

## Analisa Performansi *Single Machine Infinite Bus*(SMIB) dengan Metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) (Studi Kasus : PLTA Singkarak)

Heru Dibyo Laksono<sup>(1,\*), Ichsan Ridho Putra<sup>(2)</sup></sup>

<sup>(1,2)</sup>Laboratorium Kontrol Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas  
Kampus Limau Manis Padang Sumatera Barat

\*E-mail : heru\_dl@ft.unand.ac.id

### ABSTRAK

Jurnal ini membahas tentang analisa performansi sistem *single machine infinite bus* (SMIB). Sistem *single machine infinite bus* (SMIB) merupakan subsistem tenaga listrik yang terdiri dari satu atau lebih generator yang terhubung ke bus yang tak terhingga. Sistem *single machine infinite bus* (SMIB) ini merupakan subsistem yang paling berpengaruh terhadap performansi sistem tenaga listrik. Analisa performansi yang dilakukan dalam domain waktu dan domain frekuensi. Performansi ini merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam operasi sistem *single machine infinite bus* (SMIB). Performansi sistem tenaga listrik akan terganggu jika ada gangguan. Ada 2 jenis gangguan yang sering terjadi dalam operasi sistem tenaga listrik diantaranya gangguan peralihan dan gangguan kecil. Jika gangguan ini terus terjadi secara terus menerus setiap waktu akan berakibat terjadinya perubahan parameter – parameter pada sistem *single machine infinite bus* (SMIB) terutama perubahan tegangan. Perubahan parameter – parameter ini bisa mengakibatkan performansi sistem *single machine infinite bus* (SMIB) akan terganggu dan berakibat sistem tidak mampu lagi bekerja secara normal setelah mengalami gangguan. Dengan menggunakan metoda linear quadratic regulator (LQR) dan data – data sistem *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak akan dilakukan analisa performansi untuk domain waktu dan domain frekuensi. Hasil analisa menunjukkan bahwa performansi sistem *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak dengan menggunakan metoda linear quadratic regulator (LQR) bersifat lebih baik.

**Kata kunci** : *single machine infinite bus* (SMIB), linear quadratic regulator (LQR), performansi, PLTA Singkarak.

### 1. PENDAHULUAN

Performansi merupakan salah satu ukuran dari kualitas sistem *single machine infinite bus* (SMIB). Selain performansi, kestabilan dan kekokohan juga termasuk faktor – faktor yang mempengaruhi kualitas sistem *single machine infinite bus* (SMIB) (Laksono, 2013). Berbagai macam gangguan yang terjadi pada operasi sistem *single machine infinite bus* (SMIB) mengakibatkan terjadinya perubahan terutama perubahan tanggapan tegangan. Jika keadaan ini dibiarkan terus terjadi akan mengakibatkan performansi *single machine infinite bus* (SMIB) akan terganggu serta kadang – kadang mengakibatkan sistem *single machine infinite bus* (SMIB) tidak mampu lagi bekerja secara normal setelah mengalami gangguan.

Untuk menjaga agar sistem *single machine infinite bus* (SMIB) berjalan titik operasinya, maka perlu dilakukan analisa operasi *single machine infinite bus* (SMIB) terutama performansinya terhadap gangguan. Dalam sistem *single machine infinite bus* (SMIB), gangguan ada yang bersifat peralihan dan ada gangguan yang bersifat kecil. Pada penelitian ini dilakukan analisa performansi dari sistem *single*

*machine infinite bus* (SMIB) sebagai bagian penting dari suatu sistem tenaga listrik. Sistem *single machine infinite bus* (SMIB) ini merupakan suatu subsistem tenaga listrik yang terdiri dari satu atau lebih generator yang terhubung ke bus yang tak terhingga. Sistem *single machine infinite bus* (SMIB) ini merupakan subsistem yang paling berpengaruh terhadap performansi sistem tenaga listrik. Analisa performansi sistem *single machine infinite bus* (SMIB) ini dilakukan dengan menggunakan metoda linear quadratic regulator (LQR). Alasan menggunakan metoda linear quadratic regulator (LQR) ini, sistem *single machine infinite bus* (SMIB) dengan menggunakan metoda ini dijamin akan bersifat stabil dan mempunyai performansi yang lebih baik.

