

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN BEBAN TERHADAP FREKUENSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK**Dicha Adi Satrio¹, Rifqi Firmansyah², Parama Diptya Widayaka³, Sayyidul Aulia Alamsyah⁴**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
email : dicha.19002@mhs.unesa.ac.id, rifqifirmansyah@unesa.ac.id,
paramawidayaka@unesa.ac.id, sayyidulalamsyah@unesa.ac.id

Abstract

Frequency stability in the Indonesian power system faces significant challenges due to load growth and increasing penetration of renewable energy. Sudden load variations may cause frequency deviations that can trigger Under Frequency Load Shedding (UFLS) or large-scale system disturbances. This study analyzes the impact of load changes on frequency response characteristics in a single-area Load Frequency Control (LFC) system. Simulations were carried out using MATLAB/Simulink with system parameters of inertia constant $H = 5s$, governor droop $R = 0.05pu$, and load damping factor $D = 1.0pu$, under load disturbances of $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, and $\pm 15\%$. System performance was evaluated based on frequency nadir, Rate of Change of Frequency (RoCoF), overshoot, and settling time, and validated against the Kundur (1994) reference model. The results show that without a PI controller, the system is unable to restore frequency to its nominal value. The application of a PI controller significantly improves system performance, where ITAE-based optimized parameters ($K_p = 16$, $K_i = 14$) achieve a settling time of 15 seconds, outperforming the initial tuning ($K_p = 5$, $K_i = 3$) with a settling time of 45 seconds. These findings provide technical recommendations for optimizing governor and Automatic Generation Control (AGC) settings in power systems with high renewable energy penetration..

Article History*Submitted: 15 Februari 2026**Accepted: 18 Februari 2026**Published: 19 Februari 2026***Key Words**

Load Frequency Control, Frequency Stability, PI Controller, ITAE, Power System Dynamics

Abstrak

Stabilitas frekuensi sistem tenaga listrik Indonesia menghadapi tantangan akibat pertumbuhan beban dan meningkatnya penetrasi energi terbarukan. Perubahan beban yang mendadak dapat menimbulkan deviasi frekuensi yang berpotensi memicu UFLS maupun gangguan sistem. Penelitian ini menganalisis pengaruh perubahan beban terhadap respons frekuensi pada sistem Load Frequency Control (LFC) single-area. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink dengan parameter $H = 5s$, $R = 0,05pu$, dan $D = 1,0pu$, serta gangguan beban $\pm 5\%$. Kinerja sistem dievaluasi berdasarkan frequency nadir, RoCoF, overshoot, dan settling time, serta divalidasi menggunakan referensi Kundur (1994). Hasil menunjukkan bahwa tanpa pengendali PI, sistem tidak mampu mengembalikan frekuensi ke nilai nominal. Penerapan pengendali PI mampu meningkatkan kinerja sistem, di mana parameter hasil optimasi berbasis ITAE ($K_p = 16$, $K_i = 14$) menghasilkan settling time 15 detik, lebih baik dibandingkan hasil tuning awal ($K_p = 5$, $K_i = 3$) dengan settling time 45 detik. Penelitian ini memberikan rekomendasi teknis dalam pengoptimalan pengaturan governor dan AGC pada sistem tenaga listrik di era transisi energi.

Sejarah Artikel*Submitted: 15 Februari 2026**Accepted: 18 Februari 2026**Published: 19 Februari 2026***Kata Kunci**

Load Frequency Control, perubahan beban, deviasi frekuensi, PI controller, MATLAB/Simulink ITAE

PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik merupakan infrastruktur vital yang mendukung kehidupan modern, menyediakan energi listrik untuk berbagai sektor seperti industri, rumah tangga, dan transportasi. Di Indonesia, pertumbuhan ekonomi yang pesat disertai dengan peningkatan permintaan energi listrik, di mana data Badan Pusat Statistik (BPS) menunjukkan bahwa konsumsi listrik nasional mencapai sekitar 1.200 kWh per kapita pada tahun 2024, dengan proyeksi peningkatan hingga 1.500 kWh per kapita pada 2030 (BPS, 2024). Namun, sistem tenaga listrik bersifat dinamis dan rentan terhadap gangguan, salah satunya adalah perubahan beban (load variation). Frekuensi sistem tenaga listrik merupakan indikator utama keseimbangan antara pasokan (generasi) dan permintaan (beban).

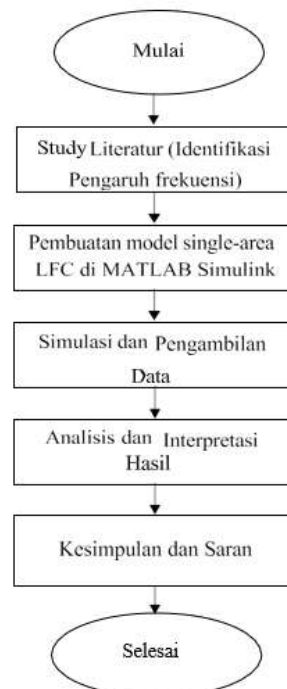
Dalam kondisi ideal, frekuensi di Indonesia ditetapkan pada 50 Hz sesuai standar PLN (Perusahaan Listrik Negara). Perubahan beban secara tiba-tiba, seperti penambahan beban

puncak pada malam hari atau penurunan beban saat jam sibuk industri berakhir, dapat menyebabkan ketidak seimbangan daya aktif. Hal ini mengakibatkan deviasi frekuensi, yang jika tidak dikendalikan dengan baik, berpotensi menimbulkan blackout atau kerusakan peralatan (Kundur, 1994). Studi kasus blackout nasional di Jawa-Bali pada Agustus 2019 menunjukkan bahwa gangguan transmisi yang dipicu oleh ketidakseimbangan beban menyebabkan frekuensi turun hingga di bawah 47 Hz, memengaruhi jutaan pelanggan (PLN, 2019).

Untuk menjaga keseimbangan antara daya pembangkitan dan beban, sistem tenaga listrik dilengkapi dengan mekanisme Load Frequency Control (LFC). Kinerja LFC dipengaruhi oleh karakteristik pembangkit dan variasi beban, sehingga diperlukan analisis pengaruh perubahan beban terhadap respons frekuensi sistem. Analisis ini bertujuan memahami perilaku dinamis sistem tenaga listrik sekaligus menjadi dasar perancangan strategi pengendalian yang efektif, khususnya pada sistem tenaga modern dengan integrasi energi terbarukan yang bersifat fluktuatif.

METODE

Metode eksperimental kuantitatif berbasis simulasi digunakan dalam penelitian ini. Metode ini dipilih karena memungkinkan analisis sistematis dan numerik sistem tenaga listrik menggunakan perangkat lunak MATLAB dan Simulink. Tujuan utama metode ini adalah untuk analisis model sistem tenaga listrik ekuivalen satu area (single-area power system) yang mewakili perilaku frekuensi pada sistem interkoneksi besar (dapat di-scale ke sistem Jamali atau sistem Indonesia lainnya). Model ini terdiri dari pembangkit termal, governor, turbine, dan beban frekuensi-sensitif. Selanjutnya untuk memberikan gambaran dari alur penelitian diberikan gambaran berupa flowchart yang dapat dilihat pada gambar 1 .



