5

Perancangan Sistem Kontrol dengan Tanggapan Waktu

5.1. Pendahuluan

Pada bab ini, akan dibahas mengenai perancangan suatu sistem kontrol *single-input-single*-output linier time-invariant dengan memperhatikan spesifikasi-spesifikasi tanggapan waktu sebagai acuan kontrolnya. Pada awal bab akan dikenalkan mengenai kompensator dan perancangannya, kemudian dilanjutkan mengenai kontroler PID dan cara perancangannya. Semuanya dianalisa dengan menggunakan analisa root-locus.

5.2. Perancangan Kompensator

5.2.1. Dasar Kompensator

Kompensator adalah suatu alat / cara yang digunakan untuk kompensasi, yaitu memodifikasi suatu sistem dinamik sehingga mempunyai spesifikasi yang kita kehendaki tanpa merubah bentuk fisik sistem itu sendiri. Dalam bab ini, kompensator yang digunakan adalah kompensator yang diseri dengan plant yang sering dikenal dengan kompensator seri.

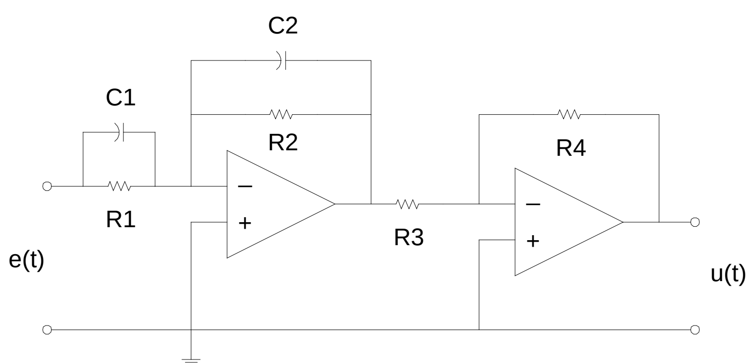
Dalam desain kompensator, dikenal ada tiga jenis kompensator :

- Kompensator Lead (*Lead Compensator*),
- Kompensator Lag (*Lag Compensator*), dan
- Kompensator Lead-Lag (*Lead-Lag Compensator*)

a. Kompensator Lead

Kompensator ini dinamakan kompensator lead karena apabila diaplikasikan untuk input sinusoidal, phasa output yang dihasilkan akan mendahului (*leading*) phasa input.

Rangkaian elektronik kompensator lead ditunjukkan oleh Gambar 5.1.



Gambar 5.1. Rangkaian Kompensator Lead

Fungsi alih dari kompensator lead ini diberikan oleh :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_C(s + \frac{1}{T})}{s + \frac{1}{\alpha T}}$$

dimana :

$T = R1.C1$

$\alpha T = R2.C2$

$\alpha = \dfrac{R2.C2}{R1.C1}$ → $0 < \alpha < 1$.

$K_C = \dfrac{R4.C1}{R3.C2}$

b. Kompensator Lag

Kompensator ini dinamakan kompensator lag karena apabila diaplikasikan untuk input sinusoidal, phasa output yang dihasilkan akan tertinggal (*lagging*) dari phasa input.

Rangkaian elektroniknya sama dengan kompensator lead, hanya nilai-nilai komponennya yang akan menentukan kompensator tersebut menjadi kompensator lag.

Fungsi alih dari kompensator lag diberikan oleh :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{\hat{K}_C\,(s + \frac{1}{T})}{s + \frac{1}{\beta T}}$$

dimana :

$T = R1.C1$

$\beta T = R2.C2$

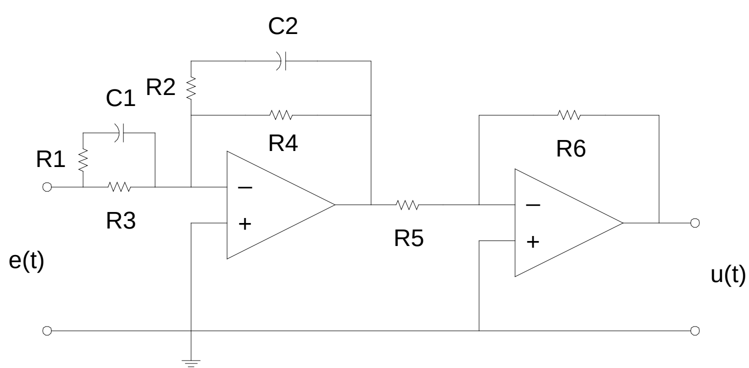
$\beta = \dfrac{R2.C2}{R1.C1}$ → $\beta > 1$.

$$\hat{K}_C = \frac{R4.C1}{R3.C2}$$

c. Kompensator Lead-Lag

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 kita ingin mengembangkan sistem kontrol yang bagus spesifikasinya pada tanggapan transien dan tanggapan steady-state sekaligus, maka penggabungan kedua prinsip kompensator ini menjadi pilihan yang cukup bagus.

