

Perancangan dan Implementasi Metode Kontrol Optimal LQR untuk Pengendalian Frekuensi pada Simulator Pembangkit Listrik Generator

Ahmad Roni Utomo dan Mochammad Rameli

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: rameli@ee.its.ac.id

Abstrak—Penelitian ini membahas masalah pengaturan keluaran frekuensi sebuah pembangkit generator set (*genset*) yang memiliki penggerak utama mesin bensin 4-tak dengan sistem bahan bakar menggunakan karburator dan kapasitas 1KVA. Frekuensi tegangan terbangkit berhubungan dengan kecepatan putar penggerak utama. Generator set (*gen set*) direpresentasikan dengan model matematis yang diperoleh dari hasil identifikasi. Metode kontrol optimal LQR (*Linier Quadratic Regulator*) digunakan untuk mengontrol agar keluaran frekuensi generator selalu berada di nilai tertentu pada beban yang berubah - ubah. Kontroler hasil desain diaplikasikan pada sistem pembangkit generator set (*genset*). Hasil simulasi serta implementasi metode kontrol optimal LQR (*Linier Quadratic Regulator*) pada sistem pembangkit generator set (*genset*) menunjukkan bahwa respon mampu mengikuti sinyal referensi yang diberikan serta memiliki indeks performansi minimal.

Kata Kunci—Kontrol Frekuensi, Generator set, LQR

I. PENDAHULUAN

TENAGA listrik sekarang ini sudah menjadi suatu kewajiban dan bahkan akan menjadi kebutuhan primer di masa yang akan datang terutama didaerah perkotaan. Semakin berkembang dan meningkat kebutuhan akan tenaga listrik, maka kestabilan pada sistem tenaga listrik menjadi hal yang sangat penting dan harus diperhatikan. Salah satu pembangkit Listrik yang sering digunakan adalah generator.

Salah satu masalah yang sering terjadi pada generator adalah bila suatu generator mendapatkan pembebanan yang yang berubah - ubah, maka dapat mengakibatkan generator tersebut tidak bekerja dengan baik (keluaran generator tidak sesuai dengan yang diinginkan).

Sistem pembangkit listrik diharapkan dapat beradaptasi dengan cepat terhadap beban yang berubah-ubah dan dengan perubahan yang cukup drastis. Hal ini dikarenakan, peralatan listrik yang membebani pembangkit listrik memiliki ambang batas tertentu pada frekuensi dan nilai tegangan terbangkit. Terdapat dua standar kedua parameter ini, yaitu frekuensi 50 Hz dan tegangan 220 volt serta frekuensi 60 Hz dan tegangan 110 volt.

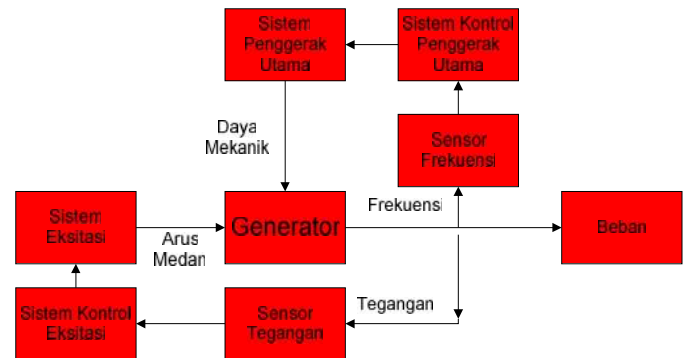
Untuk mengatasi pengaruh perubahan beban yang dapat mempengaruhi keluaran pada sistem pembangkit listrik dan masalah kontinuitas sumber daya, maka diperlukan metode

kontrol yang dapat mempertahankan nilai frekuensi keluaran terhadap pembebanan tertentu. Kontroler yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis metode kontrol optimal LQR (*Linier Quadratic Regulator*).

