STABILITAS TEGANGAN GENERATOR MELALUI DESAIN KONTROL OPTIMAL *LINIEAR QUADRATIC REGULATOR* PADA PLTMG PT. SIANTAR TARA SEJATI

[1]Rizkyandi Juliannanda[)], Ismit Mado[2)], Patria Julianto[3)], Achmad Budiman [4)], Febrian Rizky Ghifari[5)], dan Herlin[6)]

[1,]Teknik Elektro Universiats Borneo Tarakan
Tarakan, Kalimantan Utara
[2]PT. Siantar Tara Sejati
Tarakan, Kalimantan Utara
e-mail: rizkyandijuliannanda@email.com[1)], ismitmado@borneo.ac.id[2)], patria@borneo.ac.id[3)]
achmad1177@email.com[4)], febryanrizky399[5)], herlinkoecongsadlin@email.com[6)]

Abstrac - Voltage stability is a critical factor in maintaining the reliability of a power generation system. Load changes on a synchronous generator can cause voltage disturbances that affect power quality and overall system performance. This study aims to design an optimal control based on a Linear Quadratic Regulator (LQR) to enhance the voltage stability of the generator at the PLTMG of PT. Siantar Tara Sejati. The study was conducted through mathematical modeling of the electrical system consisting of an amplifier, exciter, and synchronous generator in state space form. The LQR controller design was performed by determining the weighting matrices Q and R using a trial and error method, followed by MATLAB simulations with the addition of a reference scaling factor, Nbar. The simulation results indicate that the closed loop system prior to LQR implementation 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 0.08333. After applying LQR P6 with weighting matrices Q = [0.02 0.01 500] and R = 1, system performance improved significantly, yielding a Rise Time of 0.2498 seconds, Peak Time of 0.5335 seconds, Settling Time of 0.6999 seconds, Overshoot of 4.2457%, and Steady State Error of 0. These results demonstrate that the Linear Quadratic Regulator method successfully accelerates response time, reduces overshoot, and enhances generator voltage stability. Thus, LQR is effectively applied as an optimal control for the electrical system at PLTMG PT. Siantar Tara Sejati.

Keywords: Linear Quadratic Regulator, optimal control, synchronous generator, voltage stability, MATLAB.

Abstrak - Stabilitas tegangan merupakan faktor penting dalam menjaga keandalan sistem pembangkit tenaga listrik. Perubahan beban pada generator sinkron dapat menyebabkan gangguan tegangan yang memengaruhi kualitas daya dan kinerja sistem pembangkit. Penelitian ini bertujuan merancang kontrol optimal berbasis *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk meningkatkan stabilitas tegangan generator pada PLTMG PT. Siantar Tara Sejati. Penelitian dilakukan melalui pemodelan matematis sistem elektrik yang terdiri dari *amplifier*, *exciter*, dan generator sinkron dalam bentuk *state space*. Perancangan pengendali LQR dilakukan dengan menentukan matriks pembobot Q dan R menggunakan metode *trial and error*, kemudian disimulasikan menggunakan MATLAB dengan penambahan faktor penguatan referensi Nbar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem *closed loop* sebelum penerapan LQR memiliki *Rise Time* 0,5545 detik, *Peak Time* 1,3776 detik, *Settling Time* 4,2506 detik, *Overshoot* 29,163%, dan *Steady-State Error* 0,08333. Setelah penerapan LQR P6 dengan matriks pembobot Q = [0,02 0,01 500] dan R = 1 , performa sistem meningkat dengan *Rise Time* 0,2498 detik, *Peak Time* 0,5335 detik, *Settling Time* 0,6999 detik, *Overshoot* 4,2457%, dan *Steady State Error* 0. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *Linear Quadratic Regulator* mampu mempercepat respons, mengurangi *overshoot*, serta meningkatkan kestabilan tegangan generator. Dengan demikian, LQR efektif diterapkan sebagai kontrol optimal pada sistem elektrik PLTMG PT. Siantar Tara Sejati.

Kata Kunci: Linear Quadratic Regulator, kontrol optimal, generator sinkron, stabilitas tegangan, MATLAB.