Beberapa penelitian yang sudah dilakukan diantaranya (Jalili, 2003) meneliti tentang analisa kestabilan peralihan pada *single machine infinite bus* (SMIB) dengan metoda Neuro Fuzzy serta analisa performansi yang dilakukan dalam domain waktu, (Robandi, 2007) meneliti tentang penalaan parameter *single machine infinite bus* (SMIB) menggunakan metoda algoritma genetika dan analisa performansi dilakukan dalam domain

waktu, (Panda, 2007) meneliti tentang pemodelan Matlab – Simulink *single machine infinite bus* (SMIB) untuk studi kestabilan dengan metoda algoritma genetika, (Zamani, 2009) meneliti tentang *power system stabilizer* (PSS) untuk *single machine infinite bus* (SMIB) dengan *particle swarm*, (Muawia, 2010) meneliti tentang *power system stabilizer* (PSS) untuk *single machine infinite bus* (SMIB) dengan menggunakan teknik kendali optimal dan analisa performansi dalam domain waktu dan (laksono, 2013) melakukan evaluasi kestabilan dan kekokohan pada sistem *single machine infinite bus* (SMIB) pada satu titik operasi.

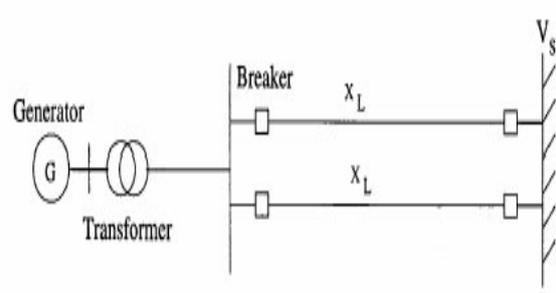
Pada beberapa penelitian yang sudah dilakukan tersebut, diperoleh informasi bahwa performansi yang dianalisa pada umumnya adalah analisa performansi dalam domain waktu sedangkan analisa performansi dalam domain frekuensi tidak dilakukan. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya maka dilakukan analisa performansisistem *single machine infinite bus*(SMIB) dalam domain waktu dan domain frekuensi dengan menggunakan metoda linear quadratic regulator (LQR). Hasil dari penelitian ini diperolehnya informasi performansi dalam domain waktu dan domain frekuensi dari sistem *single machine infinite bus*(SMIB) yang berguna nantinya dalam analisa performansi sistem tenaga listrik. Dalam melakukan penelitian ini batasan masalahnya adalah:

1. Model sistem *single machine infinite bus*(SMIB) bersifat linier, tak berubah terhadap waktu dan kontinu.
2. Adapun data – data yang digunakan untuk *single machine infinite bus* (SMIB) adalah data pembangkit listrik tenaga air (PLTA) Singkarak.
3. Sistem *single machine infinite bus* (SMIB) bersifat satu masukan dan satu keluaran.
4. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat Matlab 7.1

**2. METODOLOGI**

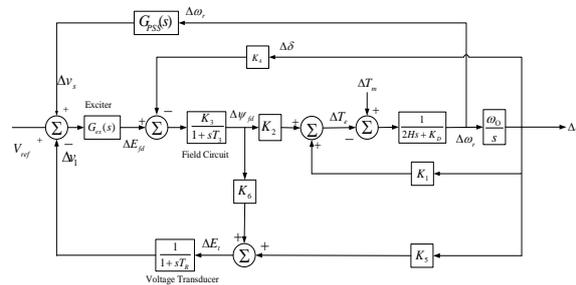
Pada bagian ini menjelaskan konfigurasi *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak, diagram blok *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak, persamaan keadaan dari *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Sngkarak, metoda linear quadratic regulator (LQR), matrik bobot Q, matrik bobot R dan langkah – langkah dalam penelitian.

