

Pengoptimalan Umpan Balik *Linear Quadratic Regulator (Lqr)* Pada *Fuzzy Load Frequency Control (Lfc)* Menggunakan *Artificial Immune System (Ais)*

Febriana Kristanti

Lecturer Department of Mathematics Education

Universitas Muhammadiyah Surabaya

E-mail: febriana_rose@yahoo.com

Abstract

Makalah ini membahas suatu metode kontrol optimal Linear Quadratic Regulator (LQR) dalam pengaturan matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} dan parameter Fuzzy menggunakan algoritma Artificial Immune System (AIS). Metode LQR digunakan untuk mendapatkan penguat optimal \mathbf{K}_{op} melalui solusi Algebraic Riccati Equation (ARE), sedangkan Fuzzy digunakan untuk menala penguat \mathbf{K}_{pi} dan \mathbf{K}_{i} kontroler Proportional-Integral (PI). Metode kontrol diaplikasikan pada Load Frequency Control sistem tenaga listrik dua area. Penguatan kontroler optimal LQR dan kontroler PI diinputkan ke nilai referensi beban pada unit governor untuk memperbaiki performansi dinamik sistem. Hasil penelitian menunjukkan, dengan menggunakan metode ini dapat memperbaiki respon dinamik sistem dibandingkan dengan konvensional kontroler (kontroler integral, kontroler PI), kontroler PI yang dihybrid dengan kontrol optimal LQR, dan fuzzy tuning PI kontroler yang dihybrid dengan kontrol optimal LQR yang ditala menggunakan metode trial-error.

Kata Kunci : Linear Quadratic Regulator (LQR), Fuzzy Logic Controller, Artificial Immune System (AIS).

I. PENDAHULUAN

Kestabilan sistem merupakan bagian yang dapat dipengaruhi oleh adanya gangguan besar maupun kecil. Di dalam sistem tenaga listrik terdapat dua macam gangguan, yaitu gangguan yang bersifat transien seperti putus jaring atau hubung singkat dan gangguan yang bersifat dinamik (di sekitar titik kerja) yang diakibatkan oleh perubahan beban yang relatif kecil [1,3]. Gangguan dinamik ini dapat mengakibatkan kinerja dinamik menjadi tidak baik, bahkan dapat membawa sistem ke daerah tidak stabil.

Pada sistem interkoneksi yang besar, banyak sistem pembangkit besar dan kecil yang terhubung secara sinkron, oleh karena itu semua pembangkit dituntut harus mempunyai frekuensi yang sama. berubah sesuai perubahan beban, sehingga diperlukan sistem pengaturan frekuensi atau dikenal dengan *Load Frequency Control (LFC)* [2].

Load Frequency Control (LFC) adalah suatu sistem yang digunakan untuk menjaga fluktuasi yang ditimbulkan oleh perubahan beban. LFC memiliki obyektif atau tujuan yang harus dicapai dalam pengoperasian sistem tenaga, terutama untuk menjaga variasi frekuensi sistem dalam pembagian beban yang harus dipikul oleh tiap generator selama proses pertukaran daya antar bus untuk memenuhi kebutuhan beban yang telah

dijadualkan [3]. Melalui kontrol modern, usaha-usaha yang telah dilakukan untuk memperbaiki performansi dinamik akibat perubahan beban yang kecil, serta penerapan kontrol optimal untuk memperbaiki performansi dinamik pada sistem tenaga menggunakan kriteria kuadratis LQR menghasilkan perbaikan yang memuaskan [3,4].

Fuzzy set dan fuzzy logic, telah dikenal sebagai metode yang handal untuk mengatasi ketidakpastian pada masalah ketidakjelasan, kekaburan, dan ketidaktepatan. Fuzzy set memperbolehkan beberapa tingkat keanggotaan dari sebagai anggota ke bukan anggota. Ide dari fuzzy set ini berguna untuk mewakili masalah linguistik numeris dan membuat keputusan yang handal dari ketidakjelasan dan ketidaktepatan suatu kasus. Aplikasi fuzzy logic juga telah banyak dilakukan dan mampu memperbaiki performansi pada sistem [3,5,6]

AIS merupakan metode adaptif yang biasa digunakan untuk memecahkan suatu pencarian nilai dalam suatu masalah optimasi yang kompleks. Penyelesaian masalah optimasi menggunakan AIS juga telah dilakukan dan menghasilkan performansi sistem yang baik [7]. Pada makalah ini, AIS digunakan untuk menala matriks pembobot Q dan R parameter LQR, dan parameter fungsi keanggotaan Fuzzy Logic Controller. Metode ini diaplikasikan pada Load Frequency Control sistem tenaga listrik dua area untuk memperbaiki performansi dinamik sistem dengan melihat respon deviasi frekuensi area satu, deviasi frekuensi area dua, dan deviasi daya tie-line. Untuk mengetahui respon pada sistem, sinyal step gangguan berupa perubahan beban 5-10% diberikan pada area satu dan parameter sistem diubah $\pm 5\%$ dari nilai nominal sistem. Metode kontrol yang diusulkan dibandingkan dengan konvensional kontroler (kontroler integral, kontroler PI), kontroler PI yang dihybrid dengan kontrol optimal LQR, dan fuzzy tuning PI kontroler yang dihybrid dengan kontrol optimal LQR yang ditala menggunakan metode trial-error.

