

Desain Kompensator Motor Servo Dc 734 Pada Laboratorium Dasar Sistem Kendali

Ir. Barani Simanjorang, MT ¹⁾, David Desvend Sinaga²⁾, Sylvia Lourenza ³⁾
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas HKBP Nommensen
baranimanjorang@gmail.com

Abstrak

Kompensasi adalah pengaturan satu sistem agar dapat memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Pendekatan yang digunakan dalam mendesain kompensator sistem kendali motor servo DC seri 734 di Laboratorium Dasar Sistem Kendali adalah pendekatan tempat kedudukan akar (root locus). Dalam perancangan kompensator secara elektronik, realisasi atau implementasi fisik sebaiknya dilakukan dengan teliti sehingga dihasilkan rangkaian elektronik yang dapat mewakili spesifikasi yang diinginkan. Kompensator lead secara umum akan mempercepat tanggapan sistem dan meningkatkan stabilitas sistem; sedangkan kompensator lag akan menaikkan akurasi steady-state dari sistem, tetapi cenderung memperlambat tanggapan sistem. Bila ingin mengembangkan sistem kendali yang bagus spesifikasinya pada tanggapan transien dan tanggapan steady-state sekaligus, maka penggabungan kedua prinsip kompensator ini menjadi pilihan yang cukup bagus.

Kata kunci: kompensator, lead, lag, lead-lag, root locus, pole, zero, spesifikasi

ABSTRACT

Compensation is the arrangement of a system in order to meet the desired specifications. The approach used in designing the compensator for the DC servo motor control system 734 series in the Basic Control System Laboratory is the root locus approach. In designing an electronic compensator, the physical realization or implementation should be done carefully so that an electronic circuit is produced that can represent the desired specifications. Lead compensator will generally speed up system response and increase system stability; while the lag compensator will increase the steady-state accuracy of the system, but tends to slow down the response of the system. If you want to develop a control system that has good specifications for both transient response and steady-state response, the combination of these two compensator principles is a pretty good choice.

Keywords: compensator, lead, lag, lead-lag, root locus, pole, zero, specification

PENDAHULUAN

Kadang kala dalam proses mendesain suatu sistem kendali, desainer menghadapi sistem dengan plant yang tidak dapat diubah fungsi transfer-nya. Sebuah kompensator disisipkan untuk mengkompensasi sistem sehingga diperoleh perilaku sistem yang diinginkan. Dalam hal ini kompensator dapat diwujudkan dalam berbagai jenis sistem, di antaranya: sistem pneumatik, sistem hidrolis, sistem termal, dan sistem elektronik. Dari beberapa sistem tersebut, sistem elektronik dianggap paling praktis dan efisien baik dari segi aplikasi maupun biaya implementasinya.

DASAR TEORI

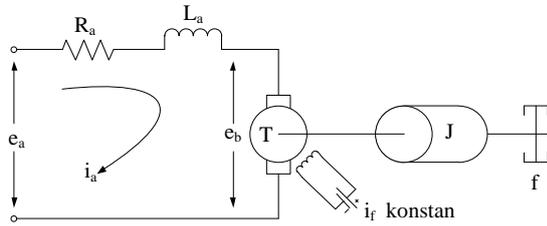
Motor Servo DC Pengontrolan Jangkar

Pengontrolan posisi motor servo DC dengan model dinamik motor dicari berdasarkan proses yang terjadi, yaitu mengubah energi listrik dalam hal ini tegangan input, menjadi energi gerak dalam bentuk putaran motor. Besaran sudut putar, kecepatan putar, dan arus berubah tergantung pada penguatan dan konstanta waktu yang ditentukan oleh momen inersia, redaman, dan lain-lain.

Konversi energi pada motor DC dijalankan oleh tiga komponen penting, yaitu:

1. Konduktor arus (kumparan jangkar)
2. Penghasil medan magnet (magnet permanen) maupun kumparan elektromagnetik

3. Media kontak (sikat, komutator), yang masing-masing menghantarkan arus dari sumber arus kumparan jangkar dan sebagai tempat pemasangan kumparan jangkar.



Gambar 1. Diagram Skematik Motor DC Pengontrolan Jangkar

Keterangan gambar:

1. R_a = tahanan jangkar (Ohm),
2. L_a = induktansi kumparan jangkar (Henry),
3. i_a = arus jangkar (Ampere),
4. i_f = arus medan (Ampere),
5. e_a = tegangan yang diberikan ke kumparan jangkar (Volt),
6. e_b = gaya gerak listrik balik (Volt),
7. θ = perpindahan sudut poros motor (radian),
8. T = torsi yang diberikan oleh motor (N-m),
9. J = momen inersia ekivalen motor dan beban pada poros ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$), dan
10. f = koefisien gesekan viskos ekivalen dari motor dan beban pada poros motor ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}/\text{det}$).

Untuk fluksi yang konstan, tegangan terinduksi e_b berbanding lurus dengan kecepatan sudut $\frac{d\theta}{dt}$, maka:

Tegangan terinduksi:

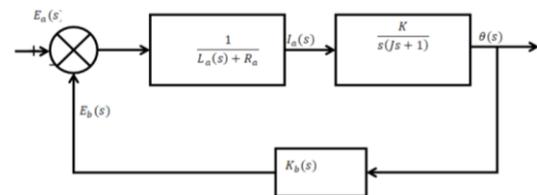
$$e_b = K_b \frac{d\theta}{dt}$$

Persamaan rangkaian jangkar:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = e_a$$

Arus jangkar menghasilkan torsi yang dikenakan pada inersia dan gesekan, sehingga:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = T = K i_a$$



Gambar 2. Diagram Blok Motor DC Pengontrolan Jangkar

Fungsi transfer motor DC

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s[L_a J s^2 + (L_a f + R_a J)s] + R_a f + K K_b}$$

