Stabilitas Tegangan Generator Melalui Desain Kompensator Berbasis Tempat Kedudukan Akar pada PLTMG PT. Siantar Tara Sejati

Akhmad Syaiful Anam[1], Ismit Mado[2], Achmad Budiman[3], Sugeng Riyanto[4], Febrian Rizky Ghifari[5], Muhammad Akbar[6], dan Nursamsiah[7]

[1,2,3,4] Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, [5,6,7] PT. Siantar Tara Sejati

Corespondent Author : ipul75anam@gmail.com

***Abstract* — Voltage stability is an essential factor in maintaining the reliability and performance of power generation systems. Instability in generator voltage may reduce power quality and disrupt overall system operation. This study aimed to design a Root Locus-based compensator to improve generator voltage stability at the Gas Engine Power Plant (PLTMG) of PT. Siantar Tara Sejati. The study was conducted by developing a mathematical model of the generator excitation system, consisting of an amplifier, exciter, and synchronous generator, followed by simulation using MATLAB software. The compensator was designed by determining the appropriate pole and zero locations through Root Locus analysis, resulting in a lead compensator capable of improving the dynamic response of the system. The simulation results show that before the addition of the compensator, the closed-loop system had a rise time of 0.5545 seconds, peak time of 1.3776 seconds, settling time of 4.2506 seconds, overshoot of 29.163%, and steady-state error of 0.0833. After the lead compensator was applied, the rise time decreased to 0.3979 seconds, the peak time decreased to 0.9146 seconds, the settling time decreased to 1.4558 seconds, the overshoot was reduced to 15.775%, and the steady-state error decreased to 0.0723. These results indicate that the designed lead compensator is able to improve response speed, enhance system damping, and increase generator voltage stability. Therefore, the Root Locus method is effective for designing compensators to improve the performance of generator excitation systems.**

***Keyword* — Compensator, MATLAB, Root Locus, Voltage Stability.**

Abstrak — Stabilitas tegangan merupakan salah satu faktor penting dalam menjaga keandalan operasi sistem pembangkit tenaga listrik. Ketidakstabilan tegangan pada generator dapat menyebabkan penurunan kualitas daya dan mengganggu kinerja sistem. Penelitian ini bertujuan untuk merancang kompensator berbasis metode Tempat Kedudukan Akar (Root Locus) guna meningkatkan stabilitas tegangan generator pada PLTMG PT. Siantar Tara Sejati. Penelitian dilakukan melalui pemodelan matematis sistem eksitasi generator yang terdiri dari amplifier, eksiter, dan generator sinkron, kemudian disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Perancangan kompensator dilakukan dengan menentukan posisi pole dan zero berdasarkan analisis Root Locus sehingga diperoleh kompensator Lead yang mampu memperbaiki karakteristik respon sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum penambahan kompensator, sistem closed-loop memiliki Rise Time sebesar 0,5545 detik, peak time 1,3776 detik, Settling Time 4,2506 detik, Overshoot 29,163%, dan steady-state error 0,0833. Setelah penambahan kompensator Lead, Rise Time menurun menjadi 0,3979 detik, peak time menjadi 0,9146 detik, Settling Time menjadi 1,4558 detik, Overshoot berkurang menjadi 15,775%, serta steady-state error menurun menjadi 0,0723. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kompensator Lead yang dirancang mampu meningkatkan kecepatan respon, memperbaiki redaman sistem, serta meningkatkan kestabilan tegangan generator. Dengan demikian, metode Tempat Kedudukan Akar efektif digunakan untuk merancang kompensator dalam meningkatkan performa sistem eksitasi generator.

Kata kunci — Kompensator, MATLAB, Root Locus, Stabilitas Tegangan.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu faktor penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan perkembangan sektor industri, komersial, maupun rumah tangga. Peningkatan kebutuhan energi listrik yang terus terjadi menuntut sistem pembangkit memiliki keandalan serta kualitas daya yang baik. Salah satu parameter yang sangat menentukan kualitas daya adalah kestabilan tegangan. Ketidakstabilan tegangan dapat menyebabkan penurunan kualitas daya, kerusakan peralatan, hingga gangguan pada kontinuitas penyaluran energi listrik. Oleh karena itu, sistem pengaturan tegangan pada generator menjadi bagian penting dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik.

PT. Siantar Tara Sejati Site Tarakan sebagai salah satu perusahaan pembangkit listrik tenaga mesin gas (PLTMG) berperan dalam memenuhi kebutuhan energi listrik di Kota Tarakan. Perubahan beban yang terjadi secara dinamis dapat menimbulkan fluktuasi tegangan pada generator. Kondisi tersebut menyebabkan sistem eksitasi harus mampu merespons perubahan secara cepat agar tegangan terminal generator tetap berada pada batas operasi yang diizinkan. Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) yang terdiri atas amplifier, exciter, dan generator memiliki karakteristik dinamis yang mempengaruhi respon tegangan sistem.

Berbagai metode telah digunakan untuk meningkatkan performa sistem kendali. Penelitian oleh [1]. menunjukkan bahwa metode Root Locus dengan pendekatan Padé mampu menganalisis pengaruh time delay terhadap kestabilan sistem kendali. Penelitian [2] memperlihatkan bahwa penerapan kompensator dengan pendekatan Tempat Kedudukan Akar (TKA) dapat memperbaiki spesifikasi respon sistem melalui penempatan pole yang sesuai. Selain itu, penelitian [3]. menunjukkan bahwa optimasi parameter Automatic Voltage Regulator (AVR) mampu meningkatkan kestabilan tegangan dan memperbaiki karakteristik respon sistem.