II. METODE PENELITIAN

Sistem tenaga listrik interkoneksi dua area yang dihubungkan dengan sebuah reaktansi saluran X_{tie} di deskripsikan pada Gambar 1(a). Untuk studi Load Frequency Control (LFC), setiap area direpresentasikan sebagai sebuah ekivalen unit pembangkit. Pemodelan seperti ini dapat diterima jika tidak memperhitungkan osilasi dalam tiap-tiap mesin pada tiap-tiap area. Gambar 1(b) menunjukkan rangkaian listrik ekivalen dari sistem, dengan masing-masing area diwakili oleh sebuah sumber tegangan dibelakang

reaktansi ekivalen jika dipandang dari tie bus. Aliran daya dari Area 1 menuju Area 2 adalah,

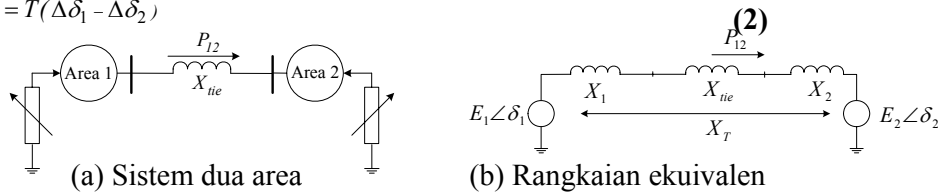
$$P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_T} \sin \delta_{12} \tag{1}$$

dengan $X_T = X_1 + X_{tie} + X_2$, dan $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$. Persamaan (1) dapat dilinearisasi untuk perubahan kecil pada aliran daya jaring ΔP_{12} , maka,

$$\Delta P_{12} = \left. \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12}} \Delta \delta_{12} = T \Delta \delta_{12}$$

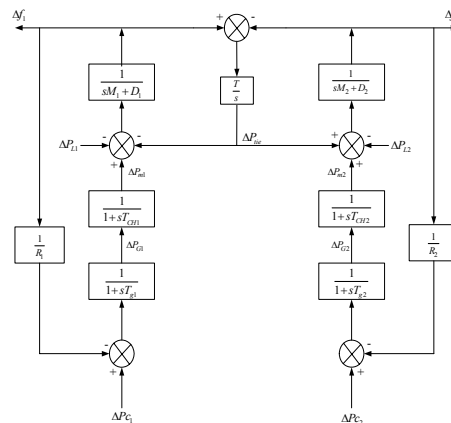
dengan $\Delta \delta_{120} = \Delta \delta_{10} - \Delta \delta_{20}$,

$$\Delta P_{12} = T(\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2)$$



Gambar 1, Representasi sistem tenaga dua area

Model linear diagram blok sistem tenaga listrik dua area yang digunakan pada tugas akhir ini ditunjukkan pada Gambar 2. Data parameter dan keterangan yang terdapat pada Gambar 2 dapat dilihat pada appendix dan numenklatur.



Gambar 2, Model linear sistem tenaga listrik dua area [8].

Persamaan state space sistem tenaga listrik yang dideskripsikan pada Gambar 2 dapat ditulis sebagai berikut

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}d(t) \tag{3}$$

$$y(t) = \mathbf{C}x(t) \tag{4}$$

dengan, \mathbf{A} = matriks sistem, $x(t)$ = variable keadaan, $\in \mathfrak{R}^n$

- B = matriks input u(t)= variabel input, ∈ ℝ m
- C = matriks pengukuran y(t) = variable output, ∈ ℝ r
- L = matriks gangguan

Komponen x(t), u(t), d(t) pada sistem yang dijelaskan pada gambar 2 dapat ditulis sebagai persamaan berikut

$$x(t) = [\Delta f_1 \Delta P_{m1} \Delta P_{G1} \Delta P_{tie} \Delta f_2 \Delta P_{m2} \Delta P_{G2}]^T$$

$$u(t) = [\Delta P_{c1} \Delta P_{c2}]^T$$

$$d(t) = [\Delta P_{L1} \Delta P_{L2}]$$

III. METODE YANG DIGUNAKAN

2.1 Kontroler Integral [3]

Penguatan kontroler integral K_i dipasang pada sistem tenaga listrik untuk mengontrol sinyal ACE pada area ke-i dideskripsikan pada Gambar 3(a), Sedangkan diagram blok pemasangan kontroler integral pada LFC untuk mengontrol sinyal ACE pada sistem tenaga listrik dua area di deskripsikan pada Gambar 3(b). Kontrol sinyal yang baru akan menjumlahkan deviasi aliran daya tie line dengan deviasi frekuensi yang dikalikan dengan pembobot faktor bias B. Penambahan pengendali ini untuk mengontrol sinyal ACE agar frekuensi steady-state menuju nol (nilai nominal).

