Peningkatan Stabilitas Frekuensi Generator melalui Kompensator Lead Berbasis Tempat Kedudukan Akar pada PLTMG PT. Siantar Tara Sejati

Ari Restu Febrianto[1], Ismit Mado[2], Patria Julianto[3], Achmad Budiman[4], Febrian Rizky Ghifari[5], dan Muhammad Akbar[6]

[1234] Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Borneo Tarakan, Indonesia

[56] PT. Siantar Tara Sejati Site Tarakan, Indonesia

Corespondent Author : arirest06@gmail.com

***Abstract* — Load variations in Gas Engine Power Plants (PLTMG) may cause an imbalance between mechanical input power and electrical power demand, resulting in generator frequency deviations. This study aims to model the frequency control system of the MWM TCG 2032 V16 generator and design a root-locus-based compensator to improve the transient response characteristics. The dynamic model is developed based on the Reciprocating Engine Generator (REG) structure consisting of governor, actuator, engine, and rotating mass components using a first-order linear approximation. The model parameters are selected based on the equivalent dynamic model of a G2-class generator according to ISO 8528 and evaluated using MATLAB/Simulink under load disturbance conditions. The simulation results before compensation show a Maximum Transient Frequency Deviation (MTFD) of 0.012 pu, peak time of 1.91 s, damping ratio of 0.051, and natural frequency 0,8017 rad/s. After implementing the root-locus-based lead compensator, the MTFD decreases to 0.0035 pu, the peak time improves to 0.5 s, the damping ratio increases to 0.499, and the natural frequency increases to 3,99 rad/s. The results demonstrate that the proposed compensator effectively improves damping performance, accelerates transient response, and enhances generator frequency stability in the investigated PLTMG system.**

***Keyword* — frequency, generator, governor, lead compensator, PLTMG, root locus.**

Abstrak — Perubahan beban pada Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG) dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara daya mekanik penggerak dan kebutuhan daya listrik sehingga menimbulkan deviasi frekuensi sistem. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sistem kendali frekuensi generator MWM TCG 2032 V16 serta merancang kompensator berbasis Analisis Tempat Kedudukan Akar untuk meningkatkan karakteristik respon transient sistem. Model dinamik dibangun berdasarkan struktur Reciprocating Engine Generator (REG) yang terdiri dari governor, actuator, engine, dan rotating mass dengan pendekatan model linear orde satu. Parameter model mengacu pada equivalent dynamic model kelas G2 berdasarkan standar ISO 8528 dan disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink dengan gangguan perubahan beban. Hasil simulasi sistem sebelum kompensasi menunjukkan nilai Maximum Transient Frequency Deviation (MTFD) sebesar 0,012 pu, peak time 1,91 detik, damping ratio 0,051, dan frekuensi alami 0,8017. Setelah pemasangan kompensator lead berbasis Root Locus, nilai MTFD menurun menjadi 0,0035 pu, peak time menjadi 0,5 detik, damping ratio meningkat menjadi 0,499, dan frekuensi alami meningkat menjadi 3,99 rad/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kompensator yang dirancang mampu meningkatkan redaman, mempercepat respon transient, dan meningkatkan stabilitas frekuensi generator PLTMG.

Kata kunci — frekuensi, generator, governor, kompensator lead, PLTMG, tempat kedudukan akar.

I. PENDAHULUAN

Stabilitas frekuensi merupakan salah satu aspek penting dalam mempertahankan keandalan operasi sistem tenaga listrik. Frekuensi sistem ditentukan oleh keseimbangan antara daya mekanik yang diberikan oleh penggerak mula dan daya aktif yang dibutuhkan oleh beban. Perubahan beban secara tiba-tiba dapat menyebabkan ketidakseimbangan daya sehingga kecepatan putar generator berubah dan menghasilkan deviasi frekuensi. Pada sistem pembangkit berbasis reciprocating gas engine, karakteristik governor, actuator, engine, serta inersia massa berputar berpengaruh terhadap besarnya deviasi dan waktu pemulihan frekuensi setelah terjadinya gangguan [15],[16].

