

MEMPERBAIKI SPESIFIKASI SISTEM KONTROL DENGAN TEKNIK KOMPENSASI

Matius Irsan Kasau

Jurusan Teknik Informatika
STMIK Dipanegara Makassar
Jl. Perintis Kemerdekaan Km 9, Makassar 90245
Matius.irsan@gmail.com

ABSTRAK

Dalam system kontrol, spesifikasi yang diinginkan merupakan kriteria utama sebagai acuan penentuan jenis dan besarnya parameter pengontrol. Tulisan ini memaparkan teknik kompensasi untuk memenuhi spesifikasi yang diinginkan yakni implementasi dari kompensator LEAD pada pengontrolan kecepatan motor dc yang spesifikasinya tidak dapat dipenuhi dengan hanya menggunakan pengontrol proporsional dengan penguat yang dapat diubah secara bebas. Hasil analisis dengan menggunakan tiga jenis diagram yakni diagram root locus, diagram Bode dan diagram polar menunjukkan bahwa posisi pole pole dominan yang nilai realnya tidak dapat diubah dengan pengontrol proporsional, ternyata dapat dilakukan dengan kompensator LEAD yang menempatkannya pada posisi sesuai spesifikasi yang diinginkan.

Kata kunci: kompensator, TKA, polar, Bode, spesifikasi.

ABSTRACT

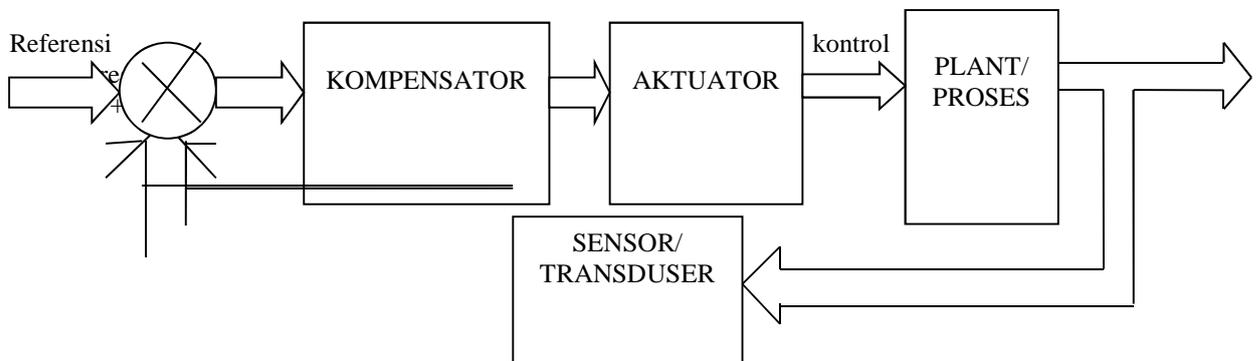
For the control system, desired of specification is based of to sure type and parameters value of controller. This writing to explain the compensation technique for to get desired the specification target that is; Implementation of the compensator LEAD on dc motor speed control with its specification can not to get if only to use the gain controller for free variable parameters. The analysis result with used three type diagram that is ; root locus diagram, Bode diagram and polar diagram indicated that the dominant of poles position that the real value can not to replace with the gain control, is can remove to position for suitable desired specification.

Key word: compensator, root locus, polar, Bode, specification.

1. PENDAHULUAN

Spesifikasi system control, khususnya masalah tingkat kestabilannya ditentukan berdasarkan posisi pole pole dalam bidang $s = \sigma + j\omega$ yang terdiri atas sumbu real dan sumbu imajiner. Apabila seluruh pole terletak disebelah kiri, pada dan kanan sumbu imajiner $j\omega$ maka respon dari system control berturut turut adalah stabil, berosilasi terus menerus dan tidak stabil. Semakin jauh dari sumbu imajiner pada arah sebelah kiri semakin stabil respon yang dihasilkan. Upaya untuk meletakkan pole pada posisi yang sesuai spesifikasi yang diinginkan dapat dilakukan dengan menyetel harga penguatan dari kontroller Proporsional. Akan tetapi dalam beberapa kasus praktis, pengaturan penguatan saja mungkin belum cukup dapat mengubah perilaku system dalam menyesuaikan spesifikasi yang diinginkan. Kasus yang sering kali terjadi adalah bahwa kenaikan harga penguatan akan memperbaiki perilaku keadaan tunak, tetapi akan menimbulkan efek kestabilan yang jelek dengan mereposisi pole pole kearah semakin dekat ke sumbu $j\omega$ bahkan menyeberang ke sebelah kanan yang berarti system berubah menjadi tidak stabil. Dalam hal ini system perlu didisain ulang dengan memodifikasi struktur atau menyisipkan perangkat/komponen tambahan untuk mengubah perilaku system secara keseluruhan sedemikian rupa sehingga system tetap sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. [7],[9],[10]

Perangkat tambahan yang disisipkan ke dalam system untuk tujuan semacam itu disebut kompensator yang dapat bersifat LEAD, LAG atau LEAD-LAG. Kompensator pada prinsipnya memperbaiki posisi pole pole kritis yang dapat menyebabkan system berubah menjadi tidak stabil. Sebuah kompensator dapat dipasang seri atau parallel dengan system, namun dalam tulisan ini hanya akan dibahas kompensator yang dipasang seri seperti gambar 1 berikut : [2],[4],[6]



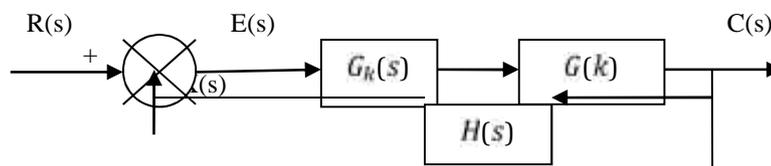
Gambar 1. Sistem Kontrol Simpal Tertutup.

