

Analisis Kinerja Pengendali dengan Filter pada Sistem Load Frequency Control Tipe Reheat untuk Stabilisasi Frekuensi

Heru Dibyo Laksono¹, Avif Tiftazani¹

¹Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Andalas

herudibyoalaksono@eng.unand.ac.id

ABSTRACT

Kestabilan frekuensi dalam sistem tenaga listrik merupakan aspek penting yang mempengaruhi kualitas energi yang dihasilkan. Penelitian ini menganalisis kinerja sistem Load Frequency Control (LFC) tipe reheat menggunakan berbagai konfigurasi pengendali, baik dengan maupun tanpa karakteristik *droop*. Metode yang digunakan meliputi pemodelan matematis dan simulasi untuk mengevaluasi respons sistem terhadap perubahan daya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan karakteristik *droop* meningkatkan kecepatan respons sistem dan mengurangi osilasi frekuensi. Konfigurasi pengendali PID dan PIDF menunjukkan performa terbaik dalam menjaga stabilitas frekuensi. Kesimpulannya, penerapan pengendali dengan filter dan karakteristik *droop* memberikan kinerja optimal dalam sistem LFC tipe reheat, memungkinkan penanganan perubahan daya yang lebih efektif dan respons yang lebih cepat terhadap gangguan.

Kata kunci: Frekuensi, *Load Frequency Control*, Pengendali, Filter

ABSTRACT

Frequency stability in electrical power systems is a crucial aspect that affects the quality of the generated energy. This study analyzes the performance of the Reheat Type Load Frequency Control (LFC) system using various controller configurations, both with and without droop characteristics. The method employed includes mathematical modeling and simulation to evaluate the system's response to changes in power. Simulation results indicate that the use of droop characteristics improves the system's response speed and reduces frequency oscillations. The PID and PIDF controller configurations exhibit the best performance in maintaining frequency stability. In conclusion, the implementation of controllers with filters and droop characteristics provides optimal performance in the Reheat Type LFC system, allowing for more effective handling of power changes and faster responses to disturbances.

Keywords: *Frequency, Load Frequency Control, Controller, Filter*

1. PENDAHULUAN

Energi listrik sudah menjadi energi yang dibutuhkan di kehidupan [1]. Ketersediaan energi listrik harus memiliki kualitas yang baik, dimana kestabilan frekuensi menjadi faktor penentu kualitas yang dihasilkan oleh unit pembangkit. Frekuensi tenaga listrik dapat dikatakan stabil apabila daya aktif keluaran dari pembangkit listrik bernilai seimbang dengan daya aktif yang digunakan oleh beban [2].

Perubahan kebutuhan daya aktif pada beban mempengaruhi nilai frekuensi pada sistem tenaga listrik. Apabila kebutuhan daya aktif pada beban meningkat, hal tersebut dapat menyebabkan frekuensi pada sistem menjadi turun [3]. Jika daya aktif yang dihasilkan pembangkit lebih besar dibandingkan daya aktif yang dikonsumsi beban, maka frekuensi akan meningkat [4]. Nilai frekuensi yang ditetapkan di setiap negara berbeda, dengan rentang frekuensi sebesar 50-60 Hz [5]. Di Indonesia, nilai frekuensi standar pada sistem tenaga listrik adalah 50 Hz dengan batas toleransi 2% [6].

Agar frekuensi tetap stabil dan berada dalam batas toleransi, daya aktif yang dibangkitkan oleh sistem tenaga listrik harus sesuai dengan kebutuhan daya pada beban. Untuk menyalahi hal ini, diperlukan analisis dan tanggapan untuk mengendalikan stabilitas keluaran frekuensi dengan menggunakan sistem *load frequency control* (LFC). *Load frequency control* atau sistem kendali frekuensi tenaga listrik adalah sistem yang diaplikasikan untuk mempertahankan perubahan frekuensi pada sistem tenaga listrik yang disebabkan perubahan beban [7]. Sistem LFC mengendalikan pembangkitan daya pada jalur beban dan kemudian menstabilkan frekuensi [8]. Pengendali Proporsional-Integral-Derifatif (PID) merupakan salah satu mekanisme pengendali yang digunakan oleh sistem kendali frekuensi tenaga listrik [9].

Terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh Yavuz

Güler, Mustafa Nalbantoğlu dan Ibrahim Kaya dengan judul “Cascade Controller Design Via Controller Synthesis for Load Frequency Control of Electrical Power Systems”. Pada penelitian tersebut membahas performansi sistem LFC dengan pengendali menggunakan pengendali PIDF [10]. Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Astri Dwi Rahma dengan judul “Simulasi dan Analisa Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan PIDTune Model Standar (Analisa Domain Waktu)”. Pada penelitian tersebut membahas performansi domain waktu dari sistem LFC dengan metode PIDTune [11].