Metode Tempat Kedudukan Akar (Root Locus) merupakan salah satu metode dalam teori kendali klasik yang digunakan untuk menganalisis perpindahan pole sistem akibat

perubahan penguatan. Metode ini dapat digunakan untuk merancang kompensator sehingga diperoleh karakteristik respon yang lebih baik, seperti mempercepat waktu tanggap, memperkecil overshoot, serta meningkatkan kestabilan sistem. Salah satu jenis kompensator yang umum digunakan adalah kompensator lead yang memiliki kemampuan meningkatkan margin fasa dan memperbaiki respon transien sistem.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan merancang pengendali tegangan pada sistem Automatic Voltage Regulator (AVR) menggunakan kompensator lead berbasis metode Root Locus. Pemodelan sistem dilakukan berdasarkan komponen amplifier, exciter, dan generator, kemudian dilakukan perancangan kompensator menggunakan MATLAB untuk memperoleh karakteristik respon waktu yang lebih baik. Kinerja sistem dianalisis berdasarkan parameter respon transien berupa rise time, settling time, peak time, dan overshoot melalui perbandingan kondisi sebelum dan sesudah penambahan kompensator.

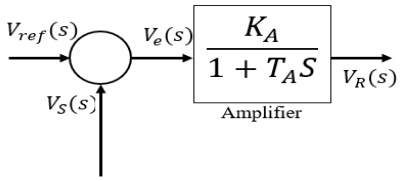
II. LANDASAN TEORI

A. Model Matematis Amplifier, Exciter, dan Generator

1) *Amplifier*

Amplifier berfungsi memperkuat sinyal kesalahan yang diperoleh dari selisih antara tegangan referensi dengan tegangan keluaran yang terukur. Fungsi alih amplifier dinyatakan sebagai [4]:

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1+T_A s} \quad (1)$$



Gambar 1. Diagram Blok *Amplifier*

dengan K_A merupakan konstanta penguatan amplifier dan T_A adalah konstanta waktu amplifier. Hasilnya diperoleh diagram blok *amplifier* sebagai berikut:

2) *Exciter*

Exciter berfungsi menyediakan arus eksitasi untuk menghasilkan medan magnet pada rotor generator. Fungsi alih exciter dinyatakan sebagai [4]:

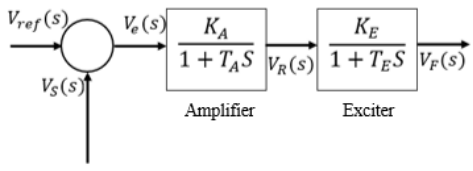
$$\frac{V_f(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1+T_E s} \quad (2)$$

Dimana:

K_E = *Gain Exciter*

T_E = Konstanta Waktu *Exciter*

T_E merupakan konstanta waktu *eksiter*.

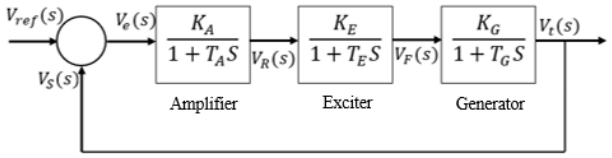


Gambar 2. Diagram Blok *Amplifier* dan *Exciter*

3) Generator

Generator sinkron mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Model matematis generator dinyatakan dalam bentuk fungsi alih [4]:

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1+T_G s} \quad (3)$$



Gambar 3. Diagram Blok *Amplifier, Exciter* dan *Generator*

B. Perancangan Kendali Kompensator

Tempat Kedudukan Akar (*Root Locus*) adalah suatu sistem yang merupakan kurva dan tempat dari kedudukan akar-akar persamaan karakteristik atau pole pole dari fungsi alih loop tertutup dalam parameter gain K yang berubah-ubah. Hal ini didasarkan pada hubungan antara kutub dan nol dari fungsi sistem loop tertutup dan fungsi transfer loop terbuka. Plot root-locus dapat digunakan untuk menyesuaikan penguatan sistem, memandu desain jaringan kompensasi, atau mempelajari dampak perubahan parameter sistem [5].

Dalam teori kontrol dan teori stabilitas, analisis *Root Locus* adalah metode grafis untuk memeriksa bagaimana akar suatu sistem berubah dengan variasi parameter sistem tertentu, biasanya merupakan penguatan dalam sistem umpan balik. Ini adalah teknik yang digunakan sebagai kriteria stabilitas dalam bidang teori kontrol klasik yang dikembangkan oleh Walter R. Evans yang dapat menentukan stabilitas sistem [6] – [7].

C. Kompensator

Kompensator merupakan suatu perangkat berupa rangkain elektronik, algoritma digital, atau fungsi transfer yang ditambahkan ke dalam sistem kontrol untuk "mengkompensasi" kekurangan kinerja sistem asal, seperti ketidakstabilan, respon yang lambat, Overshoot yang besar, kesalahan steady state yang tinggi tujuanya adalah memperbaiki kinerja sistem dengan cara menggeser pole-pole (kutub) dan zero-zero (nol) dari fungsi transfer loop tertutup ke Lokasi yang diinginkan di bidang kompleks (bidang-s) [4]. Jenis-jenis Kompensator terdiri dari Kompensator *Lead*, Kompensator *Lag*, dan Kompensator *Lead-Lag* [8].

1) Kompensator *Lead*

Kompensator Lead digunakan untuk memperbaiki respons transien dari sistem, terutama dengan cara meningkatkan margin fasa (phase margin) dan kecepatan respon sistem [4]. Kompensator Lead menambahkan kontribusi fasa positif (Leading phase) pada rentang frekuensi tertentu, sehingga membantu sistem menjadi lebih stabil dan cepat.

2) Kompensator *Lag*

Kompensator Lag berfungsi untuk mengurangi kesalahan keadaan stabil (steady-state error) tanpa mengorbankan kestabilan sistem. Kompensator ini meningkatkan gain pada frekuensi rendah, sehingga memperbaiki akurasi sistem saat mencapai kondisi mantap (steady state) [4].

