

Simulasi dan Analisa Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Pilot Servo dan Kombinasi Pengendali Model Standar (Model Hidraulik)

Heru Dibyo Laksono¹, Fina Retno Ningsih¹, Fitrilina²,

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Andalas

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Bengkulu

herudibyoalaksono@eng.unand.ac.id

ABSTRAK

Kualitas dari suatu operasi sistem tenaga listrik salah satunya ditentukan dari kestabilan nilai frekuensi pada sistem. Sistem kendali frekuensi tenaga listrik berfungsi untuk menjaga kestabilan frekuensi pada sistem tenaga listrik agar berada pada nilai normal dengan batas toleransi yang telah ditetapkan, yaitu 50Hz dengan toleransi $\pm 2\%$. Tujuan dari penelitian untuk memperoleh informasi performansi tanggapan sistem kendali frekuensi tenaga listrik model hidraulik tanpa pengendali, dengan pengendali, dengan pilot servo, dengan pengendali dan pilot servo dan untuk memperoleh informasi nilai rentang konstanta *transient droop* dan *reset time* yang memenuhi kriteria perancangan. Hasil analisa menunjukkan bahwa performansi terbaik ditunjukkan pada saat sistem ditambahkan pengendali Proporsional Diferensial (PD) dengan nilai kesalahan keadaan mantap terhadap masukan undak satuan sebesar 0.0415, waktu naik sebesar 0.3758 detik, waktu puncak sebesar 1.6172 detik, waktu keadaan mantap sebesar 3.5498 detik dan lewatan maksimum sebesar 14.3060 persen. Untuk variasi nilai konstanta *transient droop* dan *reset time*, tidak ada nilai konstanta yang memenuhi kriteria perancangan.

Kata Kunci : Frekuensi Tenaga Listrik, Pilot Servo, Pengendali, *Transient Droop*, *Reset Time*.

ABSTRACT

The quality of an electric power system operation is determined by the stability of the frequency value in the system. The electric power frequency control system functions to maintain frequency stability in the electric power system to be at normal values with a predetermined tolerance limit, which is 50Hz with a tolerance of $\pm 2\%$. The purpose of the study is to obtain information on the response performance of the

hydraulic model electric power frequency control system without control, with controller, with servo pilot, with controller and servo pilot and to obtain information on the range value of transient droop constant and reset time that meets the design criteria. The results of the analysis showed that the best performance was shown when the system added a Differential Proportional controller (PD) with a steady state error value against the unit step input of 0.0415, an increase time of 0.3758 seconds, a peak time of 1.6172 seconds, a steady state time of 3.5498 seconds and a maximum pass of 14.3060 percent. For variations in the value of the droop transient constant and reset time, none of the constant values meet the design criteria.

Keywords: *Electric Power Frequency, Servo Pilot, Controller, Transient Droop, Reset Time.*

PENDAHULUAN

Energi listrik sudah menjadi kebutuhan energi yang utama dalam kehidupan sehari-hari, sehingga dibutuhkan ketersediaan energi listrik dengan kualitas baik, yang mana kestabilan frekuensi menjadi faktor penentu kualitas yang dihasilkan oleh unit pembangkit. Suatu frekuensi tenaga listrik dikatakan stabil apabila daya nyata keluaran dari pembangkit bernilai seimbang atau setara dengan daya nyata yang digunakan oleh beban. Adanya variasi beban yang digunakan oleh konsumen menimbulkan adanya perbedaan antara nilai daya aktif dan nilai daya nyata. Penyeimbangan nilai frekuensi yang melebihi normal dapat dilakukan dengan meningkatkan penambahan daya nyata pada pembangkit jika nilai frekuensi pada sistem menurun. Sebaliknya, jika nilai frekuensi pada sistem melebihi batas normal, maka dapat diseimbangkan dengan mengurangi daya nyata yang dibangkitkan [1]. Frekuensi normal yang ditetapkan agar menghindari hal yang tidak diinginkan adalah sebesar 50Hz dengan batas toleransi 2% [2] [3].