II. DASAR TEORI

A. Sistem Pengaturan Pembangkit Listrik

Pembangkit listrik berfungsi untuk memberikan daya listrik kepada pengguna sesuai kebutuhan. Oleh karena itu dibutuhkan sistem pengaturan pembangkit listrik seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar1. Skema Pengaturan Kecepatan Generator [1]

Terdapat dua sistem kontrol utama pada pembangkit listrik yaitu pengaturan penggerak utama serta pengaturan arus medan. Frekuensi tegangan terbangkit tergantung pada kecepatan putar generator. Seperti terlihat pada persamaan 1.

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \tag{1}$$

Dimana:

f = frekuensi tegangan terbangkit(Hertz)

n = Kecepatan putar generator (RPM)

p = Jumlah pole

Tegangan terbangkit tergantung pada kecepatan putar generator dan arus medan pada rotor. Seperti terlihat pada persamaan 2.

$$E = c \cdot n \cdot \phi \tag{2}$$

Dimana:

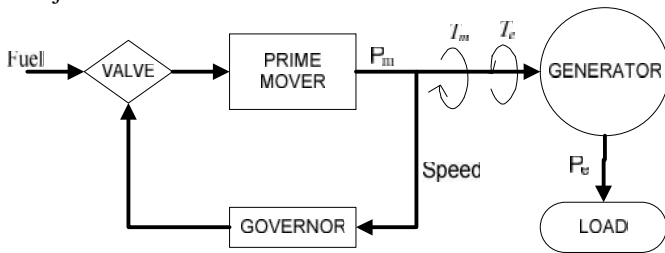
E = Tegangan terbangkit (Volt)

- n = Kecepatan putar generator (RPM)
- ϕ = Fluks medan(Wb)
- c = Konstanta generator

Pengaturan sistem pembangkit bertujuan untuk menjaga frekuensi tegangan terbangkit dan tegangan terbangkit agar selalu berada pada nilai tetap dengan kondisi beban berubah.

B. Persamaan Gerak Generator[2]

Pada sistem pembangkit listrik, terdapat dua torsi yang mempengaruhi gerak generator. Kedua torsi tersebut adalah torsi mekanik dan torsi elektromagnetik. Torsi mekanik dihasilkan oleh penggerak utama sedangkan torsi elektromagnetik diakibatkan oleh keberadaan beban yang tersambung dengan terminal tegangan generator. Skema konsep pengaturan kecepatan pada sebuah unit pembangkit ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Skema Pengaturan Kecepatan Generator.

Kedua torsi tersebut mengakibatkan percepatan generator. Hal ini ditunjukkan pada persamaan 3.

$$T_a = T_m - T_e \tag{3}$$

Dimana

$$T_a = \text{Torsi akselerasi(N.m)}$$

$$T_m = \text{Torsi Mekanik (N.m)}$$

$$T_e = \text{Torsi elektromagnetik (N.m)}$$

Dalam hal pengaturan frekuensi terhadap perubahan beban, dipilih perolehan hubungan antara daya mekanik dan daya listrik daripada torsi. Hubungan antara daya dengan torsi ditunjukkan oleh persamaan 4.

$$P = \omega_r T \tag{4}$$

Perubahan daya akan mengakibatkan perubahan kecepatan rotor dan torsi. Hal ini ditunjukkan oleh persamaan 5.

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T) \tag{5}$$

Dengan mengabaikan orde yang lebih tinggi, didapatkan persamaan 6.

$$\Delta P = \omega_0 \Delta T + T_0 \Delta\omega_r \tag{6}$$

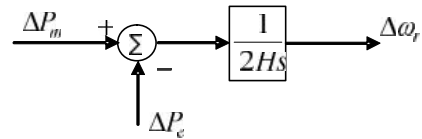
Hubungan perubahan daya elektromagnetik dan daya mekanik dengan memanfaatkan persamaan 5 ditunjukkan oleh persamaan 7.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 (\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0}) \Delta\omega_r \tag{7}$$

Pada kondisi steady state, torsi elektromagnetik dan mekanik sama, dan kecepatan yang direpresentasikan dengan $\omega_0 = 1$. Maka didapat persamaan 8.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \tag{8}$$

Melalui persamaan 8 dapat digambarkan diagram blok yang menunjukkan perubahan daya dengan perubahan kecepatan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Blok Hubungan daya dengan kecepatan.