Gambar 1 Flowchart Rancangan Penelitian

Pembuatan model single-area LFC di MATLAB pembuatan model single-area LFC di MATLAB Simulink bangun model Load Frequency Control (LFC) single-area menggunakan blok-blok Simscape Electrical dan Control System Toolbox. Model terdiri dari

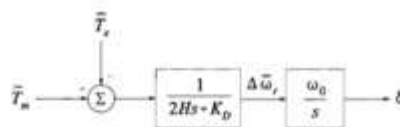
blok governor - turbine, swing equation, load, serta blok gangguan beban (step load). Semua parameter diinisialisasi sesuai nilai tipikal pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Parameter Percobaan

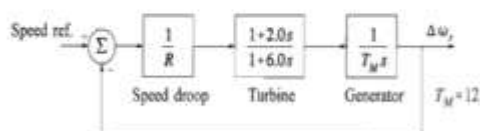
Komponen	Transfer Function / Model	Parameter Utama
Governor + Turbine	TGOV1 atau model reheat turbine sederhana	$R = 0,05$ pu (droop 5 %)
Sistem Putar (Swing)	$\frac{2Hs + D}{s}$	$H = 4,8$ detik, D $= 1$ pu
Prime Mover	on-reheat thermal	$T_g = 0,2$ s, $T_t = 0,3$ s
Load	Frequency- dependent load	$D = 1-2$ (beban sensitif frekuensi)
engatur Daya (LFC)	PI Controller	K_p & K_i akan divariasikan

Parameter Sbase akan disesuaikan dengan kondisi pembangkit jawa bali (PJB) pada area jawa serta hasil pembuatan pemodelan sistem juga akan di validasi dengan penelitian terdahulu dengan sumber yang berbeda. Adapun parameter yang akan digunakan di ambil dari RUPTL PLN 2025 – 2034 yang berisi perencanaan pembangunan kelistrikan negara, Pada penelitian ini data akan di ambil dari pembangkitan di area jawa karena model dari penelitian ini terbatas pada single area.

Pemodelan sistem pada penelitian ini mengambil 3 sumber yang berbeda yaitu Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control, Bevrani. (2009) Robust Power System Frequency R2025a (2025). Berikut merupakan sumber yang menjadi acuan untuk membangun pemodelan sistem single area load Frequency Control pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2, gambar 3,

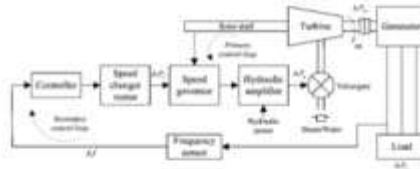


Gambar 1 Diagram Blok Swing Equation((Kundur,1994)

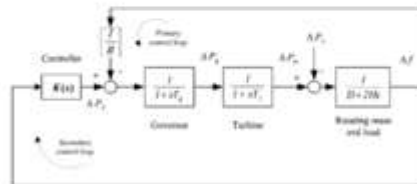


Gambar 2. Blok Diagram Load Frequency Control

(Kundur,1994)



Gambar 4. Pemodelan Sistem Load Frequency Control (Beverni, 2014)



Gambar 5. Diagram Blok Sistem Load Frequency Control (Beverni, 2014)

Dari berbagai sumber yang dijelaskan dapat disimpulkan bahwa blok pemodelan sistem Load Frequency Control tetap sama dikarenakan fisika dasar swing equation, governor, dan turbine tidak berubah selama pembangkit masih sinkronous generator (PLTU, PLTGU, PLTA) perubahan terlihat pada parameter yang digunakan.

Pada tahap simulasi sistem dengan MATLAB/Simulink, dilakukan pengujian terhadap sistem kontrol yang telah dirancang. Ditetapkan 2 skenario perubahan beban yang mencakup peningkatan beban 5% dan Penurunan beban -5% selanjutnya untuk melihat sensitivitas sistem variasi parameter droop dan inersia untuk melihat sensitivitas system serta koefisien redaman beban. Untuk pelaksanaan simulasi dinamik Setiap skenario disimulasikan selama 50–100 detik dengan solver ode45 (variabel-step). Gangguan beban diberikan pada $t = 5$ detik.

Data frekuensi sistem (Δf) direkam setiap 0,01 detik menggunakan blok Scope dan To Workspace. Tahap analisis dan interpretasi hasil parameter yang akan dilakukan untuk mengamati hasil dari pengambilan data. Data hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk tabel untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai simulasi yang telah dilakukan. Penambahan serta pengurangan beban sebesar 5% di lakukan untuk interpretasi gangguan kecil pada sebuah sistem tenaga listrik, untuk memberikan gambaran luas tentang gangguan tersebut nilai beban di ambil dari presentase *peak load* yang di miliki pembangkit jawa pada tahun 2025 dengan nilai sebesar 34.377 G. Selanjutnya gangguan dapat dihitung guna melihat nilai dari gangguan dalam sistem tenaga listrik di lingkup pembangkitan area jawa.

$$34.377 \times \frac{5}{100} = 1.718,85 \text{ MW}$$

$$1.718,85 \text{ GW}$$

$$\Delta P_L = \frac{1.718,85}{34.377} = 0,05 \text{ pu}$$

Untuk interpretasi gangguan kecil di dapatkan beban 1.718,85 sedangkan jika di ubah menjadi satuan pu akan di dapatkan nilai 0,05 pu.

Kesimpulan dan saran dibuat dari rangkuman hasil penelitian yang mencakup hasil dari analisis respon frekuensi terhadap beban yang ber variatif di mulai dari penambahan serta pengurangan beban atau penambahan gangguan lain semisal mutase penyulang dan up rating, mengidentifikasi kemungkinan adanya karakteristik perubahan frekuensi yang di pengaruhi oleh beban dan yang terakhir mengkaji setting time dari LFC. Kesimpulan di buat berdasarkan hasil analisis data dari tiga hal yang akan di jelaskan di atas, saran di buat apabila Kesimpulan telah tercapai dan hasil dari saran di harapkan dapat membantu penelitian yang akan datang.

Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang akan di gunakan dalam penelitian ini menggunakan Teknik berikut.

Analisis Sensitivitas Parameter

Analisis ini dilakukan untuk melihat pengaruh performa system dengan penambahan variasi beban dengan cara membandingkan dua rangkaian Load Frequency Control single area menggunakan dua parameter yang berbeda. Adapun perbandingan tersebut meliputi parameter H,R ,D.

Droop governor (R) : 0,05– 0,08 pu Konstanta inersia (H): 4 – 8 detik Load damping (D) :1,0 – 2,0 pu

Analisis Time Domain

Analisis dengan metode ini di lakukan dengan cara menghitung seluruh parameter pada grafik simulasi yang telah dilakukan (deviasi frekuensi, nadir,settling time) secara langsung pada kurva pada respon frekuensi yang dilihat dari scope yang mengarah ke governor dan swing equation.