Rangkaian elektronik kompensator lead-lag ditunjukkan oleh Gambar 5.2.



Gambar 5.2. Rangkaian Kompensator Lead-Lag

Fungsi alihnya diberikan oleh :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_C\left(s+\frac{1}{T_1}\right)\left(s+\frac{1}{T_2}\right)}{\left(s+\frac{\gamma}{T_1}\right)\left(s+\frac{1}{\beta T_2}\right)}$$

dimana :

$$T_1 = (R1 + R3).C1$$

$$T_2 = R2.C2$$

$$\gamma = \frac{R1 + R3}{R1} > 1$$

$$\beta = \frac{R2 + R4}{R2} > 1$$

$$K_C = \frac{R2.R4.R6}{R1.R3.R5} x \frac{R1 + R3}{R2 + R4}$$

5.1.2. Perancangan dengan Root-Locus

a. Kompensator Lead

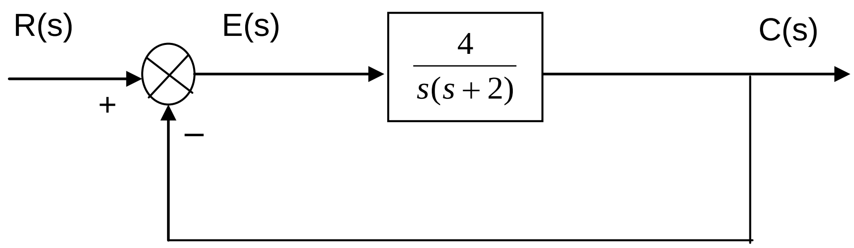
Fungsi alih lead kompensator adalah :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_C(s + \frac{1}{T})}{s + \frac{1}{\alpha T}}$$

Dari fungsi alih tersebut, terlihat bahwa kompensator lead menambahkan satu pole dan satu zero pada sistem. Satu pole pada s = $-\frac{1}{\alpha T}$ dan satu zero pada s = – 1/T. Dengan bertambahnya pole dan zero pada sistem ini, menyebabkan bentuk root-locus berubah. Justru dengan perubahan ini diharapkan spesifikasi tanggapan waktu yang kita inginkan dapat tercapai.

Contoh :

Diberikan suatu sistem yang ditunjukkan dalam Gambar 5.3. Diinginkan sistem tersebut memiliki spesifikasi ω_n = 4 dan ζ = 0.5.



Gambar 5.3. Sistem Loop Tertutup

Spesifikasi awal dari sistem dapat dicari dengan perhitungan berikut :

$$G(s) = \frac{4}{s(s+2)} \equiv \frac{\omega_n^2}{s(s+2\zeta\omega_n)}$$

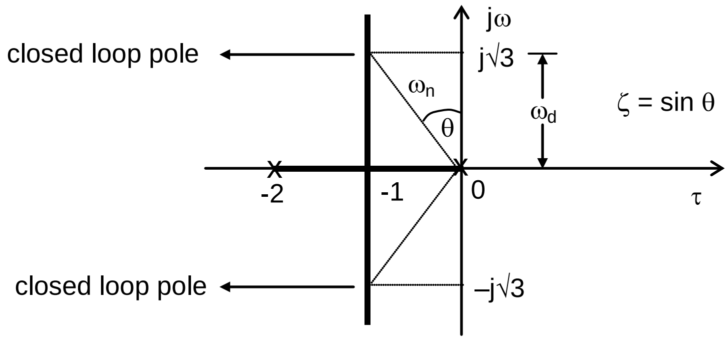
dari kesetaraan di atas, didapatkan ω_n = 2 dan ζ = 0.5. Hal ini berarti kita hanya akan mengubah ω_n dari 4 menjadi 2 dengan menjaga ζ relatif tetap.

