

PEMODELAN DAN PEMBUATAN SIMULASI KESTABILAN RESPON TRANSIEN MOTOR DC MENGGUNAKAN *GRAPHICAL USER INTERFACE* (GUI) PADA MATLAB

Mokhamad Tirono dan Nurun Nayiroh

ABSTRAK

Motor DC (*Direct Current*) adalah motor yang digerakkan oleh energi listrik DC. Salah satu jenis motor DC tersebut ialah motor DC magnet permanen yang banyak ditemui penggunaannya baik di industri maupun di rumah tangga. Terapan motor DC kebanyakan merupakan sistem yang memerlukan pengatur kecepatan. Tujuan penelitian adalah untuk menghasilkan respon transien yang stabil dan performansi yang baik pada sistem motor DC.

Sistem motor DC dimodelkan berdasarkan persamaan kesetimbangan torsi dan persamaan rangkaian listrik pada jangkar yang berlaku pada sistem tersebut. Kemudian model dari pengontrol ditentukan dan dirangkai menjadi sistem loop tertutup dengan sistem motor DC. Fungsi alih loop tertutup yang sudah didapat digunakan sebagai dasar pembuatan program simulasi respon transien menggunakan GUI pada Matlab versi 6.5.

Hasil pengujian terhadap penalaan pengontrol baik pengontrol Proporsional, Proporsional Integral (PI) maupun Proporsional Integral Diferensial (PID) dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan pengontrol PID dengan nilai $K_p=17$, $K_i=200$, dan $K_d=0.15$ semua permintaan desain terpenuhi dengan baik. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi nilai kestabilan yang baik pada sistem motor DC yaitu respon sistem mencapai *settling time* sekitar 40 ms, *overshoot* tereduksi lebih kecil dari 16%, dan tidak ada kesalahan keadaan tunak.

Kata kunci: pemodelan, simulasi, kestabilan, motor DC

1. PENDAHULUAN

Kontrol otomatis memegang peranan penting dalam era teknologi masa kini dan akan bertambah besar peran dan keterkaitannya di hampir setiap kegiatan manusia di masa yang akan datang. Kontrol otomatis bukan saja memudahkan dan meningkatkan prestasi kerja instalasi, tetapi juga membantu atau menggantikan sebagian dari tugas manusia. Hal itu terjadi karena kesadaran akan kemampuan manusia yang sangat terbatas, waktu dan kesempatan yang tidak memungkinkan, atau karena dapat membahayakan keselamatan jiwanya.

Salah satu aplikasi kontrol otomatis adalah pada motor DC (*Direct Current*) yang merupakan komponen penting dalam berbagai peralatan industri maupun peralatan rumah tangga. Hal ini juga terjadi pada benda-benda angkasa yaitu misalnya gerak matahari yang juga mempunyai pengatur atau pengendali agar tetap bergerak atau beredar pada tempat peredarannya dan berputar dengan kecepatan stabil dalam mengitari pusat galaksinya. Yang dimaksud pengendali disini adalah Allah SWT Yang Maha Kuasa atas segalanya. Fakta ilmiah ini telah dinyatakan oleh Al-Qur'an sebagai berikut (Pasya, 2004:83):

وَالشَّمْسُ تَجْرِي لِمُسْتَقَرٍّ لَهَا ذَلِكَ تَقْدِيرُ الْعَزِيزِ الْعَلِيمِ

Dan matahari beredar ditempat peredarannya. Demikianlah ketetapan yang Maha Perkasa lagi Maha Mengetahui (QS Yasin[36]:38).

Pada umumnya, sistem penggerak yang diinginkan adalah mempunyai dinamika respon yang cepat dan tanpa lonjakan (*overshoot*) terhadap perubahan sinyal rujukan, kinerja peredaman gangguan yang baik dan tidak peka terhadap gangguan eksternal dan perubahan internal pada parameter sistem. Penggunaan pengontrol otomatis pada motor DC, pada awal perputarannya sistem pengaturan kecepatan motor DC tidak akan

menghasilkan lonjakan arus pada kumparan jangkarnya. Hal ini akan memperpanjang usia pemakaian motor DC tersebut.