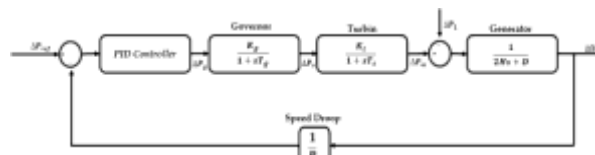
Perbandingan

Perbandingan yang akan dilakukan pada penelitian ini antara lain :

Perbandingan menggunakan primary control (*load frequency control*) dan PI Controller Skenario menggunakan PI controller (Kp, Ki di- tuning Ziegler-Nichols sebagai pendekatan awal serta fine tuning dilakukan secara manual) hal ini dilakukan untuk membandingkan nilai Δf dan setting time dari system tujuan kedua nya yakni untuk mengetahui seberapa penting LFC sekunder pada sistem. Langkah selanjutnya jika control PI masih dirasa kurang untuk mencapai batas aman target kontrol maka akan dilanjutkan dengan optimasi menggunakan pendekatan berbasis ITAE.

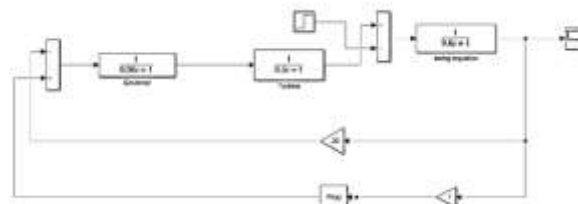
Pemodelan Sistem Load Frequency Control Single area.

Diagram blok merepresentasikan struktur model Load Frequency Control (LFC) yang digunakan dalam simulasi, menunjukkan alur sinyal dari gangguan beban hingga respons frekuensi sistem serta interaksi antar komponen utama, yaitu governor, turbin, dinamika sistem putar (swing equation), dan pengendali PI. Model yang digunakan adalah LFC single-area non-reheat thermal turbine yang sederhana namun representatif. Gangguan beban (ΔP_L) diberikan sebagai input, sementara dinamika inersia dan redaman sistem dimodelkan melalui swing equation ($2Hs+D$) untuk menghasilkan deviasi frekuensi (Δf). Umpan balik negatif melalui droop ($1/R$) dan pengendali PI pada loop sekunder digunakan untuk menghilangkan error keadaan tunak dan mengembalikan frekuensi ke nilai nominal. Diagram blok yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 6. Diagram blok Load Frequency Control Single area.

Dengan mengacu pada diagram blok yang telah divalidasi berdasarkan literatur yang relevan, model tersebut dapat dijadikan acuan dalam penyusunan pemodelan sistem Load Frequency Control (LFC) menggunakan MATLAB/Simulink, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Setiap blok pada model merepresentasikan komponen fisik utama sistem tenaga listrik, meliputi governor, turbin, dinamika sistem putar, serta pengendali sekunder, sehingga hubungan sebab-akibat antara gangguan beban dan respons frekuensi dapat dianalisis secara sistematis. Pemodelan ini memungkinkan pengamatan respons dinamis sistem terhadap variasi beban, evaluasi kinerja pengendali, serta analisis karakteristik stabilitas frekuensi berdasarkan parameter yang telah ditetapkan. Dengan demikian, model simulasi yang dibangun tidak hanya bersifat representatif secara teoritis, tetapi juga dapat digunakan sebagai alat analisis yang andal dalam mengevaluasi strategi pengendalian frekuensi.



Gambar 7. Desain Load Frequency Control Single Area pada Matlab/Simulink

Prosedur Tuning PI Controller

Proses tuning pengendali PI pada sistem Load Frequency Control (LFC) diawali dengan pendekatan Ziegler–Nichols (ZN) berbasis osilasi marginal. Namun, simulasi menunjukkan bahwa sistem LFC yang digunakan memiliki karakteristik peredaman alami yang tinggi akibat pengaruh parameter inersia, droop, dan damping, sehingga kondisi osilasi marginal tidak dapat dicapai meskipun gain proporsional dinaikkan secara signifikan. Akibatnya, nilai ultimate gain dan ultimate period tidak dapat ditentukan. Oleh karena itu, tuning awal dilakukan secara empiris melalui simulasi berulang dengan mempertimbangkan kriteria performa berupa frequency nadir, overshoot, settling time, dan Rate of Change of Frequency (RoCoF).

Parameter hasil tuning empiris kemudian divalidasi terhadap pendekatan ZN untuk memastikan kewajaran dan konsistensi respons sistem. Selanjutnya, dilakukan optimasi lanjutan menggunakan kriteria Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) guna memperoleh respons sistem yang lebih optimal. Proses optimasi dilakukan dengan memvariasikan parameter K_p dan K_i secara bertahap, dimulai dari nilai awal $K_p = 5$ dan $K_i = 3$, dan mengevaluasi respons sistem terhadap gangguan beban yang sama. Parameter optimal dipilih berdasarkan penurunan settling time dan nilai ITAE secara konsisten, dengan tetap menjaga kestabilan sistem dan batas overshoot yang dapat diterima.

HASIL DAN PEMBAHASAN

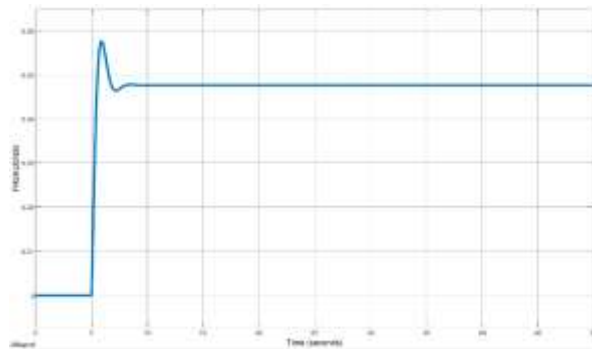
Penelitian ini dilaksanakan berdasarkan tahapan yang telah ditetapkan untuk memastikan proses yang terstruktur dan sistematis. Fokus utama dari hasil dan pembahasan berfokus pada penyajian hasil simulasi model single-area Load Frequency Control (LFC) yang dikembangkan menggunakan MATLAB/Simulink, disertai dengan analisis dan interpretasi hasil. Tahapan penelitian meliputi pemodelan sistem LFC, validasi model dengan studi terdahulu, pelaksanaan simulasi dan pengambilan data, serta analisis respons sistem terhadap perubahan beban. Hasil simulasi digunakan untuk mengevaluasi pengaruh gangguan beban terhadap deviasi frekuensi, karakteristik respons sistem, dan waktu pemulihan (settling time).