Pole-pole fungsi alih loop terbuka terletak pada s = 0 dan s = –2.
Fungsi alih loop tertutupnya diberikan oleh :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{1+G(s)} = \frac{4}{s^2+2s+4}$$

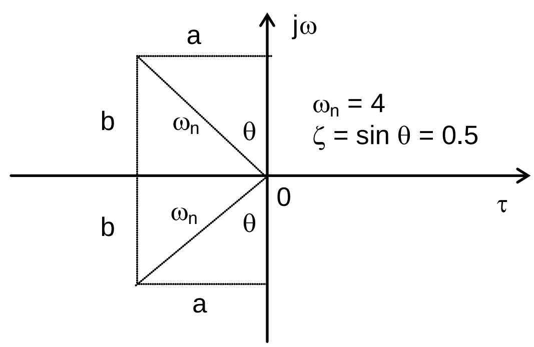
sehingga pole-pole loop tertutupnya terletak pada s = $-1+j\sqrt{3}$ dan s = $-1-j\sqrt{3}$.

Root-locus dari sistem diberikan oleh Gambar 5.4.



Gambar 5.4. Root-Locus Sistem

Diinginkan ω_n menjadi 4 dengan menjaga ζ tetap senilai 0.5. Pole-pole loop tertutup yang baru bisa didapatkan dari ω_n dan ζ yang baru ini. Perhatikan Gambar 5.5 untuk membantu mendapatkan pole-pole loop tertutup yang baru.



Gambar 5.5. Letak Pole-Pole Loop Tertutup yang Baru

$$\sin\theta = \frac{a}{\omega_n} = 0.5$$
$$a = 0.5\omega_n = 2$$
$$b = \sqrt{\omega_n^2 - a^2} = \sqrt{16-4} = 2\sqrt{3}$$

maka pole-pole loop tertutup yang baru terletak pada s = $-2 + 2\sqrt{3}$ dan s = $-2 - 2\sqrt{3}$.

Untuk kepentingan menggeser pole-pole loop tertutup dari titik semula ke titik yang diinginkan, disisipkan kompensator lead, sehingga fungsi alih loop terbukanya menjadi :

$$G'(s) = G_C(s)G(s) = \left[\frac{K_C\left(s + \frac{1}{T}\right)}{\left(s + \frac{1}{\alpha T}\right)}\right]G(s), \qquad 0 < \alpha < 1$$

dimana G'(s) adalah fungsi alih loop terbuka yang telah memenuhi spesifikasi yang diinginkan.

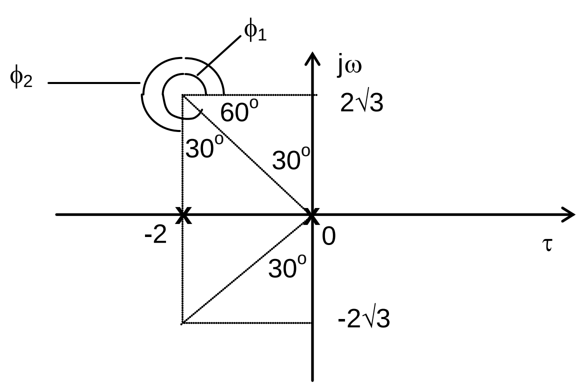
Adanya pergeseran pole-pole loop tertutup dari tempat aslinya akan membuat perubahan pada root-locus. Dan karena pole-pole loop tertutup tetap harus terletak pada root-locus, maka penjumlahan sudut G'(s) pada titik uji pole-pole loop tertutup yang baru harus sama dengan penjumlahan sudut G(s) pada titik uji pole-pole loop tertutup yang lama.

Sudut G(s) pada titik uji pole-pole loop tertutup yang baru (lihat Gambar 5.6) diberikan oleh :

$$\angle\left[\frac{4}{s(s+2)}\right]\Bigg|_{s=-2+j2\sqrt{3}} = -\phi_1 - \phi_2$$