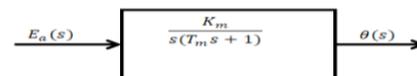
Induktansi L_a pada rangkaian jangkar biasanya kecil dan dapat diabaikan. Maka fungsi transfer persamaan dapat dinyatakan menjadi

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s[T_m s + 1]}$$

Dimana:

$$K_m = \frac{K}{(R_a f + K K_b)} = \text{konstanta penguatan motor}$$

$$T_m = \frac{R_a J}{(R_a f + K K_b)} = \text{konstanta waktu motor}$$



Gambar 3. Diagram Blok Lup Terbuka

Maka fungsi transfer lup tertutup

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s[T_m s + 1] + K_m}$$

Dengan penguatan

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K K_m}{s[T_m s + 1] + K K_m}$$

Atau
$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K K_m}{s^2 + 1/T_m s + K K_m/\tau_m}$$

Spesifikasi Performansi

Performansi sistem kendali yang diinginkan dinyatakan dalam bentuk besaran wawasan waktu. Fungsi transfer lup tertutup dari sistem tersebut:

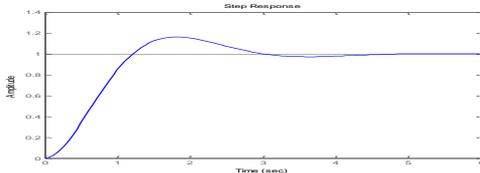
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{4}{s^2 + 2s + 4}$$

Dengan Matlab:

```
num=[0 0 4];
den=[1 2 4];
step(num,den)
```

Diperoleh kurva respon output lup tertutup sistem seperti pada gambar 4.

Dalam menentukan karakteristik respon transien terhadap input step biasanya ditentukan waktu tunda (t_d), waktu naik (t_r), waktu puncak (t_p), persen lewatan waktu maksimum (M_p), dan waktu penetapan (t_s).

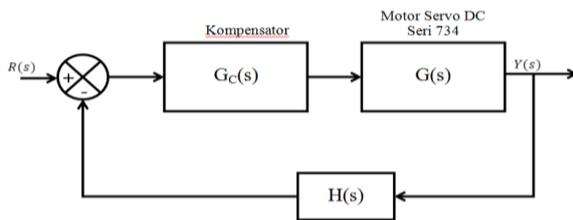


Gambar 4. Respon Lup Tertutup Suatu Sistem Kendali.

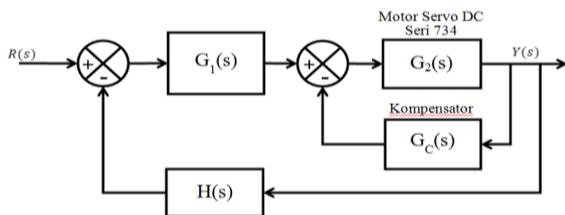
Kompensasi Sistem

Kompensator merupakan perangkat listrik, mekanik, pneumatik, hidrolis, atau kombinasinya dan terdiri dari rangkaian RC (listrik, mekanik, pneumatik, hidrolis), dan penguat.

Jika kompensator $G_c(s)$ dipasang secara seri (kaskade) dengan fungsi transfer yang tidak dapat diubah misalnya $G(s)$ maka disebut kompensasi kaskade seperti ditunjukkan gambar.



Gambar 5. Diagram Blok Kompensasi Kaskade Suatu alternatif selain kompensasi kaskade adalah kompensasi paralel dengan memasang kompensator pada lintasan umpan balik dalam, seperti ditunjukkan gambar.



Gambar 6. Diagram Blok Kompensasi Paralel

Jenis Kompensator

Kompensator *Lead*, *Lag*, dan *Lead-Lag* dapat diwujudkan dalam bentuk rangkaian listrik RC.

Kompensator Lead

Diagram skematik rangkaian Kompensator *Lead* ditunjukkan pada gambar 6 dengan $R_1C_1 > R_2C_2$.

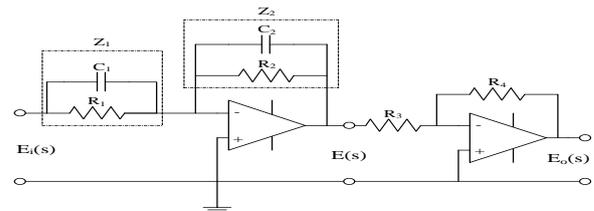
Dari rangkaian tersebut diperoleh impedansi Z_1 dan Z_2 .

$$Z_1(s) = \frac{R_1}{R_1C_1s + 1}$$

$$Z_2(s) = \frac{R_2}{R_2C_2s + 1}$$

Fungsi transfer dinyatakan dengan:

$$\frac{E(s)}{E_i(s)} = - \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$



Gambar 7. Rangkaian Elektronik sebagai Kompensator *Lead* atau Kompensator *Lag*

$$\frac{E(s)}{E_i(s)} = - \frac{R_2 R_1 C_1 s + 1}{R_1 R_2 C_2 s + 1} = - \frac{C_1 s + \frac{1}{R_1 C_1}}{C_2 s + \frac{1}{R_2 C_2}}$$

$$\frac{E_0(s)}{E(s)} = - \frac{R_4}{R_3}$$

$$\frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{R_2 R_4 R_1 C_1 s + 1}{R_1 R_3 R_2 C_2 s + 1} = \frac{R_4 C_1 s + \frac{1}{R_1 C_1}}{R_3 C_2 s + \frac{1}{R_2 C_2}}$$

Didefinisikan:

$$R_1 C_1 = T$$

$$R_2 C_2 = \alpha T$$

$$K_C = \frac{R_4 C_1}{R_3 C_2}$$

$$K_C \alpha = \frac{R_4 C_1 R_2 C_2}{R_3 C_2 R_1 C_1} = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}$$

$$\alpha = \frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}$$

dimana $0 < \alpha < 1$.