Penambahan Beban +5%

Pengujian beban 5% pada penelitian ini menginterpretasikan gangguan kecil pada sistem tenaga listrik dengan mengambil data S base dari pembangkitan Jawa sebesar 34,377 GW didapat nilai gangguan sebesar 1.718,85 GW. Dalam kondisi nyata dapat diibaratkan sebagai

pembangkit, trafo serta beban industri yang tiba tiba naik dengan nilai yang telah di jelaskan. Untuk mengetahui respon dari sistem pengambilan data di mulai dari governor yang hanya memakai inersia, Sistem Load frequency control single area, Governor + PID dan yang terakhir Gabungan dari ketiga nya.

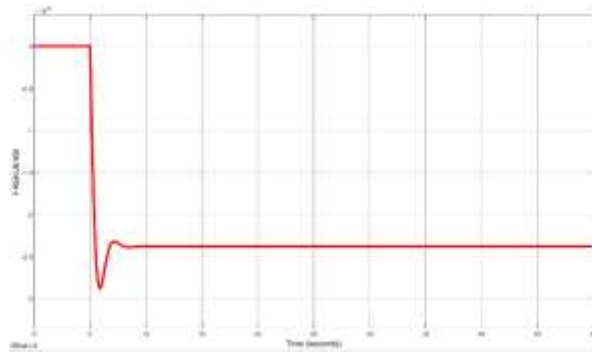
Simulasi pertama dalam penelitian ini difokuskan pada respons governor terhadap perubahan beban untuk mengamati karakteristik sistem inersia pada pembangkit tunggal. Tujuan utama adalah memahami bagaimana inersia sistem (konstanta H pada swing equation) dan droop governor bekerja meredam deviasi frekuensi tanpa adanya pengendalian tambahan dari Load Frequency Control (LFC). Hasil dari simulasi pembebanan 5% pada governor dapat di lihat pada gambar 8



Gambar 8. 1 Grafik Hasil Simulasi Governor tanpa PI

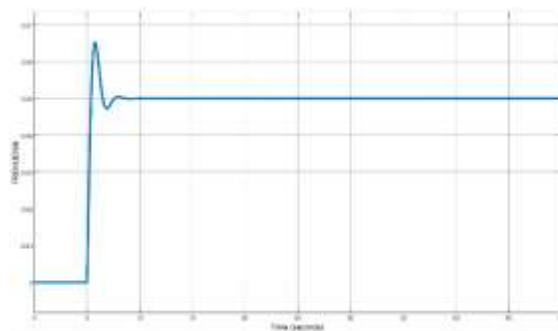
Respons governor terhadap gangguan beban $+0.05$ pu (5%) pada grafik gambar 8 menunjukkan kinerja primary control yang baik dan sesuai dengan karakteristik droop governor. Daya mekanik governor (ΔP_g) meningkat cepat dari 0 pu dan mencapai puncak sekitar 0.058 – 0.06 pu dalam waktu kurang dari 5 detik, dengan overshoot kecil sekitar 16–20% akibat perbedaan dinamika antara governor dan turbin. Setelah fase transien, respons menetap stabil pada nilai steady-state sebesar $+0.05$ pu, yang sama dengan besarnya gangguan beban, menegaskan bahwa governor droop mampu mengimbangi peningkatan beban secara permanen ($\Delta P_{g,ss} = \Delta P_L$).

Meskipun yang diamati adalah ΔP_g , deviasi frekuensi steady-state dapat diperkirakan berdasarkan droop $R = 0.05$, yaitu sekitar -0.0025 pu, dengan nadir frekuensi diperkirakan berada pada kisaran -0.0025 hingga -0.0028 pu. Nilai Rate of Change of Frequency (RoCoF) awal relatif moderat, sehingga tidak menimbulkan risiko terhadap kestabilan sistem. Settling time respons governor berada pada kisaran 18–22 detik, menunjukkan sistem yang well-damped tanpa osilasi berkepanjangan. Secara keseluruhan, hasil ini mencerminkan primary control yang responsif dan stabil, meskipun frekuensi tidak kembali ke nilai nominal akibat karakteristik droop. Temuan ini menjadi dasar pembandingan untuk pengujian LFC dengan penambahan secondary control PI pada tahap selanjutnya. Hasil dari simulasi pembebanan 5% pada swing equation dapat di lihat pada gambar 9



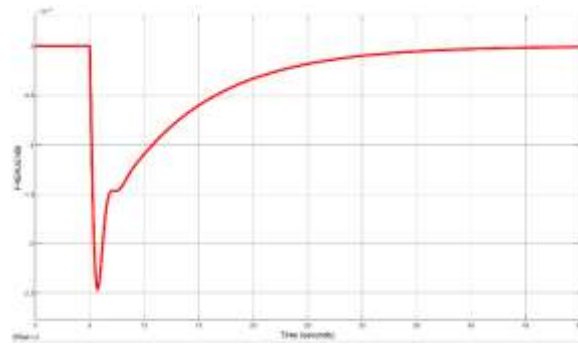
Gambar 9. Hasil Simulasi LFC Tanpa PI Controller dengan Penambahan Beban 5%

Respons sistem Load Frequency Control (LFC) tanpa pengendali PI terhadap gangguan beban $+0.05$ pu pada gambar 9 menunjukkan karakteristik primary frequency control yang sesuai dengan teori droop governor. Deviasi frekuensi (Δf) turun cepat dari kondisi awal dan mencapai nadir sekitar -0.0028 pu dalam waktu kurang dari 5 detik, akibat keterbatasan inersia dan respons awal governor. Respons sistem bersifat well-damped tanpa osilasi signifikan, dengan sedikit rebound sebelum mencapai kondisi steady-state. Nilai Rate of Change of Frequency (RoCoF) awal berada pada kisaran 0.0025 – 0.003 pu/s dan masih dalam batas aman. Deviasi frekuensi steady-state tercapai pada sekitar -0.0025 pu, sesuai dengan perhitungan teoritis berdasarkan droop governor ($\Delta f_{ss} = -R \times \Delta P_L$). Settling time sistem berada pada kisaran 20–25 detik, menunjukkan respons yang cepat dan stabil untuk kontrol primer. Hasil ini menegaskan kemampuan primary control dalam menahan penurunan frekuensi, namun dengan deviasi frekuensi permanen yang menjadi dasar pembandingan bagi evaluasi kinerja secondary control berbasis PI pada tahap selanjutnya.



Gambar 10. Grafik Hasil Simulasi Governor tanpa PI

Gambar 10 menunjukkan respons daya mekanik governor (ΔP_g) terhadap gangguan beban $+0.05$ pu dengan secondary controller PI aktif ($K_p = 5$, $K_i = 3$), yang mencerminkan kinerja full Load Frequency Control (LFC) yang stabil dan responsif. Daya mekanik meningkat cepat dan mencapai overshoot sekitar 0.065 pu dalam waktu kurang dari 5 detik, diikuti oleh undershoot kecil sebelum menetap pada nilai steady-state sebesar $+0.05$ pu, sesuai dengan besarnya gangguan beban. Respons ini menunjukkan aksi proporsional yang kuat dengan overshoot terkendali serta settling time governor sekitar 15–20 detik.



