

Analisis Kinerja Pengendali Kaskade Pada Sistem *Load Frequency Control* (LFC) Hidraulik Menggunakan *PIDTune* Model Standard

Heru Dibyo Laksono¹, Dhea Rahmadani Putri², Mumuh Muharam³, Rizki Wahyu Pratama⁴, Riko Nofendra⁵

[Submission: 28-11-2024, Accepted: 31-12-2024]

Abstract— *This study evaluates the performance of a hydraulic Load Frequency Control (LFC) system using cascade controllers in various configurations with and without droop characteristics. Through MATLAB simulation, several types of controllers such as P, PI, PD, PID, PDF, and PIDF are analysed to measure transient response parameters such as rise time, peak time, steady state time, and overshoot. The results show that the droop configuration provides better performance, with faster response and reduced oscillation compared to the other configurations. The use of filters in PIDF and PDF controllers is very effective in dampening high frequency disturbances and improving system stability. The PDF and PIDF controllers, thanks to their derivative components, showed the best performance with fast response times and minimal overshoot. Overall, droop configurations, especially with PDF controllers, are recommended to maintain frequency stability in hydraulic LFC systems, especially under dynamic load conditions.*

Intisari— Penelitian ini mengevaluasi performa sistem *Load Frequency Control* (LFC) hidraulik menggunakan pengendali kaskade pada berbagai konfigurasi dengan dan tanpa karakteristik *droop*. Melalui simulasi MATLAB, dilakukan analisis terhadap beberapa tipe pengendali seperti P, PI, PD, PID, PDF, dan PIDF untuk mengukur parameter respons transien seperti waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, serta *overshoot*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi *droop* memberikan performa yang lebih baik, dengan respons lebih cepat dan osilasi yang berkurang dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Penggunaan filter dalam pengendali PIDF dan PDF sangat efektif dalam meredam gangguan frekuensi tinggi dan meningkatkan stabilitas sistem. Pengendali PDF dan PIDF, berkat komponen derivatifnya, menunjukkan performa terbaik dengan waktu respons yang cepat dan *overshoot* minimal. Secara keseluruhan, konfigurasi *droop*, terutama dengan pengendali PDF, direkomendasikan untuk menjaga stabilitas frekuensi pada sistem LFC hidraulik, khususnya pada kondisi beban yang dinamis

Kata Kunci— *Load Frequency Control; Hidraulik; Governor; Droop; Kaskade*

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Andalas, Limau Manis, Kecamatan Pauh, Kota Padang, Sumatera Barat, 25163 Indonesia (telp: 0751-71181; fax: 0751-71085 e-mail: herudibvolaksono@eng.unand.ac.id 2010951015_dhea@student.unand.ac.id mumuh@eng.unand.ac.id rizkiwahyupratama@eng.unand.ac.id riko.nofendra@eng.unand.ac.id)

Heru Dibyo Laksono : Analisis Kinerja Pengendali Kaskade....

I. PENDAHULUAN

Energi listrik dapat memiliki kualitas yang baik karena merupakan bagian penting dari kehidupan. Frekuensi pembangkit dianggap stabil ketika daya aktif pembangkit seimbang dengan daya aktif beban[1]. Perubahan dalam kebutuhan daya aktif pada beban memengaruhi nilai frekuensi sistem tenaga listrik. Jika kebutuhan daya aktif pada beban meningkat, frekuensi sistem dapat menurun, tetapi jika pembangkit menghasilkan daya aktif yang lebih besar daripada yang dikonsumsi, frekuensi sistem akan meningkat lebih dari biasanya[2][3].

Adanya variasi produksi dan beban konsumen dalam sistem listrik, ketidakstabilan kebutuhan daya aktif dan reaktif dapat menyebabkan perubahan frekuensi yang tidak sesuai selama pengoperasian sistem[4][5][6]. Penyimpangan frekuensi yang lebih besar dapat menyebabkan pengoperasian sistem menjadi buruk atau mengurangi kinerjanya, membahayakan konsumen, memaksa pemadaman jika frekuensi tidak stabil dan turun terlalu rendah, dan mengakibatkan kerusakan[7]. Frekuensi harus distabilkan pada 50Hz atau pada batas toleransi $\pm 2\%$ dari frekuensi normal untuk menjamin kualitas listrik yang baik. Oleh karena itu, sistem kendali *Load Frequency Control* (LFC) diperlukan untuk mencegah perubahan frekuensi[8][9][10].