3) Kompensator *Lead-Lag*

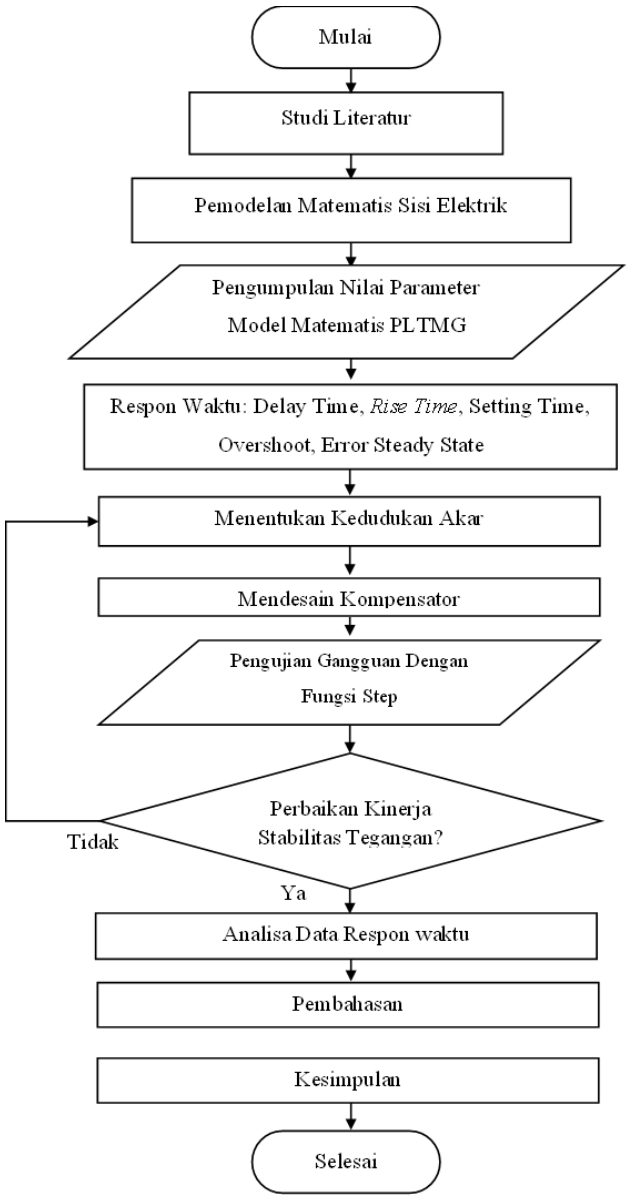
Kompensator Lead-Lag, merupakan gabungan dari dua jenis kompensator: Lead dan Lag. Kompensator ini dirancang untuk memberikan manfaat dari kedua jenis tersebut secara bersamaan. Dengan demikian, sistem tidak hanya menjadi lebih stabil dan cepat, tetapi juga memiliki akurasi yang tinggi pada kondisi mantap (steady-state) [4].

III. Metode Penelitian

A. Jenis Penelitian dan Pendekatan Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian kuantitatif dan eksperimen simulasi, dimana penelitian ini bertujuan untuk merancang kompensator sebagai pengendali tegangan pada sistem pembangkit akibat fluktuasi beban di sisi konsumen. Dengan mengumpulkan data parameter dilakukan sebagai penelitian eksperimen, dimana metode yang digunakan yaitu mendesain dan menganalisa sehingga dapat diketahui tegangan terminal pada generator.

B. Alur Metode Penelitian



Gambar 4. Flowchart

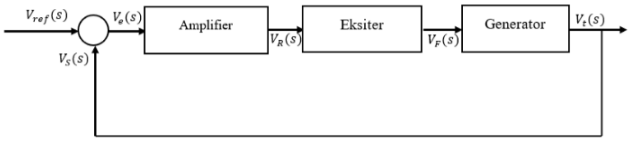
C. Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Waktu dan tempat pelaksanaan penelitian ini dilaksanakan selama bulan Oktober 2025 sampai dengan bulan Juni 2026. Tempat pelaksanaan penelitian dan pengambilan data penelitian di PT. Siantar Tara Sejati site Tarakan.

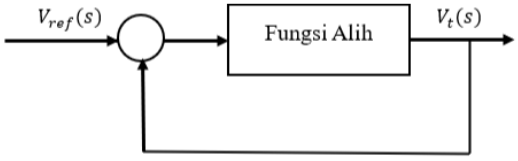
D. Data dan Sumber Data

Data yang diambil adalah data parameter dari sistem pembangkit PT. Siantar Tara Sejati berdasarkan data yang tertera pada name-plate, manual book, dan jika tidak memungkinkan mendapatkan data secara keseluruhan data parameter maka dilakukan pendekatan berbasis data parameter standar IEEE [9] – [11].

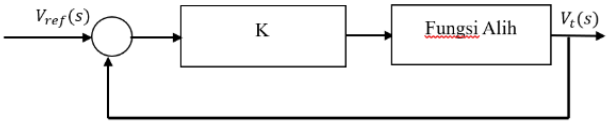
E. Usulan Kendali Kompensator berbasis Root Locus



Gambar 5. Diagram Blok pada Sisi Elektrik



Gambar 6. Diagram Blok Fungsi Alih



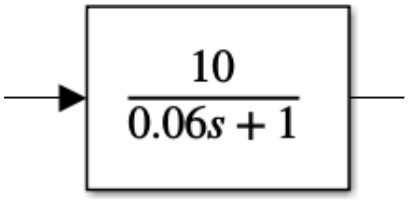
Gambar 7. Diagram Blok Kompensator dan Fungsi Alih

Berdasarkan Gambar 5 pada menunjukkan sisi elektrik pada sistem pembangkit yang terdiri atas Amplifier, Exciter, dan Generator sedangkan pada Gambar 6 merupakan fungsi alih dari sisi elektrik sistem pembangkit dalam bentuk fungsi Alih tujuan dari blok diagram untuk melihat respon tanggapan waktu maka dari itu sistem pembangkit akan menentukan kedudukan akar-akar pada sistem setelah mengetahui kedudukan stabilitas maka dirancang pengendali sistem pengendali sebagai pengatur tegangan pada penelitian ini menggunakan kompensator.