Kontrol input Δe_1 dan Δe_2 akan menjadi sinyal input untuk ΔP_{c1} dan ΔP_{c2} yang

dapat ditulis,

$$\Delta e_i = -K_{I_i} \int ACE_i dt = -K_{I_i} \int (\Delta P_{tie-i} + B_i \Delta f_i) dt \tag{5}$$

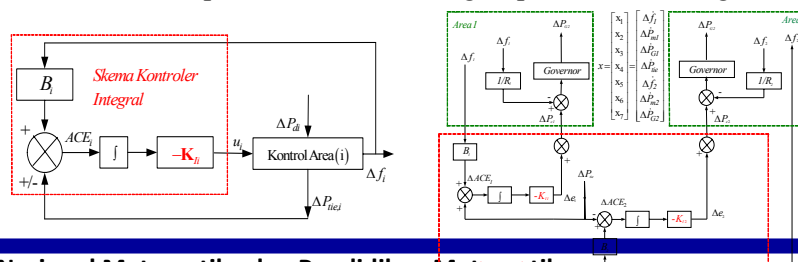
Jika persamaan (5) diturunkan akan menjadi

$$\Delta \dot{e}_i = -K_{I_i} (ACE_i) = -K_{I_i} (\Delta P_{tie-i} + B_i \Delta f_i) \tag{6}$$

atau dalam bentuk matriks $\Delta \dot{e}_i = -K_{I_i} Cx$ (7)

dengan $K_I = \begin{bmatrix} k_{I1} & 0 \\ 0 & k_{I2} \end{bmatrix}$ (8)

Gambar 3, Aplikasi Kontroler Integral pada sistem tenaga listrik



(a)

(b)

(a) Kontroler Integral pada sistem tenaga listrik area ke -*i*

(b) Kontroler Integral pada sistem tenaga listrik dua area [3]

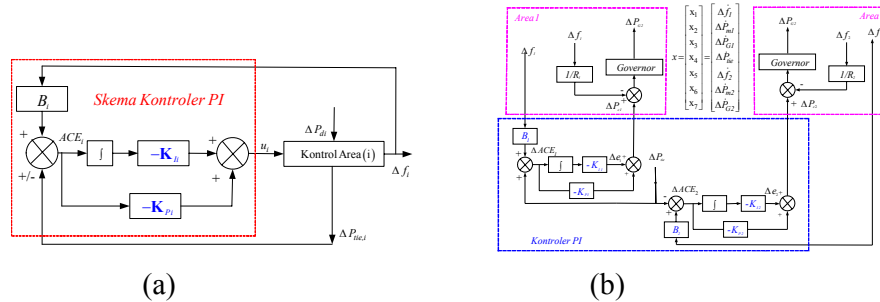
Menggunakan persamaan (9) dan (3) dapat terbentuk persamaan keadaan yang baru

adalah $\dot{x}_N = \mathbf{A}_N x_N + \mathbf{L}_N d$ (10)

$$x_N = \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ -\mathbf{K}_I \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2 Kontroler Proportional-Integral (PI)

Aplikasi Kontroler PI pada sistem tenaga listrik merupakan pengembangan dari Gambar 3. Penguatan kontroler integral \mathbf{K}_I dan kontroler proporsional \mathbf{K}_P adalah untuk mengontrol sinyal *Area Control Error* (ACE). Variabel keadaan baru $z(t)$ ditambahkan pada Gambar 3 sebagai state untuk penguatan kontroler integral \mathbf{K}_i . Sedangkan Variabel keadaan baru $v(t)$ ditambahkan pada Gambar 3 sebagai state untuk penguatan kontroler proporsional \mathbf{K}_i . Diagram blok pemasangan kontroler integral dan kontroler proporsional untuk mengontrol sinyal ACE pada sistem tenaga listrik dua area di deskripsikan pada Gambar 4. **Gambar 4.** Aplikasi Kontroler PI pada sistem tenaga listrik



(a) Kontroler PI yang dipasang pada sistem tenaga listrik area ke-*i*.