Pengendalian pasokan energi dapat dilakukan secara efektif melalui sistem *Load Frequency Control* (LFC). Sistem ini dikembangkan untuk memantau dan mengatasi fluktuasi frekuensi yang terjadi akibat perubahan beban, serta memiliki kemampuan untuk menyimpan data perubahan frekuensi dalam sistem[11][7][11][12]. *Load Frequency Control* (LFC) atau sistem pengendali frekuensi berperan penting dalam mengontrol perubahan frekuensi yang terjadi pada jaringan listrik akibat variasi beban. Perubahan frekuensi tersebut perlu dipertahankan dalam rentang yang diizinkan dan harus dapat pulih ke nilai normal dengan cepat. Hal ini penting karena fluktuasi frekuensi yang berlebihan dapat mengakibatkan kerusakan sistem dan gangguan pasokan listrik. Dalam operasional sistem tenaga listrik dan sistem kontrol, LFC memegang peranan vital sebagai komponen utama yang menjamin keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan kebutuhan energi para pelanggan. Sistem ini juga berperan dalam memastikan distribusi listrik yang stabil dan bermutu tinggi kepada konsumen[14][14][15].

Merancang pengendali yang andal dan efisien untuk mengatasi penyimpangan frekuensi. Tujuan dari sistem kontrol frekuensi adalah untuk menjaga kestabilan frekuensi sistem dengan mengatur distribusi beban di setiap generator. Hal ini

p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372



memungkinkan generator beroperasi dengan baik dan dapat menghasilkan tenaga yang dibutuhkan tanpa mengalami perubahan frekuensi yang berlebihan[17]. Untuk mencapai sasaran ini, daya aktif yang dihasilkan harus memenuhi kebutuhan daya beban agar frekuensi sistem tetap stabil dan berada dalam batas toleransi. Katup mekanis yang diperlukan sebagai pendorong generator diatur untuk mengendalikan pasokan daya aktif[18]. Di pembangkit listrik, turbin dan rotor generator terhubung secara mekanis. Sistem *governor* berfungsi untuk mengatur kecepatan turbin sambil menjaga nilai frekuensi dalam sistem pengendalian frekuensi energi listrik[12][19][20].

Pengendali Kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) adalah salah satu metode yang dipakai oleh sistem kendali frekuensi[21]. Pengendali PID masih menjadi pilihan utama di industri ketenagalistrikan saat ini karena kemudahan penggunaan dan kinerjanya yang baik[22]. Nilai keluaran pengendali PID dihitung dengan parameter kendali seperti konstanta proporsional (K_p), konstanta integral (K_i), dan konstanta turunan (K_d). Menurut besarnya *error* yang diperoleh, pengendali PID akan memberikan aksi kepada katup mekanis[23][24][18][23][24].

Droop merupakan salah satu fitur penting dalam sistem *Load Frequency Control* (LFC) terutama dalam menjaga stabilitas frekuensi pada sistem tenaga. *Droop* menunjukkan penurunan frekuensi yang terkontrol seiring dengan bertambahnya beban yang dapat membantu sistem menyeimbangkan perubahan beban tanpa sinyal luar. Dalam sistem hidrolik, sifat *droop* diterapkan melalui *governor* yang mengatur aliran turbin berdasarkan perubahan frekuensi.

Dalam sistem *Load Frequency Control* (LFC), *droop* berfungsi sebagai pengatur kestabilan frekuensi dalam sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe hidrolik dengan memberikan *feedback* proporsional antara perubahan frekuensi dan daya keluaran generator. *Droop* akan menyesuaikan diri untuk meningkatkan daya yang dihasilkan guna mengimbangi penurunan frekuensi ketika beban meningkat. Apabila beban menurun, maka *droop* mengurangi daya yang dihasilkan untuk menjaga kestabilan frekuensi. Konstanta *droop* (R) pada dasarnya bernilai antara 3-5% dari frekuensi nominal yang digunakan untuk menunjukkan parameter *Droop*. *Droop* yang lebih tinggi akan menghasilkan respons frekuensi yang lebih lambat namun lebih stabil, sedangkan *droop* yang lebih rendah akan meningkatkan kepekaan sistem terhadap perubahan frekuensi tetapi juga menyebabkan ketidakstabilan[12].