Untuk konfigurasi *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak diperlihatkan pada Gambar 1. berikut :



Gambar1. Konfigurasi *Single Machine Infinite Bus*(SMIB) PLTA Singkarak

Untuk diagram blok *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak diperlihatkan pada Gambar 2. berikut



Gambar 2. Diagram Blok *Single Machine Infinite Bus*(SMIB) PLTA Singkarak [Kundur, 1993]

Adapun persamaan keadaan *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak dinyatakan dalam bentuk persamaan (1) dan (2) berikut :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{1}$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \tag{2}$$

dimana

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -0.1714 & -0.1007 & 0 \\ 314.1593 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1274 & -0.4545 & -27.2293 \\ 0 & 2.3439 & 17.5333 & 50 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$B = [0.0999 \quad 0.0000 \quad 0.0000 \quad 0.0000] \tag{4}$$

$$C = [0.0000 \quad 0.0000 \quad 1.000 \quad 0.0000] \tag{5}$$

$$D = 0.0000 \tag{6}$$

Metoda linier quadratic regulator (LQR) adalah sebuah teknik kendali modern yang menggunakan pendekatan persamaan keadaan [Franklin, 1986]. Sistem *single machine infinite bus* (SMIB) yang akan ditinjau dinyatakan dengan persamaan (7) berikut :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (7)$$

Berdasarkan persamaan (7) akan ditentukan matrik K dari vektor kendali optimal pada persamaan (8) berikut :

$$u(t) = -Kx(t) \quad (8)$$

dengan meminimumkan indeks performansi pada persamaan (9) untuk metoda linear quadratic regulator (LQR) berikut

$$J = \int_0^{\infty} (x'(t)Qx(t) + u'(t)Ru(t)) dt \quad (9)$$

dimana Q adalah matrik simetrik nyata definite positif (atau semidefinite positif) dan R adalah matrik simetrik nyata definite positif. Matrik Q dan matrik R menentukan kepentingan relatif dari kesalahan dan kebutuhan energi. Dengan mensubstitusikan persamaan (8) ke dalam persamaan (7) diperoleh persamaan (10) berikut :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BKx(t) = (A - BK)x(t) \quad (10)$$

Untuk matrik bobot Q dan bobot R dinyatakan dengan persamaan (11) dan (12) berikut:

$$Q = \begin{bmatrix} 0.1000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20.0000 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R = 0.0200 \quad (12)$$

Untuk langkah – langkah dalam penelitian ini adalah

- Penelitian ini dimulai dengan pemodelan matematis *single machine infinite bus* (SMIB) dengan menggunakan persamaan linear diferensial dan transformasi Laplace.
- Hasil dari pemodelan ini diperolehnya persamaan keadaan dari *single machine infinite bus* (SMIB). Pembentukan persamaan keadaan dari *single machine infinite bus* (SMIB) dapat dilihat pada [Khundur,1993]
- Adapun parameter – parameter yang diperlukan untuk membentuk persamaan keadaan *single machine infinite bus* (SMIB) adalah parameter keadaan operasi sistem tenaga listrik, parameter jaringan dan parameter *Automatic Voltage Regulator* (AVR)
- Mensubstitusikan parameter-parameter tersebut agar diperoleh persamaan keadaan *single machine infinite bus* (SMIB)
- Setelah dilakukan pemodelan matematis sistem *single machine infinite bus* (SMIB) maka dilakukan analisa performansi sistem *single machine infinite bus* (SMIB) tanpa metoda linier quadratic regulator (LQR). Adapun performansi yang dianalisa adalah tanggapan perubahan tegangan dari sistem *single machine infinite bus* (SMIB).
- Analisa performansi sistem *single machine infinite bus* (SMIB) meliputi analisa performansi dalam domain waktu dan domain frekuensi.
- Analisa performansi sistem *single machine infinite bus* (SMIB) dalam domain waktu terdiri dari performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup.
- Untuk analisa performansi lingkaran terbuka dalam domain waktu, kriteria yang diamati meliputi tipe sistem, konstanta kesalahan posisi, konstanta kesalahan kecepatan, konstanta kesalahan percepatan, kesalahan keadaan mantap untuk masukan undak satuan, kesalahan keadaan mantap untuk masukan laju satuan dan kesalahan keadaan mantap untuk masukan parabolik. Analisa kesalahan mantap ini diperoleh dari tanggapan perubahan tegangan dalam keadaan mantap. Pada penelitian ini yang diamati hanya kesalahan keadaan mantap terhadap masukan undak satuan.
- Untuk analisa performansi lingkaran tertutup dalam domain waktu, kriteria yang diamati meliputi waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak, lewatan maksimum, total variasi, *decay ratio* dan *steady state offset*. Kriteria – kriteria untuk analisa performansi lingkaran tertutup ini diperoleh dari tanggapan perubahan tegangan dalam keadaan peralihan. Pada penelitian ini yang diamati hanya waktu keadaan mantap dan lewatan maksimum.
- Analisa performansi sistem *single machine infinite bus* (SMIB) dalam domain frekuensi terdiri dari performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup.
- Untuk analisa performansi lingkaran terbuka dalam domain frekuensi meliputi margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa dan frekuensi margin fasa. Pada penelitian ini yang diamati hanya margin penguatan serta frekuensi margin penguatan.
- Untuk analisa performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi meliputi lebar pita, nilai puncak resonansi dan frekuensi nilai

puncak resonansi. Pada penelitian ini yang diamati hanya perubahan lebar pita.

