

PERANCANGAN KONTROL OPTIMAL PADA SISTEM *MULTI MACHINE* MENGGUNAKAN *LINEAR QUADRATIC REGULATOR-GLOWWORM SWARM OPTIMIZATION (LQR-GSO)*

Arsyad^{*)}, Aris Triwiyatno, and Susatyo Handoko

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: shalvafyorra@yahoo.com

Abstrak

Stabilitas pada sistem *multi machine* merupakan faktor penting untuk menjaga operasional sistem agar tetap aman. Perancangan kontrol optimal pada sistem *multi machine* menggunakan *Linear Quadratic Regulator (LQR)* diharapkan mampu meningkatkan stabilitas sistem *multi machine*. Pada penelitian ini, nilai variabel diagonal matriks bobot Q dan R pada LQR dihitung menggunakan *Glowworm Swarm Optimization (GSO)*. Model persamaan state space dan data parameter pada sistem *multi machine* didapat dari studi pustaka, yaitu jurnal dan buku. Sedangkan untuk implementasi kontrol optimal pada sistem *multi machine* dilakukan dengan menggunakan MATLAB. Hasil simulasi yang diperoleh yaitu perbandingan antara respon sistem *multi machine* yang menggunakan kontrol LQR-GSO dengan LQR. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, kontrol LQR-GSO pada *multi machine* memperkecil *error* sebanyak 32.95% sedangkan kontrol LQR pada *multi machine* memperkecil *error* sebanyak 28.87%. Oleh sebab itu, metode kontrol LQR-GSO memiliki respon yang lebih baik dibandingkan metode kontrol LQR.

Kata kunci: stabilitas, multi machine, Linear Quadratic Regulator (LQR), Glowworm Swarm Optimization (GSO)

Abstract

Multi machine system stability is an important factor to keep the system operational in order to stay safe. The design of optimal control in multi machine system using Linear Quadratic Regulator (LQR) is expected to improve the stability of multi machine system. In this research, the value of the variable diagonal weighting matrix Q and R on LQR calculated using Glowworm Swarm Optimization (GSO). State space equation model and data parameters in a multi machine system obtained from the literature. Implementation of optimal control in multi machine system performed using MATLAB. Simulation results obtained by the comparison between the response of multi machine system using LQR control and LQR-GSO control. Based on the tests, the LQR-GSO control in multi machine reduce as much as 32.95% error and the LQR control in multi machine reduce as much as 28.87% error. Therefore, the LQR-GSO control method has a better response than the LQR control method.

Keywords: stability, multi machine, Linear Quadratic Regulator (LQR), Glowworm Swarm Optimization (GSO)

1. Pendahuluan

Dari sudut pandang *control engineering*, Sistem tenaga adalah sebuah sistem non-linier, multi-input-multi-output (MIMO), berskala besar yang memiliki banyak sekali variabel, perangkat proteksi, dan perangkat kontrol dengan respon dinamis dan karakteristik yang berbeda-beda [1].

Stabilitas sistem tenaga merupakan faktor penting untuk menjaga operasional sistem agar tetap aman [2]. *Power system stabilizers (PSS)* yang banyak digunakan untuk

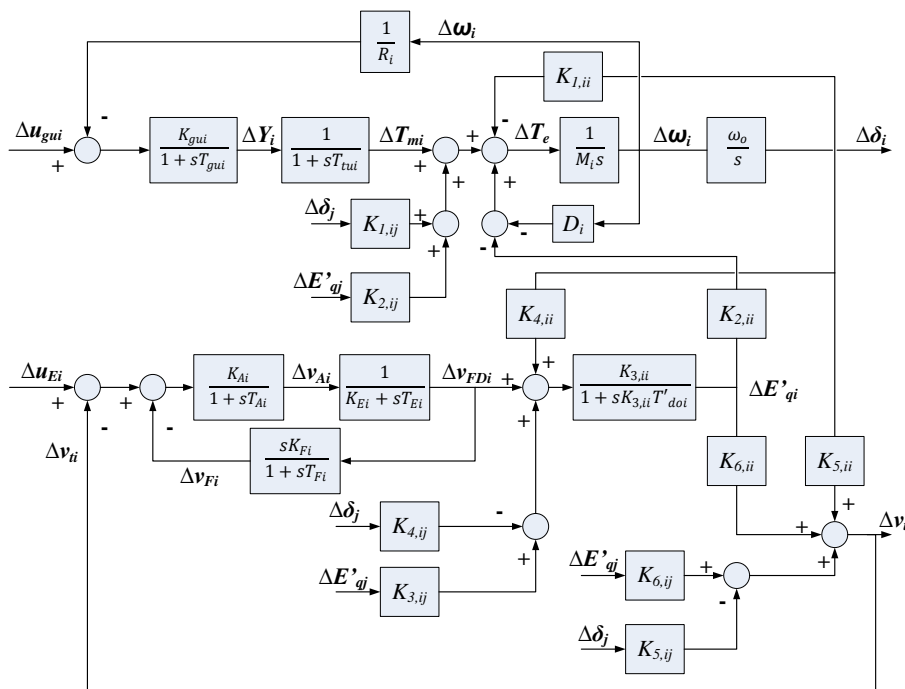
meningkatkan kinerja dari sistem tenaga selama operasional dan menjaga stabilitas sistem tenaga [3].

Pengaruh kontrol eksitasi dan PSS pada stabilitas generator dapat dilihat di [4-9]. Banyak penelitian telah dipublikasikan mengenai teknik *tuning* parameter PSS. Teknik *tuning* tersebut termasuk metode kontrol klasik dan metode evolusioner seperti *genetic algorithm (GA)*, *simulated annealing (SA)*, *evolutionary programming (EP)*, dan *particle swarm optimization (PSO)* [10-17].