Suatu sistem diharapkan mempunyai performansi yang sangat baik ditinjau dari respon sistem terhadap masukan yang disengaja seperti perubahan *set point* atau pun yang tidak disengaja seperti gangguan dari luar sistem dan dari dalam sistem itu sendiri. Pada kondisi riil sebuah industri sulit untuk melakukan penambahan elemen tertentu secara langsung tanpa melalui perhitungan dan melihat pengaruh elemen terhadap sistem, karena bisa merusak proses produksi yang sedang berjalan. Oleh karena itu, suatu sistem itu perlu disimulasikan terlebih dahulu pada komputer sebelum diaplikasikan pada alatnya.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat simulasi respon transien model sistem motor DC menggunakan GUI (*Graphical User Interface*) pada Matlab. Hasil simulasi ini diharapkan dapat membantu mempermudah pemahaman suatu sistem kontrol dan analisis suatu sistem akan dapat dilakukan dengan mudah dan cepat.

2. KAJIAN PUSTAKA

Transformasi Laplace

Transformasi Laplace adalah salah satu alat matematis yang digunakan untuk mencari solusi persamaan diferensial linear biasa. Transformasi Laplace dari fungsi $f(t)$ didefinisikan sebagai berikut (Ogata, 1991:19):

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (1)$$

Dimana $f(t)$ = fungsi waktu t sedemikian rupa sehingga $f(t)=0$ untuk $t<0$, s = variable kompleks, dan $F(s)$ = transformasi Laplace dari $f(t)$

Proses matematik dalam mengubah ekspresi variabel kompleks menjadi ekspresi waktu disebut transformasi balik. Notasi transformasi balik \mathcal{L}^{-1} adalah , sehingga (Ogata, 1991:19)

$$\mathcal{L}^{-1}[F(s)] = f(t) \quad (2)$$

Secara matematis, $f(t)$ diperoleh dengan ekspresi sebagai berikut (Ogata, 1991:38):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\omega}^{c+j\omega} F(s) e^{st} ds \quad (t>0) \quad (3)$$

Fungsi Alih

Fungsi alih didefinisikan sebagai perbandingan antara transformasi Laplace keluaran terhadap transformasi Laplace masukan dengan anggapan semua syarat awal adalah nol. Misal persamaan matematika sistem yang ditulis sebagai berikut (Ogata, 1996:46):

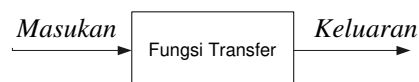
$$a_0 y^n + a_1 y^{n-1} + \dots + a_{n-1} y + a_n y = b_0 x^m + b_1 x^{m-1} + \dots + b_{m-1} x + b_m x \quad (4)$$

dengan ($n \geq m$), maka fungsi alih persamaan sistem dapat ditulis :

$$\begin{aligned} \text{Fungsi alih} = G(s) &= \frac{\text{Laplace[keluaran]}}{\text{Laplace[masakan]}} \\ &= \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \end{aligned} \quad (5)$$

Diagram Blok

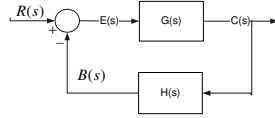
Diagram blok adalah suatu pernyataan gambar yang diringkas dari hubungan sebab dan akibat antara masukan dan keluaran dari suatu sistem fisis. Bentuk paling sederhana dari diagram blok adalah blok tunggal, dengan satu masukan dan satu keluaran (Joseph, 1985:12).



Gambar 1. Diagram blok sistem

Diagram Blok Loop Tertutup

Bentuk diagram blok loop tertutup dapat dilihat pada Gambar 2. $G(s)$ adalah fungsi alih sistem dan $H(s)$ adalah fungsi alih umpan balik



Gambar 2 Diagram blok sistem loop tertutup.

Keluaran $C(s)$ diumpan balikkan ke titik penjumlahan untuk dibandingkan dengan masukan acuan $R(s)$, dari Gambar 2. maka dapat diketahui (Ogata, 1996:49-50):

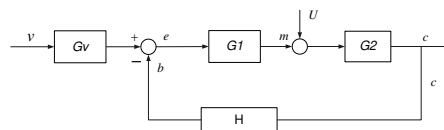
$$1. \text{ Fungsi alih loop terbuka} = \frac{B(s)}{E(s)} = G(s)H(s) \quad (6)$$

$$2. \text{ Fungsi alih umpan maju} = \frac{C(s)}{E(s)} = G(s) \quad (7)$$

$$3. \text{ Fungsi alih loop tertutup} = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (8)$$

Sistem Kontrol

Suatu proses kontrol secara fungsional dapat dinyatakan oleh blok diagram yang bentuknya bergantung pada jumlah elemen. Blok diagram yang umum diberikan pada Gambar 3.



