Desain Kompensator Berbasis Analisa Root Locus Sebagai Pengendali Frekuensi Sistem Pembangkit Tenaga Listrik

Juicha Ta'ba[1], Ismit Mado[2], Achmad Budiman[3] dan Patria Julianto[4]

[1] Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Borneo Tarakan , [2] Tarakan, Indonesia

[3] Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan

Email: icajuicha@gmail.com

***Abstract* — Frequency stability is an important aspect in maintaining the quality and reliability of electric power generation systems. Load variations can cause frequency deviations, requiring a control system capable of maintaining the frequency close to its nominal value. This study aims to model the mechanical side of a power generation system and design a compensator based on Root locus analysis to improve frequency control performance. A quantitative method was applied by developing mathematical models of the Governor, turbine, and generator, which were connected in a closed-loop configuration. Frequency data were obtained from PT. Indo Pusaka Berau – Lati Steam Power Plant, while the modeling and simulation processes were performed using MATLAB/Simulink. The compensator was designed by determining the desired closed-loop pole characteristics and angle deficiency to establish the locations of the Lead compensator zero and pole. The simulation results show that the addition of the Lead compensator improved the system response speed. The Rise Time decreased from 0.65654 s to 0.33297 s, the Peak Time from 1.5185 s to 0.75849 s, and the Settling Time from 3.2668 s to 1.718 s. The Steady-State Error also decreased from 0.038462 to 0.024026. Therefore, the Lead compensator improves frequency control performance, particularly in terms of transient response and steady-state characteristics.**

***Keyword* — Electric power generation,frequency control, Lead compensator, Root Locus.**

Abstrak — Kestabilan frekuensi merupakan salah satu aspek penting dalam menjaga kualitas dan keandalan sistem pembangkit tenaga listrik. Perubahan beban dapat menyebabkan deviasi frekuensi sehingga diperlukan sistem pengendalian yang mampu mempertahankan frekuensi mendekati nilai nominal. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sisi mekanik sistem pembangkit serta merancang kompensator berbasis analisis Root locus untuk meningkatkan kinerja pengendalian frekuensi. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan melakukan pemodelan matematis komponen Governor, turbin, dan generator yang dihubungkan dalam konfigurasi closed loop. Data frekuensi diperoleh dari PT. Indo Pusaka Berau – PLTU Lati, sedangkan proses pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink. Perancangan kompensator dilakukan dengan menentukan karakteristik pole yang diinginkan dan angle deficiency untuk menentukan posisi zero dan pole kompensator Lead. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan kompensator Lead mampu mempercepat respons sistem. Rise Time menurun dari 0,65654 detik menjadi 0,33297 detik, Peak Time dari 1,5185 detik menjadi 0,75849 detik, dan Settling Time dari 3,2668 detik menjadi 1,718 detik. Steady-State Error juga menurun dari 0,038462 menjadi 0,024026. Dengan demikian, kompensator Lead dapat meningkatkan kinerja pengendalian frekuensi terutama pada karakteristik respons transien dan keadaan tunak.

Kata kunci — Kompensator lead, Pembangkit tenaga listrik, pengendalian frekuensi, Root locus

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama dalam kehidupan sehari-hari dan kegiatan industri. Seiring meningkatnya kebutuhan energi listrik, sistem pembangkitan dituntut mampu menyediakan energi secara kontinu dengan kualitas dan keandalan yang baik. Salah satu aspek penting dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik adalah kestabilan frekuensi. Frekuensi sistem dipengaruhi oleh keseimbangan antara daya aktif yang dibangkitkan generator dan daya aktif yang digunakan beban. Ketidakseimbangan tersebut dapat menyebabkan perubahan atau deviasi frekuensi.