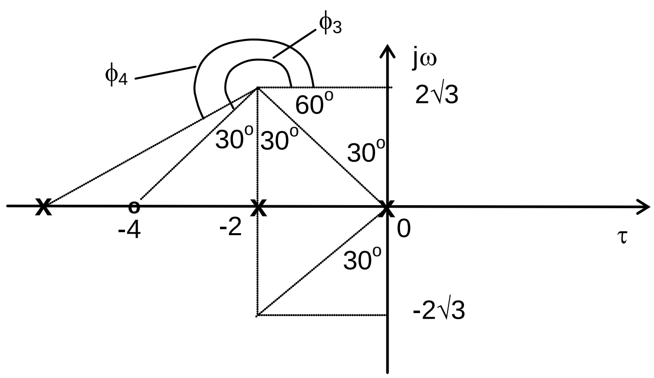
$$= -300^o - 270^o$$

$$= -570^o = -210^o$$



Gambar 5.6. Sudut-Sudut Titik Uji untuk G(s)

Nilai sudut total yang benar adalah $\pm 180^o(2k + 1)$, k = 0, 1, 2, … . Fungsi dari kompensator lead adalah menambahkan pole dan zero sehingga sudut total yang terjadi untuk titik uji tersebut menjadi $\pm 180^o(2k + 1)$, k = 0, 1, 2, … . Hal ini diperlihatkan pada Gambar 5.7.



Gambar 5.7. Penambahan Pole dan Zero

Penempatan pole dan zero dari kompensator lead sembarang, yang penting kita dengan mudah dapat menentukan sudut-sudut yang dihasilkannya dari titik uji pole-pole loop tertutup yang diinginkan.

Cara menentukan pole dan zero tersebut sebagai berikut :

- Pilih salah satu dari pole atau zero yang dengan mudah dapat kita ukur sudutnya. Misalkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.7, dipilih sebuah zero pada titik s = – 4, sehingga sudut yang dihasilkan oleh zero ini adalah $270^o - 30^o = 240^0$ (ϕ_3).
- Menentukan sudut dari pole :

$$-\phi_1 - \phi_2 + \phi_3 - \phi_4 = \pm 180^o(2k + 1),\ k = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

$$-210^o + 240^o - \phi_4 = \pm 180^o(2k + 1),\ k = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

$$30^o - \phi_4 = \pm 180^o(2k + 1),\ k = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

$\phi_4 = \pm 180^o(2k + 1) + 30^o$, k = 0, 1, 2, 3, …

nilai ϕ_4 yang paling tepat untuk Gambar 5.7 adalah 210^o.

- Menentukan titik pole tersebut. Dari Gambar 5.7, dengan menerapkan aplikasi rumus-rumus trigonometri sederhana, didapatkan letak pole dari kompensator lead pada s = – 8.

Kita telah dapatkan pole dan zero dari kompensator lead, yaitu pole pada s = – 8, dan zero pada s = – 4, sehingga persamaan fungsi alih dari kompensator lead diberikan oleh :

$$G_C(s) = \frac{K_C(s+4)}{(s+8)}$$

Maka fungsi alih loop terbuka yang baru menjadi :

$$G'(s) = G_C(s)G(s) = \frac{K_C(s+4)}{(s+8)}\frac{4}{s(s+2)}$$
$$G'(s) = \frac{K(s+4)}{s(s+2)(s+8)}, \quad K = 4K_C$$

Karena magnitude dari G’(s) pada titik uji pole-pole loop tertutup yang diinginkan harus sama dengan satu, maka :

$$\left|\frac{K(s+4)}{s(s+2)(s+8)}\right|_{s=-2+j2\sqrt{3}} = 1$$
$$\left|\frac{K(-2+j2\sqrt{3}+4)}{(-2+j2\sqrt{3})(-2+j2\sqrt{3}+2)(-2+j2\sqrt{3}+8)}\right| = 1$$
$$\left|\frac{K(2+j2\sqrt{3})}{(-2+j2\sqrt{3})(j2\sqrt{3})(6+j2\sqrt{3})}\right| = 1$$

persamaan tersebut ekivalen dengan persamaan :

$$\frac{K.B_1}{A_1 A_2 A_3} = 1$$

dimana :

$$\begin{aligned}
B_1 &= \left|2 + j2\sqrt{3}\right| = 4 \\
A_1 &= \left|-2 + j2\sqrt{3}\right| = 4 \\
A_2 &= \left|j2\sqrt{3}\right| = 2\sqrt{3} \\
A_3 &= \left|6 + j2\sqrt{3}\right| = 4\sqrt{3}
\end{aligned}$$

maka :

$$\frac{K.B_1}{A_1 A_2 A_3} = \frac{K.4}{4.2\sqrt{3}.4\sqrt{3}} = 1$$
$$K = 24$$

Fungsi alih loop terbuka dari sistem dengan spesifikasi yang telah kita tentukan menjadi :

$$G'(s) = \frac{24(s+4)}{(s+2)(s+8)}$$

Fungsi alih ini memberikan gambar root-locus seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8.