Pada dasarnya, keseimbangan nilai antara daya aktif keluaran dari unit pembangkit dengan besar beban

daya aktif diatur pada besarnya kopel penggerak generator. Namun, sistem tersebut tidak dapat bekerja secara optimal, sehingga dibutuhkan suatu pengendali agar sistem tersebut dapat bekerja dengan optimal dan menjaga keseimbangan nilai daya aktif unit pembangkit dan beban daya aktif [4]. Salah satu pengendali yang dapat digunakan adalah pengendali PID atau *Proportional-Integral-Differential*. Metode yang digunakan dalam perancangan pengendali PID adalah dengan PIDTune yang dapat menentukan parameter PID [5].

Penelitian ini melakukan analisis terhadap sistem kendali frekuensi tanpa pengendali, dengan pengendali, dengan pilot servo, dengan pengendali dan pilot servo, serta dengan variasi konstanta *transient droop* dan *reset time*. Nilai tersebut akan dibandingkan dengan performansi terbaik akan ditunjukkan oleh sistem dengan kombinasi yang paling banyak memenuhi nilai kriteria perancangan

Penelitian yang sudah pernah dilakukan adalah “Simulasi dan Analisa Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan PIDTune Model Standar (Analisa Domain Waktu)” oleh Astri Dwi Rahma (2022), “Analisa Performansi dalam Domain Waktu dan Frekuensi untuk Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik (Model *Reheat*, *Non-Reheat* dan Hidro Turbin)” oleh Wahyu Rahmadino (2020), dan “Analisa Simulasi Performansi dalam Domain Waktu untuk Pengendalian Frekuensi Sistem Tenaga Listrik (Model *Reheat*, *Non-Reheat*, dan Hidro Turbin)” oleh Aulia Rahma Putri (2015).

1 Materi dan Metode

1.1 Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik

Variasi beban konsumen dan industri dalam sistem tenaga listrik menimbulkan perbedaan dan perubahan pada kebutuhan daya aktif dan daya reaktif, yang mana akan berdampak pada perubahan frekuensi dalam operasi sistem tenaga listrik. Perubahan frekuensi yang cukup besar akan dapat menyebabkan kerugian dan memberikan dampak negatif bagi konsumen dan kerusakan alat pada industri. Oleh karenanya, diperlukan sistem kendali frekuensi tenaga listrik atau yang dikenal juga sebagai *load frequency control* (LFC) yang dapat mencegah terjadinya ketidakstabilan dalam operasi sistem tenaga listrik dengan menjaga nilai frekuensi agar tetap konstan, menahan dan mengatasi gangguan muatan, dan mempertahankan spesifikasi respon terhadap waktu yang dapat ditoleransi dalam batas tertentu.

Untuk mencapai tujuan sistem kendali tenaga listrik terhadap beban dapat dilakukan berdasarkan titik operasi

menggunakan pendekatan model linear. Komponen utama dalam sistem tenaga *single area* adalah generator, beban, *governor*, dan turbin [6].

A. Generator

Generator merupakan sebuah alat untuk menghasilkan listrik, lebih tepatnya alat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Fungsi alih dari generator berdasarkan *swing equation* dapat dilihat pada persamaan 3.1 berikut.

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (3.1)$$

Dalam keadaan penyimpangan kecil, persamaan generator ditulis dalam persamaan 3.2 berikut.

$$\frac{d\Delta \omega}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (3.2)$$

Jika ditransformasikan menjadi bentuk persamaan *laplace*, dapat ditulis menjadi persamaan 3.3 berikut.

$$\Delta \Omega(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \quad (3.3)$$

B. Model Beban

Ketergantungan terhadap frekuensi pada setiap daya listrik tergantung pada gabungan setiap karakteristik kecepatan beban dari semua perangkat yang digerakkan. Persamaan matematis untuk beban dapat dilihat pada persamaan 3.4 berikut.