Penelitian ini bertujuan dalam menganalisis kinerja sistem LFC tipe hidrolik dengan konfigurasi kaskade terhadap masukan daya. Penggunaan *governor* pada sistem berfungsi mempertahankan stabilitas frekuensi walaupun terjadi perubahan beban dan dapat dilihat melalui performa parameter transien seperti waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, dan lewatan maksimum. Selain itu, penelitian bertujuan untuk membandingkan performa sistem menggunakan pengendali kaskade dengan kriteria perancangan sebagai acuan.

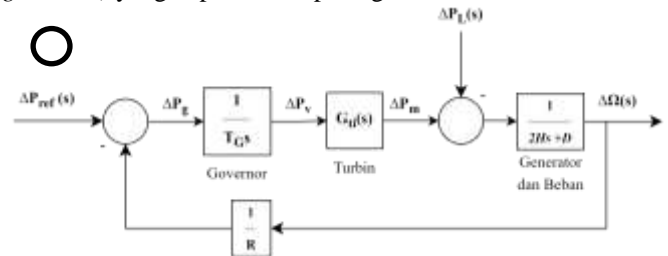
Penelitian ini memiliki batasan untuk memastikan fokus analisis menggunakan PID dan *filter* pada sistem LFC pada sistem pembangkit listrik tenaga air. Batasan tersebut diperlukan agar penelitian sesuai dengan tujuan yang dicapai. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

- 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 *droop*.
- Penelitian hanya menggunakan simulasi MATLAB untuk mengevaluasi respons transien sistem seperti waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, dan lewatan maksimum.
- Sistem yang dianalisis beroperasi pada frekuensi nominal 50Hz dalam kondisi *non-transient* sehingga tidak mencakup gangguan frekuensi di luar batas toleransi standar.

II. STUDI PUSTAKA

Sistem tenaga merupakan sistem dalam skala besar dan dinamika kompleks dengan tujuan sistem kendali frekuensi terhadap daya berdasarkan titik operasi menggunakan pendekatan linear di mana komponen utamanya dalam *single-area* adalah generator, *prime mover*, beban, *governor*[27].

Pemodelan *Load Frequency Control* (LFC) merupakan model linear sistem kendali *Load Frequency Control* (LFC) *single-area* yang merupakan gabungan dari masing-masing komponen blok diagram (generator, beban, *prime mover*, dan *governor*) yang dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Kendali *Load Frequency Control*

Pada sistem pembangkit listrik tenaga air biasa memakai sistem pengaturan *Load Frequency Control* (LFC) tipe hidrolik. Persamaan fungsi alih lingkaran terbuka dan lingkaran tertutup untuk sistem kontrol *Load Frequency Control* (LFC) tipe hidrolik dengan *input* $\Delta P_{ref}(s)$ dapat dilihat pada blok diagram Gambar 2 dengan mengubah fungsi alih turbin menjadi fungsi alih turbin hidrolik. Persamaan fungsi alih lingkaran terbuka untuk sistem kontrol frekuensi tipe hidrolik dengan *input* ΔP_{ref} dapat dituliskan sebagai berikut.

$$G(s)H(s) = \frac{1 - T_w s}{(1 + T_G s) \left(1 + \frac{1}{2} T_w s\right) (2Hs + D)R} \quad (1)$$

Sedangkan pada fungsi alih lingkaran tertutup didapatkan sebagai berikut.

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{R(1 - T_w s)}{(1 + T_G s) \left(1 + \frac{1}{2} T_w s\right) (2Hs + D) + \frac{1 - T_w s}{R}} \quad (2)$$

PIDTune model standard merupakan representasi pengontrol PID waktu kontinu di MATLAB dalam bentuk standard. Kontroler memiliki *gain* proporsional (K_p), waktu integral (T_i), dan waktu turunan (T_d), serta pembagi *filter*

turunan orde pertama N. Berikut tipe-tipe pengendali *PIDTune* model standard dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tipe-Tipe Pengendali *PIDTune* Model Standard[12]

| 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 filter orde pertama pada bagian Diferensial (PDF) | $K_p + \frac{K_p T_d s}{N s + 1}$ |
| Proporsional-Integral-Diferensial dengan filter orde pertama pada bagian Diferensial (PIDF) | $K_p + \frac{K_p}{T_i s} + \frac{K_p T_d s}{N s + 1}$ |

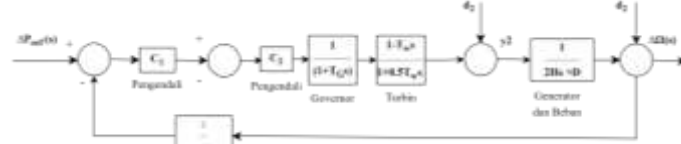
Untuk perancangan pengendali, maka dilakukan pengujian menggunakan *PIDTune* model standard yang akan mengendalikan sistem lingkaran tertutup yang mempunyai *feedback* atau umpan balik satu.