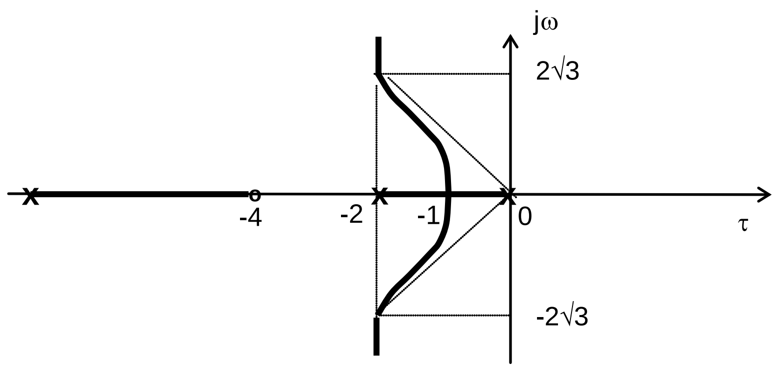
Nilai-nilai dari resistor dan kapasitor pada rangkaian elektronik kompensator lead disesuaikan dengan fungsi alih kompensatornya :

$$G_C(s) = \frac{K_C(s+4)}{(s+8)}, \quad \text{dimana } K_C = \frac{K}{4} = \frac{24}{4} = 6$$

Nilai α dapat dicek :

$$\frac{1}{T} = 4 \quad \rightarrow \quad T = 0.25$$
$$\frac{1}{\alpha T} = 8 \quad \rightarrow \quad \alpha = 0.5$$

Terlihat bahwa nilai α tetap berada antara 0 dan 1, yang merupakan ciri dari kompensator lead.



Gambar 5.8. Root-Locus dari Sistem Terkompensasi Lead

b. Kompensator Lag

Perancangan kompensator lag mirip dengan perancangan kompensator lead. Yang perlu ditekankan dalam hal ini adalah bahwa fungsi kompensator lag ini berkaitan erat dengan perbaikan kinerja tanggapan steady-state sistem. Artinya penggunaan kompensator lag ini memang sejak semula berbeda dari kompensator lead. Hal prinsip yang harus dipenuhi dalam perancangannya adalah nilai β yang harus lebih besar dari satu, karena inilah satu-satunya perbedaan mendasar dari kompensator lead.

c. Kompensator Lead-Lag

Fungsi alih dari kompensator lead-lag dinyatakan oleh :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_C\left(s+\frac{1}{T_1}\right)\left(s+\frac{1}{T_2}\right)}{\left(s+\frac{\gamma}{T_1}\right)\left(s+\frac{1}{\beta T_2}\right)}$$

$$\gamma > 1, \beta > 1$$

Dalam perancangan kompensator lead-lag ini, dibagi menjadi dua metode perancangan :

- Cara pertama : $\gamma \neq \beta$, prosedur perancangannya adalah sebagai berikut :
  1. Dari spesifikasi yang diinginkan, tentukan pole-pole loop tertutup dominannya (biasanya merupakan pasangan konjugate-kompleks).
  2. Dengan menggunakan fungsi alih yang belum terkompensasi G(s), tentukan kekurangan jumlah sudut ϕ pada titik uji pole-pole loop tertutup yang diinginkan. Sudut dari bagian lead dari kompensator lead-lag digunakan untuk menutupi kekurangan ini.
  3. Diasumsikan kita nanti akan memilih nilai T_2 yang besar sehingga magnitude dari bagian lag mendekati satu. Pilih nilai T_1 dan γ sehingga sudut dari bagian lead memenuhi kekurangan sudut sebesar ϕ. Kemudian nilai K dicari dengan perhitungan :

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

dimana nilai s adalah pole-pole loop tertutup dominan yang diinginkan (ambil salah satunya).

