

MAKALAH SEMINAR TUGAS AKHIR

SIMULASI IMPLEMENTASI *SELF TUNING REGULATOR* PADA MODEL SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK MIKROHIDRO UNTUK PENGENDALIAN FREKUENSI KELUARAN GENERATOR DENGAN MENGGUNAKAN MATLAB 6.1

Antonius Wahyu Nugroho¹, Karnoto², Trias Andromeda³

Abstrak – Pemanfaatan energi air yang mengalir untuk mendapatkan daya mekanik telah dilakukan sejak lama. Salah satu pemanfaatan air yang mengalir adalah untuk menggerakkan turbin yang selanjutnya akan memutar generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik (hidroelektrik). Mikrohidro adalah salah satu sistem hidroelektrik dengan daya rendah yang memiliki instalasi fisik hampir sama dengan sistem hidroelektrik dengan daya besar, salah satu perbedaannya terletak pada penggunaan governor (penstabil frekuensi generator). Pada sistem mikrohidro governor yang digunakan bekerja secara elektronis sebagai pengganti governor yang bekerja secara mekanik pada sistem hidroelektrik berdaya besar.

Banyak cara yang dapat ditempuh untuk membuat sebuah governor yang bekerja secara elektronik. Dalam penelitian ini sebuah *Self Tuning Regulator* (STR) dirancang untuk bekerja sebagai governor pada pembangkit listrik Mikrohidro. STR merupakan salah satu kontroler adaptif yang pernah dikembangkan, untuk menghasilkan sifat adaptif STR memerlukan sebuah estimator dan sebuah kontroler yang dapat diubah parameternya serta desain kontroler yang diinginkan. Untuk estimator dapat digunakan algoritma estimasi *Recursive Least Square* (RLS), sedangkan untuk kontroler digunakan metode *Pole-Placement* dengan orde kontroler ditentukan dengan solusi derajat minimum yang dimodifikasi dengan menambahkan aksi integral.

Dari simulasi pengendalian putaran generator dengan menggunakan STR dapat disimpulkan bahwa STR dapat bekerja seperti governor. Penggunaan integral pada kontroler dan filter pada estimator sangat membantu dalam mengkompensasi perubahan beban pada Sistem Mikrohidro.

Kata kunci : *governor*, hidroelektrik, mikrohidro, *Self Tuning Regulator* (STR), *Recursive Least Square* (RLS), estimator.

I. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Krisis energi terjadi ketika kenaikan harga minyak yang mengakibatkan seluruh dunia kembali tertarik pada eksploitasi sumber daya energi

terbaharui yang dapat dimanfaatkan. Hidroelektrik adalah salah satu sumber energi yang terlihat bangkit kembali untuk memenuhi kebutuhan yang cukup luas di negara-negara dengan sumber daya hidrolik yang mempertimbangkan perkembangan kelistrikan hidro dengan daya rendah.

1.2 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan kontroler adaptif dengan skema *Self Tuning Regulator* (STR) yang dapat mempertahankan putaran generator dalam Sistem Pembangkit Listrik Mikrohidro terhadap perubahan beban.

1.3 Pembatasan Masalah

1. Komponen *plant* Mikrohidro yang digunakan melibatkan sistem servo, turbin dan generator.
2. *Plant* Mikrohidro yang digunakan hanya melibatkan fungsi alih *plant* yang berhubungan dengan frekuensi putar generator.
3. *Plant* Mikrohidro yang memiliki orde-4 diestimasi sebagai sistem orde-2.
4. Output yang diamati adalah kecepatan putar generator yang dinyatakan dalam sistem *per unit*.
5. Kontroler yang digunakan adalah *In-Direct* STR dengan algoritma estimasi yang digunakan *Recursive Least Square* (RLS) yang dimodifikasi dengan melibatkan aksi integral pada kontroler.
6. Tidak membahas komponen-komponen fisik dari pembangkit listrik Microhydro.

II. Kajian Pustaka

2.1 Kontrol Adaptif dengan STR

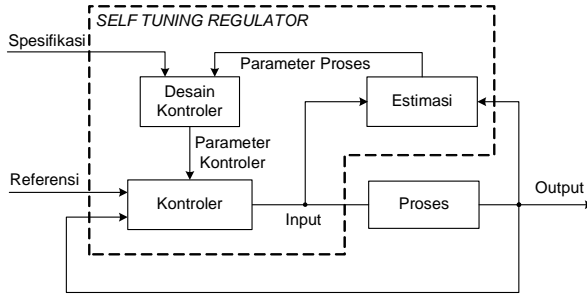
Sistem kontrol adaptif dengan skema STR diperlihatkan pada Gambar 2.1 terdiri dari dua kalang (*loop*). salah satunya adalah kalang bagian dalam (*inner loop*), yang melibatkan *plant* dengan parameter yang tidak diketahui beserta kontroler umpan balik dengan parameter yang dapat diset. Sedangkan pada kalang bagian luar (*outer loop*) terdapat estimator parameter rekursif (*recursive parameter estimator*) yang dipergunakan untuk identifikasi parameter *plant* yang tidak diketahui dan sebuah blok desain kontroler

¹ Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro

² Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro

³ Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro

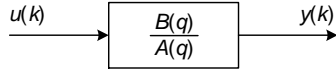
(*controller design*) yang digunakan untuk menentukan parameter kontroler.



Gambar 2.1 Diagram blok sistem adaptif untuk STR.