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \Delta \omega \quad (3.4)$$

C. Model Penggerak Awal (*Prime Mover Model*)

Penggerak awal pada suatu sistem tenaga listrik merupakan turbin yang bervariasi sesuai dengan jenis pembangkitnya, diantaranya turbin model *reheat*, *non-reheat*, dan hidrolik.

Persamaan fungsi alih untuk turbin hidrolik dapat dilihat pada persamaan berikut [7].

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad (3.5)$$

D. Model Governor

Berkurangnya energi kinetik akan mengurangi kecepatan turbin sehingga frekuensi generator menurun. *Governor* akan mendeteksi kecepatan menggunakan *flyball* dan memberikan gerakan mekanis sebagai respon terhadap perubahan kecepatan [8]. Model matematis dari *governor* dapat dilihat pada persamaan berikut.

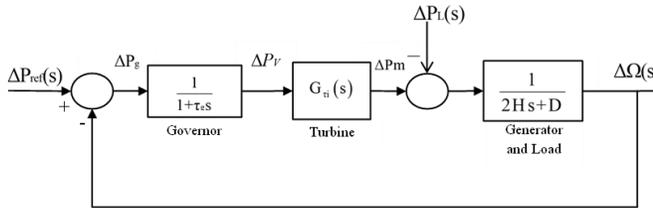
$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta \Omega(s) \quad (3.6)$$

Daya yang dikeluarkan dari *governor* (ΔP_g) ditransformasikan ke sinyal katup (ΔP_v) sehingga persamaan tersebut menghasilkan hubungan linier yang dituliskan dalam persamaan berikut.

$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1 + \tau_g} \Delta P_g(s) \quad (3.7)$$

Dimana τ_g merupakan konstanta waktu *governor*.

Model linier dari sistem kendali frekuensi tenaga listrik area tunggal yang merupakan gabungan dari blok diagram masing-masing komponen dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 1.1 Blok Diagram Sistem Kendali Frekuensi untuk Sistem Tenaga Area Tunggal

1.1.1 Tipe Hidraulik

Turbin hidraulik merupakan turbin yang menggunakan air sebagai fluida kerja yang memutar turbin pada sistem pembangkit tenaga air atau PLTA, yang mana keluaran dari turbin tersebut dipengaruhi oleh bukaan pintu masuk fluida kerjanya [7].

Pemodelan sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe hidraulik dengan masukan $\Delta P_{ref}(s)$ dan $\Delta P_L(s)$ dapat diperoleh berdasarkan blok diagram pada Gambar 3.1 dan mengganti fungsi alih turbin dengan persamaan 3.5, sehingga didapatkan fungsi alih lingkaran terbuka seperti persamaan berikut.

$$G(s)H(s) = \frac{1 - T_s}{(2Hs + D)(1 + \tau_g s) \left(1 + \frac{1}{2} T_s s\right)} \quad (3.8)$$

Fungsi alih lingkaran tertutup terhadap input $\Delta P_{ref}(s)$ dapat dihitung dengan persamaan 2.17 berikut.

$$\frac{\Delta \Omega(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{(1 - T_s)}{(2Hs + D)(1 + \tau_g s) \left(1 + \frac{1}{2} T_s s\right) + (1 - T_s)} \quad (3.9)$$

Sedangkan untuk fungsi alih lingkaran tertutup yang diperoleh berdasarkan blok diagram pada Gambar 2.8 terhadap input $\Delta P_L(s)$ dapat dihitung dengan persamaan 2.18 berikut.

$$\frac{\Delta \Omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{(1 + \tau_g s) \left(1 + \frac{1}{2} T_s s\right)}{(2Hs + D)(1 + \tau_g s) \left(1 + \frac{1}{2} T_s s\right) + (1 - T_s)} \quad (3.10)$$

1.2 Pengendali PID

Pengendali PID terdiri atas pengendali proporsional (P), pengendali integral (I), dan pengendali diferensial (D) yang dapat digunakan secara satuan maupun dikombinasikan [9]. Setiap parameter saling bergantung satu sama lain, sehingga apabila salah satu nilai konstanta berubah, maka respon sistem akan ikut berubah [10].