IV. Hasil dan Pembahasan

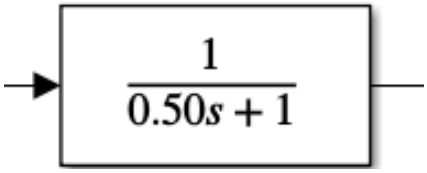
A. Pemodelan Sistem

Penelitian ini menggunakan model sistem eksitasi generator yang terdiri atas amplifier, exciter, dan generator sinkron. Nilai parameter diperoleh dari data nameplate generator, manual book engine TCG2032, serta pendekatan parameter standar IEEE untuk melengkapi data yang tidak tersedia. Berdasarkan parameter tersebut, masing-masing komponen dimodelkan dalam bentuk fungsi alih orde satu dan disusun menjadi model Automatic Voltage Regulator (AVR) dalam konfigurasi umpan balik tertutup.



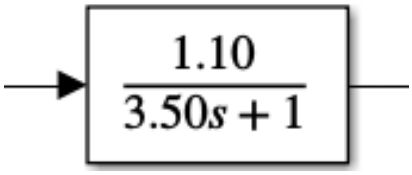
Gambar 8. Diagram Blok Nilai *Amplifier*

Model amplifier direpresentasikan dalam sebuah sistem orde satu dengan sebuah faktor penguatan dan konstanta waktu. Adapun nilai konstanta penguatan amplifier memiliki rentang nilai dari 10 sampai 400, sedangkan untuk konstanta waktu amplifier memiliki nilai yang sangat kecil yaitu 0,04 detik sampai 0,5 detik.



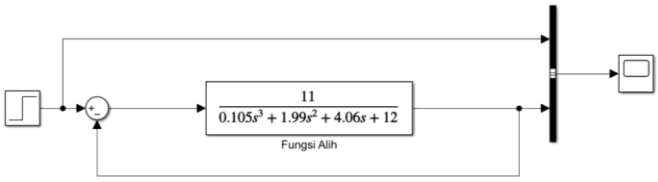
Gambar 9. Diagram Blok Nilai Exiter

Pada eksitasi di model dengan sebuah sistem orde satu dengan bentuk fungsi alih dari sistem exciter. Nilai konstanta penguatan exciter memiliki nilai dan konstanta waktu exciter memiliki rentang nilai 0.04 sampai dengan 0.5 detik.



Gambar 10. Diagram Blok Nilai Generator

Setelah didapatkan model matematik dari amplifier, exciter, dan generator maka dilanjutkan dengan mengubah menjadi fungsi alih atau dalam Bentuk Closed Loop.



Gambar 11. Fungsi Alih

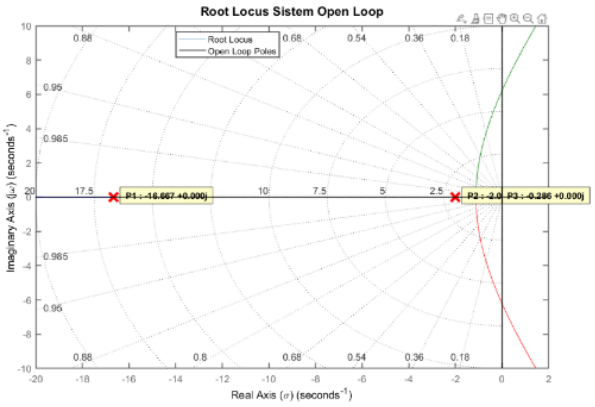
B. Analisis Tempat Kedudukan Akar Sistem Awal

Untuk menentukan tempat kedudukan akar dapat menggunakan fungsi transfer Open Loop

$$G(s) = \frac{11}{0.105s^3 + 1.99s^2 + 4.06s + 1}$$

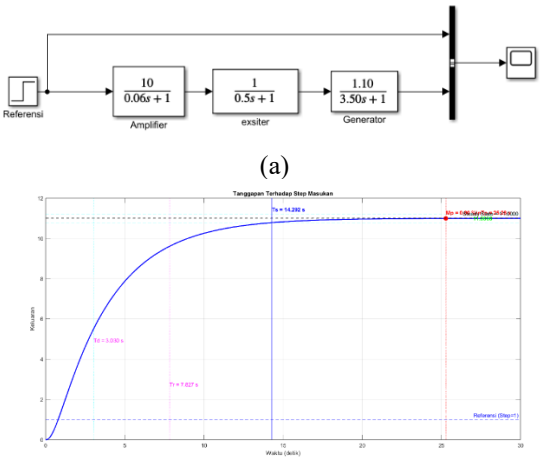
Selanjutnya mencari nilai akar polinomial dari
$0.105s^3 + 1.99s^2 + 4.06s + 1$
$s_1 = -16{,}666666666666679$
$s_2 = -2{,}000000000000000$
$s_3 = -0{,}285714284714286$

Dari Akar akar tersebut dapat ditentukan bentuk gambar pole dari Root Locus.



Gambar 12. Pole dan Zero Map Root Locus Open Loop

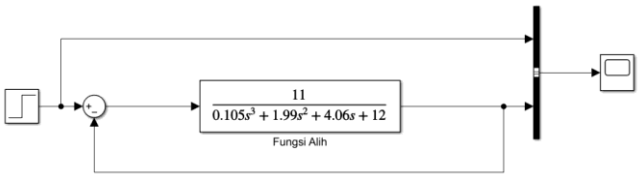
Sebelum perancangan kompensator, dilakukan uji respon sistem menggunakan MATLAB Simulink dengan masukan step untuk mengetahui karakteristik respon waktu dan mengevaluasi performa sistem terhadap spesifikasi yang diinginkan



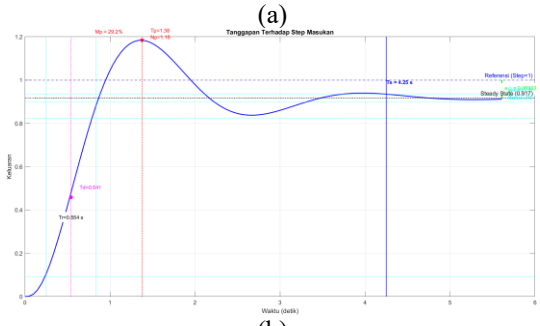
(a)