2.2 Recursive Least Square (RLS)

Dalam penelitian, estimasi parameter pada STR menggunakan metode *Recursive Least Square* (RLS). Estimasi dilakukan secara *real-time* di dalam sistem, bagian input dan output dari *plant* digunakan sebagai input untuk algoritma estimasi.



Gambar 2.2 Diagram blok sistem yang dikontrol.

Dengan menganggap sebuah model sistem yang diidentifikasi seperti diperlihatkan pada Gambar 2.2, dimana fungsi alihnya dinyatakan sebagai

$$A(q) y(k) = B(q) u(k) \quad (2.1)$$

dimana

$$A(q) = q^n + a_1 q^{n-1} + a_2 q^{n-2} + \dots + a_n$$

$$B(q) = b_0 q^m + b_1 q^{m-1} + b_2 q^{m-2} + \dots + b_m$$

Dengan menyatakan Persamaan (2.1) ke dalam bentuk persamaan beda (*difference equation*) akan diperoleh

$$\begin{aligned} y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) \\ = b_0 u(k+m-n) + b_1 u(k+m-n-1) + \dots + b_m u(k-n) \\ y(k) = -a_1 y(k-1) - \dots - a_n y(k-n) \\ + b_0 u(k+m-n) + b_1 u(k+m-n-1) + \dots + b_m u(k-n) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Dari Persamaan (2.2) diperoleh vektor parameter

$$\theta^T(k) = [a_1 \dots a_n \ b_0 \dots b_m] \quad (2.3a)$$

dan vektor regresi

$$\varphi^T(k-1) = [-y(k-1) \dots -y(k-n) \ u(k+m-n) \dots u(k-n)] \quad (2.3b)$$

sehingga Persamaan (2.2) dapat dinyatakan ke dalam bentuk

$$y(k) = \varphi^T(k-1) \theta(k) \quad (2.4)$$

Dengan menggunakan metode RLS, parameter θ diestimasi dengan menggunakan persamaan

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) \varepsilon(k) \quad (2.5)$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - \varphi^T(k) \hat{\theta}(k-1) \quad (2.6)$$

$$K(k) = P(k) \varphi(k) \quad (2.7)$$

$$= P(k-1) \varphi(k) (\lambda I + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k))^{-1}$$

$$P(k) = (I - K(k) \varphi^T(k)) P(k-1) / \lambda \quad (2.8)$$

$$= \frac{P(k-1)}{\lambda} - \frac{P(k-1) \varphi(k) \varphi^T(k) P(k-1)}{(\lambda I + \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k))}$$

2.3 Metode Pole-Placement

Prinsip dari penempatan kutub adalah menentukan kontroler yang sesuai sehingga diperoleh kutub kalang tertutup (*closed loop pole*) yang diinginkan. Dimisalkan sebuah model sistem

$$A(q) y(k) = B(q) (u(k) + v(k)) \quad (2.9)$$

dimana

y = output sistem;

u = input sistem;

v = gangguan pada sistem.

Sedangkan struktur sebuah kontroler yang digunakan dinyatakan dalam

$$R(q) u(k) = T(q) u_c(k) - S(q) y(k) \quad (2.10)$$

dimana $R(q)$, $S(q)$, dan $T(q)$ berupa polinomial. Dari Persamaan (2.9) dan (2.10) diperoleh persamaan untuk sistem kalang tertutup

$$\begin{aligned} y(k) &= \frac{B(q)T(q)}{A(q)R(q) + B(q)S(q)} u_c(k) + \frac{B(q)R(q)}{A(q)R(q) + B(q)S(q)} v(k) \\ u(k) &= \frac{A(q)T(q)}{A(q)R(q) + B(q)S(q)} u_c(k) - \frac{B(q)S(q)}{A(q)R(q) + B(q)S(q)} v(k) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Dari Persamaan (2.11) diketahui persamaan karakteristik sistem

$$A(q)R(q) + B(q)S(q) = A_c(q) \quad (2.12)$$

dengan $A_c(q)$ adalah polinomial karakteristik sistem yang ditentukan untuk mendapatkan respon sistem yang diinginkan. Persamaan (2.12) disebut sebagai Persamaan *Diophantine*.

Polinomial $R(q)$, $S(q)$ diperoleh dengan menyelesaikan Persamaan (2.12) sedangkan polinomial $T(q)$ dihitung melalui penyelesaian berikut

$$T = \beta A_o \quad (2.13)$$

dengan $\beta = \frac{A_m(1)}{B(1)}$

2.4 Syarat Desain Parameter Kontroler

Dalam mendesain parameter kontroler STR ada beberapa syarat yang harus dipenuhi, yaitu:

$$\text{derajat } S \leq \text{derajat } R \quad (2.14a)$$

$$\text{derajat } T \leq \text{derajat } R \quad (2.14b)$$

Persamaan *Diophantine* (Persamaan (2.12)) memiliki banyak solusi karena jika R^0 dan S^0 adalah solusi, maka

$$R = R^0 + QB \quad (2.15a)$$

$$S = S^0 - QA \quad (2.15b)$$

dimana Q adalah sembarang polinomial. Solusi yang digunakan adalah solusi derajat terendah (*minimum degree solution*).