I. PENDAHULUAN

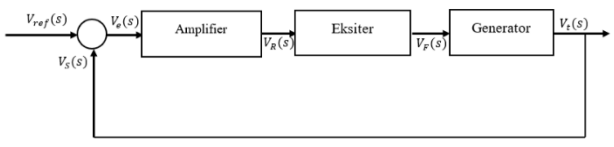
Energi listrik merupakan kebutuhan penting dalam kehidupan modern yang mendukung berbagai sektor seperti industri, transportasi, dan rumah tangga. Keandalan sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh kemampuan pembangkit dalam menjaga kestabilan operasi [12]. Salah satu komponen utama dalam sistem pembangkit adalah generator sinkron yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik [1]. Generator sinkron memiliki peranan penting dalam menjaga kestabilan tegangan terminal melalui pengaturan kondisi operasi generator [7]. Namun, perubahan beban secara tiba-tiba dapat menyebabkan gangguan dinamika tegangan berupa overshoot, undershoot, dan osilasi yang dapat memengaruhi kualitas daya serta kestabilan sistem tenaga listrik [8]. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendalian yang mampu mempertahankan tegangan generator agar tetap berada pada kondisi operasi yang diinginkan. Sistem eksitasi merupakan salah satu bagian penting dalam pengaturan tegangan generator. Sistem ini mengendalikan tegangan medan generator sehingga tegangan terminal dapat mengikuti nilai referensi yang diberikan [6]. Pemodelan sistem eksitasi yang terdiri dari amplifier, exciter, dan generator banyak digunakan dalam analisis kestabilan sistem tenaga berdasarkan standar IEEE [6]–[8]. Perkembangan sistem kendali modern memungkinkan penggunaan metode kontrol optimal untuk meningkatkan performansi sistem dinamik. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam perancangan sistem kendali adalah Linear Quadratic Regulator (LQR) [15]. Metode LQR merupakan pengendali optimal berbasis state feedback yang menentukan nilai

penguatan kendali dengan meminimalkan fungsi biaya kuadratik yang mempertimbangkan kesalahan keadaan sistem dan energi kontrol [9]. Penyelesaian persamaan Riccati digunakan dalam metode LQR untuk memperoleh penguatan optimal sehingga sistem memiliki karakteristik respon yang lebih stabil dan performansi pengendalian yang lebih baik [13]. Penerapan metode LQR pada sistem tenaga listrik telah menunjukkan kemampuan dalam memperbaiki karakteristik respon transien, mengurangi overshoot, mempercepat settling time, serta meningkatkan kemampuan sistem dalam mengikuti perubahan referensi [5]. Representasi sistem dalam bentuk state space mendukung proses analisis kestabilan dan perancangan pengendali karena mampu menggambarkan hubungan antara variabel keadaan, masukan, dan keluaran sistem secara matematis [2]. Analisis sistem kendali berbasis state space dilakukan melalui karakteristik matriks sistem, nilai eigen, controllability, dan observability untuk mengetahui kestabilan serta kemampuan sistem dalam menerima pengendalian [3]. Selain pengembangan metode LQR standar, pendekatan optimasi juga dapat dilakukan dengan mempertimbangkan batasan tertentu pada sistem untuk memperoleh performansi pengendalian yang lebih baik [14]. Pendekatan tersebut memungkinkan perancangan pengendali yang lebih sesuai dengan karakteristik sistem nyata yang memiliki keterbatasan operasi. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan kontrol optimal Linear Quadratic Regulator (LQR) untuk meningkatkan stabilitas tegangan generator pada PLTMG PT. Siantar Tara Sejati. Sistem pembangkit dimodelkan dalam bentuk state space yang terdiri dari amplifier, exciter, dan generator sinkron. Selanjutnya dilakukan perancangan pengendali LQR melalui pemilihan matriks pembobot Q dan R menggunakan metode trial and error untuk memperoleh respon sistem yang optimal.

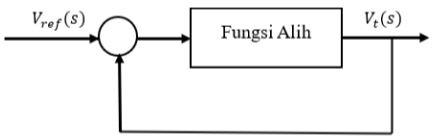
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimen simulasi yang bertujuan untuk merancang plan menggunakan metode *Linier Quadratic Regulator* (LQR) sebagai pengendali tegangan pada sistem pembangkit akibat fluktuasi beban konsumen. Data yang digunakan berbasis parameter standar IEEE [6]–[8]. Data tersebut digunakan untuk melakukan perancangan dan analisis sehingga dapat diketahui karakteristik tegangan terminal generator.

