

Analisis Kinerja Pengendali pada Sistem Load Frequency Control Tunggal dengan Variasi Droop dan Governor

**Heru Dibyo Laksono^{1*}; Dhea Rahmadani Putri¹; Mumuh Muharam¹;
Rizki Wahyu Pratama¹**

1. Teknik Elektro, Universitas Andalas, Jl. Dr. Mohammad Hatta, Limau Manis, Kec. Pauh, Kota Padang, Sumatera Barat 25175, Indonesia

**Email: herudibylaksono@eng.unand.ac.id*

Received: 26 Desember 2024 | Accepted: 18 September 2025 | Published: 18 September 2025

ABSTRACT

This study analyses the performance of various controllers on a single hydraulic LFC system with variations in the use of droop and governor on power transient response. Tests were conducted using several types of controllers, namely P, PI, PD, PID, PDF, and PIDF. Simulation results show that in the configuration with droop and governor, PD and PDF controllers fulfil the criteria of rise time and peak time, while PI, PID, and PIDF controllers effectively control overshoot. In the configuration with droop without governor, the PD, PID, PDF, and PIDF controllers fulfil all performance parameters, such as rise time, peak time, steady state time, and overshoot. These results show that the combination of derivative and filter components in the controller provides a faster and more stable response than the controller without these components.

Keywords: Load Frequency Control, PID Controller, Droop, Governor, Hydraulic System

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis kinerja berbagai pengendali pada sistem LFC hidrolik tunggal dengan variasi penggunaan droop dan governor terhadap respons transien daya. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beberapa jenis pengendali, yaitu P, PI, PD, PID, PDF, dan PIDF. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada konfigurasi dengan droop dan governor, pengendali PD dan PDF memenuhi kriteria waktu naik dan waktu puncak, sedangkan pengendali PI, PID, dan PIDF efektif mengendalikan overshoot. Pada konfigurasi dengan droop tanpa governor, pengendali PD, PID, PDF, dan PIDF memenuhi semua parameter performa, seperti waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, dan overshoot. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi komponen derivatif dan filter pada pengendali memberikan respons yang lebih cepat dan stabil dibandingkan dengan pengendali tanpa komponen tersebut.

Kata kunci: Load Frequency Control, Pengendali PID, Droop, Governor, Sistem Hidraulik

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan sehari-hari. Kualitas pasokan listrik yang stabil terutama dalam hal frekuensi sangat penting untuk menjaga kinerja optimal peralatan yang digunakan oleh konsumen. Sistem tenaga listrik terdiri dari pembangkit listrik yang menghasilkan energi dan beban yang memanfaatkan energi tersebut [1],[2]. Ketika terdapat pada beban, sistem tenaga listrik mengalami perubahan frekuensi yang dapat berdampak negatif jika tidak segera ditangani. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem pengendalian yang dapat menstabilkan frekuensi listrik. Salah satu sistem pengendalian yang digunakan adalah LFC [2]. Frekuensi harus ditetapkan pada 50Hz atau pada batas toleransi $\pm 2\%$ dari frekuensi normal untuk menjamin kualitas listrik yang baik. Maka dalam hal ini dibutuhkan sistem kendali LFC untuk mencegah perubahan frekuensi [3],[4].

Sistem kendali frekuensi atau LFC sangat baik untuk mengendalikan pasokan energi karena berfungsi untuk menyimpan perubahan frekuensi dan mengawasi ketidakstabilan frekuensi yang disebabkan oleh perubahan beban [5]. Frekuensi dan aliran daya di suatu area cenderung berubah ketika ada gangguan atau variasi beban, sehingga harus dikendalikan agar tetap stabil [6]. Dengan menggunakan LFC fluktuasi frekuensi pada sistem listrik yang disebabkan oleh perubahan beban tidak boleh melebihi batas toleransi [7],[8]. Sistem kendali LFC adalah salah satu bagian paling penting dalam sistem tenaga listrik dan sistem kontrol. LFC mengimbangi hasil tenaga yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik dan energi yang diharapkan konsumen untuk memberikan pasokan daya yang stabil dan berkualitas tinggi [9],[10]. Studi tentang penyimpanan energi magnetik *superconducting* mendukung teknologi LFC. Studi ini menunjukkan bahwa penyimpanan energi magnetik *superconducting* dapat meningkatkan stabilitas dan respons sistem secara keseluruhan [4],[5].

