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

Stepanus Lilit*[*1], Ismit Mado[2], Achmad Budiman[3], Sugeng Riyanto[4]

Teknik Elektro[1], Fakultas Teknik Universitas Borneo Tarakan[2], Indonesia[3]

Corresponding Author: stepanuslilit74@gmail.com

Abstract — Electric power generation systems require an effective voltage control system to maintain generator voltage stability and provide an appropriate response to input changes. An improperly controlled system may exhibit a relatively slow response and significant deviation from the desired reference. This study aims to analyze the voltage response characteristics of a generator and design a Lead compensator based on Root Locus analysis to improve the performance of the voltage control system. The research method consists of modeling the system using transfer functions, analyzing system stability using the Root Locus method, evaluating the open-loop and closed-loop responses, and designing a Lead compensator. The simulation results show that the open-loop system has a Rise Time of 2.361 seconds and a Settling Time of 4.3201 seconds with a Maximum Overshoot of 0%. After applying the closed-loop configuration, the Rise Time decreases to 0.22466 seconds and the Settling Time decreases to 2.9534 seconds, but the system produces a Maximum Overshoot of 46.979%. After applying the Lead compensator, the Rise Time decreases to 0.19496 seconds, the Peak Time is 0.46823 seconds, the Settling Time decreases to 1.0935 seconds, and the Maximum Overshoot decreases to 23.815%. These results indicate that the Lead compensator can improve response speed and system stability.

Keywords — generator, lead compensator, root locus, stability, voltage control

Abstrak — Sistem pembangkit tenaga listrik memerlukan sistem pengendalian tegangan yang baik agar tegangan generator dapat dipertahankan pada kondisi yang stabil dan mampu mengikuti perubahan masukan. Pada sistem tanpa pengendalian yang optimal, respons tegangan dapat memiliki waktu tanggap yang relatif lambat dan menghasilkan penyimpangan yang cukup besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik respons tegangan generator serta merancang kompensator Lead berbasis analisa Root Locus untuk meningkatkan kinerja sistem pengendalian tegangan. Metode penelitian dilakukan melalui pemodelan sistem dalam bentuk fungsi alih, analisis kestabilan menggunakan Root Locus, pengujian respons sistem open-loop dan closed-loop, serta perancangan kompensator Lead. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem open-loop memiliki Rise Time sebesar 2,361 detik dan Settling Time sebesar 4,3201 detik dengan Maximum Overshoot sebesar 0%. Setelah diterapkan sistem closed-loop, Rise Time menurun menjadi 0,22466 detik dan Settling Time menjadi 2,9534 detik, namun menghasilkan Maximum Overshoot sebesar 46,979%. Setelah penambahan kompensator Lead, Rise Time menjadi 0,19496 detik, Peak Time sebesar 0,46823 detik, Settling Time sebesar 1,0935 detik, dan Maximum Overshoot turun menjadi
23,815%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kompensator Lead mampu mempercepat respons dan meningkatkan kestabilan sistem pengendalian tegangan generator.

Kata kunci — Generator, kompensator lead, root locus, stabilitas, tegangan.

I. Pendahuluan

Tegangan listrik merupakan salah satu parameter penting dalam sistem tenaga listrik karena berhubungan langsung dengan kualitas dan keandalan penyaluran energi listrik. Perubahan tegangan yang terjadi pada sistem pembangkit dapat memengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengendalian yang mampu menjaga tegangan keluaran agar tetap berada pada kondisi yang diharapkan.

PT Indo Pusaka Berau merupakan perusahaan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berlokasi di Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. PLTU Lati memiliki kapasitas pembangkitan sebesar 3 × 7 MW dan menyalurkan energi listrik kepada pelanggan melalui jaringan tegangan menengah (JTM) 20 kV dengan panjang jaringan sekitar 132 km. Karakteristik tegangan keluaran generator pada sistem pembangkit perlu diperhatikan karena perubahan kondisi operasi dapat menyebabkan perubahan respons sistem [1].