  4. Jika konstanta kesalahan kecepatan statik (K_v) diketahui, nilai β dapat dihitung sebagai berikut :

$$
\begin{aligned}
K_v &= \lim_{s\to 0} sG_C(s)G(s) \\
&= \lim_{s\to 0} sK_C \left[\frac{s+\frac{1}{T_1}}{s+\frac{\gamma}{T_1}}\right]\left[\frac{s+\frac{1}{T_2}}{s+\frac{1}{\beta T_2}}\right]G(s) \\
&= \lim_{s\to 0} sK_C \frac{\beta}{\gamma} G(s)
\end{aligned}
$$

Nilai K_C dan γ telah ditentukan pada langkah 3, sehingga bila nilai K_v diketahui, maka nilai β dapat dicari. Kemudian dengan nilai β ini nilai T_2 dapat dicari sehingga memenuhi syarat-syarat :

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

$$
-5^\circ < \angle\left[\frac{s+\frac{1}{T_2}}{s+\frac{1}{\beta T_2}}\right] < 0^\circ
$$

- Cara kedua : $\gamma = \beta$, prosedur perancangannya adalah sebagai berikut :

1. Dari spesifikasi yang diinginkan, tentukan pole-pole loop tertutup dominannya (biasanya merupakan pasangan konjugate-kompleks).
2. Jika konstanta kesalahan kecepatan statik (K_v) diberikan, nilai K_C dapat dicari dari persamaan berikut :

$$
\begin{aligned}
K_v &= \lim_{s\to 0} sG_C(s)G(s) \\
&= \lim_{s\to 0} sK_C G(s)
\end{aligned}
$$

3. Dengan menggunakan fungsi alih yang belum terkompensasi G(s), tentukan kekurangan jumlah sudut ϕ pada titik uji pole-pole loop tertutup yang diinginkan.

Sudut dari bagian lead dari kompensator lead-lag digunakan untuk menutupi kekurangan ini.

4. Diasumsikan kita nanti akan memilih nilai T_2 yang besar sehingga magnitude dari bagian lag mendekati satu. Pilih nilai T_1 dan β sehingga magnitude dan sudut memenuhi persamaan :

$$\left| K_C \left[\frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{\beta}{T_1}} \right] G(s) \right| = 1$$

s = pole loop tertutup dominan yang diinginkan

$$\angle \left[\frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{\beta}{T_1}} \right] = \phi$$

5. Dengan menggunakan nilai β kita dapat mencari nilai T_2 sehingga memenuhi syarat-syarat :

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

$$-5^\circ < \angle \left[\frac{s + \frac{1}{T_2}}{s + \frac{1}{\beta T_2}} \right] < 0^\circ$$

5.3. Perancangan Kontroler PID

5.3.1. Dasar Kontroler PID

Kontroler PID (*proporsional-plus-integral-plus-derivative*) merupakan kontroler yang paling sering digunakan dalam sistem-sistem kontrol berumpan balik. Adakalanya tidak seluruh komponen proporsional (P), integral (I), maupun derivative (D) digunakan secara bersamaan. Variasi-variasi yang banyak digunakan adalah gabungan antara masing-masing komponen seperti yang akan dijelaskan kemudian.

a. Kontroler Proporsional (P)

Persamaan kontroler proporsional dalam tanggapan waktu diberikan oleh:

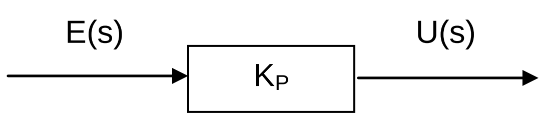
$$u(t) = K_P . e(t)$$

dimana u(t) adalah aksi kontrol proporsional yang dihasilkan dan e(t) adalah error dari sistem loop tertutup, sedangkan K_P adalah penguatan (*gain*) proporsional..

Transformasi Laplace dari persamaan tersebut memberikan fungsi alih kontroler proporsional sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P$$

Block diagramnya diberikan oleh Gambar 5.9.



Gambar 5.9. Aksi Kontrol Proporsional

b. Kontroler Proporsional Plus Integral (PI)

Persamaan kontroler proporsional plus integral dalam tanggapan waktu diberikan oleh:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt$$

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_I} \int_0^t e(t)dt$$

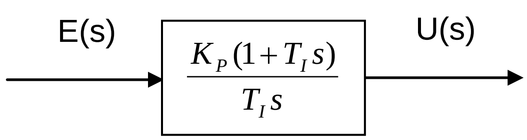
$$= K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt \right]$$

dimana u(t) adalah aksi kontrol proporsional plus integral yang dihasilkan dan e(t) adalah error dari sistem loop tertutup, sedangkan T_I adalah waktu integrator (*integrator time*).