PT. Siantar Tara Sejati Site Tarakan mengoperasikan pembangkit listrik tenaga mesin gas untuk mendukung kebutuhan daya pada sistem yang melayani Feeder 9. Data operasi menunjukkan adanya variasi pembebanan selama periode pengamatan, sementara sistem beroperasi pada frekuensi nominal 50 Hz. Salah satu unit yang menjadi objek pemodelan adalah MWM TCG 2032 V16 dengan daya terukur 4.300 kW dan frekuensi nominal 50 Hz[6]. Kondisi perubahan beban tersebut menunjukkan pentingnya kemampuan sistem pengatur kecepatan dalam mempertahankan keseimbangan daya dan mengembalikan frekuensi menuju kondisi nominal setelah terjadinya gangguan[14].

Pemodelan dinamik reciprocating engine generator telah dikembangkan untuk menganalisis respons frekuensi melalui representasi matematis komponen governor, actuator, engine, serta rotating mass. Model ekuivalen tersebut memungkinkan karakteristik sistem dievaluasi melalui fungsi alih, lokasi pole dan zero, serta respons waktu terhadap gangguan beban[10]. Selain pendekatan pemodelan, metode tempat kedudukan akar dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan lokasi pole closed-loop akibat variasi gain dan menjadi dasar dalam

menentukan karakteristik kompensator. Kompensator lead pada prinsipnya memberikan tambahan fase yang dapat menggeser pole dominan menuju daerah bidang-s dengan karakteristik transien yang lebih sesuai dengan spesifikasi desain[10][12].

Meskipun berbagai penelitian telah membahas pemodelan governor, respons frekuensi reciprocating engine generator, dan desain kompensator pada sistem kendali, kebutuhan untuk meningkatkan respons transien pada model MWM TCG 2032 V16 tanpa melakukan perubahan terhadap struktur pengendali utama masih memerlukan kajian lebih lanjut. Penelitian ini tidak menggantikan governor yang telah digunakan, tetapi menambahkan kompensator lead yang dirancang berdasarkan karakteristik tempat kedudukan akar sistem. Pendekatan tersebut memungkinkan desain kompensator dilakukan berdasarkan posisi pole dominan dan kebutuhan fase sistem, kemudian efektivitasnya dievaluasi secara kuantitatif melalui Maximum Transient Frequency Deviation, frekuensi natural, peak time, damping ratio, dan pergeseran pole dominan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan membangun model dinamik sisi mekanik sistem pembangkit dalam bentuk diagram blok dan fungsi alih, mengevaluasi karakteristik respons frekuensi model terhadap perubahan beban, serta merancang kompensator lead berbasis metode tempat kedudukan akar untuk meningkatkan performa transien sistem. Hasil penelitian selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi kelayakan kompensator sebagai alternatif peningkatan respons kendali frekuensi pada PLTMG PT. Siantar Tara Sejati.

II. METODE PENELITIAN

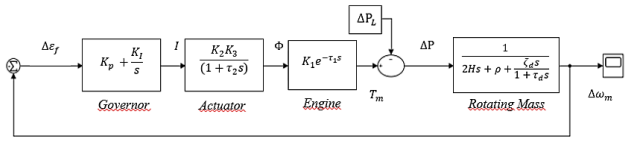
Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif eksperimental berbasis simulasi dengan objek berupa sistem kendali frekuensi reciprocating engine generator MWM TCG 2032 V16 pada PLTMG PT. Siantar Tara Sejati Site Tarakan.

A. Objek Penelitian dan Sumber Data

Data penelitian diperoleh dari log sheet operasi dari tanggal 01 hingga 31 Juli 2026, data nameplate generating set, spesifikasi actuator Heinzmann StG 40, dokumen teknis MWM, dan parameter pemodelan reciprocating engine generator dari literatur. Data log sheet digunakan untuk menggambarkan kondisi operasi dan variasi pembebanan, sedangkan data teknis mesin dan literatur digunakan untuk menentukan struktur serta parameter model dinamik. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink.