Gambar 3 Elemen-elemen sistem kontrol loop tertutup

Secara umum, elemen dari sebuah sistem kontrol rangkaian tertutup terdiri dari: Masukan Gv), Pengontrol ($G1$), Sistem ($G2$), Jalur umpan balik (H), dan Jalur umpan maju

Sistem Motor DC (*Direct Current*)

Motor DC adalah motor yang digerakkan oleh energi listrik DC. Salah satu jenis motor DC adalah motor DC magnet permanen (*Permanent magnet excited brushed DC motor*). Sebuah motor DC magnet permanen biasanya tersusun atas magnet permanen, kumparan jangkar dan sikat (*brush*).

Model Matematik Motor DC

Pengaturan kecepatan pada motor DC dengan penguatan medan dan menggunakan magnet permanen dapat dilakukan dengan mengatur tegangan pada kumparan jangkar. Dari rangkaian pada gambar 4. didapat persamaan :

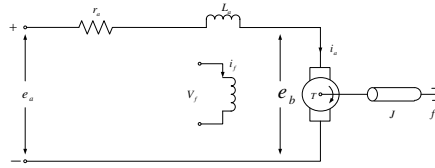
$$e_a = i_a r_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_b \quad (9)$$

dimana e_a adalah tegangan pada kumparan jangkar. L_a adalah induktansi dari kumparan jangkar, dan r_a menyatakan tahanan dari kumparan jangkar.

Arus yang mengalir pada kumparan jangkar bernilai i_a dalam hal ini, gaya gerak listrik industri atau emf di tuliskan sebagai e_b . Karena rapat medan, fluks, yang dihasilkan konstan, maka

$$e_b = K_e \omega \quad (10)$$

dengan K_e adalah konstanta motor.



Gambar 4 Rangkaian sederhana motor DC magnet permanent Ogata, K., 1991, *Modern Control Engineering*.

Persamaan kesetimbangan torsi yang dialami oleh motor diberikan oleh persamaan:

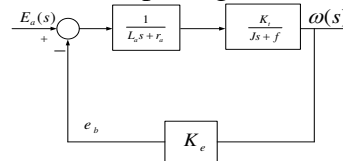
$$J \frac{d\omega}{dt} + f\omega = K_t i_a \quad (11)$$

K_t konstanta torsi motor.

Bila dianggap kondisi awal dari persamaan 9, 10 dan 11 adalah nol, maka bentuk fungsi alih dari kecepatan keluaran motor terhadap besar tegangan masukan dapat dituliskan:

$$\begin{aligned} E_a(s) &= \frac{r_a}{K_t} [sJ\omega(s) + f\omega(s)] + sL_a \left[\frac{sJ\omega(s) + f\omega(s)}{K_t} \right] + K_e \omega(s) \\ E_a(s) &= \frac{\omega(s)}{K_t} [r_a sJ + r_a f + s^2 L_a J + sL_a f + K_e K_t] \\ \frac{\omega(s)}{E_a(s)} &= \frac{K_t}{L_a J s^2 + (L_a f + r_a J)s + (r_a f + K_t K_e)} \end{aligned} \quad (12)$$

Persamaan fungsi alih 12 di atas dapat digambarkan blok seperti di bawah ini.



Gambar 5 Diagram blok fungsi alih motor DC

Pada umumnya induktansi dari kumparan jangkar motor L_a sangat kecil sekali harganya, sehingga dapat diabaikan. Dengan demikian fungsi alih antara kecepatan keluaran motor ω dengan tegangan masukan E_a dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K_M}{s(\tau_M s + 1)} \quad (13)$$

dengan K_M menyatakan konstanta penguatan motor DC dan τ_M adalah konstanta waktu motor DC.

Kontrol Proporsional

Untuk kontroler dengan aksi kontrol proporsional, hubungan antara masukan kontroler $u(t)$ dan sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$ adalah

$$u(t) = K_p e(t) \quad (14)$$

Atau dalam besaran transformasi Laplace

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (15)$$

Dengan K_p adalah suku penguatan proporsional.