(b) Kontroler PI pada sistem tenaga listrik dua area

Kontroler penguatan integral pada Gambar 3 dituliskan sebagai berikut,

$$\mathbf{K}_I = \begin{bmatrix} k_{I1} & 0 \\ 0 & k_{I2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Variabel baru $z(t)$ dan $v(t)$ untuk ACE menambahkan Persamaan (13) untuk memecahkan permasalahan yang dituliskan dalam persamaan variabel keadaan baru sebagai berikut,

$$\dot{x}_N(t) = \mathbf{A}_N x_N(t) + \mathbf{B}_N u(t) + \mathbf{L}_N d(t) \quad (13)$$

$$y_N(t) = \mathbf{C}_N x_N(t) \quad (14)$$

dengan, $x_N(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix}$; $y_N(t) = \begin{bmatrix} y(t) \\ z(t) \end{bmatrix}$; $z(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix}$ $z_1(t) = \int ACE_1 dt$ dan $z_2(t) = \int ACE_2 dt$
 $v_1(t) = ACE_1(t)$ dan $v_2(t) = ACE_2(t)$ (15)

$$A_N = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix}, B_N = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, L_N = \begin{bmatrix} L \\ 0 \end{bmatrix}, C_N = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

Sinyal kontrol ΔP_c dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 \\ 0 & k_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta e_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Menggunakan Persamaan (12) dan (16), sinyal kontrol ΔP_c dapat dituliskan sebagai

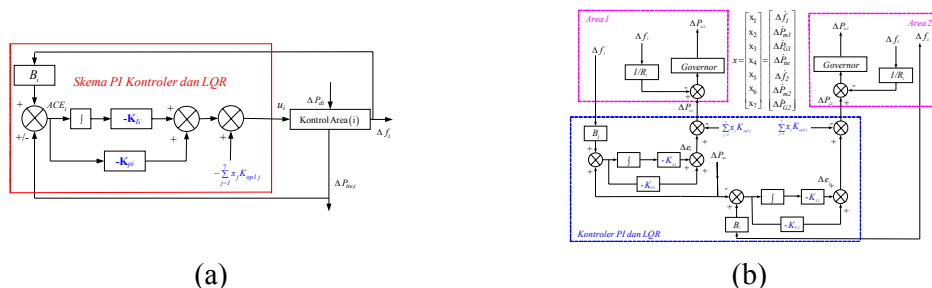
berikut,
$$\begin{bmatrix} \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \end{bmatrix} = u = -K_P \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{I1} & 0 \\ 0 & k_{I2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Atau
$$u = -K_P \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - K_I \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.3 Kontroler Proportional-Integral dan Kontrol Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR)

Aplikasi kontroler PI dan kontrol optimal LQR pada sistem tenaga listrik merupakan pengembangan dari aplikasi kontroler PI pada Gambar 4. Penambahan penguatan K_{op} kontrol optimal LQR pada gambar 4 adalah untuk menambah efek redaman pada sistem sehingga didapatkan respon dinamik sistem yang optimum. Diagram blok aplikasi kontroler PI untuk mengontrol sinyal ACE_i dan penguatan K_{op} kontrol optimal pada sistem tenaga listrik dua area di deskripsikan pada Gambar 5. Sinyal kontrol ΔP_{ci} pada persamaan (17) akan menjadi seperti pada persamaan (20).

Gambar 5, Aplikasi kontroler PI dan kontrol optimal K_{op} pada sistem tenaga listrik
 Sinyal kontrol ΔP_c dapat dituliskan sebagai berikut,



- (a) Kontroler PI dan kontrol optimal K_{op} pada sistem tenaga listrik area ke $-i$.
- (b) Kontroler PI dan kontrol optimal K_{op} pada sistem tenaga listrik dua area

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 \\ 0 & k_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta e_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^7 x_j k_{p1j} \\ \sum_{j=1}^7 x_j k_{p2j} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Menggunakan Persamaan (12) dan (15), Persamaan (19) dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \end{bmatrix} = u = -\mathbf{K}_P \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{I1} & 0 \\ 0 & k_{I2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} - \mathbf{K}_{opt} x \quad (20)$$

Atau
$$u = -\mathbf{K}_P \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \mathbf{K}_I \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} - \mathbf{K}_{opt} x \quad (21)$$

Penguatan kontrol optimal \mathbf{K}_{op} pada persamaan (21) diperoleh melalui penyelesaian *Algebraic Riccati Equation* (ARE) [9],

$$-\dot{S} = \mathbf{A}^T S + S \mathbf{A} - S \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T S + \mathbf{Q} \quad (22)$$

dengan matriks $\mathbf{Q} \geq 0$, $\mathbf{R} > 0$, matriks \mathbf{K}_{op} dapat diperoleh,

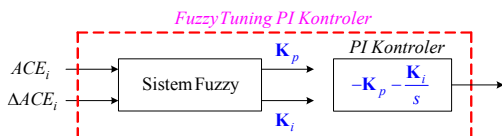
$$\mathbf{K}_{op} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T S \quad (23)$$

Menggunakan nilai terbaik matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} untuk meminimais performansi indeks dalam perhitungan iterasi seperti tertulis dibawah ini,