- Setelah dilakukan analisa performansi *single machine infinite bus* (SMIB) dalam domain waktu dan domain frekuensi maka dilanjutkan dengan analisa performansi *single machine infinite bus* (SMIB) dengan metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) dengan terlebih dahulu menentukan kriteria perancangan diinginkan
- Setelah kriteria perancangan ditentukan, maka dilakukan penentuan matrik bobot Q dan matrik bobot R. Matrik bobot Q dan matrik bobot R ini ditentukan secara coba – coba. Kedua matrik bobot ini digunakan untuk menentukan konstanta penguatan.
- Setelah itu ditentukan konstanta penguatan dengan menggunakan metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) kemudian disubstitusikan ke persamaan *single machine infinite bus* (SMIB) sehingga terbentuk persamaan keadaan untuk sistem *single machine infinite bus* (SMIB) yang baru.
- Dengan menggunakan persamaan keadaan *single machine infinite bus* (SMIB) yang telah disubstitusi konstanta penguatan maka dilakukan analisa performansi dalam domain waktu dan domain frekuensi untuk *single machine infinite bus* (SMIB). Langkah – langkah yang dilakukan dalam analisa performansi *single machine infinite bus* (SMIB) dengan metoda linear quadratic regulator (LQR) sama dengan analisa performansi tanpa metoda linear quadratic regulator (LQR).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dilakukan analisa performansi tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak tanpa dan dengan metoda linear quadratic regulator (LQR). Analisa performansi tanggapan perubahan tegangan yang dilakukan meliputi analisa performansi dalam domain waktu dan analisa performansi dalam domain frekuensi. Untuk analisa performansi tanggapan perubahan tegangan dalam domain waktu terbagi atas analisa performansi lingkaran terbuka dan analisa performansi lingkaran tertutup. Untuk analisa performansi tanggapan perubahan tegangan dalam domain frekuensi juga dilakukan dengan cara yang sama dengan analisa performansi tanggapan perubahan tegangan dalam domain waktu.

Analisa performansi tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak tanpa metoda linear quadratic regulator (LQR) yang terdiri dari analisa

performansi tanggapan perubahan tegangan dalam domain waktu dan analisa performansi tanggapan perubahan tegangan dalam domain frekuensi. Untuk analisa performansi tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain waktu diperoleh informasi performansi lingkaran terbuka dalam domain waktu seperti yang diperlihatkan pada Tabel 1. berikut

Tabel 1. Performansi Lingkaran Terbuka Dalam Domain Waktu

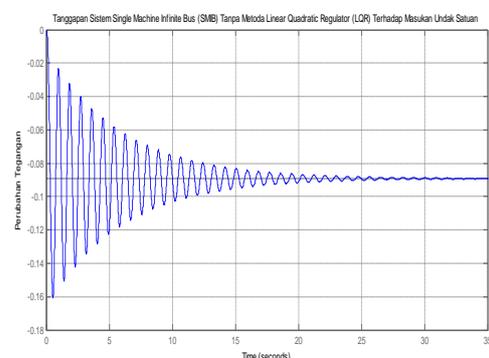
Kriteria	Nilai
Kesalahan Keadaan Mantap	0.0892

Berdasarkan Tabel 1. diperoleh informasi performansi lingkaran terbuka tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak tanpa metoda linear quadratic regulator (LQR) yang ditunjukkan dengan nilai kesalahan keadaan mantap tanggapan perubahan tegangan dan diperoleh nilainya sebesar 0.0892. Untuk performansi lingkaran tertutup dalam domain waktu diperlihatkan Tabel 2. berikut