Maka fungsi transfer menjadi:

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = K_C \alpha \frac{T_s+1}{\alpha T_s+1} = K_C \frac{s+\frac{1}{T}}{s+\frac{1}{\alpha T}}$$

Kompensator Lag

Diagram skematik rangkaian kompensator *Lag* sama dengan rangkaian kompensator *Lead* ditunjukkan pada gambar 8, namun $R_1 C_1 < R_2 C_2$. Dari rangkaian pada gambar, untuk kompensator *Lag*:

$$R_1 C_1 = T$$

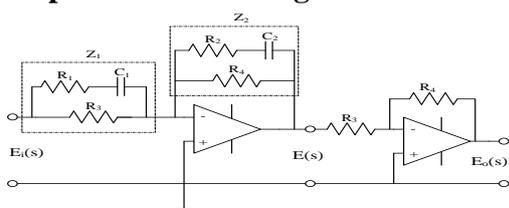
$$R_2 C_2 = \beta T$$

$$\beta = \frac{R_2 C_2}{R_1 C_1} \text{ dimana } \beta > 1$$

$$\widehat{K}_C = \frac{R_4 C_1}{R_3 C_2}$$

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \widehat{K}_C \beta \frac{T_s+1}{\beta T_s+1} = \widehat{K}_C \frac{s+\frac{1}{T}}{s+\frac{1}{\beta T}}$$

Kompensator Lead-Lag



Gambar 8. Rangkaian Elektronik Kompensator *Lead - Lag*

Dari rangkaian pada gambar, diperoleh bahwa impedansi Z_1 dan Z_2 adalah

$$Z_1 = \frac{(R_1 C_1 s + 1) R_3}{(R_1 + R_3) C_1 s + 1}$$

$$Z_2 = \frac{(R_2 C_2 s + 1) R_4}{(R_2 + R_4) C_2 s + 1}$$

Fungsi transfer:

$$\frac{E(s)}{E_i(s)} = - \frac{Z_2}{Z_1} = - \frac{R_4 (R_1 + R_3) C_1 s + 1}{R_3 (R_1 C_1 s + 1)} \frac{R_2 C_2 s + 1}{(R_2 + R_4) C_2 s + 1}$$

$$\frac{E_o(s)}{E(s)} = - \frac{R_6}{R_5}$$

Definisikan:

$$(R_1 + R_3) C_1 = T_1$$

$$R_1 C_1 = \frac{T_1}{\gamma}$$

$$R_2 C_2 = T_2$$

$$(R_2 + R_4) C_2 = \beta T_2$$

Maka fungsi transfer menjadi:

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = K_C \frac{\beta (T_1 s + 1) (T_2 s + 1)}{\gamma (\frac{T_1}{\gamma} s + 1) (\beta T_2 s + 1)} = K_C \frac{(s+\frac{1}{T_1})(s+\frac{1}{T_2})}{(s+\frac{\gamma}{T_1})(s+\frac{1}{\beta T_2})}$$

Dimana:

$$\gamma = \frac{R_1 + R_3}{R_1} > 1$$

$$\beta = \frac{R_2 + R_4}{R_2} > 1$$

$$K_C = \frac{R_2 R_4 (R_1 + R_3) + R_3}{R_1 R_3 R_2 + R_4}$$

METODOLOGI PERANCANGAN

Identifikasi Plant

Mencari Fungsi Transfer dengan Pengujian Rangkaian dan Prosedur Pengujian

Servo DC dengan komponen-komponen pendukung sistem, terdiri dari:

1. 72686, komponen *power supply* $\pm 15V/3A$
2. 73410, komponen servo potensiometer *set point*
3. 73406, komponen pengendali PID

Dengan parameter masing-masing pengendali adalah

Proporsional (P) = 0 – 10, dengan faktor pengali 0,1;1;10 dan 100

Integral (I) = 0,1 – 1, dengan faktor pengali 0,1;1;10 dan 100

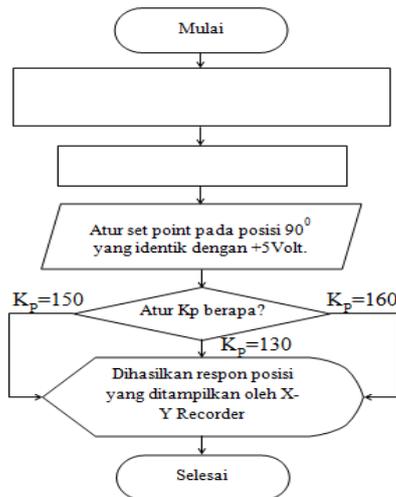
Derivatif (D) = 0,02 – 0,2; dengan faktor pengali 0,1;1;10 dan 100

4. 73413, komponen *power amplifier*
5. 73414, komponen DC servo dilengkapi potensiometer (2.31)
6. 57913, *Toggle Switch, single pole* (2.32)
7. 57529, *two - channel* (2.32)
8. 500441, 500444, 500446, 500401, yang merupakan kabel-kabel penghubung, masing-masing berwarna merah, hitam, kuning, dan merah.

Prosedur pengujian dilakukan sebagai berikut:

1. Rangkaian blok pengujian (hanya pengendali P) dengan sensor posisi dihubungkan dengan *X-Y Recorder*. (2.35)
2. Hidupkan *power supply*.
3. Atur potensiometer *set-point* pada posisi 90° yang identik dengan +5 Volt. (2.36)
4. Atur parameter K_P dengan mengatur kontroler Proporsional (P) dengan faktor pengali yang ada, dalam hal ini $K_P=130$. (2.37)
5. Dengan K_P pada poin 4 dihasilkan respon posisi yang direkam oleh *X-Y Recorder*.

