

## **Analisa Kekokohan Tanggapan Tegangan Sistem Eksitasi Generator Terhadap Perubahan Parameterkonstanta Penguatan Generator dengan Berbagai Pengendali**

**Heru Dibyo Laksono<sup>1</sup>, Doohan Haliman<sup>2</sup>, Aidil Danas<sup>3</sup>, Wayu Diafridho A<sup>4</sup>**

<sup>1,2</sup>Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Eka Sakti

<sup>4</sup>PT. PLN (Persero) Area Padang Sidempuan Sumatera Utara

Email : heru\_dl@ft.unand.ac.id

(Received: 31 Agustus 2015; Revised: 17 Februari 2016; Accepted: 4 Februari 2016)

### **ABSTRAK**

Jurnal ini membahas tentang analisa kokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan parameter konstanta penguatan generator dengan berbagai pengendali. Kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator merupakan kemampuan dari sistem eksitasi generator untuk meredam derau pada frekuensi tinggi, mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu dan mampu menghilangkan gangguan pada saat beroperasi. Pada analisa kokohan ini juga akan diamati tingkat kokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan parameter dari komponen – komponen sistem eksitasi. Adapun perubahan parameter yang diamati adalah perubahan konstanta penguatan generator terhadap tanggapan tegangan sistem eksitasi. Analisa kokohan dilakukan dengan menggunakan nilai kriteria puncak maksimum. Nilai kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai kriteria puncak maksimum sensitivitas dan nilai kriteria puncak maksimum sensitivitas komplementer. Adapun jenis – jenis pengendali yang digunakan 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). Hasil yang diperoleh bahwa tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan 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 (PIDF) bersifat kokoh terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu. Selain itu tanggapan tegangan sistem eksitasi dengan generator dengan berbagai pengendali ini juga bersifat kokoh terhadap perubahan parameter konstanta penguatan generator.

**Kata kunci** : kokohan, konstanta penguatan generator, puncak maksimum sensitivitas, puncak maksimum sensitivitas komplementer, sistem eksitasi

### **ABSTRACT**

*This journal discusses the voltage response robustness analysis of generator excitation system to the parameters changes in the constant of generator reinforcement with various controllers. The voltage response robustness of generator excitation system is the ability of generator excitation system to muffle noise at high frequency, has rapid response to specific input and is able to eliminate disturbance during operation. In the robustness analysis will be observed the voltage response robustness level of generator excitation system to the parameters changes of excitation system components. The parameters changes observed are the changes of generator reinforcement constant to the voltage response of excitation system. Robustness analysis is done by using the criteria of the maximum peak value. The criteria of maximum peak value is divided into two specifically the criteria of the sensitivity maximum peak value and the criteria of the complementary sensitivity maximum peak value. 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). The results showed that the voltage response of generator excitation system with 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) is robust to disturbance, able to reduce noise at high frequencies and having rapid response to specific input. Moreover the voltage response of generator excitation system with various controllers are also robust to the parameters changes in the constant of generator reinforcement.*

**Keywords:** *complementary sensitivity maximum peak, constant of generator reinforcement, excitation system, robustness, sensitivity maximum peak*

---

**Corresponding Author:**

Heru Dibyo Laksono  
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik,  
Universitas Andalas  
Email : heru\_dl@ft.unand.ac.id

---

## Pendahuluan

Sistem pasokan listrik arus searah sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet, sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus eksitasinya. Hal ini dikenal sebagai sistem eksitasi Graham, R [1]. Kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator merupakan kemampuan dari sistem eksitasi generator untuk meredam derau pada frekuensi tinggi, mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu dan mampu menghilangkan gangguan pada saat beroperasi Skogestad, S. dan Postlethwaite [9]. Pada analisa kekokohan ini akan diamati tingkat kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan parameter dari komponen – komponen sistem eksitasi. Adapun perubahan parameter yang diamati adalah perubahan konstanta penguatan generator terhadap tanggapan tegangan sistem eksitasi. Untuk perubahan parameter komponen sistem eksitasi yang lain tidak dilakukan.