B. Pemodelan Sistem Kendali Frekuensi

Setiap komponen direpresentasikan menggunakan fungsi alih orde satu sederhana yang menghubungkan konsumsi bahan bakar dengan daya mekanik mesin berdasarkan pendekatan model linier di sekitar titik operasi. Perubahan kecepatan referensi ($\Delta\omega_{ref}$) dibandingkan dengan kecepatan sudut aktual ($\Delta\omega_m$) untuk menghasilkan sinyal error ($\Delta\varepsilon_f$). Sinyal tersebut diproses oleh governor dan actuator untuk mengatur suplai bahan bakar (Φ), sehingga menghasilkan torsi mekanik engine (T_m). Gangguan sistem didefinisikan sebagai perubahan daya beban (ΔP_L) yang menyebabkan ketidakseimbangan antara daya mekanik dan daya listrik serta menghasilkan perubahan kecepatan sudut aktual ($\Delta\omega_m$) generator, berikut merupakan blok diagram pemodelan REG.



Gambar 1. Pemodelan REG.

C. Persamaan

Pemodelan menggunakan Reciprocating Engine Generator (REG) terdiri dari dua bagian yaitu $G_f(s)$ tersusun dari komponen speed governor, actuator, dan engine (jalur bahan bakar). Sedangkan, rotating mass $G_m(s)$ tersusun dari inersia generator (H) conventional damping (ρ) dan transient damping ($\zeta_d s/1+\tau_d$). Sistem jalur bahan bakar Reciprocating Engine disederhanakan menjadi sebuah fungsi transfer:

$$G_f(s) = \frac{K_0 K_I(1+\tau_3 s)}{s(1+\tau_2 s)}\, e^{-\tau_1 s}\,;\, K_I \neq 0 \qquad (1)$$

Dengan $K_0 = K_1K_2K_3$ dan $\tau_3 = K_P/K_I$. Lalu dengan $\tau_d s \approx 0$ bernilai sangat kecil sehingga $\zeta_d s/1+\tau_d \approx \zeta_d s$ maka Rotating Mass memiliki fungsi transfer sebagai berikut:

$$G_m(s) = \frac{1}{(2H+\zeta_d)s+\rho} \qquad (2)$$

TABEL I
NILAI PARAMETER SETS YANG DIGUNAKAN

H [s]	K_I [p.u.]	K_P [p.u.]	K_0 [p.u.]	τ_1 [s]	ζ [%P/Hz]	τ_2 [s]	ρ
1,6	10	4	1	0,15	13	0,125	0,1

Kemudian membangun persamaan matematis dari pemodelan tersebut untuk analisis sistem kendali frekuensi yaitu persamaan open loop dan close loop, untuk persamaan open loop ($G_{OL}(s)$) sebagai berikut:

$$G_{OL}(s) = G_f(s)\, G_m(s) \qquad (3)$$

Lalu penelitian ini menggunakan persamaan close loop ($G_{CL}(s)$) subjected to a disturbance dengan $\Delta\omega(s)$ adalah perubahan kecepatan dan $\Delta P_L(s)$ adalah perubahan beban sehingga:

$$G_{CL}(s) = \frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_L(s)} = -\frac{G_m(s)}{1 + G_f(s)G_m(s)} \quad (4)$$

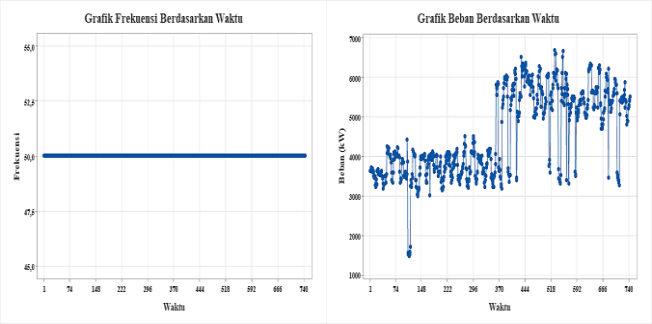
Selanjutnya adalah perancangan kompensator lead yang dilakukan menggunakan metode Root Locus dengan menganalisis perpindahan pole closed loop terhadap perubahan gain sistem. Pole dominan awal digunakan sebagai acuan untuk menentukan target pole dominan baru yang memiliki karakteristik damping ratio dan settling time yang lebih baik. Kompensator lead ($G_c(s)$) kemudian dirancang dengan menentukan lokasi zero (z_c) dan pole (p) serta gain tambahan (K_c) sehingga memberikan tambahan fase yang diperlukan untuk mencapai lokasi pole target.