Pada sistem pembangkit tenaga listrik, kestabilan frekuensi berkaitan dengan sistem pengendalian yang melibatkan governor, turbin, dan generator. Ketika terjadi perubahan beban, diperlukan penyesuaian daya mekanik turbin untuk mempertahankan keseimbangan daya. Apabila perubahan frekuensi tidak dapat dikendalikan dengan baik, kondisi tersebut dapat memengaruhi kestabilan dan operasi pembangkit. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendalian yang mampu mempertahankan frekuensi generator mendekati nilai nominal, yaitu 50 Hz. Penelitian ini dilakukan pada PT. Indo Pusaka Berau – PLTU Lati, pembangkit listrik tenaga uap dengan kapasitas 3 × 7 MW yang berlokasi di Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Berdasarkan data frekuensi generator selama Agustus 2023, diperoleh frekuensi pada kisaran 50,36–50,86 Hz. Kondisi tersebut menunjukkan adanya fluktuasi frekuensi selama periode pengamatan sehingga diperlukan analisis terhadap karakteristik sistem pengendalian.

Salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis kestabilan dan karakteristik sistem pengendalian adalah Root locus. Metode ini digunakan untuk mengetahui perubahan posisi akar persamaan karakteristik terhadap perubahan nilai penguatan, sehingga karakteristik kestabilan dan respons sistem dapat dianalisis. Berdasarkan hasil analisis tersebut, digunakan kompensator Lead yang

dirancang dengan menentukan pole sistem yang diinginkan dan menghitung angle deficiency untuk memperoleh posisi zero dan pole kompensator yang sesuai. Pemodelan sistem dilakukan dengan merepresentasikan governor, turbin, dan generator dalam bentuk fungsi alih yang dihubungkan dalam konfigurasi closed-loop dan disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink.

Penelitian ini bertujuan memodelkan sistem pengendalian frekuensi yang meliputi governor, turbin, dan generator serta merancang kompensator Lead berbasis analisis Root locus untuk meningkatkan kinerja sistem. Parameter pemodelan diperoleh dari nameplate, manual book, dan pendekatan parameter standar internasional apabila data yang diperlukan tidak tersedia secara keseluruhan. Kinerja sistem sebelum dan sesudah penambahan kompensator dianalisis berdasarkan karakteristik respons untuk mengetahui pengaruh kompensator Lead terhadap kecepatan respons dan kestabilan sistem pengendalian frekuensi pembangkit.

II. METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif yang bertujuan merancang kompensator sebagai pengendali frekuensi pada sistem pembangkit akibat fluktuasi beban. Data yang diperoleh secara terukur dianalisis menggunakan metode Root Locus untuk meningkatkan kinerja pengendalian frekuensi sistem pembangkit tenaga listrik.

B. Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan selama enam bulan, yaitu November 2023 hingga Mei 2024. Pengambilan data dilakukan di PT. Indo Pusaka Berau, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, sedangkan pemodelan, perancangan, dan pengujian sistem menggunakan MATLAB/Simulink dilakukan di tempat peneliti.

C. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian meliputi data karakteristik sistem pembangkit, parameter generator, exciter, amplifier, serta data tegangan keluaran generator. Data tersebut digunakan sebagai dasar untuk membentuk model matematis sistem pengendalian tegangan. Software MATLAB digunakan untuk membangun diagram blok, menentukan fungsi alih sistem, melakukan analisis Root Locus, merancang kompensator Lead, serta memperoleh karakteristik respons sistem. Parameter respons yang digunakan dalam evaluasi meliputi Delay Time, Rise Time, Peak Time, Settling Time, Maximum Overshoot, nilai Peak, Steady-State Value, dan Steady-State Error.

D. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur mengenai sistem pengendalian tegangan generator, pemodelan sistem pembangkit, metode Root Locus, dan perancangan kompensator. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data dan penentuan parameter yang diperlukan untuk membentuk model matematis sistem.

Model sistem pengendalian tegangan dibentuk berdasarkan komponen utama sisi elektrik pembangkit yang terdiri atas generator, exciter, dan amplifier. Pada sistem tersebut, tegangan keluaran generator diukur menggunakan Potential Transformer (PT) dan dibandingkan dengan tegangan referensi. Selisih antara tegangan referensi dan tegangan terukur digunakan sebagai sinyal kesalahan yang menjadi masukan sistem pengendalian.