(b)

Gambar 13. (a) Diagram Blok Open Loop, (b) Respon Waktu Open Loop



(a)



(b)

Gambar 14. (a) Diagram Blok Closed Loop, (b) Respon Waktu Closed Loop

Berdasarkan hasil simulasi respon step, sistem open-loop memiliki karakteristik respon yang relatif lambat dengan nilai Delay Time sebesar 3,0300 s, Rise Time 7,8271s, Peak Time 25,2824 s, dan Settling Time 14,2922 s tanpa mengalami Overshoot (0%), serta mencapai kondisi tunak pada 11 kV. Sementara itu, sistem closed-loop menunjukkan perbaikan respon dengan Delay Time 0,5412 s, Rise Time 0,5545 s, Peak Time 1,3776 s, dan Settling Time 4,427 s, namun masih menghasilkan Overshoot sebesar 29,163% dan steady-state error sebesar 8,3333%. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun sistem telah stabil, performa dinamisnya masih perlu ditingkatkan melalui perancangan kompensator.

C. Desain Kompensator Lead Berbasis Tempat Kedudukan Akar

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

$$G_{(s)} = \frac{11}{0.105s^3 + 1.99s^2 + 4.06s + 1}$$

Dari fungsi transfer Open Loop rasio redaman dan frekuensi natural ζ=0.5 dan \omega_n=4
Langkah 1 mengubah Open Loop menjadi Closed loop:

$$\frac{C_{(s)}}{R_{(s)}} = \frac{G_{(s)}}{1 + G_{(s)}}\frac{C_{(s)}}{R_{(s)}}$$

$$= \frac{\frac{11}{(0.06s+1)(0.05s+1)(3.5s+1)}}{1 + \frac{11}{(0.06s+1)(0.05s+1)(3.5s+1)}}$$

Closed loop pole didapatkan dari akar akar polynomial
$0.105s^3 + 1.99s^2 + 4.06s + 12$
yaitu:
$s_1 = -17.080307767322399$
$s_{2,3} = -0.936036592529287$
$\quad \pm j2.411413693326161$
$\omega_n = \sqrt{11} = 3.31662$
$s2\zeta\omega_n = 1 \Rightarrow \zeta = 0.150756$

Langkah 2:
Closed loop Poles yang diinginkan Adalah ζ=0.5 dan omega_n=4 Maka:
$s^2 + 2\zeta\omega_n s + {\omega_n}^2 = 0s^2 + 2(0.5)(4)s + (4)^2$
$= 0s^2 + 4s + 16 = 0$
Sehingga diperoleh:
$s_1 = -2 - j2\sqrt{3}$
$s_1 = -2 + j2\sqrt{3}$
Dari akar akar didapatkan letak pole Closed loop yang diinginkan
Jumlah sudut yang dihasilkan oleh pole sistem kemudian dibandingkan dengan syarat sudut *Root Locus*, yaitu:

$$\angle G_{(s)}H_{(s)} = \pm 180°(2k+1)$$

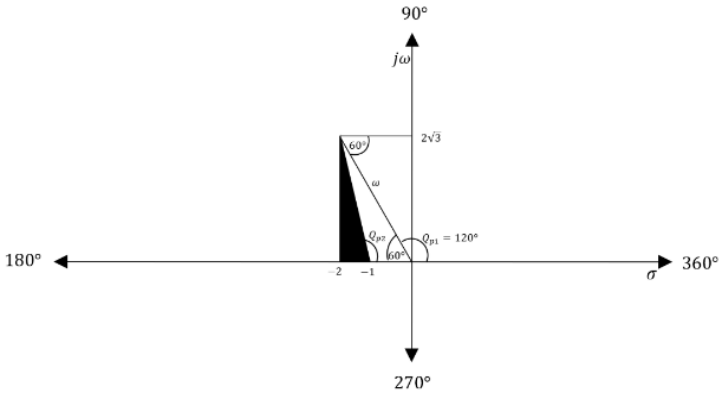
$$\angle \frac{11}{0.105s^3 + 1.99s^2 + 4.06s + 1}\Big|_{s=-2+j2\sqrt{3}} = -\emptyset_{P1} - \emptyset_{P2}$$

$$\emptyset_{P1} = 180° - tan^{-1}\left(\frac{2\sqrt{3}}{2}\right) = 180° - 60° = 120°$$

$$\emptyset_{P2} = 180° - tan^{-1}\left(\frac{2\sqrt{3}}{1}\right) = 180° - 73.9° = 106.1°$$

$$= -226.1°$$

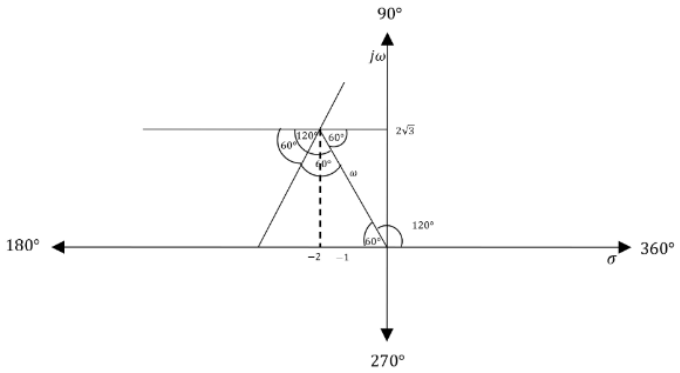
$$\emptyset = -226.1° + 180° = -46.1°$$



Nilai $\emptyset = 46.1°$ inilah yang nantinya harus dipenuhi oleh kompensator *Lead*.

$$\angle \frac{11}{0.105s^3 + 1.99s^2 + 4.06s + 1}\Big|_{s=-2+j2\sqrt{3}} = -\emptyset_{P1} - \emptyset_{P2}$$