Penelitian ini melakukan analisis peralihan terhadap sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe *reheat* terhadap masukan daya dengan konfigurasi tanpa pengendali, dengan pengendali tunggal dan dengan pengendali tunggal menggunakan filter. Sistem akan diuji dengan menggunakan *droop* dan tidak menggunakan *droop*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe *reheat* dalam menjaga stabilitas frekuensi, baik saat menggunakan pengendali dengan maupun tanpa karakteristik *droop* serta mengevaluasi peran filter dalam meningkatkan performa pengendali pada sistem LFC tipe *reheat*, terutama dalam meredam osilasi frekuensi yang berlebihan.

Adapun batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Penelitian ini terbatas pada analisis sistem Load Frequency Control (LFC) tipe *reheat*. Sistem lain seperti LFC tipe *non-reheat* tidak menjadi fokus dalam kajian ini, sehingga hasil analisis hanya berlaku untuk sistem yang spesifik.
2. Analisis hanya dilakukan pada beberapa jenis pengendali, yaitu Proporsional (P), Proporsional Integral (PI), Proporsional Diferensial (PD), Proporsional Integral Diferensial (PID), Proporsional Diferensial dengan Filter (PDF), dan Proporsional Integral Diferensial dengan Filter (PIDF). Pengendali lainnya tidak termasuk dalam ruang lingkup penelitian ini.
3. Studi ini hanya mempertimbangkan pengaruh tanpa dan dengan karakteristik *droop* dalam sistem LFC tipe *reheat*. Pengaruh karakteristik *droop* pada sistem lain tidak dibahas.
4. Penelitian ini mengevaluasi kinerja pengendali dengan dan tanpa penggunaan filter, namun tidak membahas variasi lebih lanjut dari jenis filter yang digunakan selain yang terstandarisasi pada parameter tertentu.

5. Hasil penelitian didasarkan pada simulasi tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem LFC dengan berbagai konfigurasi pengendali. Analisis dilakukan berdasarkan data simulasi dan tidak mencakup uji coba pada sistem fisik di lapangan.

6. Penelitian ini dilakukan dengan asumsi kondisi operasi tertentu untuk beban sistem. Variasi beban dan kondisi operasi yang lebih dinamis mungkin tidak sepenuhnya terwakili dalam simulasi yang dilakukan.

2. KERANGKA TEORITIS

2.1 Sistem Load Frequency Control (LFC)

Sistem Load Frequency Control (LFC) atau yang dikenal dengan sistem kendali frekuensi tenaga listrik adalah sistem untuk mempertahankan fluktuasi frekuensi pada sistem tenaga listrik. Sistem LFC diperlukan untuk mengembangkan sistem yang lebih baik agar mencapai efek yang lebih sedikit pada frekuensi dan penyimpangan daya saluran pembangkit setelah terjadinya gangguan beban [12]. Komponen utama pada sistem LFC adalah generator, turbin, *governor*, dan beban.

A. Model Generator

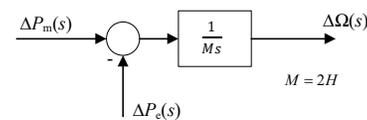
Generator merupakan alat pembangkit yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik. Model dari sebuah generator ini didapatkan dengan menggunakan *swing equation* pada persamaan 2.1.

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (2.1)$$

Persamaan tersebut diubah ke transformasi *laplace*, dan didapatkan persamaan 2.2.

$$\Delta \Omega(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \quad (2.2)$$

Gambar 2.1 menunjukkan diagram blok dari model generator.



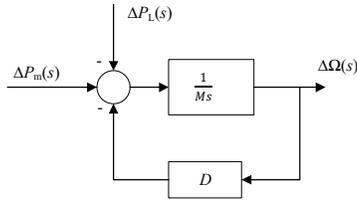
Gambar 2.1 Diagram Blok Generator [13]

B. Model Beban

Beban merupakan perilaku beban listrik dalam sistem tenaga listrik yang digunakan untuk mengatur tanggapan beban terhadap perubahan frekuensi. Model beban dapat dimodelkan dituliskan pada persamaan 2.3.

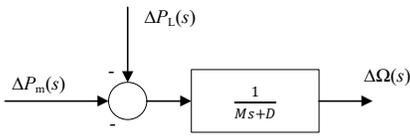
$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (2.3)$$

Dari model tersebut didapatkan diagram blok pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram Blok Model Generator dan Beban [13]

Diagram blok tersebut dapat disederhanakan, seperti pada Gambar 2.3.



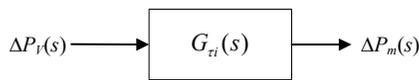
Gambae 2.3 Hasil Penyederhanaan Diagram Blok Model Generator dan Beban [13]

C. Model Turbin

Model turbin menghubungkan perubahan output daya mekanik ΔP_m dengan perubahan posisi katup ΔP_v . Model matematis dari turbin didapatkan pada persamaan 2.4.

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + T_{CH}s)(1 + T_{RH}s)} \quad (2.4)$$

Diagram blok dari model turbin dapat dilihat pada Gambar 2.4.