Karena derajat $A >$ derajat B , maka yang memiliki bentuk orde tertinggi pada sebelah kiri Persamaan (2.12) adalah AR , dimana

$$\text{derajat } R = \text{derajat } A_c - \text{derajat } A \quad (2.16)$$

Dari kondisi kausal pada Persamaan (2.14a) dapat diketahui

$$\text{derajat } A_c \geq 2 \text{ derajat } A - 1 \quad (2.17a)$$

$$\text{derajat } A_m - \text{derajat } B_m \geq \text{derajat } A - \text{derajat } B = d_o \quad (2.17b)$$

2.5 Gangguan pada Sistem Adaptif

2.5.1 Modifikasi Prosedur Desain Kontroler

Dengan melibatkan gangguan v ke dalam desain *Pole Placement*, dimana gangguan dinyatakan sebagai

$$A_d v = e \quad (2.18)$$

dengan e adalah sebuah sinyal pulsa (*pulse*), maka Persamaan (2.11) berubah menjadi

$$y(k) = \frac{B(q)T(q)}{A(q)R(q) + B(q)S(q)} u_c(k) + \frac{B(q)R(q)}{A_d(A(q)R(q) + B(q)S(q))} e(k)$$

$$u(k) = \frac{A(q)T(q)}{A(q)R(q) + B(q)S(q)} u_c(k) - \frac{B(q)S(q)}{A_d(A(q)R(q) + B(q)S(q))} e(k) \quad (2.19)$$

Untuk mengkompensasi gangguan tersebut maka dilakukan perubahan pada desain dengan membuat A_d menjadi faktor dari R , yaitu $R = R^* A_d$.

Jika Persamaan (2.15) diubah menjadi

$$R = X R^0 + Y B \quad (2.20a)$$

$$S = X S^0 - Y A \quad (2.20b)$$

maka akan diperoleh Persamaan *Diophantine*

$$AR + BS = XA_c^0 \quad (2.21)$$

dengan X adalah polinomial stabil. Sehingga untuk memenuhi Persamaan (2.21) maka dari Persamaan (2.20) diperoleh

$$R = A_d R^* = X R^0 + Y B \quad (2.22)$$

2.5.2 Aksi Integral pada Kontroler

Karena gangguan yang terlibat di dalam sistem berupa sinyal konstan, yaitu $A_d = q - 1$, maka untuk Persamaan (2.32) ditentukan

$$X = q + x_0 \quad (2.23)$$

Dan Persamaan (2.22) menjadi

$$(q - 1) R^* = (q - x_0) R^0 + y_0 B \quad (2.24)$$

Dengan $q = 1$, maka dari Persamaan (2.24) diperoleh

$$y_0 = - \frac{(1 + x_0) R^0(1)}{B(1)} \quad (2.25)$$

Substitusi Persamaan (2.23) dan Persamaan (2.35) ke dalam Persamaan (2.20) akan diperoleh kontroler baru, yaitu

$$R = (q - x_0) R^0 + y_0 B$$

$$S = (q - x_0) S^0 - y_0 A$$

Dengan mengambil $x_0 = 0$, maka kontroler berubah menjadi

$$R = q R^0 + y_0 B \quad (2.26a)$$

$$S = q S^0 - y_0 A \quad (2.26b)$$

Dengan R^0 dan S^0 diperoleh dari penyelesaian Persamaan (2.12). Sedangkan untuk polinomial T tidak mengalami perubahan.

2.5.3 Modifikasi Estimator

Karena gangguan akan merubah hubungan antara input dan output maka estimasi juga diubah. Dalam estimasi, polinomial A_d dimasukkan ke dalam model sistem. Sehingga dari Persamaan (2.9) dan Persamaan (2.18) diperoleh

$$A_d A y(k) = A_d B (u(k) + v(k)) = A_d B u(k) + e(k)$$

atau

$$A y_f(k) = B u_f(k) + e(k) \quad (2.27)$$

dimana

$$y_f(k) = A_d y(k)$$

$$u_f(k) = A_d u(k)$$

$$A_d = 1 - q^{-1}$$

2.6 Waktu Cacah dalam Sistem Diskret

Untuk menentukan waktu cacah diperlukan variabel dari sebuah sistem, variabel yang digunakan adalah waktu naik, t_r (*rise time*) sistem. Jika N_r adalah jumlah periode cacah untuk satu waktu naik (t_r), maka

$$N_r = \frac{t_r}{T_s} \approx 4 - 10 \quad (2.28)$$

dengan T_s adalah waktu cacah. Jumlah periode cacah (N_r) yang diperbolehkan adalah antara 4 hingga 10, atau

2.7 Pembangkit Listrik Mikrohidro

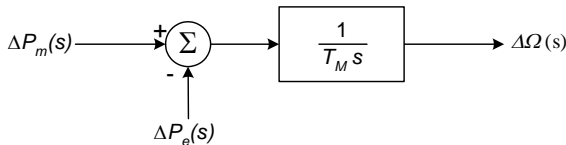
Micro Hydro Power Station (MHPS) merupakan instalasi tenaga listrik untuk produksi listrik pada level daya rendah. Dalam penelitian, elemen-elemen pada *plant* Mikrohidro yang digunakan adalah generator, turbin dan gerbang (*gate*) yang digerakkan oleh servomotor.

2.7.1 Generator

Fungsi alih generator yang dipergunakan dalam simulasi dinyatakan sebagai

$$\Delta\Omega(s) = \frac{1}{T_M s} (\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)) \quad (2.29)$$

dengan diagram blok diperlihatkan dalam pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Diagram blok generator

2.7.2 Respon Beban Terhadap Deviasi Frekuensi

Beban pada sistem daya terdiri dari beban resistif yang tidak bergantung pada frekuensi serta beban yang bersifat reaktif seperti beban motor lebih sensitif terhadap perubahan frekuensi. Karakteristik gabungan kedua beban dinyatakan dalam

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \Delta\omega, \quad (2.30)$$

dimana

ΔP_L = perubahan beban yang tidak sensitif terhadap frekuensi;

$\Delta\omega$ = perubahan frekuensi putar generator;

$D \Delta\omega$ = perubahan beban yang sensitif terhadap frekuensi.