III. METODOLOGI

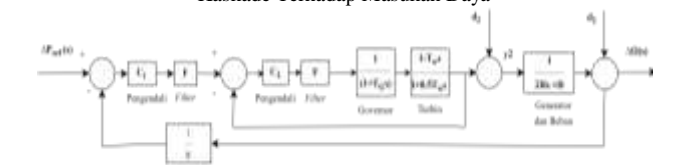
Pada penelitian ini, pemodelan sistem LFC dilakukan menggunakan simulasi *software* MATLAB. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap, diawali dengan studi literatur mengenai sistem LFC. Kemudian dirancang untuk pemodelan matematisnya. Lalu, mengimplementasikan MATLAB untuk menentukan pengendali yang optimal.

A. Pemodelan Matematis

Simulasi MATLAB digunakan untuk menganalisis performa pengendali kaskade pada sistem LFC hidrolik terhadap masukan daya. Blok diagram sistem menunjukkan aliran kontrol serta pengaturan untuk *governor* dan *droop*.



Gambar 2. Blok Diagram LFC Tipe Hidraulik dengan Pengendali Kaskade Terhadap Masukan Daya



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

Sistem kontrol kaskade yang dianalisis dalam penelitian ini terdiri dari dua *loop* pengendalian utama: *loop* dalam (*inner loop*) dan *loop* luar (*outer loop*). Penalaan dilakukan pada *loop* luar, yang berfungsi mengontrol frekuensi sistem melalui Heru Dibyo Laksono : Analisis Kinerja Pengendali Kaskade....

penyesuaian *governor*. Penyesuaian parameter dilakukan untuk memastikan respons cepat terhadap perubahan beban dan mengurangi *overshoot* tanpa mengorbankan stabilitas jangka panjang. *Loop* dalam, yang bertugas mengatur dinamika turbin, menggunakan parameter *default* berdasarkan spesifikasi pabrikan dan tidak di-*tuning* lebih lanjut dalam penelitian ini.

Berdasarkan Gambar 1 dan Gambar 2, masing-masing dari blok diagram tersebut mempunyai fungsi alih. Fungsi alih tersebut dapat dilihat pada persamaan berikut. Pada Gambar 1 merupakan blok diagram LFC tipe hidrolik dengan pengendali, di mana persamaannya dapat dilihat sebagai berikut.

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{C_1 C_2 - C_1 C_2 T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s + T_G s + \frac{1}{2} T_G T_w s^2 + C_2 - C_2 T_w s}\right) \left(\frac{1}{M_s + D}\right)}{1 + \left(\frac{C_1 C_2 - C_1 C_2 T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s + T_G s + \frac{1}{2} T_G T_w s^2 + C_2 - C_2 T_w s}\right) \left(\frac{1}{M_s + D}\right) \left(\frac{1}{R}\right)} \quad (3)$$

Pada Gambar 2 merupakan blok diagram LFC tipe hidrolik dengan pengendali menggunakan *filter*, di mana persamaannya dapat dilihat sebagai berikut.

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{\left(\frac{FC_1 FC_2 - FC_1 FC_2 T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s + T_G s + \frac{1}{2} T_G T_w s^2 + FC_2 - FC_2 T_w s}\right) \left(\frac{1}{M_s + D}\right)}{1 + \left(\frac{FC_1 FC_2 - FC_1 FC_2 T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s + T_G s + \frac{1}{2} T_G T_w s^2 + FC_2 - FC_2 T_w s}\right) \left(\frac{1}{M_s + D}\right) \left(\frac{1}{R}\right)} \quad (4)$$

B. Kriteria Perancangan

Pada penelitian ini, ditetapkan kriteria perancangan yang berfungsi untuk menunjukkan pengendali yang optimal pada sistem LFC. Kriteria perancangan yang digunakan sebagai berikut.

