

Simulasi Pola Tingkah Laku Sistem *Automatic Voltage Regulator (AVR)* Tipe Arus Searah Dengan Metoda PIDTune Model Standard

Heru Dibyo Laksono¹, Rika Ampuh Hadiguna¹

¹Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur Sekolah Pascasarjana Universitas Andalas
E-mail : heru.dibyo@laksono@eng.unand.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) dengan metode PIDTune untuk stabilitas tegangan generator. Menggunakan pemodelan matematis, komponen seperti amplifier, eksiter, dan generator dimodelkan untuk mendapatkan fungsi transfer. Analisis peralihan dilakukan dengan parameter kinerja seperti waktu naik dan nilai lewatan. Pengontrol C(s) dirancang dengan konfigurasi standar, pre filter, Feedback, dan FeedForward, menargetkan kesalahan keadaan mantap $< 0,05$ dan waktu naik $< 0,13$ detik. Berbagai pengontrol diuji, termasuk Proporsional (P), Proporsional Integral (PI), Proporsional Diferensial (PD), Integral Diferensial Proporsional (PID), Proporsional Diferensial dengan Filter Orde Pertama (PDF), dan Proporsional Integral dengan Filter Orde Pertama (PIDF). Hasil simulasi menunjukkan pengontrol PD dan PDF memenuhi kriteria dengan konstanta proporsional 0.6280/0.6130 dan waktu diferensial 0.2720/0.2790 detik. Pengontrol PDF memiliki tambahan konstanta pembagi filter 323. Parameter kinerja seperti waktu puncak dan nilai lewatan juga dihitung. Namun, konfigurasi pre filter, feedback, dan feedforward tidak memenuhi kriteria dengan pengontrol yang ada.

Kata kunci: Automatic voltage regulator, pidtune model standard, peralihan, kesalahan, konfigurasi.

ABSTRACT

This study evaluates an Automatic Voltage Regulator (AVR) system using the PIDTune method for generator voltage stability. Employing mathematical modeling, components such as amplifiers, exciters, and generators are modeled to obtain the transfer function. A transient analysis is conducted with performance parameters like rise time and overshoot value. The controller C(s) is designed with standard configuration, pre-filter, Feedback, and FeedForward, targeting a steady-state error of < 0.05 and a rise time of < 0.13 seconds. Various controllers are tested, including Proportional (P), Proportional Integral (PI), Proportional Differential (PD), Proportional Integral Differential (PID), Proportional Differential with First Order Filter (PDF), and Proportional Integral with First Order Filter (PIDF). Simulation results indicate that the PD and PDF controllers meet the criteria with proportional constants of 0.6280/0.6130 and differential times of 0.2720/0.2790 seconds, respectively. The PDF controller includes an additional filter divisor constant of 323. Performance parameters such as peak time and overshoot value are also calculated. However, the configurations with pre-filter, feedback, and feedforward do not meet the criteria with the existing controllers.

Key Word: automatic voltage regulator, pidtune model standard, transient, error, configuration.

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan energi utama pada peralatan listrik. Saat ini tingkat penggunaan energi listrik semakin meningkat seiring dengan banyaknya teknologi yang diciptakan dengan menggunakan energi listrik yang dihasilkan oleh generator. Sektor industri dan domestik merupakan contoh pihak yang mengandalkan energi listrik. [1].

Generator adalah mesin yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik dari sumber energi mekanik [2]. Generator merupakan mesin utama pada berbagai jenis pembangkit listrik seperti uap, air, angin dan lain-lain. Arus eksitasi mengalir pada generator, yang mempengaruhi energi listrik dan tegangan keluaran yang dihasilkan [3]. Tegangan keluaran yang dihasilkan generator haruslah konstan, namun kenyataannya perubahan beban menyebabkan tegangan keluaran generator berubah [4]. Meningkatnya penggunaan energi listrik mengubah beban konsumen hal ini dapat menyebabkan kebutuhan daya reaktif menjadi kurang stabil, sehingga kerja generator pada pembangkit listrik juga menjadi tidak stabil sehingga mengakibatkan tegangan keluaran generator tidak stabil [5]. Saat mengoperasikan jaringan listrik, stabilitas tegangan merupakan hal yang penting dan salah satu ukuran kualitas jaringan listrik [6].

Ketidakstabilan tegangan keluaran generator dapat menimbulkan dampak negatif seperti rusaknya peralatan listrik, penurunan kinerja pengisian, mempengaruhi berbagai sistem proteksi sistem tenaga, dan juga dapat menyebabkan kolapsnya sistem [7]. Untuk menjamin kestabilan tegangan tetap beroperasi pada daerah titik operasi, dapat dikelola dengan peralatan yang mampu mengatur arus eksitasi generator secara otomatis agar tegangan pada terminal keluaran generator berada pada tingkat tertentu. Peralatan ini disebut sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) [8]. Untuk penulisan lebih lanjut, sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) akan disingkat menjadi sistem AVR. Sistem AVR ada dua jenis, yang diantaranya sistem AVR tipe arus searah dan tipe statis [9].

Untuk itu perlu dilakukan kajian dinamik terhadap sistem AVR pada titik operasinya dan mencoba menganalisis perilaku dinamis sistem AVR dengan menggunakan metode kendali PIDTune model standar dan konfigurasi kendali standar, Pre Filter, Feedback dan Umpan Maju. Hasil penelitian nantinya dapat digunakan sebagai informasi untuk merancang pengontrol sistem AVR menggunakan model standar PIDTune. Ada banyak metode yang dapat digunakan untuk perancangan sistem kendali antara lain metode pendekatan posisi akar, metode

respon frekuensi, metode Ziegler – Nichols [10], metode Ziegler – Nichols yang disempurnakan, metode Cohen – Coon, metode Chien – Hrones – Reswick (CHR) dan The Wang – Juan–Chan [11]. Selain itu pada penelitian ini akan dibahas simulasi terkait perancangan tahap awal sistem kendali linier untuk mengendalikan tegangan keluaran sistem AVR menggunakan metode standar model PIDTune. Syarat penggunaan cara diatas adalah model sistem AVR harus linier. Untuk memperoleh model linier, model sistem dilinierkan pada titik-titik operasi tertentu.