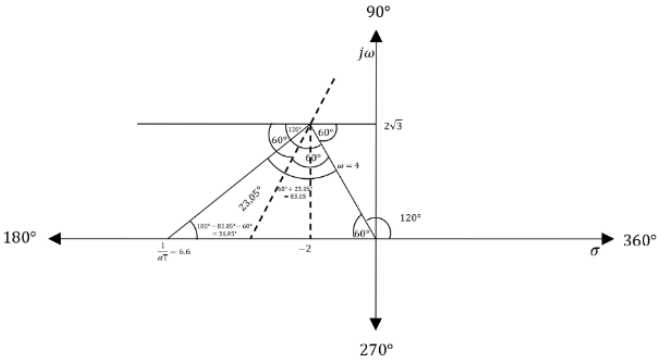
$$= 120° - 106.1°$$



$$\frac{\emptyset}{2} = \frac{46.1°}{2} = 23.05°$$

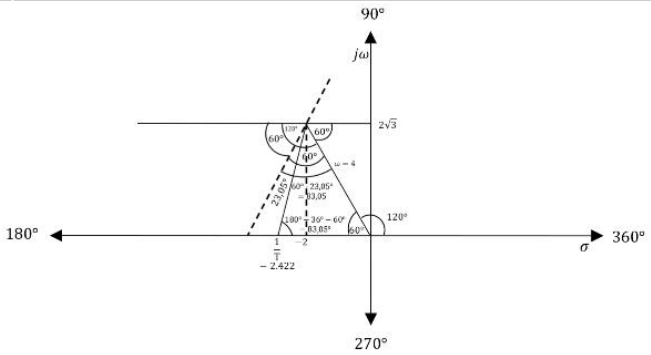
$$60° + 23.05° = 83.05°$$

$$180° - 83.05° - 60° = 36.95°$$



$$\frac{x}{\sin(83.05°)} = \frac{4}{\sin(36.95°)} = x = 6.6$$

Maka didapatkan zero baru yaitu -6.6



$60° - 23.05° = 36.95°$

$180° - 36.95° - 60° = 83.05°$

$$\frac{4}{\sin(83.05°)} = \frac{x}{\sin(36.95°)} = x = 2.422$$

Maka didapatkan zero baru -2,422

Dengan menggunakan nilai gain, pole, dan zero yang telah diperoleh dapat ditentukan nilai α

$Z_C = -2.422 \; dan \; P_C = -6.6$

$\alpha = \frac{Z_C}{P_C} = \frac{2.422}{6.6} = 0.3669$

$0 < \alpha < 1$

Ini menunjukan bahwa nilai α masih pada rentang menunjukan ciri khas kompensator

$$G_C(s) = K_C \frac{(s + 2.422)}{(s + 6.6)}$$

Melakukan evaluasi Kc menggunakan Magnitude Condition

$$\left| K_C \frac{(s + 2.422)}{(s + 6.6)} \times \frac{11}{0.105s^3 + 1.99s^2 + 4.06s + 1} \right|_{=-2+j2\sqrt{3}} = 1$$

$$K_C = \left| \frac{(s + 6.6) \times 0.105s^3 + 1.99s^2 + 4.06s + 1}{11(s + 2.422)} \right|_{=-2+j2\sqrt{3}}$$

Dimana:

$$4.6 + j2\sqrt{3} = \sqrt{(4.6)^2 + \left(2\sqrt{3}\right)^2} = \sqrt{21.16 + 12} = \sqrt{33.16} = 5.758$$

$$(0.105 \times 64) + 1.99\left(-8 - j8\sqrt{3}\right) + 4{,}06\left(-2 + j2\sqrt{3}\right) + 1$$

$$6.72 - 15.92 - j15.92\sqrt{3} - 8.12 + 8.12\sqrt{3} + 1 \quad -16.32 - j7.8\sqrt{3}$$

$$\sqrt{(16.32)^2 + \left(7.8\sqrt{3}\right)^2} = \sqrt{266.3424 + 182.52} = \sqrt{448.8624} = 21.19$$

$$\left(0.422 + j2\sqrt{3}\right) = \sqrt{(0.422)^2 + \left(2\sqrt{3}\right)^2} = 3.490$$

Sehingga,

$$K_C = \frac{(5.758)(21.19)}{11(3.490)} = \frac{122}{38.39} = 3.18$$

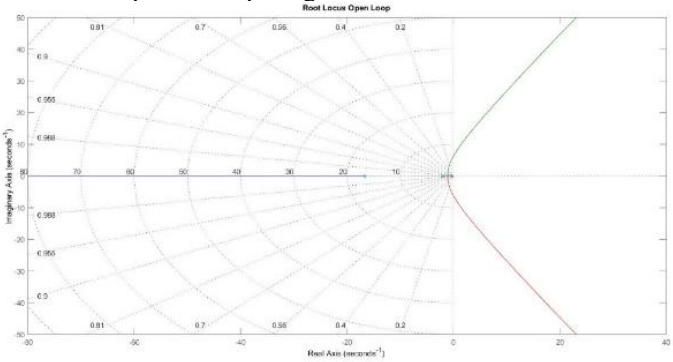
Dengan menggunakan nilai gain, pole, dan zero yang telah diperoleh, maka bentuk akhir kompensator *Lead* yang digunakan adalah:

$$G_C(s) = 3.18 \frac{(s + 2.422)}{(s + 6.6)} = \frac{122}{38.39}$$

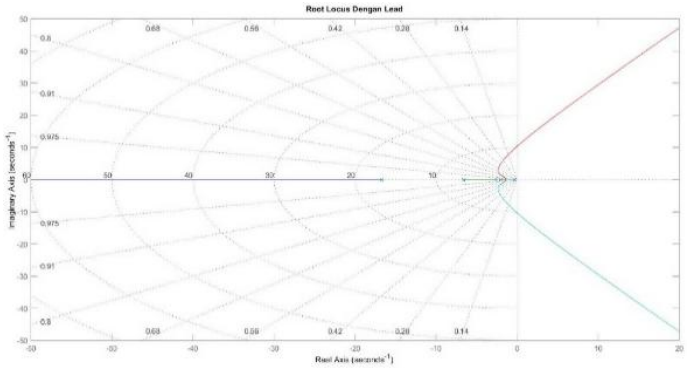
Open Loop Compensator:

$$G_C(s) \times G_{(s)} = 3.18 \frac{(s + 2.422)}{(s + 6.6)} = \frac{11}{0.105s^3 + 1.99s^2 + 4.06s + 1}$$