6. Dengan cara yang sama dilakukan untuk $K_p=150$ dan $K_p=160$.



Gambar 9. Flowchart Prosedur Pengujian
Perhitungan Parameter dan Respon Hasil Pengujian

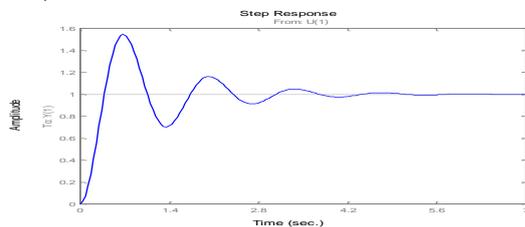
Analisis respon pengujian:

1. Dengan melakukan pengujian untuk $K_p=130$ diperoleh respon lup tertutup seperti pada gambar 10.

Dengan perhitungan diperoleh:

$$M_p=0,532$$

$$t_p=0,875$$



Gambar 10. Respon untuk $K_p=130$

Persamaan umum sistem orde kedua lup tertutup

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Perumusan peak overshoot

$$M_p = e^{\frac{-\zeta\pi}{1-\zeta^2}}$$

Faktor redaman

$$\zeta = \pm \frac{\ln M_p}{\sqrt{(\pi^2 + (\ln M_p)^2)}}$$

Frekuensi alamiah

$$\omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{(1-\zeta^2)}}$$

Dari persamaan (2-9) dapat dituliskan hubungan ζ dan ω_n :

$$\tau_m = \frac{1}{2\zeta\omega_n}$$

$$K_m = \frac{\omega_n^2 \tau_m}{K_p}$$

Dari hasil perhitungan, diperoleh:

$$\zeta = 0,748$$

$$\omega_n = 5,402$$

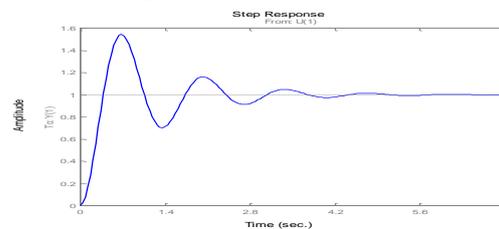
$$\tau_m = 0,181$$

$$K_m = 0,181$$

Maka fungsi transfer untuk pengujian K_p diperoleh:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{29,2}{s^2 + 8,1s + 29,2}$$

2. Dengan melakukan pengujian untuk $K_p=150$, diperoleh respon lup tertutup seperti gambar 11.



Gambar 11. Respon untuk $K_p=150$

Dengan perhitungan diperoleh:

$$M_p=0,566$$

$$t_p=0,825$$

$$\zeta=0,734$$

$$\omega_n=5,688$$

$$\tau_m=0,096$$

$$K_m=0,118$$

Maka fungsi transfer:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{32,4}{s^2 + 8,027s + 32,4}$$

3. Dengan melakukan pengujian untuk $K_p=160$, diperoleh respon lup tertutup seperti gambar 12

Dengan perhitungan diperoleh:

$$M_p=0,583 \quad (3.2)$$

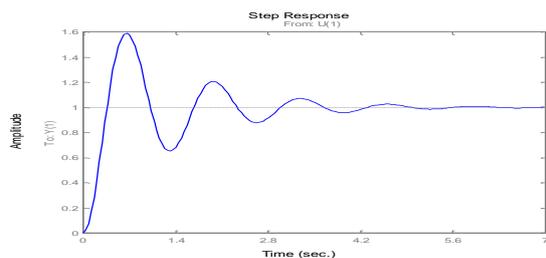
$$t_p=0,750$$

$$\zeta=0,734 \quad (3.3)$$

$$\omega_n=5,688$$

$$\tau_m=0,096$$

$$K_m=0,118 \quad (3.4)$$



Gambar 12. Respon untuk Kp=160

Maka fungsi transfer:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{38,9}{s^2 + 9,24s + 38,9}$$

Dari respon lup tertutup pada gambar 10, gambar 11, dan gambar 12 ditunjukkan bahwa untuk K_P yang berbeda tetapi hasilnya mendekati sama.

Spesifikasi Performansi

Spesifikasi diberikan dalam bentuk kuantitas wawasan waktu seperti lewat maksimum, waktu naik, waktu penetapan, rasio redaman, dan frekuensi alamiah tak teredam dari pole-pole lup tertutup dominan yang diinginkan.

Prosedur Desain

Kompensator Lead

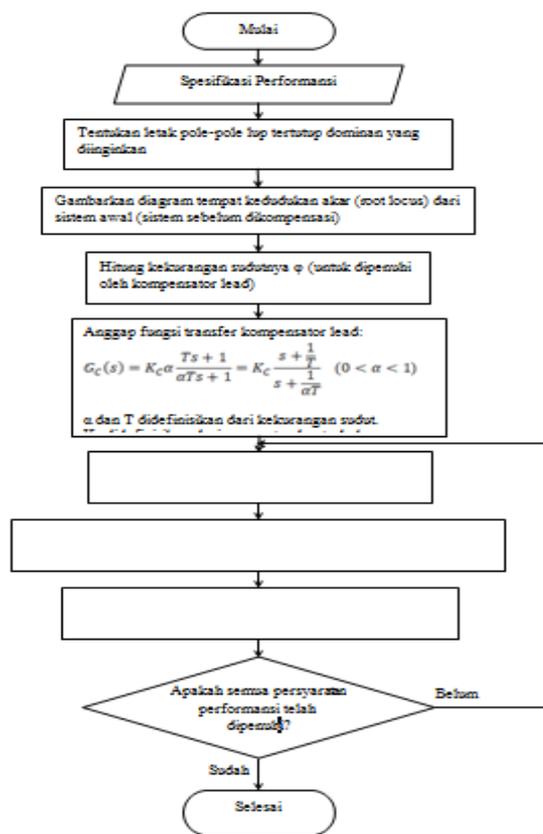
Prosedur desain:

1. Dari spesifikasi performansi, tentukan letak pole-pole lup tertutup dominan yang diinginkan.
2. Dengan menggambar *root locus* sistem awal (tak terkompensasi), hitung kekurangan sudut ϕ .
3. Anggap kompensator Lead:

$$G_C(s) = K_C \alpha \frac{T s + 1}{\alpha T s + 1} = K_C \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} \quad (0 < \alpha < 1)$$

dengan α dan T didefinisikan dari kekurangan sudut. K_C didefinisikan dari penguatan lup terbuka.