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk menganalisis dan meningkatkan karakteristik

sistem pengendalian adalah metode Root Locus. Metode Root Locus merupakan metode grafis yang digunakan untuk mengetahui perubahan posisi pole sistem closed-loop terhadap perubahan nilai penguatan (gain). Metode ini dapat digunakan untuk menganalisis kestabilan sistem serta menentukan karakteristik respons yang diinginkan berdasarkan posisi pole pada bidang-s [2]. Dengan mengetahui posisi pole sistem, karakteristik seperti rasio redaman dan kecepatan respons dapat dianalisis untuk menentukan kondisi sistem yang lebih sesuai.

Dalam sistem pengendalian, kompensator digunakan untuk memperbaiki karakteristik respons sistem agar memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Kompensator dapat berupa Lead, Lag, maupun Lead-Lag. Penggunaan kompensator Lead terutama ditujukan untuk memperbaiki karakteristik transien dan meningkatkan kestabilan sistem melalui penambahan phase lead pada sistem [3]. Perancangan kompensator dengan metode Root Locus memungkinkan posisi pole closed-loop yang diinginkan digunakan sebagai dasar dalam menentukan parameter kompensator.

Berdasarkan hasil analisis pada sistem sebelum kompensasi, respons closed-loop menunjukkan nilai Delay Time sebesar 0,2140 s, Rise Time sebesar 0,1946 s, Peak Time sebesar 0,5542 s, dan Settling Time sebesar 3,5678 s. Sistem juga menghasilkan Maximum Overshoot sebesar 55,97% dengan nilai steady-state sebesar 0,9286 dan steady-state error sebesar 0,0714. Nilai overshoot yang relatif tinggi menunjukkan bahwa sistem masih memiliki karakteristik transien yang perlu diperbaiki, terutama dari sisi redaman dan kestabilan respons [4].

Permasalahan tersebut menjadi dasar dilakukannya perancangan kompensator Lead berbasis analisis Root Locus. Perancangan dilakukan dengan menentukan lokasi pole closed-loop yang diinginkan berdasarkan karakteristik sistem, kemudian menghitung kekurangan sudut (angle deficiency) yang harus dipenuhi oleh kompensator. Penambahan zero dan pole pada kompensator diharapkan dapat menggeser lintasan Root Locus menuju daerah yang menghasilkan respons sistem lebih cepat dan stabil [4].

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sisi elektrik sistem pembangkit dalam bentuk diagram blok serta merancang kompensator berbasis analisis Root Locus untuk meningkatkan karakteristik respons pengendalian tegangan. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB untuk membandingkan karakteristik sistem sebelum dan sesudah penerapan kompensator Lead. Parameter respons seperti Delay Time, Rise Time, Peak Time, Settling Time, Maximum Overshoot, dan Steady-State Error digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kinerja sistem.

II. Metode Penelitian

A. Model Matematis Generator, Exciter dan Amplifier

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

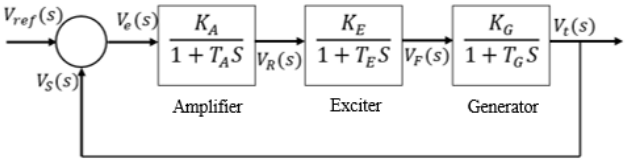
$$\frac{V_f(s)}{V_R(s)} = \frac{K_G}{1+T_G s} \quad (1)$$

Sistem *exciter* adalah sistem pasokan listrik arus searah sebagai penguat pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet, sehingga pada generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran bergantung pada besarnya arus eksitasinya. *Exciter* berfungsi menyediakan arus eksitasi untuk menghasilkan medan magnet pada rotor generator. Fungsi alih exciter dinyatakan sebagai [4]:

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

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

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1+T_A s} \quad (3)$$



Gambar 1. Diagram Blok Model Matematis

B. Kompensator

Kompensator merupakan perangkat yang dapat berupa rangkaian elektronik, algoritma digital, maupun fungsi transfer yang ditambahkan pada suatu sistem kontrol dengan tujuan memperbaiki keterbatasan kinerja sistem awal. Beberapa permasalahan yang dapat diperbaiki melalui penggunaan kompensator antara lain ketidakstabilan sistem, respons yang lambat, *overshoot* yang tinggi, serta kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) yang besar. Perancangan kompensator dilakukan

dengan mengatur posisi *pole* (kutub) dan *zero* (nol) pada fungsi transfer sistem sehingga diperoleh karakteristik sistem yang sesuai dengan kinerja yang diharapkan pada bidang kompleks atau bidang-s [4]. Secara umum, kompensator dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu kompensator *Lead*, kompensator *Lag*, dan kompensator *Lead-Lag* [8].