$$G_c(s) = K_c \frac{s+z_c}{s+p_c} \quad (5)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Operasi Sistem

Berdasarkan data log sheet operasi, sistem mengalami variasi pembebanan selama periode pengamatan dengan rentang daya sekitar 1900 kW hingga 6500 kW. Meskipun terjadi perubahan beban, frekuensi generator tetap berada pada nilai nominal 50 Hz. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem governor mampu mempertahankan keseimbangan daya mekanik dan daya listrik selama operasi normal. Namun, kemampuan mempertahankan frekuensi nominal belum menggambarkan karakteristik respons transien ketika terjadi gangguan perubahan beban secara cepat.



Gambar 2. Profil Beban PT. Siantar Tara Sejati Site Tarakan.

B. Respons Sistem Sebelum Kompensasi

Menggunakan persamaan 1-4 dengan nilai parameter sets pada tabel 1 untuk membangun model equivalent dynamic REG sebagai pendekatan terhadap mesin MWM TCG 2032 V16 didapatkan nilai sistem open loop dan close loop sebagai berikut:

$$G_{OL}(s) = \frac{-0{,}3s^2 + 3{,}25s + 10}{0.152s^4 + 3.241s^3 + 16.22s^2 + 0.1s}$$

$$G_{CL}(s) = -\frac{0{,}009375s^3 + 0{,}2s^2 + s}{0.152s^4 + 3.241s^3 + 15{,}92s^2 + 3{,}35s + 10}$$

dengan akar polinomial dari $N_{CL}(s) = 0{,}009s^3 + 0{,}2s^2 + s$ adalah

$z_1 = 0$

$z_2 = -14.6248$

$z_3 = -7.5975$

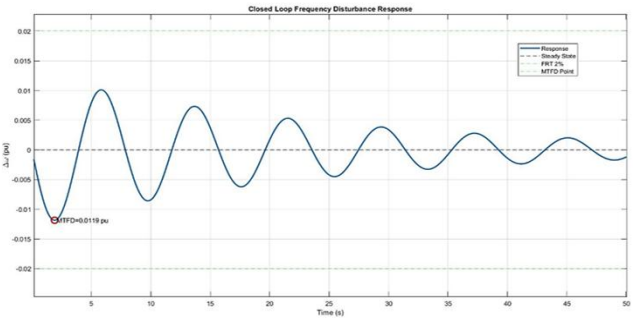
akar polinomial dari $CE = D_{CL}(s) = 0.152s^4 + 3.241s^3 + 15{,}92s^2 + 3{,}35s + 10 = 0$ adalah

$p_1 = -13.8506$

$p_2 = -7.3898$

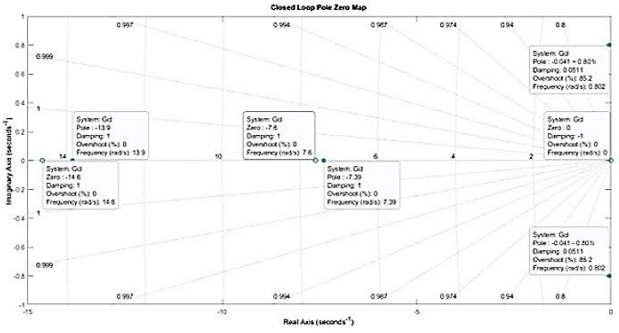
$p_{3,4} = -0.0410 \pm j0.8007$

Hasil simulasi sistem closed loop tanpa kompensator dengan batasan berdasarkan dokumen teknis MWM berisi tentang pengujian load acceptance. Penulis menggunakan nilai load acceptance terbesar sebagai batas perubahan daya yang dapat diterima mesin TCG 2032 V16 ($\Delta P_L = 16\%$) untuk menguji model linear REG yang dibangun menunjukkan bahwa sistem masih berada pada kondisi stabil, tetapi memiliki karakteristik transien yang relatif lambat. Nilai Maximum Transient Frequency Deviation (MTFD) mencapai 0,012 pu dengan peak time sebesar 1,91 detik.