Seperti halnya controller, suatu kompesator dapat berupa listrik, mekanik, pneumatic atau hidraulik, tergantung dari jenis plant/proses yang dikompensasinya. Tulisan ini membahas secara khusus mengenai kompensator listrik dengan komponen RC dan penerapannya pada motor dc penguat terpisah yang induktansi jangkarnya diabaikan.

Gambar 1 untuk jenis kompensator LEAD yang dipilih dalam tulisan ini dan dengan plant/proses berupa motor dc penguat terpisah serta sensor umpan balik berupa tacho-generator dapat dinyatakan dalam bentuk model blok diagram

2. LANDASAN TEORI

Gambar 1 untuk jenis kompensator LEAD yang dipilih dalam tulisan ini dan dengan plant/proses berupa motor dc penguat terpisah serta sensor umpan balik berupa tacho-generator dapat dinyatakan dalam bentuk model blok diagram seperti gambar 2 :

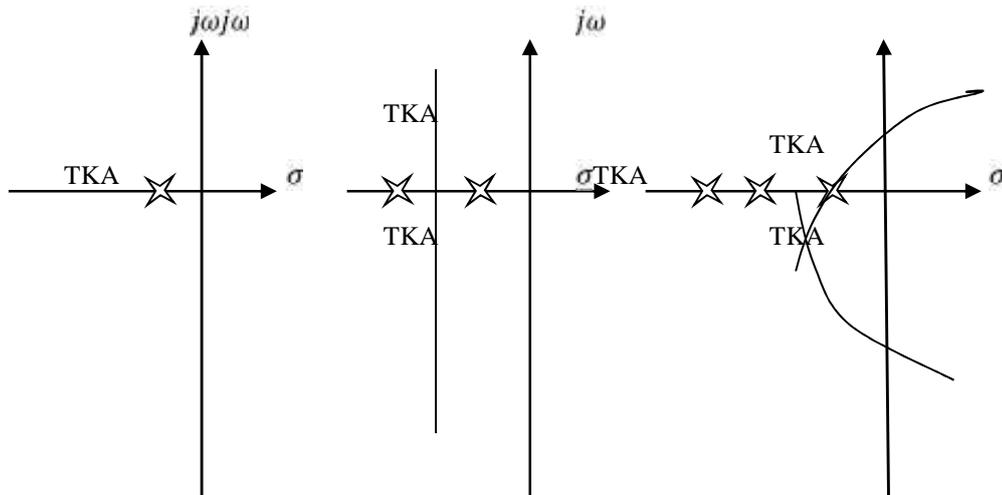


Gambar 2 Blok diagram system dalam bentuk model.

Untuk dapat mendisain sebuah kompensator yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan, pertama tama harus diketahui pengaruh penambahan pole dan atau zero pada system, kemudian model matematik dari plant/proses dan selanjutnya karakteristik dari jenis kompensator yang akan digunakan, apakah LEAD, LAG atau LEAD-LAG.

A. Pengaruh penambahan pole pada system

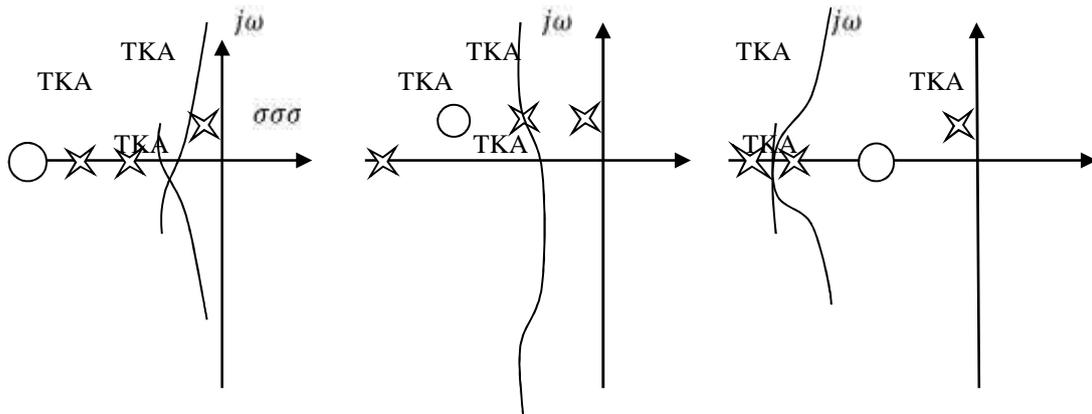
Setiap penambahan sebuah pole pada fungsi alih lup terbuka ($G(s)H(s)$) mempunyai pengaruh menarik tempat tempat kedudukan akar (TKA) ke kanan, semakin mendekati ke sumbu imajiner $j\omega$ yang berarti semakin jelek tingkat kestabilan system yakni memperlambat waktu penetapan (settling time) untuk mencapai keadaan mantap (steady state). Sebagai contoh penggunaan controller jenis PI menambahkan sebuah pole pada titik asal. Pada gambar 2 diperlihatkan TKA untuk 1 pole, 2 pole dan 3 pole. [1], [3], [11].