III. PERANCANGAN SISTEM

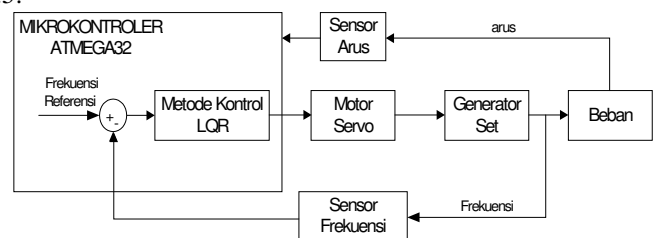
A. Arsitektur Sistem

Sistem terdiri dari generator set 1KV_a, rangkaian komparator, sistem minimum mikrokontroler ATMEGA 32, sistem minimum mikrokontroler ATMEGA 32, rangkaian komunikasi serial, sensor arus dan motor servo. Rangkaian komparator berfungsi untuk memberikan sinyal umpan balik berupa nilai frekuensi terbangkit generator. Sistem minimum mikrokontroler berfungsi untuk kontrol utama sistem dan pengiriman data, rangkaian komunikasi serial berfungsi untuk pengiriman data, sensor arus berfungsi sebagai penanda perubahan beban, dan motor servo sebagai aktuator yang berfungsi untuk menggerakkan *throttle valve* pada karburator.

Nilai frekuensi hasil perhitungan mikrokontrolerakan diolah oleh kontrolerLQR (*Linier Quadratic Regulator*) yang tertanam pada mikrokontroler ATMEGA 32. Kontroler LQR (*Linier Quadratic Regulator*) digunakan untuk memberikan sinyal kontrol ke aktuator sesuai dengan beban yang diberikan pada generator set.Mikrokontroler memberikan sinyal kontrol pada motor servo berupa sinyal PWM. Motor servo menggerakkan *throttle valve* pada karburator yang akan mempengaruhi kecepatan putar *prime-mover*.

B. Blok Diagram Sistem

Pada penelitian ini frekuensi tegangan terbangkit dijaga tetap pada nilai nilai 60 Hz. Dengan menggunakan kontroler 1 maka keluaran frekuensi diharapkan selalu disekitar nilai 60 Hz meskipun beban selalu berubah - ubah. Jumlah arus pada beban menandakan beban listrik yang dihubungkan dengan generator set, sehingga nilai perubahan arus yang diolah oleh mikrokontroler menandakan adanya perubahan beban. Blok diagram sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 4. Diagram Blok Sistem.

Aktuator pada generator set berupa motor servo yang terhubung dengan karburator generator set. Karburator berfungsi untuk mengatur jumlah campuran bensin dan udara

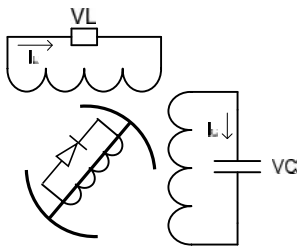
pada silinder mesin. Jumlah campuran bahan bakar dan udara tersebut mempengaruhi putaran mesin yang mempengaruhi frekuensi tegangan terbangkit.

Sensor arus yang terpasang pada sistem berfungsi untuk mengetahui perubahan – perubahan beban, sehingga dapat mempermudah untuk melihat pengaruh perubahan beban terhadap frekuensi. Jumlah beban yang diberikan akan mempengaruhi kecepatan putar generator sehingga diperlukan mekanisme pengaturan kecepatan putar Generator untuk mempertahankan frekuensi tegangan terbangkit.