Gambar 3. Time Respons Sistem Close Loop Sebelum Terkompensasi.

Selain itu, dari characteristic equation model REG diketahui pole dominan berada di $p_{3,4} = -0.0410 \pm j0.8007$ sehingga dengan pendekatan orde dua didapatkan *damping ratio* (ζ) 0,0511 dan *frequency natural* (ω_n) 0,8017 rad/s, menunjukkan bahwa sistem mengalami redaman rendah sehingga menghasilkan osilasi yang lebih lama sebelum mencapai kondisi stabil.



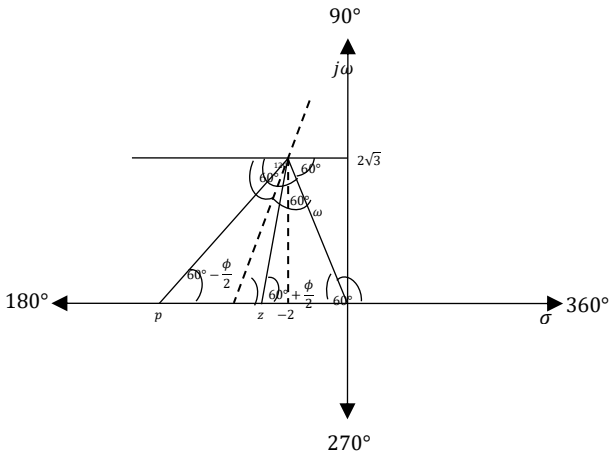
Gambar 4. Pole Zero Map Close Loop Sebelum Terkompensasi.

C. Perancangan Kompensator Lead

Tahap awal desain dilakukan dengan menentukan karakteristik pole dominan sistem sebelum kompensasi. Berdasarkan lokasi pole tersebut, ditentukan target pole baru dengan mempertimbangkan kebutuhan peningkatan damping ratio dan pengurangan waktu settling. Selanjutnya dilakukan perhitungan angle deficiency untuk menentukan besar tambahan fase yang diperlukan agar titik desain memenuhi kondisi Root Locus. Berdasarkan pole dominan sistem yang telah didapatkan selanjutnya adalah menetapkan target pole baru, pole baru yang memiliki nilai $\zeta = 0{,}5$ dan $\omega_n = 4\,rad/s$, bisa menjadi titik pole dominan baru yang ideal. Maka pole dominan target adalah $s_d = -2 \pm j2\sqrt{3}$.

Setelah mengetahui target pole dominan target, selanjutnya adalah menghitung angle deficiency terhadap pole dominan tersebut yang harus diisi oleh kompensator yang akan dirancang, dengan cara mengetahui total sudut sistem open loop yaitu, $\angle G_{OL}(s_d) = \sum\theta_z - \sum\theta_p = 142{,}2°$.

Syarat sudut Root Locus adalah $\angle G_{OL}(s_d) = (2k+1)180°$. Namun, sudut yang dihasilkan oleh sistem $\angle G_{OL}(s_d)$ 142,2°. Maka sudut tambahan yang harus diberikan kompensator adalah $\phi = 180° - 142{,}2° = 37{,}8°$.



Gambar 5. angle deficiency terhadap nilai titik pole dan zero.

Bentuk kompensator sebelum penentuan gain adalah

$$G_c(s) = K_c \frac{s+2{,}68}{s+5{,}971}$$

Syarat magnitudo *Root Locus* adalah $|G_c(s_d)G_{OL}(s_d)| = 1$.