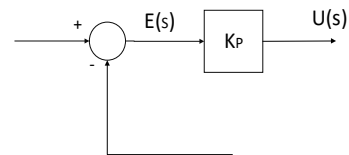
2. KERANGKA EORITIS

2.1 Elemen – Elemen Pengendali

Elemen pengendali adalah sistem yang berfungsi untuk membuat sistem bekerja lebih optimal. Komponen pengendali adalah pengendali konvensional yang umum digunakan dalam pengendalian suatu sistem. Pengendali terdiri dari tiga variasi utama kontrol yaitu Proporsional (P), Integral (I), dan Diferensial (D) [12] [13].

2.1.1. Pengendali Proporsional (P)

Pengendali ini merespons secara proporsional terhadap perbedaan antara nilai yang diinginkan dan nilai yang diukur. Untuk diagram blok pengendali Proporsional (P) diperlihatkan pada Gambar 2.1 berikut



Gambar 2.1 Diagram Blok Pengendali Proporsional (P)

Dengan menggunakan blok diagram pada Gambar 2.1 sebagai acuan maka diperoleh hubungan antara sinyal kesalahan dengan sinyal keluaran pengendali Proporsional (P) yang dinyatakan dalam bentuk persamaan (2.1) berikut

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.1)$$

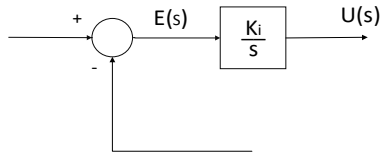
Persamaan 2.1 dilakukan transformasi Laplace akan diperoleh persamaan (2.2) dan (2.3) berikut

$$U(s) = K_p E(s) \quad (2.2)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.3)$$

2.1.2. Pengendali Integral (I)

Pengendali ini bertujuan untuk menghilangkan kesalahan keadaan yang mungkin terjadi pada pengendali proporsional. Untuk diagram blok pengendali Integral (I) diperlihatkan pada Gambar 2.2 berikut



Gambar 2.2 Diagram Blok Pengendali Integral (I)

Dengan menggunakan blok diagram pada Gambar 2.2 sebagai acuan maka diperoleh hubungan antara sinyal *error* dengan sinyal keluaran pengendali Integral (I) yang dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan (2.4) dan (2.5) berikut

$$\frac{du}{dt} = K_i e(t) \quad (2.4)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.5)$$

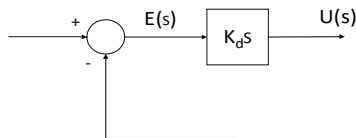
Dengan menggunakan transformasi Laplace, persamaan (2.3) berubah menjadi (2.6) dan (2.7) berikut

$$sU(s) = K_i E(s) \quad (2.6)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.7)$$

2.1.3. Pengendali Diferensial (D)

Pengendali ini bereaksi terhadap kecepatan perubahan kesalahan. Dengan memonitor laju perubahan kesalahan, pengendali derivatif dapat membantu dalam merespons cepat terhadap perubahan yang cepat dalam sistem. Untuk diagram blok pengendali Diferensial (D) diperlihatkan pada Gambar 2.3 berikut



Gambar 2.3 Diagram Blok Pengendali Diferensial (D)

Dengan menggunakan blok diagram pada Gambar 2.3 sebagai acuan maka diperoleh hubungan antara sinyal kesalahan dengan sinyal keluaran pengendali Diferensial (D) yang dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan (2.8) berikut

$$u(t) = K_d \frac{de}{dt} \quad (2.8)$$

Dengan menggunakan transformasi Laplace, persamaan (2.8) berubah menjadi (2.9) dan (2.10) berikut

$$U(s) = K_d s E(s) \quad (2.9)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (2.10)$$

2.2 PIDTune Model Standard

Bentuk umum dari PIDTune model standard dinyatakan dalam bentuk persamaan (2.11) berikut

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right) \quad (2.11)$$

Keterangan:

K_p = konstanta penguatan Proporsional

T_i = konstanta waktu integral

T_d = konstanta waktu diferensial

Untuk tipe-tipe pengendali pada PIDTune model standard beserta representasi matematisnya diperlihatkan pada Tabel 2.1 berikut

TABEL 2.1
Tipe – Tipe Pengendali pada PIDTune Model Standard

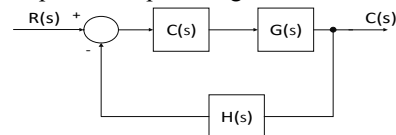
Tipe Pengendali	Representasi Matematis
Proporsional (P)	K_p
Proporsional Integral (PI)	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$
Proporsional Diferensial (PD)	$K_p (1 + T_d s)$
Proporsional Integral Diferensial (PID)	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$
Proporsional Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian Diferensial (PDF)	$K_p \left(1 + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right)$
Proporsional Integral Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian Diferensial (PIDF)	$K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right)$

2.3 Konfigurasi Sistem Kendali

Ada 4 jenis konfigurasi yang akan dijabarkan diantaranya konfigurasi standard, konfigurasi pre filter, konfigurasi feedback dan konfigurasi feedforward.