Setelah model matematis diperoleh, sistem dianalisis dalam konfigurasi open-loop dan closed-loop. Analisis Root Locus digunakan untuk mengetahui karakteristik perubahan pole sistem terhadap variasi penguatan serta menentukan lokasi pole closed-loop yang sesuai dengan karakteristik respons yang diinginkan. Metode Root Locus juga digunakan sebagai dasar dalam menentukan rasio redaman dan frekuensi natural sistem.

Tahap berikutnya adalah perancangan kompensator Lead. Kompensator ditempatkan secara seri dengan plant untuk memodifikasi karakteristik dinamik sistem tanpa mengubah bentuk fisik plant. Perancangan dilakukan dengan menentukan pole closed-loop yang diinginkan, kemudian menghitung kekurangan sudut (angle deficiency) yang harus dipenuhi oleh kompensator. Kompensator Lead digunakan karena memberikan tambahan fase yang dapat membantu menggeser karakteristik Root Locus menuju daerah yang diinginkan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penentuan Model Sistem

Model sistem penelitian mengacu pada model single area load frequency control oleh Hadi Saadat, yang terdiri atas tiga komponen utama, yaitu governor, turbin, dan generator dalam konfigurasi closed-loop. Governor mengatur masukan turbin berdasarkan perubahan frekuensi, turbin mengubah energi fluida menjadi energi mekanik, sedangkan generator mengubahnya menjadi energi listrik.

Perubahan beban menyebabkan deviasi frekuensi yang diproses oleh governor untuk mengatur daya mekanik turbin. Selanjutnya, generator menyesuaikan daya keluarannya terhadap perubahan beban. Hubungan dinamis ketiga komponen tersebut menjadi model dasar analisis stabilitas frekuensi dan perancangan kompensator.

Tabel 1 Parameter Nilai Governor

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Governor Gain	$\frac{1}{R}$	20	pu/Hz
Speed Regulation	R	0.05	pu/Hz
Time Constant Governor	T_G	0.2	S

Tabel 2 Parameter Nilai Turbin

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Governor Gain	$\frac{1}{R}$	20	pu/Hz
Speed Regulation	R	0.05	pu/Hz
Time Constant Governor	T_G	0.2	s

Tabel 3 Parameter Nilai Generator

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Governor Gain	$\frac{1}{R}$	20	pu/Hz
Speed Regulation	R	0.05	pu/Hz
Time Constant Governor	T_G	0.2	s

B. Penentuan Model Matematis

Menerapkan swing equation pada generator singkron untuk gangguan kecil maka diperoleh

$$\frac{2H}{\omega_s}\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = \Delta P_m - P_e \quad \Rightarrow \quad \frac{2(5)}{\omega_s}\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = \Delta P_m - P_e \tag{1}$$

Atau dinyatakan dalam bentuk penyimpangan kecil kecepatan puta,

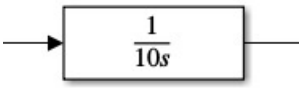
$$\frac{d(\Delta\omega/\omega_s)}{dt} = \frac{1}{10}\Delta P_m - \Delta P_e \tag{2}$$

Apabila kecepatan dinyatakan dalam satuan pu, maka Persamaan menjadi

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{10}(\Delta P_m - \Delta P_e) \tag{3}$$

Dengan melakukan transformasi laplace terhadap Persamaan diatas diperoleh

$$\Delta\Omega(s) = \frac{1}{10s}[\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \tag{4}$$



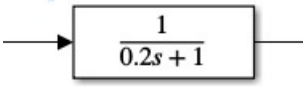
Gambar 1 Blok Diagram Generator dan Beban