C. Generator Set

Generator Set memiliki penggerak utama berupa mesin bensin 4-langkah. Mesin bensin tersebut menggunakan sistem bahan bakar karburator [5]. Berikut spesifikasi Generator set yang digunakan

- Kapasitas Daya Maksimum : 1000 VA
- Tegangan rata-rata : 220 Volt
- Frekuensi rata-rata : 60 Hz
- Fasa : 1 Fasa
- Jumlah pole : 2 pole
- Kecepatan rata-rata : 3000 RPM



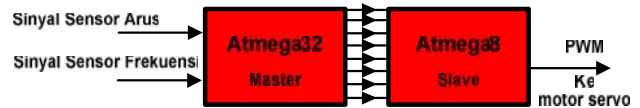
Gambar 5. Konstruksi Generator Sinkron Eksitasi Kapasitor [7].

Jenis generator yaitu generator dengan sistem eksitasi kapasitor. Skema konstruksi generaor sistem eksitasi kapasitor ditunjukkan oleh gambar 2.6. Generator ini memiliki karakteristik tegangan output bergantung kepada kecepatan generator. Tegeangan generator bergantung pula pada jumlah arus yang ada pada beban pada kondisi frekuensi dijaga tetap. Setelah dilakukan tes tegangan output terhadap frekuensi generator. Didapatkan bahwa generator set menghasilkan tegangan 220 volt pada frekuensi 60 Hz. Oleh karena itu ditentukan nilai refrensi frekuensi tegangan terbangkit sebesar 60 Hz.

D. Perangkat Kontrol

Rangkaian kontrol yang digunakan pada tugas akhir ini terdiri dari dua bagian yaitu mikrokontroler master dan mikrokontroler slave. Mikrokontroler master menggunakan ATMEGA32. Mikrokontroler slave menggunakan ATMEGA8. Mikrokontroler master digunakan untuk mengolah semua data yang diperoleh dari *plant* yaitu berupa perhitungan frekuensi tegangan terbangkit, perhitungan sinyal kontrol, dan komunikasi Serial. Mikrokontroler slave digunakan untuk membangkitkan sinyal PWM yang digunakan untuk menggerakkan motor servo. Data hasil perhitungan sinyal kontrol dari mikrokontroler ATMEGA32 dikirim secara paralel ke mikrokontroler ATMEGA8 data sinyal kontrol ini diolah oleh ATMEGA8 lalu dikirm ke pin

data dari motor servo. Skema hubungan antara mikrokontroler master dengan slave ditunjukkan oleh gambar 3.3.



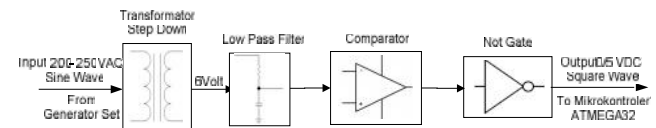
Gambar 6. Skema Hubungan Mikrokontroler Master Dan Slave.

E. Sensor Frekuensi

Sensor frekuensi ini terdiri beberapa komponen yaitu rangkaian lowpas filter, Rangkaian komparator dan rangkaian gerbang NOT. Rangkaian komparator menggunakan IC LM339 yang dapat mengubah keluaran tegangan 200-250 volt dari genset yang berbentuk sinyal sinus menjadi sinyal kotak. Keluaran gelombang kotak dari rangkaian komparator yang bernilai $\pm 5V$ untuk logika *high* dan $\pm 0V$ untuk logika *low* akan dimasukkan ke rangkaian gerbang NOT yang menggunakan IC 74LS05 agar keluaran gelombang kotak menjadi 0 Volt dan 5 Volt. Gelombang kotak ini memiliki periode tertentu, yang mana data periode ini dapat diolah di

mikrokontroler menjadi frekuensi dengan rumus $F = \frac{1}{T}$,

dimana F adalah frekuensi dan T adalah periode dari gelombang kotak. Rangkaian Sensor Frekuensi terdiri dari beberapa bagian dan hubungan antar bagian ditunjukkan oleh Gambar 2.7.