4. Jika konstanta kesalahan statik tidak disebutkan, tentukan letak pole dan zero rangkaian Lead untuk memenuhi kekurangan sudut ϕ .
5. Tentukan penguatan lup terbuka kompensator Lead dari syarat besaran. Setelah kompensator selesai didesain, cek apakah semua persyaratan performansi telah dipenuhi atau belum.



Gambar 13. Flowchart Prosedur Desain Kompensator Lead

Kompensator Lag

Prosedur desain:

1. Gambarkan tempat kedudukan akar untuk sistem tak terkompensasi yang fungsi transfer lup terbukanya $G(s)$.
2. Berdasarkan spesifikasi respon transien, tentukan letak pole-pole lup tertutup dominan pada root locus.
3. Anggap fungsi transfer kompensator Lag:

$$G_C(s) = \widehat{K}_C \beta \frac{T s + 1}{\beta T s + 1} = \widehat{K}_C \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\beta T}} \quad (3.10)$$

Kemudian fungsi transfer lup terbuka dari sistem terkompensasi menjadi $G_C(s)G(s)$.

4. Tentukan penguatan lup terbuka dengan menggunakan syarat besar.
5. Evaluasi konstanta kesalahan statik khusus yang diberikan.
6. Tentukan besarnya penambahan konstanta kesalahan statik yang diperlukan agar memenuhi spesifikasi respons transien.
7. Tentukan *pole* dan *zero* rangkaian Lag yang menghasilkan penambahan

- konstanta kesalahan yang diperlukan tanpa banyak mengubah root locus awal.
- Gambar *root locus* yang baru dengan kompensasi. Letakkan *pole-pole* lup tertutup dominan yang diperlukan pada *root locus* tersebut.
 - Jika kontribusi sudut dari rangkaian *Lag* sangat kecil atau beberapa derajat saja, hal itu berarti *root locus* asal dan yang baru hampir identik. Jika terjadi perbedaan yang besar maka harus diulangi lagi menempatkan *pole-pole* lup tertutup yang baru. Hal ini dapat terus berulang hingga diperoleh spesifikasi respons transien.

Atur penguatan dengan menggunakan syarat besar, sehingga *pole-pole* lup tertutup dominan terletak pada posisi yang diinginkan. Dengan mengikuti prosedur desain yang disebutkan di atas, dapat ditentukan *pole* dan *zero* dari rangkaian *Lag*, yaitu dengan cara menentukan besar resistor R_1 , R_2 , dan kapasitor C pada rangkaian *Lag*.

Kompensator Lead-Lag

Kasus 1: $\gamma \neq \beta$

Prosedur desain:

- Dari spesifikasi performansi, tentukan lokasi yang diinginkan untuk *pole-pole* lup tertutup dominan yang diinginkan.
- Anggap kompensator Lead-Lag $G_C(s)$:

$$G_C(s) = K_C \frac{(s + \frac{1}{T_1})(s + \frac{1}{T_2})}{(s + \frac{\gamma}{T_1})(s + \frac{1}{\beta T_2})}$$

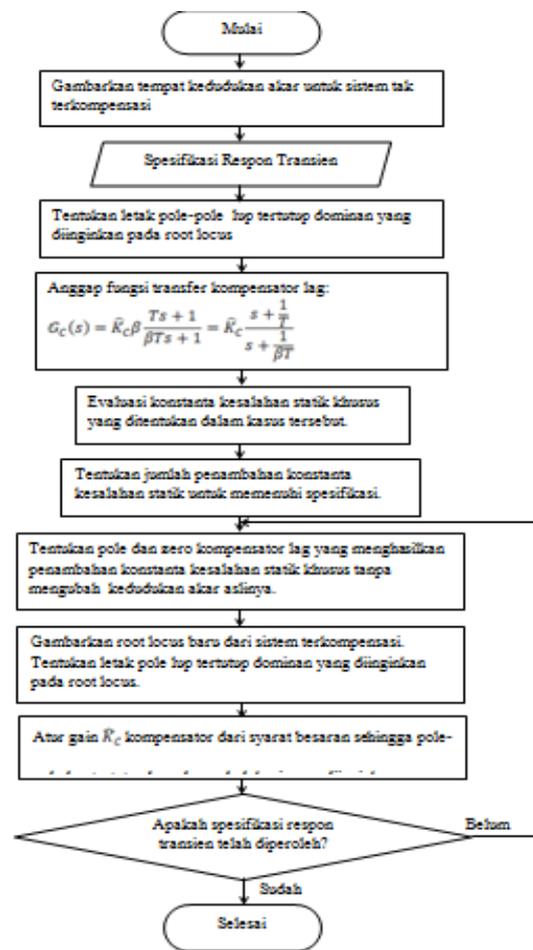
dan fungsi transfer lup terbuka tak terkompensasi adalah $G(s)$, tentukan kekurangan sudut ϕ jika *pole-pole* lup tertutup dominan akan berada pada lokasi yang diinginkan. Bagian fase *lead* dari kompensator *Lead-Lag* harus menyumbangkan kekurangan sudut tersebut.