Beberapa penelitian yang sudah dilakukan diantaranya Laksono, H. D. dan Revan , M [3]. Pada jurnal ini dibahas pemodelan dan analisa sistem eksitasi generator. Model sistem eksitasi yang dibahas meliputi 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. Hasil analisa memperlihatkan bahwa sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan *Rate Output Feedback* memiliki 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. Laksono, H. D. dan Revan , M [3] pembahasan pada jurnal ini meliputi perancangan dan analisa kendali sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan PIDTool model paralel. Hasil analisa memperlihatkan bahwa sistem kendali eksitasi generator tipe arus searah dengan pengendali Proporsional Diferensial dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) memiliki kekokohan yang lebih baik dibandingkan dengan pengendali – pengendali yang lain. Laksono, H. D. dan Yulianto , N. F [7] membahas evaluasi kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma Bass – Gura. Adapun informasi yang diperoleh, bahwa kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menunjukkan kekokohan yang lebih baik dibandingkan kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi tanpa metoda penempatan kutub. Laksono, H. D. dan Yulianto , N. F. [6] membahas evaluasi kestabilan dan kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan kutub menggunakan algoritma Ackerman dan diperoleh informasi bahwa kestabilan dan kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator menunjukkan performansi kestabilan dan kekokohan yang lebih baik dibandingkan performansi kestabilan dan kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi tanpa metoda penempatan kutub. Laksono, H. D. dan Rezki, S. O. [5], pada jurnal ini membahas tentang analisa tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan metoda H-. Informasi

yang diperoleh bahwa tanggapan tegangan sistem eksitasi mempunyai performansi, kestabilan dan kekokohan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem eksitasi tanpa metoda H-. Karnoto, Facta, M. *et al* [2], membahas analisa peralihan sistem kendali eksitasi generator konvensional dan non konvensional. Berdasarkan hasil dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan terlihat bahwa belum adanya analisa kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan parameter terutama perubahan parameter konstanta penguatan generator. Untuk itu dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Matlab dilakukan analisa kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan parameter khususnya perubahan konstanta penguatan generator.

Penelitian – penelitian yang dibahas pada bagian sebelumnya ini pada umumnya dilakukan dengan menggunakan nilai parameter – parameter yang tetap tanpa adanya perubahan parameter dari setiap komponen-komponennya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan satu nilai tertentu pada komponen – komponen sistem eksitasi generator, tanggapan tegangan sistem eksitasi generator mempunyai kekokohan yang baik sedangkan untuk perubahan parameter dari komponen – komponen sistem eksitasi generator terhadap kekokohan tidak memperlihatkan hasil yang begitu memuaskan. Untuk itu dilakukan analisa kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan perubahan parameter pada komponen – komponen tanpa dan dengan menggunakan berbagai pengendali. Adapun jenis pengendali yang digunakan 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 kekokohan dilakukan dengan menggunakan nilai kriteria puncak maksimum. Nilai kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai kriteria puncak sensitivitas dan nilai kriteria puncak sensitivitas komplementer.

Selain itu dengan penelitian ini diharapkan nantinya diperoleh informasi kekokohan

tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan parameter konstanta penguatan generator. Agar tercapai hasil penelitian yang diinginkan maka penelitian ini dibatasi sebagai berikut

1. Model sistem eksitasi generator bersifat linier, tak berubah terhadap waktu dan kontinu.
2. Sistem eksitasi generator bersifat satu masukan dan satu keluaran
3. Analisa dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab

### Metoda Penelitian

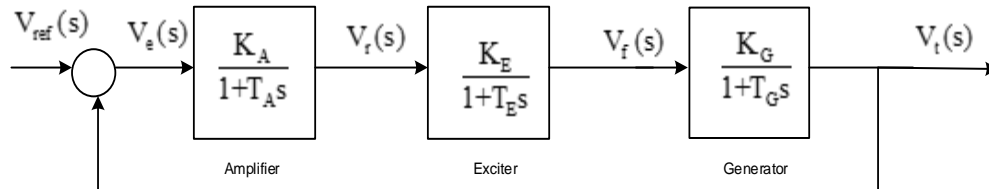
Pada bagian ini dijelaskan tentang diagram blok dari sistem eksitasi generator tipe arus searah umpan balik satu tanpa dan dengan pengendali, data – data parameter dari sistem eksitasi generator tipe arus searah umpan balik satu, fungsi alih lingkaran terbuka tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tipe arus searah, fungsi alih lingkaran tertutup tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tipe arus searah, fungsi alih pengendali Proporsional (P), fungsi alih pengendali Proporsional Integral (PI), fungsi alih pengendali Proporsional Diferensial (PD), fungsi alih pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID), fungsi alih pengendali Proporsional Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PDF) dan fungsi alih pengendali Proporsional Integral Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PIDF). Untuk analisa kekokohan dilakukan dengan menggunakan nilai kriteria puncak maksimum. Nilai kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai kriteria puncak maksimum sensitivitas dan nilai kriteria puncak maksimum sensitivitas komplementer. Pembahasan akan diakhiri dengan prosedur analisa kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan parameter konstanta penguatan generator dengan berbagai pengendali