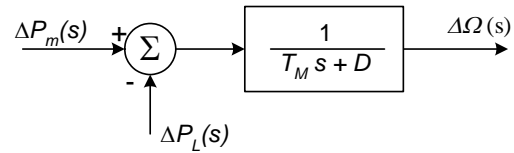
D dinyatakan sebagai persentase perubahan beban dibagi oleh persentase perubahan frekuensi

$$D = \frac{\Delta P_{L(frek)}}{\Delta\omega} \quad \text{atau} \quad P_{L(frek)} = D \Delta\omega$$

Dengan memasukkan model beban ke dalam diagram blok generator diperoleh diagram blok seperti

pada Gambar 2.4. Substitusi Persamaan (2.30) ke dalam (2.29) diperoleh

$$\Delta\Omega(s) = \frac{1}{T_M s + D} (\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s)) \quad (2.31)$$



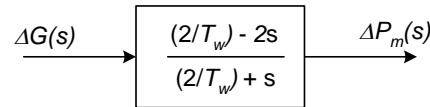
Gambar 2.4 Diagram blok generator dengan input beban.

2.7.3 Turbin Air

Turbin air yang dipergunakan untuk memutar generator memiliki fungsi alih

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta G(s)} = \frac{(2/T_w) - 2s}{(2/T_w) + s} \quad (2.32)$$

Persamaan (2.32) menunjukkan fungsi alih klasik turbin hidrolik dimana perubahan output daya turbin merupakan respon terhadap perubahan gerbang untuk sebuah turbin. Gambar 2.5 memperlihatkan blok diagram fungsi alih turbin.



Gambar 2.5 Model turbin air

2.7.4 Pintu Air (*Gate*) dan Servomotor

Sebuah aktuator diperlukan untuk mengatur bukaan pintu air sehingga diperoleh debit air yang cukup untuk menghasilkan daya mekanik turbin yang sesuai. Aktuator yang digunakan berupa sistem elektrohidrolik yang terdiri dari servomotor hidrolik yang digerakkan oleh sebuah servomotor listrik.

Dalam diagram blok yang diperlihatkan dalam Gambar 2.6 diperoleh fungsi alih lengkap dari sistem elektrohidrolik yang menggerakkan pintu air, yaitu

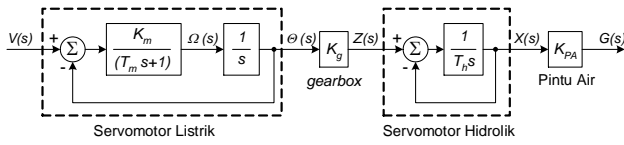
$$\begin{aligned} \frac{X(s)}{V(s)} &= \frac{X(s)}{Z(s)} \cdot \frac{Z(s)}{\Theta(s)} \cdot \frac{\Theta(s)}{V(s)} \\ &= \frac{1}{T_h s + 1} \cdot K_g \cdot \frac{K_m}{s(T_m s + 1) + K_m} \\ &= \frac{K_g K_m}{(T_h s + 1)(T_m s^2 + s + K_m)} \end{aligned} \quad (2.33)$$

dimana

$X(s)$ = perpindahan output pada motor hidrolik;

$V(s)$ = input tegangan pada sistem elektrohidrolik;

K_g = konstanta perpindahan pada *gearbox* (kopel antara motor listrik dengan motor hidrolik);



Gambar 2.6 Diagram blok lengkap sistem elektrohidrolik dan pintu air

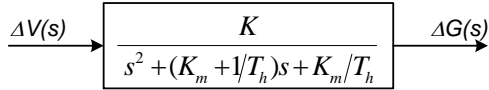
Dengan menyederhanakan Persamaan (2.33) diperoleh persamaan berikut

$$\frac{\Delta G(s)}{\Delta V(s)} = \frac{K}{s^2 + (K_m + \frac{1}{T_h})s + \frac{K_m}{T_h}} \quad (2.34)$$

dengan

$$K = \frac{K_g K_m}{T_h K_{PA}}$$

Penyederhanaan diagram blok sistem elektrohidrolik diperlihatkan dalam Gambar 2.7.



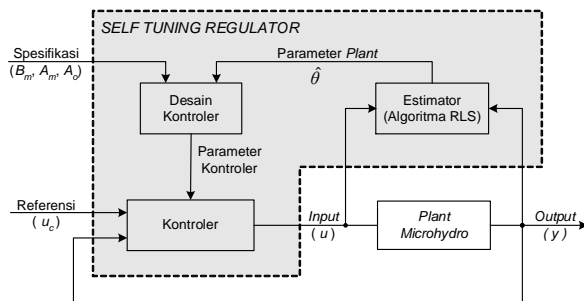
Gambar 2.7 Diagram blok sederhana sistem elektrohidrolik

III. Perancangan Program

Perangkat lunak yang dipergunakan adalah Matlab versi 6.1.0.450 Release 12.1; dan Microsoft Visual C++ 6.0. Program Matlab digunakan untuk membuat tampilan, membuat model sistem Mikrohidro dan beberapa program dalam format *m-file* dan *MEX-file*, sedangkan Program Microsoft Visual C++ digunakan untuk melakukan *compile* terhadap *MEX-file* yang dibuat dengan Matlab.