Linear quadratic regulator (LQR) adalah juga salah satu metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja dan stabilitas pada sistem tenaga yang telah

diterapkan secara luas dalam beberapa tahun terakhir. Salah satu masalah dalam penerapan LQR adalah penentuan matriks pembobot Q dan R. Dibutuhkan banyak *trial-error* untuk merancang diagonal matriks Q dan R agar mendapatkan hasil yang optimal. Oleh sebab itu, Bryson mengembangkan sebuah metode untuk memecahkan masalah ini dengan menggunakan algoritma iterasi sederhana untuk mengoptimalkan diagonal matriks pembobot Q dan R [18]. Untuk hasil yang lebih baik, Penentuan diagonal matriks pembobot menggunakan *genetic algorithm* (GA) dan *particle swarm optimization* (PSO) telah dipublikasikan pada [19, 20]. Pengembangan metode penentuan keseluruhan isi matriks pembobot Q dan R menggunakan *genetic algorithm* (GA) dapat dilihat di [21].

Dalam makalah ini, model yang digunakan adalah model *multi machine* dengan 9 bus dan 3 generator. Metode kontrol yang digunakan adalah LQR dengan penentuan diagonal matriks pembobot Q dan R menggunakan *glowworm swarm optimization* (GSO). Untuk mengurangi beban komputasi dalam penelitian ini, fungsi objektif yang digunakan berdasarkan *Comprehensive Damping Index* (CDI) yang telah dioptimalkan [16, 22]. Dengan menggunakan model sistem skala besar maka pengaruh dari interkoneksi apabila terjadi gangguan pada salah satu mesin dapat dilihat. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang kontroler LQR yang memiliki kinerja kontrol yang baik dan dapat mencapai karakteristik sistem yang diinginkan.



Gambar 1. Model mesin tunggal terinterkoneksi dengan pembangkit turbin uap [23]

2. Metode

2.1. Pemodelan Single Machine

Dari gambar 1 dapat dibentuk persamaan keadaan (state space) dan interkoneksinya (1).

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + E_i w_i(t) \quad (1.a)$$

$$y_i(t) = C_i x_i(t) + D_i u_i(t) + F_i w_i(t) \quad (1.b)$$

$$w_i(t) = Cz_{ij} x_j(t) + Cz_{ik} x_k(t) + Dz_{ij} U_j(t) + Dz_{ik} U_k(t) \quad (1.c)$$

Variabel keadaan x yang akan dikontrol, variabel keluaran (output) y yang akan diamati, variabel masukan (input) u , dan variabel interkoneksi w dalam sebuah single-machine i dituliskan ke dalam persamaan (2).

$$x = [\Delta Y_i \quad \Delta T_{mi} \quad \Delta \delta_i \quad \Delta \omega_i \quad \Delta E'_{qi} \quad \Delta v_{Fi}]^T \quad (2.a)$$

$$y = [\Delta \delta_i \quad \Delta \omega_i \quad \Delta E'_{qi} \quad \Delta v_{Fi}]^T \quad (2.b)$$

$$u = [\Delta u_{gui} \quad \Delta u_{Ei}]^T \quad (2.c)$$

$$w_i = [\sum_{j \neq i} \Delta \delta_{ij} \quad \sum_{j \neq i} \Delta E'_{qij}]^T \quad (2.d)$$

Persamaan dinamis mesin i dituliskan ke dalam persamaan (3).

$$\Delta \dot{Y}_i = \frac{K_{gui} \Delta u_{gui}}{T_{gui}} - \frac{K_{gui} \Delta \omega_i}{T_{gui} R_i} - \frac{\Delta Y_i}{T_{gui}} \quad (3.a)$$

$$\Delta \dot{T}_{mi} = \frac{\Delta Y_i}{T_{tui}} - \frac{\Delta T_{mi}}{T_{tui}} \quad (3.b)$$

$$\Delta \dot{\delta}_i = \omega_o \Delta \omega_i \quad (3.c)$$

Tabel 1. Simbol yang digunakan dalam model

Simbol	Keterangan	Simbol	Keterangan
Y	Ketinggian katup turbin	T'_{do}	Konstanta waktu transien medan
T_m	Torsi mekanik turbin	K_1	Gain torsi elektrik terhadap perubahan sudut daya
δ	Sudut rotor mesin	K_2	Gain torsi elektrik terhadap perubahan flux linkage
ω	Kecepatan sudut mesin	K_3	Gain flux linkage terhadap perubahan tegangan medan
E'_{qi}	Tegangan transient generator	K_4	Gain tegangan medan terhadap perubahan sudut daya
v_F	Tegangan keluaran penyearah sisi eksitasi	K_5	Gain tegangan medan terhadap perubahan sudut daya
v_t	Tegangan terminal	K_6	Gain tegangan terminal terhadap perubahan flux linkage
u_{gu}	Sinyal masukan sisi turbin	K_A	Gain pengatur tegangan
u_E	Sinyal masukan sisi eksitasi	T_A	Konstanta waktu tanggap pengatur tegangan
K_{gu}	Gain pengatur turbin	v_A	Tegangan amplifier
T_{gu}	Konstanta waktu tanggap pengatur turbin	K_E	Gain exciter
R	Konstanta pengatur turbin	T_E	Konstanta waktu tanggap exciter
T_{tu}	Konstanta waktu tanggap turbin	v_{FD}	Tegangan keluaran eksitasi
M	Momen inersia	K_F	Gain filter
D	Koefisien redaman	T_F	Konstanta waktu tanggap filter
T_c	Torsi elektrik turbin	ω_0	Konstanta kecepatan sudut mesin

$$\Delta \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} (\Delta T_{mi} - \Delta T_{ei} - D_i \Delta \omega_i) \quad (3.d)$$

