

Simulasi dan Analisis *Load Frequency Control* Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* dan *Zero/Pole Cancellation*

Heru Dibyo Laksono¹; Fauzi Rahmadani²

^{1,2} Departemen Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, 25163 Padang, Sumatera Barat, Indonesia

*Corresponding author, e-mail: herudibyolaksono@eng.unand.ac.id

Abstrak

Sistem kelistrikan merupakan salah satu aspek penting dalam kehidupan sehari-hari karena hampir semua aktivitas manusia bergantung pada energi listrik. Ketidakstabilan frekuensi bisa terjadi akibat terhentinya operasi unit pembangkit besar atau jalur penghubung (*tie line*), serta ketidakseimbangan antara yang diproduksi dan daya yang diperlukan oleh beban. Agar tidak berpotensi merusak peralatan listrik, diperlukan analisis dan tanggapan untuk mengontrol penggunaan beban dengan menggunakan *Load Frequency Control* (LFC) yang dapat menjaga keseimbangan dan bertujuan untuk menjaga frekuensi serta daya aktif pada nilai nominalnya disaat terjadi perubahan beban. Penelitian ini berfokus untuk merancang pengendali yang diterapkan pada sistem LFC menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Zero/Pole Cancellation* (ZPC) untuk mendapatkan konstanta pengendali yang sesuai. Uji sistem LFC dilakukan dengan perangkat lunak Matlab. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendali optimal pada LFC tipe *Reheat* yang memenuhi kriteria perancangan..

Keyword: *Load Frequency Control, Sistem Kendali, Particle Swarm Optimization, Zero/Pole Cancellation, Matlab.*

Abstract

The electricity system is one of the most important aspects of daily life because almost all human activities depend on electrical energy. Frequency instability can occur due to the cessation of operation of large generating units or tie lines, as well as the imbalance between the power produced and the power required by the load. In order not to potentially damage electrical equipment, it is necessary to analyze and respond to control load usage by using Load Frequency Control (LFC) that can maintain balance and aims to maintain frequency and active power at their nominal values when load changes occur. This research focuses on designing a PID controller that is applied to the LFC system using Particle Swarm Optimization (PSO) and Zero/Pole Cancellation (ZPC) methods to obtain the appropriate controller constants. The LFC system test is conducted with Matlab software. The results show that the optimal controller on the Reheat type LFC that meets the design criteria.

Keywords: *Load Frequency Control, Control System, Particle Swarm Optimization, Zero/Pole Cancellation, Matlab.*

PENDAHULUAN

Sistem kelistrikan merupakan salah satu aspek penting dalam kehidupan sehari-hari karena hampir semua aktivitas manusia bergantung pada energi listrik. Frekuensi standar sistem listrik Indonesia adalah 50 Hz dengan tingkat toleransi 2% sehingga pembangkit harus dapat menjaga kestabilan tegangan serta frekuensi yang diproduksi [1][2]. Dampaknya, ketika daya listrik meningkat, roda akan berputar lebih cepat sehingga berpotensi merusak peralatan listrik rumah tangga [3]. Hal ini dikarenakan stabilitas frekuensi merupakan komponen penting dari sistem tenaga, maka frekuensi jaringan harus selalu berada dalam toleransi yang telah ditetapkan [4][5]. Agar tidak berpotensi merusak peralatan listrik, diperlukan analisis dan tanggapan untuk mengontrol stabilitas penggunaan beban dengan menggunakan *Load Frequency Control* (LFC) [6].

Load Frequency Control (LFC) merupakan salah satu sistem kendali yang digunakan dalam menjaga keseimbangan. LFC bertujuan untuk menjaga frekuensi dan daya aktif pada nilai nominalnya saat terjadi perubahan beban [7]. Sistem kendali frekuensi atau LFC dalam proses menghasilkan tenaga listrik terdiri dari beberapa komponen berupa turbin dan generator. Jenis tipe LFC yang digunakan adalah jenis *reheat* [8][9][10].

Pada sistem kendali *Load Frequency Control* pengaturan pada besarnya kopel penggerak generator dapat dilakukan untuk menyeimbangkan besar daya aktif keluaran unit pembangkit dengan besar beban daya aktif [11]. Namun sistem ini tidak selalu bekerja secara optimal dalam menjaga kestabilan frekuensi yang dihasilkan generator. Oleh karena itu, dibutuhkan pengendali agar sistem dapat bekerja lebih optimal. Satu dari banyak pengendali yang dapat digunakan adalah pengendali PID (Proporsional-Integral-Derivatif) [12][13]. Selain itu, banyak upaya yang dilakukan pada penelitian sebelumnya untuk mendapatkan performansi LFC dengan pengendali PID yang lebih baik dan optimal[14].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang pengendali yang terdiri dari Proporsional (P), Proporsional Integral (PI), Proporsional Derivatif (PD), dan Proporsional Integral Derivatif (PID) yang diterapkan pada sistem LFC tipe reheat dengan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Zero/Pole Cancellation* (ZPC) serta melakukan analisis peralihan pada sistem LFC tersebut. Keseluruhan sistem akan disimulasikan melalui penggunaan perangkat lunak Matlab.

METODE

Dalam penelitian ini, langkah awal yang dilakukan adalah identifikasi masalah terkait pengendalian frekuensi pada sistem *Load Frequency Control* (LFC) dengan tipe *reheat*, serta menentukan tujuan penelitian. Langkah ini dilanjutkan dengan studi literatur yang mencakup kajian mengenai konsep dasar sistem LFC, pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID), penggunaan metode *Particle Swarm Optimization* dan *Zero/Pole Cancellation*, serta karakteristik *droop* dan *droop plus* sensor. Selain itu, penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan juga dikaji untuk memperoleh pemahaman tentang metode pengendalian frekuensi yang efektif.