Gambar 3 Pengaruh penambahan pole pada TKA

B. Pengaruh penambahan zero pada system

Sebaliknya, penambahan zero pada fungsi alih lup terbuka mempunyai pengaruh menarik TKA kea rah kiri yang berarti membuat system yang tingkat kestabilannya jelek menjadi lebih baik yakni mempercepat waktu penetapan respon. Secara fisis, penambahan zero pada fungsi alih lup terbuka berarti menambahkan controller PD pada system. Pengaruh aksi control PD adalah mempercepat berlalunya respon transien. Pada gambar 3 diperlihatkan pengaruh posisi sebuah zero yang disisipkan pada 3 pole dalam gambar 2. [7], [10], [12]

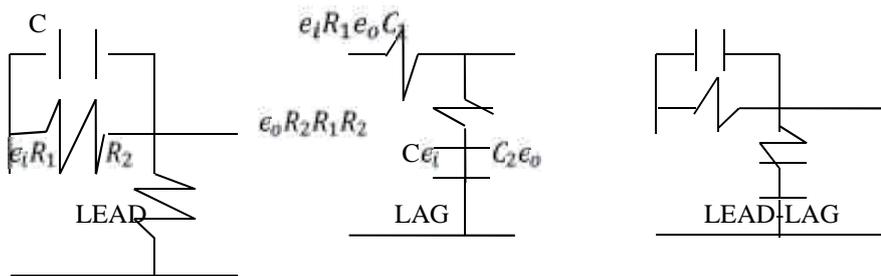


Gambar 4 Pengaruh penambahan zero pada TKA

☆ = pole (kutub) ; ○ = zero (nol)

C. Kompensator LEAD, LAG dan LEAD-LAG.

Tulisan ini hanya membahas kompensator listrik dengan komponen RC yang rangkaiannya seperti gambar 4. [2], [4], [5], [8].



Gambar 5 Tiga jenis kompensator listrik

Penjabaran penurunan model matematik dari ketiga rangkaian ini, menghasilkan persamaan fungsi alih dari kompensator seperti table 1. [1],[3],[10]

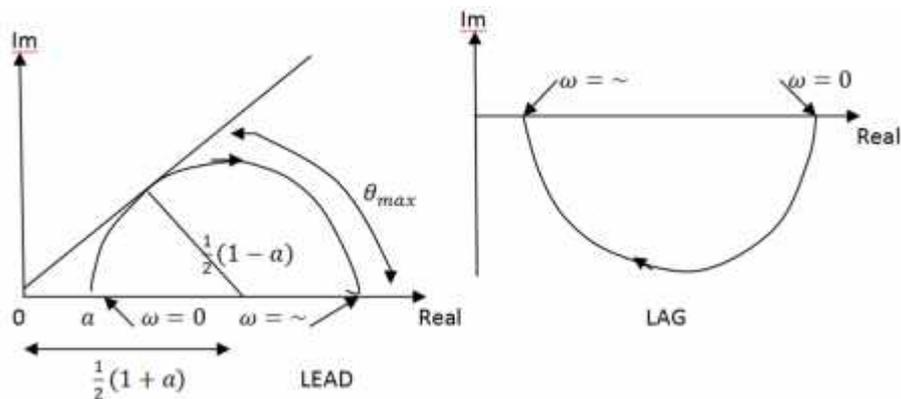
Tabel 1 Fungsi Laplace dari 3 Jenis Kompensator

Model	Kompensator LEAD	Kompensator LAG	Kompensator LEAD-LAG
Fungsi Alih $\frac{E_o(s)}{E_i(s)}$ $(G_k(s))$	$\frac{s+\frac{1}{T}}{s+\frac{1}{\alpha T}}; \alpha < 1$	$\frac{1}{\beta} \left[\frac{s+\frac{1}{T}}{s+\frac{1}{\beta T}} \right]; \beta > 1$	$\left(\frac{s+\frac{1}{T_1}}{s+\frac{1}{\beta T_1}} \right) \left(\frac{s+\frac{1}{T_2}}{s+\frac{1}{\beta T_2}} \right); \beta > 1$

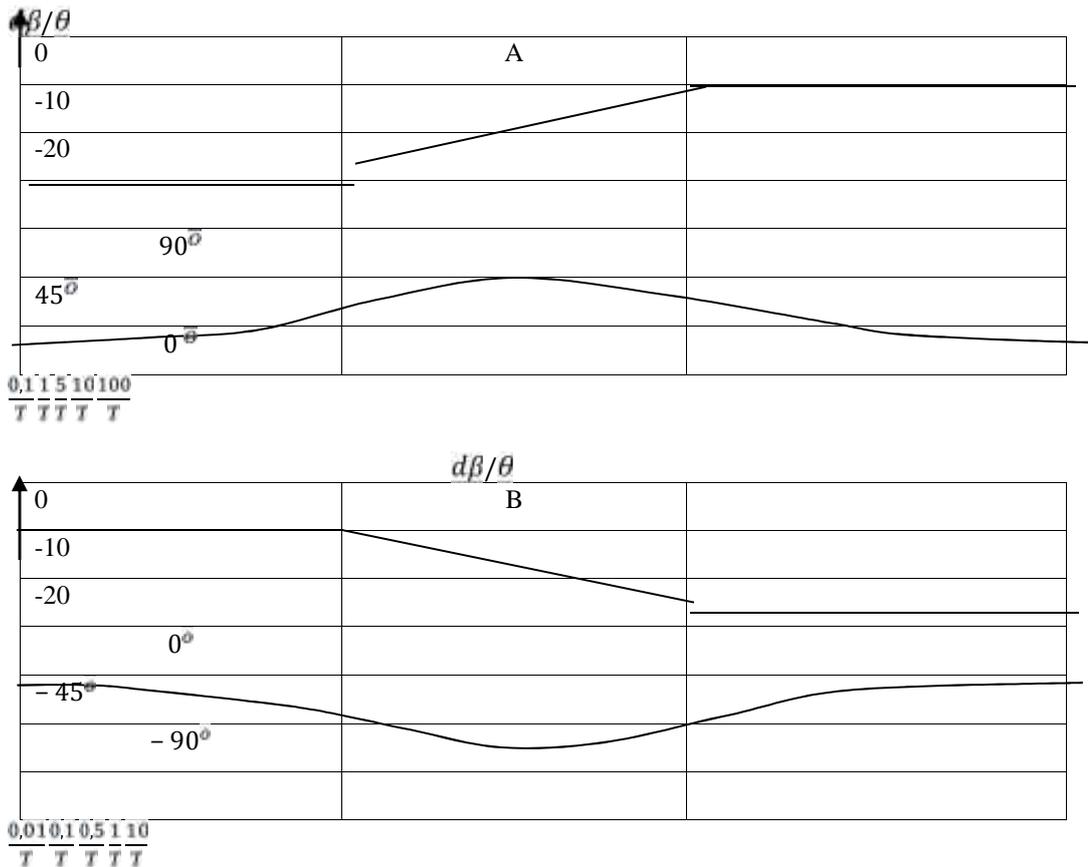
Dimana parameter untuk kompensator LEAD; $= R_1 C$ dan $\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$, untuk kompensator LAG $T = R_2 C$ dan $\beta = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ dan untuk kompensator LEAD-LAG $T_1 = R_1 C_1, T_2 = R_2 C_2$ dan β dicari dari persamaan: $R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2 = \frac{T_1}{\beta} + \beta T_2$.