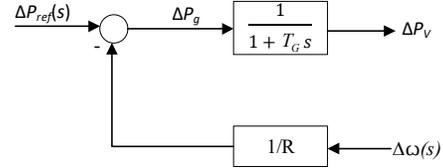
Gambar 2.4 Diagram Blok Turbin [13]

D. Model Governor

Governor adalah pengendali yang terdapat pada generator yang berfungsi untuk menstabilkan frekuensi. Pemodelan matematis model *governor* dapat dilihat pada persamaan 2.5.

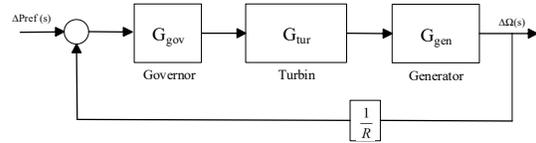
$$\Delta P_v(s) = \frac{1}{1 + T_G s} \Delta P_g(s) \quad (2.5)$$

Diagram blok dari model *governor* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram Blok Governor [13]

Pemodelan pada sistem LFC yaitu dengan menggabungkan diagram blok dari generator, *load*, *turbin*, dan *governor*. Diagram blok sistem LFC secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut.

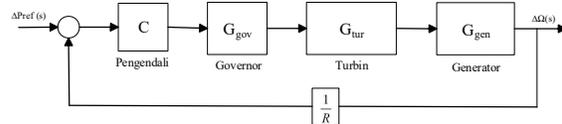


Gambar 2.6 Diagram Blok Sistem Load Frequency Control [13]

Dengan fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem LFC terhadap masukan daya dapat dilihat pada persamaan 2.6.

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{(1+sF_{HP}T_{RH})R}{(Ms+D)(1+T_Gs)(1+T_{CH}s)(1+T_{RH}s)R+(1+sF_{HP}T_{RH})} \quad (2.6)$$

Untuk diagram blok sistem LFC dengan pengendali tunggal dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Diagram Blok Sistem LFC dengan Pengendali Tunggal

Dengan fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem LFC dengan pengendali tunggal terhadap masukan daya dapat dilihat pada persamaan 2.7.

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{as + C}{bs^4 + cs^3 + ds^2 + es + f} \quad (2.7)$$

Dimana:

$$a = CF_{HP}T_{RH}$$

$$b = MT_G T_{RH} T_{CH}$$

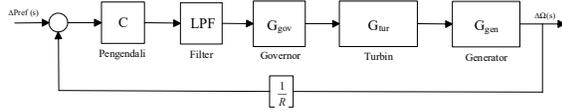
$$c = MT_G T_{CH} + MT_{RH} T_{CH} + MT_G T_{RH} + T_G T_{RH} T_{CH} D$$

$$d = MT_{CH} + MT_{RH} + MT_G + T_G T_{RH} D + T_G T_{CH} D$$

$$e = M + T_{RH} D + T_G D + T_{CH} D + \frac{CF_{HP}T_{RH}}{R}$$

$$f = D + \frac{C}{R}$$

Untuk diagram blok sistem LFC dengan pengendali tunggal menggunakan filter dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram Blok Sistem LFC dengan Pengendali Tunggal Menggunakan Filter

Dengan fungsi alih lingkaran tertutup dari sistem LFC dengan pengendali tunggal menggunakan filter terhadap masukan daya dapat dilihat pada persamaan 2.8.

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{as + FC}{bs^4 + cs^3 + ds^2 + es + f} \quad (2.8)$$

Dimana:

$$a = FCF_{HP}T_{RH}$$

$$b = MT_G T_{RH} T_{CH}$$

$$c = MT_G T_{CH} + MT_{RH} T_{CH} + MT_G T_{RH} + T_G T_{RH} T_{CH} D$$

$$d = MT_{CH} + MT_{RH} + MT_G + T_G T_{RH} D + T_G T_{CH} D$$

$$e = M + T_{RH} D + T_G D + T_{CH} D + \frac{FCF_{HP}T_{RH}}{R}$$

$$f = D + \frac{FC}{R}$$

Keterangan simbol yang digunakan dalam sistem LFC ditunjukkan pada tabel 2.1.

TABEL 2.1 Keterangan Simbol pada Sistem LFC [14]

Simbol	Keterangan
$\Delta\Omega$	Perubahan frekuensi
H	Konstanta Inersia
ΔP_m	Perubahan daya mekanik
ΔP_e	Perubahan daya akibat perubahan beban
ΔP_L	Perubahan beban yang tidak peka terhadap frekuensi
D	Konstanta redaman beban
ΔP_V	Perubahan posisi katup
ΔP_g	Daya keluaran Governor
ΔP_{ref}	Daya referensi
R	Speed regulation (berkisar antara 5 s/d 6%)
T_{CH}	Konstanta waktu turbin nonreheat
T_{RH}	Konstanta waktu turbin reheat
T_{ω}	Konstanta waktu turbin hidrolik
F_{HP}	Presentase daya yang dihasilkan dibagian reheat

2.2 PIDTune Model Standar

Perancangan pengendali dilakukan melalui simulasi menggunakan representasi pengendali PID

waktu kontinu yang dikenal dengan PIDTune [15]. PIDTune merupakan fungsi pada perangkat lunak MATLAB yang dirancang untuk menyederhanakan proses pembuatan pengendali dari Proporsional, Integral, dan Diferensial [16]. Tipe-tipe pengendali yang digunakan pada PIDTune model standar diperlihatkan pada Tabel 2.2.