Diagram blok dari sistem eksitasi generator tipe arus searah umpan balik satu tanpa dan dengan pengendali diperlihatkan pada Gambar 1. dan Gambar 2. Untuk data – data parameter dari sistem eksitasi generator tipe arus searah umpan balik satu diperlihatkan pada Tabel 1. dan Tabel 2. Berikut Saadat, H [8].

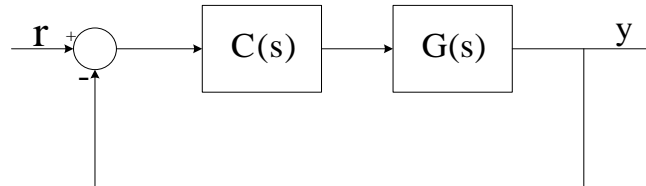
Tabel 1. Nilai Parameter Sistem Eksitasi Generator

Parameter	Nilai	Minimum	Maksimum
$K_A$	20.0000	10.0000	400.0000
$T_A$	0.0600	0.0200	0.1000

Parameter	Nilai	Minimum	Maksimum
$K_E$	1.0000	-----	-----
$T_E$	0.2000	-----	-----
$K_G$	0.8000	0.7000	1.0000
$T_G$	1.5000	1.0000	2.0000



Gambar 1. Diagram Blok Model Sistem Eksitasi Generator Tanpa Pengendali (Saadat, H [8])



Gambar 2. Diagram Blok Model Sistem Eksitasi Generator Dengan Pengendali (Saadat, H [8])

Untuk penjelasan masing – masing blok pada Gambar 1 dan Gambar 2. bisa dilihat pada Saadat, H [8]. Untuk fungsi alih lingkaran terbuka dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tipe arus searah diperlihatkan pada persamaan (1) berikut

$$G(s)H(s) = \frac{K_A K_E K_G}{(1 + T_A s)(1 + T_E s)(1 + T_G s)} \quad (1)$$

Untuk fungsi alih lingkaran terbuka dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tipe arus searah diperlihatkan pada persamaan (2) berikut

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G}{(1 + T_A s)(1 + T_E s)(1 + T_G s) + K_A K_E K_G} \quad (2)$$

Dengan mensubstitusi nilai – nilai pada Tabel 1. ke persamaan (1) dan (2) diperoleh persamaan (3) dan persamaan (4) berikut

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{16.0000}{0.0180s^3 + 0.4020s^2 + 1.7600s + 1.0000} \quad (3)$$

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{16.0000}{0.0180s^3 + 0.4020s^2 + 1.7600s + 17.0000} \quad (4)$$

Untuk pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) yang digunakan adalah pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) model standard yang dinyatakan dalam bentuk persamaan (5) [10] berikut

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{N} \right) \quad (5)$$

dimana  $K_p$  adalah konstanta proporsional dimana nilainya real,  $T_i$  adalah konstanta waktu integral dimana nilainya real dan besar atau sama dengan nol,  $T_d$  dimana konstanta waktu diferensial dimana nilainya real dan besar atau sama dengan nol dan  $N$  adalah konstanta waktu diferensial untuk filter orde satu dimana nilainya real dan besar atau sama dengan nol. Berdasarkan persamaan (5) dapat diturunkan fungsi alih tipe – tipe pengendali yang lain diantaranya fungsi pengendali Proporsional (P) yang dinyatakan dengan persamaan (6) berikut

$$C(s) = K_p \quad (6)$$

Fungsi alih pengendali Proporsional Integral (PI) yang dinyatakan dengan persamaan (7) berikut

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (7)$$

Fungsi alih pengendali Proporsional Diferensial (PD) yang dinyatakan dengan persamaan (8) berikut

$$C(s) = K_p (1 + T_d s) \quad (8)$$

Fungsi alih pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) yang dinyatakan dengan persamaan (9) berikut

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (9)$$

Fungsi alih pengendali Proporsional Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PDF) yang dinyatakan dengan persamaan (10) berikut