Gambar 11. Hasil Simulasi LFC dengan PI Controller dengan Penambahan Beban 5%

Respons frekuensi sistem (Δf) dengan pengendali PI ditunjukkan pada Gambar 11, di mana frekuensi mencapai nadir sekitar -0.0025 pu dengan RoCoF awal sebesar 0.0025 – 0.003 pu/s, kemudian pulih secara monoton tanpa osilasi menuju nilai nominal. Deviasi frekuensi steady-state berhasil dieliminasi sepenuhnya oleh aksi integral, dengan settling time sekitar 40–45 detik. Secara keseluruhan, penambahan pengendali PI mempertahankan karakteristik transient awal yang baik sekaligus menghilangkan deviasi frekuensi permanen, menunjukkan bahwa parameter $K_p = 5$ dan $K_i = 3$ menghasilkan respons LFC yang stabil.

Untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai pengaruh penambahan secondary controller PI terhadap performa sistem Load Frequency Control (LFC) single-area, dilakukan perbandingan antara empat kondisi pengujian utama pada gangguan peningkatan beban sebesar $+0.05$ pu (5%). Kondisi tersebut meliputi: (1) respons governor dengan primary control saja (droop governor), (2) respons deviasi frekuensi (Δf) pada LFC dengan primary control saja, (3) respons governor dengan penambahan secondary controller PI ($K_p = 5$, $K_i = 3$), serta (4) respons deviasi frekuensi pada full LFC dengan secondary controller PI aktif. Perbandingan ini difokuskan pada parameter kunci performa sistem, yaitu steady-state deviation, nadir frekuensi, peak/overshoot, rate of change of frequency (RoCoF), dan settling time. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 3.1 berikut, yang menunjukkan trade-off antara kecepatan respons primary control dengan akurasi dan eliminasi error yang dicapai melalui secondary control. Analisis ini menjadi dasar untuk mengevaluasi efektivitas tuning PI berbasis Ziegler- Nichols sebagai pendekatan tuning dan fine tuning menggunakan manual tuning, sekaligus membuktikan keunggulan full LFC dalam menjaga stabilitas frekuensi sistem tenaga listrik terhadap gangguan beban kecil.

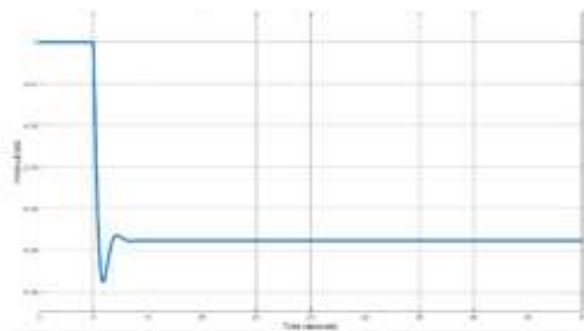
Tabel 1 Tabel perbandingan Hasil Simulasi (Penambahan Beban 5%)

Parameter	Governor	LFC	Governor + PID	LFC + PID
Steady- State Deviation	-0.0025 pu (permanen)	-0.0025 pu (permanen)	$+0.05$ pu $\Delta f_{ss} \approx 0$	$\Delta f_{ss} \approx 0$ pu)
Nadir	-0.0028 pu	≈ -0.0028 pu	Tidak langsung (ΔP_g) nadir ≈ -0.0025 pu (dari simulasi terkait)	≈ -0.0025 pu
Peak / Overshoot	$\approx +0.06$ pu	-	$\approx +0.065$ pu (overshoot $\approx 30\%$)	$(<1\%)$

	0.0025– 0.003 pu/s	0.0025– 0.003 pu/s	-	0.0025 –0.003 pu/s
Settling Time (t_s , $\pm 2\%$)	≈ 18 – 22 detik	≈ 20 – 25 detik	≈ 15 – 20 detik	≈ 40 – 45 detik

Pelepasan Beban -5%

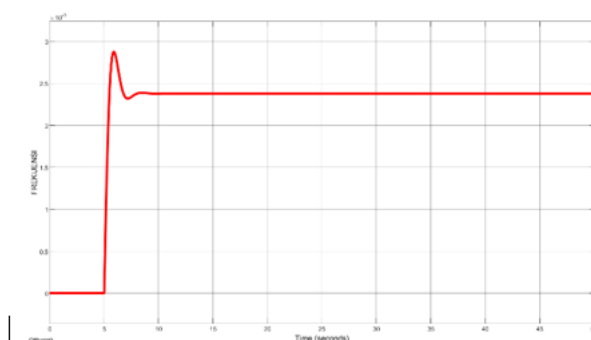
Pengujian beban -5% pada penelitian ini menginterpretasikan gangguan kecil pada sistem tenaga listrik dengan mengambil data S base dari pembangkitan jawa sebesar 34,377 GW didapat nilai gangguan sebesar 1.718,85 GW , Dalam kondisi nyata dapat di ibarat kan sebagai pembangkit ,trafo serta beban industri yang tiba tiba mati atau troubleshoot dengan nilai yang telah di jelaskan. Untuk mengetahui respon dari sistem pengambilan data di mulai dari governor yang hanya memakai inersia, Sistem Load frequency control single area, Governor + PID dan yang terakhir Gabungan dari ketiga nya. Simulasi pertama dalam penelitian ini difokuskan pada respons governor terhadap perubahan beban untuk mengamati karakteristik sistem inersia pada pembangkit tunggal. Tujuan utama adalah memahami bagaimana inersia sistem (konstanta H pada swing equation) dan droop governor bekerja meredam deviasi frekuensi tanpa adanya pengendalian tambahan dari Load Frequency Control (LFC). Hasil simulasi berupa grafik respon frekuensi yang direkam melalui scope pada governor, grafik respon tersebut dapat dilihat pada gambar 3. 12



Gambar 12. Grafik Hasil Simulasi Governor
Pelepasan Beban -5%

Gambar 3.12 menunjukkan respons daya mekanik governor (ΔP_g) terhadap pelepasan beban sebesar -0.05 pu yang mencerminkan karakteristik primary droop yang baik dan simetris dengan kasus peningkatan beban. Saat beban dilepaskan, daya governor menurun cepat dan mencapai undershoot sekitar -0.06 pu dalam waktu kurang dari 5 detik, akibat respons proporsional terhadap kenaikan frekuensi awal. Setelah fase transien, respons mengalami rebound kecil dan menetap stabil pada nilai steady-state sekitar -0.05 pu, sesuai dengan besarnya pelepasan beban. Settling time berada pada kisaran 15–20 detik dengan respons yang well- damped tanpa osilasi berlebih. Hasil ini menunjukkan bahwa governor droop mampu menangani pelepasan beban kecil secara cepat dan stabil, meskipun masih terdapat deviasi frekuensi permanen kecil akibat karakteristik droop. Langkah selanjutnya dalam penelitian ini adalah melakukan simulasi LFC pada sistem single- area tanpa controller integral atau proportional- integral (PI). Simulasi ini bertujuan untuk mengamati peningkatan performa sistem dalam meredam gangguan beban $+0.05$ pu, khususnya pada parameter overshoot, undershoot, settling time, dan eliminasi steady-state error. Hasil simulasi LFC akan