1) Kompensator Lead

Kompensator *Lead* digunakan untuk meningkatkan karakteristik respons transien suatu sistem, terutama melalui peningkatan *phase margin* dan percepatan respons sistem [4]. Kompensator ini memberikan tambahan fasa positif (*leading phase*) pada rentang frekuensi tertentu. Penambahan fasa tersebut dapat meningkatkan kestabilan relatif sistem sekaligus menghasilkan respons yang lebih cepat.

2) Kompensator Lag

Kompensator *Lag* digunakan untuk memperkecil kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) dengan tetap mempertahankan kestabilan sistem. Prinsip kerjanya adalah meningkatkan penguatan (*gain*) pada frekuensi rendah, sehingga kemampuan sistem dalam mengikuti nilai referensi dan mencapai kondisi tunak dengan tingkat ketelitian yang lebih baik dapat ditingkatkan [4].

3) Lead-Lag

Kompensator *Lead-Lag* merupakan kombinasi antara kompensator *Lead* dan *Lag* yang dirancang untuk memperoleh manfaat dari kedua jenis kompensator tersebut secara bersamaan. Kompensator ini memungkinkan peningkatan karakteristik respons transien melalui bagian *Lead*, sekaligus memperbaiki akurasi keadaan tunak melalui bagian *Lag*. Dengan demikian, penerapan kompensator *Lead-Lag* dapat menghasilkan sistem yang memiliki kestabilan dan respons yang lebih baik serta tingkat kesalahan keadaan tunak yang lebih kecil [4].

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.

Perangkat lunak 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.

E. Analisis dan Evaluasi Respons

Setelah kompensator Lead dirancang, model sistem disimulasikan menggunakan MATLAB. Hasil simulasi sebelum dan sesudah penambahan kompensator dibandingkan berdasarkan parameter

respons waktu. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh kompensator terhadap kecepatan respons, kestabilan, overshoot, dan kesalahan keadaan tunak sistem.

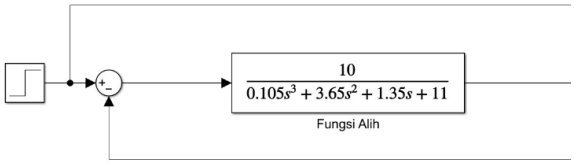
Secara umum, alur penelitian dilakukan melalui tahapan: (1) studi literatur, (2) pengumpulan data sistem pembangkit, (3) pemodelan matematis sistem, (4) analisis Root Locus, (5) penentuan pole closed-loop yang diinginkan, (6) perancangan kompensator Lead, (7) simulasi respons sistem, dan (8) perbandingan kinerja sistem sebelum dan sesudah kompensasi.

III. Hasil dan Pembahasan

A. Pemodelan Sistem Pengendalian Tegangan

Model sistem pengendalian tegangan dibangun berdasarkan tiga komponen utama pada sistem eksitasi, yaitu amplifier, exciter, dan generator sinkron. Masing-masing komponen direpresentasikan dalam bentuk fungsi alih orde satu sehingga karakteristik dinamis sistem dapat dianalisis menggunakan MATLAB.

Konfigurasi sistem mengacu pada model sistem eksitasi generator yang terdiri atas amplifier, exciter, generator, dan umpan balik. Sensor tidak dimasukkan secara eksplisit dalam model karena konstanta waktunya relatif kecil, yaitu sekitar 0,01–0,06 detik, sehingga pengaruhnya terhadap respons dinamis keseluruhan dianggap kecil dibandingkan komponen utama sistem.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Pengendalian Tegangan Generator

Pemodelan tersebut menggambarkan hubungan antara sinyal kesalahan, amplifier, exciter, dan generator. Tegangan referensi dibandingkan dengan tegangan terminal generator untuk menghasilkan sinyal kesalahan. Sinyal tersebut kemudian diproses melalui amplifier dan exciter untuk mengatur arus medan generator sehingga tegangan terminal dapat mengikuti nilai referensi.