3.1 Model Sistem Mikrohidro Adaptif

Simulasi pengontrolan Sistem Pembangkit Listrik Mikrohidro yang mempergunakan kontroler adaptif digambarkan dalam diagram blok seperti diperlihatkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram blok program simulasi.

Dalam Program Matlab, model sistem Mikrohidro adaptif dibuat dengan menggunakan *Simulink*. Dalam *Simulink* blok generator, turbin dan servomotor dibuat berdasarkan Gambar 2.4, Gambar 2.5 dan Gambar 2.6.

3.2 Perancangan Estimasi Dengan Algoritma RLS

Struktur *plant* Mikrohidro yang diidentifikasi memiliki fungsi alih

$$\frac{y(k)}{u(k)} = \frac{B(q)}{A(q)} = \frac{b_0 q + b_1}{q^2 + a_1 q + a_2} \quad (3.1)$$

Dalam estimasi, Persamaan (3.1) diubah ke dalam bentuk persamaan beda (*difference equation*) seperti pada Persamaan (2.2), yaitu

$$y(k) = b_0 u(k-1) + b_1 u(k-2) - a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) \quad (3.2)$$

sehingga dalam estimasi dengan algoritma RLS diperoleh vektor parameter dan vektor regresi sebagai berikut

$$\theta^T(k) = [b_0 \ b_1 \ a_1 \ a_2] \quad (3.3a)$$

$$\varphi^T(k-1) = [u(k-1) \ u(k-2) \ -y(k-1) \ -y(k-2)] \quad (3.3b)$$

3.3 Perancangan Parameter Kontroler Dengan Metode Pole Placement

Dengan menggunakan solusi derajat minimum, maka kontroler yang dipergunakan memiliki struktur

$$R = (q + r_1) \quad (3.4a)$$

dan

$$S = (s_0 q + s_1) \quad (3.4b)$$

Sedangkan polinomial *T* diperoleh dengan menyelesaikan Persamaan (2.13), yaitu

$$T = \frac{(1 + a_{m1} + a_{m2})}{(b_0 + b_1)} (q + a_{o1}) \quad (3.5)$$

3.4 Perancangan Kontroler Dengan Aksi Integral

Dengan melibatkan gangguan (pembebanan) terhadap *plant* Mikrohidro, maka parameter kontroler (*R* dan *S*) mengalami perubahan. Dengan menggunakan Persamaan (3.4) maka parameter kontroler berubah menjadi

$$R = qR^0 + y_0 B \quad (3.6a)$$

$$S = qS^0 - y_0 A \quad (3.6b)$$

dimana R^0 dan S^0 diperoleh dari penyelesaian sebelumnya, sedangkan polinomial *T* tidak mengalami perubahan.

Variabel y_0 diperoleh melalui menyelesaikan Persamaan (2.35), yaitu

$$y_0 = -\frac{(1+x_0)R^0(1)}{B(1)} \quad (3.7a)$$

dengan mengambil $x_0 = 0$ maka Persamaan (3.7a) menjadi

$$y_0 = -\frac{(1+r_1)}{b_0+b_1} \quad (3.7b)$$

IV. Hasil Penelitian

4.1 Penentuan Waktu Cacah (T_s)

Waktu cacah (T_s) ditentukan melalui grafik output *plant* Mikrohidro dengan menggerakkan generator dari kondisi diam ke dalam keadaan tunak. Hasil plot grafik output yang diperoleh dari simulasi diperlihatkan pada Gambar 4.1.

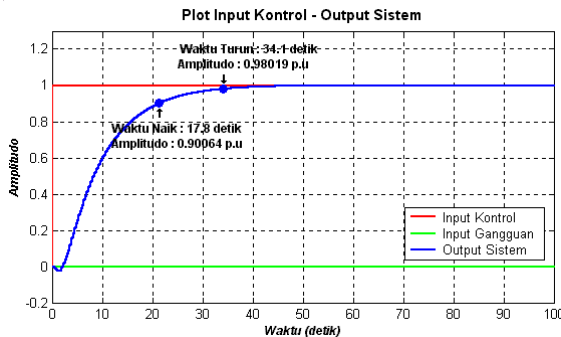
Dari Gambar 4.1 diketahui waktu naik (*rise time*) sistem untuk mencapai keadaan tunak (*steady state*) yaitu sebesar $t_r = 17,8$ detik. Waktu naik digunakan untuk menentukan waktu cacah dengan perhitungan menggunakan Persamaan (2.28), yaitu memiliki N_r dengan range dari 4 hingga 10.

Jika mengambil $N_r = 4$, maka diperoleh waktu cacah (T_s) maksimum sebesar

$$T_{s \text{ maks}} = \frac{t_r}{N_r} = \frac{17,8}{4} = 4,45 \text{ detik} \quad (4.1)$$

sedangkan jika $N_r = 10$, akan diperoleh waktu cacah minimum sebesar

$$T_{s \text{ min}} = \frac{t_r}{N_r} = \frac{17,8}{10} = 1,78 \text{ detik} \quad (4.2)$$



Gambar 4.1 Grafik I/O hasil simulasi dalam mode Analisis Plant.