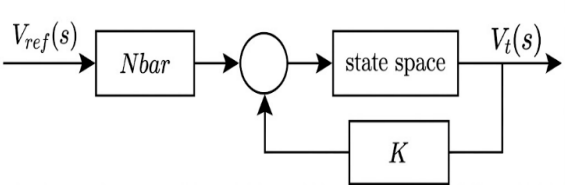
A. Perancangan kendali menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR)



Gambar 2.1 Diagram Blok pada sisi *Elektrik*



Gambar 2.2 Diagram Blok Fungsi Alih



Gambar 2.3 Diagram Blok *Gain* Dan *State Space*

Berdasarkan diagram sistem pembangkit, sisi elektrik terdiri dari *amplifier*, *exciter*, dan generator yang direpresentasikan dalam bentuk fungsi alih untuk menganalisis respon tanggapan waktu. Sistem pembangkit kemudian ditentukan matriks sistem untuk mengetahui stabilitas, sebelum dilakukan perancangan sistem pengendali menggunakan metode *Linier Quadratic Regulator* (LQR) sebagai pengatur tegangan. Simulasi gangguan diberikan sebelum *plan* untuk merepresentasikan pengaruh gangguan *eksternal* atau variasi sistem, seperti perubahan tegangan, beban, maupun gangguan *internal*, yang dapat menyebabkan fluktuasi dan ketidakstabilan tegangan keluaran generator.

III. HASIL PEMBAHASAN

A. Model Matematis

Amplifier berfungsi memperkuat sinyal kesalahan antara tegangan referensi dan tegangan keluaran generator. Fungsi alih amplifier dinyatakan:

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{10}{1+0.06s} \quad (1)$$

dengan K_A merupakan konstanta penguatan amplifier dan T_A merupakan konstanta waktu amplifier.

Exciter berfungsi menghasilkan tegangan eksitasi yang diberikan menuju medan rotor generator. Model matematis exciter dinyatakan:

$$\frac{V_e(s)}{V_t(s)} = \frac{1}{1+0.50s} \quad (2)$$

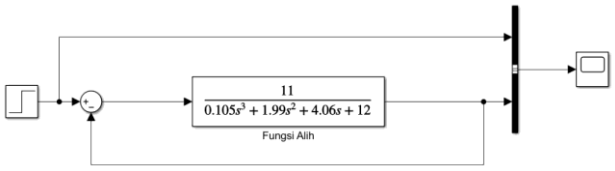
dengan K_E sebagai konstanta penguatan exciter dan T_E sebagai konstanta waktu exciter.

Generator sinkron dimodelkan berdasarkan hubungan antara tegangan eksitasi dan tegangan terminal generator:

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{1.10}{1+3.50s} \quad (3)$$

dengan K_G merupakan konstanta penguatan generator dan T_G merupakan konstanta waktu generator.

Setelah didapatkan model matematik dari amplifier, exciter, dan generator maka dilanjutkan dengan mengubah bentuk *Closed loop*.



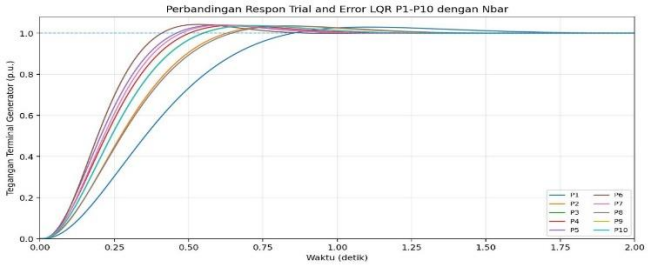
Gambar 3.1 Fungsi Alih

B. *Linear Quadratic Regulator* (LQR)

Metode pada penelitian ini adalah *Linear Quadratic Regulator* (LQR) sebagai pengendali optimal berbasis *state feedback*. Metode LQR dipilih karena mampu menentukan nilai penguatan kendali optimal dengan mempertimbangkan keseimbangan antara performansi sistem dan energi kontrol.