Tabel 2. Kriteria Perancangan Analisa Load Frequency Control Tipe Hidraulik Terhadap Masukan Daya

| Kriteria Perancangan | Nilai Perancangan |
|----------------------------------|-------------------|
| Waktu Naik (t_r) | <2.000 s |
| Waktu Puncak (t_p) | <4.000 s |
| Waktu Keadaan Mantap (t_s) | <6.000 s |
| Nilai Puncak (y_p) | <0.055 |
| Nilai Lewatan Maksimum (M_p) | <20% |

Berdasarkan Tabel 2, nilai dari kriteria perancangan didapatkan dari pengujian sistem LFC tanpa pengendali. Parameter seperti waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, dan lewatan maksimum dipilih karena relevansinya dalam menilai performa sistem kontrol. Namun, kesalahan tunak tidak dimasukkan sebagai kriteria utama karena fokus utama penelitian ini adalah pada respons transien sistem.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian hasil dan analisis, dapat dilihat bahwa penggunaan pengendali kaskade dengan *governor* 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



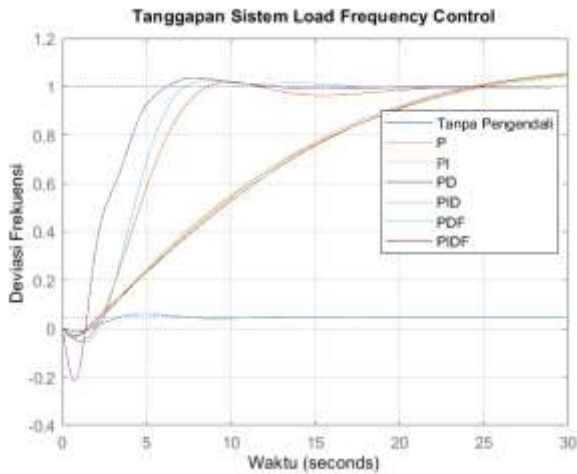
panjang. Adapun hasil dari analisis tersebut didapat dari perbandingan kriteria yang ditetapkan.

Tabel 3. Informasi Analisa Peralihan dengan Pengendali Kaskade Terhadap Masukan Daya

| Peralihan | P | PI | PD | PID | PDF | PIDF |
|-----------|--------------|--------------|-----|--------------|--------------|--------------|
| t_r | 0.811 | 16.633 | NaN | 16.469 | 0.005 | 16.581 |
| t_p | 4.102 | 33.787 | Inf | 34.816 | 1.225 | 35.259 |
| t_s | 21.391 | 105.680 | NaN | 90.824 | 17.253 | 91.113 |
| y_p | 0.923 | 1.058 | Inf | 1.051 | 1.216 | 1.063 |
| M_p | 76.196 | 5.775 | NaN | 5.071 | 6341.200 | 6.253 |

Berdasarkan Tabel 3, tidak pengendali yang memenuhi kriteria perancangan. Pada waktu naik dan waktu puncak hanya pengendali P dan PDF yang memenuhi. Hal ini disebabkan adanya komponen Derivatif (D) yang mampu memberikan respons cepat dan mencapai puncak tanpa osilasi berlebihan. Pada nilai lewatan maksimum hanya pengendali PI, PID, dan PIDF yang memenuhi. Hal ini dikarenakan integrasi komponen integral mampu mengurangi dan mengendalikan *overshoot*.

Pengendali PD pada setiap parameter peralihan, tidak ada yang memenuhi. Hasil dari pengendali PD sendiri tidak terdefinisi (ditunjukkan dengan *NaN* atau *Inf*) yang mengindikasikan sistem menjadi tidak stabil. Tetap adanya pengendali ini guna untuk membandingkan dengan pengendali lainnya untuk memperlihatkan perbedaan dan efektivitas masing-masing pengendali. Oleh karena itu, metode kontrol PD jarang digunakan dalam implementasi praktis karena sulitnya mencapai kestabilan sistem secara keseluruhan.



Gambar 4. Tanggapan Analisa Peralihan Sistem LFC Tipe Hidraulik Menggunakan Konfigurasi Kaskade

Berdasarkan dari Gambar 4, dapat dilihat bahwa pengendali PD menyebabkan sistem tidak stabil dengan osilasi yang besar dan tidak adanya kestabilan jangka panjang. Pengendali PDF menunjukkan kinerja terbaik dengan waktu pemulihan tercepat, *overshoot* yang minimal, dan stabilitas terjaga. Pengendali PI dan PID memiliki kelebihan dalam mengurangi kesalahan (*steady-state error*), tetapi waktu pemulihannya lebih lama dibanding pengendali lainnya.