Gambar 7. Skema Sensor Frekuensi.

F. Sensor Arus

Sensor arus digunakan untuk mengetahui jumlah beban yang terpasang pada terminal *generator set*. Bentuk fisik pada gambar III.1. Sensor arus ini berbentuk IC yang berukuran kecil dan dapat digunakan untuk pengukuran arus DC dan AC. Sensor Arus ACS 712ELCTR-20A-T memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Tegangan Supply : 5 V
- Resolusi : 100mV/A
- Arus Maksimum : 20 A
- Keluaran saat Arus Nol : 2.5 V



Gambar 8. Sensor Arus ACS712.

G. Motor Servo

Motor servo berfungsi sebagai *actuator* untuk menggerakkan *throttle* karburator pada *generator set*. Adapun spesifikasi motor servo adalah sebagai berikut :

- Tegangan Kerja : 4.8-6 V

- Kecepatan putar : 0.21sec/60°
- Torsi : 3.3Kg.cm
- Sudut putar : 180°



Gambar 9. Motor Servo

H. Identifikasi Sistem[4]

Identifikasi dinamis plant dilakukan dengan memberikan *set point* yang berubah terhadap waktu. Sinyal PRBS yang diberikan pada sistem terdiri atas sepuluh bit bilangan biner. Respon yang diberikan sistem dapat digunakan sebagai acuan dalam pemodelan *plant*. Sinyal PRBS merepresentasikan variasi bukaan throttle. Model matematika yang didapatkan merupakan hubungan antara bukaan throttle valve dalam derajat dengan frekuensi tegangan output. Identifikasi dilakukan pada tiga kondisi beban yaitu pada kondisi beban minimal, nominal dan maksimal. Beban yang diberikan pada generator set berupa lampu pijar 100 watt dengan jumlah total 6 buah. Beban minimal 2 buah lampu, nominal 4 buah lampu, dan maksimal 6 buah lampu.

Proses pemodelan respon hasil identifikasi dinamis terdiri atas tiga tahap, yaitu [3]:

1. Perhitungan parameter parameter ARMAX dengan metode *standard least square*
2. Melakukan Transformasi-Z terhadap pemodelan ARMAX, dengan waktu sampling 0.2 detik dan dengan metode *zero-order hold*
3. Melakukan transformasi terhadap hasil transformasi Z pada poin 2 ke dalam domain-S hingga diperoleh fungsi alih sistem.

Pengambilan data pada tiap-tiap beban yang diberikan dilakukan sebanyak lima kali. Dari kelima data tersebut didapatkan model matematika dengan nilai RMSE terkecil. Transfer function yang didapatkan pada tiap-tiap beban ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1.

Transfer function derajat bukaan *throttle* dengan frekuensi Tegangan terbangkit Generator set

Beban	Transfer Function	Rmse
Minimal (200 watt)	$G(s) = \frac{0.8463s + 2.017}{s^2 + 2.366s + 0.2736}$	2.2497 %
Nominal (400 watt)	$G(s) = \frac{0.9964s + 4.918}{s^2 + 2.639s + 0.912}$	1.7137 %
Maksimal (600 watt)	$G(s) = \frac{0.7806s + 1.871}{s^2 + 2.531s + 0.3553}$	1.6920 %

I. Perancangan Kontroler LQR[8]

Pada penelitian ini kontroler optimal LQR digunakan untuk mendapatkan sistem yang stabil, yaitu mendekati *set point*, matriks pembobot Q dan R didapat dengan melakukan *tuning (trial and error)*, sehingga diharapkan matriks

pembobot yang didapat, mampu melakukan proses optimasi. Berdasarkan hasil identifikasi maka dipilih persamaan fungsi alih plant sebagai berikut :

$$\frac{F(s)}{\theta(s)} = \frac{0.9964s + 4.918}{s^2 + 2.639s + 0.912} \tag{9}$$