Tahap berikutnya adalah melakukan pemodelan sistem LFC tipe *reheat*, dengan membangun model matematis dari masing-masing sistem untuk keperluan simulasi. Pemodelan ini melibatkan variabel-variabel penting seperti parameter sistem dan pengaturan kontrol. Selanjutnya, dilakukan perancangan pengendali dengan mengembangkan beberapa konfigurasi, termasuk pengendali Proporsional (P), Proporsional Integral (PI), dan Proporsional Integral Diferensial (PID), serta mengintegrasikan metode PSO dan ZPC untuk meningkatkan performa pengendali. Pengujian berbagai konfigurasi dilakukan dengan menggunakan karakteristik *droop* dan sensor, serta dengan parameter dan pengaturan awal dari setiap jenis pengendali yang telah ditentukan.

Simulasi sistem dilakukan untuk menguji respons analisis peralihan dengan berbagai konfigurasi pengendali yang telah dirancang. Simulasi ini melibatkan konfigurasi sistem dengan karakteristik *droop* dan sensor, serta penerapan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Zero/Pole Cancellation* (ZPC). Setelah itu, data dari hasil simulasi dikumpulkan, meliputi waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, dan nilai lewatan maksimum. Kinerja setiap konfigurasi pengendali dibandingkan untuk mengidentifikasi konfigurasi yang memberikan performa paling optimal.

Tahap berikutnya adalah evaluasi kinerja pengendali yang mencakup analisis data hasil simulasi untuk mengevaluasi efektivitas setiap konfigurasi pengendali, serta peran PSO dan ZPC dalam meningkatkan stabilitas dan respons sistem melalui analisis peralihan. Selain itu, perbandingan antara pengendali dengan karakteristik *droop* dan sensor dilakukan untuk mengidentifikasi manfaat dari penggunaan fitur tersebut. Pada tahap terakhir, kesimpulan ditarik dari hasil, dengan mengidentifikasi kelebihan dan kekurangan masing-masing konfigurasi pengendali yang diuji, serta memberikan rekomendasi tentang konfigurasi pengendali terbaik untuk sistem LFC tipe *reheat*, serta saran untuk penelitian lebih lanjut.

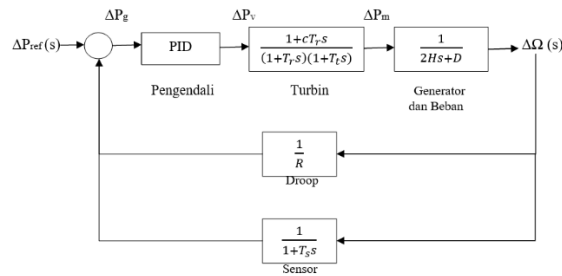
Nilai parameter untuk sistem kendali *Load Frequency Control* tipe *reheat* ditunjukkan pada Tabel 1 berikut[13][20].

Tabel 1. Nilai Parameter Sistem LFC Tipe Reheat

Parameter	Nilai
R	0.0500
T _G	0.2000 detik
F _{HP}	0.3000
F _{LP}	0.7000

T_{RH}	7.0000 detik
T_{CH}	0.3000 detik
M	10.0000 detik
D	1.0000 pu MW/Hz

Adapun blok diagram sistem LFC dengan tipe turbin *reheat* serta pengendali PID yangmana dapat menghasilkan fungsi alih lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup. Blok diagram LFC dengan tipe *reheat* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem LFC Tipe *Reheat*

Berdasarkan Gambar 1 diatas, dihasilkan fungsi alih lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup seperti yang ditunjukkan pada persamaan 1 dan 2 berikut.

$$\frac{\Delta \Omega}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{1 + cT_r s}{R(1 + T_r s)(1 + T_t s)(2Hs + D)(1 + T_s s)} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta \Omega}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{1 + cT_r s}{R(1 + T_r s)(1 + T_t s)(2Hs + D)(1 + T_s s)(1 + cT_r s)} \quad (2)$$

Keterangan simbol yang digunakan dalam sistem LFC tipe *reheat* ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Keterangan Simbol Pada Sistem LFC

Simbol	Keterangan
$\Delta \Omega$	Perubahan frekuensi
H	Konstanta Inersia
ΔP_m	Perubahan daya mekanik
ΔP_L	Perubahan beban yang tidak peka terhadap frekuensi
D	Konstanta redaman beban
ΔP_v	Perubahan posisi katup
ΔP_g	Daya keluaran <i>Governor</i>
ΔP_{ref}	Daya referensi
R	<i>Speed regulation</i> (berkisar antara 5 s/d 6%)/ <i>Droop</i>
T_t	Konstanta waktu turbin <i>non-reheat</i>
T_r	Konstanta waktu turbin <i>reheat</i>
T_s	Konstanta waktu sensor
c	Persentase energi yang dihasilkan pada bagian <i>reheat</i>

Adapun kriteria perancangan yang digunakan pada penelitian ini melibatkan parameter-parameter tersebut dengan nilai dari tipe *reheat*. Kriteria perancangan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Kriteria Perancangan

Analisis	Kriteria	<i>Reheat</i>
Peralihan	Waktu Naik	< 0.0750 detik
	Waktu Puncak	< 0.0250 detik
	Waktu Keadaan Mantap	
	Nilai Puncak	< 1.2000
	Nilai Lewatan Maksimum	<20.0000 %

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, dibahas mengenai deskripsi data hasil dan analisis sistem kendali *Load Frequency Control* (LFC) untuk tipe *reheat* yang dioptimalkan menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Zero/Pole Cancellation* (ZPC). Analisis yang diterapkan meliputi analisis peralihan dengan tujuan untuk mendapatkan hasil keluaran yang sesuai dengan kriteria perancangan. Hasil data akan dianalisis dengan membandingkan hasil analisis sistem LFC dengan pengendali menggunakan metode PSO dan ZPC, serta sistem akan diuji dengan menggunakan karakteristik *droop* dan sensor.