$$\Delta T_{ei} = K_{1,ii} \Delta \delta_i + K_{2,ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i} K_{1,ij} \Delta \delta_j + K_{2,ij} \Delta E'_{qj} - \sum_{j \neq i} K_{2,ij} \Delta E'_{qj} \quad (3.e)$$

$$T'_{doi} \Delta \dot{E}'_{qi} = \Delta v_{fi} - C_{3,ii} \Delta E'_{qi} + K_{4,ii} \Delta \delta_i + \sum_{j \neq i} C_{3,ij} \Delta E'_{qj} - \sum_{j \neq i} K_{4,ij} \Delta \delta_j \quad (3.f)$$

$$C_{3,ii} = \frac{1}{K_{3,ii}} \quad (3.g)$$

$$\Delta v_{fi} = -\frac{K_{Ai}}{1+sT_{Ai}} (\Delta v_{ti} - \Delta u_{Ei}) \quad (3.h)$$

$$\Delta v_{ti} = K_5 \Delta \delta_i + K_6 \Delta E'_{qi} \quad (3.i)$$

$$D = \begin{bmatrix} D_i & F_i D_{z_{ji}} & F_i D_{z_{ki}} \\ F_j D_{z_{ij}} & D_j & F_j D_{z_{kj}} \\ F_k D_{z_{ik}} & F_k D_{z_{jk}} & D_k \end{bmatrix} \quad (5.d)$$

Pada gambar 1 tidak diperlihatkan bahwa sistem memiliki *throughput* (input langsung menjadi output) maka $D_{i,j,k} = 0$ sehingga persamaan (5.b) dan (5.d) menjadi:

$$B = \begin{bmatrix} B_i & 0 & 0 \\ 0 & B_j & 0 \\ 0 & 0 & B_k \end{bmatrix} \quad (6.a)$$

$$D = 0 \quad (6.b)$$

Dengan model input-output dari persamaan (4) maka perancangan sistem kontrol dapat dilakukan secara global menggunakan LQR.

2.2. Pemodelan Multi Machine

Untuk memodelkan *multi machine* seperti pada gambar 2 maka model persamaan (2) dari tiap-tiap mesin dapat disederhanakan menjadi satu persamaan keadaan (*state space*) (4) menggunakan metode pemodelan input-output [24].

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.a)$$

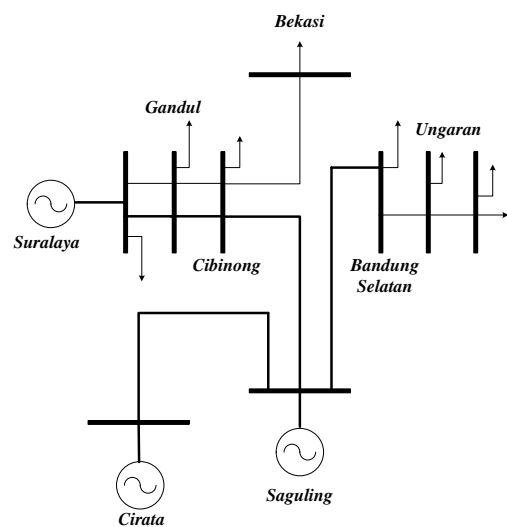
$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (4.b)$$

Dengan isi matriks A , B , C , dan D :

$$A = \begin{bmatrix} A_i & E_i C_{z_{ji}} & E_i C_{z_{ki}} \\ E_j C_{z_{ij}} & A_j & E_j C_{z_{kj}} \\ E_k C_{z_{ik}} & E_k C_{z_{jk}} & A_k \end{bmatrix} \quad (5.a)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_i & F_i D_{z_{ji}} & F_i D_{z_{ki}} \\ F_j D_{z_{ij}} & B_j & F_j D_{z_{kj}} \\ F_k D_{z_{ik}} & F_k D_{z_{jk}} & B_k \end{bmatrix} \quad (5.b)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_i & F_i C_{z_{ji}} & F_i C_{z_{ki}} \\ F_j C_{z_{ij}} & C_j & F_j C_{z_{kj}} \\ F_k C_{z_{ik}} & F_k C_{z_{jk}} & C_k \end{bmatrix} \quad (5.c)$$



Gambar 2. Sistem Jaringan Tenaga Listrik Jawa-Bali 500kV [23]

2.3. Linear Quadratic Regulator (LQR)

Pada perancangan kontrol optimal ini, indeks peromansi dapat dirumuskan sebagai minimum penyimpangan dengan variabel keadaan dan minimum energi dengan variabel sinyal input.

$$J = \int_{t_0}^t [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \tag{9}$$

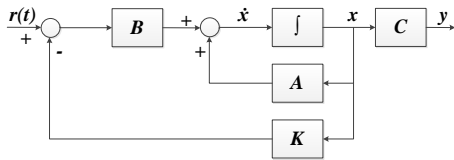
Dimana :

$Q \geq 0$; matriks bobot, $[n \times n]$, dan semi-definit positif.

$R > 0$; matriks bobot, $[m \times m]$, dan definit positif.

$x(t)$ dan $u(t)$ didapat dari persamaan (4).

Dengan menentukan matriks bobot Q dan R maka nilai indeks peromansi J (9), matriks p dari persamaan Riccati (10), dan umpan balik K (11) dapat dihitung.



Gambar 3. Blok diagram sistem kontrol LQR

Persamaan aljabar Riccati [28]:

$$pA + A^T p + Q - pBR^{-1}B^T p = 0 \tag{10}$$

Dimana:

$$R^{-1}B^T p = K \tag{11}$$

Sehingga sinyal input optimal yang dihasilkan sistem, dalam bentuk persamaan (12).

$$u(t) = -Kx(t) \tag{12}$$

Dengan adanya umpan balik K , persamaan variabel keadaan dari sistem (4) akan berubah menjadi persamaan (13).