- Dengan menganggap bahwa kemudian kita memilih T_2 cukup besar sehingga besarnya bagian *lead*

$$\left| \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} \right|$$

adalah kira-kira satu, dengan $s=s_1$ adalah satu dari *pole-pole* lup tertutup dominan. Pilih nilai T_1 dan γ dari persyaratan

$$\frac{s_1 + \frac{1}{T_1}}{s_1 + \frac{\gamma}{T_1}} = \phi$$



Gambar 14. Flowchart Prosedur Desain Kompensator Lag

- Tentukan nilai K_C dari syarat besaran:

$$\left| K_C \frac{s_1 + \frac{1}{T_1}}{s_1 + \frac{\gamma}{T_1}} G(s_1) \right| = 1$$

- Jika konstanta kesalahan kecepatan statik K_v ditetapkan, tentukan nilai β untuk memenuhi persyaratan untuk K_v . Konstanta kesalahan kecepatan statik diberikan oleh

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s K_C \frac{\beta}{\gamma} G(s)$$

Kemudian dengan nilai β yang baru ditentukan, pilih nilai T_2 sehingga

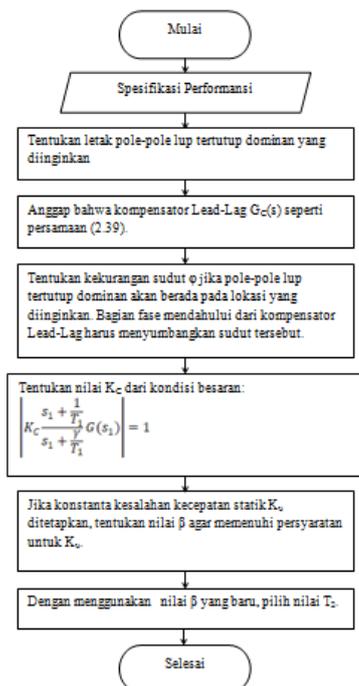
$$\left| \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} \right| := 1$$

Kasus 2: $\gamma = \beta$

- Prosedur desain:
1. Dari spesifikasi performansi, tentukan lokasi yang diinginkan untuk pole-pole lup tertutup dominan yang diinginkan.
 2. Kompensator Lead-Lag $G_C(s)$ yang diberikan persamaan (3.12) dimodifikasi menjadi:

$$G_C(s) = K_C \frac{(s + \frac{1}{T_2})(s + \frac{1}{T_1})}{(s + \frac{\beta}{T_1})(s + \frac{1}{\beta T_2})}$$

$$-5^0 < \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} < 0^0$$



Gambar 15. Flowchart Prosedur Desain Kompensator Lead-Lag Kasus 1

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s K_C G(s) \tag{3.20}$$

3. Untuk memperoleh pole-pole lup tertutup dominan pada lokasi yang diinginkan, hitung kontribusi sudut ϕ yang diperlukan dari bagian fase *Lead* dari kompensator *Lead-Lag*.
4. Dengan menganggap bahwa kemudian kita memilih T_2 cukup besar sehingga

$$\left| \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} \right|$$

adalah kira-kira satu, dengan $s=s_1$ adalah satu dari pole-pole lup tertutup dominan. Pilih nilai T_1 dan β dari persyaratan besaran dan sudut:

$$(3.17)$$

$$\left| K_C \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} G(s_1) \right| = 1$$

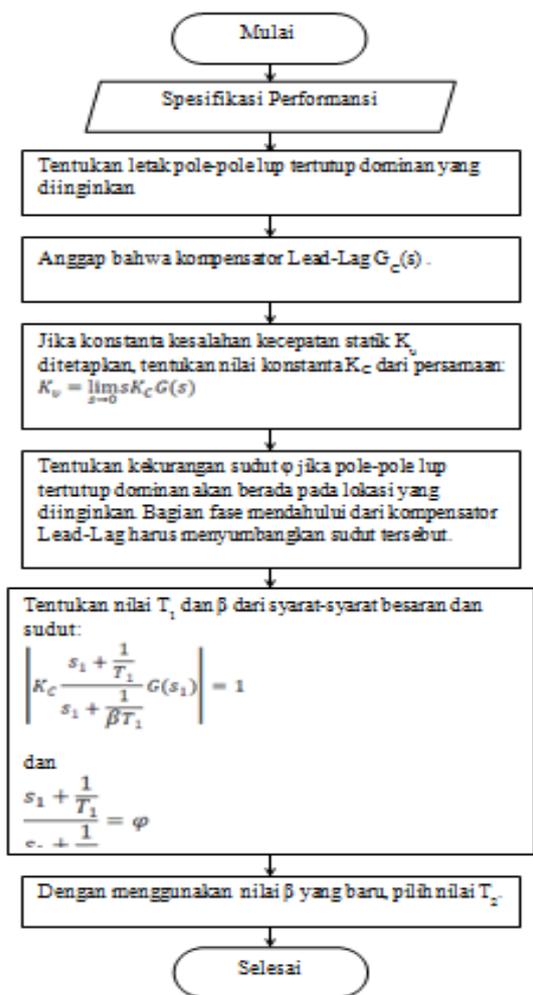
$$\frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} = \phi$$

4. Dengan menggunakan nilai β yang baru ditentukan, pilih T_2 sehingga

$$\left| \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} \right| := 1$$

$$-5^0 < \frac{s_1 + \frac{1}{T_2}}{s_1 + \frac{1}{\beta T_2}} < 0^0$$

Nilai βT_2 , konstanta waktu terbesar dari kompensator *Lead-Lag* secara fisik tidak boleh diwujudkan terlalu besar.

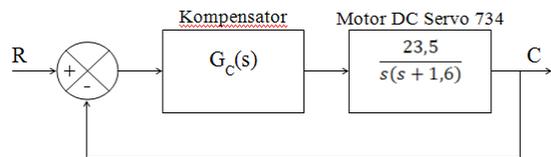


Gambar 16. Flowchart Prosedur Desain Kompensator Lead-Lag Kasus 2

HASIL DAN PEMBAHASAN

Diagram Blok Dan Realisasi Kompensator

Tujuan akhir desain dalam tulisan ini adalah mengimplementasikan hasil desain pada sistem kendali yang sesungguhnya (*real plant*). Diharapkan dengan implementasi tersebut, letak *pole* sistem dapat ditempatkan pada lokasi yang diinginkan.



Gambar 17. Diagram Blok Sistem dengan Kompensator

Implementasi

Mengimplementasikan sistem kendali hasil desain pada sistem yang sesungguhnya berarti merealisasikan perangkat kompensator

pengendali sesuai desain dan mengkompensasikan dengan plant atau proses yang akan dikendalikan menjadi suatu sistem baru pada Laboratorium Dasar Sistem Kendali.