Dalam simulasi, waktu cacah yang dipilih adalah waktu cacah yang paling maksimum, yaitu $T_s = 4,45$ detik

4.2 Penentuan Polinomial Model (A_m)

Polinomial model yang digunakan memiliki waktu naik yang sama dengan waktu naik sistem, yaitu $t_r = 1,78$ detik.

Karena *plant* yang diestimasi dianggap sebagai sistem orde 2 (memiliki dua *pole*), yaitu dengan polinomial *denominator*

$$A(q) = q^2 + a_1 q + a_2 \quad (4.3)$$

maka polinomial model yang diperlukan adalah sistem orde 2, dengan struktur

$$A_m(q) = q^2 + a_{m1} q + a_{m2} \quad (4.4)$$

Sehingga diperlukan dua *pole* untuk membentuk Persamaan (4.4). Dari penelitian, *pole* dominan yang sesuai adalah di $z = 0,55$, karena dengan *pole* ini waktu naik (t_r) model sama dengan waktu naik *plant* Mikrohidro, sedangkan *pole* yang lain di $z = 0,15$.

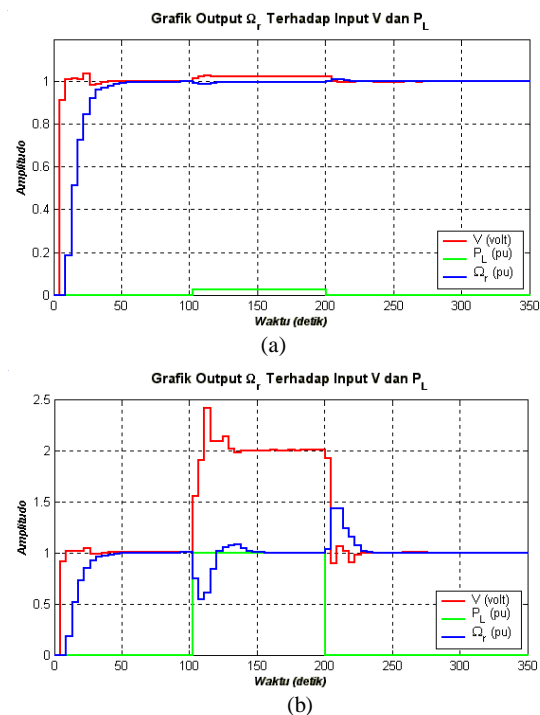
4.3 Penentuan Polinomial Observer (A_o)

Polinomial *observer* yang dipilih dari hasil penelitian memiliki respon 4 hingga 5 kali lebih cepat dari sistem. memiliki *pole* di $z = 0,0$.

4.4 Pengujian Dan Analisa Mikrohidro Adaptif

4.4.1 Pengujian Sistem Mikrohidro Adaptif Dengan Beban Konstan

Pengujian pertama Sistem Mikrohidro Adaptif adalah dengan memberikan beban konstan (P_L) terhadap sistem. Dalam pengujian digunakan 10 beban dengan amplitudo yang berbeda, yaitu $P_L = 0,025$ p.u; 0,05 p.u; 0,1 p.u; 0,125 p.u; 0,25 p.u; 0,375 p.u; 0,5 p.u; 0,625 p.u; 0,750 p.u; 1,0 p.u.



Gambar 4.2 Hasil simulasi terhadap sistem Mikrohidro adaptif pada saat diberi beban konstan pada $t = 100$ detik dan dilepas pada $t = 200$ detik; (a) $P_L = 0,025$ p.u.; (b) $P_L = 1,000$ p.u.

Dalam makalah ini hanya mengamati Sistem Mikrohidro Adaptif pada saat diberi beban kecil, yaitu sebesar 0,025 pu, dan pada saat diberi beban maksimum, 1,0 p.u. Grafik hasil simulasi sistem

terhadap dua pembebanan yang berbeda diperlihatkan dalam Gambar 4.2.

Dari Gambar 4.2(a) diperlihatkan kurva beban (hijau) berubah dari 0,0 p.u ke 0,025 p.u pada $t = 102,35$ detik diikuti oleh perubahan kecil pada kurva output (biru) ke arah negatif. Akibat penurunan amplitudo output, maka kontroler memberikan respon dengan memberikan input kontrol yang lebih besar, sehingga pada $t = 111,25$ detik amplitudo output sudah mencapai 0,9905 p.u ($\approx 1,0$ p.u) setelah sebelumnya output mengalami penurunan hingga 0,9885 p.u di $t = 106,8$ detik..

Perubahan input kontrol juga terjadi pada saat beban sebesar 0,025 p.u dilepaskan sehingga beban menjadi 0,0 p.u yaitu pada $t = 200,25$ detik. Penurunan beban tersebut mengakibatkan output mengalami kenaikan hingga 1,0118 p.u pada $t = 209,15$ detik. Namun kontroler dapat mengkompensasi perubahan sehingga output dapat mencapai 1,0036 p.u di $t = 218,05$ detik.

Dari Gambar 4.2(b) tampak pada saat $t = 102,35$ detik ketika terjadi gangguan 1,0 p.u kurva output (biru) mengalami penurunan hingga mencapai 0,5377 p.u pada $t = 106,8$ detik, namun kontroler memberikan aksi kontrol sehingga pada $t = 151,3$ detik output mencapai 1,0006 p.u.

Dari kondisi beban penuh pada $t = 200$ detik beban dilepaskan, akibatnya output sistem mengalami perubahan hingga mencapai 1,4303 p.u pada $t = 209,15$ detik. Namun aksi kontroler dapat membuat output sistem mencapai amplitudo 1,0002 p.u pada 231,4 detik.