Salah satu metode yang digunakan oleh sistem LFC adalah pengendali kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) [8],[13]. Karena kemudahan penggunaan dan kinerjanya yang luar biasa, pengendali PID masih menjadi pilihan utama di industri ketenagalistrikan saat ini [6],[7]. Parameter pengendali seperti konstanta proporsional (K_p), konstanta integral (K_i), dan konstanta turunan (K_d) digunakan untuk menghitung nilai keluaran pengendali PID [15],[16]. Aksi katup mekanis diberikan oleh pengontrol PID berdasarkan besarnya kesalahan yang dihasilkan. Seringkali, kontroler PID digunakan dalam sistem LFC tetapi kontroler ini memiliki kekurangan dalam hal kerja dinamis dan bisa menyebabkan ketidakstabilan apabila nilai *gain* tidak sesuai [8],[16],[19].

Penelitian ini bertujuan dalam menganalisis kinerja sistem LFC pada pembangkit listrik tenaga air dengan konfigurasi pengendali tunggal terhadap masukan daya. Penggunaan *governor* dalam sistem ini bertujuan untuk mempertahankan frekuensi tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban dan hasil analisis dapat dilihat melalui performa parameter transien seperti waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, dan lewat maksimum. Selain itu, penelitian bertujuan untuk membandingkan performa sistem yang menggunakan pengendali tunggal dengan *governor* terhadap masukan daya dengan kriteria perancangan sebagai acuan.

Penelitian ini memiliki batasan untuk memastikan fokus analisis performa sistem LFC pada sistem tenaga tipe hidroelektrik dengan menggunakan pengendali PID dan

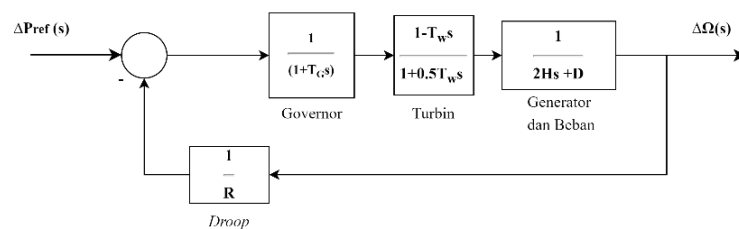
filter. Batasan tersebut diperlukan agar penelitian tetap terarah dan sesuai dengan tujuan yang dicapai. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

- Penelitian hanya berfokus pada analisis performa sistem LFC tipe hidrolik menggunakan kombinasi pengendali PID
- Respons sistem yang ditinjau dibatasi pada masukan daya pada turbin hidrolik dengan analisis yang mencakup kondisi dengan dan tanpa karakteristik *droop* pada dan tanpa *governor*.
- Penelitian hanya menggunakan simulasi MATLAB untuk mengevaluasi respons transien sistem, seperti waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, dan lewatan maksimum.