2.3.1. Konfigurasi Standard

Diagram blok sistem kendali dengan konfigurasi standard dapat dilihat pada diagram 2.4 berikut



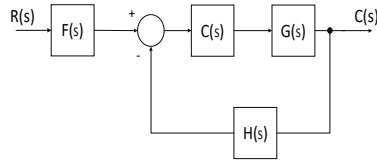
Gambar 2.4 Diagram Blok Dengan Konfigurasi Standard

Adapun fitur – fitur yang dimiliki oleh konfigurasi standard sebagai berikut

- Umpan balik Tunggal
- Pengendali (C) dan Plant (G) di satu jalur utama dan sensor (H) sebagai umpan balik

2.3.2. Konfigurasi Pre Filter

Diagram blok sistem kendali dengan konfigurasi Pre Filter diperlihatkan pada Gambar 2.5 berikut



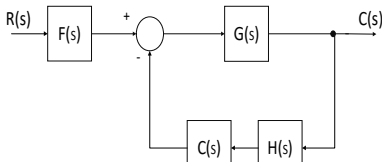
Gambar 2.5 Diagram Blok Dengan Konfigurasi Pre Filter

Adapun fitur – fitur yang dimiliki oleh konfigurasi standard sebagai berikut

- Pre Filter
- Umpan balik Tunggal
- Pengendali (C) dan Plant (G) di satu jalur utama dan sensor (H) sebagai umpan balik

2.3.3. Konfigurasi Feedback

Diagram blok sistem kendali dengan konfigurasi Feedback diperlihatkan pada Gambar 2.6 berikut



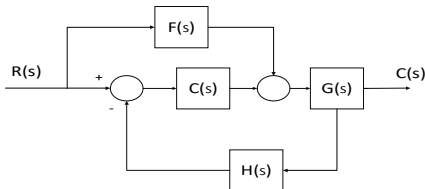
Gambar 2.6 Diagram Blok Dengan Konfigurasi Feedback

Adapun fitur – fitur yang dimiliki oleh konfigurasi Feedback sebagai berikut

- Pre Filter
- Umpan balik tunggal
- Pengendali (C) dan sensor (H) sebagai umpan balik
- Pengendali (C) dan Plant (G) di satu jalur utama dan sensor (H) sebagai umpan balik

2.3.4. Konfigurasi Feedforward

Diagram blok sistem kendali dengan konfigurasi FeedForward diperlihatkan pada Gambar 2.7 berikut



Gambar 2.7 Diagram Blok Dengan Konfigurasi Feedforward

Adapun fitur – fitur yang dimiliki oleh konfigurasi Feedback sebagai berikut

- Umpan maju Pre Filter digunakan untuk redaman gangguan pada masukan.
- Pengendali (C) dan Plant (G) di satu jalur utama
- Sensor (H) sebagai umpan balik

2.4 Analisa Sistem Kendali

Analisa sistem kendali yang akan dijabarkan adalah analisa peralihan.

2.4.1. Analisa Peralihan

Pada analisa peralihan difokuskan pada beberapa parameter yang diamati, diantaranya lewatan maksimum, waktu keadaan mantap, nilai puncak waktu puncak, dan waktu naik,.

a. Waktu Naik (t_r)

Waktu naik adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk naik dari 10% menjadi 90%, 5% menjadi 95%, atau 0 hingga 100% dari harga akhirnya. Untuk sistem orde kedua dengan redaman lebih kecil biasanya digunakan waktu naik 0 hingga 100% dan untuk sistem redaman lebih besar biasanya digunakan waktu naik 10% hingga 90%. Perhitungan waktu naik dihitung menggunakan persamaan berikut [14]

$$t_r = \frac{1.00 + 1.10\zeta + 1.40\zeta^2}{\omega_n} \quad (2.12)$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \tan^{-1} \left(-\frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\zeta} \right) \quad (2.13)$$

b. Waktu Puncak (t_p)

Waktu puncak adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lintasan pertama kali. Waktu puncak ini dihitung menggunakan persamaan (2.14) berikut

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.14)$$

c. Waktu Keadaan Mantap (t_s)

Merupakan waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai dan tetap berada pada daerah sekitar nilai akhir yang besarnya ditentukan oleh persentase absolut nilai akhir, biasanya 5%, 2% atau 0,50% dengan rasio redaman berkisar antara 0,00 hingga 0,90. Untuk kriteria kurang dari 2%, waktu keadaan tunak dihitung menggunakan persamaan berikut [15]

1) Kriteria $\pm 2\%$

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (2.15)$$

2) Kriteria $\pm 5\%$

$$t_s \approx \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (2.16)$$

3) Kriteria $\pm 0.5\%$

$$t_s \approx \frac{5}{\zeta\omega_n} \quad (2.17)$$

d. Lewatan maksimum (M_p)

Lewatan maksimum adalah nilai puncak maksimum dari kurva respons yang diukur dari satu. Jika nilai tunak respon tidak sama dengan satu maka digunakan persentase lewatan maksimum yang dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (2.18)$$

Lewatan maksimum juga dapat dihitung dalam bentuk persentase dengan persamaan 2.19 berikut

$$M_p = 100e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (2.19)$$

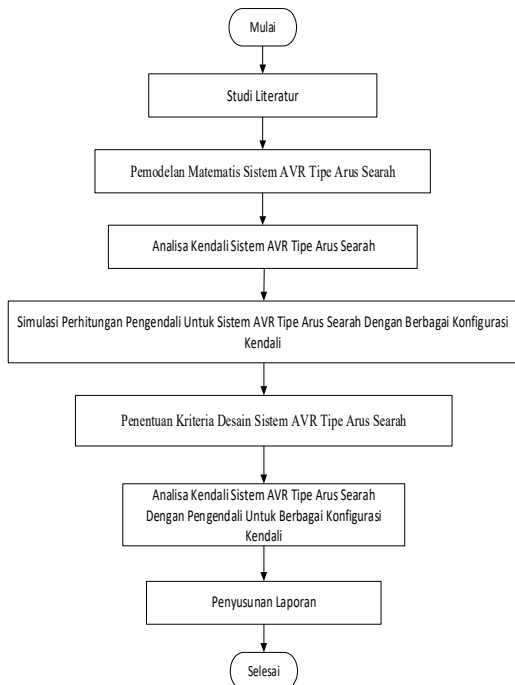
Sistem dengan kinerja yang baik memiliki waktu naik, waktu puncak, dan waktu keadaan tunak yang lebih kecil, serta nilai jalan lewatan maksimum sebesar 20% atau lebih kecil.

3. METODE RISET

Pada bagian ini akan menjelaskan diagram alir dan langkah – langkah penelitian.