Pada bagian ini, disajikan hasil simulasi dan analisis peralihan dari sistem LFC tipe *reheat* dengan menggunakan metode PSO dengan karakteristik *droop* dan *droop plus* sensor yang dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5 berikut.

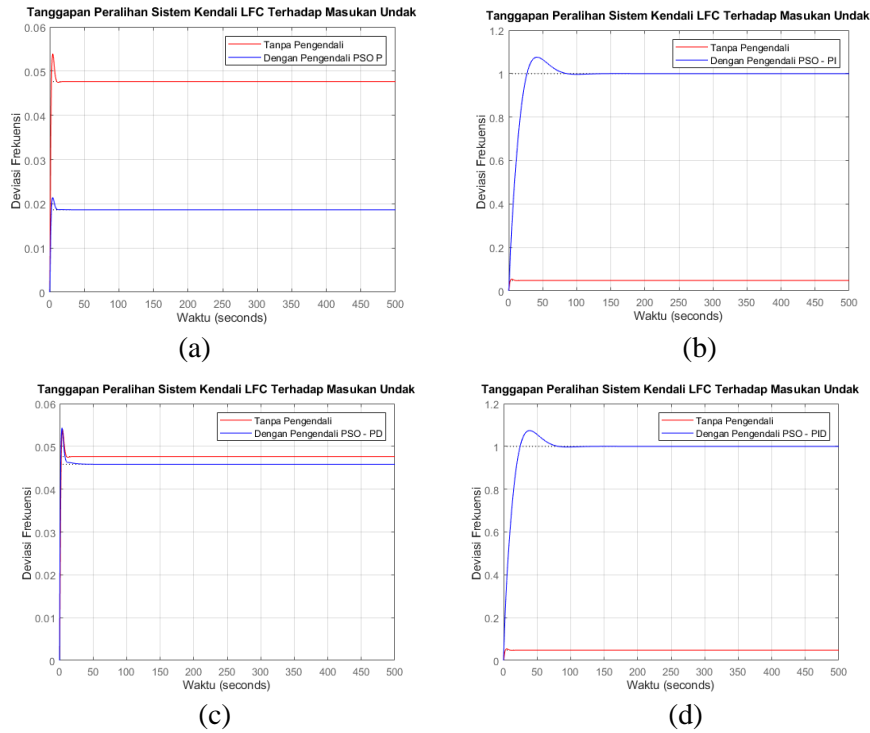
Tabel 4. Hasil Analisis Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe *Reheat Droop*

Pengendali	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum (%)
P	1.7660	4.3710	9.1000	0.0210	15.0080
PI	19.2180	41.7510	68.7250	1.0750	7.5340
PD	1.3600	3.7130	9.3630	0.0540	18.4940
PID	17.9680	38.8240	64.8470	1.0730	7.3710

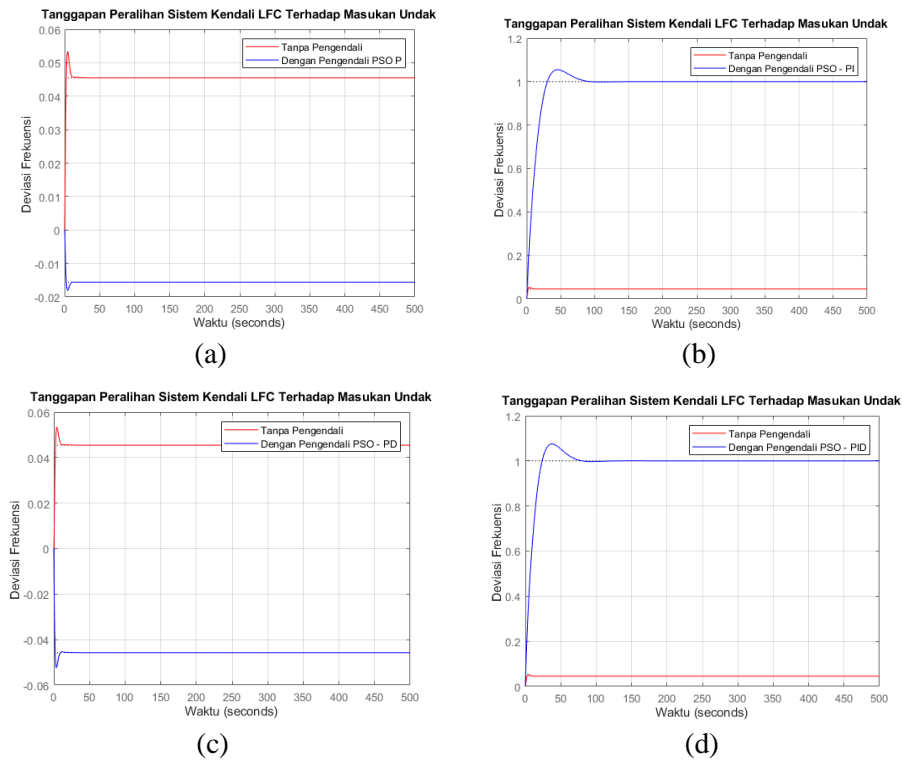
Tabel 5. Hasil Analisis Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe *Reheat Droop Plus Sensor*

Pengendali	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum (%)
P	1.7330	4.3340	8.9970	0.0180	15.8710
PI	21.1540	45.8130	69.9200	1.0540	5.4420
PD	1.2970	3.6420	9.5060	0.0260	20.5580
PID	17.2080	37.8380	63.2090	1.0750	7.4990

Gambar 2 dan 3 menampilkan tanggapan peralihan dari sistem LFC tipe *reheat* terhadap masukan undak menggunakan *droop* dan *droop plus* sensor dengan metode PSO.