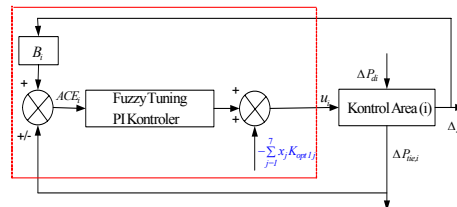
$$J^*(t_0) = \frac{1}{2} x^T(t_0) S(t_0) x(t_0) \quad (24)$$

2.4 Fuzzy Logic dan Kontrol Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR)

Komponen Fuzzy menggunakan dua input dan dua output yang dimodelkan pada Gambar 6. Fuzzy tuning PI dan kontrol optimal \mathbf{K}_{op} diinputkan ke nilai referensi beban pada unit governor (set point load governor) yang dideskripsikan pada Gambar 7.

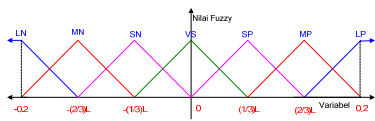


Gambar 6, Fuzzy tuning PI

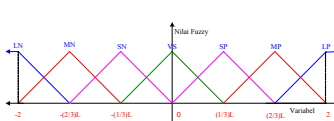


Gambar 7, Fuzzy tuning PI dan kontrol optimal LQR

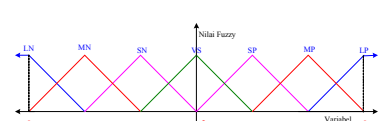
Fungsi keanggotaan (membership function) variabel input ACE_i dan ΔACE_i , output \mathbf{K}_{fi} dan \mathbf{K}_{pi} dibagi dalam tujuh triangular fuzzy fungsi keanggotaan seperti ditunjukkan pada Gambar 8-10, yaitu Fungsi Keanggotaan variabel input ACE_i dan ΔACE_i , Fungsi keanggotaan variabel output \mathbf{K}_{fi} , dan Fungsi keanggotaan variabel output \mathbf{K}_{pi}



Gambar 8



Gambar 9



Gambar 10,

Aturan fuzzy untuk penguatan K_{Pi} dan K_{Ii} adalah:

If ACE_i adalah A_1^i and ΔACE_i adalah A_2^i then Gain Proportional adalah Z_1^i and Gain Integral adalah Z_2^i dengan $A_1^i, A_2^i, Z_1^i,$ dan Z_2^i adalah himpunan fuzzy rule ke-i.

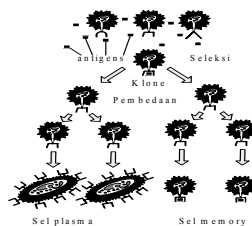
Pada makalah ini, aturan Fuzzy yang digunakan untuk K_{Pi} dan K_{Ii} dibuat sama. Aturan fuzzy yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Table 1. Tabel Aturan Fuzzy

ΔACE_i ACE_i	LN	MN	SN	VS	SP	MP	LP
LP	VS	SP	MP	LP	LP	LP	LP
MP	SN	VS	SP	MP	MP	LP	LP
SP	MN	SN	VS	SP	SP	MP	LP
VS	MN	MN	SN	VS	SP	MP	MP
SN	LN	MN	SN	SN	VS	SP	MP
MN	LN	LN	MN	MN	SN	VS	SP
LN	LN	LN	LN	LN	MN	SN	VS

2.4. Artificial Immune System (AIS) via Clonal Selection [10]

AIS merupakan algoritma optimisasi yang menirukan sistem kekebalan tubuh manusia (sistem *immune*). Dalam sistem *immune*, *lymphocyte* berperan dalam membantu proses produksi *antibody*. *Lymphocyte* mempunyai dua komponen yang utama, yaitu *B-lymphocytes* dan *T-lymphocytes*. *B-lymphocytes* adalah sel yang dihasilkan oleh *bone marrow* dan *T-lymphocytes* dihasilkan oleh *thymus*. *B-lymphocytes* dapat diprogram untuk menghasilkan satu *antibody* yang diletakkan pada permukaan luar *lymphocyte*. *Antibody* ini bertindak sebagai *receptor*.



Gambar 11. Prinsip dari Clonal Selection.

Mekanisme produksi *antibody* diatur dengan menggunakan *T-lymphocytes*. Prinsip dari *clonal selection* ditunjukkan pada Gambar 11.

2.5 Implementasi AIS

Perhitungan AIS digunakan untuk desain kontroler parameter matriks pembobot **Q, R**, fungsi keanggotaan fuzzy untuk mendapatkan performansi yang bagus pada sistem tenaga listrik.