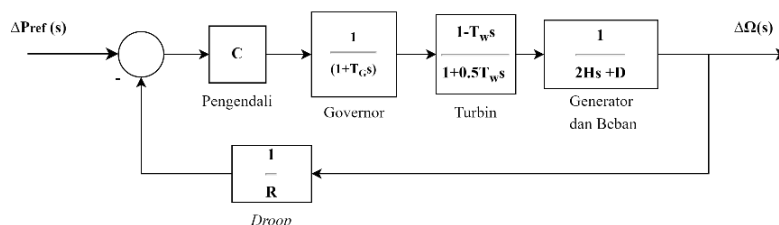
2. METODE/PERANCANGAN PENELITIAN

2.1. Load Frequency Control Pengendali Tunggal Menggunakan Governor

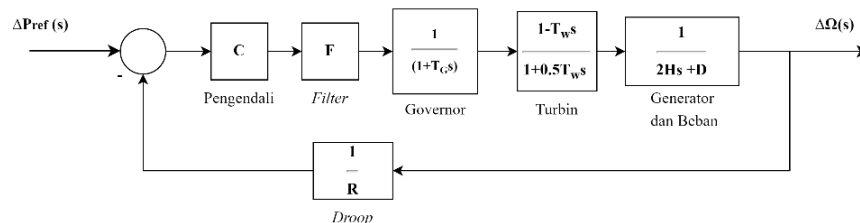
Simulasi MATLAB digunakan untuk menganalisis performa pengendali tunggal pada sistem LFC hidrolik terhadap masukan daya. Blok diagram sistem digambarkan untuk menunjukkan aliran kontrol, termasuk detail parameter yang diuji, seperti waktu naik, waktu puncak, waktu mantap, dan lewatan maksimum.



Gambar 1. Blok Diagram LFC Tipe Hidraulik tanpa Pengendali Terhadap Masukan Daya Menggunakan Governor



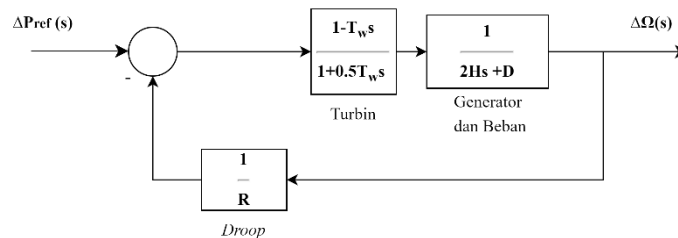
Gambar 2. Blok Diagram LFC Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal Terhadap Masukan Daya Menggunakan Governor



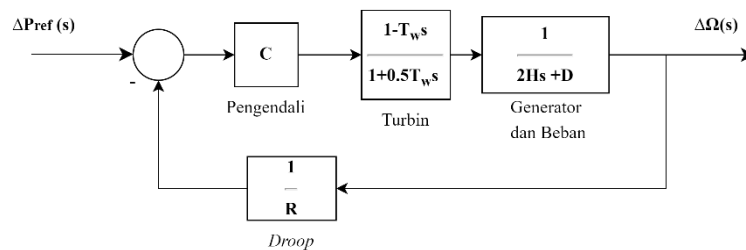
Gambar 3. Blok Diagram LFC Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal Menggunakan Filter Terhadap Masukan Daya Menggunakan Governor

2.2. Load Frequency Control Pengendali Tunggal tanpa Governor

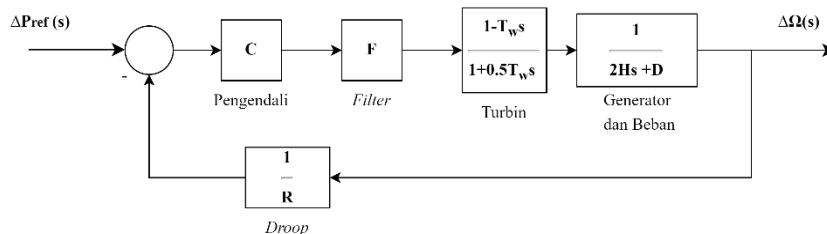
Simulasi MATLAB digunakan untuk menganalisis performa pengendali tunggal pada sistem LFC hidrolik terhadap masukan daya. Blok diagram sistem digambarkan untuk menunjukkan aliran kontrol, termasuk detail parameter yang diuji, seperti waktu naik, waktu puncak, waktu mantap, dan lewatan maksimum.



Gambar 4. Blok Diagram LFC Tipe Hidraulik tanpa Pengendali Terhadap Masukan Daya tanpa Governor



Gambar 5. Blok Diagram LFC Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal Terhadap Masukan Daya tanpa Governor



Gambar 6. Blok Diagram LFC Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal Menggunakan Filter Terhadap Masukan Daya tanpa Governor

2.3. Kriteria Perancangan

Tabel 1. Tipe-Tipe Pengendali PIDTune Model Standard[20]

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

Proporsional-Integral-Diferensial dengan *filter* orde pertama pada bagian Diferensial (PIDF)

$$K_p + \frac{K_p}{T_i s} + \frac{K_p T_d s}{N s + 1}$$

Tabel 2. Kriteria Perancangan Analisa Peralihan *Load Frequency Control* Tipe Hidraulik