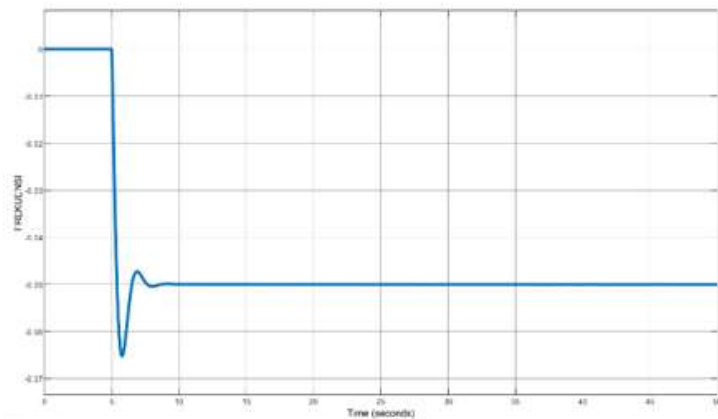
dibandingkan dengan respons governor saja untuk mengevaluasi efektivitas pengendalian suplementer. Hasil simulasi berupa grafik respon frekuensi yang direkam melalui scope pada swing equation, grafik respon tersebut dapat dilihat pada gambar 3. 13.



Gambar 13. Hasil Simulasi LFC Tanpa PI Controller dengan Penambahan Beban 5%

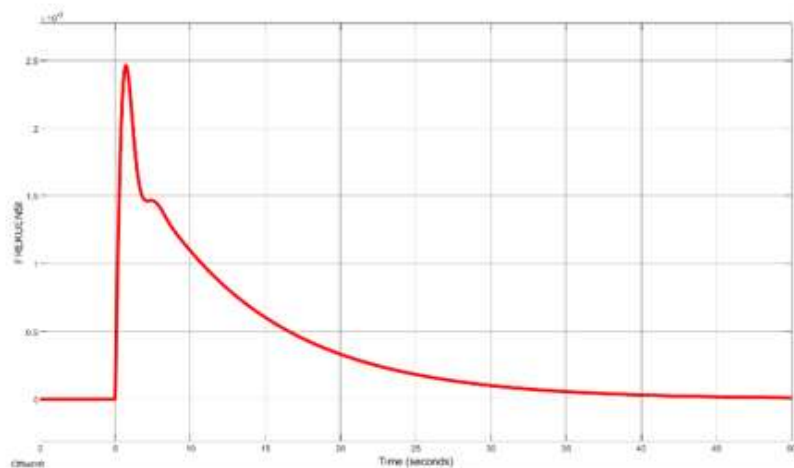
Gambar 3.13 menggambarkan respon frekuensi terhadap perubahan beban sebesar - 0.05 pu pada scope yang mengarah ke swing equation (Δf). Respons deviasi frekuensi (Δf) terhadap pelepasan beban -0.05 pu menunjukkan dinamika primary control yang konsisten dan simetris. Saat beban dilepas, frekuensi naik tajam dengan Rate of Change of Frequency (RoCoF) awal positif sekitar 0.0025 – 0.003 pu/s (kemiringan curam pada 1–2 detik pertama), mencapai peak (frekuensi tertinggi) sekitar $+0.0028$ pu dalam waktu kurang dari 5 detik. Setelah peak, kurva mengalami undershoot kecil tanpa overshoot signifikan yang melewati nilai steady-state. Steady-state frequency deviation (Δf_{ss}) menetap di sekitar $+0.0025$ pu, nilai yang persis sesuai perhitungan teori $\Delta f_{ss} = -R \times \Delta P_L = -0.05 \times (-0.05) = +0.0025$ pu, membuktikan bahwa droop governor bekerja secara proporsional pada arah pelepasan beban. Settling time tetap cepat, yaitu sekitar 20–25 detik (masuk band $\pm 2\%$ dari nilai steady-state $+0.0025$ pu), menunjukkan sistem yang well-damped dan responsif.

Secara keseluruhan, simulasi ini berhasil mendemonstrasikan kemampuan primary control dalam menahan kenaikan frekuensi dengan cepat dan mengembalikan sistem ke kondisi steady-state baru yang terkendali, meskipun dengan deviasi frekuensi positif permanen kecil— karakteristik simetris yang menjadi dasar untuk pengujian dengan secondary controller PI pada pelepasan beban yang sama selanjutnya. Selanjutnya pengujian dilakukan dengan menambahkan PI controller dengan nilai yang telah ditentukan sebelumnya, dimulai dari pengamatan respon dari governor serta dilanjutkan dengan LFC yang telah di tambahkan PI Controller akan disajikan dalam bentuk grafik.



Gambar 14. Grafik Hasil Simulasi Governor
Pelepasan Beban -5%

Gambar 3.14 menunjukkan respons daya mekanik governor (ΔP_g) terhadap pelepasan beban sebesar -0.05 pu dengan secondary controller PI aktif, yang mencerminkan kinerja full Load Frequency Control (LFC) yang stabil dan responsif. Daya governor menurun cepat dan mencapai undershoot sekitar -0.065 pu dalam waktu kurang dari 5 detik akibat aksi proporsional yang kuat, kemudian mengalami rebound kecil sebelum menetap pada nilai steady-state sekitar -0.05 pu. Respons sistem bersifat well-damped tanpa osilasi berlebih, dengan settling time sekitar 15–20 detik. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan pengendali PI meningkatkan kecepatan dan stabilitas respons governor pada pelepasan beban kecil, sekaligus memastikan kontribusi daya akhir yang akurat untuk mendukung pemulihan frekuensi sistem. selanjutnya pengujian dilakukan pada respon LFC terhadap pelepasan beban -5%, grafik respon dari swing equation dapat dilihat pada gambar 15.



Gambar 15. Hasil Simulasi LFC dengan PI Controller
dengan Penambahan Beban -5%

Gambar 3.15 menggambarkan respon frekuensi terhadap perubahan beban sebesar -0.05 pu pada scope yang mengarah ke swing equation (Δf). Respons deviasi frekuensi (Δf) terhadap pelepasan beban -0.05 pu dengan secondary controller PI aktif menunjukkan kemampuan full LFC dalam mengembalikan frekuensi ke nilai nominal dengan halus dan