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \tag{13}$$

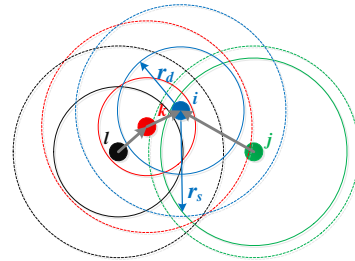
Sistem ini akan mempunyai akar-akar karakteristik persamaan yang berbeda dengan akar-akar karakteristik persamaan sebelum adanya umpan balik K , akar-akar persamaan karakteristik ini dapat ditentukan dengan persamaan (14).

$$|sI - (A - BK)| = 0 \tag{14}$$

2.4. Glowworm Swarm Optimization (GSO)

Algoritma GSO dikembangkan oleh Krishnanand dan Ghose (2005), yang merupakan pengembangan dari

pendekatan algoritma *ant colony optimization* (ACO) dan juga berdasarkan metafor kunang-kunang [29].



Gambar 4. Ilustrasi kunang-kunang dengan agen i, j, k, dan l dengan $\ell_i > \ell_k > \ell_j > \ell_k$; $0 \leq r_d \leq r_s$ dan $d < r_d$

Secara garis besar, GSO terdiri atas tiga tahap: tahap memperbarui luciferin, tahap pergerakan agen, dan tahap memperbarui local-decision range.

Persamaan untuk memperbarui luciferin:

$$\ell_i(t) = (1 - \rho)\ell_i(t - 1) + \gamma J(x_i(t)) \tag{15}$$

Dimana:

ℓ_i : nilai luciferin dari agen i pada waktu t

ρ : konstanta peluruhan luciferin ($0 < \rho < 1$)

γ : konstanta peningkatan luciferin

$J(x_i(t))$: nilai fungsi objektif pada lokasi agen i pada waktu t

Setiap agen menggunakan mekanisme probabilistik untuk menentukan arah gerak berdasarkan posisi tetangga yang mempunyai nilai luciferin yang lebih tinggi dari dirinya sendiri. Setiap agen i , memiliki probabilitas menuju ke agen j dengan persamaan (16).

$$p_{ij}(t) = \frac{\ell_j(t) - \ell_i(t)}{\sum_{k \in N_i} \ell_k(t) - \ell_i(t)} \tag{16}$$

Dimana :

$j \in N_i(t)$

$N_i(t) = \{j: d_{ij}(t) < r_d^i(t); \ell_i(t) < \ell_j(t)\}$ (17)

$d_{ij}(t) = \|x_j(t) - x_i(t)\|$

$N_i(t)$: jumlah tetangga agen i pada waktu t

$d_{ij}(t)$: jarak antara agen i dengan agen j pada waktu t

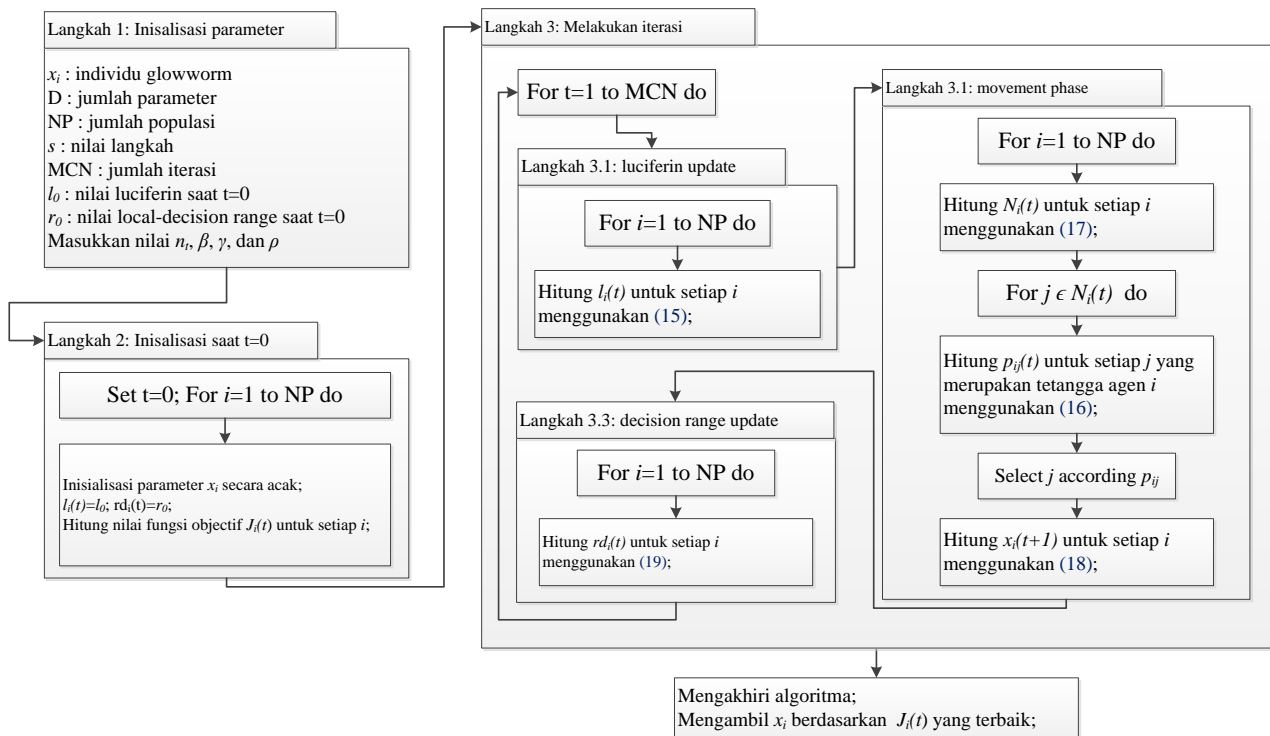
$r_d^i(t)$: local-decision range agen i pada waktu t

Setelah agen i mendapatkan posisi agen j yang memiliki nilai probabilistik tertinggi (16). Maka gerakan setiap agen dapat dinyatakan dengan persamaan (18).