Model turbin menggambarkan hubungan antara perubahan daya mekanik yang dihasilkan (〖 ∆ P 〗 _m) dengan perubahan posisi katup uap (〖 ∆ P 〗 _v). Model paling sederhana dari turbin uap tanpa reheater (nonreheater steam turbine) dapat didekati sebagai sistem orde satu yang memiliki satu konstanta waktu τ_T, sehingga diperoleh fungsi alih berikut

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1+0.2} \tag{1}$$

Sehingga *Transfer Function* turbinnya adalah

$$G_T(s) = \frac{1}{1+0.2s} \tag{2}$$



Gambar 2 Blok Diagram Turbin

Governor berfungsi mengatur daya mekanik turbin berdasarkan deviasi frekuensi sistem. Saat terjadi perubahan beban, governor menerima sinyal error untuk mengatur bukaan katup turbin sehingga daya mekanik dapat disesuaikan dan frekuensi dipertahankan mendekati nilai nominal.

Pada umumnya governor memiliki nilai speed regulation sekitar 5-6% ketika beban berubah dari kondisi tanpa beban hingga beban penuh. Mekanisme governor bekerja sebagai pembanding, di mana keluarannya berubah perintah daya ΔP_g, yaitu selisih antara daya referensi ΔP_ref dengan komponen 1/R Δω yang berasal dari karakteristik kecepatan governor.

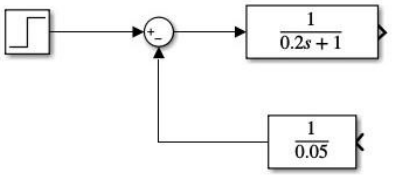
$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R}\Delta\omega \quad \Rightarrow \quad \Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{0.05}\Delta\omega \tag{1}$$

Atau transformasi laplacenya

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{0.05}\Delta\Omega(s) \tag{2}$$

Maka fungsi alihnya

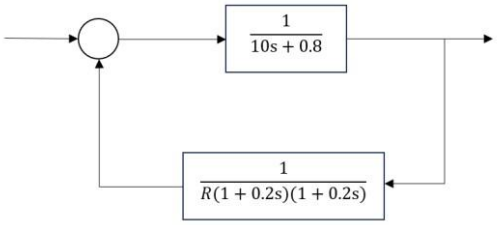
$$\Delta P_V(s) = \frac{1}{1+0.2s}\Delta P_g(s) \tag{3}$$



Gambar 3 Blok Diagram Speed Governing stream turbin

C. Penentuan Nilai Parameter

Setelah didapatkan model matematiknya maka dilanjutkan dengan mengubah menjadi fungsi alih, Menentukan Fungsi Transfer *Open-Loop G(s)*



Gambar 4 LFC Blok Diagram

$$KG(s)H(s) = \frac{K}{(10s + 0.8)(1 + 0.2s)(1 + 0.2s)} \quad (1)$$

$$= \frac{K}{0.4s^3 + 4.032s^2 + 10.32s + 0.8}$$

Dimana $K = \frac{1}{R}$

Persamaan karakteristiknya adalah:

$$1 + KG(s)H(s) = \frac{K}{0.4s^3 + 4.032s^2 + 10.32s + 0.8} \quad (2)$$

Selanjutnya, menghitung akar polinominal dengan tabel *Routh-Hurwitz:*

$0.4s^3 + 4.032s^2 + 10.32s + 0.8$

Pangkat	Kolom 1	Kolom 2
s^3	0.4	10.32
s^2	4.032	$0.8 + K$
s^1	$\frac{41.29 - 0.4K}{4.032}$	0
s^0	$0.8 + K$	0

Maka $0 < K < 103{,}225$

Sehingga $R = \frac{1}{K}$ untuk kontrol stabilitas sistem, governor speed regulationnya:

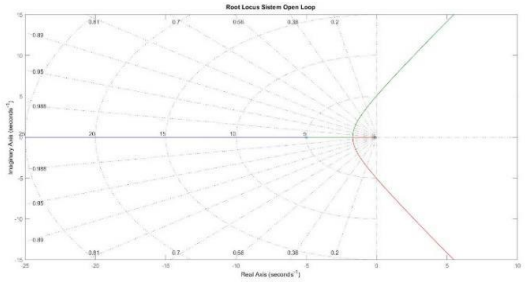
$R > \frac{1}{103{,}225}$ atau $R = 0{,}009$