Tabel 3.1 Variasi Pembobot Matriks Q

P	Q1	Q2	Q3	R
P1	0,1	0,01	100	1
P2	0,1	0,01	300	1
P3	0,1	0,01	500	1
P4	0,1	0,01	700	1
P5	0,1	0,01	1000	1
P6	0,02	0,01	500	1
P7	0,05	0,01	500	1
P8	0,2	0,01	500	1
P9	0,1	0,002	500	1
P10	0,1	0,02	500	1



Gambar 3.2 LQR *trial and error* P1-P10

Dari P1-P5 terlihat bahwa peningkatan q_3 dari 100 menjadi 1000 mempercepat *rise time* dan *settling time*, tetapi diikuti kenaikan *overshoot* dan peningkatan K3. Hal ini menunjukkan bahwa bobot yang lebih besar pada state tegangan terminal menghasilkan tindakan kendali yang lebih agresif terhadap deviasi state tersebut. Pada variasi q_1, P6 menghasilkan respons paling cepat, tetapi memiliki *overshoot* dan *control energy* yang lebih besar. Sebaliknya, peningkatan q_1 pada P8 memperlambat respons namun menurunkan *control energy*. Sementara itu, perubahan q_2 pada P9 dan P10 hanya memberikan perubahan kecil terhadap respons dibandingkan P3, sehingga sensitivitas sistem terhadap q_2 pada rentang pengujian tersebut relatif kecil.

Berdasarkan hasil *trial and error*, P6 ditetapkan sebagai konfigurasi terpilih dengan Q = [0,02 0,01 500] dan R = 1. P6 memberikan *rise time*, *peak time*, dan *settling time* paling cepat di antara seluruh percobaan, dengan *overshoot* 4,2457% yang masih berada di bawah batas 5%. Setelah penambahan precompensator Nbar, keluaran mencapai *steady state* 1 p.u. dengan *steady state error* mendekati nol. Oleh karena itu, P6 dipilih dengan prioritas utama pada kecepatan respons, kestabilan, dan kemampuan *tracking* referensi.

C. Substitusi pembobot P6

Nilai matriks Kdiperoleh dengan meminimalkan fungsi biaya kuadratik:

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (4)$$

Matriks bobot keadaan (Q) dan bobot kendali (R) yang digunakan untuk konfigurasi P6 adalah:

$$Q = \begin{bmatrix} 0{,}02 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}01 & 0 \\ 0 & 0 & 500 \end{bmatrix} \qquad R = 1$$

Untuk mendapatkan matriks penguatan optimal, diselesaikan *Continuous Algebraic Riccati Equation* (CARE) yang didefinisikan sebagai:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (5)$$

Diasumsikan matriks P merupakan matriks simetris dan definit positif, sehingga dapat direpresentasikan sebagai:

$$P = P^T = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{12} & p_{22} & p_{23} \\ p_{13} & p_{23} & p_{33} \end{bmatrix}$$

Langkah pertama penjabaran analitik adalah menyusun suku linier A^TP menggunakan transpos dari matriks sistem awal (A):

$$A^T = \begin{bmatrix} -16{,}6667 & 2 & 0 \\ 0 & -2 & 0{,}3143 \\ 0 & 0 & -0{,}2857 \end{bmatrix}$$

Melalui perkalian matriks A^T dengan P, diperoleh:

$$A^T P = \begin{bmatrix} -16{,}6667p_{11} + 2p_{12} & -16{,}6667p_{12} + 2p_{22} & -16{,}6667p_{13} + 2p_{23} \\ -2p_{12} + 0{,}3143p_{13} & -2p_{22} + 0{,}3143p_{23} & -2p_{23} + 0{,}3143p_{33} \\ -0{,}2857p_{13} & -0{,}2857p_{23} & -0{,}2857p_{33} \end{bmatrix}$$

Matriks PA merupakan transpos dari A^TP karena P simetris, yaitu:

$$PA = \begin{bmatrix} -16{,}6667p_{11} + 2p_{12} & -2p_{12} + 0{,}3143p_{13} & -0{,}2857p_{13} \\ -16{,}6667p_{12} + 2p_{22} & -2p_{22} + 0{,}3143p_{23} & -0{,}2857p_{23} \\ -16{,}6667p_{13} + 2p_{23} & -2p_{23} + 0{,}3143p_{33} & -0{,}2857p_{33} \end{bmatrix}$$

Langkah kedua adalah menjabarkan suku pengurang kuadratik $PBR^{-1}B^TP$. Karena R = 1, maka $R^{-1} = 1$. Dengan B = $[166{,}667\ \ 0\ \ 0]^T$, diperoleh:

$$BB^T = \begin{bmatrix} 27778,11 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dengan demikian, suku kuadratik menjadi:

$$PBB^TP = 27778,11 \begin{bmatrix} p^2{}_{11} & p_{11}p_{12} & p_{11}p_{13} \\ p_{12}p_{11} & p^2{}_{12} & p_{12}p_{13} \\ p_{13}p_{11} & p_{13}p_{12} & p^2{}_{13} \end{bmatrix}$$