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right) \quad (10)$$

Fungsi alih pengendali Proporsional Integral Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PIDF) yang dinyatakan dengan persamaan (11) berikut

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right) \quad (11)$$

Untuk analisa kekokohan dilakukan dengan menggunakan kriteria nilai puncak maksimum. Kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer. Untuk nilai puncak maksimum sensitivitas ( $M_s$ ) dihitung dengan persamaan (12) berikut

$$M_s = \max_{\omega} |S(j\omega)| \quad (12)$$

Untuk nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer ( $M_T$ ) ini dihitung dengan persamaan (13) berikut

$$M_T = \max_{\omega} |T(j\omega)| \quad (13)$$

dimana  $S(s)$  adalah fungsi alih sensitivitas dan  $T(s)$  adalah fungsi alih sensitivitas komplementer. Untuk fungsi alih sensitivitas dinyatakan dengan persamaan (14) berikut

$$S(s) = \frac{1}{1 + L(s)} \quad (14)$$

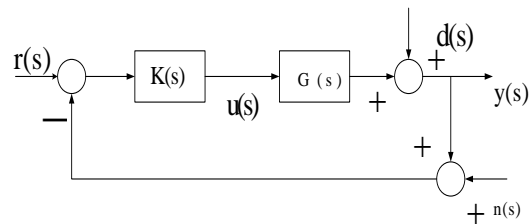
Fungsi alih sensitivitas komplementer dinyatakan dengan persamaan (15) berikut

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)} = 1 - S(s) \quad (15)$$

dimana

$$L(s) = G(s)K(s) \quad (16)$$

Persamaan (14), (15) dan (16) diperoleh dari diagram blok pada Gambar 3. berikut



Gambar 3. Diagram Blok Sistem Umpan Balik Multivariabel [9].

Untuk sistem yang bersifat kokoh, nilai puncak maksimum sensitivitas kurang dari 2 (6 dB) dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer kurang dari 1.25 (2 dB) [9]. Jika nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer bertambah besar maka performansi sistem dalam domain frekuensi dan kekokohan sistem akan semakin jelek.

Untuk kriteria perancangan pengendali untuk sistem eksitasi generator tipe arus searah sebagai berikut

1. Nilai puncak maksimum sensitivitas kurang dari 2 (6 dB) dan
2. Nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer kurang dari 1.25 (2 dB).

Penelitian ini dilakukan dengan prosedur dengan diawali dengan pemodelan matematis sistem eksitasi generator. Pemodelan matematis sistem eksitasi generator yang dibahas meliputi pemodelan amplifier, pemodelan eksiter dan pemodelan generator. Tipe sistem eksitasi generator yang digunakan adalah sistem eksitasi generator tipe arus searah dengan umpan balik satu dengan bentuk diagram blok yang diperlihatkan pada Gambar 1. Hasil dari pemodelan ini diperolehnya persamaan linear diferensial yang merepresentasikan perilaku dinamik dari model amplifier, model eksiter dan model generator. Selanjutnya dengan melakukan transformasi Laplace pada persamaan linear diferensial pada masing – masing model maka diperoleh fungsi alih dari model amplifier, fungsi alih dari model eksiter dan fungsi alih dari model generator.

Fungsi alih dari model amplifier, model eksiter dan model generator ini kemudian digabungkan dan diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem eksitasi generator. Untuk fungsi alih lingkaran terbuka diperlihatkan pada persamaan (1) dan untuk fungsi alih lingkaran tertutup diperlihatkan pada persamaan (2). Adapun keluaran dari kedua fungsi alih tersebut adalah tegangan terminal sedangkan masukannya adalah

tegangan referensi. Nilai – nilai parameter dari sistem eksitasi generator pada Tabel 1. kemudian disubstitusikan ke persamaan (1) dan (2) serta diperoleh persamaan (3) dan (4). Selanjutnya dilakukan analisa kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan parameter. Adapun perubahan parameter generator yang dilakukan adalah konstanta penguatan generator ( $K_G$ ). Analisa kekokohan dilakukan dengan menggunakan persamaan (3) dan dengan menggunakan kriteria nilai puncak maksimum. Kriteria puncak maksimum ini terbagi atas 2 bahagian yaitu nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer.