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + s \left(\frac{x_j(t) - x_i(t)}{\|x_j(t) - x_i(t)\|} \right) \tag{18}$$

Dimana :

s : nilai langkah agen i



Gambar 5. Flowchart prosedur komputasi algoritma GSO [31]

Persamaan untuk memperbarui local-decision range: $r_{di}^l(t+1) = \min\{r_s, \max\{0, r_{di}^l(t) + \beta(n_t - |N_i(t)|)\}\}$ (19)

- Dimana :
- r_s : batas maksimum dari local-decision range
 - β : parameter konstan
 - n_t : parameter yang digunakan untuk mengendalikan jumlah tetangga

n_t, s, l_0, β, ρ dan γ adalah parameter algoritma yang telah ditentukan [30] dan bernilai tetap (Tabel 2).

Tabel 2. Parameter Algoritma GSO

ρ	γ	β	n_t	s	l_0
0.4	0.6	0.08	5	0.03	5

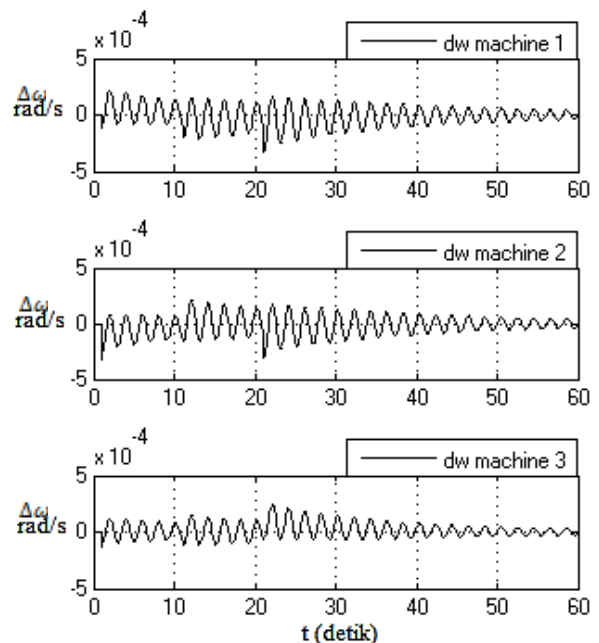
3. Hasil dan Analisa

Untuk mengetahui hasil keluaran respon dari setiap mesin yang terinterkoneksi maka sebuah *impulse* diberikan ke mesin 1 pada saat $t=1$, ke mesin 2 pada saat $t=11$, dan ke mesin 3 pada saat $t=21$.

Dari gambar 6 menunjukkan adanya pengaruh interkoneksi pada perubahan kecepatan sudut mesin.

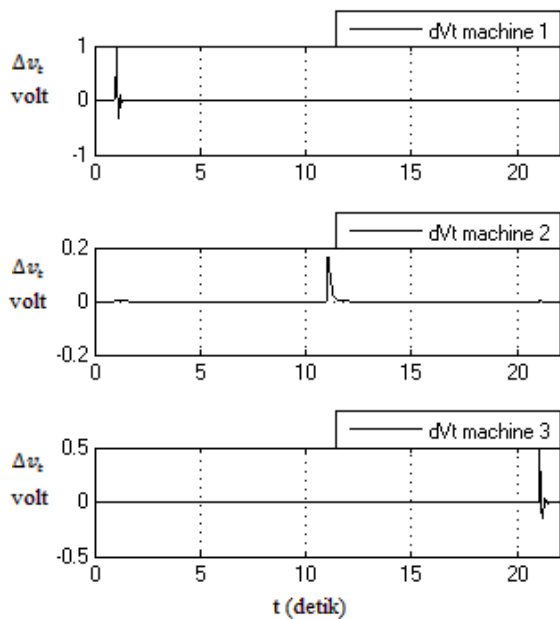
Selain itu, pada gambar 6 juga dapat dilihat bahwa sistem stabil pada kondisi nilai matriks A_{mm} . Hasil keluaran respon sistem pada setiap mesin mulai menuju ke titik 0

setelah tidak ada lagi gangguan dari interkoneksi, yaitu saat $t > 21$.



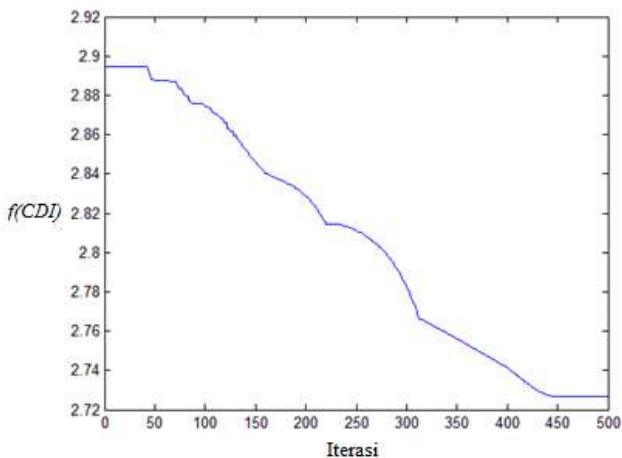
Gambar 6. Perubahan kecepatan sudut mesin tanpa kontrol

Sedangkan pada tegangan terminal, pengaruh dari interkoneksi tidak terlihat signifikan. Hal ini dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 7. Perubahan tegangan terminal mesin tanpa kontrol

Untuk memperkecil pengaruh interkoneksi pada setiap mesin maka dipasang kontrol LQR. Pada penelitian ini, Perancangan matriks bobot Q dan R menggunakan algoritma GSO dalam menentukan variabel diagonal matriks pembobot. Fungsi objektif yang digunakan berdasarkan CDI (*Comprehensive Damping Index*). Jumlah iterasi yang digunakan adalah lima ratus dan jumlah agen yang digunakan adalah dua puluh.