Kriteria Perancangan	Nilai Perancangan
Waktu Naik (t_r)	<2 s
Waktu Puncak (t_p)	<4 s
Waktu Keadaan Mantap (t_s)	<6 s
Nilai Puncak (y_p)	<0,055
Nilai Lewatan Maksimum (M_p)	<20%

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian hasil dan analisis, dapat dilihat bahwa penggunaan *governor* dalam sistem kendali *LFC* tipe hidraulik memiliki peran penting dalam meningkatkan performa transien sistem. Penggunaan karakteristik *droop* pada *governor* menghasilkan stabilitas yang lebih baik karena dapat mengurangi *overshoot*, meskipun dengan sedikit tambahan waktu pada waktu puncak dan waktu keadaan mantap. Tanpa *droop*, sistem cenderung memiliki waktu respons yang lebih cepat tetapi berisiko pada *overshoot* yang dapat mempengaruhi kestabilan jangka panjang. Adapun hasil dari analisis tersebut didapat dari perbandingan kriteria yang ditetapkan.

Tabel 3. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal Terhadap Masukan Daya tanpa Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor*

Pengendali i	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	2,16	6,344	10,74	0,98	12,697	0,60	3,06	11,32	0,98	59,263
			2	9		7	9	7	6	
PI	13,07	30,31	52,02	1,11	11,087	1,73	4,61	11,12	1,05	5,165
	5	2	2	1		3	8	6	2	
PD	0,597	6,938	3,882	0,93	1,949	0,30	0	2,084	3,27	6,417
			5			5			5	
PID	13,64	31,36	51,92	1,07	7,399	2,32	5,61	4,454	1,01	1,765
	8	7	6	4		8	8		8	
PDF	1,699	5,209	7,817	1,00	14,361	0,10	1,19	5,748	1,46	140,32
			9			1	1		8	
PIDF	13,64	31,27	52,08	1,07	7,648	1,98	5,01	10,68	1,03	3,875
	6	9	0	7		4	5	4	9	

Berdasarkan Tabel 3, dalam penggunaan *governor*, dapat dilihat bahwa semua pengendali memenuhi nilai lewatan maksimum dan hanya pengendali PD dan PDF yang memenuhi parameter waktu naik. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali PD dan PDF efektif dalam mempercepat waktu naik dikarenakan adanya komponen derivatif yang meredam perubahan cepat dan mengurangi osilasi. Sedangkan, pada nilai lewatan maksimum semua pengendali memenuhi dikarenakan adanya komponen integral (I) yang mampu menekan *overshoot*. Adanya *governor* mampu menjaga stabilitas sistem sehingga pengendali mampu mengendalikan *overshoot* dengan baik. Pada penggunaan tanpa *governor*, dapat dilihat pada waktu naik semua pengendali memenuhi waktu naik kecuali pengendali PID. Pada waktu puncak, pengendali P, PD,

dan PDF memenuhi karena adanya respons cepat dari komponen P dan efek redaman dari komponen D. Adanya komponen derivatif yang menekan osilasi dan komponen integral yang mengurangi kesalahan *steady-state*, maka pengendali PD, PID, dan PDF memenuhi pada waktu keadaan mantap. Nilai lewatan maksimum bisa dikontrol oleh pengendali tersebut karena memiliki kombinasi kontrol yang baik untuk menjaga respons stabil dan mengurangi lonjakan berlebih.

Tabel 4. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal Terhadap Masukan Daya dengan Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor*

Pengendali i	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PI	4,309	32,213	17,398	0,999	0	0,001	0,002	0,006	1,244	24,402
PD	0,009	1,291	11,936	1,238	3229,6	0,002	0,005	0,003	1,002	0
PID	3,58	8,235	15,592	1,01	0,963	0,001	0,003	0,008	1,117	11,706
PDF	0,005	1,338	NaN	1,235	6420,8	0,002	0,005	0,003	1,002	0
PIDF	3,457	8,592	16,473	1,062	6,238	0,001	0,002	0,006	1,186	18,595