3.1. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.8 berikut



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Langkah – Langkah Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian ini adalah

- Langkah pertama yang dilakukan pada penelitian ini yaitu dengan melakukan pemodelan matematis setiap komponen sistem AVR dengan tipe arus searah. Komponen sistem AVR dengan tipe arus searah ini terdiri dari amplifier, eksiter, dan generator. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan persamaan linier diferensial dan transformasi Laplace.
- Hasil pemodelan ini diperoleh persamaan fungsi transfer lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup pada sistem AVR tipe arus searah. Dengan menggunakan

persamaan fungsi transfer lingkaran tertutup, dilakukan perhitungan peralihan. Parameter yang dihitung pada analisis peralihan ini meliputi waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan tunak, nilai puncak, nilai lewatan maksimum, dan nilai lewatan minimum.

- Setelah dilakukan analisa peralihan pada sistem AVR tipe arus searah, maka dilakukan perancangan pengontrol C(s) untuk sistem AVR tipe arus searah dengan konfigurasi standar, konfigurasi pre filter, konfigurasi Feedback dan konfigurasi FeedForward.
- Berdasarkan hasil analisis peralihan yang telah dilakukan, ditentukan kriteria perancangan agar sistem AVR tipe saat ini mempunyai kinerja yang lebih baik dengan nilai kesalahan keadaan mantap kurang dari 0,05, waktu naik kurang dari 0,13 detik, waktu puncak kurang dari 0,05, kurang dari 0,30 detik, waktu keadaan tunak kurang dari 5,00 detik, puncak kurang dari 1,20, lewatan maksimum kurang dari 20,00 %, lewatan minimum sama dengan 0 %.
- Setelah menentukan kriteria, dilakukan analisa peralihan sistem AVR tipe arus searah dengan pengendali untuk konfigurasi standar, konfigurasi pre filter, konfigurasi Feedback dan konfigurasi FeedForward. Pengendali yang digunakan adalah Pengendali Proporsional (P), Pengendali Proporsional Integral (PI), Pengendali Proporsional Diferensial (PD), Pengendali Integral Diferensial Proporsional (PID), Pengendali Proporsional Diferensial dengan Filter Orde Pertama pada Bagian Diferensial (PDF) dan Pengendali Proporsional Integral dengan Filter Orde Pertama pada Bagian Diferensial (PIDF). Analisis yang dilakukan adalah analisis peralihan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dijelaskan hasil respon peralihan sistem AVR tipe arus searah tanpa pengendali dan dengan pengendali untuk konfigurasi standar, konfigurasi pre filter, konfigurasi Feedback, dan konfigurasi FeedForward.

4.1. Tanpa Pengendali

Perhitungan nilai parameter peralihan untuk sistem AVR tipe arus searah tanpa pengendali ditunjukkan pada Tabel 4.1 dibawah ini

TABEL 4.1
Nilai Parameter Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah
Tanpa Pengendali

Parameter	Tanpa Pengendali
Waktu Naik (detik)	0.1465
Waktu Puncak (detik)	0.4561
Waktu Keadaan Mantap (detik)	42.2070
Nilai Puncak	1.8555
Nilai Lewatan Maksimum (%)	91.3450
Nilai Lewatan Minimum (%)	0.00

4.2. Tanggapan Peralihan Konfigurasi Standard Dengan Pengendali

4.2.1. Dengan Pengendali P, PI, dan PD

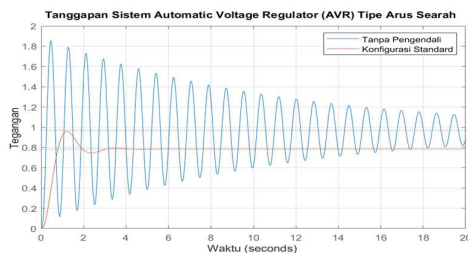
Parameter peralihan sistem AVR tipe arus searah konfigurasi standard dengan pengendali P, PI dan PD hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 4.2

TABEL 4.2

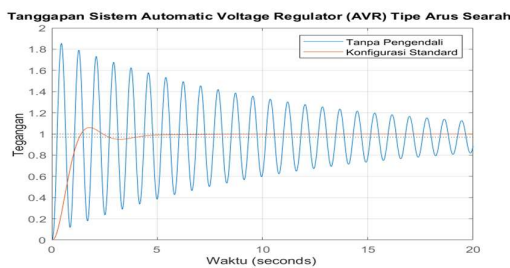
Nilai Parameter Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Standard dengan Pengendali P, PI, dan PD

Parmater	P	PI	PD
Waktu Naik (detik)	0.5090	0.8885	0.1228
Waktu Puncak (detik)	1.2086	1.8092	0.2739
Waktu Keadaan Mantap (detik)	2.8265	4.3429	0.5229
Nilai Puncak	0.9597	1.0602	1.0804
Nilai Lewatan Maksimum (%)	22.231	6.0209	13.4110
Nilai Lewatan Minimum (%)	0.00	0.00	0.00

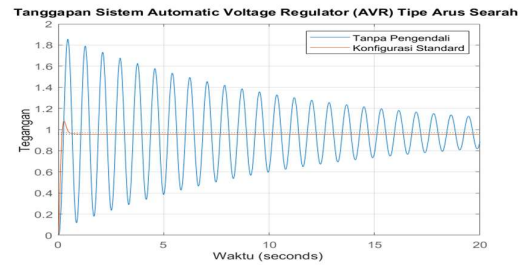
Respon peralihan konfigurasi standard diperlihatkan pada gambar untuk setiap pengendali



Gambar 4.1 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Standard Dengan Pengendali P



Gambar 4.2 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Standard Dengan Pengendali PI



Gambar 4.3 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Standard Dengan Pengendali PD