Untuk $K = 103{,}225$ persamaan auxiliary dari baris 2 s^2

$4{,}032s^2 + 104{,}025 = 0$

Sehingga $s = \pm 5{,}079$

Untuk gambar *root locus open loop:*



Gambar 5 Pole dan Zero Map Root Locus Open Loop

Root locus memotong sumbu imajiner $j\omega$ pada $s = \pm j3{,}21$ ketika $K = 103{,}225$ oleh karena itu, sistem berada pada kondisi stabil ketika $R = \frac{1}{103{,}225} = 0{,}009$

Fungsi alih *closed loop:*

$$-\frac{\Delta\Omega_{(s)}}{\Delta P_{L(s)}} = T_{(s)} \quad (1)$$

Lalu diperoleh

$$T_{(s)} = \frac{(1 + 0{,}2s)(1 + 0{,}2s)}{0.4s^3 + 4.032s^2 + 10.32s + 0.8 + \frac{1}{0{,}05}} \quad (2)$$

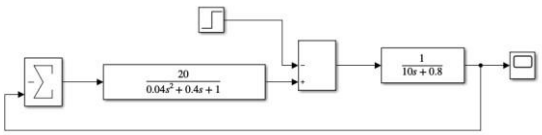
Kemudian disederhanakan menjadi

$$T_{(s)} = \frac{0.04s^2 + 0.4s + 1}{0.4s^3 + 4.032s^2 + 10.32s + 20.8} \quad (3)$$

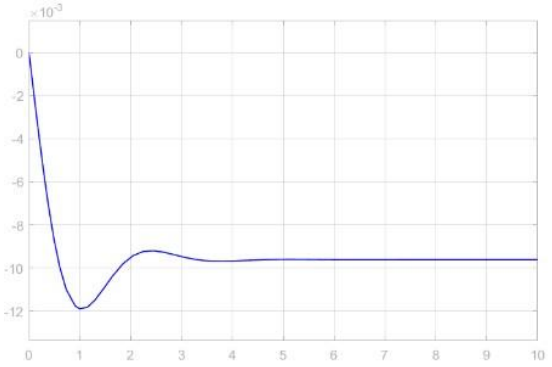
Penyimpangan frekuensi keadaan tunak akibat masukan step:

$$\Delta_{\omega ss} = \lim_{s \to 0} s\Delta\Omega(s) = \frac{1}{20{,}8}(-0{,}2) = -0{,}0096pu \quad (4)$$

D. Uji Fespon



(a) Diagram Blok

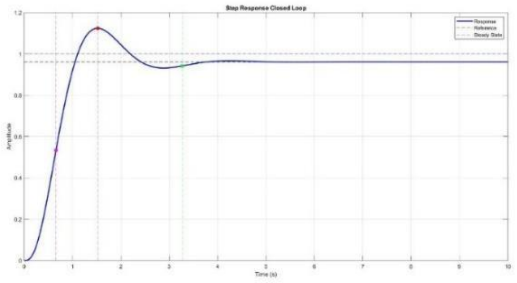


(b) Respon Waktu

Sebelum perancangan kompensator, dilakukan analisis awal untuk mengetahui karakteristik dan respons sistem menggunakan MATLAB Simulink dengan konfigurasi closed-loop dan masukan step sebagai gangguan. Analisis ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem terhadap spesifikasi yang ditetapkan serta mengidentifikasi

permasalahan sistem sebelum dilakukan perancangan kompensator.

Pada Gambar 6. (a) merupakan diagram blok yang inputnya menggunakan sinyal masukan step sebagai gangguan. Berikut merupakan respon waktu dari hasil simulasi yang telah dijalankan dengan menggunakan sinyal masukan step sehingga didapatkan respon waktu sebagai berikut.