Gambar 2. Tanggapan Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe Reheat Droop Metode PSO: (a) Proporsional (P), (b) Proporsional Integral (PI), (c) Proporsional Derivatif (PD), (d) Proporsional Integral Derivatif (PID)



Gambar 3. Tanggapan Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe Reheat Droop Plus Sensor Metode PSO: (a) Proporsional (P), (b) Proporsional Integral (PI), (c) Proporsional Derivatif (PD), (d) Proporsional Integral Derivatif (PID)

Berdasarkan Tabel 4 dan Tabel 5 menampilkan hasil analisis peralihan dengan menggunakan *droop* dan *droop plus* sensor. Pengendali proporsional (P), proporsional-integral (PI), proporsional-derivatif (PD), serta proporsional-integral-derivatif (PID) diuji untuk melihat respons sistem terhadap masukan undak. Berdasarkan hasil, sistem dengan *droop* memberikan waktu naik yang lebih cepat untuk pengendali P dan PD, tetapi dengan nilai lewatan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan pengendali PID dan PI. Namun, ketika ditambahkan sensor, waktu respons sistem menjadi lebih lambat tetapi dengan pengurangan nilai lewatan maksimum, terutama untuk pengendali PD dan PID.

Pengendali P memberikan waktu naik dan waktu puncak yang relatif cepat baik pada sistem dengan karakteristik *droop* maupun *droop plus* sensor. Pada sistem *droop*, waktu naik sebesar 1.7660 detik dengan nilai puncak 0.0210, sedangkan pada sistem *droop plus* sensor, waktu naiknya sedikit lebih cepat yaitu 1.7330 detik dengan nilai puncak 0.0180. Meskipun pengendali P memberikan respons yang cepat, nilai lewatan maksimum pada kedua sistem masih cukup tinggi, yaitu 15.0080% dan 15.8710% masing-masing untuk sistem *droop* dan *droop plus* sensor. Ini menunjukkan bahwa pengendali P dapat merespons dengan cepat, tetapi cenderung memiliki *overshoot* yang besar.

Pada pengendali PI, waktu responsnya secara signifikan lebih lambat dibandingkan pengendali P, terutama dengan adanya karakteristik *droop plus* sensor. Pada sistem *droop*, waktu naik mencapai 19.2180 detik, sementara pada *droop plus* sensor, waktu naik lebih lama yaitu 21.1540 detik. Namun, meskipun waktu naik lebih lambat, pengendali PI mampu mengurangi nilai lewatan maksimum, khususnya pada *droop plus* sensor, yang mencapai 5.4420%, jauh lebih rendah dibandingkan dengan pengendali P. Hal ini menandakan bahwa pengendali PI menghasilkan respons yang lebih stabil meskipun membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai keadaan mantap.

Pengendali PD menghasilkan waktu naik yang lebih cepat dibandingkan pengendali lainnya baik pada sistem *droop* maupun *droop plus* sensor. Pada sistem *droop*, waktu naik hanya 1.3600 detik dan waktu puncak 3.7130 detik, sementara pada *droop plus* sensor, waktu naik lebih cepat lagi, yaitu 1.2970 detik dengan waktu puncak 3.6420 detik. Namun, meskipun respons cepat, pengendali PD menghasilkan nilai lewatan maksimum yang cukup tinggi, terutama pada *droop plus* sensor dengan nilai lewatan maksimum sebesar 20.5580%. Ini menunjukkan bahwa meskipun respons sistem cepat, ada risiko *overshoot* yang signifikan, membuat pengendali PD kurang ideal untuk kestabilan sistem jangka panjang.

Pengendali PID menawarkan keseimbangan antara kecepatan respons dan stabilitas sistem. Pada sistem *droop*, waktu naik pengendali PID adalah 17.9680 detik, sementara pada *droop plus* sensor sedikit lebih cepat, yaitu 17.2080 detik. Meskipun waktu respons lebih lambat dibandingkan pengendali P dan PD, pengendali PID memiliki kelebihan dalam mengurangi nilai lewatan maksimum. Pada sistem *droop*, nilai lewatan maksimum mencapai 7.3710%, dan pada *droop plus* sensor sebesar 7.4990%. Hal ini menandakan bahwa pengendali PID memberikan respons yang relatif stabil dengan *overshoot* yang lebih terkontrol, menjadikannya pengendali yang cocok untuk menjaga kestabilan sistem dalam waktu lama.

Secara keseluruhan, pengendali P dan PD menawarkan respons cepat tetapi memiliki *overshoot* yang tinggi, sedangkan pengendali PI dan PID memberikan stabilitas yang lebih baik dengan *overshoot* yang lebih rendah, meskipun waktu responsnya lebih lambat. Kombinasi *droop plus* sensor umumnya memperlambat respons sistem namun berhasil menekan nilai *overshoot*, yang penting untuk menjaga kestabilan sistem kendali LFC.

Tidak ada pengendali yang sepenuhnya memenuhi kriteria perancangan sebagaimana yang disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7 berikut.

Tabel 6. Kriteria Perancangan Analisis Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe Reheat Droop Metode PSO

Pengendali	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum (%)
P	×	×	-	✓	✓
PI	×	×	-	✓	✓
PD	×	×	-	✓	✓
PID	×	×	-	✓	✓

Tabel 7. Kriteria Perancangan Analisis Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe *Reheat Droop Plus* Sensor Metode PSO

Pengendali	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum (%)
P	✘	✘	-	✓	✓
PI	✘	✘	-	✓	✓
PD	✘	✘	-	✓	✘
PID	✘	✘	-	✓	✓

Tabel 6 dan Tabel 7 menunjukkan evaluasi kinerja pengendali dalam sistem LFC tipe *reheat* dengan metode PSO berdasarkan kriteria perancangan tertentu, yaitu waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, dan nilai lewatan maksimum. Simbol "✓" menunjukkan bahwa kriteria perancangan terpenuhi, sedangkan "✘" menandakan bahwa kriteria tersebut tidak terpenuhi.