Berdasarkan Tabel 4, dalam penggunaan *governor*, pengendali PD dan PDF memenuhi parameter waktu naik dan waktu puncak karena efek derivatif yang mempercepat respons. Sedangkan untuk lewatan maksimum pengendali PI, PID, dan PIDF yang memenuhi karena efek integral yang mampu mengendalikan *overshoot* yang mengurangi kesalahan *steady-state*. Pada penggunaan tanpa *governor*, pengendali PD, PID, PDF, dan PIDF memenuhi semua parameter karena kombinasi komponen P, I, D dan *filter* yang membuat pengendali tersebut menunjukkan respons cepat dan stabil. Untuk pengendali PI, kurang efektif dalam mengendalikan *overshoot* karena adanya komponen integral dibandingkan dengan pengendali lain yang memiliki komponen derivatif.

Tabel 5. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal dan *Filter* Terhadap Masukan Daya tanpa Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor* ($\tau = 0,025$)

Pengendali i	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	2,139	6,346	10,67	0,99 6	13,482	0,60 9	3,13 7	11,57 1	1,00 2	61,94
PI	13,03 8	30,24 7	51,97 8	1,11 2	11,158	1,70 7	4,60 8	11,05 2	1,06 4	6,425
PD	0,566	2,021	5,349	0,97 2	5,965	0,12 5	0,14 7	1,959	1,85 1	30,182
PID	13,60 6	31,32 5	51,89 1	1,07 5	7,452	2,27 6	5,60 2	6,134	1,02 5	2,482
PDF	1,686	5,189	7,867	1,01 9	15,469	0,11 1	1,28	7,997	1,53 7	151,63
PIDF	13,60 4	31,22 6	52,04 4	1,07 7	7,703	1,95 2	5,14 6	10,74 6	1,04 9	4,933

Tabel 6. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal dan *Filter* Terhadap Masukan Daya tanpa Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor* ($\tau = 0,05$)

Pengendali i	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	2,122	6,346	10,60	1,00	14,289	0,61	3,19	13,68	1,01	64,378
			8	3		1	9	6	8	
PI	13,00	30,25	51,93	1,11	11,230	1,68	4,59	11,00	1,07	7,652
	1	4	3	2		4	8	7	7	
PD	0,558	2,172	5,953	1,01	10,317	0,12	0,21	2,124	1,46	63,012
				2			2		3	
PID	13,56	31,23	51,85	1,07	7,507	2,22	5,58	6,455	1,03	3,25
	3	9	5	5		8	6		3	
PDF	1,671	5,261	7,915	1,02	16,598	0,12	1,42	9,64	1,54	153,66
				9		2	3		9	
PIDF	13,56	31,18	52,00	1,07	7,758	1,92	5,12	10,81	1,06	6,011
	2	9	8	8		3	9	7		

Tabel 7. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal dan *Filter* Terhadap Masukan Daya tanpa Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor* ($\tau = 0,075$)

Pengendali i	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	2,107	6,343	10,55	1,01	15,111	0,61	3,25	14,11	1,03	66,573
			5			4		1	1	
PI	12,96	30,21	51,88	1,11	11,303	1,66	4,77	10,98	1,08	8,855
	4	9	9	3		5	9	8	9	
PD	0,561	2,254	6,34	1,04	14,018	0,13	0,25	3,337	1,23	77,812
				6		5	5		9	
PID	13,52	31,16	51,82	1,07	7,562	2,18	5,57	6,687	1,04	4,065
	1	9	6			6			1	
PDF	1,663	5,308	7,972	1,03	17,712	0,13	1,53	10,56	1,53	150,98
				8		7	5	3	3	
PIDF	13,52	31,16	51,97	1,07	7,814	1,9	5,11	10,89	1,07	7,080
		9	1	8		3	3	8	1	

Tabel 8. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal dan *Filter* Terhadap Masukan Daya tanpa Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor* ($\tau = 0,1$)