Dari persamaan fungsi alih diatas maka diperoleh persamaan sate berikut :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0.912 & -2.639 \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} 2.2885004 \\ 0.0064 \end{bmatrix}$$

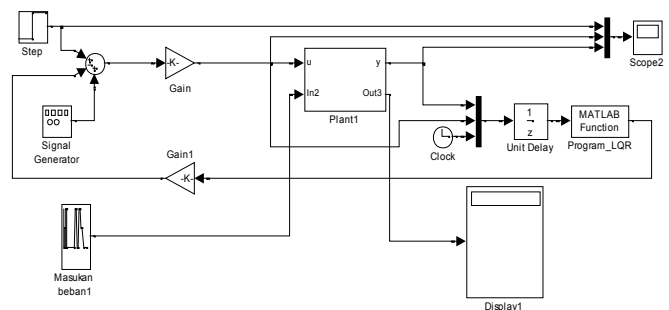
$$C = [1 \ 0] D = 0$$

Untuk mengubah persamaan alih menjadi persamaan *state* maka digunakan persamaan yang menghubungkan antara frekuensi dan turunan frekuensi, berikut adalah persamaan yang digunakan :

$$X_1 = F \tag{10}$$

$$X_2 = \dot{F} - 0.9964\theta \tag{11}$$

Matrik A, B, C, D, persamaan (3.1) dan persamaan (3.2) digunakan untuk mendesain kontroler LQR di *software* MATLAB pada *simulink* untuk *men-tuning* nilai Q dan R. Berikut adalah program *simulink* yang digunakan.



Gambar 10. Simulasi metode kontrol LQR pada *genset*.

Pada blok “MATLAB FUNCTION” berisi *listing* algoritma program LQR (*Linier Quadratic Regulator*) yang dibuat menggunakan editor pada MATLAB berupa *m.file*, berikut adalah *listing* program yang dibuat :

```
u1=K1*fk;
u2=K2*((fk-fkm1)/ts-0.9964*uk);
uf=u1+u2;
```

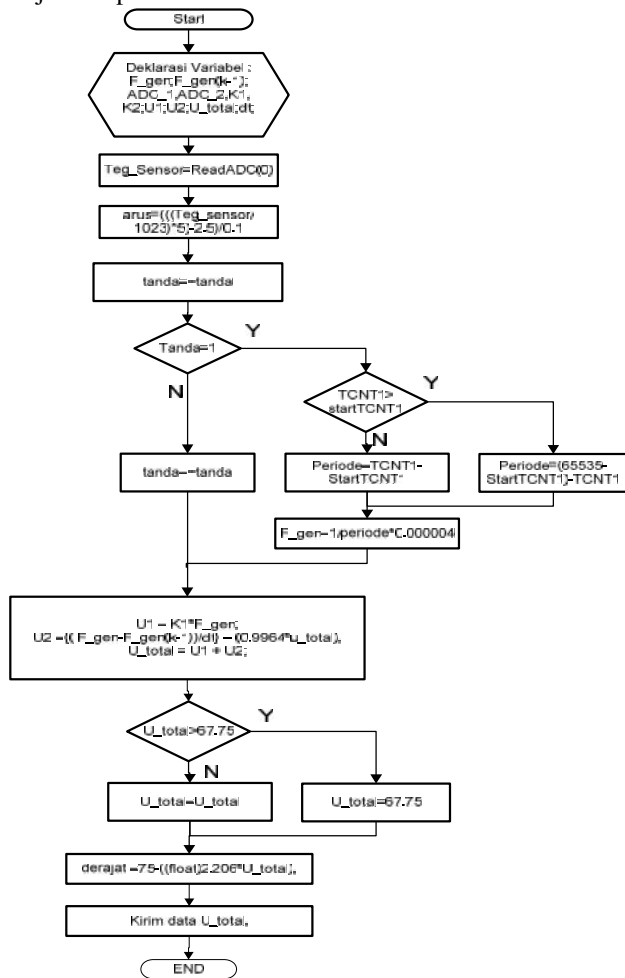
Nilai K1 dan K2 diperoleh dari program berikut ini :

```
A=[0 1; -0.912 -2.639]
B=[0.9964; 2.2885004]
C=[1 0]
D=0
R=(*tuning) ..... Tuning nilai R
Q=(*tuning) *eye(2) ..... Tuning nilai Q
[K1 K2]=lqr(A,B,Q,R)
```

Pada *listing* program diatas nilai Q dan R dapat di-*tuning* dengan mengisi variabel pada (***tuning**), hasil *running* program diatas adalah mendapatkan nilai K (K1 dan K2).