Gambar 8. Nilai fungsi objektif berdasarkan iterasi GSO

Pada gambar 6 menunjukkan bahwa nilai fungsi objektif telah mencapai konvergensi dengan nilai 2.7267 pada saat iterasi ke-449 dari 500 iterasi.

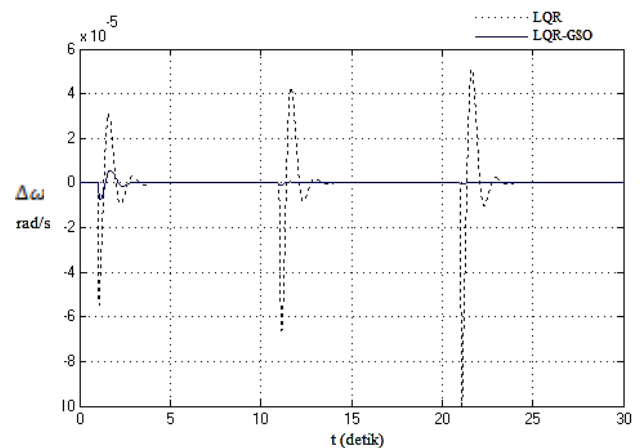
Pada tabel 3 dapat dilihat perbandingan eigenvalue yang didapat dari hasil iterasi GSO pada *multi machine* dengan kontrol LQR-GSO.

Tabel 3. Perbandingan eigenvalue multi machine

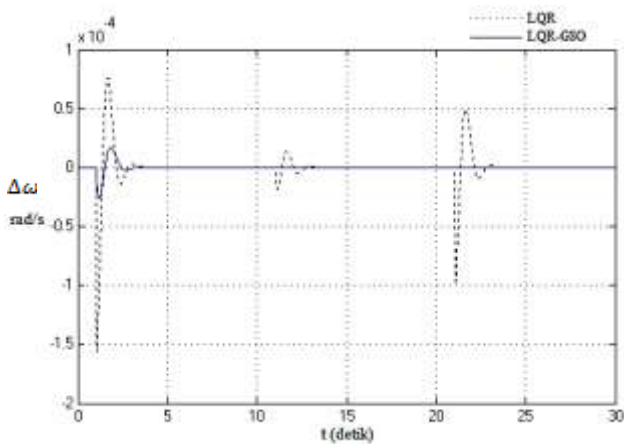
Tanpa kontrol	LQR	LQR-GSO
-420.586	-40.3317	-2.4293·10 ⁴
-10.0648 +30.2383i	-21.7127 +35.8399i	-0.3902·10 ⁴
-10.0648 -30.2383i	-21.7127 -35.8399i	-0.1053·10 ⁴
-10.0499 +25.2974i	-19.2762 +30.1750i	-0.0048·10 ⁴
-10.0499 -25.2974i	-19.2762 -30.1750i	-0.0050·10 ⁴
-0.0447 + 3.1028i	-14.3676	(-0.0003 + 0.0005i)·10 ⁴
-0.0447 - 3.1028i	-2.0898 + 4.7851i	(-0.0003 - 0.0005i)·10 ⁴
-80.090	-2.0898 - 4.7851i	(-0.0002 + 0.0004i)·10 ⁴
-0.0007	-2.4730 + 4.3287i	(-0.0002 - 0.0004i)·10 ⁴
-0.0001	-2.4730 - 4.3287i	(-0.0002 + 0.0003i)·10 ⁴
-0.1132	-2.4471 + 4.1844i	(-0.0002 - 0.0003i)·10 ⁴
-0.1073	-2.4471 - 4.1844i	-0.0007·10 ⁴
-46.623	-6.0390 + 1.5941i	-0.0006·10 ⁴
-45.928	-6.0390 - 1.5941i	-0.0007·10 ⁴
-45.837	-6.3665 + 1.7056i	-0.0007·10 ⁴
-53.276	-6.3665 - 1.7056i	-0.0002·10 ⁴
-53.761	-6.2594 + 1.6181i	-0.00001·10 ⁴
-53.836	-6.2594 - 1.6181i	-0.00001·10 ⁴

Pada tabel 3 dapat dilihat bahwa eigenvalue pada multi-machine dengan kontrol LQR-GSO berada di sebelah kiri dibandingkan dengan eigenvalue pada multi-machine dengan kontrol LQR dan tanpa kontrol. Selain itu, tabel 3 juga membuktikan bahwa LQR menjamin stabilitas sistem setelah dikontrol. Hal ini dibuktikan dengan tidak adanya nilai pole yang berada pada area positif sumbu real setelah diberi kontrol LQR.