Gambar12, Matriks **Q,R** dan fungsi keanggotaan fuzzy dalam bentuk struktur Antibodi

- (1) (2) (3)

(1)Struktur antibodi matriks **Q**;(2)Struktur antibodi matriks **R**;(3)Struktur antibodi fungsi keanggotaan fuzzy input $ACE_i, \Delta ACE_i$, output K_{Ii}, K_{Pi}

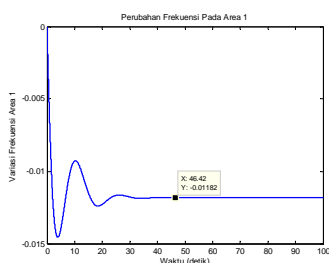
Struktur antibodi matriks pembobot **Q, R** dan fungsi keanggotaan fuzzy ditunjukkan pada Gambar 12. Mekanisme produksi *antibody* diatur dengan menggunakan *T-lymphocytes*. Prinsip dari *clonal selection* ditunjukkan pada Gambar 11.

III. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

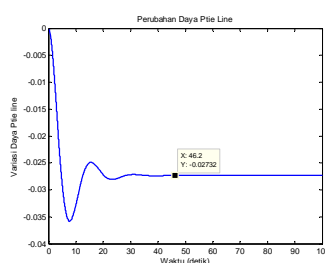
Simulasi dilakukan menggunakan *Software MatLab* yang diaplikasikan terhadap sistem untuk memberikan informasi performansi dinaimk sistem berdasarkan deviasi frekuensi, dan deviasi daya tie-line sistem tenaga listrik dua area.

Studi Kasus 1,

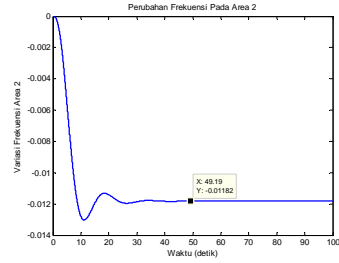
Pada kasus 1, sistem diberi input step gangguan berupa perubahan beban 0.05 pu pada area 1. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 13~Gambar 18.Tanpa menggunakan kontroler :



Gambar 13
Deviasi frekuensi area 1,

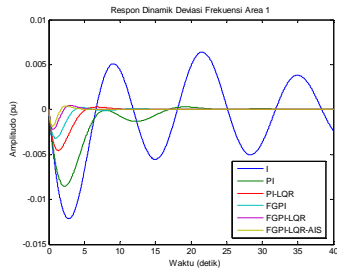


Gambar 14
Deviasi frekuensi area 2

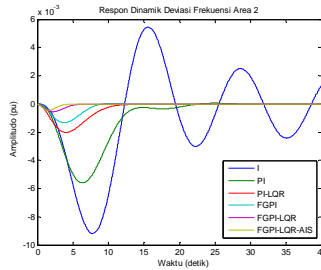


Gambar 15
Deviasi daya tie-line

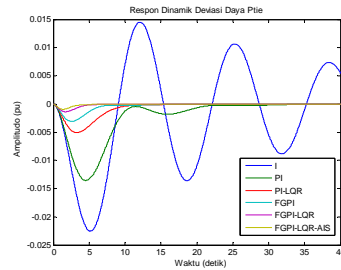
Menggunakan kontroler :



Gambar16
Deviasi frekuensi area 1



Gambar17
Deviasi frekuensi area 2



Gambar18
Deviasi daya tie-line

Nilai *overshoot* dan *settling time* dari Gambar 16 sampai Gambar 18 ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5, Overshoot (pu) studi kasus 1

	Integral Kontroler	PI Kontroler	PI-LQR
Δf_1	-0.01215	-0.008506	-0.00455
Δf_2	-0.009183	-0.0056	-0.002008
ΔP_{tie}	-0.02252	-0.01354	-0.005053
	FGPI	FGPI-LQR	FGPI-LQR-AIS
Δf_1	-0.003196	-0.002191	-0.00181
Δf_2	-0.001326	-0.000523	-0.0004459
ΔP_{tie}	-0.003052	-0.001383	-0.0009332

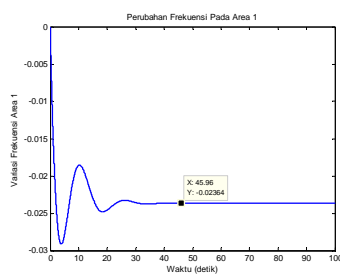
Tabel 6, Settling time (detik) studi kasus 1

	Integral Kontroler	PI Kontroler	PI-LQR
Δf_1	153.2	28.19	23.61
Δf_2	154.7	31.97	19.75
ΔP_{tie}	157.2	33.02	19.32
	FGPI	FGPI-LQR	FGPI-LQR-AIS
Δf_1	18.47	11.16	8.36
Δf_2	17.61	13.85	9.48
ΔP_{tie}	18.11	11.41	10.39

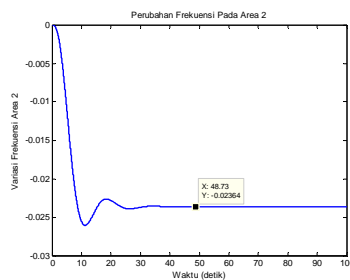
Studi Kasus 2,

Pada kasus 2, sistem diberi input step gangguan berupa perubahan beban 0.1 pu pada area 1. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 19~ Gambar 24.