D. Diagram polar dan diagram Bode dari komparator LEAD, LAG dan LEAD-LAG

Diagram polar dan diagram Bode diperlukan untuk analisis kestabilan system. Diagram polar diperoleh dengan cara mengubah persamaan fungsi alih menjadi berbentuk bilangan kompleks yakni dengan menggantikan s dengan $j\omega$ yang menghasilkan $\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = G(s) = Real + jIm = A \angle \theta$ dimana $\theta = \arctg \frac{Im}{Real} = A e^{-j\theta}$ dimana $A = \sqrt{Real^2 + Im^2}$. Sementara untuk diagram Bode merupakan grafik penguatan dalam decibel ($d\beta$) sebagai fungsi dari frekuensi dengan hubungan $d\beta = 20 \log |G(j\omega)|$ (baca besaran dari $G(j\omega)$) dan sudut θ sebagai fungsi dari frekuensi ω . Diagram polar dan diagram Bode dari kompensator LEAD, LAG dan LEAD-LAG adalah seperti gambar 5. [1], [3], [10,12]



Gambar 5 Diagram polar LEAD dan LAG (LEAD-LAG gabungan kedua gambar)



Gambar 6 Diagram Bode: A. Kompensator LEAD dan B. Kompensator LAG (LEAD-LAG gabungan)

Perhatikan bahwa baik diagram polar maupun diagram Bode, kompensator LEAD merupakan kebalikan dari kompensator LAG, sementara kompensator LEAD-LAG merupakan gabungan dari keduanya. Penentuan yang mana paling tepat digunakan sangat tergantung pada karakteristik dari plant/proses yang dikompensasi. Tulisan ini menggunakan plant berupa tangki penyulingan cairandengan suhu/temperature sebagai obyek control dengan fungsi alih lup tertutup tanpa kompensasi berupa orde 2 dengan persamaan: $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{s^2 + 2s + K}$; $0 < K < \infty$. Ternyata untuk kasus ini berapapun harga K tidak dapat merubah jarak posisi pole pole dari sumbu imajiner $j\omega$, sehingga tingkat kestabilan system tidak dapat diperbaiki dengan hanya mengubah harga K. Perubahan harga K hanya mengubah besar kecilnya frekuensi pada bagian imajiner yakni $j\omega$, tetapi bagian real $-\sigma$ selalu tetap harganya, berapapun harga K yang dipilih. Dengan alasan ini diperlukan kompensator LEAD utuk memperbaiki respon untuk sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. [2], ;[6],[8].

3. METODE

Pertama tama dijabarkan model fungsi alih system lup terbuka system tanpa kompensasi. Selanjutnya dari model ini diperoleh fungsi alih system lup tertutup dengan posisi TKA pole pole dalam bidang $s = \sigma + j\omega$ untuk harga K diubah dari nol sampai tidak terhingga. Tentu saja system yang sesungguhnya hanya mempunyai harga K tertentu yang posisinya dapat dilihat pada TKA. Dari posisi ini dapat didisain sampai sejauh mana harus digeser untuk mencapai spesifikasi yang diinginkan. Hal hal yang penting diperhatikan dalam perancangan adalah: [3], [5], [8], [10].

- redaman pole lup tertutup ζ , frekuensi alamiah tidak teredam ω_n , koefisien kesalahan Rasio kecepatan static K_v pada saat sebelum dipasang kompensator.
- Spesifikasi respon yang diinginkan dalam rancangan setelah kompensator dipasang yakni rasio redaman ζ yang baru, frekuensi alamiah tidak teredam ω_n yang baru dan koefisien kesalahan kecepatan statik K_v yang baru.

Dari kedua informasi penting ini mulailah dilakukan disain dengan algoritma sebagai berikut:

A. Untuk pendekatan TKA (root locus)

1. Hitung rasio redaman sebelum dipasang kompensator dan rasio redaman yang diinginkan sesudah dipasang kompensator.
2. Letakkan posisi pole pole lup tertutup pada TKA sesuai yang diinginkan dengan rasio redaman juga sesuai yang diinginkan seperti pada langkah 1.
3. Hitung fungsi alih lup terbuka dari system terkompensasi dengan persamaan: $G_g s = \text{fungsi alih kompensator } G(s)$. Dalam tulisan ini digunakan kompensator LEAD dengan fungsi alih seperti dalam table 1 yakni $\frac{s+\frac{1}{T}}{s+\frac{1}{\alpha T}}$; $\alpha < 1$ dan $G(s)$ tidak lain adalah : $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{s^2+2s+K}$; $0 < K < \infty$ yang dalam kasus tangki penyulingan cairan K berharga 4.
4. Tentukan harga konstanta T dan α dengan cara:
 - Letakkan posisi pole lup tertutup dominan yang diinginkan pada sebelah kiri sumbu imajiner $j\omega$ dalam bidang $s = \sigma + j\omega$. Sebut titik itu P
 - Tarik garis AP yang sejajar dengan sumbu real $-\sigma$ dari arah kiri titik P.
 - Tarik juga garis dari titik P ke titik asal O sumbu bidang s.
 - Bagi dua sudut APO, sebut garis baginya garis PB
 - Hitung besarnya sudut $G(s)$ dengan mensubstitusi posisi pole yang diinginkan, dengan persamaan: $\phi = \angle G(s)$ dengan $s = \sigma + j\omega$ dimana harga σ dan ω sesuai yang diinginkan.
 - Bagi dua sudut ϕ sama besar pada titik P yakni $\frac{\phi}{2}$ disebelah kiri dan disebelah kanan garis bagi PB sampai kedua garis itu memotong sumbu real σ negatif. Sebut titik potong yang disebelah kiri adalah titik C dan titik potong disebelah kanan adalah titik D. Harga pada titik C itulah sama dengan $-\frac{1}{\alpha T}$ dan pada titik D sama dengan $-\frac{1}{T}$.
 - Dari harga T dan α yang diperoleh, hitung harga komponen R_1, R_2 dan C dari kompensator LEAD yang digunakan sesuai rumus yang sudah dikemukakan sebelumnya, diperoleh $G_k(s)$.
 - Hitung lebih lanjut $G_g s = G_k s G(s)$
 - Hitung harga penguatan K_g terkompensasi dari $G_g(s)$ dari syarat besar $G_g(s) = 1$ pada $s = \sigma + j\omega$ yang diinginkan.
 - Hitung penguat kompensator dari $K_g = K K_k$ dimana K adalah penguat dari G(s) tanpa kompensator.
 - Hitung koefisien kesalahan kecepatan yang baru $K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G_k s G(s)$
 - Hitung pole ketiga dari fungsi alih lup tertutup hasil kompensasi yakni dengan persamaan $\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_g(s)}{1+G_g s H s}$; $H s = 1$, dengan melakukan pengfaktoran pada harga harga karakteristiknya yakni $1 + G_g s H s = 0$. [1],[3], [9],[10]

B. Pendekatan Diagram Bode

Fungsi utama dari kompenator LEAD adalah membentuk kembali kurva respon frekuensi untuk memberikan sudut fase mendahului (lead) guna menghilangkan ketertinggalan fase yang berlebihan pada komponen komponen system yang tetap.

Anggaplah sebuah system control berumpan balik yang hendak dipenuhi persyaratan spesifikasi dan performansinya dalam bentuk margin fase, margin penguatan, koefisien kesalahan dan sebagainya. Prosedur disain kompensator LEAD dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Tentukan penguatan lup terbuka K untuk memenuhi persyaratan koefisien kesalahan.

2. Dengan menggunakan penguatan yang telah diperoleh, hitung margin fase system tanpa kompensasi.
3. Tentukan sudut fase mendahului yang perlu ditambahkan ke system.
4. Tentukan factor attenuasi α dari rumus yang diturunkan pada gambar 5 LEAD yakni $\sin \theta_{max} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}$
5. Tentukan frekuensi yang menyebabkan besar system tanpa kompensasi $d\beta = -20 \log \frac{1}{\alpha}$, frekuensi ini merupakan gain cross over frekuensi ω_m yang baru yang menyebabkan terjadinya pergeseran fase maksimum.
6. Tentukan frekuensi patah kompensator LEAD $\omega_1 = \frac{1}{T}$ dan $\omega_2 = \frac{1}{\alpha T}$
7. Akhirnya sisipkan penguat dengan penguatan $\frac{1}{\alpha}$, atau perbesar penguatan yang sudah ada dengan factor $\frac{1}{\alpha}$.

C. Pendekatan Diagram Polar

1. Nyatakan persamaan fungsi alih lup tertutup menjadi $\frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} = Me^{j\alpha}$ dan $G(j\omega) = X + jY$
2. Hitung X dan Y
3. Hitung M dengan rumus $M = \frac{\sqrt{X^2+Y^2}}{1+X^2+Y^2}$
4. Hitung pusat lingkaran X_P, Y_P dengan $X_P = -\frac{M^2}{M^2-1}$ dan $Y_P = 0$
5. Hitung jari jari lingkaran $R = \frac{M}{M^2-1}$
6. Plot lingkaran dengan persamaan $(X - X_P)^2 + (Y - Y_P)^2 = R^2$
7. Hitung $\alpha = \tan^{-1} \frac{Y}{X} - \tan^{-1} \frac{Y}{1+X}$
8. Hitung $N = \tan \alpha$
9. Plot lingkaran sudut yang berpusat di $Q = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2N}$ dan jari-jari $R_\alpha = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{2N^2}}$
(Dalam tulisan ini hanya menggunakan lingkaran M, sampai langkah 6).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari ketiga uraian pendekatan dan landasan teori yang sudah dipaparkan, dilakukan simulasi dan hasilnya seperti yang terlihat pada gambar 7, 8 dan 9. Namun sebelumnya perlu diketahui data parameter yang digunakan dalam simulasi yakni:

- Kompensator LEAD $C = 1\mu F; R_1 = 345 k\Omega; R_2 = 400 k\Omega$
- Penguatan K dari system tanpa kompensasi $K = 4$
- Sensor umpan balik $H s = 1$
- Data ini membentuk Model kompensator LED $\frac{s+\frac{1}{T}}{s+\frac{1}{\alpha T}} = \frac{s+2,9}{s+5,4}$ dan