Kompensator Lead

Fungsi transfer motor servo DC 734 adalah

$$G(s) = \frac{23,5}{s(s+1,6)}$$

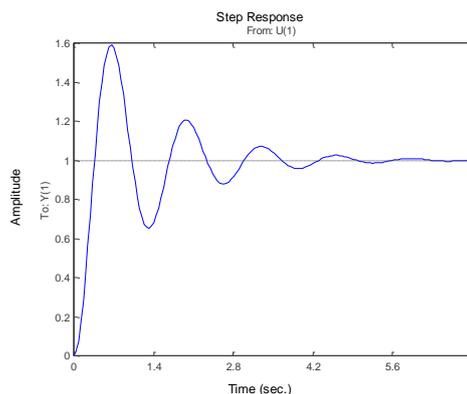
Diagram tempat kedudukan akar-akar (root locus) untuk sistem ini

Fungsi transfer lup tertutup menjadi

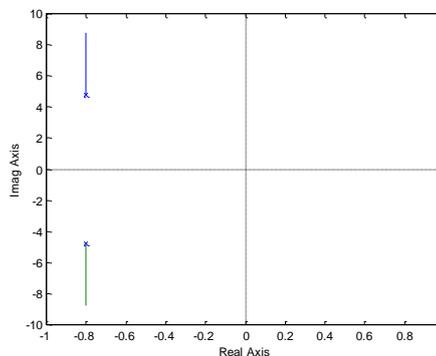
$$\begin{aligned} \frac{C(s)}{R(s)} &= \frac{23,5}{s^2+1,6s+23,5} \\ &= \frac{23,5}{(s+0,8+j4,8)(s+0,8-j4,8)} \end{aligned}$$

Pole-pole lup tertutup berada pada:

$$s = -0,8 \pm j4,8$$



Gambar 18. Respon tanpa kompensasi



Gambar 19. Root locus tanpa kompensasi

Lokasi yang diinginkan dari pole-pole lup tertutup dominan dapat ditentukan dari

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + 5,82s + 23,5$$

$$= (s + 2,9 + j3,9)(s + 2,9 - j3,9)$$

$$s = -2,9 \pm j3,9$$

Anggap bahwa kompensator Lead $G_C(s)$ memiliki fungsi transfer:

$$G_C(s) = K_C \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} \quad (0 < \alpha < 1)$$

Sudut dari pole pada titik asal terhadap pole lup tertutup dominan yang diinginkan pada $s = -2,9 \pm j3,9$ adalah $126,6^\circ$. Sudut dari pole pada $s = -0,8 + j4,8$ terhadap pole lup tertutup yang diinginkan adalah $18,56^\circ$. Dengan demikian, kekurangan sudutnya adalah $180^\circ - 126,6^\circ - 18,56^\circ = 34,84^\circ$.

Kekurangan sudut $34,84^\circ$ harus disumbangkan oleh sebuah kompensator Lead.

Dalam sistem ini, sudut $G(s)$ pada pole lup tertutup yang diinginkan adalah

$$\left. \frac{38,9}{s(s+9,24)} \right|_{s=-2,9+j3,9} = -235,07^\circ$$

Dengan demikian, jika ingin memaksa root locus untuk melalui pole lup tertutup yang diinginkan, kompensator Lead harus menyumbangkan $\phi = 34,84^\circ$ pada titik ini. Zero dan pole kompensator Lead ditentukan sebagai berikut:

Zero pada $s = -3,72$

Pole pada $s = -6,35$

Maka dapat dinyatakan

$$G_C(s) = K_C \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} = K_C \frac{s + 3,72}{s + 6,35}$$

Nilai K_C dapat ditentukan dengan syarat besaran.

$$\left| K_C \frac{s + 3,72}{s + 6,35} \frac{23,5}{s(s+1,6)} \right|_{s=-0,8+j4,8} = 1$$

$$K_C = \left| \frac{(s+6,35)s(s+1,6)}{23,5(s+3,72)} \right|_{s=-0,8+j4,8} = 0,25$$

Kompensator Lead $G_C(s)$ yang baru didesain diberikan oleh:

$$G_C(s) = 0,25 \frac{s + 3,72}{s + 6,35}$$

Fungsi transfer lup terbuka sistem terkompensasi menjadi:

$$G_C(s)G(s) = 0,25 \frac{s + 3,72}{s + 6,35} \frac{23,5}{s(s+1,6)}$$

Dan fungsi transfer lup tertutup menjadi

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{5,875(s+3,72)}{s(s+1,6)(s+6,35) + 5,875(s+3,72)}$$

$$= \frac{5,875s + 21,855}{s^3 + 7,95s^2 + 16,035s + 21,855}$$

Komponen pasif R dan C untuk implementasi kompensator Lead dapat dipilih secara sembarang sesuai dengan fungsi transfer kompensator yang telah didapatkan.

Di sini dipilih:

$$R_1 = 574468,1 \Omega; \text{dipilih } 560 \text{ k}\Omega$$

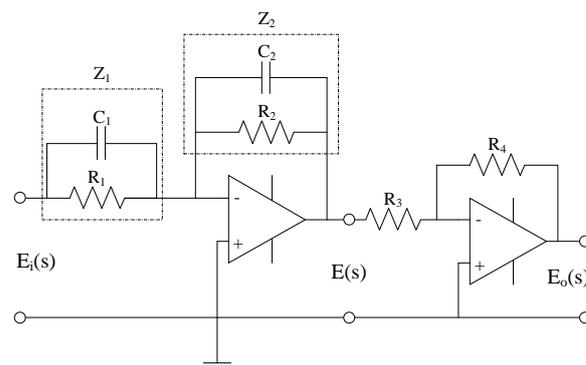
$$R_2 = 340425,5 \Omega; \text{dipilih } 330 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 2500 \Omega; \text{dipilih } 2,7 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 470 \text{ nF}$$