Gambar 6 Respon Waktu *Closed Loop*

Pada Gambar diatas menunjukkan respon waktu dari hasil simulasi yang telah diproses dengan sinyal masukan step, sehingga didapatkan nilai respon pada Delay Time (□□□) 0.29 □, Rise Time (□□) 0.65654 □, peak time (□□□) 1.5185, Settling Time (□) 3.2668 □, max Overshoot (M□□) 16.929% dan untuk error steady state 0.038462. Berikut merupakan perhitungan untuk nilai respon transient dan error steady state.

E. Desain Kompensator Berbasis Root Locus

Perancangan kompensator Lead dilakukan menggunakan metode tempat kedudukan akar (Root Locus) dengan tujuan memperbaiki karakteristik respon transien sistem.

Tahapan perancangan dimulai dengan menentukan lokasi pole Closed loop yang diinginkan berdasarkan spbesifikasi rasio redaman dan frekuensi natural sistem.

$$KG_{(s)}H_{(s)} = \frac{20}{0.4s^3 + 4.032s^2 + 10.32s + 0{,}8} \quad \textbf{(1)}$$

Dari fungsi transfer *Open loop* rasio redaman dan frekuensi natural $\zeta = 0.5$ dan $\omega_n = 4$

Langkah 1 mengubah *Open loop* menjadi *Closed loop:*

$$\frac{\Delta\Omega_{(s)}}{-\Delta PL_{L(s)}} = \frac{(1+\tau_g s)(1+\tau_T s)}{(2H_s + D)(1+\tau_g s)(1+\tau_T s)} = \frac{0{,}04s^2 + 0{,}4s + 1}{0{,}4s^3 + 4{,}032s^2 + 10{,}32s + 20{,}8} \quad \textbf{(2)}$$

Closed loop pole didapatkan dari akar-akar polinomial

$0{,}4s^3 + 4{,}032s^2 + 10{,}32s + 20{,}8$

$s_1 = -7.5817$

$s_2 = -1{,}2492 + j2{,}3018$

$s_3 = -1{,}2492 - j2{,}3018$

Langkah 2:

Closed loop poles yang diinginkan adalah $\zeta = 0.5$ dan $\omega_n = 4$ maka :

$s^2 + 2\zeta\omega_n s + {\omega_n}^2 = 0$

$s^2 + 2\zeta\omega_n s + {\omega_n}^2 = 0$

$s^2 + 4s + 16 = 0$

Sehingga diperoleh:

$$s_1 = -2 - j2\sqrt{3} \quad \textbf{(1)}$$

$$s_1 = -2 + j2\sqrt{3} \quad \textbf{(2)}$$

Dari akar akar didapatkan letak pole Closed loop yang diinginkan, Titik tersebut digunakan sebagai titik desain pada bidang-s untuk proses perancangan kompensator Lead.

Dengan menggunakan nilai gain, pole, dan zero yang telah diperoleh, maka bentuk akhir kompensator Lead yang digunakan adalah:

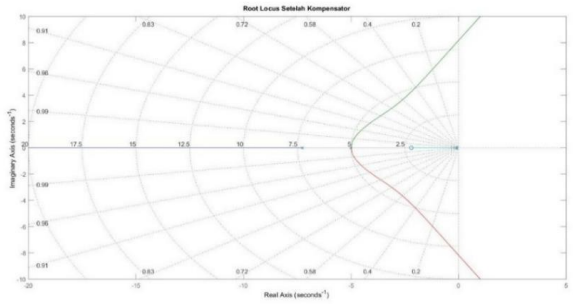
$$G_C(s) = 5.37198\frac{(s + 2.199)}{(s + 7.27)} \quad \textbf{(1)}$$

Open loop Compensator:

$$G_C(s) \times G_{(s)} = 5.37198\frac{(s + 2.199)}{(s + 7.27)} = \frac{20}{0{,}4s^3 + 4{,}032s^2 + 10{,}32s + 0{,}8} \quad \textbf{(2)}$$