Transformasi Laplace dari persamaan tersebut memberikan fungsi alih kontroler proporsional plus integral sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left[1 + \frac{1}{T_I s} \right]$$

Block diagramnya diberikan oleh Gambar 5.10.



$$\frac{K_P(1+T_I s)}{T_I s}$$

Gambar 5.10. Aksi Kontrol Proporsional plus Integral

c. Kontroler Proporsional Plus Derivative (PD)

Persamaan kontroler proporsional plus derivative dalam tanggapan waktu diberikan oleh:

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

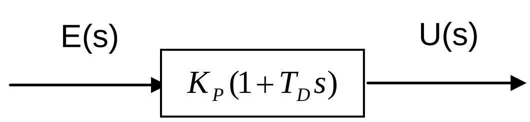
$$u(t) = K_P \left[e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

dimana u(t) adalah aksi kontrol proporsional plus derivative yang dihasilkan dan e(t) adalah error dari sistem loop tertutup, sedangkan T_D adalah waktu derivative (*derivative time*).

Transformasi Laplace dari persamaan tersebut memberikan fungsi alih kontroler proporsional plus derivative sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P [1 + T_D s]$$

Block diagramnya diberikan oleh Gambar 5.11.



Gambar 5.11. Aksi Kontrol Proporsional plus Derivative

d. Kontroler Proporsional Plus Integral Plus Derivative (PID)

Persamaan kontroler proporsional plus integral plus derivative dalam tanggapan waktu diberikan oleh:

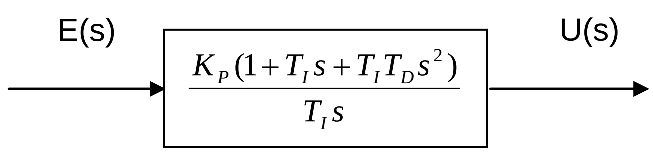
$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

dimana u(t) adalah aksi kontrol proporsional plus integral plus derivative yang dihasilkan dan e(t) adalah error dari sistem loop tertutup.

Transformasi Laplace dari persamaan tersebut memberikan fungsi alih kontroler proporsional plus integral plus derivative sebagai berikut :

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right]$$

Block diagramnya diberikan oleh Gambar 5.12.



Gambar 5.12. Aksi Kontrol Proporsional plus Integral plus Derivative

5.3.2. Perancangan dengan Root-Locus

Pada prinsipnya semua bentuk variasi kontroler proporsional, integral, dan derivative memberikan efek penambahan pole dan zero (tergantung dari jenis variasinya seperti yang akan kita lihat nanti). Penambahan pole maupun zero ini mirip dengan operasi penambahan kompensator pada subbab sebelumnya. Sehingga perancangan yang dilakukan pun mirip dengan perancangan kompensator. Bedanya hanya terletak pada jumlah penambahan pole dan zeronya.

a. Kontroler Proporsional (P)

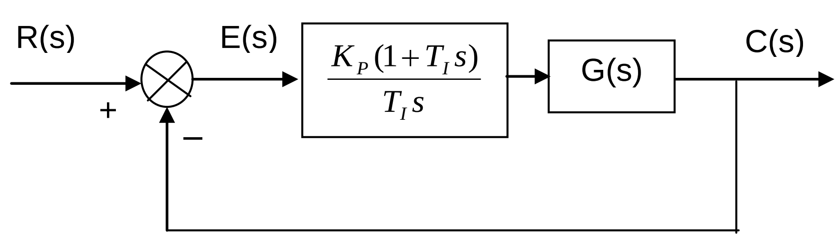
Kontroler P merupakan penguatan (*gain*) murni K_P. Jadi penguatan K yang diubah-ubah untuk menghasilkan root-locus seperti yang telah dibahas sebelumnya adalah kontroler P, yang persamaan karakteristiknya diberikan oleh :

$$1 + K_P G(s)H(s) = 0$$

Dengan memilih nilai K_P tertentu, maka dapat ditentukan nilai-nilai frekuensi alami takteredam (ω_n) dan rasio peredaman (ζ) dari tanggapan transien sistem. Perubahan nilai K_P pada kontroler proporsional yang identik dengan perubahan K pada penggambaran root-locus akan memberikan nilai ζ dan ω_n yang berbeda-beda, sehingga dengan melihat gambar root-locus dari sistem, kita dapat menentukan nilai K_P sehingga sistem bekerja sesuai (paling tidak dekat) dengan spesifikasi yang kita inginkan.

b. Kontroler PI

Suatu sistem loop tertutup dengan kontroler PI diberikan oleh Gambar 5.13.