Selanjutnya dilakukan perancangan pengendali untuk sistem eksitasi generator arus searah. Perancangan pengendali dilakukan dengan bantuan PIDTool Matlab Model Standard dan dengan menggunakan persamaan (3). 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 (PIDF). Hasil dari perancangan pengendali ini diperolehnya fungsi alih masing – masing pengendali. Fungsi alih pengendali ini disimbolkan dengan  $C(s)$ . Selanjutnya dengan berpedoman diagram blok pada Gambar 2. maka diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka dan fungsi alih lingkaran tertutup tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali. Selanjutnya dilakukan analisa kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan parameter generator dengan pengendali. Analisa kekokohan yang dilakukan sama dengan analisa kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tanpa pengendali. Berdasarkan hasil dari analisa kekokohan ini diperoleh informasi pengendali yang bersifat kokoh terhadap perubahan parameter generator.

### Hasil dan Pembahasan

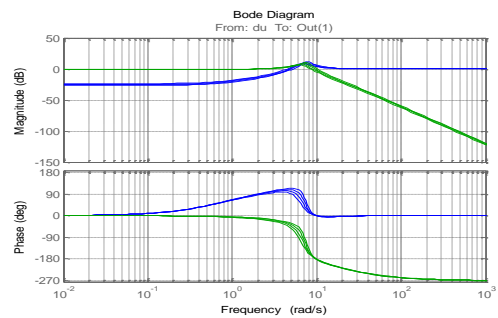
Pada bagian ini akan diperlihatkan hasil simulasi kekokohan tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tanpa dan dengan pengendali terhadap perubahan parameter generator. Adapun perubahan parameter generator yang dilakukan perubahan konstanta penguatan generator. Untuk hasil simulasi tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tanpa pengendali terhadap perubahan

konstanta penguatan generator diperoleh nilai puncak maksimum yang diperlihatkan pada Tabel 2. berikut

Tabel 2. Nilai Puncak Maksimum

$K_G$	$M_s$	$M_T$
0.7000	2.5762	2.1092
0.8000	2.9367	2.4776
0.9000	3.3648	2.9130
1.0000	3.8834	3.4381

Grafik tanggapan fungsi sensitivitas dan fungsi sensitivitas komplementer dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tanpa pengendali terhadap perubahan konstanta penguatan generator yang diperlihatkan pada Gambar 4. berikut



Gambar 4. Tanggapan Fungsi Sensitivitas dan Sensitivitas Komplementer

Untuk pengendali Proporsional (P) diperlihatkan dengan persamaan berikut

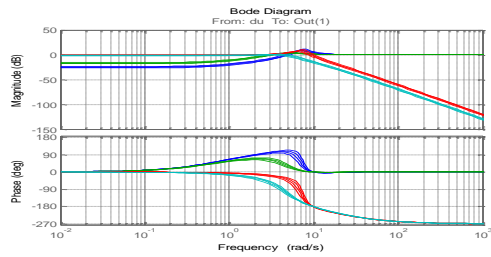
$$C(s) = 0.3539 (7)$$

Untuk hasil simulasi tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional (P) terhadap perubahan konstanta penguatan generator diperoleh nilai puncak maksimum yang diperlihatkan pada Tabel 3. berikut

Tabel 3. Nilai Puncak Maksimum

$K_G$	$M_s$	$M_T$
0.7000	1.4466	0.92997
0.8000	1.5159	1.0032
0.9000	1.5874	1.0792
1.0000	1.6614	1.1576

Grafik tanggapan fungsi sensitivitas dan fungsi sensitivitas komplementer dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional (P) terhadap perubahan konstanta penguatan generator yang diperlihatkan pada Gambar 5. berikut



Gambar 5. Tanggapan Fungsi Sensitivitas dan Sensitivitas Komplementer

Untuk pengendali Proporsional Diferensial (PD) diperlihatkan dengan persamaan berikut

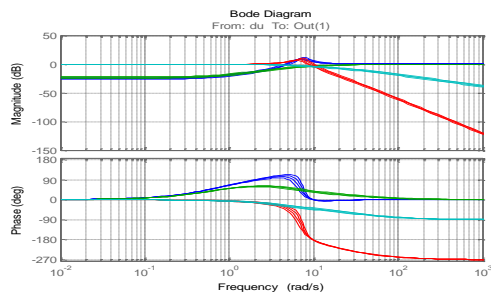
$$C(s) = 0.9040(1 + 0.1260s) \quad (8)$$