Dengan menyatukan seluruh elemen suku linier ($A^TP + PA$), menguranginya dengan suku kuadratik (PBB^TP), dan menambahkan matriks pembobot Q, CARE diekstraksi menjadi enam persamaan skalar independen berikut:

$$-33,3334p_{11} + 4p_{12} - 27778,11p_{11}^2 + 0,02 = 0$$
$$-18,6667p_{12} + 2p_{22} + 0,3143p_{13} - 27778,11p_{11}p_{12} = 0$$
$$-16,9524p_{13} + 2p_{23} - 27778,11p_{11}p_{13} = 0$$
$$-4p_{22} + 0,6286p_{23} - 27778,11p_{12}^2 + 0,01 = 0$$
$$-2,2857p_{23} + 0,3143p_{33} - 27778,11p_{12}p_{13} = 0$$
$$-0,5714p_{33} - 27778,11p_{13}^2 + 500 = 0$$

Keenam persamaan nonlinear tersebut merupakan hasil penyederhanaan dari sembilan persamaan matriks CARE, dengan tiga persamaan lainnya memiliki nilai yang sama akibat sifat simetris matriks *P*. Sistem persamaan tersebut tidak diselesaikan secara analitik karena memiliki hubungan kuadratik antar variabel. Oleh karena itu, penyelesaian dilakukan secara numerik menggunakan MATLAB untuk memperoleh solusi matriks Riccati *P*.

$$P = \begin{bmatrix} 0,0008 & 0,0064 & 0,1271 \\ 0,0064 & 0,1125 & 2,5157 \\ 0,1271 & 2,5157 & 90,2810 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan hasil penyelesaian numerik menggunakan MATLAB, diperoleh matriks Riccati *P* yang memenuhi persamaan CARE.

D. Perhitungan *gain state feedback*

Gain LQR dihitung menggunakan hubungan $K = R^{-1}B^TP$. Karena R = 1 dan B^T = [166,667 0 0], maka nilai K ditentukan oleh baris pertama matriks P. Perhitungan menggunakan nilai P dengan presisi penuh dari MATLAB.

$$K = R^{-1}B^TP \tag{6}$$

$$k_1 = 1 \times 166,667 \times 0,000815306 = 0,135884$$
$$k_2 = 1 \times 166,667 \times 0,006410347 = 1,068391$$
$$k_3 = 1 \times 166,667 \times 0,127054284 = 21,175714$$

Sehingga matriks *gain* LQR P6 yang diperoleh adalah:

$$K = [0,135884 \quad 1,068391 \quad 21,175714]$$

Hukum kendali *state feedback* sebelum penambahan precompensator dinyatakan sebagai:

$$u = -0,135884x_1 - 1,068391x_2 - 21,175714x_3$$

E. Pembentukan matriks closed loop A - BK

Dengan menggunakan *gain* P6 berpresisi penuh, perkalian matriks BK menghasilkan:

$$BK = \begin{bmatrix} 22,647378 & 178,065193 & 3529,285671 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Melalui pengurangan matriks awal sistem A dengan matriks BK, diperoleh matriks sistem tertutup:

$$A_{CL} = A - BK$$
$$= \begin{bmatrix} -39,314045 & -178,065193 & -3529,285671 \\ 2,000000 & -2,000000 & 0 \\ 0 & 0,314286 & -0,285714 \end{bmatrix}$$

Matriks A - BK menunjukkan bahwa *state feedback* LQR mengubah dinamika baris pertama sistem karena sinyal kendali bekerja langsung pada *amplifier*. Pengaruhnya kemudian diteruskan ke *exciter* dan generator melalui hubungan antar state.