4.2.2. Dengan Pengendali PID, PDF dan, PIDF

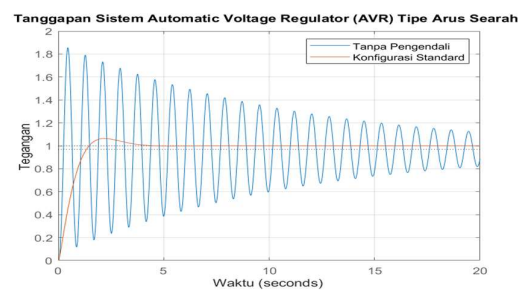
Parameter peralihan sistem AVR tipe arus searah konfigurasi standard dengan pengendali PID, PDF, dan PIDF hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 4.3

TABEL 4.3

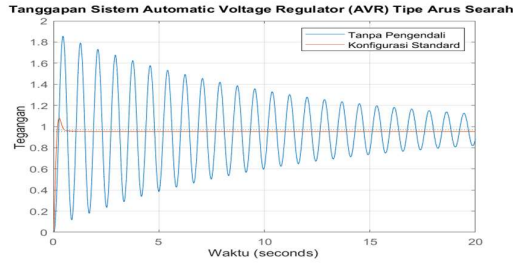
Nilai Parameter Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Standard dengan Pengendali PID, PDF, dan PIDF

Parameter	PID	PDF	PIDF
Waktu Naik (detik)	1.0036	0.1223	0.9942
Waktu Puncak (detik)	2.2035	0.2745	2.1633
Waktu Keadaan Mantap (detik)	3.4735	0.5152	3.4471
Nilai Puncak	1.0631	1.0779	1.0637
Nilai Lewatan Maksimum (%)	6.3114	13.2880	6.3739
Nilai Lewatan Minimum (%)	0.00	0.00	0.00

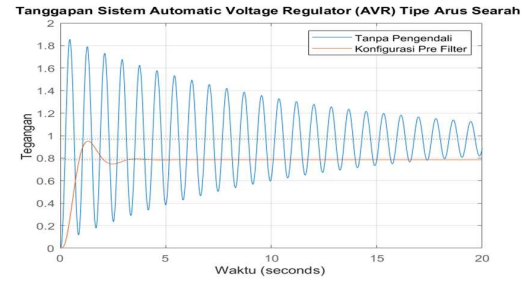
Respon peralihan konfigurasi standard diperlihatkan pada gambar untuk setiap pengendali



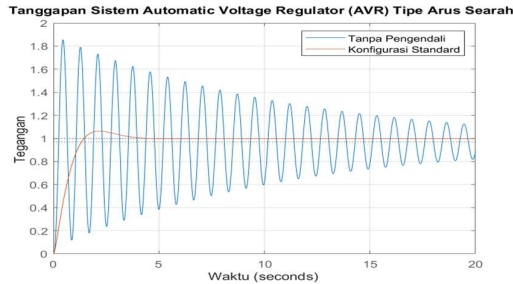
Gambar 4.4 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Standard Dengan Pengendali PID



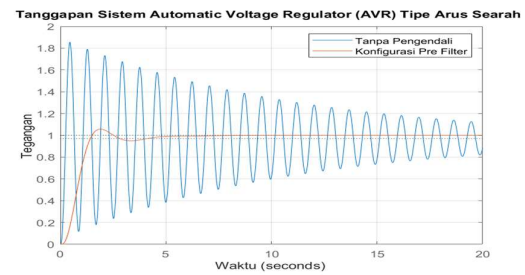
Gambar 4.5 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Standard Dengan Pengendali PDF



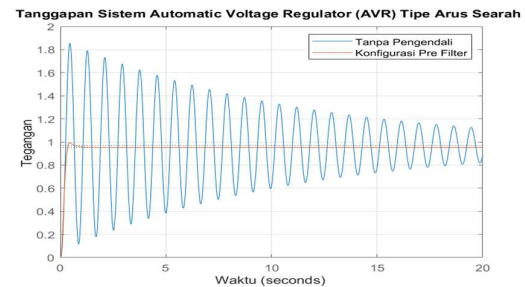
Gambar 4.7 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Pre Filter Dengan Pengendali P



Gambar 4.6 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Standard Dengan Pengendali PIDF



Gambar 4.8 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Pre Filter Dengan Pengendali PI



Gambar 4.9 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Pre Filter Dengan Pengendali PD

4.3. Tanggapan Peralihan Konfigurasi Pre Filter Dengan Pengendali

4.3.1. Dengan Pengendali P, PI, dan, PD

Parameter peralihan sistem AVR tipe arus searah konfigurasi pre filter dengan pengendali P, PI dan PD hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 4.4

TABEL 4.4

Nilai Parameter Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Pre Filter dengan Pengendali P, PI, dan PD

Parameter	P	PI	PD
Waktu Naik (detik)	0.5399	0.9156	0.2035
Waktu Puncak (detik)	1.3171	1.8915	0.4421
Waktu Keadaan Mantap (detik)	2.9255	4.4483	0.6379
Nilai Puncak	0.9508	1.0571	0.9951
Nilai Lewatan Maksimum (%)	0.5399	0.9156	0.2035
Nilai Lewatan Minimum (%)	1.3171	1.8915	0.4421

Respon peralihan konfigurasi pre filter diperlihatkan pada gambar untuk setiap pengendali

4.3.2. Dengan Pengendali PID, PDF dan, PIDF

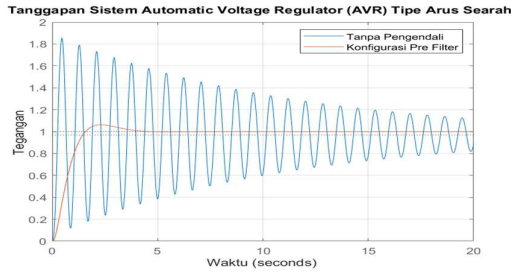
Parameter peralihan sistem AVR tipe arus searah konfigurasi pre filter dengan pengendali PID, PDF, dan PIDF hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 4.5