Kontrol Integral

Pada kontroler dengan aksi kontrol integral nilai masukan kontroler $u(t)$ diubah pada laju proporsional dari sinyal pembangkit kesalahan $e(t)$ sehingga

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (16)$$

Dengan K_i adalah konstanta yang dapat diubah. Fungsi alih dari kontroler integral adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (17)$$

Jika nilai $e(t)$ ada dua (*double*), maka nilai $u(t)$ bervariasi dua kali secara cepat.

Kontrol Diferensial

Kontrol diferensial menghasilkan keluaran yang bergantung pada laju perubahan sinyal kesalahan yang terjadi. Persamaan masukan dan keluaran kontrol diferensial adalah

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (18)$$

Dengan transformasi Laplace maka didapatkan fungsi alih kontrol diferensialnya yaitu

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d T_d s \quad (19)$$

Kontrol Proporsional Integral (PI)

Aksi kontrol kontroler proporsional ditambah integral didefinisikan dengan persamaan berikut

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (20)$$

atau fungsi alih kontroler ini adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (21)$$

dengan K_p penguatan proporsional dan T_i disebut waktu integral.

Kontrol Proporsional Diferensial (PD)

Aksi kontrol proporsional ditambah turunan didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (22)$$

dan fungsi alihnya adalah

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (23)$$

dengan K_p adalah penguatan proporsional dan T_d konstanta yang disebut waktu turunan.

Kontrol Proporsional Integral Diferensial (PID)

Kombinasi dari aksi kontrol proporsional, aksi kontrol integral, dan aksi kontrol turunan disebut aksi kontrol proporsional ditambah integral ditambah turunan. Persamaan dengan tiga kombinasi ini diberikan oleh:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (24)$$

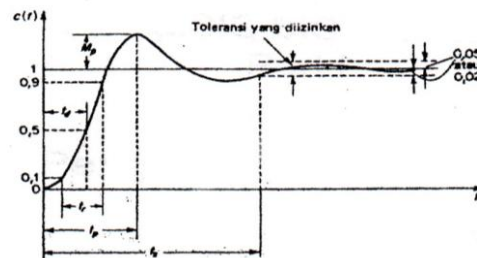
Atau fungsi alihnya

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (25)$$

dengan K_p penguatan proporsional, T_i waktu integral, dan T_d waktu turunan.

Respon Transien

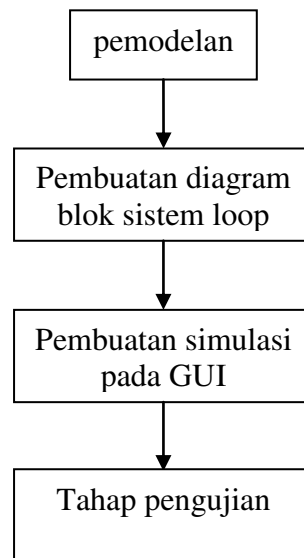
Respon transien adalah kinerja yang menunjukkan kecepatan respon sistem dalam satuan waktu pada saat gejala peralihan. Tanggapan peralihan suatu sistem kontrol terhadap masukan tangga satuan (unit step), umumnya dikelompokkan sebagai berikut (Ogata, 1996:286-287): Waktu tunda, t_d : Waktu naik, t_r : Waktu puncak, t_p : Lewatan maksimum, M_p : dan Waktu penetapan, t_s :



Gambar 6. Kurva respon tangga.

3. METODE PENELITIAN

Langkah-langkah yang digunakan untuk pembuatan simulasi kestabilan respon transien sistem motor DC menggunakan GUI pada Matlab dapat dilihat pada gambar 9.



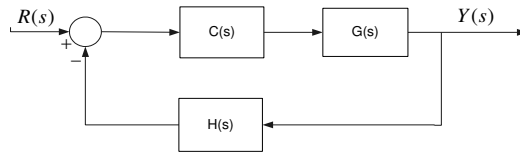
Gambar 7. Tahapan implementasi

Pemodelan

Pemodelan merupakan proses pembuatan model matematika dari suatu sistem fisis dengan menelaah dan menganalisis karakteristik dinamika sistemnya yang kemudian disimulasikan dalam komputer. Langkah-langkah yang harus dilakukan pada tahap pemodelan adalah menentukan : pengaturan fisik sistem motor DC, persamaan sistem motor DC, Diagram blok sistem, fungsi alih dari sistem motor DC, dan permintaan desain sistem yang diinginkan.