Tabel 4. Informasi Analisa Peralihan dengan Pengendali Kaskade Menggunakan *Filter* Terhadap Masukan Daya ($\tau=0,025$)

| Peralihan | P | PI | PD | PID | PDF | PIDF |
|-----------|--------------|--------------|-----|--------------|--------------|--------------|
| t_r | 0.828 | 16.585 | NaN | 16.404 | 0.005 | 16.296 |
| t_p | 4.244 | 33.721 | Inf | 34.756 | 1.439 | 34.807 |
| t_s | 24.903 | 105.930 | NaN | 90.936 | NaN | 90.362 |
| y_p | 0.928 | 1.058 | Inf | 1.051 | 1.256 | 1.063 |
| M_p | 78.809 | 5.755 | NaN | 5.052 | 6710.800 | 6.303 |

Tabel 5. Informasi Analisa Peralihan dengan Pengendali Kaskade Menggunakan *Filter* Terhadap Masukan Daya ($\tau=0,05$)

| Peralihan | P | PI | PD | PID | PDF | PIDF |
|-----------|--------------|--------------|-----|--------------|--------------|--------------|
| t_r | 0.847 | 16.537 | NaN | 16.338 | 0.006 | 15.848 |
| t_p | 4.372 | 33.639 | Inf | 34.681 | 1.605 | 33.779 |
| t_s | 25.875 | 106.180 | NaN | 91.049 | NaN | 89.759 |
| y_p | 0.932 | 1.057 | Inf | 1.050 | 1.238 | 1.061 |
| M_p | 81.031 | 5.735 | NaN | 5.034 | 6759.100 | 6.064 |

Tabel 6. Informasi Analisa Peralihan dengan Pengendali Kaskade Menggunakan *Filter* Terhadap Masukan Daya ($\tau=0,075$)

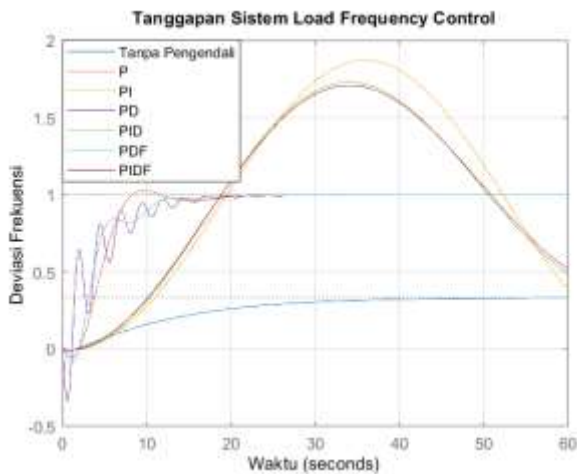
| Peralihan | P | PI | PD | PID | PDF | PIDF |
|-----------|--------------|--------------|-----|--------------|--------------|--------------|
| t_r | 0.868 | 16.489 | NaN | 16.272 | 0.007 | 16.382 |
| t_p | 4.502 | 33.598 | Inf | 34.590 | 1.749 | 35.034 |
| t_s | 29.544 | 106.450 | NaN | 91.164 | NaN | 91.163 |
| y_p | 0.933 | 1.057 | Inf | 1.050 | 1.203 | 1.062 |
| M_p | 82.919 | 5.716 | NaN | 5.016 | 6689.400 | 6.231 |

Tabel 7. Informasi Analisa Peralihan dengan Pengendali Kaskade Menggunakan *Filter* Terhadap Masukan Daya ($\tau=0,1$)

| Peralihan | P | PI | PD | PID | PDF | PIDF |
|-----------|--------------|--------------|-----|--------------|--------------|--------------|
| t_r | 0.891 | 16.441 | NaN | 16.205 | 0.007 | 16.416 |
| t_p | 4.637 | 33.548 | Inf | 34.469 | 1.884 | 35.117 |
| t_s | 30.648 | 106.740 | NaN | 91.281 | NaN | 91.546 |
| y_p | 0.934 | 1.057 | Inf | 1.050 | 1.163 | 1.062 |
| M_p | 84.498 | 5.697 | NaN | 4.999 | 6578.300 | 6.192 |