TABEL 2.2 Tipe – Tipe Pengendali PIDTune Model Standar

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 Filter

Filter adalah suatu perangkat atau proses yang dirancang untuk mengurangi bahkan menghilangkan komponen frekuensi tertentu dari suatu sinyal [17]. Persamaan 2.9 menyatakan fungsi alih dari filter [18].

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (2.9)$$

Dimana τ merupakan konstanta waktu untuk menentukan seberapa cepat atau lambat dari filter untuk menanggapi perubahan pada sinyal. Semakin besar nilai τ maka semakin lambat tanggapan dari sistem.

2.4 Analisis Peralihan

Analisis peralihan berfungsi untuk mengetahui kestabilan dan akurasi dari suatu sistem. Analisis ini dilakukan pada kondisi peralihan hingga pada keadaan tunak [19]. Terdapat beberapa parameter yang diamati, diantaranya waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak dan lewatan maksimum.

A. Waktu Naik (t_r)

Waktu naik merupakan waktu yang diperlukan oleh tanggapan sistem untuk mencapai 10% hingga 90%, 5% hingga 95%, atau 0% hingga 100% dari nilai akhir. Untuk menghitung waktu naik dapat menggunakan Persamaan 2.10.

$$t_r = \frac{1.00 + 1.10\zeta + 1.40\zeta^2}{\omega_n} \quad (2.10)$$

B. Waktu Puncak (t_p)

Waktu puncak adalah waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk sampai pada puncak lewatan pertama. Waktu puncak dapat dihitung dengan Persamaan 2.11.

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.11)$$

C. Waktu Keadaan Mantap (t_s)

Waktu keadaan mantap adalah waktu yang diperlukan oleh tanggapan sistem untuk mencapai dan berada dalam daerah disekitar nilai akhir. Waktu keadaan mantap dapat ditentukan dengan menggunakan persentase mutlak dari nilai akhir, yaitu 5%, 2% atau 0.50% dengan rasio redaman berkisar antara 0.00 sampai 0.90. Waktu keadaan mantap dapat dihitung dengan persamaan berikut.

- Kriteria $\pm 2\%$

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (2.12)$$

- Kriteria $\pm 5\%$

$$t_s = \frac{3}{\zeta \omega_n} \quad (2.13)$$

- Kriteria $\pm 0.5\%$

$$t_s = \frac{5}{\zeta \omega_n} \quad (2.14)$$

D. Nilai Puncak (y_p)

Nilai yang dicapai respon untuk mencapai puncak lewatan pertama dapat disebut dengan nilai puncak. Nilai puncak dapat dihitung dengan Persamaan 2.15.

$$y_p = 1.00 - e^{\frac{-\zeta \pi}{\sqrt{1 - \zeta^2}}} \quad (2.15)$$

E. Lewatan Maksimum (M_p)

Lewatan maksimum merupakan nilai puncak maksimum dari tanggapan yang diukur dari nilai akhir yang telah ditetapkan [19]. Lewatan maksimum dapat dihitung dengan Persamaan 2.16.

$$M_p = 100e^{\frac{-\zeta \pi}{\sqrt{1 - \zeta^2}}} \quad (2.16)$$

Dalam penelitian ini, langkah pertama yang dilakukan adalah identifikasi masalah terkait pengendalian deviasi frekuensi pada sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe *reheat*, serta penentuan tujuan penelitian. Tahap ini diikuti oleh studi literatur yang mencakup kajian terhadap konsep dasar sistem LFC, pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID), karakteristik droop, dan peran filter dalam pengendalian frekuensi. Selain itu, mengkaji penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang relevan untuk memahami metode pengendalian frekuensi yang efektif.

Tahap selanjutnya adalah pemodelan sistem LFC tipe *reheat*, yang melibatkan pembangunan model matematis dari sistem tersebut untuk digunakan dalam simulasi. Pemodelan ini mencakup variabel-variabel penting seperti deviasi frekuensi, parameter sistem, dan pengaturan kontrol. Setelah itu, dilakukan desain pengendali dengan mengembangkan berbagai konfigurasi, termasuk pengendali Proporsional (P), Proporsional Integral (PI), dan Proporsional Integral Diferensial (PID), serta penambahan filter untuk meningkatkan kinerja pengendali. Pengujian konfigurasi dilakukan baik dengan maupun tanpa karakteristik droop, serta dengan parameter dan pengaturan awal dari setiap jenis pengendali yang telah ditentukan.