Tabel 2. Lingkaran Tertutup Dalam Domain Waktu

Kriteria	Nilai
Waktu Naik	0.1793 detik
Waktu Puncak	0.5393 detik
Nilai Puncak	0.1605
Lewatan Maksimum	79.8871 %
Waktu keadaan mantap	22.1580 detik
Total Variasi	2.0533
<i>Decay Ratio</i>	Tidak Terhingga
<i>Steady State Offset</i>	0.0892

Tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 3. berikut



Gambar 3. Tanggapan Perubahan Tegangan *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

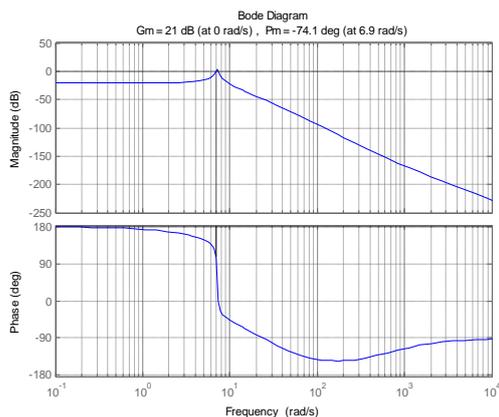
Berdasarkan Tabel 2. dan Gambar 3. diperoleh informasi performansi lingkaran tertutup tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak tanpa metoda linear quadratic regulator (LQR) yang terbagi atas 2 klasifikasi yaitu kecepatan perubahan tanggapan tegangan dan kualitas perubahan tanggapan tegangan. Untuk klasifikasi kecepatan perubahan tanggapan tegangan diperoleh informasi waktu naik sebesar 0.1793 detik, waktu puncak sebesar 0.5393 detik dan waktu keadaan mantap sebesar 22.1580 detik sedangkan untuk klasifikasi kualitas perubahan tanggapan tegangan diperoleh lewat maksimum sebesar 79.8871 %, *decay ratiotidak* terhingga dan nilai *steady state offset* sebesar 0.0892.

Untuk analisa performansi tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain frekuensi diperoleh informasi performansi lingkaran terbuka dalam domain frekuensi seperti yang diperlihatkan pada Tabel 3. berikut

Tabel 3. Performansi Lingkaran Terbuka Dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
Margin Penguatan	11.2091
Frekuensi Margin Penguatan	0.0000 rad/detik
Margin Fasa	-74.0548 derajat
Frekuensi Margin Fasa	6.9036 rad/detik

Tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak terhadap masukan sinusoidal yang diperlihatkan dengan diagram Bode pada Gambar 4. berikut



Gambar 4. Diagram Bode Tanggapan Perubahan Tegangan *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

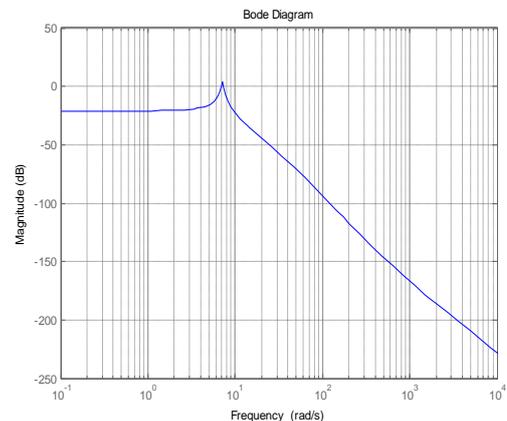
Berdasarkan Tabel 3. dan Gambar 4. diperoleh informasi performansi lingkaran terbuka tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain frekuensi tanpa metoda linear quadratic regulator

(LQR) yang ditunjukkan dengan margin penguatan sebesar 11.2091, frekuensi margin penguatan sebesar 0.0000 rad/detik, margin fasa sebesar -74.0548 derajat dan frekuensi margin fasa sebesar 6.9036 rad/detik. Untuk performansi lingkaran tertutup dalam domain frekuensi diperlihatkan Tabel 4. berikut

Tabel 4. Performansi Lingkaran Tertutup Dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
Lebar Pita (rad/detik)	10.2610
Nilai Puncak Resonansi	1.6145
Frekuensi Puncak Resonansi (rad/detik)	7.1297

Tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak terhadap masukan sinusoidal diperlihatkan dengan diagram magnitudo Bode pada Gambar 5. berikut



Gambar 5. Diagram Magnitudo Bode Tanggapan Perubahan Tegangan *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

Berdasarkan Tabel 4. dan Gambar 5. diperoleh informasi performansi lingkaran terbuka tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain frekuensi tanpa metoda linear quadratic regulator (LQR) yang ditunjukkan dengan lebar pita sebesar 10.2610, nilai puncak resonansi sebesar 1.6145 dan frekuensi puncak resonansi sebesar 7.1297 rad/detik.