J. Perancangan Algoritma Kontroler

Implementasi kontroler LQR (Linier Quadratic Regulator) pada mikrokontroler menggunakan bahasa C dalam pemrogramannya. Flowchart Proses penalaan parameter PID ditunjukkan pada Gambar III.8.



Gambar 11. Diagram Alir metode kontrol LQR pada pengaturan frekuensi

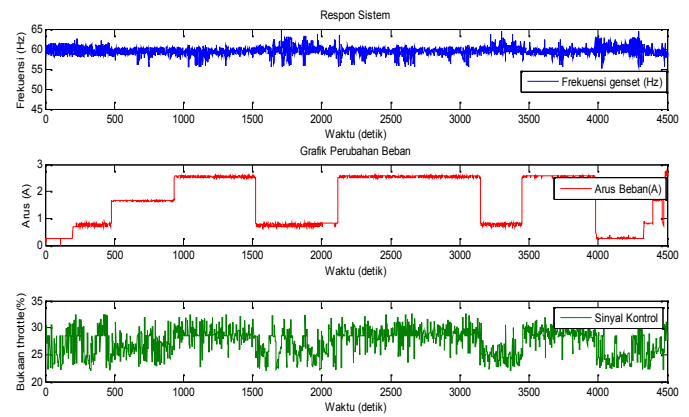
Nilai K1 dan K2 yang digunakan dalam program didapat dari hasil perhitungan simulasi menggunakan MATLAB. Dengan mengubah nilai Q dan R maka diperoleh K1 dan K2 yang berbeda – beda.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISA

Pengujian kontroler dilakukan dengan memberikan perubahan beban pada sistem. Diharapkan kontroler dapat memberikan aksi kontrol terhadap perubahan beban yang terjadi. Pengujian dilakukan pada saat sistem dalam kondisi steady state. Pada pengujian dilakukan 3 kali percobaan dengan nilai Q dan R yang berbeda – beda.

Pada bagian ini akan ditunjukkan respon sistem ketika diberi beban minimal (200 Watt), nominal (400 Watt) dan maksimal (600 Watt). Berikut adalah grafik hasil implementasi :

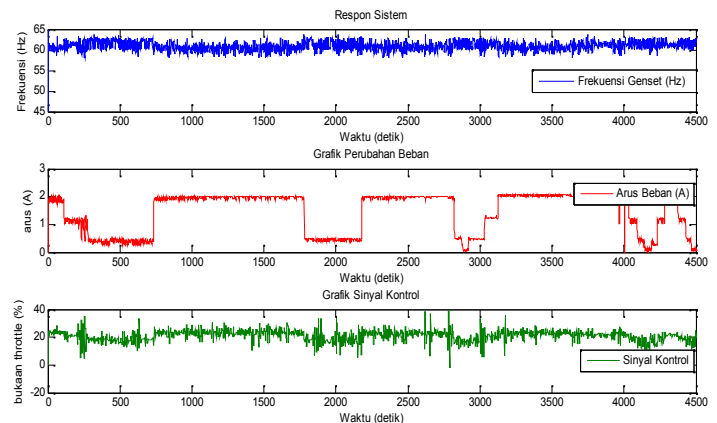
1) Parameter dengan Q=2 dan R=1 set point60 Hz.



Gambar 12. Hasil respon Q=2 dan R=1

Dengan mengguakan software MATLAB, pada percobaan ini kontroler memiliki indeks performansi J = 7.521.