Secara keseluruhan, kedua tabel menunjukkan bahwa sistem LFC dengan metode PSO belum mampu memenuhi kriteria perancangan secara optimal dalam hal kecepatan respons (waktu naik dan waktu puncak) untuk semua pengendali. Namun, dari segi nilai puncak dan lewatan maksimum, sebagian besar pengendali, terutama P, PI, dan PID, mampu memenuhi kriteria tersebut. Kombinasi *droop* dan sensor cenderung memberikan efek stabilisasi tambahan dengan mengurangi *overshoot*, kecuali untuk pengendali PD yang masih menunjukkan *overshoot* tinggi pada sistem *droop plus* sensor.

Lalu pada bagian ini, disajikan hasil simulasi dan analisis peralihan dari sistem LFC tipe *reheat* dengan menggunakan metode *Zero/Pole Cancellation* (ZPC) dengan karakteristik sensor dan *droop plus* sensor yang dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9 berikut.

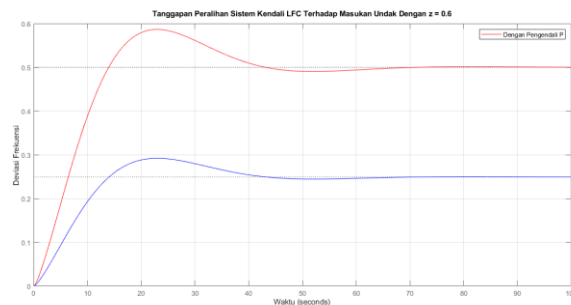
Tabel 8. Hasil Analisis Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe *Reheat* Sensor

Rasio Redaman (z)	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum (%)
0.4	15.5780	32.1610	46.8910	0.1610	5.1380
0.45	13.9730	29.1780	45.9210	0.1920	7.5690
0.5	12.5700	26.7970	44.1910	0.2250	10.4120
0.55	11.3460	24.5600	42.1280	0.2580	13.6180
0.6	10.2820	22.8410	39.9690	0.2920	17.1420
0.65	9.3540	21.6000	55.7880	0.3260	20.9450
0.7	8.5430	20.4240	55.4540	0.3590	24.9720
0.75	7.8330	18.9350	54.2240	0.3930	29.2030
0.8	7.2120	18.2410	52.6150	0.4270	33.6120
0.85	6.6610	17.2220	65.2420	0.4600	38.1670
0.9	6.1710	16.2440	65.5080	0.4930	42.8250
0.95	5.7350	15.6520	64.4550	0.5270	47.6160
1	5.3440	15.0850	62.9590	0.5600	52.4770
1.05	4.9910	14.5390	75.5390	0.5920	57.4050
1.1	4.6730	14.0140	74.8300	0.6250	62.3940
1.25	3.8940	12.5440	84.3190	0.7210	77.6780
1.5	2.9750	10.6800	113.7700	0.8770	103.7000
1.75	2.3520	9.3410	140.7800	1.0280	129.9600
2	1.9210	8.1500	195.4300	1.1750	156.1800

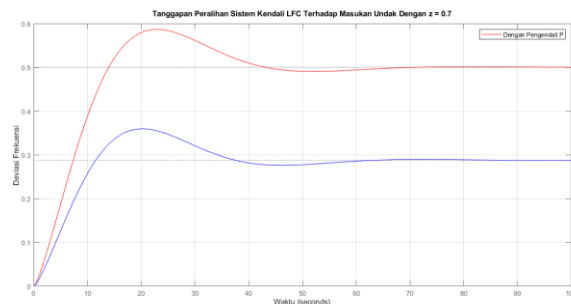
Tabel 9. Hasil Analisis Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe Reheat Droop Plus Sensor

Rasio Redaman (z)	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum (%)
0.4	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.45	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.5	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.55	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.6	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.65	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.7	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.75	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.8	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.85	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.9	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
0.95	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
1	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
1.05	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
1.1	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
1.25	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
1.5	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
1.75	NaN	Inf	NaN	Inf	NaN
2	27.8070	78.9480	47.4390	0.0010	0

Gambar 4 dan 5 menampilkan tanggapan peralihan terbaik dari sistem LFC tipe *reheat* terhadap masukan undak menggunakan sensor dan *droop plus* sensor dengan metode ZPC.

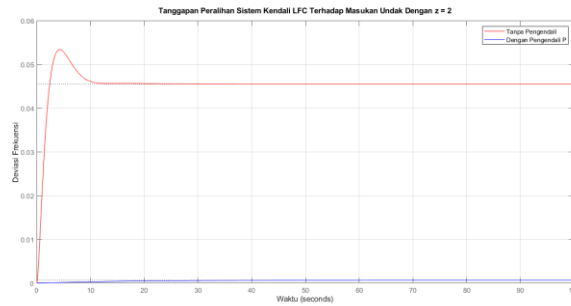


(a)



(b)

Gambar 4. Tanggapan Peralihan Terbaik Terhadap Masukan Undak Tipe Reheat Sensor Metode ZPC: (a) Rasio Redaman (z)=0.6, (b) Rasio Redaman (z)=0.7



(a)

Gambar 5. Tanggapan Peralihan Terbaik Terhadap Masukan Undak Tipe Reheat Droop Plus Sensor Metode ZPC: (a) Rasio Redaman (z)=2