Dengan,

$$G_c(s) = K_c \frac{s+2{,}68}{s+5{,}971}$$

Maka,

$$K_C = \frac{1}{0{,}6698 \times 0{,}0828} = 18{,}03.$$

Sehingga,

$$G_C(s) = 18{,}03\frac{s+2{,}68}{s+5{,}971} = \frac{(18.03s+48{,}32)}{(s+5{,}971)}$$

D. Respon Sistem Setelah Kompensasi

Fungsi transfer *close loop* setelah kompensasi diterapkan adalah

$$G_{CL,c}(s) = \frac{G_m(s)}{1 + G_c(s)G_f(s)G_m(s)}$$

$$G_{CL,c}(s) = \frac{0{,}009375s^4 + 0.256s^3 + 2.194s^2 + 5.971s}{0.152s^5 + 4.148s^4 + 30{,}169s^3 + 141{,}055s^2 + 337{,}938s + 483{,}2}$$

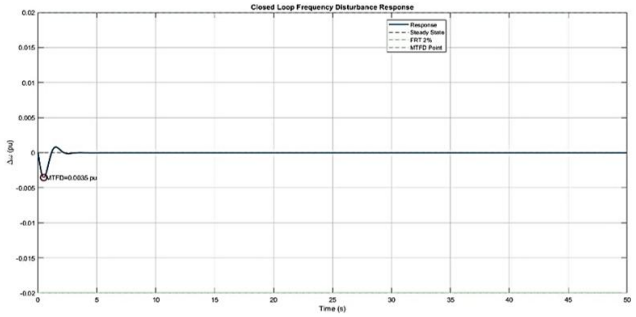
Dari CE setelah kompensator didapatkan akar polinomialnya adalah

$s_1 = -19{,}18$

$s_{2,3} = -1{,}99 \pm j3{,}45$

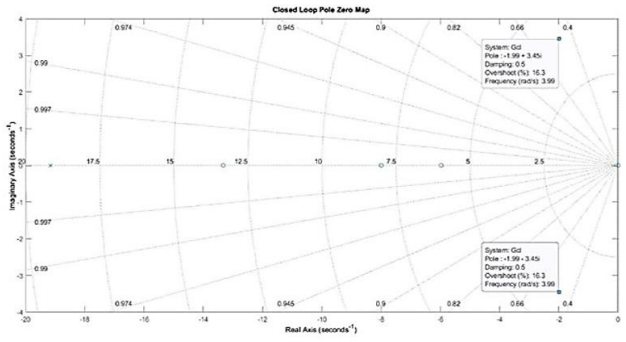
$s_{4,5} = -2{,}07 \pm j2{,}48$

Setelah kompensator lead diterapkan pada model sistem kendali frekuensi, hasil simulasi menunjukkan adanya peningkatan karakteristik respons transien secara signifikan.



Gambar 6. Respon Waktu Closed Loop Setelah Terkompensasi

Nilai MTFD mengalami penurunan menjadi 0,0035 pu. Hal tersebut menunjukkan bahwa besar deviasi frekuensi maksimum akibat gangguan perubahan beban dapat dikurangi. Selain penurunan deviasi frekuensi, waktu respons sistem juga mengalami peningkatan. Nilai peak time berkurang menjadi 0,5 detik sehingga sistem mampu mencapai respons maksimum dengan waktu yang lebih cepat. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa kompensator lead mampu meningkatkan kecepatan respons sistem secara signifikan terhadap gangguan.



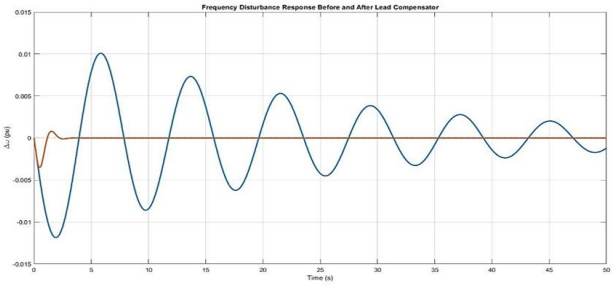
Gambar 7. Pole Zero Map Close Loop Setelah Terkompensasi.