TABEL 4.5

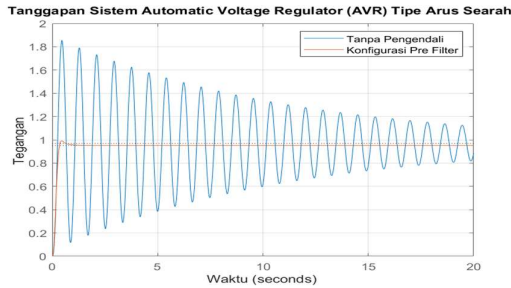
Nilai Parameter Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Pre Filter dengan Pengendali PID, PDF, dan PIDF

Parameter	PID	PDF	PIDF
Waktu Naik (detik)	1.0313	0.2033	1.0220
Waktu Puncak (detik)	2.3026	0.4421	2.2842
Waktu Keadaan Mantap (detik)	3.5774	0.6266	3.5511
Nilai Puncak	1.0623	0.9918	1.0629
Nilai Lewatan Maksimum (%)	6.2297	4.2345	6.2881
Nilai Lewatan Minimum (%)	0.00 %	0.00 %	0.00 %

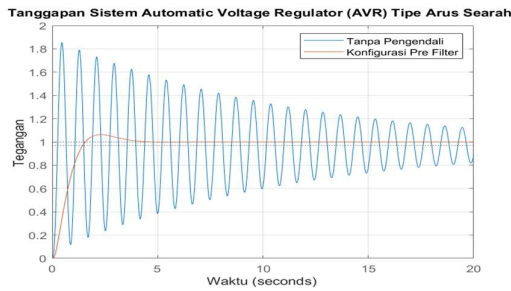
Respon peralihan konfigurasi pre filter diperlihatkan pada gambar untuk setiap pengendali



Gambar 4.10 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Pre Filter Dengan Pengendali PID



Gambar 4.11 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Pre Filter Dengan Pengendali PDF



Gambar 4.12 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Pre Filter Dengan Pengendali PIDF

4.4. Tanggapan Peralihan Konfigurasi Feedback Dengan Pengendali

4.4.1. Dengan Pengendali P, PI, dan, PD

Parameter peralihan sistem AVR tipe arus searah konfigurasi feedback dengan pengendali P, PI dan PD hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 4.6

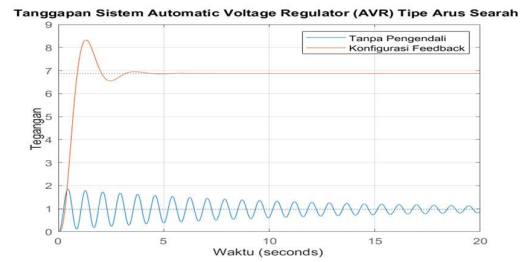
TABEL 4.6

Nilai Parameter Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedback dengan Pengendali P, PI, dan PD

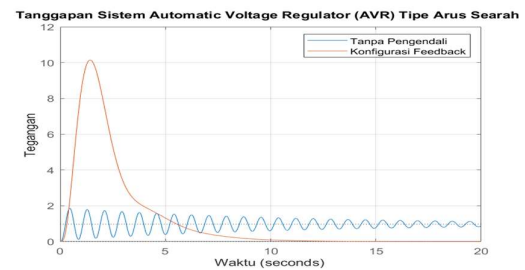
Parameter	P	PI	PD
Waktu Naik (detik)	0.5399	0.00	0.5895
Waktu Puncak (detik)	1.3171	1.3980	2.3855
Waktu Keadaan Mantap (detik)	2.9255	NaN	1.1533
Nilai Puncak	8.3264	10.1410	1.5166
Nilai Lewatan Maksimum (%)	21.10	Inf	0.00

Nilai	Lewatan	0.00	0.00	0.00
Minimum (%)				

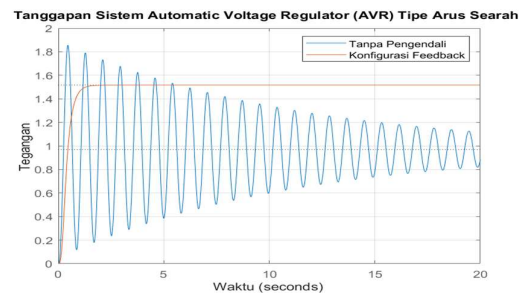
Respon peralihan konfigurasi feedback diperlihatkan pada gambar untuk setiap pengendali



Gambar 4.13 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedback Dengan Pengendali P



Gambar 4.14 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedback Dengan Pengendali PI



Gambar 4.15 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedback Dengan Pengendali PD

4.4.2. Dengan Pengendali PID, PDF dan, PIDF

Parameter peralihan sistem AVR tipe arus searah konfigurasi feedback dengan pengendali PID, PDF, dan PIDF hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 4.7

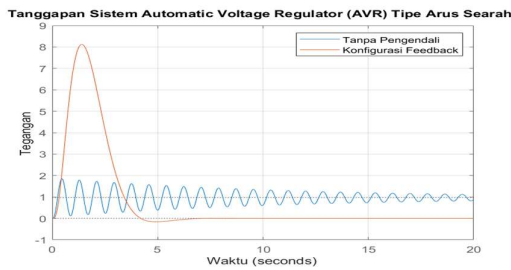
TABEL 4.7

Nilai Parameter Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedback dengan Pengendali PID, PDF, dan PIDF

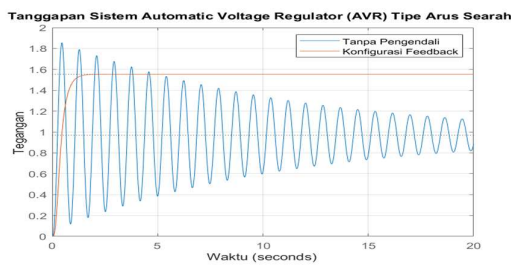
Parameter	PID	PDF	PIDF
Waktu Naik (detik)	0.00	0.6076	0.00
Waktu Puncak (detik)	1.3874	2.2013	1.4021
Waktu Keadaan Mantap (detik)	NaN	1.1872	NaN
Nilai Puncak	8.1198	1.5520	8.1765
Nilai Lewatan Maksimum (%)	Inf	0.00	Inf