Bentuk umum persamaan pengendali PID berdasarkan blok diagram pada Gambar adalah sebagai berikut [11].

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \quad (3.11)$$

$$K(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.12)$$

Dengan keterangan

K_p = Konstanta proporsional dengan nilai *real*

T_i = Konstanta waktu integral dengan nilai *real* dan ≥ 0

T_d = Konstanta waktu diferensial dengan nilai *real* dan ≥ 0

K_i = Konstanta integral

K_d = Konstanta diferensial

1.3 PIDTune Model Standar

PIDTune merupakan salah satu modul pada Matlab untuk membantu dalam merancang pengendali. *PIDTune* model *standard* menjadikan objek pengontrol PIDF (PID

dengan *filter* turunan orde pertama) waktu kontinu dalam bentuk standar. Pengendali tersebut memiliki *gain* proporsional K_p , waktu integral T_i dan waktu turunan T_d , dan pembagi filter turunan orde pertama N . Persamaan *PIDTune* model *standard* adalah sebagai berikut [11].

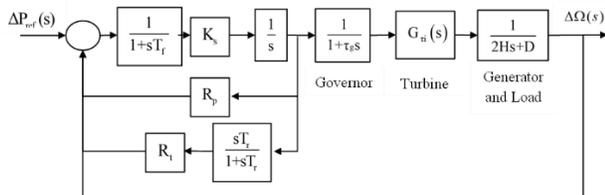
$$C=K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{N s + 1} \right) \quad (3.13)$$

Dengan keterangan

- K_p = konstanta penguatan proporsional
- T_i = waktu integral
- T_d = waktu diferensial

1.4 Pilot Servo

Bagian awal dari blok diagram pada Gambar 2.10 menunjukkan blok diagram pilot servo. R_p merupakan *steady state droop*, yang mana ketika frekuensi tinggi, droop akan meningkat dengan umpan balik maju ke *temporary droop* R_t . Konstanta waktu yang berkaitan dengan *temporary droop* disebut *reset time* (T_r). K_s merupakan *gain* dan T_f merupakan konstanta waktu dari pilot servo [12]. *Transient droop* dan *reset time* bisa disesuaikan agar sistem kendali dapat stabil [13].



Gambar 1.2 Diagram Blok Tipe Hidraulik dengan Pilot Servo

1.5 Analisa Kesalahan

Analisa kesalahan diperoleh dari fungsi alih lingkaran terbuka (*open loop*) terhadap tiga masukan, yaitu undak satuan, laju satuan, dan parabolik satuan. Dengan menggunakan analisa kesalahan, akan didapatkan informasi mengenai tipe sistem, konstanta kesalahan posisi, konstanta kesalahan kecepatan, konstanta kesalahan percepatan, kesalahan keadaan mantap untuk 3 masukan (undak satuan, laju satuan, dan parabolik satuan). Konstanta tersebut termasuk konstanta statistik sebagai ukuran kebaikan sistem, yang mana semakin tinggi nilai konstanta tersebut, maka kesalahan keadaan mantap akan semakin kecil [14].