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



Gambar 15. Pole dan Zero Open Loop

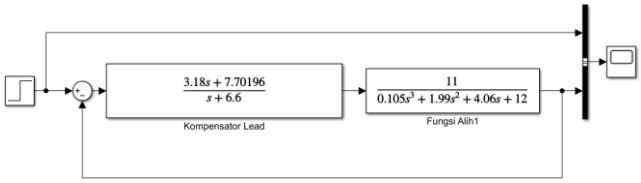


Gambar 16. Pole dan Zero Open Loop dengan Kompensator Lead

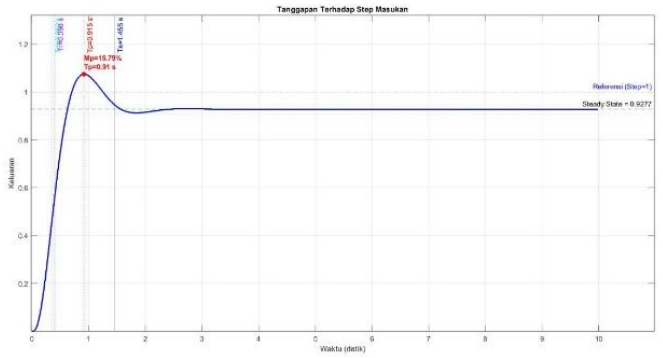
Setelah dilakukan perancangan kompensator Lead menggunakan metode Root Locus, terjadi perubahan pada posisi pole dan zero sistem yang ditunjukkan melalui peta pole-zero dan lintasan akar baru. Pada kondisi awal, lintasan Root Locus masih didominasi oleh pole sistem sehingga pole tertutup cenderung berada dekat sumbu imajiner, yang mengindikasikan redaman relatif kecil dan potensi overshoot yang cukup besar. Setelah penambahan kompensator Lead dengan fungsi transfer $Gc(s) = 3{,}18s + 6{,}6s + 2{,}422$, muncul zero baru pada $s = -2{,}422$ dan pole baru pada $s = -6{,}6$. Penambahan zero menyebabkan lintasan Root Locus bergeser ke arah kiri bidang-s, sehingga meningkatkan daerah kestabilan sistem dan memungkinkan penempatan pole dominan pada lokasi yang memiliki redaman lebih baik. Selain itu, zero kompensator memberikan tambahan fasa (phase lead) yang membantu memenuhi syarat sudut Root Locus. Pergeseran lintasan akar ke kiri menunjukkan bahwa sistem setelah kompensasi memiliki respon yang lebih cepat, lebih stabil, dan mampu mencapai keadaan tunak dengan performa yang lebih baik dibandingkan sebelum kompensasi

D. Evaluasi Kinerja Sistem Setelah Kompensator

Untuk mengevaluasi efektivitas kompensator yang dirancang, dilakukan pengujian respon step pada sistem sebelum dan sesudah penambahan kompensator Lead. Simulasi dilakukan menggunakan software MATLAB Simulink dengan membuat diagram blok dengan menambahkan nilai $3.18\frac{(s+2.422)}{(s+6.6)}$yang dirangkai seri dengan fungsi alih seperti pada gambar.



(a)



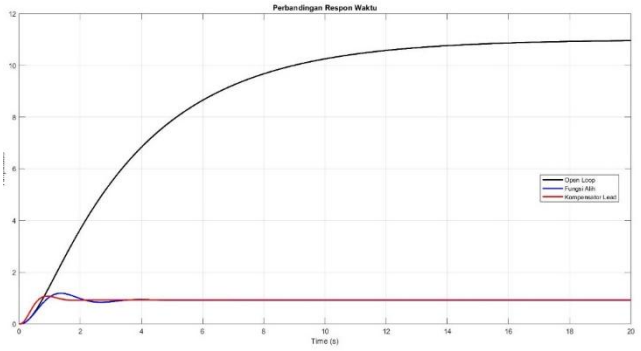
(b)

Gambar 17. (a) Diagram Blok Penambahan Kompensator Lead, (b) Hasil Respon Waktu Penambahan Kompensator Lead

Berdasarkan hasil simulasi respon langkah satuan setelah penambahan kompensator Lead, diperoleh karakteristik respon transien yang menunjukkan peningkatan performa sistem. Nilai Delay Time sebesar 0,3520 detik, Rise Time sebesar 0,3978 detik, dan Peak Time sebesar 0,9146 detik menunjukkan bahwa sistem mampu merespons masukan dengan lebih cepat. Sistem mencapai nilai puncak sebesar 1,0742 dengan Overshoot sebesar 15,7862%, lebih rendah dibandingkan sistem sebelum kompensasi yang mencapai 29,1627%, sehingga menunjukkan peningkatan redaman dan kestabilan sistem. Selain itu, Settling Time menurun menjadi 1,4554 detik dari 4,2506 detik atau mengalami percepatan sekitar 65,8%, menandakan bahwa sistem lebih cepat mencapai kondisi tunak. Nilai steady-state sebesar 0,9277 menghasilkan steady-state error sebesar 7,23%, yang menunjukkan keluaran sistem telah mendekati nilai referensi. Secara keseluruhan, kompensator Lead yang dirancang berhasil mempercepat respon sistem, mengurangi Overshoot, dan meningkatkan kestabilan dibandingkan kondisi sebelum kompensasi.