Simulasi sistem dilakukan untuk menguji tanggapan peralihan deviasi frekuensi menggunakan berbagai konfigurasi pengendali yang telah dirancang. Simulasi dilakukan pada konfigurasi sistem dengan dan tanpa karakteristik droop, serta dengan penggunaan filter yang berbeda. Setelah itu, data dari hasil simulasi dikumpulkan, termasuk waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, dan nilai lewatan maksimum. Kinerja dari masing-masing konfigurasi pengendali dibandingkan untuk mengidentifikasi konfigurasi yang memberikan performa terbaik.

Tahap selanjutnya yaitu evaluasi kinerja pengendali yang melibatkan analisis data hasil simulasi untuk menilai efektivitas setiap konfigurasi pengendali, serta peran filter dalam meningkatkan stabilitas dan responsivitas sistem. Selain itu, perbandingan antara pengendali dengan dan tanpa karakteristik droop dilakukan untuk melihat manfaat dari penggunaan fitur ini. Pada bagian terakhir yaitu menyimpulkan hasil analisis, mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan dari berbagai konfigurasi pengendali yang diuji, serta memberikan rekomendasi mengenai konfigurasi pengendali terbaik untuk sistem LFC tipe *reheat* dan saran untuk penelitian lanjutan.

3.2 Data Parameter

3. METODE RISET

3.1 Tahapan Penelitian

Nilai parameter yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

TABEL 3.1 Data Parameter Sistem LFC

Parameter	Nilai
T_{RH}	7.000 detik
T_{CH}	0.300 detik
T_G	0.2000 detik
F_{HP}	0.3000
R	0.0500
M	10.00
D	1.000
τ	0.025, 0.05, 0.75, 0.10

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini mendeskripsikan hasil tanggapan sistem LFC tipe *reheat* tanpa pengendali, dengan pengendali tunggal tanpa filter dan dengan pengendali tunggal menggunakan filter. Sistem akan diuji dengan menggunakan karakteristik *droop* dan tanpa menggunakan karakteristik *droop*.

4.1 Analisis Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem LFC

Bagian ini membahas hasil simulasi tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem LFC tipe *reheat* tanpa dan dengan menggunakan karakteristik *droop* yang diperlihatkan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 berikut.

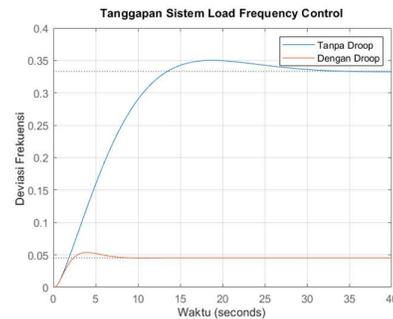
TABEL 4.1 Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem LFC Tipe *Reheat* Tanpa Karakteristik *Droop*

Parameter	Nilai
Waktu Naik	9,0979 s
Waktu Puncak	18,563 s
Waktu Keadaan Mantap	26,787 s
Nilai Puncak	0,3501
Lewatan Maksimum	5,0423%

TABEL 4.2 Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem LFC Tipe *Reheat* Dengan Karakteristik *Droop*

Parameter	Nilai
Waktu Naik	1,5714 s
Waktu Puncak	3,9633 s
Waktu Keadaan Mantap	7,7648 s
Nilai Puncak	0,0537 s
Lewatan Maksimum	18,122%

Grafik tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem LFC tipe *reheat* tanpa dan dengan karakteristik *droop* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem LFC Tanpa Pengendali

Berdasarkan Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, terlihat bahwa untuk waktu naik, terdapat perbedaan signifikan dimana tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC dengan menggunakan karakteristik *droop* menunjukkan waktu naik yang jauh lebih cepat. Untuk waktu puncak, tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC dengan karakteristik *droop* juga lebih cepat dibandingkan sistem LFC tanpa karakteristik *droop*. Efisiensi ini menunjukkan bahwa sistem LFC dengan karakteristik *droop* lebih mampu menangani perubahan. Sementara itu, untuk waktu keadaan mantap, tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC dengan karakteristik *droop* juga lebih singkat, menandakan bahwa sistem lebih cepat mencapai stabilitas.

Pada nilai puncak, tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC dengan karakteristik *droop* memiliki nilai puncak yang lebih rendah, hal tersebut menunjukkan bahwa tanggapan terhadap gangguan lebih terkendali. Namun, untuk nilai lewatan maksimum, sistem LFC dengan karakteristik *droop* memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa karakteristik *droop*. Berdasarkan analisis ini, dapat dilihat bahwa penggunaan karakteristik *droop* pada sistem LFC tipe *reheat* lebih efektif dan memberikan pengaruh signifikan dalam hal waktu naik, waktu puncak, dan waktu keadaan mantap, meskipun terdapat peningkatan pada nilai lewatan maksimum.

4.2 Kriteria Perancangan

Kriteria perancangan merupakan nilai patokan terhadap konfigurasi sistem. Kriteria perancangan didapatkan dari hasil analisis peralihan pada sistem kendali LFC tanpa menggunakan pengendali.