Untuk hasil simulasi tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Diferensial (PD) terhadap perubahan konstanta penguatan generator diperoleh nilai puncak maksimum yang diperlihatkan pada Tabel 4. berikut

Tabel 4. Nilai Puncak Maksimum

$K_G$	$M_s$	$M_T$
0.7000	1.2831	1.0008
0.8000	1.3115	1.0334
0.9000	1.3386	1.0636
1.0000	1.3649	1.0921

Grafik tanggapan fungsi sensitivitas dan fungsi sensitivitas komplementer dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Diferensial (PD) terhadap perubahan konstanta penguatan generator yang diperlihatkan pada Gambar 6. berikut



Gambar 6. Tanggapan Fungsi Sensitivitas dan Sensitivitas Komplementer

Untuk pengendali Proporsional Integral (PI) diperlihatkan dengan persamaan berikut

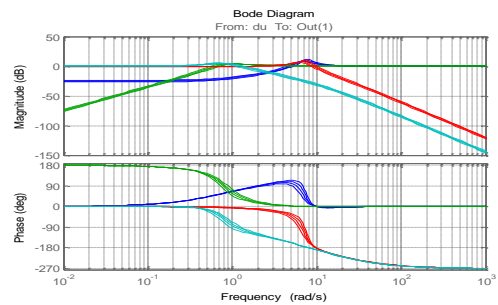
$$C(s) = 0.2536 \left( 1 + \frac{1}{1.4119s} \right) \quad (9)$$

Untuk hasil simulasi tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral (PI) terhadap perubahan konstanta penguatan generator diperoleh nilai puncak maksimum yang diperlihatkan pada Tabel 5. berikut

Tabel 5. Nilai Puncak Maksimum

$K_G$	$M_s$	$M_T$
0.7000	1.4359	1.0465
0.8000	1.4977	1.0893
0.9000	1.5607	1.1408
1.0000	1.6251	1.6251

Grafik tanggapan fungsi sensitivitas dan fungsi sensitivitas komplementer dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral (PI) terhadap perubahan konstanta penguatan generator yang diperlihatkan pada Gambar 7. berikut



Gambar 7. Tanggapan Fungsi Sensitivitas dan Sensitivitas Komplementer

Untuk pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) diperlihatkan dengan persamaan berikut

$$C(s) = 1.2285 \left( 1 + \frac{1}{1.0236s} + 0.1980s \right) \quad (10)$$

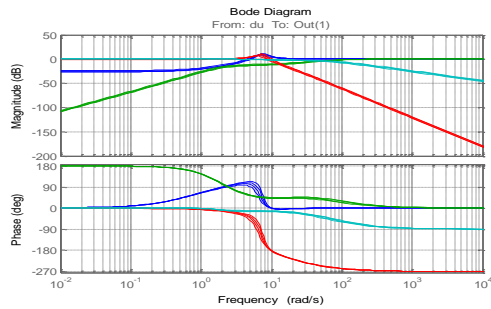
Untuk hasil simulasi tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) terhadap perubahan konstanta penguatan generator diperoleh nilai puncak maksimum yang diperlihatkan pada Tabel 6. berikut

Tabel 6. Nilai Puncak Maksimum

$K_G$	$M_s$	$M_T$
0.7000	1.3187	1.0354
0.8000	1.3548	1.0329
0.9000	1.3898	1.0568
1.0000	1.4236	1.0919

Grafik tanggapan fungsi sensitivitas dan fungsi sensitivitas komplementer dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) terhadap perubahan konstanta penguatan generator yang diperlihatkan pada Gambar 12. berikut





Gambar 8. Tanggapan Fungsi Sensitivitas dan Sensitivitas Komplementer

Untuk pengendali Proporsional Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PDF) diperlihatkan dengan persamaan berikut

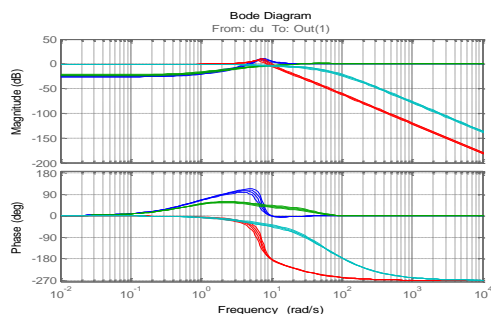
$$C(s) = 0.8490 \left( 1 + \frac{0.1350s}{\frac{0.1350}{13.3000}s + 1} \right) \quad (11)$$