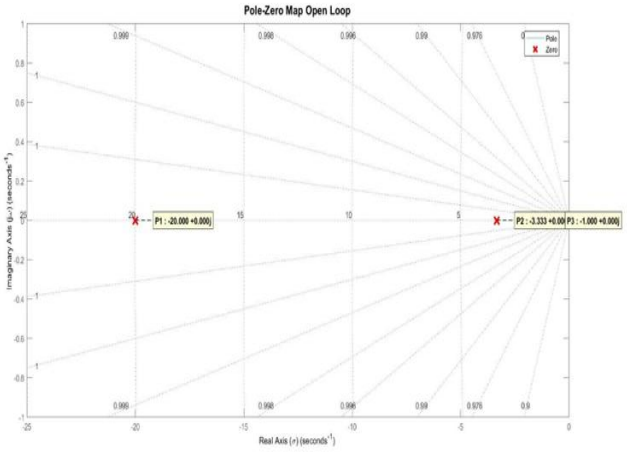
Nilai parameter rentan yang digunakan dalam pemodelan diperoleh dari data [5] anarchy. Beberapa parameter utama yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Rentang Parameter

	Transfer Function	*Parameter Limits*
Amplifier	$TF_{amplifier} = \frac{K_a}{1+T_aS}$	$10 \le K_a \le 40$; $0{,}02 \le T_a \le 0{,}1$
Exciter	$TF_{exciter} = \frac{K_e}{1+T_eS}$	$1 \le K_e \le 10$; $0{,}4 \le T_e \le 1$
Generator	$TF_{generator} = \frac{K_g}{1+T_gS}$	$0{,}7 \le K_g \le 1$; $1 \le T_g \le 2$

B. Analisis Root Locus dan Respons Awal Sistem

Setelah model matematis sistem diperoleh, analisis dilakukan dengan menentukan fungsi alih open-loop dan closed-loop. Analisis Root Locus digunakan untuk mengetahui posisi pole sistem dan perubahan karakteristik kestabilannya terhadap perubahan nilai penguatan. Hasil analisis pole dan zero digunakan sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan kompensasi.



Gambar 3. Root Locus Open Loop

Dari bentuk fungsi alih atau fungsi transfer *Closed loop* yang telah didapatkan

$$G_{(s)} = \frac{10}{0.015s^3 + 0.365s^2 + 1.35s + 11}$$

Selanjutnya mencari nilai akar polinomial dari $0.015s^3 + 0.365s^2 + 1.35s + 11$

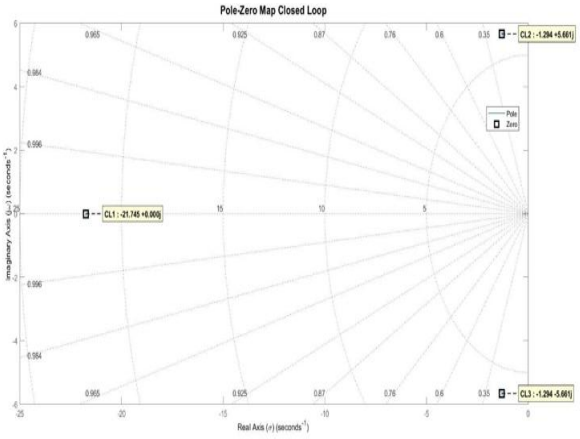
Akar polinomial dari $0.015s^3 + 0.365s^2 + 1.35s + 11$

$s_1 = -21{,}7454$

$s_2 = -1{,}2940 + j5{,}6612$

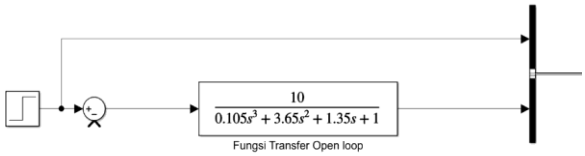
$s_3 = -1{,}2940 - j5{,}6612$

Dari akar polinomial dapat ditentukan letak pole pada tempat kedudukan akar seperti pada gambar dibawah ini