$$C_2 = 470 \text{ nF}$$



Gambar 20. Rangkaian Elektronik Kompensator Lead

Kompensator Lag

Fungsi transfer umpan maju motor servo DC 734 adalah

$$G(s) = \frac{23,5}{s(s+1,6)}$$

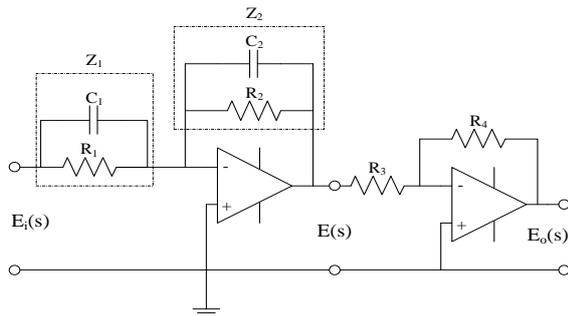
Diagram tempat kedudukan akar-akar (root locus) untuk sistem ini diperlihatkan pada gambar 21.

Fungsi transfer lup tertutup menjadi

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{23,5}{s^2 + 1,6s + 23,5}$$

$$= \frac{23,5}{(s+0,8+j4,8)(s+0,8-j4,8)}$$

Pole-pole lup tertutup dominan berada pada:
 $s = -0,8 \pm j4,8$



Gambar 21. Rangkaian Elektronik Kompensator Lag
Kompensator Lead-Lag
 Fungsi transfer umpan maju motor servo DC 734 adalah

$$G(s) = \frac{38,9}{s(s+9,24)}$$

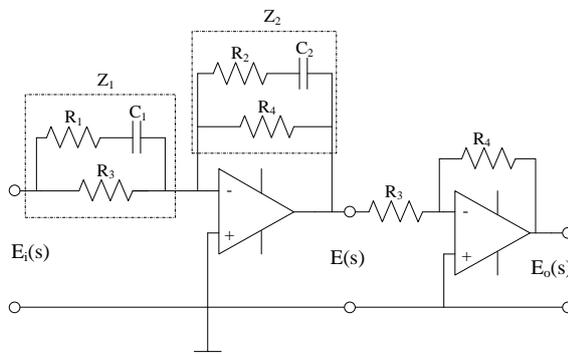
Fungsi transfer lup tertutup menjadi

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{38,9}{s^2+9,24s+38,9}$$

$$= \frac{38,9}{(s+4,62+j4,19)(s+4,62-j4,19)}$$

Pole-pole lup tertutup berada pada:

$$s = -4,62 \pm j4,19$$



Gambar 22 .Rangkaian Elektronik Kompensator Lead-Lag.

KESIMPULAN

1. Sistem kendali posisi dengan pengendali PID yang ada di Laboratorium Dasar Sistem Kendali dapat dikembangkan menjadi sistem kendali posisi dengan kompensator *Lead*, *Lag*, dan *Lead-Lag*. Dengan demikian, mahasiswa praktikan dapat membandingkan kelemahan dan kelebihan kedua jenis pengendali.

2. Hasil yang diperoleh dengan teoritis dan melalui program simulasi komputer, jika dibandingkan dengan implementasi fisik setelah menyediakan komponen-komponen yang telah dihitung besar resistor dan kapasitor dalam penelitian ini, hasilnya masih ada perbedaan, akan tetapi masih layak diterima sebagai bahan praktikum. Hal ini dapat dilakukan perbaikan-perbaikan selanjutnya pada saat menentukan besar resistor dan kapasitor yang cukup disediakan beberapa jenis di laboratorium pada saat praktikum berlangsung.
3. Respon awal sistem lup terbuka dan tertutup memang dapat dikatakan baik, akan tetapi pada pemberian nilai konstanta penguatan harus dilakukan lebih hati-hati karena dapat mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil.
4. Pada sistem kendali posisi dengan kompensator yang terdiri dari kompensator *Lead*, *Lag*, dan *Lead-Lag*, *root locus* dapat diubah-ubah dan performansi yang terbaik akan dapat dicapai.
5. Pada penelitian ini, dimungkinkan adanya kesalahan penentuan model sistem. Oleh karena itu, masih sulit melakukan spesifikasi performansi sistem. Akan tetapi, kelanjutan perolehan performansi desain yang memuaskan akan dapat dilanjutkan di laboratorium walaupun pada penelitian ini belum dapat diperoleh karena dapat dilakukan lebih teliti lagi untuk mencari model sistem yang lebih mendekati yang sebenarnya.
6. Telah berhasil didisain dan diimplementasikan sistem kendali posisi dengan kompensator pada motor servo seri 734 di Laboratorium Dasar Sistem Kendali. Performansi respon implementasi memang lebih rendah bila dibanding dengan performansi sistem berdasarkan disain. Hal ini diakibatkan pemodelan motor servo seri 734 dalam bentuk model matematis belum mewakili motor servo seri 734 yang sebenarnya dan pengadaan komponen-komponen elektronik yang terbatas sesuai hasil disain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kuo, Benjamin C., 1980. *Automatic Control System*. Prentice Hall of India

- [2] Laksono, Edi, 1996. *Teknik Kontrol Automatik* (Ogata, Katsuhiko, terjemahan), Erlangga, Jakarta.
- [3] Ogata, Katsuhiko, 2010. *Modern Control Engineering*. Fifth Edition, PearsonEducation, Inc., New Jersey.
- [4] Santoso, Alb. Joko, MT, 2004. *Prinsip Prinsip Elektronika* (Malvino, Albert Paul, PhD, EE, terjemahan), Penerbit SalembaTeknika, Jakarta.
- [5] Shinnars, Stanley M., 1972. *Modern Control System Theory and Application*. Addison Wesley Publishing Company Inc.
- [6] www.digiware.com
- [7] www.datasheetcatalog.com