Tinjauan pada fungsi alih lingkaran terbuka dapat dilihat pada persamaan 3.14 berikut.

$$G(s)H(s) = G(s) = \frac{K(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_m)}{s^N(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_k)} \quad (3.14)$$

Dengan ketentuan

- $k = n > m$
- $z_1, z_2, z_3, \dots, z_m$ adalah zero dari $G(s)H(s)$
- $p_1, p_2, p_3, \dots, p_k$ adalah pole dari $G(s)H(s)$

1.6 Analisa Peralihan

Pada analisa peralihan, digunakan tanggapan peralihan fungsi alih lingkaran tertutup (*close loop*) terhadap masukan undak satuan [14]. Perhitungan tiap parameter untuk lingkaran tertutup dalam domain waktu adalah sebagai berikut.

a. Waktu Naik (t_r)

Waktu naik merupakan waktu yang dibutuhkan oleh tanggapan sistem untuk naik dari 10% hingga 90%, 5% hingga 95%, atau 0% sampai 100% dari harga akhirnya [14].

Persamaan untuk menghitung nilai waktu naik adalah sebagai berikut.

$$t_r = \frac{1 + 1.100\zeta + 1.4000\zeta^2}{\omega_n} \quad (3.15)$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \left(\pi - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \quad (3.16)$$

b. Waktu Puncak (t_p)

Waktu puncak merupakan waktu yang dibutuhkan oleh suatu tanggapan sistem untuk mencapai puncak lewatan pertama kali.

Nilai waktu puncak dapat dihitung dengan persamaan 2.55 berikut.

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.17)$$

c. Waktu Keadaan Mantap (t_s)

Waktu keadaan mantap merupakan waktu yang dibutuhkan oleh kurva tanggapan sistem untuk mencapai dan menetap di dalam area di sekitar harga akhir yang mana ukurannya ditentukan menggunakan persentase mutlak dari harga akhir biasanya (5%, 2%, atau 0.5%) [14].

Waktu keadaan mantap dapat dihitung melalui persamaan berikut.

a. Kriteria $\pm 2\%$

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (3.18)$$

b. Kriteria $\pm 5\%$

$$t_s \approx \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (3.19)$$

c. Kriteria $\pm 0.5\%$

$$t_s \approx \frac{5}{\zeta\omega_n} \quad (3.20)$$

d. Lewatan Maksimum (M_p)

Lewatan maksimum merupakan nilai puncak maksimum dari kurva tanggapan sistem yang diukur dari nilai ahir yang sudah ditetapkan [14]. Apabila nilai dari keadaan mantap tidak sama dengan satu ($\neq 1$), maka nilai lewatan maksimum dapat ditentukan dengan persamaan 2.60 berikut

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (3.21)$$

Selain dengan persamaan 2.60, nilai lewatan maksimum juga dapat dihitung menggunakan persamaan 2.61 berikut

$$M_p = 100e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (3.22)$$

Sistem dengan performansi yang baik memiliki nilai waktu naik, waktu puncak, dan waktu keadaan mantap lebih kecil, serta nilai lewatan maksimum sebesar 20% atau lebih kecil [15] [16].

2 Hasil dan Pembahasan

Bagian ini mendeskripsikan hasil tanggapan sistem tanpa pengendali, dengan pengendali, dengan pilot servo, dengan pengendali dan pilot servo, serta variasi konstanta transient droop dan reset time.

2.1 Tanpa Pengendali

Sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe hidraulik tanpa pengendali dilakukan analisa kesalahan dan peralihan.

2.1.1 Analisa Kesalahan

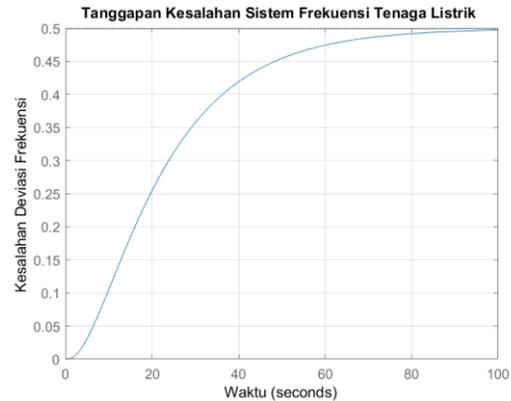
Hasil analisa kesalahan sistem kendali frekuensi tenaga listrik tanpa pengendali dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 2.1 Analisa Kesalahan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik tanpa Pengendali