Analisa performansi sistem *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain waktu terdiri dari performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup. Untuk performansi lingkaran terbuka, tanggapan tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak sudah memenuhi kriteria diinginkan dimana kesalahan keadaan mantap yang

diperoleh sebesar 0.0892. Untuk performansi lingkaran tertutup terdiri dari kecepatan tanggapan dan kualitas tanggapan. Untuk tanggapan tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak belum memenuhi kriteria yang diinginkan baik untuk kecepatan tanggapan maupun untuk kualitas tanggapan. Untuk kecepatan tanggapan yang diamati dari penelitian ini adalah waktu keadaan mantap. Untuk kualitas tanggapan yang diamati adalah lewatan maksimum. Untuk kecepatan tanggapan, tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak mempunyai waktu keadaan mantap yang cukup lama. Agar tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak ini mempunyai kecepatan tanggapan yang lebih baik maka diharapkan waktu keadaan mantap mempunyai durasi yang lebih kecil. Untuk kualitas tanggapan, tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak ini mempunyai nilai lewatan maksimum yang besar dengan nilai 79.8871 %. Agar perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak ini mempunyai kualitas tanggapan yang lebih baik maka diharapkan memiliki nilai lewatan maksimum kurang dari 20 %. Jika kecepatan tanggapan dan kualitas tanggapan dari perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak sudah lebih baik maka performansi lingkaran tertutup perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak akan menjadi lebih baik juga.

Analisa performansi tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain frekuensi terdiri dari performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup. Untuk performansi lingkaran terbuka tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak sudah memenuhi kriteria yang diinginkan dimana margin penguatan yang diperoleh sebesar 11.2091 (20.9914dB). Agar tanggapan perubahan tegangan sistem *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak bersifat stabil maka nilai margin penguatannya harus besar dari 1.9953 (6 dB). Untuk performansi sistem lingkaran tertutup tanggapan perubahan tegangan *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain frekuensi belum memenuhi kriteria yang diinginkan dimana lebar pita diperoleh sebesar 10.2610 rad/detik. Nilai lebar pita tersebut mengakibatkan waktu keadaan mantap dari tanggapan peralihan perubahan tegangan *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak menjadi lebih lambat.

Agar tanggapan perubahan tegangan *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak mempunyai performansi yang lebih baik dalam domain waktu maupun domain frekuensi maka dilakukan penambahan pengendali. Adapun pengendali yang ditambahkan itu dirancang dengan menggunakan metoda linear quadratic regulator (LQR) dengan kriteria perancangan diantaranya kesalahan keadaan mantap yang kecil dari 0.0500, lewatan maksimum yang kurang dari 20 %, margin penguatan yang lebih besar dari 1.9953 (6 dB) serta lebar pita yang lebih lebar dari lebar pita tanpa metoda linear quadratic regulator (LQR). Perancangan pengendali dengan metoda linear quadratic regulator (LQR) dilakukan dengan terlebih menentukan matrik bobot Q dan nilai bobot R agar memenuhi kriteria performansi yang diinginkan. Penentuan matrik bobot Q dan matrik bobot R ini dilakukan secara coba – coba dan dengan menggunakan matrik Q pada persamaan (11) berikut

$$Q = \begin{bmatrix} 0.1000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0100 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 20.0000 \end{bmatrix} \quad (11)$$

dan nilai  $R = 0.0200$ . diperoleh matrik penguatan umpan balik dari metoda linear quadratic regulator (LQR) yang dinyatakan oleh persamaan (12) berikut

$$K = [188.2412 \quad 5.6371 \quad -0.2511 \quad 0.2153] \quad (12)$$

Matrik penguatan umpan balik ini kemudian disubstitusikan ke persamaan keadaan (1) dan (2) dan diperoleh persamaan keadaan *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak yang baru. Dengan menggunakan persamaan keadaan yang baru analisa performansi tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dilakukan.