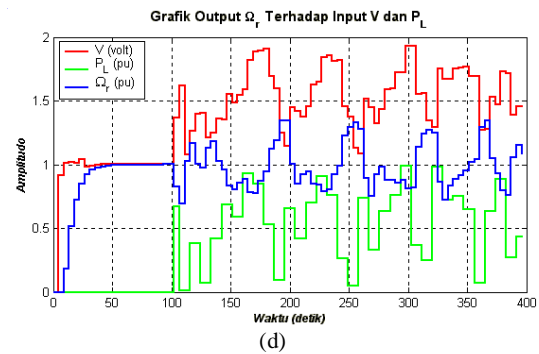
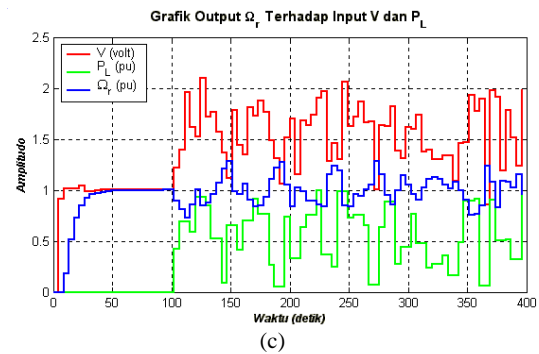
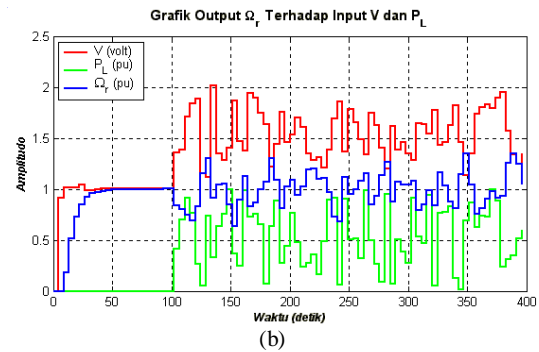
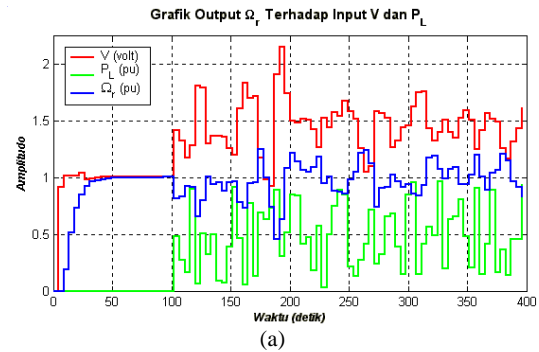
4.4.2 Pengujian Sistem Mikrohidro Adaptif Dengan Beban Random

Langkah akhir dalam menguji Sistem Mikrohidro Adaptif adalah dengan memberikan beban random. Dalam Gambar 4.3 diperlihatkan empat grafik simulasi. Perbedaan keempat grafik tersebut ada pada laju perubahan beban. Gambar 4.3(a) adalah hasil simulasi dengan perubahan beban 2 kali lebih cepat dari waktu cacah ($0,5 \times 4,45$ detik = 2,225 detik). Sebaliknya, pada Gambar 4.3(d) diperlihatkan hasil simulasi dengan perubahan beban 2 kali lebih lambat dari waktu cacah ($2 \times 4,45$ detik = 8,9 detik).

Dari Gambar 4.3(a) diketahui bahwa meskipun perubahan beban lebih cepat dari waktu cacah, kontroler masih dapat mempertahankan output sistem pada titik referensi meskipun deviasi yang dihasilkan cukup besar.

Meskipun perubahan gangguan memiliki deviasi yang cukup besar, namun output tidak mengalami deviasi yang terlalu besar akibat gangguan tersebut. Sinyal kontrol yang dihasilkan oleh kontroler dapat

mengkompensasi perubahan output sehingga output cukup stabil.



Gambar 4.3 Hasil simulasi terhadap sistem Mikrohidro adaptif pada saat diberi beban acak; (a) periode sinyal gangguan = $0,5 \times T_s$; (b) periode sinyal gangguan = T_s ; (c) periode sinyal gangguan = $1,5 \times T_s$; periode sinyal gangguan = $2 \times T_s$.