Parameter Analisa Kesalahan	Nilai
Tipe Sistem	0
Konstanta Kesalahan Posisi (K_p)	1.0000
Konstanta Kesalahan Kecepatan (K_v)	0.0000
Konstanta Kesalahan Percepatan (K_a)	0.0000

Kesalahan Keadaan Mantap (e_{ss}) Masukan Undak	0.5000
Kesalahan Keadaan Mantap (e_{ss}) Masukan Laju	Inf
Kesalahan Keadaan Mantap (e_{ss}) Masukan Parabolik	Inf

Grafik



2.1.2 Analisa Peralihan

Hasil analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik tanpa pengendali dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 2.2 Analisa Peralihan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik tanpa Pengendali

Parameter Analisa Peralihan	Nilai
Waktu Naik (t_r)	39.511 detik
Waktu Puncak (t_p)	133.97 detik
Waktu Keadaan Mantap (t_s)	71.007 detik
Lewatan Maksimum (M_p)	0 %

2.2 Kriteria Perancangan

Kriteria perancangan didapatkan dari hasil setiap analisa sistem kendali frekuensi tenaga listrik tanpa pengendali. Untuk analisa kesalahan, sistem diharapkan memiliki nilai kesalahan keadaan mantap (e_{ss}) kurang dari 0.05 untuk masukan undak satuan. Sedangkan untuk analisa peralihan, kriteria perancangan setiap parameter dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 2.3 Kriteria Perancangan Analisa Peralihan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik

Parameter Analisa Peralihan	Nilai Perancangan
Waktu Naik (t_r)	< 3.000 detik
Waktu Puncak (t_p)	< 10.000 detik
Waktu Keadaan Mantap (t_s)	< 10.000 detik
Lewatan Maksimum (M_p)	< 20%

2.3 Dengan Pengendali

Sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe hidraulik dengan pengendali diberikan tanda untuk memberi informasi parameter mana yang memenuhi kriteria perancangan.

2.3.1 Analisa Kesalahan

Hasil analisa kesalahan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan pengendali dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 2.4 Analisa Kesalahan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Pengendali

Pengendali	Parameter Analisa
	Kesalahan e_{ss} Masukan Undak
P	✗
PI	✓
PD	✓
PID	✓
PDF	✗
PIDF	✓

2.3.2 Analisa Peralihan

Hasil analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan pengendali dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 2.5 Analisa Peralihan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Pengendali

Pengendali	Parameter Analisa Peralihan			
	Waktu Naik (t_r) (detik)	Waktu Puncak (t_p) (detik)	Waktu Keadaan Mantap (t_s) (detik)	Lewatan Maksimum (M_p) (%)
P	✓	✓	✗	✓
PI	✗	✗	✗	✓
PD	✓	✓	✓	✓
PID	✗	✗	✗	✓
PDF	✓	✓	✓	✓
PIDF	✗	✗	✗	✓

2.4 Dengan Pilot Servo

Sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe hidraulik dengan pilot servo diberikan tanda untuk memberi informasi parameter mana yang memenuhi kriteria perancangan.

2.4.1 Analisa Kesalahan

Hasil analisa kesalahan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan pilot servo dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 2.6 Analisa Kesalahan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Pilot Servo

Kondisi Sistem	Parameter Analisa
	Kesalahan e_{ss} Masukan Undak
Dengan Pilot Servo	✓

2.4.2 Analisa Peralihan

Hasil analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan pilot servo dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 2.7 Analisa Peralihan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Pilot Servo

Kondisi Sistem	Parameter Analisa Peralihan			
	Waktu Naik (t_r) (detik)	Waktu Puncak (t_p) (detik)	Waktu Keadaan Mantap (t_s) (detik)	Lewatan Maksimum (M_p) (%)
Dengan Pilot Servo	✗	✗	✗	✗

2.5 Dengan Pengendali dan Pilot Servo

Sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe hidraulik dengan pengendali dan pilot servo diberikan tanda untuk memberi informasi parameter mana yang memenuhi kriteria perancangan.