TABEL 4.3 Kriteria Perancangan

Kriteria	Nilai
----------	-------

Waktu Naik	< 9,0000 s
Waktu Puncak	< 10,000 s
Waktu Keadaan Mantap	< 9,0000 s
Nilai Puncak	< 1,1
Lewatan Maksimum	< 20%

dikarenakan filter dapat membantu untuk mengurangi gangguan dan menstabilkan tanggapan sistem.

4.3 Analisis Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem LFC Tipe *Reheat* Dengan Konfigurasi Pengendali Tanpa Karakteristik *Droop*

Bagian ini memperlihatkan hasil simulasi tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem LFC tipe *reheat* menggunakan pengendali tunggal tanpa dan dengan filter serta tanpa karakteristik *droop*. Untuk hasil simulasi tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem LFC tipe *reheat* dengan pengendali tunggal tanpa dan dengan filter serta tanpa karakteristik *droop* diperlihatkan pada Tabel 4.4 berikut.

TABEL 4.4 Hasil Simulasi Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem LFC Tipe *Reheat*

Konfigurasi	P	PI	PD	PID	PDF	PIDF
Tanpa Filter	✗	✗	✓	✗	✓	✗
Filter ($\tau = 0,025$)	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Filter ($\tau = 0,05$)	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Filter ($\tau = 0,075$)	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Filter ($\tau = 0,10$)	✓	✗	✗	✗	✗	✗

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 4.4, dapat dilihat bahwa karakteristik *droop* memerikan peran penting dalam pengendalian frekuensi dan daya pada sistem LFC tipe *reheat*. Hal tersebut dikarenakan karakteristik *droop* memungkinkan sistem untuk secara otomatis mengatur daya keluaran dengan penurunan frekuensi sehingga dapat menjaga stabilitas frekuensi. Ketika karakteristik *droop* dihilangkan, sistem kehilangan mekanisme otomatis untuk menjaga keseimbangan antara pembangkit dan beban, sehingga memerlukan kendali manual yang lebih kompleks.

Pada konfigurasi dengan pengendali Proporsional (P) tanpa menggunakan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya karakteristik *droop* yang dapat mengurangi daya keluaran seiring penurunan frekuensi. Selain itu, pengendali Proporsional (P) juga hanya menggunakan informasi proporsional. Pada konfigurasi dengan pengendali Proporsional (P) menggunakan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut

Pada konfigurasi dengan pengendali PI tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC tipe *reheat* tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan akumulasi kesalahan pada komponen integral menyebabkan osilasi berlebih. Tidak adanya karakteristik *droop* juga membuat sistem sulit membatasi keluaran daya. Pada konfigurasi dengan pengendali PI dengan menggunakan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem juga tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan filter memperlambat tanggapan elemen integral, sehingga memperburuk kemampuan sistem dalam menjaga keseimbangan frekuensi secara otomatis.

Pada konfigurasi dengan pengendali PD tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC tipe *reheat* memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan pada elemen derivatif (D) memberikan tanggapan perubahan yang cepat. Pada konfigurasi dengan pengendali PD menggunakan filter, tanggapan sistem tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan filter memperlambat tanggapan derivatif, sehingga mengurangi efektivitas pengendali PD dalam mengatasi perubahan frekuensi dengan cepat.

Pada konfigurasi dengan pengendali PID tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan tanpa karakteristik *droop*, pengendali PID mengalami permasalahan antara elemen integral (I) dan derivatif (D), sehingga terjadi lewatan maksimum yang tinggi. Pada konfigurasi dengan pengendali PID menggunakan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem juga tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan filter yang memperlambat tanggapan pada sistem.

Pada konfigurasi dengan pengendali PDF tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan elemen derivatif (D) dan filter pada elemen tersebut cukup untuk mengurangi gangguan. Pada konfigurasi dengan pengendali PDF dengan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan filter tambahan menyebabkan terjadinya gangguan pada tanggapan elemen derivatif (D) yang sudah memiliki filter internal.

Pada konfigurasi dengan pengendali PIDF tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya karakteristik *droop*. Pada konfigurasi dengan pengendali PIDF dengan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC juga tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan filter tambahan menyebabkan penundaan tanggapan pada elemen derivatif (D) dan integral (I). sehingga sistem tidak dapat menanggapi perubahan frekuensi dengan cepat dan efektif.

4.4 Analisis Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem LFC Tipe *Reheat* Dengan Pengendali dan Dengan Karakteristik *Droop*

Bagian ini memperlihatkan hasil simulasi tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem LFC tipe *reheat* menggunakan pengendali tanpa dan dengan filter serta dengan karakteristik *droop*. Untuk hasil simulasi tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem LFC tipe *reheat* dengan pengendali tanpa dan dengan filter serta dengan karakteristik *droop* diperlihatkan pada Tabel 4.5 berikut.