F. Hasil dari tempat kedudukan akar kompensator

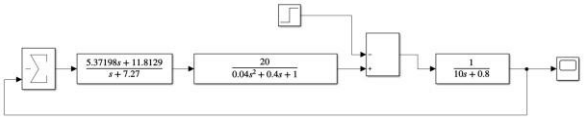
Sehingga dari desain kompensator diperoleh pole dan zero baru maka dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 7 Penambahan Kompensator pada Diagram Blok

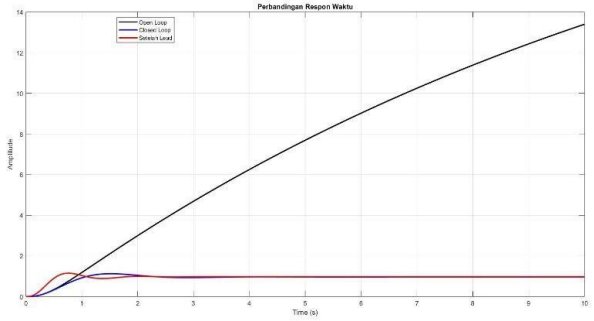
Berdasarkan perbandingan Root locus pada kondisi Open Loop dan setelah penambahan kompensator Lead, terlihat bahwa lintasan akar mengalami pergeseran akibat penambahan pole dan zero kompensator. Pada kondisi Open Loop, pole sistem cenderung berada relatif dekat dengan sumbu imajiner sehingga tingkat redaman sistem lebih rendah dan berpotensi menghasilkan Overshoot yang besar. Setelah kompensator Lead ditambahkan, lintasan akar bergeser ke arah kiri bidang kompleks sehingga posisi pole sistem menjadi lebih stabil dan respons transien sistem dapat diperbaiki.

Simulasi dilakukan menggunakan software MATLAB Simulink dengan membuat diagram blok dengan menambahkan nilai 5.37198 ((s+2.199))/((s+7.27)) yang dirangkai seri dengan fungsi alih seperti pada gambar.



Gambar 8 Penambahan Kompensator pada Diagram Blok

Hasil dari uji respon sebelum penambahan kontrol atau kendali dari kompensator sangat berpengaruh besar dalam memperbaiki respon transien.



Gambar 9 Perbandingan Respon Waktu Sebelum dan Sesudah Kompensator

Parameter	Fungsi Alih (*Closed loop*)	Kompensator *Lead*
Rise Time (s)	0,65654	0,33297
Peak Time (s)	1,5185	0,75849
Settling Time (s)	3,2668	1,718
Overshoot (%)	16,929	17,893
Peak Value	1,1243	1,1506
Steady-State Value	0,96154	0,97597
Steady-State Error	0,038462	0,024026

Gambar menunjukkan perbandingan respons transien sistem Closed Loop dan kompensator Lead. Sistem Closed Loop memiliki Rise Time 0,65654 s, Peak Time 1,5185 s, Settling Time 3,2668 s, Overshoot 16,929%, Peak Value 1,1243, Steady-State Value 0,96154, dan Steady-State Error 0,038462.