Pengendali	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	2,094	6,344	10,512	1,017	15,944	0,622	3,289	14,456	1,043	68,488
PI	12,927	30,141	51,845	1,1138	11,377	1,652	4,768	10,993	1,101	10,125
PD	0,572	2,363	6,662	1,074	17,111	0,154	1,295	3,843	1,173	84,573
PID	13,479	31,117	51,784	1,076	7,618	2,149	5,555	6,879	1,049	4,923
PDF	1,658	5,349	8,031	1,048	18,814	0,152	1,637	11,314	1,505	146,4
PIDF	13,479	31,089	51,935	1,079	7,871	1,883	5,242	10,987	1,081	8,144

Berdasarkan Tabel 5 – Tabel 8, dapat dilihat bahwa semua pengendali memenuhi parameter nilai lewatan maksimum pada semua nilai τ . Pada nilai $\tau = 0,025 - 0,05$, pengendali PD memenuhi semua parameter baik dari waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, dan nilai lewatan maksimum. Hal ini disebabkan karena pada nilai τ yang rendah, *filter* tidak memperlambat respons secara signifikan yang memungkinkan komponen derivatif untuk bekerja secara optimal dalam mencapai respons yang cepat dan stabil. Namun, pada nilai τ yang lebih tinggi, efek *filter* memperlambat respons sistem sehingga waktu keadaan mantap tidak tercapai sesuai dengan kriteria yang ditetapkan. Sedangkan, pada waktu naik hanya pengendali PDF yang memenuhi pada semua nilai τ . Hal ini dikarenakan komponen *filter* pada τ tinggi menurunkan efek diferensial sehingga kinerja keseluruhan pada waktu keadaan mantap dan lewatan maksimum terpengaruh.

Pada penggunaan tanpa *governor*, dapat dilihat bahwa tidak ada pengendali yang memenuhi keseluruhan kriteria perancangan dari semua *filter*. Pada waktu naik, hanya PID yang tidak memenuhi. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali P dan PD lebih responsif dalam mengatasi perubahan awal beban daya. Pada waktu puncak, hanya pengendali P, PD, dan PDF yang memenuhi. Hal tersebut menunjukkan bahwa kombinasi komponen Derivatif (D) memberikan respons cepat dan dapat meredam osilasi serta membantu mencapai puncak lebih cepat. Pada waktu keadaan mantap hanya pengendali PD yang memenuhi. Hal ini disebabkan pengendali PD mampu mempertahankan stabilitas yang cukup baik meskipun tanpa karakteristik *droop*. Pada nilai lewatan maksimum, hanya pengendali PI, PID, dan PIDF yang memenuhi. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi komponen Integral (I) dengan derajat redaman dapat membantu mengendalikan *overshoot* secara lebih efektif.

Tabel 9. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal dan *Filter* Terhadap Masukan Daya dengan Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor* ($\tau = 0,025$)

Pengendali	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PI	4,285	31,859	17,45	0,999	0	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PD	0,009	1,410	NaN	1,280	3344,9	0,005	0,013	0,208	1,796	78,758
PID	3,558	8,158	15,657	1,015	1,457	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PDF	0,005	1,349	NaN	1,267	6588,1	0,005	0,013	0,208	1,796	78,758
PIDF	3,449	8,704	16,564	1,068	6,753	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN

Tabel 10. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal dan *Filter* Terhadap Masukan Daya dengan Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor* ($\tau = 0,05$)

Pengendali	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PI	4,262	31,495	17,505	0,999	0	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PD	0,01	1,489	NaN	1,294	3380,1	0,006	0,018	0,473	1,866	85,708
PID	3,545	8,324	15,725	1,019	1,938	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PDF	0,005	1,498	NaN	1,288	6702,2	0,006	0,018	0,473	1,866	85,708
PIDF	3,44	8,808	16,66	1,072	7,237	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN

Tabel 11. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal dan *Filter* Terhadap Masukan Daya dengan Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor* ($\tau = 0,075$)

Pengendali	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PI	4,243	31,12	17,564	0,999	0	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PD	0,011	1,573	NaN	1,286	3359,3	0,008	0,022	0,843	1,901	89,231
PID	3,529	8,241	15,796	1,024	2,420	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PDF	0,006	1,579	NaN	1,279	6653,4	0,008	0,022	0,843	1,901	89,231
PIDF	3,43	8,904	16,757	1,077	7,701	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN

Tabel 12. Informasi Analisis Peralihan Tipe Hidraulik dengan Pengendali Tunggal dan *Filter* Terhadap Masukan Daya dengan Karakteristik *Droop*: Menggunakan *Governor* dan tanpa *Governor* ($\tau = 0,1$)

Pengendali	Menggunakan <i>Governor</i>					tanpa <i>Governor</i>				
	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)	t_r (s)	t_p (s)	t_s (s)	y_p	M_p (%)
P	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PI	4,224	30,735	17,625	0,999	0	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PD	0,012	1,649	23,326	1,266	3307,3	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PID	3,517	8,396	15,871	1,029	2,897	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PDF	0,006	1,654	23,487	1,259	6546,5	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
PIDF	3,427	8,782	16,859	1,082	8,174	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN

Berdasarkan Tabel 9 – Tabel 12, dalam penggunaan *governor*, pengendali PD dan PDF memenuhi parameter waktu naik dan waktu puncak karena komponen derivatif membantu mempercepat respons awal disaat *droop* dan *filter* memperlambat respon total. Sedangkan, nilai lewatan maksimum pengendali PI, PID dan PIDF yang memenuhi karena memiliki komponen integral mampu menahan dan mengontrol *overshoot* yang berlebihan. Namun, pada *filter* τ yang tinggi dapat memperpanjang waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai keadaan mantap sehingga tidak ada pengendali yang mampu memenuhi kriteria waktu keadaan mantap pada semua nilai τ yang ada. Pada penggunaan tanpa *governor*, tidak ada pengendali yang memenuhi keseluruhan kriteria perancangan. Pada waktu naik, waktu puncak, dan waktu keadaan mantap hanya pengendali PD dan PDF dengan $\tau = 0,025 - 0,075$ yang memenuhi. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali tersebut memiliki kemampuan yang baik dalam merespons cepat dan mempertahankan stabilitas *transien* hingga mencapai keadaan mantap. Adanya komponen Derivatif (D) dapat meredam osilasi dan mempercepat waktu pemulihan meskipun tanpa bantuan *governor*. Terjadinya ketidakstabilan atau ketidakmampuan untuk menghasilkan respons yang terukur menyebabkan nilai NaN dan inf yang diakibatkan oleh efek *droop* yang tidak dibantu dengan redaman yang memadai.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan variasi pengendali pada sistem LFC hidraulik dengan dan tanpa *droop* serta *governor* memengaruhi kinerja respons *transien*. Pada sistem dengan *droop* dan *governor*, pengendali PD dan PDF memberikan waktu naik dan waktu puncak yang lebih cepat, sementara PI, PID, dan