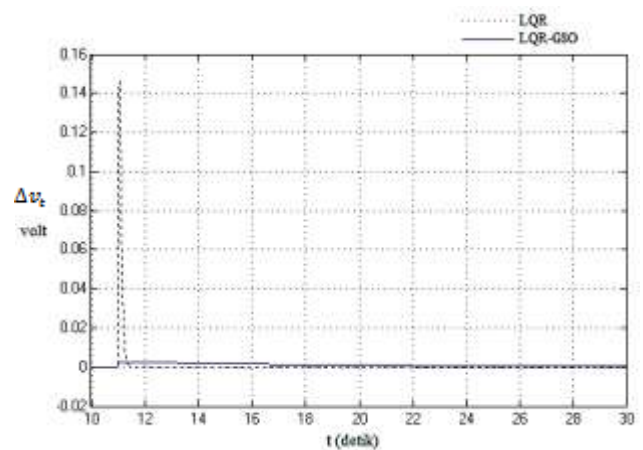
Pada gambar 9 hingga gambar 14 dapat dilihat perbandingan hasil keluaran respon mesin pada multi machine dengan kontrol LQR-GSO



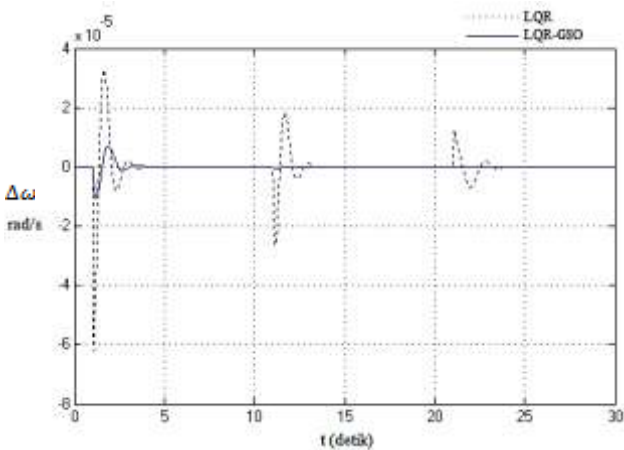
Gambar 9. Perbandingan antara kontrol LQR dan LQR-GSO pada perubahan kecepatan sudut mesin 1



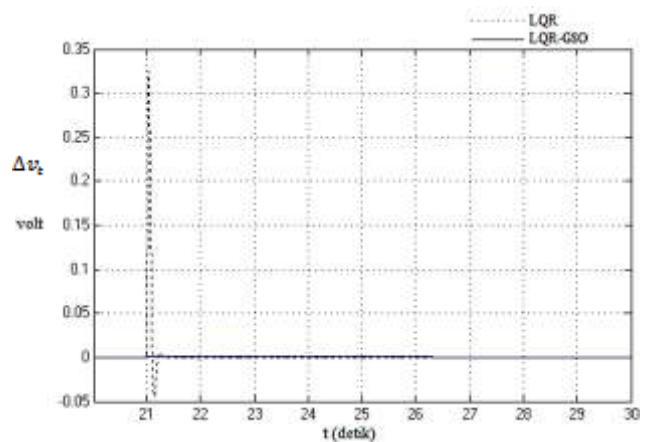
Gambar 10. Perbandingan antara kontrol LQR dan LQR-GSO pada perubahan kecepatan sudut mesin 2



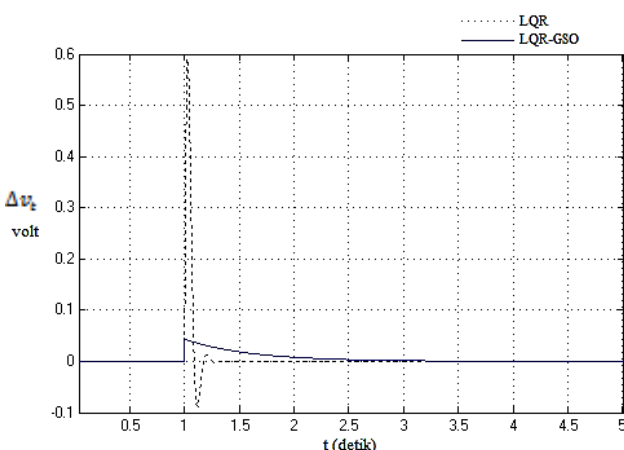
Gambar 13. Perbandingan antara kontrol LQR dan LQR-GSO pada perubahan tegangan terminal mesin 2



Gambar 11. Perbandingan antara kontrol LQR dan LQR-GSO pada perubahan kecepatan sudut mesin 3



Gambar 14. Perbandingan antara kontrol LQR dan LQR-GSO pada perubahan tegangan terminal mesin 2



Gambar 12. Perbandingan antara kontrol LQR dan LQR-GSO pada perubahan tegangan terminal mesin 1

Dari gambar 9 hingga gambar 14 terlihat adanya perbedaan yang cukup signifikan antara keluaran respon pada multi machine dengan LQR dan LQR-GSO. Pada grafik respon perubahan kecepatan sudut mesin terlihat osilasi kontrol LQR-GSO lebih kecil dibandingkan dengan kontrol LQR. Sedangkan pada grafik respon perubahan tegangan terminal mesin, terlihat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *steady state* lebih lambat dibandingkan dengan kontrol LQR. Untuk melihat nilai *Integral Absolute Error* (IAE) yang diambil dari detik ke-0 hingga 60 dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan nilai IAE pada multi machine

	Mesin 1		Mesin 2		Mesin 3	
	$\Delta\omega_1$	Δv_{t1}	$\Delta\omega_2$	Δv_{t2}	$\Delta\omega_3$	Δv_{t3}
LQR	0.04569	0.08158	0.03146	0.04952	0.02996	0.05292
LQR-GSO	0.04558	0.0717	0.03135	0.05575	0.02992	0.0401

4. Kesimpulan

Dari hasil dari penelitian ini diperoleh bahwa untuk melakukan perancangan matriks bobot Q dan R pada LQR maka dapat menggunakan metode GSO untuk memperoleh parameter yang optimal.

Pada makalah ini memperlihatkan pengaruh interkoneksi pada tiap mesin serta cara melakukan perancangan sistem kontrol secara global.

Selain itu, pada penelitian ini membuktikan bahwa kontrol LQR mampu memperkecil pengaruh interkoneksi dari mesin lain. Kontrol LQR juga menjamin kestabilan *plant* sesudah diberi kontroler dengan syarat *plant* memenuhi syarat stabilitas sistem.