2.5.1 Analisa Kesalahan

Hasil analisa kesalahan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan pengendali dan pilot servo dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut.

Tabel 2.8 Analisa Kesalahan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Pengendali dan Pilot Servo

Pengendali	Parameter Analisa
	Kesalahan e_{ss} Masukan Undak
P + Pilot Servo	✗
PI + Pilot Servo	✓
PD + Pilot Servo	✓
PID + Pilot Servo	✓
PDF + Pilot Servo	✓
PIDF + Pilot Servo	✓

✗

2.5.2 Analisa Peralihan

Hasil analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan pengendali dan pilot servo dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut.

Tabel 2.9 Analisa Peralihan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Pengendali dan Pilot Servo

	Parameter Analisa Peralihan			
	Waktu Naik (t_r) (detik)	Waktu Puncak (t_p) (detik)	Keadaan Mantap (t_s) (detik)	Lewatan Maksimum (M_p) (%)
P	x	x	x	✓
PI	x	x	x	✓
PD	x	x	x	✓
PID	x	x	x	✓
PDF	✓	x	x	✓
PIDF	x	x	x	✓

2.6 Variasi Konstanta *Transient Droop*

Sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe hidraulik dengan variasi konstanta *transient droop* diberikan tanda untuk memberi informasi parameter mana yang memenuhi kriteria perancangan.

2.6.1 Analisa Kesalahan

Hasil analisa kesalahan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan variasi konstanta *transient droop* dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 2.10 Analisa Kesalahan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Variasi Konstanta *Transient Droop*

Konstanta <i>Transient Droop</i>	Parameter Analisa Kesalahan
	e_{ss} Masukan Undak
0.2	x
0.5	x
0.7	x
1	x
5	x
8	x
10	x

2.6.2 Analisa Peralihan

Hasil analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan variasi konstanta *transient droop* dapat dilihat pada Tabel 4.11 berikut.

Tabel 2.11 Analisa Peralihan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Variasi Konstanta *Transient Droop*

Konstanta <i>Transient Droop</i>	Parameter Analisa Peralihan			
	Waktu Naik (t_r) (detik)	Waktu Puncak (t_p) (detik)	Waktu Keadaan Mantap (t_s) (detik)	Lewatan Maksimum (M_p) (%)
0.2	x	x	x	x
0.5	x	x	x	x
0.7	x	x	x	x
1	x	x	x	x
5	x	x	x	✓
8	x	x	x	✓
10	x	x	x	✓

2.7 Variasi Konstanta *Reset Time*

Sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe hidraulik dengan variasi konstanta *reset time* diberikan tanda untuk memberi informasi parameter mana yang memenuhi kriteria perancangan.

2.7.1 Analisa Kesalahan

Hasil analisa kesalahan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan variasi konstanta *reset time* dapat dilihat pada Tabel 4.12 berikut.

Tabel 2.12 Analisa Kesalahan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Variasi Konstanta *Reset Time*

Konstanta <i>Reset Time</i>	Parameter Analisa Kesalahan
	e_{ss} Masukan Undak
1.5	x
5	x
8	x
10	x
12	x
15	x
20	x
25	✓

2.7.2 Analisa Peralihan

Hasil analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan variasi konstanta *reset time* dapat dilihat pada Tabel 4.13 berikut.