Untuk analisa performansi tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dengan metoda linear quadratic regulator (LQR) juga terdiri dari analisa performansi tanggapan perubahan tegangan dalam domain waktu dan analisa performansi tanggapan perubahan tegangan dalam domain frekuensi. Untuk performansi tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain waktu diperlihatkan pada Tabel 5. dan Tabel 6. berikut

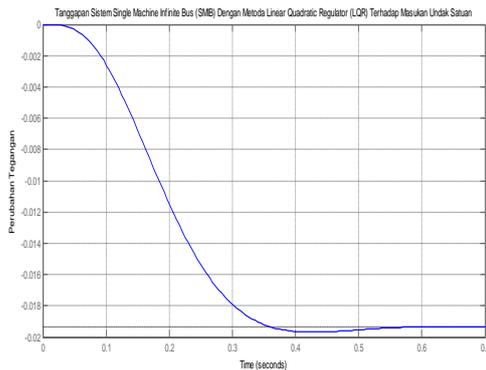
Tabel 5. Performansi Lingkaran Terbuka dalam Domain Waktu

Kriteria	Nilai
Kesalahan Keadaan Mantap	0.0194

Tabel 6. Performansi Lingkar Tertutup dalam Domain Waktu

Kriteria	Nilai
Lewatan Maksimum	1.6362 %
Waktu keadaan mantap	0.3383 detik

Tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 6. berikut



Gambar 6. Tanggapan Perubahan Tegangan *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

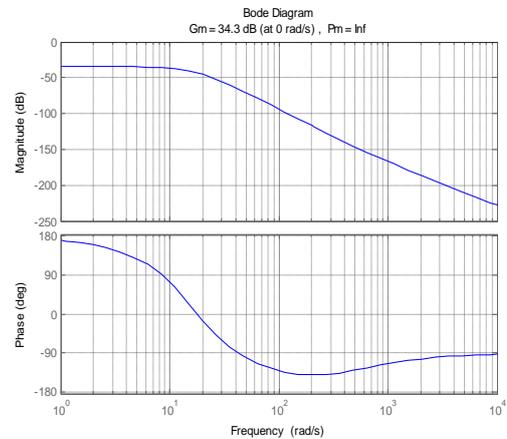
Berdasarkan Tabel 5. diperoleh informasi performansi lingkaran terbuka tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dengan metoda linear quadratic regulator (LQR) yang ditunjukkan dengan nilai kesalahan keadaan mantap tanggapan perubahan tegangan dengan nilai 0.0194. Berdasarkan Tabel 6. dan Gambar 6. diperoleh informasi performansi lingkaran tertutup tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dengan metoda linear quadratic regulator (LQR) yang terbagi juga atas 2 klasifikasi yaitu kecepatan perubahan tanggapan tegangan dan kualitas perubahan tanggapan tegangan. Untuk klasifikasi kecepatan perubahan tanggapan tegangan diperoleh waktu keadaan mantap sebesar 0.3383 detik sedangkan untuk klasifikasi kualitas perubahan tanggapan tegangan diperoleh lewatan maksimum sebesar 1.6362 %.

Untuk performansi tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain frekuensi diperlihatkan pada Tabel 7. dan Tabel 8. serta Gambar 7. Dan Gambar 8. berikut

Tabel 7. Performansi Lingkar Terbuka dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
Margin Penguatan	51.6228
Frekuensi Margin Penguatan	0.0000 rad/detik

Tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak terhadap masukan sinusoidal yang diperlihatkan dengan diagram Bode pada Gambar 7. berikut

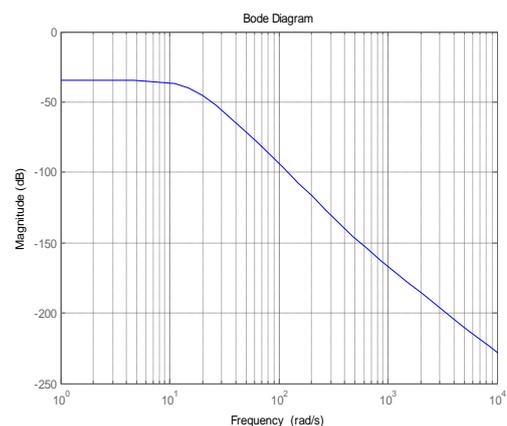


Gambar 7. Diagram Bode Tanggapan Perubahan Tegangan *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