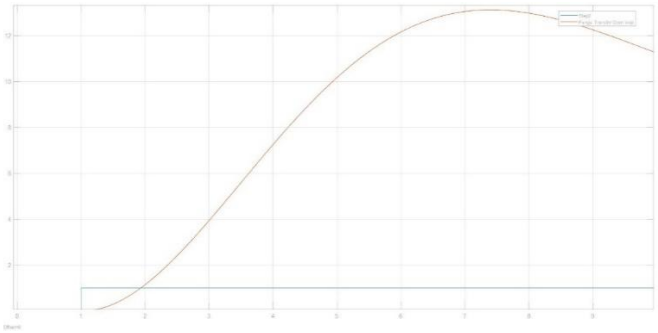


Gambar 4. Root Locus Closed Loop

Pada kondisi awal, lintasan Root Locus masih dipengaruhi oleh pole sistem sehingga pole dominan cenderung berada dekat dengan sumbu imajiner. Kondisi tersebut menunjukkan rasio redaman yang relatif rendah dan berpotensi menghasilkan overshoot yang besar. Setelah kompensator Lead ditambahkan, lintasan akar mengalami pergeseran ke arah kiri bidang-s. Pergeseran tersebut menunjukkan peningkatan rasio redaman dan perubahan karakteristik respons sistem.



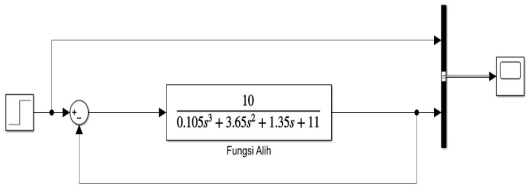
(a)



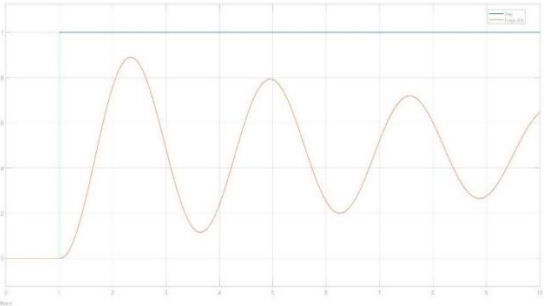
(b)

Gambar 5. (a) Blok Diagram Open Loop (b) Respon Waktu Open Loop

Sebelum perancangan kompensator, sistem diuji menggunakan masukan sinyal step pada konfigurasi open-loop dan closed-loop. Pada open-loop, diperoleh Delay Time 1,0730 s, Rise Time 2,3610 s, Peak Time 7,1564 s, dan Settling Time 4,3201 s. Sistem tidak mengalami overshoot dengan nilai Maximum Overshoot 0%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem relatif stabil, tetapi memiliki respons yang lambat.



(a)



(b)

Gambar 6. (a) Blok Diagram Closed Loop (b) Respon Waktu Closed Loop

Pada konfigurasi closed-loop, respons menjadi lebih cepat, tetapi masih menghasilkan Maximum Overshoot sebesar 55,97%. Nilai Delay Time, Rise Time, Peak Time, dan Settling Time masing-masing sebesar 0,2140 s, 0,1946 s, 0,5542 s, dan 3,5678 s. Kondisi ini menunjukkan bahwa konfigurasi closed-loop mampu mempercepat respons, tetapi redaman sistem masih rendah sehingga diperlukan

kompensator untuk memperbaiki karakteristik transien.

C. Perancangan Kompensator Lead

Perancangan kompensator dilakukan menggunakan metode Root Locus dengan tujuan memperbaiki karakteristik respons transien sistem. Tahap awal dilakukan dengan menentukan lokasi pole closed-loop yang diinginkan berdasarkan spesifikasi rasio redaman dan frekuensi natural. Selanjutnya dihitung sudut yang dibentuk oleh pole sistem terhadap titik desain. Apabila titik desain belum memenuhi syarat sudut Root Locus, selisih sudut tersebut digunakan sebagai angle deficiency yang harus dipenuhi oleh kompensator Lead.

$$K_C = \frac{(6{,}306)(10{,}40)}{10(3{,}469)} = \frac{65{,}5842}{34{,}69} = 1.89$$