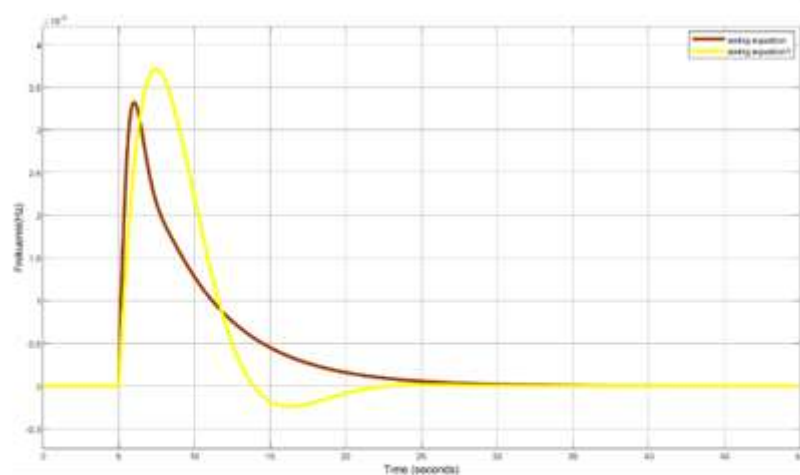
akurat. Saat beban dilepas, frekuensi naik tajam dengan Rate of Change of Frequency (RoCoF) awal positif sekitar 0.0025–0.003 pu/s hingga mencapai peak (frekuensi tertinggi) sekitar +0.0025 pu dalam waktu kurang dari 5 detik. Setelah peak, kurva turun secara monoton dan sangat halus tanpa undershoot atau overshoot signifikan (<1%), berhasil menghilangkan steady-state deviation sepenuhnya dengan menetap tepat di 0 pu berkat aksi integral $K_i = 3$ yang mengakumulasi error secara bertahap. Settling time ≈ 40 –45 detik (masuk band $\pm 2\%$ dari 0 pu), lebih panjang dibandingkan primary only karena fokus pada eliminasi error jangka panjang, tetapi tetap critically damped dan bebas fluktuasi. Secara keseluruhan, simulasi ini mendemonstrasikan keunggulan PI dalam menangani pelepasan beban kecil: mempertahankan peak dan RoCoF awal yang terkendali, serta memastikan recovery frekuensi nominal yang akurat dan stabil tanpa fluktuasi berlebih—hasil yang simetris dengan kasus peningkatan beban dan memperkuat efektivitas tuning $K_p=5$, $K_i=3$ pada arah pelepasan beban. Tabel hasil perbandingan simulasi dengan pelepasan beban -5% dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2 Tabel perbandingan Hasil Simulasi (Pelepasan Beban - 5%)

Parameter	Governor	LFC	Governor + PID	LFC + PID
Steady- State Deviation	$\Delta P_{g_ss} \approx -0.05$ pu $\Delta f_{ss} \approx +0.0025$ pu ($\Delta f_{ss} \approx +0.0025$ pu (permanen)	$\Delta P_{g_ss} \approx -0.05$ pu $\Delta f_{ss} \approx 0$ pu	$\Delta f_{ss} \approx 0$ pu (
Nadir	$(\Delta P_g) \Delta f_{peak} \approx +0.0028$ pu ($\approx +0.0028$ pu	Tidak langsung $(\Delta P_g) \Delta f_{peak} \approx +0.0025$ pu	$\approx +0.0025$ pu
Peak / Overshoot	≈ -0.06 pu (undershoot $\approx 20\%$)	Tidak ada undershoot signifikan	≈ -0.065 pu (undershoot $\approx 30\%$)	(<1%)
rocof	+0.0025–0.003 pu/s	$\approx +0.0025$ –0.003 pu/s	-	$\approx +0.0025$ –0.003 pu/s
Settling Time (t_s , $\pm 2\%$)	≈ 15 –20 detik	≈ 20 –25 detik	≈ 15 –20 detik	≈ 40 –45 detik

Analisis Sensitivitas Parameter

Analisis sensitivitas parameter dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter sistem terhadap respons frekuensi pada sistem Load Frequency Control (LFC) area tunggal. Parameter utama yang dianalisis meliputi konstanta inersia (H), konstanta droop governor (R), dan koefisien redaman beban (D), yang secara signifikan memengaruhi deviasi frekuensi, nadir frekuensi, Rate of Change of Frequency (RoCoF), overshoot, dan settling time. Analisis dilakukan melalui simulasi domain waktu menggunakan MATLAB/Simulink dengan dua set parameter yang berbeda, sebagaimana tercantum pada Tabel 3.4. Respons sistem terhadap gangguan pelepasan beban sebesar -0.05 pu dibandingkan melalui dua kurva respon, di mana kurva kuning merepresentasikan parameter pertama dan kurva coklat merepresentasikan parameter kedua, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.16.



Gambar 4. 16 Grafik perbandingan Sensitivitas Parameter.

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa konstanta inersia sistem (H), konstanta droop governor (R), dan koefisien redaman beban (D) merupakan parameter utama yang menentukan karakteristik respons frekuensi sistem tenaga listrik. Konstanta inersia H paling berpengaruh pada fase awal gangguan, karena menentukan laju perubahan frekuensi (RoCoF) dan kedalaman nadir frekuensi. Konstanta droop R memengaruhi agresivitas respons pengaturan daya dan besarnya deviasi frekuensi selama fase transien menuju kondisi tunak, sedangkan koefisien redaman D berperan dalam meredam osilasi dan meningkatkan kestabilan sistem. Hasil ini menegaskan bahwa ketiga parameter tersebut harus ditentukan secara terkoordinasi, khususnya pada sistem tenaga listrik modern dengan variabilitas beban tinggi dan penetrasi sumber energi berinersia rendah, sehingga analisis sensitivitas menjadi dasar penting dalam pengaturan governor dan Automatic Generation Control (AGC).

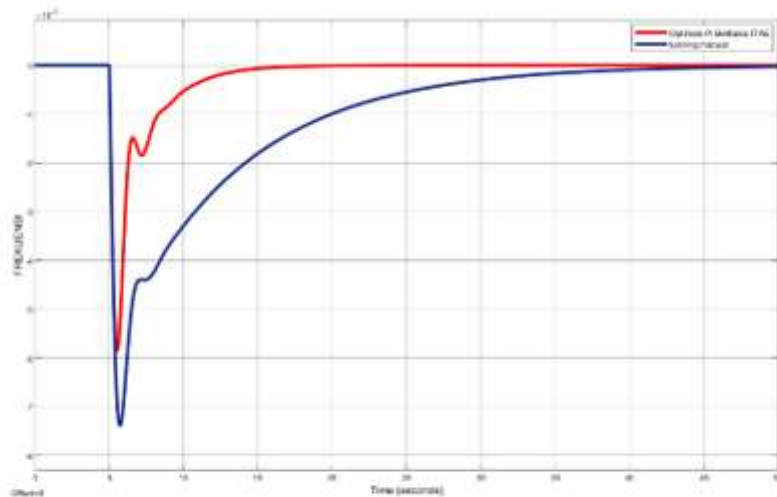
Optimasi Parameter PI Controller Menggunakan Pendekatan Berbasis ITAE untuk Minimasi Settling Time Sistem LFC.