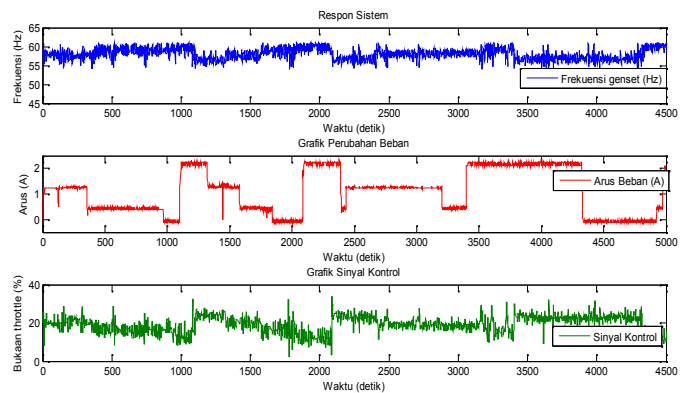
2) Parameter Q=1.5 dan R=1 dengan set point60 Hz.



Gambar 14. Hasil respon Q=1.5 dan R=1

Dengan mengguakan software MATLAB, pada percobaan ini kontroler memiliki indeks performansi J = 5.67.

3) Parameter Q=0.5 dan R=1.5 dengan set point60 Hz.



Gambar 15. Hasil respon Q=0.5 dan R=1.5

Dengan mengguakan software MATLAB, pada percobaan ini kontroler memiliki indeks performansi J = 2.03.

Dari ketiga percobaan yang dilakukan hasil yang paling optimum adalah ketika nilai $Q=1.5$ dan $R=1$, respon sistem stabil pada *set point* yang diinginkan yaitu 60 Hz dan sinyal kontrol yang dihasilkan tidak terlalu besar dibandingkan dengan dua percobaan yang lainnya. Hasil respon sistem ketika nilai $Q=2$ dan $R=1$ memiliki nilai kesalahan *steady state* paling kecil tapi sinyal kontrol yang dihasilkan cukup besar, sedangkan ketika nilai $Q=0.5$ dan $R=1.5$ nilai sinyal kontrolnya paling kecil tetapi kesalahan *steady state* cukup besar.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Dari pengujian dan analisa yang telah dilakukan pada pengerjaan Tugas Akhir ini diperoleh beberapa kesimpulan.

1. Disain LQR dirancang bukan untuk proses regulasi pada saat sistem mencapai *steady state*.
2. Dari ketiga percobaan respon yang paling baik adalah ketika nilai $Q=1.5$ dan $R=1$.
3. Saat *plant* diberi beban tertentu, dengan kontroler LQR maka respon akan mengejar *setpoint*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada orang tua penulis yang selalu memberikan doa serta dukungan tulus tiada henti, Bapak Dr. Ir. Moch Rameli dan Bapak Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T. serta dosen – dosen sistem pengaturan yang lain atas segala bimbingan ilmu, moral, dan spiritual dari awal hingga terselesaikannya penelitian ini. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada angkatan e-48, LJ 2010, team T.A. di BAPDT, Seluruh mahasiswa bidang studi sistem pengaturan, Himatekro ITS, dan semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Elgerd L. O , “*Electric energy systems theory: an Introduction*”, McGraw-Hill, New delhi, 1983
- [2] Kundur P., “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, USA, 1994
- [3] Ljung L., Glad T., “*Modelling of Dynamic Systems*”, Prentice Hall, USA, 1994
- [4] Ogata, K., “*Modern Control Engineering*”, Prentice Hall, USA, 2002
- [5] NSW , “*Service Petrol Fuel Systems*”, 2008
- [6] Darmawan Aria. 2011. “*Tugas Akhir : Perancangan Embedded Kontroler Lqr Adaptive Menggunakan Mikrokontroler Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Dc*”. Prodi Teknik Elektro FTI-ITS : Surabaya.