Selain itu, dari characteristic equation model REG diketahui pole dominan berada di $s_{2,3} = -1{,}99 \pm j3{,}45$ sehingga dengan pendekatan orde dua didapatkan *damping ratio* (ζ) 0,5 dan *frequency natural* (ω_n) $3{,}99\ rad/s$, Peningkatan nilai (ζ) dan (ω_n) menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan redaman yang lebih baik sehingga amplitudo osilasi frekuensi dapat dikurangi.

Berdasarkan hasil perancangan, diperoleh kompensator lead yang memiliki tambahan zero dan pole pada lokasi telah ditentukan sehingga mampu memberikan peningkatan fase terhadap sistem. Konfigurasi tersebut menyebabkan pole dominan closed loop bergeser menjauhi sumbu imajiner menuju daerah kiri bidang-s. Pergeseran tersebut menunjukkan peningkatan kestabilan relatif dan menjadi dasar evaluasi performa sistem setelah kompensasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa desain kompensator lead berbasis Root Locus efektif digunakan untuk meningkatkan stabilitas frekuensi pada model PLTMG MWM TCG 2032 V16 tanpa melakukan perubahan terhadap struktur governor utama.

E. Perbandingan Sebelum dan sesudah Plant Terkompensasi

Berikut adalah grafik dan tabel perbandingan perubahan hasil simulasi sebelum dan sesudah plant terkompensasi.



Gambar 8. Perbandingan Respon Waktu Sistem Close loop sebelum (Biru) dan Sesudah (Jingga) Terkompensasi.

TABEL II
PERBANDINGAN DAN PERUBAHAN RESPON TRANSIEN SISTEM

Parameter	**Sebelum**	**Sesudah**	**Perubahan**
Peak Time Aktual	1,91 detik	0,5 detik	73,8% lebih cepat
Maximum Transient Frequency Deviation	0,012 pu	0,0035 pu	70,8% Lebih kecil
Pole dominan	$-0.0410 \pm j0.8007$	$-1{,}99 \pm j3{,}45$	Bergeser ke kiri (lebih stabil)
ω_n	$0{,}8017\ rad/s$	$3{,}99\ rad/s$	Meningkat $\approx 5\times$
ζ	0,0511	0,5	Meningkat $\approx 10\times$

Terlihat perubahan berdasarkan perbandingan grafik dan hasil perhitungan pendekatan orde dua pole dominan, bahwa kompensator lead yang dirancang berpengaruh terhadap respon trasien sistem dimana sistem yang telah terkompensasi memiliki respon transien yang lebih cepat dari pada sebelum terkompensasi.

IV. KESIMPULAN

Pemodelan sisi mekanik sistem pembangkit listrik berhasil dilakukan dalam bentuk diagram blok dinamik yang merepresentasikan hubungan antara governor, aktuator, mesin, dan dinamika inersia generator. Model matematis tersebut mampu menggambarkan hubungan antara perubahan daya beban dengan perubahan kecepatan/frekuensi generator sehingga dapat digunakan sebagai dasar analisis kestabilan sistem frekuensi PLTMG. Desain kompensator kendali frekuensi berbasis Analisis Tempat Kedudukan Akar (Root Locus) berhasil meningkatkan performansi sistem kendali. Perancangan kompensator dilakukan dengan mengatur perpindahan posisi pole dominan menuju daerah kiri bidang kompleks untuk memperoleh karakteristik sistem sesuai spesifikasi desain. Hasil desain menunjukkan peningkatan nilai damping ratio dari 0,051 menjadi 0,499 serta peningkatan natural frequency dari 0,802 rad/s menjadi 3,989 rad/s, yang menunjukkan peningkatan kemampuan sistem dalam meredam osilasi dan mempercepat respons dinamik.