Diagram Blok Sistem Loop Tertutup

Kecepatan motor DC dapat diatur dengan menggunakan pengontrol. Ilustrasi sistem pengontrol kecepatan motor DC diberikan oleh gambar 8.



Gambar 8. Diagram blok sitem loop tertutup dengan umpan balik.

Dimana $G(s)$ adalah fungsi alih sistem motor DC, $C(s)$ adalah fungsi alih kontrol, $Y(s)$ adalah keluaran loop tertutup, $R(s)$ adalah masukan loop tertutup, dan $H(s)$ adalah umpan balik. Fungsi alih sistem loop tertutup gambar 8 adalah

$$Y(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)H(s)} R(s) \quad (26)$$

Pembuatan Simulasi pada GUI

Pembuatan GUI dilakukan dengan dua tahap, yaitu:

- Pembuatan halaman GUI
- Penulisan *script* program di *M-file* untuk proses simulasi

Pengujian (Penalaan Parameter Kontrol)

Langkah-langkah yang dilakukan dalam pengujian/ penalaan parameter kontrol adalah dengan memberi nilai konstanta pengontrol pada sistem kontrol motor DC dengan kontroler Proporsional, Proporsional Integral (PI), dan Proporsional Integral Diferensial (PID) sehingga menghasilkan respon transien yang diinginkan dengan metode coba-coba (*cut and try method*).

Teknik Analisis Sistem

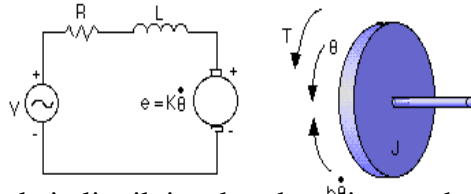
Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dengan membuat simulasi dalam bentuk gambar dan grafik (respon transien). Analisis respon sistem meliputi tingkat kecepatan respon transien untuk mencapai keadaan tunak, lonjakan (*overshoot*) terhadap perubahan sinyal rujukan, dan variasi parameter sistem atau perubahan kondisi lingkungan operasi. Langkah selanjutnya, hasil analisis tersebut dibahas berdasarkan karakteristik-karakteristik yang ada untuk kemudian ditarik suatu kesimpulan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN PEMODELAN

Rangkaian listrik pada jangkar dan diagram bentuk bodi rotor ditunjukkan pada gambar 9. Motor DC yang digunakan dalam eksperimen diambil dari sebuah motor DC yang sebenarnya di Labolatorium Kontrol Pascasarjana Carnegie Mellon (dari web site www.engin.umich.edu) dengan parameter sebagaimana terlihat pada tabel 1.

Table 1. Parameter motor DC untuk kecepatan

Lambang	Besaran	Parameter
J	Momen Inersia	3.2284E-6 kg.m ² /s ²
b	Koefisien gesekan	3.0577E-6 Nms
Kt	Konstanta torsi	0.0274 Nm/Amp
Ke	Konstanta ggl balik	0.0274 Nm/Amp
R	Resistansi	4 Ohm
L	Induktansi	2.75E-6 H



Gambar 9. Rangkaian listrik jangkar dan diagram bentuk bodi rotor

Torsi motor (T) direlasikan pada kuat arus jangkar (i) dengan sebuah konstanta jangkar (K_t), sedangkan Emf balik (e) direlasikan dengan kecepatan rotasi, maka persamaannya sebagai berikut:

$$T = K_t i \quad (27)$$

$$e = K_e \dot{\theta} \quad (28)$$

Dalam Satuan Internasional (SI), K_t sama dengan K_e (konstanta motor).

Dari gambar 9, berdasarkan hukum Newton yang dikombinasikan dengan hukum Kirchoff dapat ditulis persamaan sebagai berikut:

$$J \ddot{\theta} + b \dot{\theta} = T \quad (\text{persamaan kesetimbangan torsi})$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = K_t i \quad (29)$$

$$iR + L \frac{di}{dt} = V - e \quad (\text{persamaan rangkaian listrik pada jangkar})$$

$$iR + L \frac{di}{dt} = V - K_e \dot{\theta}$$

$$iR + L \frac{di}{dt} + K_e \frac{d\theta}{dt} = V \quad (30)$$

Dengan menggunakan transformasi Laplace, maka arus $i(s)$ pada kumparan jangkar:

$$i(s) = \frac{s^2 J \theta(s) + sb \theta(s)}{K_t} \quad (31)$$

Dengan mengeliminasi $i(s)$ dari persamaan 31 dimana kecepatan rotasinya sebagai keluaran dan tegangan sebagai masukannya, diperoleh fungsi alih sebagai berikut,

$$\left[\frac{s^2 J \theta(s) + sb \theta(s)}{K_t} \right] R + sL \left[\frac{s^2 J \theta(s) + sb \theta(s)}{K_t} \right] + sK_e \theta(s) = V(s)$$