$$G s H s = \frac{K}{s s+2} = \frac{4}{s(s+2)} \text{ (lup terbuka)}$$

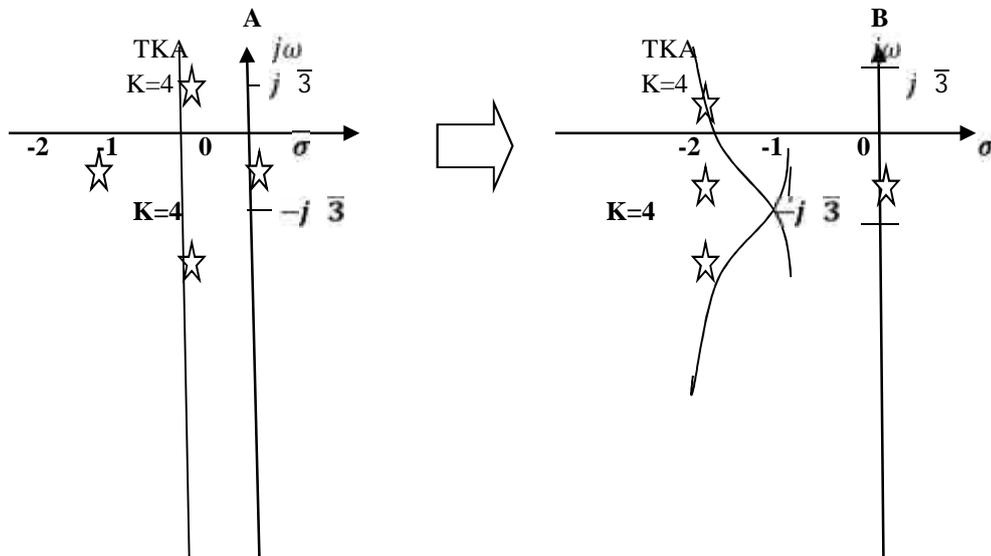
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G s H(s)} = \frac{4}{s^2+2s+4} \text{ (lup tertutup tanpa kompensator)}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{4}{(s+5,4)} \frac{(s+2,9)}{(s^2+2s+4)} \text{ (lup tertutup dengan kompensator)}$$

- Dengan menggantikan $s = j\omega$ diperoleh $G(j\omega) = X + jY = \left(\frac{-4\omega}{\omega^3+4\omega}\right) + j\left(\frac{-8}{\omega^3+4\omega}\right)$ untuk $0 \leq \omega \leq \infty$. Selanjutnya diperoleh $M, X_p, R, \alpha, \frac{C(j\omega)}{R(j\omega)}$ dan seterusnya.

Akhirnya diperoleh diagram root locus (TKA), diagram Bode dan Diagram polar sebagai hasil simulasi seperti diagram-diagram berikut.

A. Diagram root locus (TKA)

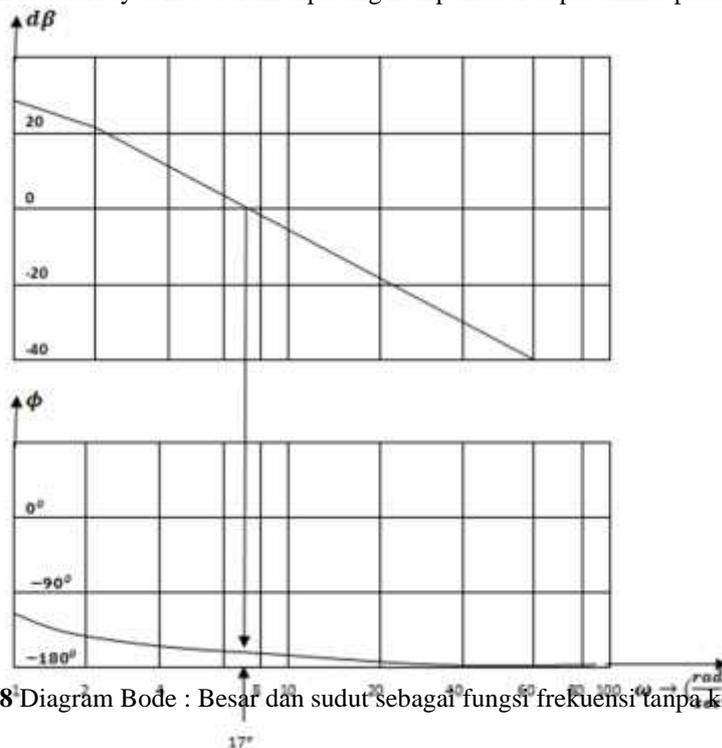


Gambar 7 A. Sebelum/tanpa kompensasi dan B. Sesudah/dengan kompensasi

Perhatikan bahwa sesudah kompensasi, tanpa mengubah besarnya penguatan K, frekuensi ω dan factor redaman ζ dua buah pole yakni $s_1 = -1 + j\sqrt{3}$ dan $s_2 = -1 - j\sqrt{3}$ dapat diubah posisinya dengan didorong ke kiri ke posisi $s_1 = -2 + j\sqrt{3}$ dan $s_2 = -2 - j\sqrt{3}$ sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan yakni posisi yang lebih stabil, menjauh dari sumbu imajiner $j\omega$.