TABEL 4.5 Hasil Simulasi Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem LFC Tipe *Reheat*

Konfigurasi	P	PI	PD	PID	PDF	PIDF
Tanpa Filter	✗	✗	✗	✓	✗	✓
Filter ($\tau = 0,025$)	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Filter ($\tau = 0,05$)	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Filter ($\tau = 0,075$)	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Filter ($\tau = 0,10$)	✗	✓	✗	✓	✗	✓

Berdasarkan Tabel 4.5, pada konfigurasi pengendali tanpa filter, terdapat 2 pengendali yang memenuhi kriteria perancangan yaitu pengendali PID dan PIDF. Pada konfigurasi pengendali menggunakan filter, terdapat 3 pengendali yang memenuhi kriteria perancangan yaitu, pengendali PI, PID dan PIDF.

Pada pengendali Proporsional (P) tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan pengendali Proporsional (P) hanya menanggapi kesalahan deviasi frekuensi tanpa mengakumulasi kesalahan atau perubahan laju. Pada pengendali Proporsional (P) menggunakan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC juga tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan filter yang diterapkan tidak

secara signifikan meningkatkan kinerja pengendali Proporsional (P).

Pada pengendali PI tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan tanggapan sistem yang lambat dikarenakan tidak adanya elemen derivatif (D). Pada pengendali PI dengan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC memenuhi kriteria perancangan. hal tersebut dikarenakan dengan penambahan filter, pengendali PI menjadi lebih efektif dalam menjaga stabilitas frekuensi.

Pada pengendali PD tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan tidak adanya elemen integral (I) yang berfungsi untuk mengurangi kesalahan. Pada pengendali PD dengan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC juga tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan filter tidak mampu mengatasi sinyal kesalahan karena tidak adanya elemen integral (I).

Pada pengendali PID tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan pengendali PID dapat menanggapi perubahan dengan cepat dan juga dengan adanya karakteristik *droop* yang dapat menjaga keseimbangan dan kestabilan. Pada pengendali PID dengan filter diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC juga memenuhi kriteria perancangan. Dengan adanya filter, kinerja pengendali PID menjadi semakin baik dan membuat kinerja sistem menjadi lebih stabil.

Pada pengendali PDF tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC tidak memenuhi kriteria perancangan. Sama seperti pengendali PD, pengendali PDF tidak dapat mengatasi kesalahan keadaan mantap dikarenakan tidak adanya elemen integral (I). Pada pengendali PDF dengan filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC juga tidak memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan filter tambahan tidak dapat mengatasi kesalahan keadaan mantap.

Pada pengendali PIDF tanpa filter, diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC memenuhi kriteria perancangan. Hal tersebut dikarenakan pengendali PIDF dapat menanggapi perubahan dengan baik. Pada pengendali PIDF dengan filter diperoleh informasi bahwa tanggapan deviasi frekuensi sistem LFC juga memenuhi kriteria

perancangan. Dengan adanya filter tambahan, kinerja pengendali PIDF menjadi lebih baik dan membuat kinerja sistem menjadi lebih stabil.

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Penggunaan pengendali dalam sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe *reheat* dengan karakteristik droop dapat meningkatkan kinerja sistem terhadap perubahan daya. Dari hasil simulasi, pengendali PID dan PIDF menunjukkan performa terbaik dalam menstabilkan deviasi frekuensi, baik tanpa atau dengan penggunaan filter. Pengendali dengan karakteristik *droop* lebih efektif karena dapat mengatur daya keluaran secara otomatis seiring penurunan frekuensi, yang membantu sistem mencapai stabilitas lebih cepat.

2. Penambahan filter pada pengendali dengan karakteristik *droop* juga terbukti dapat meredam osilasi berlebih, sehingga menghasilkan tanggapan yang lebih efisien. Secara keseluruhan, konfigurasi sistem LFC dengan pengendali PID dan PIDF dengan filter dan karakteristik *droop* mampu memberikan kinerja yang optimal dalam menjaga keseimbangan antara tanggapan cepat terhadap perubahan tanggapan jangka panjang.

5.2 Saran

1. Penggunaan pengendali dengan filter yang optimal. Disarankan untuk menerapkan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) dengan filter pada sistem Load Frequency Control (LFC) tipe *reheat*, terutama untuk kondisi beban yang bervariasi. Penggunaan filter terbukti dapat meredam osilasi dan memperbaiki stabilitas frekuensi, sehingga lebih efektif dalam aplikasi sistem kontrol.

2. Penerapan karakteristik droop untuk stabilisasi otomatis. Penggunaan karakteristik droop dalam sistem LFC sebaiknya dipertahankan atau bahkan ditingkatkan, karena fitur ini membantu pengendalian otomatis daya keluaran, yang penting untuk menjaga stabilitas sistem saat terjadi perubahan beban secara mendadak.

3. Eksperimen lebih lanjut pada variasi beban yang lebih kompleks. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi variasi beban yang lebih dinamis dan kondisi operasi yang lebih realistis. Hal ini untuk memastikan bahwa solusi pengendali yang diterapkan dapat bekerja efektif pada berbagai skenario operasional.

4. Pengembangan pengendali dengan kombinasi lebih lanjut. Mengingat keterbatasan masing-masing jenis pengendali yang diuji, disarankan untuk mengembangkan kombinasi pengendali yang lebih canggih, seperti adaptasi atau pengendali cerdas, yang

dapat mengintegrasikan kelebihan dari pengendali PID dan filter, serta memperbaiki kelemahan yang ada.