Tabel 2.13 Analisa Peralihan Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Variasi Konstanta *Reset Time*

Parameter Analisa Peralihan

Konstanta <i>Reset Time</i>	Waktu Naik (t_r) (detik)	Waktu Puncak (t_p) (detik)	Waktu Keadaan Mantap (t_s) (detik)	Lewatan Maksimum (M_p) (%)
1.5	x	x	x	x
5	x	x	x	x
8	x	x	x	x
10	x	x	x	x
12	x	x	x	✓
15	x	x	x	✓
20	x	x	x	✓
25	x	x	x	✓

3 Penutup

3.1 Simpulan

Berdasarkan simulasi dan analisa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Sistem yang menunjukkan performansi terbaik adalah sistem dengan pengendali PD yang seluruh parameternya memenuhi kriteria perancangan dengan nilai parameter e_{ss} masukan undak = 0.0415, waktu naik (t_r) = 0.37576 detik, waktu puncak (t_p) = 1.6172 detik, waktu keadaan mantap (t_s) = 3.5498 detik, dan lewatan maksimum (M_p) = 14.306 %.
2. Pada sistem dengan variasi konstanta *transient droop* dan *reset time*, tidak ada nilai konstanta yang memenuhi kriteria perancangan. Setiap parameternya memiliki hubungan yang berbeda dengan variasi konstanta.

3.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan :

1. Melakukan analisa terhadap variasi konstanta *transient droop* dan *reset time* dengan rentang nilai yang lebih besar.
2. Melakukan analisa terhadap performansi sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan perubahan parameter.

Daftar Pustaka

[1] T. Mustarin, "Desain Optimal Load Frequency Control (LFC) dengan Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) pada Sistem Pembangkit

Listrik Tenaga Mikro Hidro menggunakan Metode Firefly Algorithm (FA)," Institut Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.

- [2] I. D. Marsudi, Operasi Sistem Tenaga Listrik, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2006.
- [3] M. E. D. S. D. M. R. Indonesia, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia," Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, 2020.
- [4] W. Ramadino, "Analisa Performansi dalam Domain Waktu dan Frekuensi untuk Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik (Model Reheat, Non Reheat, dan Hidro Turbin)," Padang, 2020.
- [5] A. R. Putri, ""Analisa Simulasi Performansi dalam Domain Waktu untuk Pengendalian Frekuensi Sistem Tenaga Listrik (Model Reheat, Non-Reheat, dan Hidro Turbin)," Padang, 2020.
- [6] Y. V. Hote, S. Jain, "PID Controller Design for Load Frequency Control: Past, Present, and Future Challenges," *IFAC-PaperOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 604-609, 2018.
- [7] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw Hill, Inc, 1994.
- [8] H. Saadat, Power System Analysis, New York: McGraw Hill, 1999.
- [9] S. Vashanti, M. Gopila, I. Gnanambal, "Fuzzy and PID Excitation Control System with AVR in Power System Stability Analysis," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 1, no. 5, pp. 95-99, 2012.
- [10] R. Prihandono dan M. Rameli, "Load Frequency Control (LFC) menggunakan Metode Noise-Tolerable PID Feedback pada Power Generation Plant Simulator PLTU PT. Pembangkitan Jawa dan Bali (PJB) Unit Pembangkitan (UP) Paiton," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 491-496, 2016.
- [11] H. D. Laksono, Sistem Kendali Tenaga Listrik dengan Matlab, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2014.
- [12] G. Rogers, Power System Oscillations, Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [13] P.L. Dandeno, P. Kundur, J.P. Bayne, "Hydraulic Unit Dynamic Performance under Normal and Islanding Conditions - Analysis and Validation," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vols. PAS-97, 1978.

- [14] H. D. Laksono, Perancangan dan Analisa Sistem Kendali dengan Berbagai Pengendali, Padang: Andalas University Press, 2015.
- [15] S. Skogestad, I. Postlethwaite, Multivariable Feedback Control Analysis and Design, New York: McGraw Hill, 1996.
- [16] K. Ogata, Teknik Kontrol Automatik, Jakarta: Erlangga, 1996.