Data pada Tabel 8 menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio redaman (z), waktu naik dan waktu puncak cenderung menurun, yang berarti sistem merespons perubahan lebih cepat pada awalnya. Waktu naik, yang menunjukkan seberapa cepat sistem pertama kali mencapai keadaan stabil, menurun dari sekitar 15 detik pada redaman rendah ($z = 0.4$) hingga mendekati 2 detik pada redaman tinggi ($z = 2$). Demikian pula, waktu puncak waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai nilai maksimum pertamanya menurun seiring peningkatan redaman, meski kemudian sedikit meningkat pada redaman yang sangat tinggi ($z > 1$). Namun, waktu keadaan mantap menunjukkan tren berbeda setelah menurun pada redaman moderat, waktu ini justru meningkat signifikan pada redaman tinggi, yang menunjukkan bahwa respons menjadi lebih lambat dalam mencapai kestabilan setelah osilasi terjadi. Sementara itu, nilai puncak dan lewatan maksimum, yang menggambarkan seberapa besar sistem akan melebihi respons stabilnya sebelum kembali, meningkat dengan bertambahnya rasio redaman, menunjukkan adanya *overshoot* yang lebih besar. Pada redaman rendah, nilai lewatan maksimum hanya sekitar 5% hingga 10%, tetapi dengan redaman tinggi, nilainya naik drastis hingga lebih dari 100%, menunjukkan sistem yang berosilasi berlebihan. Dengan demikian, untuk mencapai keseimbangan antara respons cepat dan stabilitas tanpa *overshoot* yang terlalu besar, sistem dengan redaman moderat ($z \approx 0.6$) hingga ($z \approx 1$) biasanya diinginkan, karena menghasilkan respons yang cepat sekaligus stabil. Dari 19 rasio redaman (z) yang tersedia, dua rasio terbaik yang mencapai keseimbangan optimal antara kecepatan respons dan stabilitas adalah $z=0.7$ dan $z=0.6$. Pada $z=0.7$, waktu naik mencapai 8.5400 detik dan waktu puncak 20.4200 detik, menunjukkan respons yang cepat terhadap perubahan. Waktu keadaan mantapnya cukup singkat di 55.4500 detik, dengan nilai puncak sebesar 0.3590 dan lewatan maksimum sekitar 24.9700%, yang masih terkendali. Sementara itu, $z=0.6$ memberikan sedikit waktu naik yang lebih lambat, yaitu 10.2800 detik, dan waktu puncak 22.8400 detik. Pada nilai ini, waktu keadaan mantap berada di 39.9700 detik dengan nilai puncak 0.2920 serta lewatan maksimum 17.1400%, menunjukkan *overshoot* yang lebih rendah dibandingkan $z=0.7$. Kedua rasio ini memberikan respons yang cepat dan stabilitas yang cukup baik, dengan *overshoot* yang tidak berlebihan. Rasio redaman ini sangat ideal untuk sistem kendali yang membutuhkan keseimbangan antara kecepatan dan stabilitas.

Dari Tabel 9 yang diberikan, terlihat bahwa untuk hampir seluruh nilai rasio redaman (z) antara rasio redaman (z)=0.4 hingga rasio redaman (z)=1.75, respons sistem tidak dapat dihitung atau tidak stabil, yang ditunjukkan dengan nilai "NaN" (*Not a Number*) dan "Inf" (tak terhingga) pada parameter seperti waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, dan nilai lewatan maksimum. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada rentang rasio redaman tersebut, sistem mengalami ketidakstabilan atau osilasi tak terkendali, yang mengakibatkan kegagalan mencapai nilai respons yang diinginkan atau stabil. Satu-satunya pengecualian dalam data ini adalah pada rasio redaman $z=2$, di mana terdapat nilai respons yang terukur. Pada $z=2$, waktu naik adalah 27.8070 detik dan waktu puncak adalah 78.9480 detik, dengan waktu keadaan mantap sebesar 47.4390 detik. Nilai puncak yang dicapai sangat kecil, yaitu hanya 0.0010, dan tidak terdapat lewatan maksimum (0%). Hal ini menunjukkan bahwa pada redaman yang sangat tinggi ($z=2$), sistem memiliki respons yang sangat lambat, hampir tidak mengalami osilasi, dan memiliki *overshoot* nol, tetapi membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai keadaan stabil. Respons ini mungkin cocok untuk sistem yang membutuhkan stabilitas tinggi meski responsnya lambat, namun tidak cocok jika diinginkan respons cepat. Secara keseluruhan, data ini mengindikasikan bahwa untuk sebagian besar nilai redaman yang lebih rendah dari 2,

sistem tidak dapat mencapai stabilitas, dan hanya pada redaman tinggi sistem mampu stabil meskipun responsnya lambat.

Namun, berdasarkan kriteria perancangan pada Tabel 10 dan Tabel 11, tidak ada pengendali yang sepenuhnya memenuhi kriteria desain untuk tipe *reheat*, baik dengan sensor maupun *droop plus* sensor. Tabel 10 dan Tabel 11 dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 10. Kriteria Perancangan Analisis Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe *Reheat* Sensor Metode ZPC

Rasio Redaman (z)	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum (%)
0.4	x	x	-	✓	✓
0.45	x	x	-	✓	✓
0.5	x	x	-	✓	✓
0.55	x	x	-	✓	✓
0.6	x	x	-	✓	✓
0.65	x	x	-	✓	x
0.7	x	x	-	✓	x
0.75	x	x	-	✓	x
0.8	x	x	-	✓	x
0.85	x	x	-	✓	x
0.9	x	x	-	✓	x
0.95	x	x	-	✓	x
1	x	x	-	✓	x
1.05	x	x	-	✓	x
1.1	x	x	-	✓	x
1.25	x	x	-	✓	x
1.5	x	x	-	✓	x
1.75	x	x	-	✓	x
2	x	x	-	✓	x