F. Perhitungan Nbar

$$\bar{N} = -\frac{1}{C(A-BK)^{-1}B} \tag{7}$$

Selanjutnya dilakukan substitusi numerik menggunakan matriks sistem dan gain LQR konfigurasi P6. Matriks yang digunakan adalah:

$$A = \begin{bmatrix} -16,666667 & 0 & 0 \\ 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0,314286 & -0,285714 \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} 166,666667 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad C = [0 \quad 0 \quad 1]$$
$$K = [0,135884268 \quad 1,068391158 \quad 21,175714027]$$

Perkalian B dengan K menghasilkan:

$$BK = \begin{bmatrix} 22,647378 & 178,065193 & 3529,285671 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dengan demikian, matriks dinamika closed loop adalah:

$$A - BK = \begin{bmatrix} -39,314045 & -178,065193 & -3529,285671 \\ 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0,314286 & -0,285714 \end{bmatrix}$$

Nilai hasil perkalian invers matriks *closed loop* terhadap matriks B dihitung dengan menyelesaikan persamaan linear untuk vektor z. Hasilnya adalah:

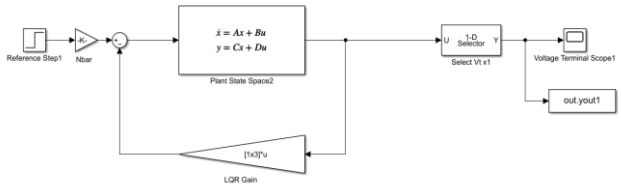
$$z = (A - BK)^{-1}B = \begin{bmatrix} -0,040654437481 \\ -0,040654437481 \\ -0,044719881229 \end{bmatrix}$$

Karena C = [0 0 1], maka C hanya mengambil elemen ketiga dari vektor tersebut:

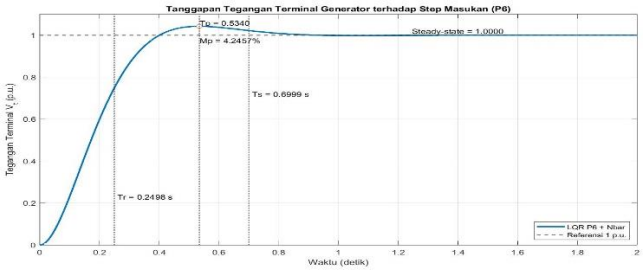
$$C(A - BK)^{-1}B = -0,044719881229$$

Substitusi ke persamaan precompensator memberikan:

$$\bar{N} = -\frac{1}{-0,044719881229}$$
$$\bar{N} = 22,361418959$$



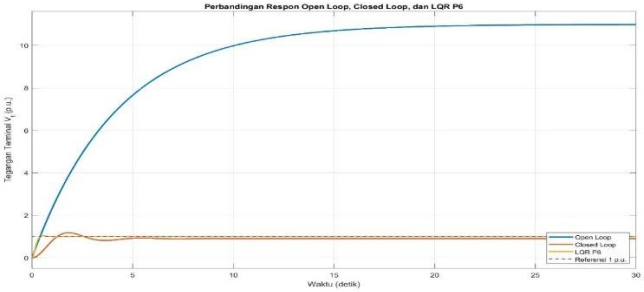
Gambar 3.3 Model Simulink *State Feedback* Sistem dengan LQR P6



Gambar 3.4 Respon Step Sistem dengan LQR P6

G. Perbandingan Sebelum dan Sesudah LQR

Perbandingan akhir dilakukan untuk melihat perubahan performa dari *plant open loop, closed loop unity feedback,* dan *closed loop* dengan LQR P6 yang dilengkapi precompensator Nbar.



Gambar 3.5 Perbandingan Respon *Open Loop, Closed Loop*, dan LQR P6

Tabel 3.2 Perbandingan Karakteristik Respon Sistem

Parameter	***Open Loop***	***Closed Loop***	**LQR P6**
Rise Time (s)	7,8271	0,554	0,2498
Peak Time (s)	25,2824	1,36	0,5335
Settling Time (s)	14,2922	4,25	0,6999
Overshoot (%)	0	29,163	4,2457
Steady State Value	11	0,917	1
Steady State Error	-	0,08333	0

Berdasarkan Tabel 4.13, LQR P6 memberikan peningkatan yang jelas pada karakteristik transien. *Rise time* berkurang sekitar 54,94%, *peak time* berkurang sekitar 61,27%, *settling time* berkurang sekitar 83,53%, dan *overshoot* turun sekitar 85,44% dibandingkan *closed loop* tanpa LQR. Dengan demikian, *state feedback* LQR P6 secara signifikan mempercepat dinamika sistem dan meningkatkan redaman.