Tabel 8. Performansi Lingkar Tertutup Dalam Domain Frekuensi

Kriteria	Nilai
Lebar Pita (rad/detik)	11.2020

Tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak terhadap masukan sinusoidal diperlihatkan dengan diagram magnitudo Bode pada Gambar 8. berikut



Gambar 8. Diagram Magnitudo Bode Tanggapan Perubahan Tegangan *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

Berdasarkan Tabel 7. dan Gambar 7. diperoleh informasi performansi lingkaran terbuka tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTASingkarak dalam domain frekuensi dengan metoda linear quadratic regulator

(LQR) yang ditunjukkan dengan margin penguatan sebesar 51.6228 dan frekuensi margin penguatan sebesar 0.0000 rad/detik. Berdasarkan Tabel 8. dan Gambar 8. diperoleh informasi performansi lingkaran tertutup tanggapan perubahan tegangan pada *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak dalam domain frekuensi dengan metoda linear quadratic regulator (LQR) yang ditunjukkan dengan lebar pita sebesar 11.2020rad/detik.

#### 4. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari pembahasan diatas adalah

1. Dengan menggunakan metoda linear quadratic regulator (LQR), tanggapan perubahan tegangan sistem *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak mempunyai performansi yang lebih baik untuk domain waktu maupun domain frekuensi.
2. Performansi tanggapan perubahan tegangan sistem *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak dalam domain waktu ini meliputi performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup. Untuk performansi lingkaran terbuka ditunjukkan dengan nilai kesalahan keadaan mantap yang lebih kecil. Untuk performansi lingkaran tertutup ditunjukkan dengan durasi keadaan mantap yang lebih cepat dan nilai lewatan maksimum yang lebih kecil.
3. Performansi tanggapan perubahan tegangan sistem *single machine infinite bus* (SMIB) PLTA Singkarak dalam domain frekuensi ini juga meliputi performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup. Untuk performansi lingkaran terbuka ditunjukkan dengan margin penguatan dan frekuensi margin penguatan yang telah memenuhi kriteria yang telah ditetapkan. Untuk performansi lingkaran tertutup ditunjukkan dengan lebar pita yang lebih lebar

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas yang telah memfasilitasi penelitian sehingga dihasilkan jurnal ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chalis Zamani, *Desain Optimal PI based Power System Stabilizer Menggunakan Particle Swarm Optimization*. Journal Electrical and Electronics Engineering, (2009)
- [2] Franklin, G. F, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, New York : Addison – Wesley Publishing Company, (1986)
- [3] Heru Dibyo Laksono, *Evaluasi Kestabilan dan Kekokohan Single Machine Infinite Bus(SMIB) dengan Metoda Linear Quadratic Regulator(LQR)(Studi Kasus : PLTA Singkarak)*, Jurnal Teknik Vol. 20 No. 01, (2013)
- [4] Imam Robandi dan Bedy Kharisma, *Setting Parameter Single Machine Infinite Bus Via Genetic Algorithm*, Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi 2007 (SNATI 2007), Yogyakarta (2007).
- [5] Kundur, Prabha, *Power System Stability and Control* , New Jersey : Prentice Hall, (1993)
- [6] Kuo, B. C., *Automatic Control Systems*, India : Prentice Hall, (1983)
- [7] M.J. Yazdanpanah dan M.JaliliKharaajoo, *Optimal NonLinear Transient Control with Neuro-AVR of Singl –Machine Infinite-Bus Power systems*, Proceeding of The 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Hawaii, USA, (2003).
- [8] Muawia Abdel Kafi Magzoub.2010. *Power System Stabilizer (PSS) For Single Machine Connected To Infinite Bus (SMIB) Based On Optimal Control (OP) Techniques*, (2010).
- [9] Nise, Norman S., *Control System Engineering*, Canada : John Wiley & Sons, (2004)
- [10] Sidhartha Pand and Narayana Prasad Padhy, *Matlab/Simulink Based Model Of Single-Machine Infinite-Bus With TCSC For Stability Studies and Tuning Employing GA*. International Journal of Computer Science and Engineering Vol 1, (2007)
- [11] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*, Second Edition, New York : John Wiley & Sons, (1996)