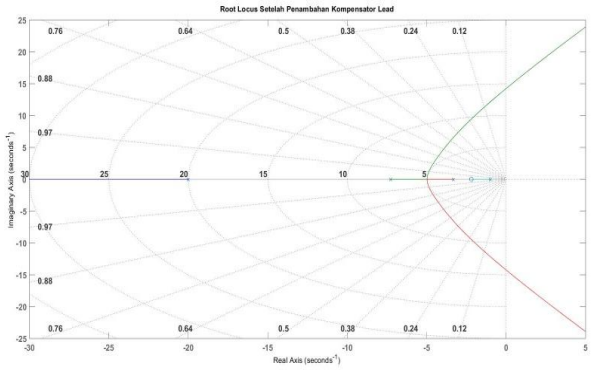
Dengan menggunakan nilai gain, pole, dan zero yang telah diperoleh, maka bentuk akhir kompensator *Lead* yang digunakan adalah:

$$G_C(s) = 1.89\frac{(s+2.19)}{(s+7.27)} = \frac{65{,}5842}{34{,}69}$$

Open Loop Compensator:

$$G_C(s) \times G_{(s)} = 1.89\frac{(s+2.19)}{(s+7.27)}$$
$$= \frac{10}{0.015s^3 + 0.365s^2 + 1.35s + 1}$$

Hasil perancangan menghasilkan pole baru pada sekitar -7,27 dan zero baru pada sekitar -2,19. Pole dan zero tersebut kemudian digunakan untuk membentuk kompensator Lead dan dievaluasi menggunakan magnitude condition.



Gambar 7. Hasil Root Locus setelah Penambahan Kompensator Lead

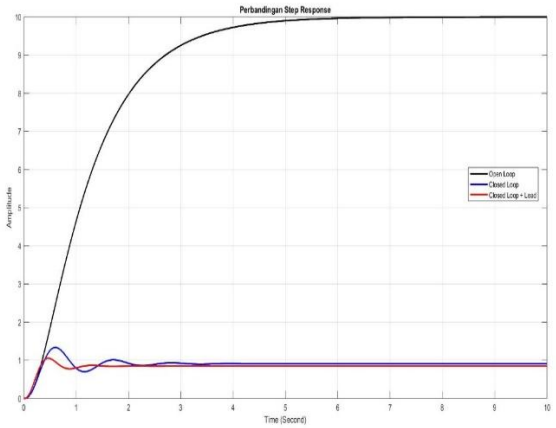
Penambahan zero pada kompensator menyebabkan lintasan Root Locus bergeser ke arah kiri bidang-s, sedangkan pole kompensator ditempatkan lebih jauh di sebelah kiri sehingga pengaruhnya terhadap pole dominan relatif kecil. Pergeseran tersebut menghasilkan pole dominan pada daerah dengan rasio redaman yang lebih tinggi sehingga sistem dapat mencapai keadaan tunak dengan lebih cepat dan stabil.

D. Perbandingan Respons Sebelum dan Sesudah Kompensasi

Pengujian akhir dilakukan dengan membandingkan respons sistem open-loop, closed-loop, dan sistem setelah penambahan kompensator Lead. Parameter yang dibandingkan meliputi Delay Time, Rise Time, Peak Time, Settling Time, Overshoot, Peak Value, Steady-State Value, dan Steady-State Error.

Tabel 2. Perbandingan karakteristik Respons

Parameter	*Open Loop*	Fungsi Alih (*Closed loop*)	Kompensator *Lead*
Delay Time (s)	1,073	0,241	0,195
Rise Time (s)	2,361	0,22466	0,19496
Peak Time (s)	7,1564	0,60501	0,46823
Settling Time (s)	4,3201	2,9534	1,0935
Overshoot (%)	0	46,979	23,815
Peak Value	9,9883	1,3362	1,0532
Steady-State Value	10	0,90909	0,8506
Steady-State Error	9	0,090909	0,1494



Gambar 8. Perbandingan Respons Sistem sebelum dan sesudah Penambahan Kompensator

Berdasarkan Tabel 2, penerapan kompensator Lead memberikan perbaikan yang paling jelas pada karakteristik transien. Rise Time menurun dari 0,22466 s pada sistem closed-loop menjadi 0,19496 s setelah kompensasi. Peak Time juga berkurang dari 0,60501 s menjadi 0,46823 s. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan masukan dan mencapai nilai puncak dalam waktu yang lebih singkat.