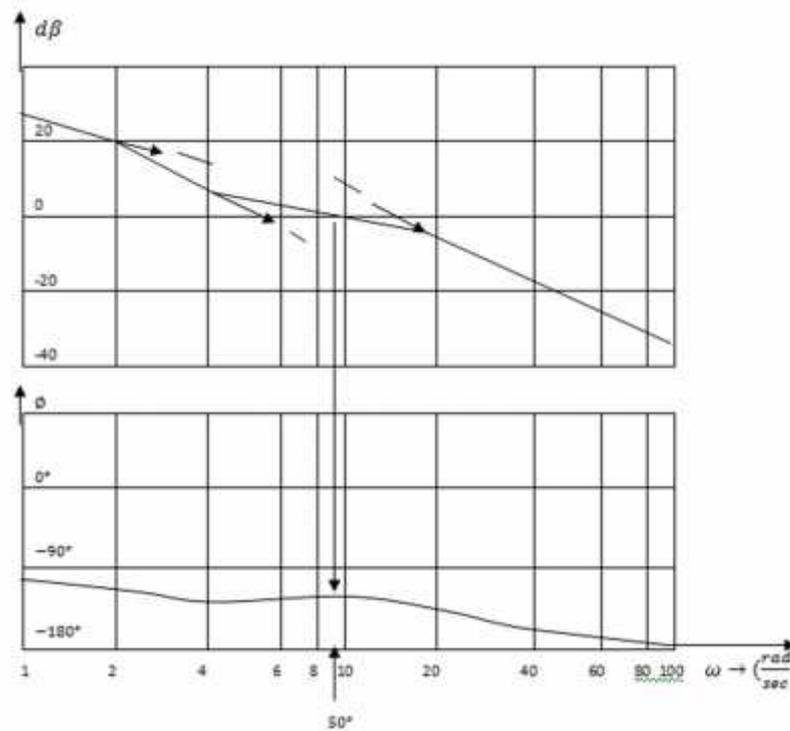
B. Diagram Bode

Diagram Bode dari system sebelum dipasang kompensator dapat dilihat pada gambar 8



Gambar 8 Diagram Bode : Besar dan sudut sebagai fungsi frekuensi tanpa kompensator

Sesudah dipasang kompensator LEAD pengaruh gambar 6 A menyebabkan diagram Bode berubah menjadi seperti gambar 9. Selanjutnya jika Gambar 6 A dipadukan dengan gambar 8, diperoleh system yang sudah dikompensasi dengan diagram Bode seperti gambar 9.

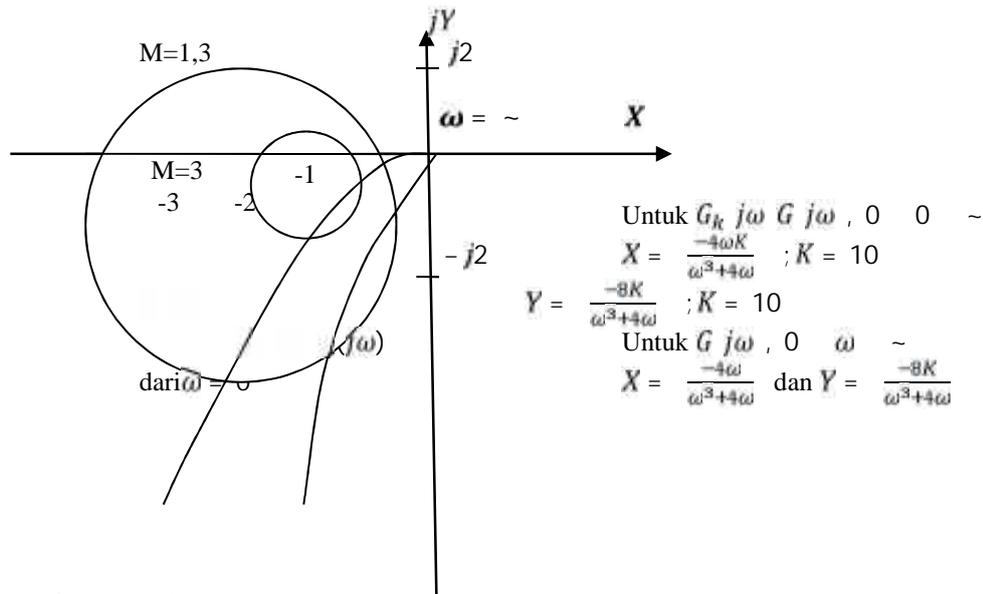


Gambar 9 Diagram Bode, Besar dan sudut dengan kompensator LEAD

Perhatikan bahwa titik 0 dB dengan sudut 17° pada frekuensi $\omega = 6,3 \text{ rad/sec}$ pada sebelum kompensasi bergeser ke 50° pada frekuensi $\omega = 9 \text{ rad/sec}$ setelah kompensasi. Kedua frekuensi ini disebut frekuensi "gain crossover frequency". Margin fasa dan margin penguatan setelah dikompensasi adalah 50° dan $+ \infty$. Yang dimaksudkan dengan margin fasa adalah besarnya kelambatan fasa tambahan pada gain crossover frekuensi yang diperlukan agar system berada pada ambang ketidak stabilan. Sementara yang dimaksudkan dengan gain crossover frequency adalah frekuensi yang menyebabkan harga $d\beta = 0$ atau besar dari $|G(s)H(s)| = 1$. Dan yang dimaksudkan dengan margin penguatan adalah kebalikan dari $|G(s)H(s)|$ atau $\frac{1}{|G(s)H(s)|}$ pada frekuensi yang menyebabkan sudut fasa -180° . Dengan penjelasan ini jelaslah bahwa margin fasa 50° jauh lebih stabil dari pada margin fasa 17° .

C. Diagram Polar

Diagram polar diperoleh dari $G(j\omega)H(s) = X + jY = \left(\frac{-4\omega}{\omega^3+4\omega}\right) + j\left(\frac{-8}{\omega^3+4\omega}\right)$ dimana baik besar $\sqrt{X^2+Y^2}$ dan sudut fasa $= \arctan \frac{Y}{X}$ diplot bersama sama dalam sumbu X versus jY sebagai fungsi dari frekuensi yang diubah dari nol sampai tidak terhingga atau $0 \leq \omega \leq \infty$. Untuk kasus yang ditinjau diperoleh diagram polar seperti gambar 10. Dalam gambar ini sebelum dan sesudah diberi kompensator tergambar bersama-sama.



Gambar 10 Diagram polar sebelum dan sesudah kompensator LEAD dipasang.