Referensi

- [1]. Sauer PW, Pai MA. Power system dynamic and stability. NJ, Prentice Hall: Englewood Cliff; 1998.
- [2]. Wang SK, Chiou JP, Liu CW. Parameter tuning of power system stabilizers using improved ant direction hybrid differential evolution. *Electrical Power and Energy Systems*. 2009; 31: 34-42.
- [3]. Bevrani Hassan, Hiyama T, Bevrani Hossein, Robust PID based power system stabiliser: Design and real-time implementation. *Electrical Power and Energy Systems*. 2011; 33: 179-188.
- [4]. Anderson PM, Fouad AA. Power system control and stability. Ames IA: Iowa State Univ. Press: 1977.
- [5]. Sauer PW, Pai MA. Power system dynamics and stability. NJ, Prentice Hall: Englewood Cliffs: 1998.
- [6]. De Mello FP, Concordia C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Trans Power Appl Syst*. 1969; PAS-88: 316-329.
- [7]. Abe S, Doi A. New power system stabilizer synthesis in multi machine power systems. *IEEE Trans Power Appl syst*. 1983; PAS-88: 316-329.
- [8]. Kundur P. Power system stability and control. Tata-McGraw-Hill; 2006.
- [9]. Pai MA, Energy function analysis for power system stability. MA, Norwell: Kluwer; 1989.
- [10]. Abdel-Magid YL, Abido MA, Mantawy AH. Robust tuning of power system stabilizers in multi machine power systems. *IEEE Trans Power Syst*. 2000; 15(2): 735-740.
- [11]. Abido MA. Robust design of multi machine power system stabilizers using simulated annealing. *IEEE Trans Energy Convers*. 2000; 15(3): 297-304.
- [12]. Abido MA. Optimal design of multi machine power system stabilizers using particle swarm optimization. *IEEE Trans Energy Convers*. 2002; 17(2): 406-413.
- [13]. Abdel-Magid YL, Abido MA, Al-Baiyat S, Mantawy AH. Simultaneous stabilization of multi machine power systems via genetic algorithms. *IEEE Trans Power Syst*. 1999; 14(4): 1428-1439.
- [14]. Abido MA, Abdel-Magid YL. Optimal design of power system stabilizers using evolutionary programming. *IEEE Trans Energy Convers*. 2004; 19(2): 384-391.
- [15]. Gaing ZL. A particle swarm optimization approach for minimum design of PID controller in AVR system. *IEEE Trans Energy Convers*. 2004; 19(2): 384-391.
- [16]. Mishra S, Tripathy M, Nanda J. Multi-machine power system stabilizer design by rule based bacteria foraging. *Electric Power Systems Research*. 2007; 77: 1595-607.
- [17]. Kashki M, Abdel-Magid YL, Abido MA. Parameter optimization of multimachine power system conventional stabilizers using CDCARLA method. *Electrical Power and Energy Systems*. 2010; 32: 498-506.
- [18]. Johnson MA, Grimble MJ. *Recent Trends in Linear Optimal Quadratic Multivariable Control System Design*. IEE Proc. 1987; 134: 1.
- [19]. Robandi I, Nishimori K, Nishimura R, Ishihara N. *Application of Genetic Algorithms to Improve a Q Weighting Matrix of Optimal Control Solution in Power System*. The proceeding of Universities Power Engineering Conference (UPEC). Leicester UK. 1999.
- [20]. Hamidi J. Control System Design Using Particle Swarm Optimization (PSO). *International Journal of Soft Computing and Engineering*. 2012; 1(6); 116-119.
- [21]. Robandi I, Nishimori K, Nishimura R, Ishihara N. Full-element weighting matrices Q and R design in optimal Load Frequency Control solution using genetic Algorithm. Tottori University Japan; 2000.
- [22]. Shayeghi H, Shayanfar HA, Safari A, Aghmasheh R. *A robust PSSs design using PSO in a multimachine environment*. Energy Conversion and Management. 2010; 51(4): 696-702.
- [23]. Mado I. Perancangan kontrol optimal adaptif melalui observer beban pada sistem pembangkit tenaga listrik mesin tunggal yang ter-interkoneksi. Thesis. Surabaya: Postgraduate ITS; 2006.
- [24]. Triwiyatno A. Large scale system course. Semarang: Dept. of Electrical Engineering Undip. 2011.
- [25]. D'Souza AF. Design of control system. Prentice-Hall International Edition. 1988.
- [26]. Manan S. Stabilisasi dan sinyal kontrol optimal pada eksitasi sebagai stabilizer pembangkit tenaga listrik. Sistem Pengaturan ITB. Bandung. 1996.
- [27]. Kailath T. Linear Systems. Prentice-Hall. 1980.
- [28]. Lewis FL, Syrmos VL. Optimal Control. 2nd Ed. Wiley. 1995.
- [29]. Krishnanand KN, Ghose D. Glowworm swarm optimisation : a new method for optimising multi-modal functions. *Int. J. Computational Intelligence Studies*. 2009; 1(1): 93-119.
- [30]. Krishnanand KN, Ghose D. Theoretical foundations for rendezvous of glowworm-inspired agent swarms at multiple locations. *Robotics and Autonomous System*. 2008; 56: 549-569.
- [31]. Bin Wu, Cunhua Qian, Weihong Ni, Shuhai Fan. The improvement of glowworm swarm optimization for continuous optimization problems. *Expert System with Application*. 2012; 39: 6335-6342.
- [32]. Hamdy MA, You Nan Yu. Dynamic Interaction of Multi Machine Power System and Excitation Control. *IEEE Trans*. 1974; 93:1150-1158.
- [33]. IEEE Committee Report. Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Trans*. 1981; 100:2.
- [34]. Ronald S., Burns. Advanced Control Engineering. Butterworth Heinemann:2001.
- [35]. Frank D'souza, Design of Control System. Prentice-Hall. 1988.