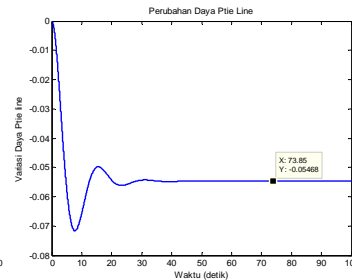
Tanpa menggunakan kontroler :



Gambar 19,
Deviasi frekuensi area 1

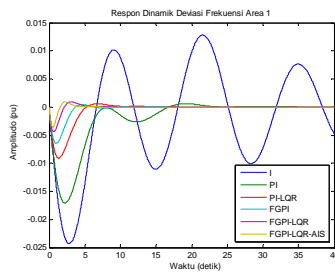


Gambar 20,
Deviasi frekuensi area 2

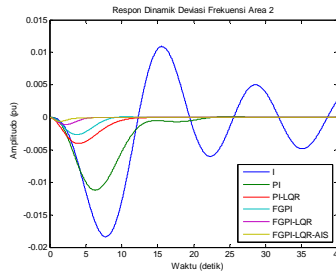


Gambar 21,
Deviasi daya tie-line

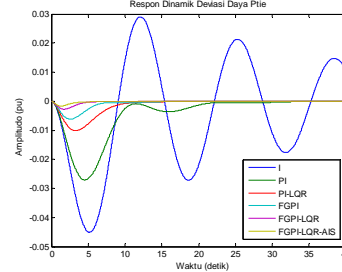
Menggunakan kontroler :



Gambar 22
Deviasi frekuensi area 1



Gambar 23
Deviasi frekuensi area 2



Gambar 24,
Deviasi daya tie-line

Nilai *overshoot* dan *settling time* dari Gambar 22 sampai Gambar 24 ditunjukkan pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7, Overshoot (pu) studi kasus 2

	Integral Kontroler	PI Kontroler	PI-LQR
Δf_1	-0.02423	-0.01705	-0.009098
Δf_2	-0.01837	-0.01119	-0.004014
ΔP_{tie}	-0.04487	-0.02704	-0.01011
	FGPI	FGPI-LQR	FGPI-LQR-AIS
Δf_1	-0.006281	-0.004369	-0.003465
Δf_2	-0.002652	-0.00106	-0.0006066
ΔP_{tie}	-0.006128	-0.002765	-0.001627

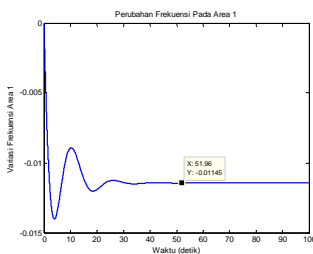
Tabel 8, Settling time (detik) studi kasus2

	Integral Kontroler	PI Kontroler	PI-LQR
Δf_1	169.6	33.06	17.66
Δf_2	172.6	28.24	17.56
ΔP_{tie}	185.2	33.93	21.73
	FGPI	FGPI-LQR	FGPI-LQR-AIS
Δf_1	17.3	11.46	8.64
Δf_2	16	13.43	10.36
ΔP_{tie}	20.78	12.22	10.91

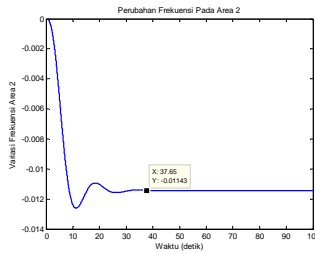
Studi Kasus 3,

Pada kasus 3, sistem diberi input step gangguan berupa perubahan beban 0.05 pu pada area 1 dan parameter sistem diubah +5%. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 25~ Gambar 30.

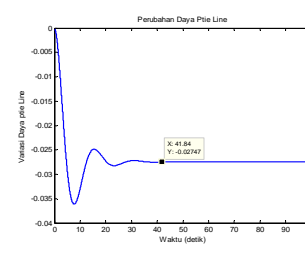
Tanpa menggunakan kontroler :