Perbedaan penting dibandingkan konfigurasi sebelumnya terdapat pada tracking keadaan tunak. Dengan precompensator Nbar = 22,361419, *steady state error* turun dari 0,08333 pada *closed loop unity feedback* menjadi nilai yang secara numerik mendekati nol. Oleh karena itu, konfigurasi P6 tidak hanya memperbaiki respons transien, tetapi juga mempertahankan tegangan terminal pada referensi 1 p.u.

H. Analisis Efektivitas *Linear Quadratic Regulator*

Analisis awal menunjukkan bahwa model *state space* sebelum LQR telah memiliki seluruh *eigenvalue* dengan bagian *real negatif*, sehingga sistem secara *internal* berada pada kondisi stabil. Akan tetapi, hasil respons *closed loop unity feedback* masih menunjukkan *maximum overshoot* sebesar 29,163% dan *settling time* sebesar 4,2506 s. Kondisi ini menunjukkan bahwa kestabilan matematis belum identik dengan performa transien yang optimal. Kelayakan penerapan pengendali berbasis *state feedback* didukung oleh hasil analisis *controllability* dan *observability*. Matriks *controllability* memiliki rank 3 dan matriks *observability* juga memiliki rank 3, sama dengan jumlah state sistem. Dengan demikian, seluruh state dapat dipengaruhi oleh sinyal kendali dan secara matematis dapat direkonstruksi dari keluaran yang diamati.

Proses tuning dilakukan melalui sepuluh variasi pembobot matriks Q dengan R dipertahankan sebesar 1. Variasi q_3 menunjukkan bahwa pembobot yang lebih besar pada state tegangan terminal mempercepat respons tetapi cenderung meningkatkan gain K3 dan *overshoot*. Variasi q_1 menunjukkan pengaruh yang kuat terhadap kecepatan respons. Pada kelompok tersebut, P6 dengan Q = [0,02 0,01 500] menghasilkan *rise time*, *peak time*, dan *settling time* paling cepat. Perubahan q_2 pada P9 dan P10 hanya memberikan perubahan respons yang relatif kecil dibandingkan P3. Konfigurasi P6 menghasilkan matriks Riccati P yang *positif definit* dan memenuhi CARE dengan norm residual sekitar $1{,}2511 \times 10^{-12}$. Matriks tersebut menghasilkan gain K = [0,135884 1,068391 21,175714]. *Eigenvalue* A - BK adalah -28,979689 dan -6,310035, seluruhnya memiliki bagian *real negatif*. Hal ini memastikan sistem *closed loop* stabil.

Dari sisi transien, *rise time* turun menjadi 0,2498 s, *settling time* menjadi 0,6999 s, dan *peak time* menjadi 0,5335 s. *Overshoot* sebesar 4,2457% memang lebih tinggi daripada beberapa variasi lain, tetapi masih berada di bawah 5%. Dibandingkan *closed loop* tanpa LQR, *settling time* membaik sekitar 83,53% dan *overshoot* turun sekitar 85,44%. Dengan demikian, P6 dipilih bukan karena menghasilkan nilai

minimum pada seluruh indikator, tetapi karena memberikan prioritas terbaik pada kecepatan respons dengan *overshoot* yang masih dapat diterima. Penambahan precompensator Nbar sebesar 22,361419 memperbaiki kemampuan tracking referensi. Untuk Vref = 1 p.u., *steady state* Vt mencapai 1 p.u. dengan *steady state error* sekitar $1{,}11 \times 10^{-16}$ yang secara praktis sama dengan nol. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi *state feedback* LQR P6 dan Nbar mampu memperbaiki dinamika transien sekaligus memenuhi kebutuhan tracking keadaan tunak.

Secara keseluruhan, hasil analitik dan simulasi menunjukkan bahwa LQR P6 memberikan perubahan dinamika yang terukur melalui solusi CARE, pembentukan *gain state feedback*, pergeseran *eigenvalue* sistem tertutup, penurunan *rise time* dan *settling time*, serta penurunan *overshoot* dibandingkan *closed loop* tanpa LQR. Penambahan Nbar melengkapi fungsi LQR dengan menghilangkan *error* keadaan tunak terhadap referensi step. Oleh karena itu, konfigurasi P6 dapat digunakan sebagai gain terpilih pada model pengendalian tegangan terminal generator dalam penelitian ini.