V. Penutup

5.1 Kesimpulan

1. Waktu naik (t_r) dari model *plant* Mikrohidro adalah 17,8 detik. Dengan waktu naik ini waktu cacah yang memenuhi syarat berkisar 1,78 detik hingga 4,45 detik. Waktu cacah yang lebih besar dari 3,115 detik memberikan hasil estimasi *plant* yang lebih baik, namun waktu cacah dengan hasil estimasi yang paling baik adalah 4,45 detik.
2. *Pole observer* yang terletak di titik asal ($A_o = z$) memberikan respon yang paling baik karena memberikan deviasi output yang paling minimum yaitu sebesar 0,4623 p.u ($\Delta\Omega$) ketika sistem diberi beban maksimum 1,0 pu jika dibandingkan dengan *observer* lain yang memiliki *pole* di $z = 0,1; 0,2$ dan $0,3$ yang masing-masing memberikan deviasi output sebesar 0,4732 p.u; 0,4842 p.u dan 0,4952 p.u.
3. Pembebanan terhadap model *plant* Mikrohidro mengubah koefisien parameter fungsi alih dari *plant*, akibatnya parameter hasil estimasi ikut mengalami perubahan yang akhirnya akan mengubah parameter STR.
4. Ketika terjadi pembebanan pada *plant* Mikrohidro, STR menganggap pembebanan tersebut sebagai gangguan yang mengakibatkan deviasi pada level output sistem, akibatnya STR juga mengubah aksi kontrolnya sehingga memperoleh output sistem yang diinginkan, dalam hal ini sebesar 1,0 p.u.
5. Perubahan beban yang lebih cepat dari waktu cacah, dalam hal ini dua kali lebih cepat dari waktu cacah ($0,5 \times 4,45$ detik = 2,225 detik), dapat ditangani oleh kontroler sehingga output model *plant* Mikrohidro dapat kembali stabil. Begitu pula ketika kecepatan perubahan beban dua kali lebih lambat dari waktu cacah ($2 \times 4,45$ detik = 8,9 detik).
6. Untuk kondisi awal, polinomial kontroler yang dapat digunakan adalah $R = z - 0,1103$; $S = z + 0,0060$ dan $T = 0,9151z$, jika melibatkan sinyal gangguan (v) dalam desain maka parameter kontroler yang harus digunakan adalah $R = z^2 - 0,5396z - 0,4604$; $S = 2,1477z^2 - 1,2575z + 0,0249$ dan $T = 0,9151z$.

5.2 Saran

1. Kontrol yang dilakukan dalam simulasi ini adalah menggunakan *In-Direct* STR, yaitu kontrol dengan menentukan parameter *plant* terlebih dahulu baru parameter kontroler dihitung dengan menyelesaikan persamaan *Diophantine*. Namun dengan sedikit perubahan, kontrol dapat diubah menjadi *Direct* STR, dengan metode ini

parameter kontroler dapat langsung diperoleh dari estimasi.

2. Selain menggunakan algoritma RLS, estimasi juga dapat menggunakan algoritma lain, terutama dengan menggunakan *Extended Least Square* (ELS) yang melibatkan sinyal gangguan dalam estimasi.
3. *Self Tuning Regulator* (STR) bukan satu-satunya kontroler adaptif, oleh karena itu *plant* Mikrohidro dapat dikontrol dengan kontroler adaptif lainnya.
4. Model *plant* Mikrohidro dapat dikembangkan dengan membuat desain aktuatur Servomotor nonlinear sesuai dengan kondisi riil, yaitu memiliki kecepatan dan level output yang terbatas dalam menggerakkan pintu air (*gate*).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Åström, Karl Johan., Björn Wittenmark, "Adaptive Control, 2nd ed", USA: Addison – Wesley Publishing Company, Inc., 1995.
- [2] Åström, Karl Johan., Björn Wittenmark, "Computer - Controlled Systems, Theory and Design, 2nd ed", USA: Addison – Wesley Publishing Company, Inc., 1990.
- [3] Byerly, Richard T., Edward W. Kimbark, "Stability of Large Electric Power Systems", New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1974, pg 121.
- [4] Kernighan, Brian W., Dennis M. Ritchie, "The C Programming Language, 2nd ed", New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- [5] Kundur, Prabha., "Power System Stability And Control", McGraw-Hill, Inc USA, 1994.
- [6] Monition, L., Nir, M. Le., Roux, J., "Micro Hydroelectric Power Stations", John Wiley & Sons, 1984.
- [7] Ogata, Katsuhiko. "Teknik Kontrol Automatik, Jilid 1 ", Jakarta: Penerbit Erlangga, 1997.
- [8] Ogata, Katsuhiko. "Teknik Kontrol Automatik, Jilid 2 ", Jakarta: Penerbit Erlangga, 1997.
- [9] Ogata, Katsuhiko. "Discrete – Time Control Systems", New Jersey: Prentice Hall Inc, 1987.
- [10] Padiyar, K.R., "Power System Dynamics, Stability and Control", Bangalore: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 1996.
- [11] Palm, William J., "Modelling, Analysis, and Control of Dynamic Systems, 2nd ed", New York: John Wiley & Sons Inc.
- [12] Paraskevopolis, P.N., "Digital Control System", New Jersey: Prentice Hall Inc., 1996.
- [13] Saadat Hadi, "Power System Analysis", Singapore: McGraw-Hill Inc., 1999.
- [14] Wood Allen J., Wollenberg Bruce F., "Power General Operating And Control", John Wiley & Sons, 1984.
- [15] _____, Adaptive Control FRT050 2003, <http://www.control.lth.se>
- [16] _____, "MATLAB, The Language of Technical Computing, Creating Graphical User Interfaces, Ver. 1", The Mathworks.
- [17] _____, "SIMULINK, Model-Based and System-Based Design, Writing S-Function, Ver. 4", The Mathworks.



**Antonius Wahyu Nugroho
(L2F099574)**

Dilahirkan di Semarang, 29 Agustus 1981. Menempuh pendidikan dasar di SD. ST. Antonius I Semarang sampai tahun 1993 dan melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 9 Semarang sampai tahun 1996 kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 2 Semarang dan lulus pada tahun 1999, hingga saat ini masih menjadi Mahasiswa Strata – 1 di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang dengan konsentrasi kontrol.

Mengetahui dan Mengesahkan

Pembimbing I

Pembimbing II

**Karnoto, ST
NIP. 132 162 547**

**Trias Andromeda, ST, MT
NIP. 132 283 185**