5. Pengujian sistem pada lingkungan fisik. Hasil dari simulasi sebaiknya dikonfirmasi melalui pengujian pada sistem fisik di lapangan. Pengujian ini dapat memberikan wawasan tambahan mengenai kinerja nyata dari pengendali dan karakteristik droop, sehingga hasil yang didapat lebih aplikatif dalam konteks industri.

6. Pengembangan teknologi filter yang lebih efisien. Pengembangan lebih lanjut dalam desain filter, termasuk parameter yang lebih fleksibel, dapat menjadi area penelitian berikutnya untuk memperbaiki performa pengendalian dan meredam gangguan frekuensi dengan lebih efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Saleh Al Amin, "Lampu LED Sebagai Alternatif Penghemat Energi Listrik Rumah Tangga," *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, vol. 8, Jul. 2021, [Online]. Available: www.teknika-ftiba.info
- [2] H. Dibyo Laksono, F. Retno Ningsih, and Fitrilina, "Simulasi dan Analisa Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Pilot Servo dan Kombinasi Pengendali Model Standar (Model Hidraulik)," *Jurnal Amplifier Mei*, vol. 13, 2023, doi: <https://doi.org/10.33369/jamplifier.v13i1.27591>.
- [3] M. Rafsanjani; Retno, A. Diantari, S. Tinggi, and T. Pln, "Studi Laju Penurunan Frekuensi Pada Sistem Kelistrikan Sumatera Bagian Utara Dengan Skema Pelepasan Beban," vol. 9, no. 2, 2019, doi: 10.33322/sutet.v9i2.584.
- [4] V. T. Wahyuni¹, B. Puguh Manunggal, and A. A. Melkias, "Analisis Setting Speed Droop dan Deadband Governor Unit 1 PLTA Maninjau Sebagai Pengaturan Frekuensi Pada Sistem 150 KV," *Jurnal Energi*, vol. 11, 2022, doi: <https://doi.org/10.35313/energi.v11i2.3912>.
- [5] Brilliantie Davira, R. Rusda, and Khairuddin Karim, "Analisis Kualitas Daya Listrik Gedung Direktorat Politeknik Negeri Samarinda," *PoliGrid*, vol. 5, no. 1, Feb. 2024, doi: 10.46964/poligrd.v5i1.20.
- [6] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 20 Tahun 2020 tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code)," Jakarta, Dec. 2020.
- [7] H. Dibyo Laksono, A. Widi Adriana, and J. Teknik Elektro, "Analisa Sistem Load Frequency Control dengan Metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG) dan Linear Quadratic Gaussian-Loop Transfer Recovery (LQG-LTR)," vol. 12, 2022.
- [8] M. Ranjan and R. Shankar, "A Literature Survey on Load Frequency Control Considering Renewable Energy Integration in Power System: Recent Trends and Future Prospects," *J Energy Storage*, vol. 45, p.

- 103717, 2022, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103717>.
- [9] H. Khairnar, G. B. Patil, S. Ghugare, B. More, S. Ushkewar, and M. Mali, "Load Frequency Control using PID Controller," in *2024 2nd International Conference on Sustainable Computing and Smart Systems (ICSCSS)*, 2024, pp. 190–195. doi: 10.1109/ICSCSS60660.2024.10625307.
- [10] Y. Güler, M. Nalbantoğlu, and İ. Kaya, "Cascade Controller Design Via Controller Synthesis for Load Frequency Control of Electrical Power Systems," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 32, no. 2, pp. 285–304, 2024, doi: 10.55730/1300-0632.4069.
- [11] A. D. Rahma, "Simulasi Dan Analisa Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Dengan Pidtune Model Standard (Analisa Domain Waktu)," Universitas Andalas, Padang, 2022.
- [12] A. B. Dewanto *et al.*, "Penerapan Kontroler ANFIS untuk Load Frequency Control," *BEES: Bulletin of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 133–138, Mar. 2023, doi: 10.47065/bees.v3i3.3174.
- [13] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [14] K. Prabha, *Power System Stability and Control*. McGraw-Gill, 1994.
- [15] H. D. Laksono and R. 'Aisya, "Frequency Domain Analysis of Load Frequency Control Using PIDTune Model Standard," *Andalas Journal of Electrical and Electronic Engineering Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 44–51, Jun. 2023, doi: 10.25077/ajeet.v3i1.38.
- [16] L. Heru Dibyo, *Pidtune Model Paralel Dan Model Standard*. Padang: LPPM - Universitas Andalas, 2021.
- [17] M. S. Ayas and E. Sahin, "FOPID Controller With Fractional Filter For An Automatic Voltage Regulator," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 90, p. 106895, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106895>.
- [18] Katsuhiko. Ogata, *Modern Control Engineering*. Prentice-Hall, 2010.
- [19] H. D. Laksono, *Perancangan dan Analisa Sistem Kendali dengan Berbagai Pengendali*. Padang: Andalas University Press, 2015.