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s[s^2 LJ + (Lb + JR)s + (bR + KeKt)]}$$

karena $Ke=Kt=K$, maka persamaan di atas menjadi:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s[(Js + b)(Ls + R) + K^2]} \quad (32)$$

Bagaimanapun selama percobaan ini akan diperlihatkan juga keadaan putaran motor sebagai keluarannya sehingga diperoleh keadaan dengan integrasi dot theta. Oleh karena itu, dibutuhkan fungsi alih dengan s .

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s((Js + b)(Ls + R) + K^2)} \quad (33)$$

Keterangan:

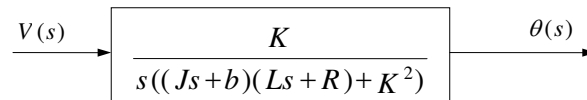
V = tegangan pada kumparan jangkar (volt)

e = gaya grah listrik induksi balik (emf) (volt)

- Ke= konstanta motor
- Kt= konstanta torsi motor
- b = koefisien gesekan (Nms)
- θ = perpindahan sudut dari poros motor (rad)
- T = torsi yang diberikan oleh motor (Nm)
- R = tahanan kumparan jangkar (ohm)
- L = induktansi kumparan jangkar (henry)

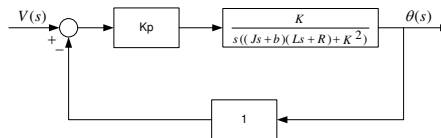
DIAGRAM BLOK LOOP TERBUKA DAN LOOP TERTUTUP

Diagram Blok Loop Terbuka

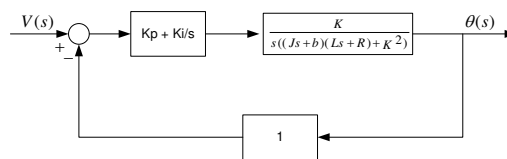


Gambar 10 Diagram blok loop terbuka dari fungsi alih motor DC

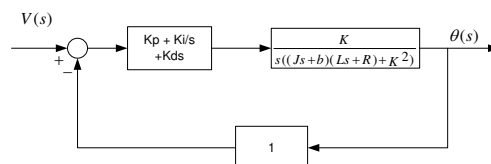
Diagram Blok Loop Tertutup dengan Kontroler



Gambar 11 Diagram blok loop tertutup pengontrol Proporsional



Gambar 12 Diagram blok loop tertutup pengontrol PI



Gambar 13 Diagram blok loop tertutup pengontrol PID

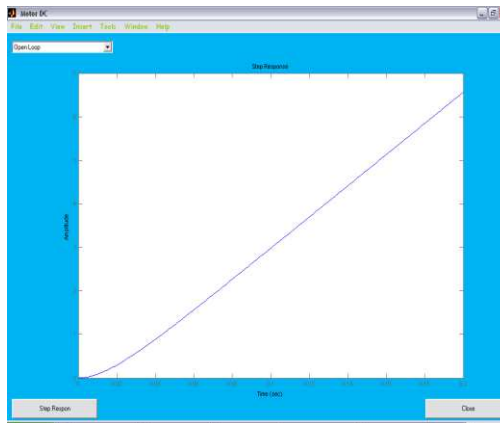
Permintaan Desain

Sistem motor DC yang baik mampu menunjukkan perpindahan poros motor yang sangat tepat. Permintaan performansi yang lain yaitu motor mampu mencapai keadaan putaran akhir yang sangat cepat. Dalam hal ini, waktu penetapan (*settling time*) 40 ms dan *overshoot* lebih kecil dari 16%.