Berdasarkan hasil simulasi, terjadi penurunan peak time aktual dari 1,91 detik menjadi 0,50 detik atau meningkat sebesar 73,8% dalam kecepatan respons. Selain itu, nilai Maximum Transient Frequency Deviation (MTFD) mengalami penurunan dari 0,012 pu menjadi 0,0035 pu atau berkurang sebesar 70,8%. Secara keseluruhan, penerapan kompensator berbasis Tempat Kedudukan Akar mampu meningkatkan stabilitas frekuensi generator PLTMG dengan memperbaiki posisi pole dominan, meningkatkan redaman sistem, mengurangi penyimpangan frekuensi transient, serta mempercepat waktu pemulihan sistem terhadap gangguan.

DAFTAR ACUAN

[1] A. Iswahyudi, A. T. Alamsyah, "Pemodelan Kendali Frekuensi Beban Pada Pembangkit Tenaga Listrik Surya On Grid," vol. 5, no. 1, pp. 2–6, 2020.

[2] A. Gangopadhyay and P. Meckl, "Modeling and Validation of a," vol. 123, no. September 2001, pp. 425–430, 2017, doi: 10.1115/1.1386790.

[3] P. Plant and D. Model, "Technical Reference Document," no. September, 2016.

[4] R. J. Best, J. M. Kennedy, D. J. Morrow, and B. Fox, "Steady-State & Transient Performance of Biodiesel Fuelled Compression Ignition Based Electrical Generation," vol. 2, pp. 20–27, 2011.

[5] INTERNATIONAL ASSOCIATION of OIL & GAS PRODUCERS, "Specification for Diesel Engines," 2021.

[6] MWM, "Power Plants Design and Installation," 2014

[7] F. Conte, S. Massucco, and F. Silvestro, "Equivalent Modelling of Reciprocating Engines Generators for Microgrid Frequency Response Analysis," pp. 1–6, 2017.

[8] F. Mohamed, *MICROGRID MODELLING AND SIMULATION*. Helsinki: Helsinki University of Technology Control Engineering Laboratory, 2006.

[9] O. Mohamed, "Progress in Modeling and Control of Gas Turbine," 2020.

[10] K. Ogata and J. W. Brewer, *Modern Control Engineering*, Fifth Edit., vol. 93, no. 1. Pearson Education, Inc, 1971. doi: 10.1115/1.3426465.

[11] Hadi Saadat, *Power System Analysis*. Boston, 1999.

[12] R. Zanasi and S. Cuoghi, "Design of lead-lag compensators for robust control," *IEEE Int. Conf. Control Autom. ICCA*, no. 4, pp. 106–111, 2011, doi: 10.1109/ICCA.2011.6138021.

[13] E. F. Fongang, "Towards resilient plug-and-play microgrids," no. 2009, 2019.

[14] S. Sommerville, G. A. Taylor, and M. Abbod, "Frequency stability considerations of reciprocating gas engine generators in microgrids," *2021 56th Int. Univ. Power Eng. Conf. Powering Net Zero Emiss. UPEC 2021 - Proc.*, 2021, doi: 10.1109/UPEC50034.2021.9548254.

[15] J. H. Kim, J. W. Chang, and Y. S. Kim, "A Novel Frequency Reference Compensation Method in Decentralized Secondary Frequency Control for Parallel Operation of Multiple Generators in an Islanded Microgrid," *IEEE Access*, vol. 12, no. August, pp. 127993–128006, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3456087.

[16] C. H. Lin, C. J. Wu, J. Z. Yang, and C. J. Liao, "Parameters identification of reduced governor system model for diesel-engine generator by using hybrid particle swarm optimisation," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 12, no. 9, pp. 1265–1271, 2018, doi: 10.1049/iet-epa.2017.0851.

[17] 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.*, vol. 211, no. July, p. 108191, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108191.

[18] Prabha S. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education, 1994.

[19] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, "INTERNATIONAL STANDARD engine driven alternating current Generating sets", 2022.

[20] M. I. Kasau, "Memperbaiki Spesifikasi Sistem Kontrol Dengan Teknik Kompensasi," *Pros. Semin. Ilm. Sist. Inf. DAN Teknol. Inf.*, vol. 4, pp. 214–223, 2015.