Berdasarkan Tabel 4-7, tidak ada pengendali yang memenuhi keseluruhan kriteria perancangan. Pada waktu naik hanya pengendali P dan PDF yang memenuhi, waktu puncak hanya pengendali PDF yang memenuhi. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali PDF mampu memberikan respons cepat serta mencapai nilai puncak dengan stabilitas yang memadai. Selain itu, pengendali P mengindikasikan cukup efektif dalam merespons perubahan awal beban daya meskipun kurang optimal dalam mencapai stabilitas puncak dibanding PDF yang memiliki komponen Derivatif (D) untuk redaman tambahan. Pada nilai lewatan maksimum hanya pengendali PI, PID, dan PIDF yang memenuhi. Hal ini mengindikasikan komponen Integral (I) atau tambahan *filter* dalam pengendali PIDF berperan penting dalam mengendalikan *overshoot* serta memerlukan penyesuaian dalam mengatasi kesalahan *residual* dan menstabilkan sistem setelah mencapai puncak.

Pengendali PD pada konfigurasi kaskade menunjukkan ketidakstabilan yang signifikan, sebagaimana terlihat pada data yang menghasilkan informasi *NaN* dan *Inf*. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh pengaruh komponen derivatif dalam pengendali PD yang memperkuat osilasi dalam sistem dinamis. Tanpa adanya komponen integral, sistem tidak mampu meredam gangguan dengan efektif sehingga menghasilkan respons yang tidak stabil. Oleh karena itu, pengendali PD jarang digunakan dalam konfigurasi ini karena ketidakstabilannya.



Gambar 5. Tanggapan Analisa Peralihan Sistem LFC Tipe Hidraulik Menggunakan Konfigurasi Kaskade Menggunakan Filter ($\tau=0,025$)

Berdasarkan dari Gambar 5, dapat dilihat bahwa pengendali P, PI, PID, PDF dan PIDF menunjukkan kinerja terbaik dalam mengatasi gangguan pada sistem LFC. Dengan pengendali P dan PDF memberikan waktu respons tercepat dan pengendali PI, PID, dan PIDF memberikan kestabilan yang optimal.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis performansi untuk sistem LFC hidraulik menunjukkan bahwa karakteristik *droop* secara umum memberikan stabilitas yang baik dalam mengurangi *overshoot* meskipun waktu respons sedikit lebih lama dibanding tanpa *droop*. Pada waktu naik, pengendali P dan PDF memenuhi kriteria perancangan. Sedangkan, pada waktu puncak hanya pengendali PDF yang memenuhi kriteria perancangan. Hal ini dikarenakan adanya komponen derivatif yang memberikan performa terbaik dalam merespons cepat dan mengurangi *overshoot*. Penambahan *filter* pada pengendali P dan PDF terbukti efektif dalam meredam gangguan frekuensi tinggi sehingga dapat meningkatkan stabilitas sistem. Secara keseluruhan, pengendali P dan PDF direkomendasikan untuk menjaga stabilitas frekuensi pada sistem LFC hidraulik terutama pada kondisi beban yang dinamis.

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.

REFERENSI

- [1] F. R. Ningsih, "Simulasi Dan Analisa Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Dengan Pilot Servo Dan Kombinasi Pengendali PIDTune Model Standar (Model Hidraulik)," *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] I. P. Riasa, R. S. Hartati, I. B. G. Manuaba, and D. A. S. Santiar, Heru Dibyo Laksono : Analisis Kinerja Pengendali Kaskade....