Jika disimulasikan pada masukan rujukan (R) dengan masukan step satuan, sehingga keluaran kecepatan motor harus mempunyai *Settling time* 40 ms, *overshoot* tereduksi lebih kecil dari 16%, dan tidak ada kesalahan keadaan tunak

REPRESENTASI MATLAB DENGAN GUI

Dengan meletakkan fungsi alih ke dalam Matlab menggunakan GUI dengan mendefinisikan numerator dan denominator sebagai vektor, maka diperoleh respon step loop terbuka (dengan menekan menu *Open Loop*) sebagai berikut:



Gambar 14. Respon transien loop terbuka motor DC

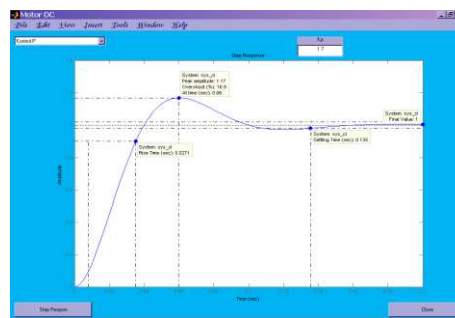
Dari plot di atas terlihat bahwa ketika 1 volt diaplikasikan dalam sistem, putaran motor berubah menjadi 6 radian. Padahal untuk sebuah masukan step motor 1 volt seharusnya mencapai 1 radian dan sistem motor itu tidak mencapai keadaan tunak sesuai dengan desain yang diinginkan.

TAHAP PENGUJIAN (PENALAN PARAMETER KONTROL)

Untuk menentukan pengontrol apa yang sesuai untuk sistem, maka diperlukan penalaan parameter pengontrol.

Kontrol Proporsional

Dengan metode *trial and error* (coba-coba) sesuai dengan kriteria pengontrol dilakukan penalaan selama 7 kali dengan nilai K_p 1 sampai 1.7, sehingga terlihat respon step sebagai berikut:

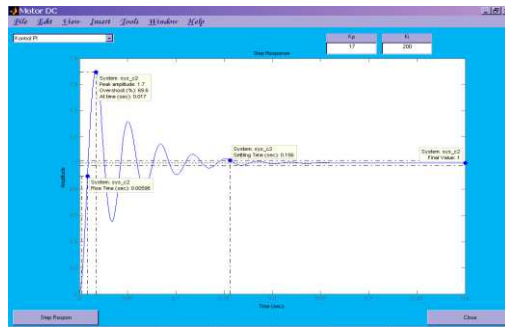


Gambar 15. Respon transien dengan pengontrol proporsional

Gambar diatas terlihat bahwa waktu naik(t_r)= 0.0271 sekon, *pek amplitude*=1.17, waktu puncak (t_p)=0.06 sekon, *overshoot*=16,9%, dan *settling time*= 0.135 sekon; artinya bahwa kesalahan keadaan tunaknya sudah agak bagus, *settling time* (waktu penetapan) sangat luas sebagaimana *overshoot*nya, sehingga tidak sesuai dengan kriteria kestabilan yang diinginkan.

Kontrol Proporsional Integral (PI)

Untuk meningkatkan gain agar respon semakin cepat maka dilakukan penalaan dengan merubah K_i sampai dengan 200 dan K_p sampai dengan 17. sehingga diperoleh respon step sebagaimana terlihat pada gambar 16.

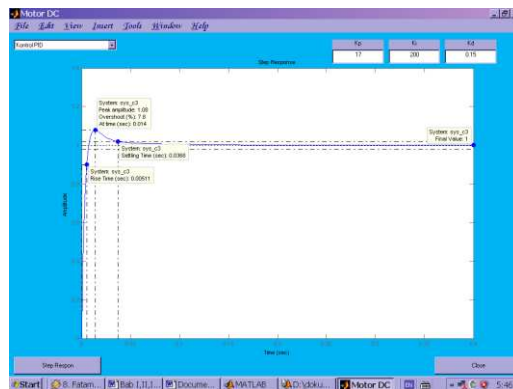


Gambar 16. Respon transien dengan pengontrol PI

Dari gambar di atas diperoleh data yaitu waktu naik(t_r)=0.00596 sekon, *peak amplitude*=1.7, waktu puncak (t_p)=0.017 sekon, *overshoot*=69,6%, dan *settling time*= 0.156 sekon; artinya respon lebih cepat dari pada sebelumnya, tapi dengan besarnya K_i menyebabkan respon transient menjadi lebih buruk (*overshoot*nya besar atau naik).