Nilai Lewatan	0.00	0.00	0.00
Minimum (%)			

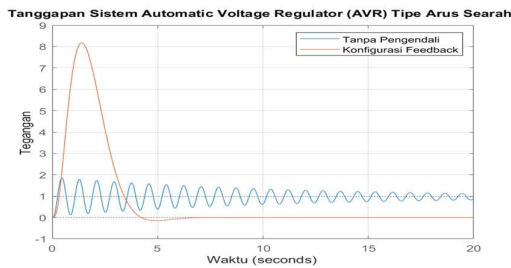
Respon peralihan konfigurasi feedback diperlihatkan pada gambar untuk setiap pengendali



Gambar 4.16 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedback Dengan Pengendali PID



Gambar 4.17 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedback Dengan Pengendali PDF



Gambar 4.18 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedback Dengan Pengendali PIDF

4.5. Tanggapan Peralihan Konfigurasi Feedforward Dengan Pengendali

4.5.1. Dengan Pengendali P, PI, dan, PD

Parameter peralihan sistem AVR tipe arus searah konfigurasi feedforward dengan pengendali P, PI, dan PD hasil perhitungan diperlihatkan pada Tabel 4.8

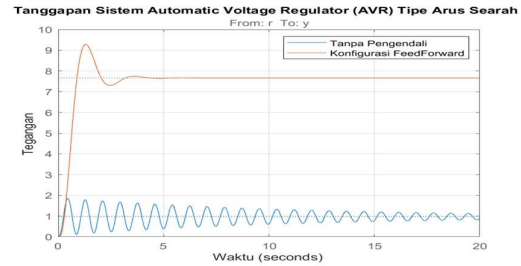
TABEL 4.8

Nilai Parameter Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedforward dengan Pengendali P, PI, dan PD	P	PI	PD
Waktu Naik (detik)	0.5395	0.1655	0.5804
Waktu Puncak (detik)	1.3079	1.4803	3.1223

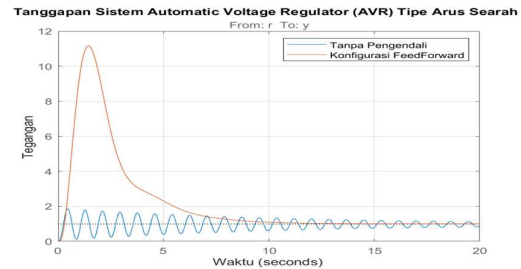
Waktu Keadaan Mantap (detik)	2.9152	12.8470	1.0240
Nilai Puncak	9.2780	11.1460	2.4694

Nilai Lewatan Maksimum (%)	21.1090	1014.60	0.00
Nilai Lewatan Minimum (%)	0.00	0.00	0.00

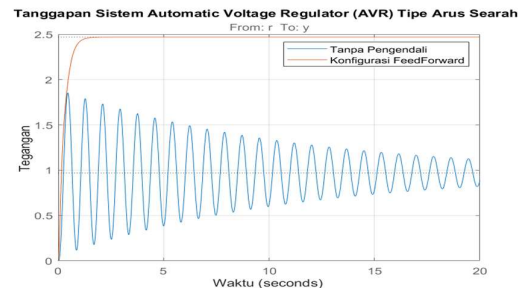
Respon peralihan konfigurasi feedforward diperlihatkan pada gambar untuk setiap pengendali



Gambar 4.19 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedforward Dengan Pengendali P



Gambar 4.20 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedforward Dengan Pengendali PI



Gambar 4.21 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedforward Dengan Pengendali PD

4.5.2. Dengan Pengendali PID, PDF dan, PIDF

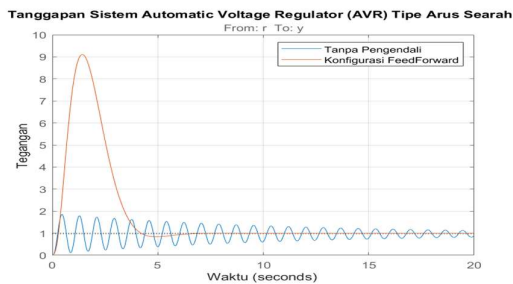
Parameter peralihan sistem AVR tipe arus searah konfigurasi feedforward pengendali PID, PDF, dan PIDF hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 4.9

TABEL 4.9

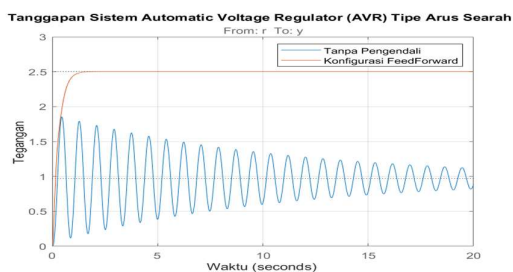
Nilai Parameter Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedforward dengan Pengendali PID, PDF, dan PIDF	PID	PDF	PIDF
Waktu Naik (detik)	0.1744	0.5966	0.1721

Waktu Puncak (detik)	1.4282	2.3855	1.4021
Waktu Keadaan Mantap (detik)	6.6581	1.0565	6.5975
Nilai Puncak	9.1082	2.5038	9.1645
Nilai Lewatan Maksimum (%)	810.8200	0.00	816.4500
Nilai Lewatan Minimum (%)	0.00	0.00	0.00

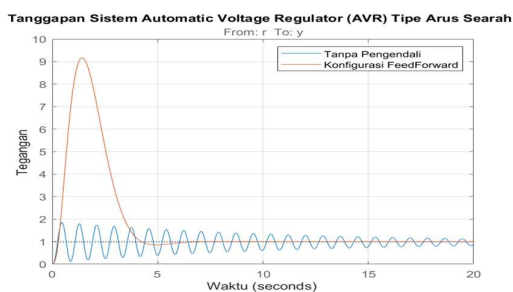
Respon peralihan konfigurasi feedforward diperlihatkan pada gambar untuk setiap pengendali



Gambar 4.22 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedforward Dengan Pengendali PID



Gambar 4.23 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedforward Dengan Pengendali PDF



Gambar 4.24 Respon Peralihan Sistem AVR Tipe Arus Searah Konfigurasi Feedforward Dengan Pengendali PIDF

5. PENUTUP

5.1. Simpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa

1. Untuk tanggapan tegangan sistem AVR dengan konfigurasi standard diperoleh informasi bahwa pengendali yang memenuhi kriteria perancangan adalah pengendali Proporsional Diferensial (PD) dan

pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF).