- [4] "Pengaruh PLTB Sidrap Terhadap Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 1, p. 27, 2020, doi: 10.24843/mite.2020.v19i01.p04.
- [5] Oladiran Kayode Olajiga, Emmanuel Chigozie Ani, Zamathula Queen Sikhakane, and Tosin Michael Olatunde, "Assessing the Potential of Energy Storage Solutions for Grid Efficiency: A Review," *Eng. Sci. Technol. J.*, vol. 5, no. 3, pp. 1112–1124, 2024, doi: 10.51594/estj.v5i3.974.
- [6] G. Liu, J. H. Park, C. Hua, and Y. Li, "Hybrid Dynamic Event-Triggered Load Frequency Control for Power Systems With Unreliable Transmission Networks," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 53, no. 2, pp. 806–817, 2023, doi: 10.1109/TCYB.2022.3163271.
- [7] S. Asgari, M. B. Menhaj, A. A. Suratgar, and M. G. Kazemi, "A disturbance observer based fuzzy feedforward proportional integral load frequency control of microgrids," *Int. J. Eng. Trans. A Basics*, vol. 34, no. 7, pp. 1694–1702, 2021, doi: 10.5829/IJE.2021.34.07A.13.
- [8] E. Noviyani and P. Harjono, "I-1 Studi Pelepasan Beban Pada Skema Pertahanan (Defence Scheme) Jaringan Sistem Khatulistiwa," pp. 1–7, 2023, [Online]. Available: <https://media.neliti.com/media/publications/191211-ID-studi-pelepasan-beban-pada-skema-pertaha.pdf>
- [9] D. Marsudi, "Operasi Sistem Tenaga Listrik," *Graha Ilmu*, no. April, pp. 2–5, 2006.
- [10] H. D. Laksono and R. 'Aisyah, "Frequency Domain Analysis of Load Frequency Control Using PIDTune Model Standard," *Andalas J. Electr. Electron. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 44–51, 2023, doi: 10.25077/ajeet.v3i1.38.
- [11] 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.
- [12] D. Wahyudi, "Analisis Kestabilan Transient dan Pelepasan Beban saat terjadi Gangguan pada Pembangkit di PTPN X (Persero) PG. Ngadirejo Kediri," *J. Tek. Elektro*, vol. 07, no. 2, pp. 113–120, 2018, [Online]. Available: <https://jurnal-lp2m.umnaw.ac.id/index.php/JP2SH/article/view/339/295>
- [13] P. Kundur, "Power System Stability and Control," *Power System Stability and Control*. doi: 10.1201/9781420009248.
- [14] M. Kusriyanto, H. S. Utama, and I. Effendi, "Prototype of Automatic Frequency Control in Microhydro Power Plant with Dummy Load Based on Arduino Uno and Labview," *Teknoin*, vol. 27, no. 1, pp. 1–8, 2021, doi: 10.20885/teknoin.vol27.iss1.art1.
- [15] H. Bevrani, "Robust Power System Frequency Control," *Robust Power Syst. Freq. Control*, 2009, doi: 10.1007/978-0-387-84878-5.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] I. M. A. Nugraha, I. G. M. N. Desnanjaya, L. G. G. Serihollo, and J. S. M. Siregar, "Perancangan Hybrid System PLTS dan Generator Sebagai Catu Daya Tambahan Pada Tambak Udang Vaname: Studi Kasus Politeknik Keluatan Dan Perikanan Kupang," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 1, p. 121, 2020, doi: 10.24843/mite.2020.v19i01.p18.
- [19] C. S. M. Da Silva, N. J. F. Da Silva, F. A. D. C. Ayres Junior, R. L. P. De Medeiros, L. E. S. E. Silva, and V. F. De Lucena, "Experimental Implementation of Hydraulic Turbine Dynamics and a Fractional Order Speed Governor Controller on a Small-Scale Power System," *IEEE Access*, vol. 12, no. March, pp. 40480–40495, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3375349.
- [20] A. Adrianti, M. Nasir, and A. R. Salvayer, "Skema Pelepasan Beban Menggunakan Relai Rate of Change of Frequency dengan Supervisi Under Frequency Relay," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 2, p. 249, 2020, doi: 10.24843/mite.2020.v19i02.p18.
- [21] A. Fernández-Guillamón, E. Muljadi, and A. Molina-García, "Frequency control studies: A review of power system, conventional and renewable generation unit modeling," *Electr. Power Syst. Res.*, p-ISSN:1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372



9 772503 237160

- vol. 211, no. January, 2022, doi: 10.1016/j.epr.2022.108191.
- [21] 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.
- [22] A. A. Aloukili, T. M. Nasser, S. Abuzaid, and M. A. Mehanna, "Improved of Load Frequency Control in a Three-Area Non-Reheat System Using Hybrid Fuzzy-PI Controller and PIDF based on Mountain Gazelle Optimizer," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 13, no. 4, pp. 1632–1645, 2023. doi: 10.20508/ijrer.v13i4.14242.g8841.
- [23] A. G. Wibisono, "Sistem pengendali robot bergerak lurus dengan kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) berbasis LabView," *Telekontran*, vol. 3, no. 2, pp. 13–24, 2015.
- [24] P. M. Dash, A. K. Baliarsingh, and S. K. Mohapatra, "Frequency control of power system with electric vehicles using hybrid african vultures optimization algorithm and pattern search tuned fuzzy PID controller," *EAI Endorsed Trans. Energy Web*, vol. 10, pp. 1–14, 2023, doi: 10.4108/EW.135.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Y. V. Hote and S. Jain, "PID controller design for load frequency control: Past, Present and future challenges," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 604–609, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.162.