Pengontrol PID

Pengontrol PI jika ditambah pengontrol derivative akan mereduksi *overshoot*. Dengan cara melakukan penalaan seperti yang diatas diperoleh respon step dengan $K_p=17$, $K_i=600$, dan $K_d=0.15$ sebagai berikut:



Gambar 17 Respon transien dengan pengontrol PID

Dari gambar di atas diperoleh data yaitu waktu naik=0.00511 sekon, *peak amplitude*=1.08, waktu puncak =0.014 sekon, *overshoot*=7.8%, dan *settling time*= 0.0368 sekon.

4. PEMBAHASAN

Dari hasil pengujian (gambar 15) di atas diketahui bahwa ketika sistem motor DC diberi pengontrol proporsional tidak menghasilkan respon transien yang sesuai dengan kriteria yang diinginkan. Sistem tersebut masih kurang sempurna dan kurang memuaskan sebab membutuhkan *settling time* yang cukup lama.

Pengujian berikutnya sistem motor DC tersebut diberi pengontrol Proporsional Integral (PI) dengan beberapa kali penalaan sampai diperoleh respon transien dengan $K_p=17$ dan $K_i=200$. Dari gambar 16 diketahui bahwa hasil keluarannya sudah mendekati kestabilan tapi respon transiennya menjadi lebih buruk yaitu respon sistem berisolasi dengan *overshoot* cukup besar mencapai nilai 69,6%. Untuk mereduksi *overshoot* yang terjadi, maka ditambahkan pengontrol Derivatif dengan beberapa nilai parameter pengontrol yang bervariasi. Dari beberapa variasi nilai parameter pengontrol PID, respon

sistem mampu memberikan respon yang mampu mengikuti perubahan input. Respon sistem terbaik diperoleh untuk nilai $K_p=17$, $K_i=200$, dan $K_d=0.15$, dimana respon sistem terjadi sedikit lonjakan dan mampu mencapai keadaan tunak pada $t=0.0368$ sekon. Dari gambar 17 di peroleh *settling time* sekitar 40ms, *overshoot* tereduksi lebih kecil dari 16%, dan tidak ada kesalahan keadaan tunak. Jadi dengan menggunakan pengontrol PID dengan nilai $K_p=17$, $K_i=200$, dan $K_d=0.15$ sistem motor DC menjadi stabil, sehingga ketika suatu peralatan yang menggunakan motor DC dihidupkan, sistem mencapai keadaan tunak dengan waktu yang cepat.

5. KESIMPULAN

Simulasi respon transien dengan menggunakan GUI dibuat berdasarkan persamaan fungsi alih sistem loop tertutup motor DC dengan mendefinisikan numerator dan denominator sebagai vektor.

Dari beberapa pengujian sistem dengan variasi parameter K_p , K_i , dan K_d yang berbeda, didapatkan bahwa respon terbaik sistem diperoleh pada saat $K_p=17$, $K_i=200$, dan $K_d=0.15$ yaitu menghasilkan *settling time* sekitar 40 ms, *overshoot* tereduksi lebih kecil dari 16%, dan tidak ada kesalahan keadaan tunak.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Hanselman, Duane dan Little Fied, Bruce. 2000. *Matlab*. Alih bahasa : Josep Ediyanto. Yogyakarta: Andi.
- Hartanto, Thomas Wahyu Dwi dan Prasetyo, Y. Wahyu Agung. 2003. *Analisa Desain Sistem Kontrol dengan Matlab*. Yogyakarta: Andi.
- Joseph, J. D. 1985. *Sistem Pengendalian dan Umpan Balik*. Jakarta: Erlangga.
- Kuo, Benjamin C. 1987. *Automatic Control Systems*. Fifth Edition, Prentice-Hall. Inc.
- Ogata, Katsuhiko. 1991. *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Ogata, Katsuhiko. 1996. *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Pakpahan. S. 1988. *Kontrol Otomatik : Teori dan Penerapan*. Jakarta: Erlangga.
- Pasya, Ahmad Fuad. 2004. *Dimensi Sains Al-Qur'an, Menggali Kandungan Ilmu Pengetahuan dari Al-Qur'an*. Solo: Tiga Serangkai.
- Shihab, M. Quraish. 2002. *Tafsir Al-Misbah: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an Volume 6*. Jakarta: Lentera Hati.
- Shihab, M. Quraish. 2002. *Tafsir Al-Misbah: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an Volume 10*. Jakarta: Lentera Hati.

www.engin.umich.edu