2. Untuk pengendali Proporsional Diferensial (PD) diperoleh informasi konstanta proporsional sebesar 0.6280 dan konstanta waktu diferensial sebesar 0.2720 detik serta waktu naik sebesar 0.1228 detik, untuk waktu puncak sebesar 0.2739 detik, untuk waktu keadaan mantap sebesar 0.5229 detik, nilai puncak sebesar 1.0804, nilai lewatan maksimum sebesar 13.4110 % dan nilai lewatan minimum sebesar 0.00 %.
3. Untuk pengendali Proporsional Diferensial Dengan Filter Orde Pertama Pada Bagian Diferensial (PDF) diperoleh informasi konstanta proporsional sebesar 0.6130 dan konstanta waktu diferensial sebesar 0.2790 detik dan konstanta pembagi filter sebesar 323. Untuk waktu naik sebesar 0.1223 detik, untuk waktu puncak sebesar 0.2745 detik, untuk waktu keadaan mantap sebesar 0.5152 detik, nilai puncak sebesar 1.0779, nilai lewatan maksimum sebesar 13.2880 % dan nilai lewatan minimum sebesar 0.00 %.
4. Untuk tanggapan tegangan sistem AVR dengan konfigurasi Pre Filter, Feedback dan FeedForward, tidak satupun elemen pengendali yang memenuhi kriteria perancangan.

5.2. Saran

Tindak lanjut dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Pemodelan sistem AVR tipe arus searah hendaknya dilakukan dibanyak titik operasi sehingga pengendali yang dirancang mempunyai daerah operasi yang lebih luas.
2. Analisis sistem AVR tipe arus searah yang dilakukan pada penelitian ini disarankan dilanjutkan dengan analisis domain frekuensi untuk fungsi transfer lingkaran terbuka, analisa domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup, analisa kestabilan dan analisa kekokohan. Sehingga informasi yang diperoleh untuk perancangan pengontrol lebih lengkap.
3. Selain dengan metoda PIDTune Model Standard ini, hendaknya juga dilakukan dengan metoda – metoda yang lain agar diperoleh informasi perancangan pengendali yang lebih banyak dan akurat.

6. REFERENCES

- [1] H. Saadat, Power System Analysis, New York: McGraw Hill, 1999.
- [2] D. Supriyatna, "Analysis of Power Efficiency Produced by AC and DC Generators: A Literature Review," *MOTIVECTION : Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, vol. 5, pp. 261-268, 2023.

- [3] H. R. Maulana, A. Suandi and Helmizar, "PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP ARUS EKSITASI PADA GENERATOR," *REKAYASA MEKANIKA*, vol. 6, no. 2, pp. 63-70, 2022.
- [4] A. Supardi, A. Budiman and N. R. Khairudin, "PENGARUH KECEPATAN PUTAR DAN BEBAN TERHADAP KELUARAN GENERATOR INDUKSI 1 FASE KECEPATAN RENDAH," *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 16, no. 1, 2016.
- [5] L. Shintawaty, "PERANAN DAYA REAKTIF PADA SISTEM KELISTRIKAN," *Jurnal Desiminasi Teknologi*, vol. 1, no. 2, 2013.
- [6] P. Jatmiko, S. Nisworo and A. Trihasto, "STABILITAS TRANSIEN PADA GENERATOR KAPASITAS 6,4 MW AKIBAT PERUBAHAN BEBAN : STUDI KASUS PADA PLTA JELOK," *SEMASTER" Seminar Nasional Riset Teknologi*, 2022.
- [7] R. Gianto, "Penggunaan UPFC (Unified Power Flow Controller) untuk Perbaikan Kestabilan Sistem Tenaga Listrik yang Terinterkoneksi," *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 15, pp. 25-32, 2021.
- [8] A. Nurdin, A. Azis and R. A. Rozal, "PERANAN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR SEBAGAI PENGENDALI TEGANGAN GENERATOR SINKRON," *JURNAL AMPERE*, vol. 3, no. 1, 2018.
- [9] R. Graham, *Power System Oscillations*, Massachusetts : Kluwer Academic Publisher , 1999.
- [10] N. Allu and S. Salu2, "APLIKASI PENALAAAN DENGAN METODE ZIEGLER NICHOLS DI PERANCANGAN PENPENDALI PID PADA PUTARAN MOTOR DC," *Prosiding Seminar Nasional Sinergitas Multidisiplin Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, vol. 1, pp. 203-207, 2018.
- [11] D. Xue, C. dan D. P. Atherton, *Linear Feedback Control : Analysis and Design With Matlab*, Philadelphia : SIAM , 2007.
- [12] E. Budi, Wahyono and F. Desanto, "KENDALI PROPORSIONAL INTEGRAL DIFERENSIAL DAN MONITORING KARAKTERISTIK MOTOR INDUKSI TIGA FASA BERBASIS LabVIEW," *Jurnal Sains & Teknologi Fakultas Teknik*, vol. 7, 2017.
- [13] R. Arindya, "PENALAAAN KENDALI PID UNTUK PENGENDALI PROSES," *Jurnal Teknologi Elektro, Universitas Mercu Buana* , vol. 8, no. 2, pp. 109-116, 2017.
- [14] R. Nelson, *Flight Stability and Automatic Control Edisi 2*, Singapore: McGraw Hill, 1998.
- [15] A. Veloni, *Control Systems Problems*, London : CRC Press, 2012.