Sebagai informasi bahwa lingkaran $M=3$ merupakan lingkaran yang menyinggung kurva $G(j\omega)$ pada $\omega = 6$ dan lingkaran $M=1,3$ merupakan lingkaran yang menyinggung kurva $G_K(j\omega) G(j\omega)$ pada $\omega = 8$ yaitu masing masing sebelum dan sesudah dipasang kompensator. Perhatikan bahwa kurva dengan kompensator berjarak lebih jauh dari titik $(-1,0)$ dari pada kurva tanpa kompensator yang berjarak sangat dekat dengan titik $(-1,0)$. Perlu diketahui bahwa menurut teorema Nyquist, jika sebuah kurva tidak memutar titik $(-1,0)$ maka kurva itu stabil dan semakin jauh semakin stabil, sehingga dengan demikian pemasangan kompensator LEAD terbukti semakin memperbaiki tingkat kestabilan system.

5. SIMPULAN DAN SARAN

A. SIMPULAN

1. Untuk memperbaiki spesifikasi system kontrol orde dua dengan hanya menaikkan harga penguatan K tidak dapat mengubah posisi real dari system. Dengan memperbesar harga K menyebabkan berubahnya posisi imajiner yang tidak disertai dengan perubahan posisi real, akibatnya tingkat kestabilan system tidak berubah sama sekali, kecuali hanya memperbesar frekuensi alamiah ω_n yang justru menyebabkan mengecilnya factor redaman ζ .
2. Penerapan kompensator LEAD pada orde dua dapat menggeser posisi real pole pole dominan ke arah semakin ke kiri menjauh dari sumbu imajiner $j\omega$, tanpa menyebabkan turut berubahnya frekuensi alamiah dan factor redaman ω_n dan ζ . Hal ini dapat dianalisis dari tiga jenis diagram yang telah diperoleh diatas yakni:
 - a. Dari diagram root locus, tempat kedudukan akar (TKA) untuk $K = 4$, posisi pole sebelum kompensator dipasang berada pada $s_1 = -1 + j\sqrt{3}$ dan $s_2 = -1 - j\sqrt{3}$, dengan kompensator posisinya dapat didorong ke kiri ke posisi $s_1 = -2 + j\sqrt{3}$ dan $s_2 = -2 - j\sqrt{3}$ yang memiliki tingkat kestabilan yang lebih baik sesuai spesifikasi yang ditetapkan seperti terlihat pada gambar 7 A dan B.
 - b. Dari diagram Bode dihasilkan sebelum dipasang kompensator LEAD besar $d\beta = 0$ dB bersesuaian dengan sudut fasa $\phi = 17^\circ$. Setelah dipasang kompensator LEAD sudut fase pada $d\beta = 0$ dB dapat diperbesar menjadi 50° yang berarti tingkat kestabilan system semakin baik. Seperti diketahui bahwa semakin besar sudut fase pada besar nol dB semakin stabil system tersebut.
 - c. Dari diagram polar juga dihasilkan bahwa sebelum kompensator LEAD dipasang kurva $G(j\omega)$ berada sangat dekat dengan titik $(-1,0)$ yakni menyinggung lingkaran $M=3$ pada $\omega = 6$ rad/sec. Sementara setelah dipasang kompensator LEAD kurva $G_K(j\omega) G(j\omega)$

menyinggung lingkaran $M=1,3$ di $\omega = 8 \text{ rad/sec}$ yang membawa system menjauhi titik $(-1,0)$ yang berarti berdasarkan teorema Nyquist system menjadi semakin stabil.

3. Spesifikasi dapat dicapai dengan menerapkan kompensator. Pemilihan jenis kompensator LEAD, LAG atau LEAD-LAG dapat disesuaikan dengan karakteristik dari system yang akan diperbaiki. Dalam tulisan ini dipilih jenis LEAD mengingat system yang ada pole-pole dominan yang akan diperbaiki posisinya akan didorong ke kiri. Untuk tujuan perbaikan mendorong ke kanan, tentu saja tidaklah tepat dengan kompensator LEAD, melainkan LAG atau LEAD-LAG.

B. SARAN

Sebelum menerapkan kompensator, apalagi langsung memilih salah satu dari tiga jenis yang ada, disarankan untuk terlebih dahulu mengetahui model dari plant/proses mengenai orde system, jumlah pole dan zeronya, spesifikasi yang dicanangkan, dan grafik TKA nya. Dengan demikian penentuan jenis dan besarnya parameter dari kompensator yang diperlukan sesuai dengan kebutuhan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Garth Nash, 1994, "**Phase Locked loop Design Fundamental**", Motorola Application Note- 535, Motorola Inc.
2. Harunur Rasyid Muhammad, 1996, "**Power Electronics**", Prentice Hall International Inc., New Jersey.
3. Moffat R., Paresh C. Sen, Younker R., Bayoumi M. Muhamed., 1979, "**Digital Phase Locked Loop for Induction Motor Speed Control**", Transaction on Industrial Electronics, vol.43.
4. Astrom, K.J., B. Wittenmark, 1994, **Computer Controlled Systems : Theory and Design**, Prentice Hall Inc.
5. Avtar Singh, 1991, **16-bit and 32-bit Microprocessors**, Prentice –Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey 07632
6. BOLTON, W, 2005, **Mechatronics**, Electronic controlsystems in mechanical engineering, Mc Graw-Hill Book Company, Inc, New York, USA
7. Franklin, G. F., J. D. Powell dan M. L. Workman, 2000, **Digital Control of Dynamic Systems**, Addison- Wesley Pub. Co.
8. Harunur Rashid Muhammad, 1988, **Power Electronics**, Circuits, Devices, and Applications, Prentice-Hall Internatinal, Inc.
9. Kusmayanto Kadiman, 1991, **Sistem Kontrol Berbasis Komputer**, Teori, perancangan dan Implementasi, laboratorium Instrumentasi dan Kontrol Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Bandung.
10. Katsuhiko Ogata , 1996, **Modern Control Engineering**, Simon & Schuster (Asia) Pte. Ltd.
11. Sumanto, Drs, MA, 1995. **Mesin Arus Searah**. Penerbit ANDI Offset, Yogyakarta.
12. The Math Work, 2001. **Simulink, model, based and system-based design**. Diambil dari www. Electricalmotors.com.