Gambar 25
Deviasi frekuensi area 1

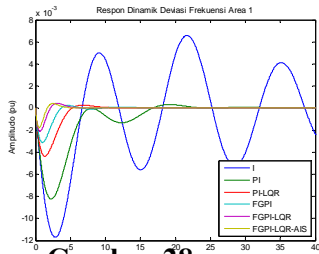


Gambar 26
Deviasi frekuensi area 2

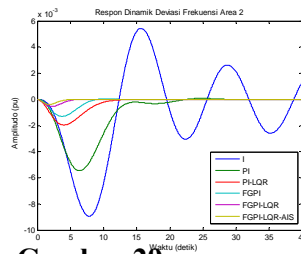


Gambar 27
Deviasi daya tie-line

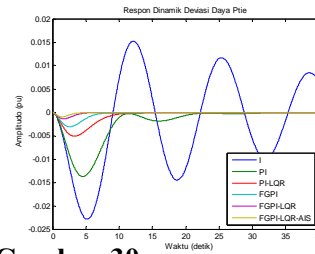
Menggunakan kontroler :



Gambar 28
Deviasi frekuensi area 1



Gambar 29
Deviasi frekuensi area 2



Gambar 30
Deviasi daya tie-line

Nilai *overshoot* dan *settling time* dari Gambar 28 sampai Gambar 30 ditunjukkan pada Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 9. *Overshoot* (pu) studi kasus 3

	Integral Kontroler	PI Kontroler	PI-LQR
Δf_1	-0.0117	-0.008229	-0.004363
Δf_2	-0.008941	-0.00545	-0.001955
ΔP_{tie}	-0.02289	-0.01373	-0.005045
	FGPI	FGPI-LQR	FGPI-LQR-AIS
Δf_1	-0.003112	-0.002111	-0.001774
Δf_2	-0.001302	-0.000542	-0.0003878
ΔP_{tie}	-0.003108	-0.001401	-0.0009078

Tabel 10. *Settling time* (detik) studi kasus 3

	Integral Kontroler	PI Kontroler	PI-LQR
Δf_1	207.7	32.67	17.10
Δf_2	200.8	31.96	15.79
ΔP_{tie}	211.1	32.77	18.16
	FGPI	FGPI-LQR	FGPI-LQR-AIS
Δf_1	16.70	10.96	8.54
Δf_2	15.04	13.43	10.90
ΔP_{tie}	17.81	11.26	9.25

Dari Tabel 5 dan Tabel 10 ditunjukkan bahwa metode kontrol yang diusulkan dapat menekan osilasi deviasi Frekuensi Area 1, Area 2, dan deviasi Daya Tie-Line (jaring) sistem dan memperbaiki respon dinamik sistem.

IV. SIMPULAN DAN SARAN

Setelah melakukan simulasi dan analisis hasil simulasi aplikasi *Artificial Immune System* via *Clonal Selection* untuk menala matriks pembobot Q dan R kontrol optimal LQR dan parameter *Fuzzy Logic Controller* yang diterapkan pada *Load Frequency Control* sistem tenaga listrik dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Metode *Artificial Immune System* via *Clonal Selection* dapat diaplikasikan dengan baik untuk mencari parameter optimal matriks pembobot Q dan R kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan parameter *Fuzzy Logic Controller*.
2. *Artificial Immune System* via *Clonal Selection* untuk mencari parameter optimal matriks pembobot Q dan R kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan parameter *Fuzzy Logic Controller* yang di aplikasikan pada *Load Frequency*

Control sistem tenaga listrik dapat berpengaruh positif dalam mempercepat *settling time* dan meredam *overshoot* yang terjadi pada sistem ketika terjadi perubahan beban.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anderson P. M, Fouad A. A, *Power System Control and Stability*, The Iowa State University, Press. 1982.
- [2] Kundur. P, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [3] Imam Robandi, *Desain Sistem Tenaga Modern*, Penerbit Andi Yogyakarta, 2006.
- [4] M.A. Johnson & M.J. Grimble, ‘‘Recent Trends In Linear Optimal Quadratic Multivariable Control System Design’’, *IEEE Proc*, Vol. 134, Pt.D, No.1, January 1987.
- [5] Jawad Talaq and Fadel Al-Basri. ‘‘Adaptive Gain Scheduling for Load Frequency Control’’. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol.14. No.1. February 1999. pp.145-150.
- [6] Danang Agus Sanjaya, *Aplikasi Fuzzy Logic Controller dengan pembangkit aturan otomatis menggunakan Genetic Algorithm pada Load Frequency Control*, Tugas Akhir S-1, Jurusan Teknik Elektro, ITS Surabaya, 2006.
- [7] Marwan Rosyadi, Imam Robandi, *Optimal Reactive Power Compensation on Jawa-Bali Grid System using Artificial Immune System via Clonal Selection Algorithm*, Proceeding Industrial Electronic Seminar (IES), Nopember, 2005, hal 61-66.
- [8] Hadi Saadat, *Power System Analysis 2nd Edition*, McGrawHill, 2004.
- [9] Frank Lewis, *Optimal Control*, John Wiley & Sons, Inc, 1986.
- [10] De castro Leandro N, Fernando Jose Van Zuben, (2000), ‘‘Artificial Immune System : Basic theory – A Survey of Applications’’, Technical Report, TR-DCA 02/00, February.