Tabel 11. Kriteria Perancangan Analisis Peralihan Terhadap Masukan Undak Tipe *Reheat Droop Plus* Sensor Metode ZPC

Rasio Redaman (z)	Waktu Naik (s)	Waktu Puncak (s)	Waktu Keadaan Mantap (s)	Nilai Puncak	Nilai Lewatan Maksimum (%)
0.4	x	x	-	x	x
0.45	x	x	-	x	x
0.5	x	x	-	x	x
0.55	x	x	-	x	x
0.6	x	x	-	x	x
0.65	x	x	-	x	x
0.7	x	x	-	x	x
0.75	x	x	-	x	x
0.8	x	x	-	x	x
0.85	x	x	-	x	x
0.9	x	x	-	x	x
0.95	x	x	-	x	x
1	x	x	-	x	x
1.05	x	x	-	x	x
1.1	x	x	-	x	x

1.25	✘	✘	-	✘	✘
1.5	✘	✘	-	✘	✘
1.75	✘	✘	-	✘	✘
2	✘	✘	-	✓	✓

Dari Tabel 10 di atas, terlihat bahwa sebagian besar rasio redaman (z) menghasilkan tanda “✘” pada parameter waktu naik dan waktu puncak, yang menunjukkan bahwa sistem tidak memiliki waktu naik dan waktu puncak yang terukur atau stabil. Selain itu, tanda “-” pada kolom waktu keadaan mantap menunjukkan bahwa nilai ini tidak terdefinisi dalam rentang rasio redaman (z) yang ditentukan. Namun, untuk hampir semua nilai redaman, tanda “✓” pada kolom nilai puncak menunjukkan bahwa sistem masih mencapai nilai puncak meskipun responsnya tidak stabil. Pada kolom lewatan maksimum, tanda “✓” hanya muncul pada nilai redaman rendah (0.4 hingga 0.6), sedangkan pada rasio redaman (z) yang lebih tinggi ($z \geq 0.65$), nilai lewatan maksimum tidak terdefinisi (diberi tanda “✘”). Analisis ini menunjukkan bahwa sistem cenderung tidak stabil pada sebagian besar rasio redaman (z). Hanya nilai puncak yang terdefinisi dengan baik, sementara waktu naik, waktu puncak, dan lewatan maksimum tidak dapat dihitung dalam kondisi ini. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem mungkin mengalami osilasi atau ketidakstabilan yang parah pada berbagai nilai redaman.

Sedangkan pada Tabel 11 di atas, dapat dilihat bahwa untuk hampir seluruh rasio redaman (z) dari rasio redaman (z)=0.4 hingga rasio redaman (z)=1.75, sistem tidak memiliki nilai terukur untuk waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, ataupun lewatan maksimum, yang ditandai dengan simbol “✘”. Hal ini menunjukkan bahwa pada rentang nilai redaman tersebut, sistem tidak mencapai stabilitas atau bahkan tidak memiliki respons yang dapat diukur. Satu-satunya pengecualian adalah pada rasio redaman $z=2$, di mana sistem menunjukkan nilai terukur untuk nilai puncak dan lewatan maksimum (tanda “✓”). Kondisi ini mengindikasikan bahwa hanya pada redaman sangat tinggi, sistem dapat mencapai stabilitas, meskipun cenderung memiliki respons yang sangat lambat. Secara keseluruhan, tabel ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kendala stabilitas pada sebagian besar rasio redaman dan hanya mampu mencapai kondisi stabil pada redaman tinggi, yaitu $z=2$.

PENUTUP

Dari hasil analisis sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe *Reheat*, dapat disimpulkan