Gambar 5.13. Sistem Loop Tertutup dengan Kontroler PI

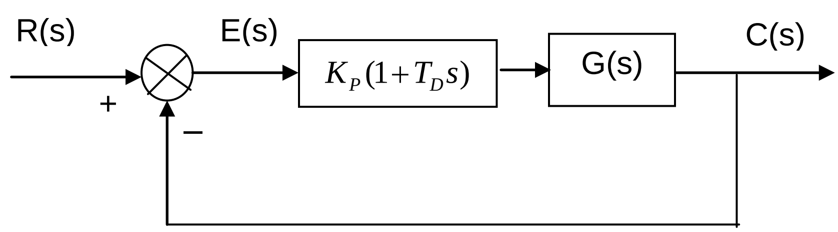
Fungsi alih loop terbukanya diberikan oleh :

$$G'(s) = \frac{K_P\left(s + \frac{1}{T_I}\right)}{s} G(s)$$

Terlihat bahwa kontroler PI menambahkan satu zero dan satu pole pada plant, yakni zero pada s = –1/T_I dan pole pada s = 0. Penambahan ini akan merubah bentuk asli root-locusnya. Untuk mendapatkan nilai ζ dan ω_n sesuai dengan keinginan kita, maka pemilihan gain K_P dan waktu integrator T_I harus benar-benar tepat sehingga dihasilkan pole-pole loop tertutup yang memberikan nilai ζ dan ω_n yang benar.

c. Kontroler PD

Suatu sistem loop tertutup dengan kontroler PD diberikan oleh Gambar 5.14.



Gambar 5.14. Sistem Loop Tertutup dengan Kontroler PD

Fungsi alih loop terbukanya diberikan oleh :

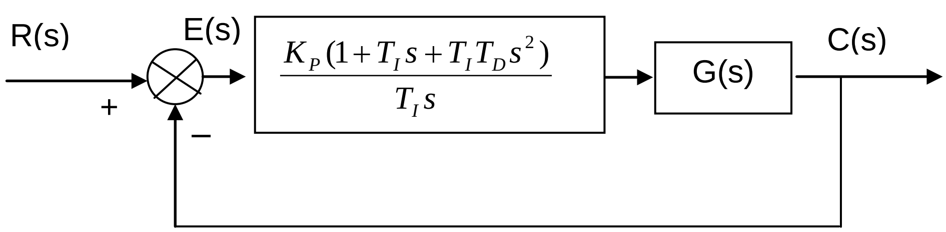
$$G'(s) = K_P(1 + T_D s)G(s)$$

Terlihat bahwa kontroler PD menambahkan satu zero pada plant, yakni zero pada s = –1/T_D. Penambahan ini akan merubah bentuk asli root-locusnya. Untuk mendapatkan nilai

ζ dan ω_n sesuai dengan keinginan kita, maka pemilihan gain K_P dan waktu derivative T_D harus benar-benar tepat sehingga dihasilkan pole-pole loop tertutup yang memberikan nilai ζ dan ω_n yang benar.

d. Kontroler PID

Suatu sistem loop tertutup dengan kontroler PID diberikan oleh Gambar 5.15.



Gambar 5.15. Sistem Loop Tertutup dengan Kontroler PID

Fungsi alih loop terbukanya diberikan oleh :

$$G'(s) = \frac{K_P(1+T_I s+T_I T_D s^2)}{T_I s} G(s)$$

Terlihat bahwa kontroler PID menambahkan dua zero dan satu pole pada plant. Penambahan ini akan merubah bentuk asli root-locusnya. Untuk mendapatkan nilai ζ dan ω_n sesuai dengan keinginan kita, maka pemilihan gain K_P, waktu integrator T_I, dan waktu derivative T_D harus benar-benar tepat sehingga dihasilkan pole-pole loop tertutup yang memberikan nilai ζ dan ω_n yang benar.