Setelah penambahan kompensator Lead, Rise Time menjadi 0,33297 s (49,28%), Peak Time 0,75849 s (50,05%), dan Settling Time 1,718 s (47,41%). Overshoot meningkat menjadi 17,893% dan Peak Value 1,1506. Steady-State Value meningkat menjadi 0,97597, sedangkan Steady-State Error menurun menjadi 0,024026 (37,53%). Hasil ini menunjukkan kompensator Lead mempercepat respons dan meningkatkan kemampuan sistem mengikuti referensi dengan kenaikan Overshoot yang relatif kecil.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, pemodelan sistem pembangkit yang terdiri atas governor, turbin, dan generator dalam konfigurasi closed loop dapat digunakan sebagai dasar analisis kestabilan dan pengendalian frekuensi. Perancangan kompensator Lead berbasis analisis Root Locus dengan penentuan angle deficiency mampu memperbaiki respons sistem. Hasil simulasi menunjukkan Rise Time menurun dari 0,65654 s menjadi 0,33297 s, Peak Time dari 1,5185 s menjadi 0,75849 s, dan Settling Time dari 3,2668 s menjadi 1,718 s. Steady-State Error juga menurun dari 0,038462 menjadi 0,024026. Meskipun Overshoot meningkat dari 16,929% menjadi 17,893%, secara keseluruhan kompensator Lead menghasilkan respons yang lebih cepat dan meningkatkan kinerja pengendalian frekuensi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis kepada Bapak Dr.Ismit Mado, S.T.,M.T selaku dosen pembimbing yang telah membimbang dan mengarahkan penulis dalam menentukan judul serta dalam proses penyusunan jurnal ini.

DAFTAR ACUAN

[1] G. M. N. C. Aryanata, I. N. Suweden, and I. M. Mataram, "Studi analisis governor sebagai load frequency control pada PLTG menggunakan fuzzy logic controller," Majalah Ilmiah Teknologi Elektro, vol. 17, no. 1, p. 107, 2018, doi: 10.24843/mite.2018.v17i01.p15.

[2] M. Fahreza, Hamdani, and Z. Tharo, "Pemodelan

dan pengendalian frekuensi sistem tenaga listrik pada simulator pembangkit listrik tenaga uap," in Semnastek UISU, pp. 233–236, 2019.

[3] A. M. Prasetia, L. Sartika, and A. Saad, "Optimasi AVR pada generator sinkron menggunakan metode Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)," vol. 16, no. 2, pp. 137–150, 2023.

[4] Y. K. Wiguna, P. W. Rusimamto, B. Suprianto, and M. S. Zuhrie, "Desain sistem pengendali posisi sumbu azimuth pada turret gun dengan PI controller metode root-locus," 2018.

[5] A. A. Yana, M. A. Muslim, and E. Yudaningtyas, "Metode root locus untuk mencari parameter PID dalam pengendalian posisi stamping rod berbasis pneumatic menggunakan Arduino Uno," Universitas Brawijaya, pp. 1–6, 2014.

[6] H. A. Alhelou, M.-E. Hamedani-Golshan, R. Zamani, and E. Heydarian-Forushani, "Challenges and opportunities of load frequency control in conventional, modern and future smart power systems: A comprehensive review," Energies, vol. 11, no. 10, p. 2497, 2018, doi: 10.3390/en11102497.

[7] X. Liu, S. Qiao, and Z. Liu, "A survey on load frequency control of multi-area power systems: Recent challenges and strategies," Energies, vol. 16, no. 5, p. 2323, 2023, doi: 10.3390/en16052323.

[8] M. Januszewski et al., "A comprehensive review of load frequency control technologies," Energies, vol. 17, no. 12, p. 2915, 2024, doi: 10.3390/en17122915.

[9] "A review of load frequency control schemes deployed for wind-integrated power systems," Sustainability, vol. 15, no. 10, p. 8380, 2023.

[10] "Load frequency control (LFC) strategies in renewable energy-based hybrid power systems: A review," Energies, vol. 15, no. 10, p. 3488, 2022.

[11] "A comprehensive review of the cyber-attacks and cyber-security on load frequency control of power systems," Energies, vol. 13, no. 15, p. 3860, 2020.

[12] "Cybersecurity analysis of load frequency control in power systems: A survey," Journal of Cybersecurity and Privacy, vol. 5, no. 3, p. 52, 2021.

[13] "Load frequency control of power systems using GPI observer-based controller," Energies, vol. 18, no. 15, p. 4117, 2025.

[14] "Improved load frequency control design for interconnected power systems," Energies, vol. 19, no. 3, p. 702, 2026.

[15] "Provision of frequency response from wind farms: A review," Energies, vol. 14, no. 20, p. 6689, 2021.