PIDF efektif mengendalikan *overshoot*. Dalam konfigurasi tanpa *governor*, pengendali dengan komponen derivatif dan filter, seperti PD, PDF, PID, dan PIDF, menunjukkan kinerja optimal dalam memenuhi seluruh parameter respons *transien*. Hasil ini menegaskan pentingnya pemilihan pengendali yang tepat untuk mencapai kestabilan frekuensi dan mengurangi osilasi pada sistem LFC hidrolik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan yang telah membantu menyelesaikan penelitian ini. Secara khusus, penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Andalas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. R. Ningsih, "Simulasi Dan Analisa Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Dengan Pilot Servo Dan Kombinasi Pengendali PIDTune Model Standar (Model Hidrolik)," *J. Ilmu Pendidik.*, vol. 7, no. 2, pp. 809–820, 2020.
- [2] V. T. W. Vina, "Analisis Setting Speed Droop dan Deadband Governor Unit 1 PLTA Maninjau Sebagai Pengaturan Frekuensi pada Sistem 150 KV," *J. Tek. Energi*, vol. 11, no. 2, pp. 25–29, 2023, doi: 10.35313/energi.v11i2.3912.
- [3] A. J. Pakpahan and Herlambang Setiadi, "Optimal Control Design for Frequency Regulation in Electric Power System With Low Inertia," *J. Adv. Technol. Multidiscip.*, vol. 3, no. 1, pp. 26–36, 2024, doi: 10.20473/jatm.v3i1.59984.
- [4] D. Marsudi, "Operasi Sistem Tenaga Listrik," *Graha Ilmu*, no. April, pp. 2–5, 2006.
- [5] R. Tambunan, ... K. K.-T. J. I., and U. 2014, "Simulasi Pelepasan Beban (Load Shedding) pada Sistem Jaringan Distribusi Tragi Sibolga 150/20 KV (Studi Kasus pada Penyulang Tragi Sibolga, SUMUT)," *Ejournal3.Undip.Ac.Id*, vol. 3, no. 2, pp. 2302–9927, 2014, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient/article/view/5508>
- [6] N. A. Orka, S. S. Muhaimin, M. N. S. Shahi, and A. Ahmed, *An Enhanced Gradient Based Optimized Controller for Load Frequency Control of a Two Area Automatic Generation Control System*, vol. 1069. 2023. doi: 10.1007/978-3-031-16832-1_5.
- [7] T. Siswanto, D. Hendra Kusuma, and A. Raikhani, "Desain Optimal Load Frequency Control (Lfc) Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (Pltmh) Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization (Pso)," *Pros. SENTIA – Politek. Negeri Malang*, vol. 6, pp. 35–39, 2016.
- [8] P. Kundur, "Power System Stability and Control," *Power System Stability and Control*. 2007. doi: 10.1201/9781420009248.
- [9] S. Y. Bhuran and S. P. Jadhav, "Design of PID, IMC and IMC based PID Controller for Hydro Turbine Power System of Non-minimum Phase Dynamics," *J. Robot. Control*, vol. 5, no. 2, pp. 416–426, 2024, doi: 10.18196/jrc.v5i2.21342.
- [10] A. K. Baliarsingh, S. K. Mohapatra, and P. M. Dash, "Fractional Order PD(1+ PI) Controller for Frequency Control of Power System with Renewable Sources and Electric Vehicle," *Electrica*, vol. 24, no. 2, pp. 406–424, 2024, doi: 10.5152/electrica.2024.23143.
- [11] D. P. K. dan I. J. Nagrath, *Modern Power Systems Analysis*. 2022. doi:

- 10.1201/9781003207429-6.
- [12] E. D. Cahyono, "Simulasi Rancang Bangun Alat pH Balancer Berbasis Logika Fuzzy Menggunakan Arduino Uno," *SinarFe7*, pp. 296–301, 2021, [Online]. Available: <http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=2811419%5C&val=25026%5C&title=Simulasi Rancang Bangun Alat pH Balancer Berbasis Logika Fuzzy Menggunakan Arduino Uno>
- [13] B. Maharmi, I. Cholid, Syafii, and E. H. Arya, "Optimization of speed droop governor operation at the gas turbine cogeneration unit," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 33, no. 1, pp. 20–30, 2024, doi: 10.11591/ijeecs.v33.i1.pp20-30.
- [14] N. G. Hingorani dan L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2000.
- [15] D. V. Doan, K. Nguyen, and Q. V. Thai, "Load-Frequency Control of Three-Area Interconnected Power Systems with Renewable Energy Sources Using Novel PSO~PID-Like Fuzzy Logic Controllers," *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 12, no. 3, pp. 8597–8604, 2022. doi: 10.48084/etasr.4924.
- [16] M. Mokhtar, M. I. Marei, M. A. Sameh, and M. A. Attia, "An Adaptive Load Frequency Control for Power Systems with Renewable Energy Sources," *Energies*, vol. 15, no. 2, pp. 1–22, 2022, doi: 10.3390/en15020573.
- [17] 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," p. 84, 2015, [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/52255/>
- [18] S. Datta and D. Chakraborty, "An LMI based PID controller for load frequency control in power system," *Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl.*, no. August 2013, pp. 655–660, 2013, doi: 10.1109/CCA.2013.6662824.
- [19] I. A. Khan, H. Mokhlis, N. N. Mansor, H. A. Illias, L. Jamilatul Awal, and L. Wang, "New trends and future directions in load frequency control and flexible power system: A comprehensive review," *Alexandria Eng. J.*, vol. 71, pp. 263–308, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.03.040.
- [20] H. D. Laksono, *Pidtune Model Paralel Dan Model Standard*. LPPM - Universitas Andalas, 2021.