1. Bahwa kinerja pengendali dalam sistem LFC tipe *Reheat* dengan metode PSO masih memiliki keterbatasan dalam mencapai kriteria perancangan yang optimal, terutama terkait kecepatan respons pada waktu naik dan waktu puncak.
2. Meskipun sebagian besar pengendali, khususnya P, PI, dan PID, dapat memenuhi kriteria nilai puncak dan lewatan maksimum, kendala pada waktu respons mengindikasikan bahwa stabilitas sistem masih memerlukan perbaikan. Efek stabilisasi tambahan dari kombinasi *droop* dan sensor menunjukkan hasil positif dengan mengurangi *overshoot*, namun hasil ini belum optimal untuk pengendali PD yang masih menunjukkan *overshoot* tinggi dalam konfigurasi tersebut.
3. Analisis redaman menunjukkan bahwa sistem LFC tipe *Reheat* dengan metode ZPC cenderung tidak stabil pada hampir seluruh rentang rasio redaman (z) di bawah 2, di mana waktu naik, waktu puncak, dan waktu keadaan mantap tidak terdefinisi. Hanya pada nilai redaman tinggi ($z=2$), sistem menunjukkan stabilitas yang memadai, meskipun dengan waktu respons yang lambat. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi tertentu, sistem memerlukan redaman tinggi untuk mencapai stabilitas, tetapi hal tersebut mengorbankan kecepatan respons.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti terima kasih kepada Departemen Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Andalas yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Siswanto, D. Hendra Kusuma, dan 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, hal. 35–39, 2016.
- [2] A. J. Pakpahan dan Herlambang Setiadi, “Optimal Control Design for Frequency Regulation in Electric Power System With Low Inertia,” *J. Adv. Technol. Multidiscip.*, vol. 3, no. 1, hal. 26–36, 2024, doi: 10.20473/jatm.v3i1.59984.
- [3] A. Hendryani, V. Nurdinawati, I. Gunawan, dan J. T. Elektromedik, “Rumah Tangga Bagi Warga Kelurahan Duri Selatan Jakarta,” vol. 1, no. 1, hal. 22–26, 2019.
- [4] I. Soedibyo, M. MT, I. M. Ashari, dan M. Eng, “Rancang Bangun Kendali Tegangan dan Frekuensi pada Sistem Kelistrikan di Pulau Terpencil dengan Pembangkit PV-Wind Turbine-Fuel Cell Berbasis Fuzzy Logic Control untuk Mendukung Kemandirian Energi Baru Terbarukan Nasional,” *Simpel.Its.Ac.Id*, no. Anggota II, 2020, [Daring]. Tersedia pada: https://simpler.its.ac.id/assets/docs/upload/program_RistekBRIN/skim_PTUPT/penelitian_8546/proposal_revisi_8546_PTUPT_20200917212046.pdf
- [5] A. Kiswantono dan Y. Hermanto, “Peningkatan Kinerja PLTB Melalui Kendali,” vol. 12, no. 1, hal. 137–147, 2024.
- [6] B. Dhanasekaran, J. Kaliannan, A. Baskaran, N. Dey, dan J. M. R. S. Tavares, “Load Frequency Control Assessment of a PSO-PID Controller for a Standalone Multi-Source Power System,” *Technologies*, vol. 11, no. 1, hal. 1–16, 2023, doi: 10.3390/technologies11010022.
- [7] M. Mokhtar, M. I. Marei, M. A. Sameh, dan M. A. Attia, “An Adaptive Load Frequency Control for Power Systems with Renewable Energy Sources,” *Energies*, vol. 15, no. 2, hal. 1–22, 2022, doi: 10.3390/en15020573.
- [8] Rahayu Deny Dinar dan Alvi Furwanti Alwie, A. B. Prasetyo, R. Andespa, P. N. Lhokseumawe, dan K. Pengantar, “Tugas Akhir Tugas Akhir,” *J. Ekon. Vol. 18, Nomor 1 Maret 201*, vol. 2, no. 1, hal. 41–49, 2020.
- [9] A. R. Putri, “Analisa Simulasi Performansi Dalam Domain Waktu Untuk Pengendalian Frekuensi Sistem Tenaga Listrik (Model Reheat, Non-Reheat dan Hidro Turbin),” 2020.
- [10] K. Masruhan dan P. E. Pambudi, “Analisis Sistem Governor Dalam Menjaga Kestabilan Frekuensi Pada Pt . Indonesia Power Up Mrica Sub Unit Plta Wadaslantang,” *J. Elektr.*, vol. 6, hal. 48–55, 2019.
- [11] N. A. Karim, “Analisis Pengoperasian Governor Sebagai Pengatur Kestabilan Frekuensi Pada PLTU Mamuju 2 x 25 MW,” no. September, hal. 147–151, 2021.
- [12] V. Kumarakrishnan, G. Vijayakumar, D. Boopathi, K. Jagatheesan, S. Saravanan, dan B. Anand, “Optimized PSO Technique Based PID Controller For Load Frequency Control of Single Area Power System,” *Solid State Technol.*, vol. 63, no. 5, hal. 7979–7990, 2020.
- [13] D. R. Astri, “Simulasi Dan Analisa Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Dengan Pictune Model Standard (Analisa Domain Waktu),” 2022.
- [14] M. M. Uddin, M. K. Saifullah, dan M. M. Kabir, “PID Controller Based Automatic Generation Control for Three Area Interconnected Power System,” 2021 *Int. Conf. Inf. Commun. Technol. Sustain. Dev. ICICT4SD 2021 - Proc.*, hal. 300–305, 2021, doi: 10.1109/ICICT4SD50815.2021.9396971.
- [15] C. Technologies, “A Comprehensive Review of Load Frequency Control Technologies,” 2024.
- [16] A. N. Aliansyah, N. Nurhayati, S. N. Jaya, L. Pagiling, W. O. S. N. Alam, dan M. N. A. Nur, “Analisis Tuning Parameter PID Menggunakan Algoritma Genetika pada Pengontrolan Kecepatan Motor DC,” *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 21, no. 2, hal. 287, 2022, doi: 10.24843/mite.2022.v21i02.p17.
- [17] V. N. Ogar, S. Hussain, dan K. A. A. Gamage, “Load Frequency Control Using the Particle Swarm Optimisation Algorithm and PID Controller for Effective Monitoring of Transmission Line,” *Energies*, vol. 16, no. 15, 2023, doi: 10.3390/en16155748.
- [18] F. Ahcene dan H. Bentarzi, “Automatic Voltage Regulator Design Using Particle Swarm Optimization Technique,” no. 1, hal. 0–5, 2020.
- [19] E. A. Rene dan W. S. T. Fokui, “A Quantum Particle Swarm Optimization-Based Optimal LQR-PID Controller for Load Frequency Control of an Asolated Power System,” *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 70, no. 1, hal. 1–22, 2023, doi: 10.1186/s44147-023-00271-z.
- [20] H. D. Laksono, F. Retno Ningsih, dan Fitrilina, “Simulasi dan Analisa Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Dengan Pilot Servo dan Kombinasi Pengendali Model Standar (Model Hidraulik),” *J. Amplif. J. Ilm. Bid. Tek. Elektro Dan Komput.*, vol. 13, no. 1, hal. 1–9, 2023, doi: 10.33369/jamplifier.v13i1.27591.
- [21] H. D. Laksono, M. Latif, E. A. Gunawan, dan R. Afrianita, “Sistem Pengatur Tegangan Otomatis : Analisa Peralihan dengan Pengendali Tunggal dan Kaskade,” vol. 11, no. 2, hal. 28–35, 2021.