Pengendalian frekuensi pada sistem Load Frequency Control (LFC) memerlukan respons dinamis yang cepat dan stabil terhadap perubahan beban. Pengujian awal dengan pengendali PI ($K_p = 5$, $K_i = 3$) menunjukkan bahwa frekuensi dapat kembali ke nilai setpoint, namun settling time masih relatif lama, yaitu sekitar 45 detik. Untuk meningkatkan kinerja dinamis sistem, dilakukan optimasi parameter PI controller menggunakan pendekatan Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE). Optimasi dilakukan dengan memvariasikan nilai K_p dan K_i secara bertahap, dengan tetap memperhatikan batas overshoot yang diizinkan. Kinerja sistem dievaluasi melalui analisis grafik respons deviasi frekuensi serta perbandingan nilai ITAE dan settling time terhadap kondisi baseline. Hasil optimasi menunjukkan peningkatan kinerja sistem, khususnya dalam mempercepat settling time tanpa menimbulkan overshoot berlebih.

Pada kondisi awal dengan parameter $K_p = 5$ dan $K_i = 3$, sistem LFC mampu mengembalikan frekuensi ke nilai setpoint, namun menghasilkan settling time yang relatif lama sebesar 45 detik dengan nilai ITAE 65,41. Peningkatan nilai K_p dan K_i secara bertahap menghasilkan perbaikan signifikan pada respons dinamik sistem, di mana settling time menurun secara konsisten hingga 15,7 detik pada parameter $K_p = 16$ dan $K_i = 14$. Sejalan dengan itu, nilai ITAE juga mengalami penurunan drastis hingga 7,84, yang menunjukkan berkurangnya akumulasi error deviasi frekuensi terhadap waktu. Hasil ini menegaskan bahwa optimasi parameter PI controller berbasis ITAE efektif dalam meningkatkan kinerja sistem LFC, khususnya dalam mempercepat settling time tanpa menurunkan stabilitas sistem.

Untuk memperjelas pengaruh optimasi parameter PI controller terhadap respons dinamik sistem Load Frequency Control (LFC), hasil simulasi disajikan dalam bentuk grafik deviasi frekuensi. Grafik ini membandingkan respons sistem pada kondisi awal ($K_p = 5$, $K_i = 3$) dan kondisi akhir hasil optimasi berbasis ITAE, sehingga perbedaan karakteristik respons, khususnya settling time, overshoot, dan proses peredaman deviasi frekuensi menuju kondisi stabil, dapat diamati secara langsung. Penyajian dalam satu bidang memungkinkan evaluasi visual yang jelas terhadap peningkatan kinerja sistem setelah optimasi.

Gambar 17 yang menunjukkan Perbandingan Tuning manual dan Tuning Berbasis pendekatan ITAE menunjukkan perbandingan respon deviasi frekuensi sistem LFC antara PI controller tuning manual dengan parameter $K_p = 5$ dan $K_i = 3$, yang menghasilkan settling time sekitar 45 detik dan nilai ITAE sebesar 65,41, serta PI controller hasil optimasi berbasis ITAE dengan parameter $K_p = 16$ dan $K_i = 14$, yang mampu menurunkan settling time menjadi 15,7 detik dan nilai ITAE menjadi 7,84. Hasil ini menunjukkan bahwa optimasi parameter PI berbasis ITAE secara signifikan meningkatkan respon dinamik sistem, khususnya dalam mempercepat peredaman deviasi frekuensi menuju kondisi stabil.



Gambar 4. 17 Perbandingan Tuning manual dan Tuning Berbasis pendekatan ITAE

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan pada sistem Load Frequency Control (LFC) single-area dengan primary droop governor dan secondary controller PI ($K_p = 5$, $K_i = 3$), diperoleh kesimpulan sebagai berikut yang secara langsung menjawab rumusan masalah penelitian.

Perubahan beban pada sistem tenaga listrik memberikan pengaruh linier dan proporsional terhadap deviasi frekuensi, di mana peningkatan beban menyebabkan penurunan frekuensi dan penurunan beban menyebabkan kenaikan frekuensi sesuai karakteristik droop governor. Pada pengujian dengan primary control saja, deviasi frekuensi bersifat permanen (steady-state error), sedangkan penambahan secondary controller PI mampu menghilangkan deviasi tersebut secara efektif sehingga frekuensi kembali ke nilai nominal pada seluruh skenario gangguan. Respon frekuensi menunjukkan karakteristik simetris dan well-damped terhadap gangguan peningkatan maupun penurunan beban hingga $\pm 15\%$, menandakan linearitas sistem dan kestabilan respon tanpa osilasi berlebih. Meskipun penggunaan PI meningkatkan settling time dibandingkan primary control, optimasi parameter berbasis ITAE berhasil mempercepat waktu pemulihan frekuensi secara signifikan. Parameter optimal diperoleh pada $K_p = 16$ dan $K_i =$

14, dengan settling time sekitar 15 detik, sehingga meningkatkan kinerja dinamik sistem LFC secara keseluruhan.

Saran

1. Memperluas model menjadi multi-area LFC untuk menganalisis interaksi antar area, termasuk kontrol tie-line power dan Area Control Error (ACE), guna mendekati kondisi sistem tenaga listrik interlaced yang lebih kompleks.
2. Mengimplementasikan metode tuning controller yang lebih advanced, seperti fuzzy logic, particle swarm optimization (PSO), atau adaptive control, untuk mengoptimalkan settling time secondary tanpa mengorbankan stabilitas pada gangguan beban yang lebih ekstrem atau stochastic.
3. Menambahkan elemen realistis seperti delay komunikasi, saturasi actuator, atau integrasi sumber energi terbarukan (PV/wind) dalam simulasi untuk meningkatkan aplikabilitas model pada microgrid nyata.
4. Melakukan validasi eksperimental dengan hardware-in-the-loop (HIL) atau data lapangan dari sistem tenaga listrik kecil di Indonesia guna membandingkan hasil simulasi dengan kondisi operasional aktual.

Saran-saran ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi penelitian lanjutan dalam upaya meningkatkan reliabilitas dan efisiensi kontrol frekuensi pada sistem tenaga listrik modern.

DAFTAR PUSTAKA

- Arnawan hasibuan. 2016. ANALISIS STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK SINGLE MESIN MENGGUNAKAN METODE RUNGE KUTTA ORDE 4.
- Erwin Syahputra dkk. 2018. ANALISIS STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK MENGGUNAKAN BERBASIS MATLAB.
- Cekdin Cekmas, 2006, "Sistem Tenaga Listrik", Penerbit Andi, Yogyakarta.
- BPS. (2024). Statistik Energi Indonesia. Badan Pusat Statistik.
- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. McGraw- Hill.
- PLN. (2019). Laporan Investigasi Blackout Jawa-Bali. PT PLN (Persero).
- Wood, A. J., et al. (2015). Power Generation, Operation, and Control. Wiley.
- Mochammad Rameli. 2016. Frequency Control (LFC) Menggunakan Metode Noise- Tolerable PID Feedback pada Power Generation Plant Simulator PLTU PT. Pembangkitan Jawa dan Bali (PJB) Unit Pembangkitan (UP) Paiton
- Machowski, J., et al. (2020). Power System Dynamics (3rd ed.). Wiley.
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (2016). Power System Analysis (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Saadat Hadi, 1999, "Power System Analysis", Mc Graw Hill, New York. RUPTL 2025 – 2034. 2025