Untuk hasil simulasi tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PDF) terhadap perubahan konstanta penguatan generator diperoleh nilai puncak maksimum yang diperlihatkan pada Tabel 7. berikut

Tabel 7. Nilai Puncak Maksimum

$K_G$	$M_s$	$M_T$
0.7000	1.3253	0.9846
0.8000	1.3651	1.0207
0.9000	1.4045	1.0563
1.0000	1.4437	1.0920

Grafik tanggapan fungsi sensitivitas dan fungsi sensitivitas komplementer dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan Proporsional Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PDF) terhadap perubahan konstanta penguatan generator yang diperlihatkan pada Gambar 9. berikut



Gambar 9. Tanggapan Fungsi Sensitivitas dan Sensitivitas Komplementer

Untuk pengendali Proporsional Integral Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PIDF) diperlihatkan dengan persamaan berikut

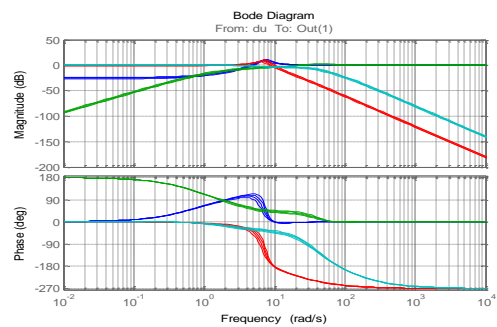
$$C(s) = 0.8455 \left( 1 + \frac{1}{1.6697s} + \frac{0.1487s}{\frac{0.1487}{10.8875}s + 1} \right) \quad (12)$$

Untuk hasil simulasi tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PIDF) terhadap perubahan konstanta penguatan generator diperoleh nilai puncak maksimum yang diperlihatkan pada tabel 8 berikut.

Tabel 8. Nilai Puncak Maksimum

$K_G$	$M_s$	$M_T$
0.7000	1.3475	1.0202
0.8000	1.3928	1.0441
0.9000	1.4382	1.0737
1.0000	1.4839	1.1079

Grafik tanggapan fungsi sensitivitas dan fungsi sensitivitas komplementer dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan Proporsional Integral Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PIDF) terhadap perubahan konstanta penguatan generator yang diperlihatkan pada Gambar 10. Berikut



Gambar 10. Tanggapan Fungsi Sensitivitas dan Sensitivitas Komplementer

Hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 2. memperlihatkan bahwa tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tanpa pengendali terhadap perubahan konstanta penguatan generator bersifat tidak kokoh terhadap gangguan, tidak mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempuyai tanggapan yang lambat terhadap masukan tertentu. Hal ini dibuktikan dengan nilai sensitivitas dan nilai sensitivitas komplementer dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator terhadap perubahan konstanta penguatan generator



semakin lama semakin besar. Agar tanggapan tegangan sistem eksitasi generator tanpa pengendali ini bersifat kokoh terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu. Maka nilai puncak maksimum sensitivitas kurang dari 2 dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer kurang dari 1.25.

Untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan 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 (PIDF) terhadap perubahan konstanta penguatan generator bersifat kokoh terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu. Hal ini dibuktikan dengan nilai sensitivitas dan nilai sensitivitas komplementer dari tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan semua pengendali terhadap perubahan konstanta penguatan generator semakin lama semakin besar tetapi masih dalam batasan nilai yang yang diizinkan. Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 3, tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional (P) mempunyai nilai sensitivitas terkecil sebesar 1.4466 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000 dan nilai sensitivitas terbesar dengan nilai 1.6614 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas komplementer terkecil sebesar 0.92997 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000, dan nilai sensitivitas terbesar sebesar 1.1576 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000.

Untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Diferensial (PD) mempunyai nilai sensitivitas terkecil sebesar 1.2831 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000 dan nilai sensitivitas terbesar dengan nilai 1.3649 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas komplementer terkecil sebesar 1.0008 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000, dan nilai sensitivitas terbesar sebesar 1.0921 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas dan nilai sensitivitas komplementer selengkapnya untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Diferensial (PD) diperlihatkan pada Tabel 4.

Untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral (PI) mempunyai nilai sensitivitas terkecil sebesar 1.4359 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000 dan nilai sensitivitas terbesar dengan nilai 1.6251 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas komplementer terkecil sebesar 1.0465 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000, dan nilai sensitivitas terbesar sebesar 1.6251 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas dan nilai sensitivitas komplementer selengkapnya untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral (PI) diperlihatkan pada Tabel 5.

Untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) mempunyai nilai sensitivitas terkecil sebesar 1.3187 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000 dan nilai sensitivitas terbesar dengan nilai 1.4236 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas komplementer terkecil sebesar 1.0354 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000, dan nilai sensitivitas terbesar sebesar 1.0919 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas dan nilai sensitivitas komplementer selengkapnya untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) diperlihatkan pada Tabel 6.

Untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PDF) mempunyai nilai sensitivitas terkecil sebesar 1.3253 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000 dan nilai sensitivitas terbesar dengan nilai 1.4437 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas komplementer terkecil sebesar 0.9846 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000, dan nilai sensitivitas terbesar sebesar 1.0920 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas dan nilai sensitivitas komplementer selengkapnya untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PDF) diperlihatkan pada Tabel 7.

Untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PIDF) mempunyai nilai sensitivitas terkecil sebesar 1.3475 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000

dan nilai sensitivitas terbesar dengan nilai 1.4839 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas komplementer terkecil sebesar 1.0202 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 0.7000. dan nilai sensitivitas terbesar sebesar 1.1079 pada nilai konstanta penguatan generator sebesar 1.0000. Untuk nilai sensitivitas dan nilai sensitivitas komplementer selengkapnya untuk tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian diferensial (PIDF) diperlihatkan pada Tabel 8.

### Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari pembahasan diatas adalah bahwa tanggapan tegangan sistem eksitasi generator dengan semua pengendali dalam hal ini 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 (PIDF) bersifat kokoh terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu. Selain itu tanggapan tegangan sistem eksitasi dengan generator dengan berbagai pengendali ini juga bersifat kokoh terhadap perubahan parameter terutama perubahan parameter konstanta penguatan generator.

Sebagai tindak lanjut dalam penelitian diantaranya pertama, pengaruh ketidakpastian sebaiknya dimasukkan dalam analisa tanggapan tegangan sistem eksitasi generator. Kedua, perubahan parameter yang disimulasikan sebaiknya lebih dari satu parameter dan dilakukan secara simultan. Ketiga, selain analisa kekokohan juga dilakukan analisa performansi dalam domain waktu dan frekuensi serta analisa kestabilan untuk perubahan satu atau lebih parameter secara simultan.

### 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] Graham, R., 1999. *Power System Oscillations*. Massachusetts: Kluwer Academic Publisher.
- [2] Karnoto, Facta, M. & T, A., 2000. *Perbandingan Pengaruh Sistem Eksitasi Konvensional dan Non Konvensional Terhadap Kestabilan Generator Untuk Meningkatkan Sistem Kelistrikan*. Bandung, Insitute Teknologi Bandung Hal : 120 - 128.
- [3] Laksono, H. D. & Revan, M., 2014. Perancangan dan Analisa Kendali Sistem Eksitasi Generator Tipe Arus Searah Dengan PIDTool Model Paralel. *Teknika*, 21(3) Hal : 26 - 35.
- [4] Laksono, H. D., Revan, M. & Rabiarahim, A., 2014. Pemodelan dan Analisa Sistem Eksitasi Generator. *Teknika*, 21(01) Hal : 60 - 69.
- [5] Laksono, H. D. & Rezki, S. O., 2012. Penerapan Sistem Kendali Kokoh Dengan Metoda H~ Pada Sistem Eksitasi Generator. *Amplifier*, 02(02) Hal : 23 - 30.
- [6] Laksono, H. D. & Yulianto, N. F., 2013. *Evaluasi Kestabilan dan Kekokohan Tanggapan Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma Ackerman*. Padang, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Unand Hal 1 : 10.
- [7] Laksono, H. D. & Yulianto, N. F., 2013. Evaluasi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma Bass – Gura. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 02(02) Hal : 18 - 26.
- [8] Saadat, H., 1999. *Power System Analysis*. New York: McGraw Hill.
- [9] Skogestad, S. & Postlethwaite, I., 1996. *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*. New York : McGraw Hill.
- [10] Xue, D., Chen, Y. Q. & Atherton, D. P., 2007. *Linear Feedback Control : Analysis and Design With Matlab*. Philadelphia : SIAM.