VII. KESIMPULAN

Perancangan dan implementasi kontrol *optimal Linear Quadratic Regulator* menggunakan MATLAB telah berhasil dilakukan. Perancangan diawali dengan pemodelan sistem pembangkit dalam bentuk *state space* yang terdiri dari dinamika *amplifier*, *exciter*, dan generator. Hasil analisis menunjukkan bahwa model memiliki rank *controllability* sebesar 3 dan rank *observability* sebesar 3, sehingga seluruh state pada sistem dapat dikendalikan dan diamati. Selanjutnya dilakukan proses *tuning* terhadap sepuluh variasi matriks pembobot Q dengan nilai R = 1. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, konfigurasi P6 dengan Q = [0,02 0,01 500)] dipilih sebagai konfigurasi terbaik karena memberikan respons *rise time*, *peak time*, dan *settling time* paling cepat dengan *overshoot* yang masih berada di bawah batas 5%. Pengendalian tegangan generator menggunakan kontrol optimal LQR berhasil meningkatkan kemampuan sistem dalam mempertahankan tegangan terminal terhadap nilai referensi. Pada konfigurasi P6 diperoleh gain LQR sebesar K = [0,135884 1,068391 21,175714]. Hasil analisis *eigenvalue* setelah penerapan LQR menunjukkan nilai −28,979689 dan −6,310035, yang seluruhnya memiliki bagian real negatif sehingga sistem *closed loop* dinyatakan stabil secara asimtotik. Untuk meningkatkan kemampuan tracking terhadap referensi, digunakan precompensator Nbar = 22,361419. Dengan penambahan Nbar, tegangan terminal dapat mencapai 1 p.u. dengan *steady state error* yang secara numerik mendekati nol. Penerapan LQR memberikan peningkatan yang signifikan terhadap karakteristik respon waktu sistem dibandingkan sistem *closed loop* tanpa LQR. Sebelum penerapan LQR, sistem *closed loop* memiliki *rise time* sebesar 0,554 s, *peak time* 1,36 s, *settling time* 4,25 s, dan *overshoot* 29,163%. Setelah menggunakan LQR P6 dan precompensator Nbar, *rise time* menurun menjadi 0,2498 s, *peak time* menjadi 0,5335 s, *settling time* menjadi 0,6999 s, serta *overshoot* turun menjadi 4,2457%. Dengan demikian, penerapan LQR menghasilkan penurunan *rise time* sekitar 54,94%, *peak time* sekitar 61,27%, *settling time* sekitar 83,53%, dan *overshoot* sekitar 85,44% dibandingkan *closed loop* tanpa LQR. Selain memperbaiki respon transien, penggunaan Nbar juga mampu mengurangi *steady state error* dari 0,08333 menjadi nilai yang secara numerik mendekati nol.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, arahan, dan bantuan selama pelaksanaan penelitian hingga penyusunan artikel ini.

DAFTAR ACUAN

[1] S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.
[2] R. C. Dorf and R. H. Bishop, Modern Control Systems, 12th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2011.
[3] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, 7th ed. Boston, MA, USA: Pearson Education, 2015.
[4] IEEE Standards Association, IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above, 2014.
[5] M. A. Ibraheem, "Application of Linear Quadratic Regulator (LQR) in Generator Control Systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 2, pp. 562–571, 2011.
[6] IEEE Standards Association, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std. 421.5-2016, 2016.
[7] IEEE Standards Association, IEEE Guide for Synchronous Generator, 2019.
[8] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
[9] F. L. Lewis and V. L. Syrmos, Optimal Control, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.
[10] K. Ogata, Modern Control Engineering, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.
[11] A. Rohman, "Perbaikan Performasi Tegangan Automatic Voltage Regulator (AVR) pada Multimesin dengan Metode Linear Quadratic Regulator (LQR)," Indonesian Journal of Engineering and Technology, vol. 1, no. 1, pp. 11–15, 2022.
[12] H. Saadat, Power System Analysis. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1999.
[13] H. L. Trentelman, A. A. Stoorvogel, and M. L. J. Hautus, Control Theory for Linear Systems. London, UK: Springer, 2001.
[14] P. O. M. Scokaert and J. B. Rawlings, "Constrained Linear Quadratic Regulation," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 43, no. 8, pp. 1163–1169, 1998.

[15] B. C. Kuo, Automatic Control Systems, 7th ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1995.