E. Perbandingan Uji respon sebelum dan sesudah Kontrol

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



Gambar 18. Perbandingan Sebelum dan Sesudah Penambahan Kendali

TABEL I
PERBANDINGAN SEBELUM DAN SESUDAH PENAMBAHAN KENDALI

Parameter	*Open Loop*	Fungsi Alih (*Closed loop*)	Kompensator *Lead*
Rise Time (s)	7,8271	0,5545	0,3979
Peak Time (s)	25,282	1,3776	0,9146
Settling Time (s)	14,292	4,2506	1,4558
Overshoot (%)	0	29,163	15,775
Peak Value	10,99	1,184	1,074
Steady-State Value	11	0,9167	0,9277
Steady-State Error	10	0,0833	0,0723

Berdasarkan hasil simulasi, sistem Open Loop memiliki respon paling lambat dengan Rise Time sebesar 7,8271 detik dan Settling Time sebesar 14,2920 detik, serta menghasilkan error keadaan tunak yang besar sehingga belum mampu mengikuti sinyal referensi dengan baik. Setelah diterapkan umpan balik (Closed Loop), performa sistem meningkat dengan Rise Time menurun menjadi 0,5545 detik, Settling Time menjadi 4,2506 detik, dan error keadaan tunak berkurang menjadi 0,0833. Namun, sistem masih memiliki Overshoot yang cukup tinggi yaitu 29,163%. Penambahan kompensator Lead yang dirancang menggunakan metode Root Locus berhasil meningkatkan performa sistem secara signifikan dengan menurunkan Rise Time menjadi 0,3979 detik, Peak Time menjadi 0,9146 detik, Settling Time menjadi 1,4558 detik, serta mengurangi Overshoot menjadi 15,775%. Selain itu, error keadaan tunak juga menurun menjadi 0,0723. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kompensator Lead mampu mempercepat respon, meningkatkan redaman, dan memperbaiki kestabilan sistem dibandingkan kondisi sebelum kompensasi.

V. KESIMPULAN

1) Desain kompensator berbasis analisis Tempat Kedudukan Akar (Root Locus) berhasil dilakukan menggunakan aplikasi MATLAB. Perancangan diawali dengan pembentukan model matematis sistem eksitasi

generator yang terdiri dari amplifier, exciter, dan generator sinkron. Berdasarkan analisis Root Locus diperoleh kompensator Lead yang mampu menggeser letak pole dominan ke daerah yang lebih stabil.

2) Pengendalian tegangan generator menggunakan kompensator berbasis Tempat Kedudukan Akar (Root Locus) dapat dilakukan melalui penambahan kompensator Lead pada sistem eksitasi generator. Penambahan kompensator tersebut menghasilkan perubahan posisi pole dan zero yang menyebabkan lintasan akar bergeser ke sebelah kiri bidang-s, sehingga sistem memiliki redaman yang lebih baik, respon yang lebih cepat, dan tingkat kestabilan yang lebih tinggi dibandingkan sistem sebelum kompensasi.
3) Penerapan kompensator Lead memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respon waktu sistem. Setelah penambahan kompensator, nilai Rise Time menurun dari 0,5545 detik menjadi 0,3979 detik, Settling Time menurun dari 4,2506 detik menjadi 1,4558 detik, Overshoot berkurang dari 29,163% menjadi 15,775%, serta error keadaan tunak menurun dari 0,0833 menjadi 0,0723. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kompensator Lead yang dirancang mampu meningkatkan performa sistem sehingga respon menjadi lebih cepat, lebih stabil, dan lebih baik dalam mengikuti nilai referensi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Siantar Tara Sejati *Site* Tarakan atas dukungan dan penyediaan data dalam penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada sumber-sumber referensi yang digunakan, sebagaimana tercantum dalam daftar acuan.

REFERENSI

[1] M. A. Yanuar, L. Yanuar, F. A. Said, and R. D. Pramudya, "Aplikasi Metode Root-Locus dengan Aproksimasi Padé untuk Analisis Pengaruh Time Delay pada Kestabilan Sistem Kendali," 2025.

[2] M. I. Kasau, "Memperbaiki Spesifikasi Sistem Kontrol dengan Teknik Kompensasi."

[3] E. N. W., "Perencanaan Optimal Sistem Kontrol AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk Memperbaiki Kestabilan Tegangan dengan Menggunakan Algoritma Genetik," Makalah Tugas Akhir, pp. 1–11, 2011.

[4] H. Saadat, Power System Analysis. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1999.

[5] K. Ogata and J. W. Brewer, Modern Control Engineering, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 2010.

[6] W. R. Evans, *Control-System Dynamics*. New York, NY, USA: McGraw-Hill Book Company, 1954.

[7] I. B. Simanjorang, D. D. Sinaga, and S. Lourenza, "Desain Kompensator Motor Servo DC 734 pada Laboratorium Dasar Sistem Kendali," vol. 3, no. 2, pp. 22–33, 2020.

[8] A. Agung, "Perancangan Model Kompensator dan Plant pada Sistem Kendali Konvensional Menggunakan Komputer Analog," Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia, 2012.

[9] IEEE Standards Association, IEEE Guide for Synchronous Generators, IEEE Std., 2019.

[10] IEEE Standards Association, IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above, IEEE Std., 2014.

[11] IEEE Standards Association, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std. 421.5-2016, 2016.

[12] Z. Aini, "Analisis Kestabilan Tegangan dengan Menggunakan Static Synchronous Compensator (STATCOM)," vol. 9, no. 2, pp. 9–14, 2012.

[13] E. P. Fadillah, Endryansyah, P. W. Rusimamto, and M. S. Zuhrie, "Desain Sistem Pengaturan Keseimbangan Posisi Bola pada Sistem Ball and Beam Menggunakan Metode Kendali Root Locus Berbasis MATLAB," pp. 136–145, 2019.

[14] N. S. Nise, Control Systems Engineering, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2019.

[15] A. Nurdin, A. Azis, and R. A. Rozal, "Peranan Automatic Voltage Regulator sebagai Pengendali Tegangan Generator," vol. 3, no. 1, pp. 163–173, 2018.

[16] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.

[17] 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.