Perbaikan terbesar terlihat pada Settling Time dan Maximum Overshoot. Settling Time turun dari 2,9534 s menjadi 1,0935 s, sedangkan Maximum Overshoot turun dari 46,979% menjadi 23,815%. Penurunan kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa kompensator Lead mampu meningkatkan redaman sistem sehingga simpangan respons terhadap nilai referensi menjadi lebih kecil dan sistem lebih cepat mencapai keadaan tunak. Peak Value juga menurun dari 1,3362 menjadi 1,0532.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode Root Locus dapat digunakan untuk menentukan konfigurasi kompensator yang sesuai dengan karakteristik sistem. Penambahan kompensator Lead terutama memberikan peningkatan pada respons transien melalui pergeseran pole dominan ke daerah yang lebih sesuai pada bidang-s. Dengan demikian, sistem pengendalian tegangan generator memiliki respons yang lebih cepat dan tingkat overshoot yang lebih rendah dibandingkan sistem closed-loop tanpa kompensator.

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan, analisis Root Locus, dan simulasi menggunakan MATLAB, dapat disimpulkan bahwa sistem pengendalian tegangan generator dapat direpresentasikan melalui model sistem eksitasi yang terdiri atas amplifier, exciter, dan generator sinkron. Pemodelan tersebut digunakan sebagai dasar untuk menganalisis karakteristik dinamis sistem serta merancang pengendali tegangan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem closed-loop sebelum kompensasi masih memiliki karakteristik transien yang kurang optimal, terutama ditunjukkan oleh nilai overshoot yang relatif tinggi. Oleh karena itu, dilakukan perancangan kompensator Lead menggunakan metode Root Locus dengan mengatur posisi pole dominan menuju daerah yang memiliki karakteristik redaman lebih baik.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan kompensator Lead mampu meningkatkan performa transien sistem. Berdasarkan hasil perbandingan, Rise Time menurun dari 0,22466 s menjadi 0,19496 s, Peak Time dari 0,60501 s menjadi 0,46823 s, Settling Time dari 2,9534 s menjadi 1,0935 s, serta Maximum Overshoot dari 46,979% menjadi 23,815%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kompensator Lead mampu menghasilkan respons sistem yang lebih cepat, mengurangi simpangan maksimum, dan mempercepat sistem mencapai keadaan tunak.

Dengan demikian, metode Root Locus dapat digunakan sebagai pendekatan dalam perancangan kompensator Lead pada sistem pengendalian tegangan generator. Penerapan kompensator memberikan peningkatan terhadap karakteristik respons transien sistem dibandingkan kondisi closed-loop tanpa kompensator.

DAFTAR ACUAN

[1] A. Agung, “Perancangan model kompensator dan plant pada sistem kendali konvensional menggunakan komputer analog,” Universitas Brawijaya, 2012.

[2] Z. Aini, “Analisis kestabilan tegangan dengan menggunakan Static Synchronous Compensator (STATCOM),” vol. 9, no. 2, pp. 9–14, 2012.

[3] E. P. Fadillah, Endryansyah, P. Wanarti 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.

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

[5] IEEE Standards Association, “IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,” 2016.

[6] IEEE Standards Association, “IEEE Guide for Synchronous Generator,” 2019.

[7] M. I. Kasau, “Memperbaiki spesifikasi sistem kontrol dengan teknik kompensasi,” n.d.

[8] A. Muhammad, 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.
[9] N. S. Norman, *Control System Engineering*, 8th ed. Wiley, 2019.
[10] A. Nurdin, A. Azis, and R. A. Rozal, "Peranan Automatic Voltage Regulator sebagai pengendali tegangan generator," vol. 3, no. 1, pp. 163–173, 2018.
[11] E. Nw, "Perencanaan optimal sistem kontrol AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk memperbaiki kestabilan tegangan dengan menggunakan algoritma genetik," pp. 1–11, 2011.
[12] K. Ogata and J. W. Brewer, *Modern Control Engineering*. 1971. doi: 10.1115/1.3426465.
[13] P. S. Kundur and O. P. Malik, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc., 1994.
[14] 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.
[15] H. Saadat, *Power System Analysis*. Kevin Kane, 1999.
[16] 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.