
6

Tanggapan Frekuensi

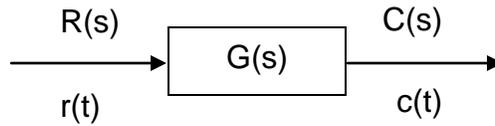
6.1. Pendahuluan

Dalam bab 2, kita telah membahas karakteristik suatu sistem dalam lingkup waktu dengan masukan-masukan berupa fungsi step, fungsi ramp, fungsi impuls, dan sebagainya tanpa memperhitungkan masalah frekuensi input. Pada bab ini, akan dipelajari mengenai tanggapan keadaan tunak suatu sistem dengan input sinusoidal, yang akan kita sebut dengan tanggapan frekuensi. Pada metode tanggapan frekuensi ini, frekuensi sinyal input akan divariasikan dalam jangkauan tertentu dan tanggapan yang dihasilkan akibat perubahan frekuensi tersebut dipelajari.

Tanggapan Sistem Terhadap Masukan Sinusoidal

Bila diberikan suatu sistem linier time-invariant seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.1, maka fungsi alih untuk sistem ini adalah :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s)$$



Gambar 6.1. Sistem Linier Time-Invariant

Suatu input sinusoidal yang dinyatakan dengan :

$$r(t) = A \sin \omega t$$

diaplikasikan terhadap sistem tersebut. Maka output yang dihasilkan bila diasumsikan sistem tersebut merupakan suatu sistem yang stabil adalah bentuk gelombang sinusoidal pula. Hanya saja pada output kemungkinan terjadi perubahan amplitudo atau pergeseran fasa, sehingga persamaan output bisa dituliskan sebagai :

$$c(t) = B \sin (\omega t + \theta)$$

dimana :

$$B = A|G(j\omega)| \quad \text{dan}$$

$$\theta = \angle[G(j\omega)] = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}[G(j\omega)]}{\text{Re}[G(j\omega)]} \right]$$

Dalam analisa tanggapan frekuensi, fungsi alih biasanya dituliskan dalam bentuk fungsi dari $j\omega$ yang dinamakan fungsi alih sinusoidal, sehingga fungsi alih sinusoidal dari sistem pada Gambar 6.1 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{C(j\omega)}{R(j\omega)} = G(j\omega)$$

Ada beberapa macam cara yang biasa digunakan untuk merepresentasikan karakteristik dari suatu sistem terhadap input sinusoidal dengan frekuensi yang divariasi. Dalam bab ini akan dibahas mengenai Diagram Bode, Nyquist (Polar) Plot, dan Log Magnitude vs Phase Plot.

6.2. Diagram Bode

Karakteristik suatu sistem dengan persamaan fungsi alih sinusoidal yang telah diketahui terhadap perubahan frekuensi input dapat digambarkan dalam suatu diagram yang disebut diagram Bode. Diagram Bode ini berisi dua gambar, yang pertama merupakan penggambaran dari nilai logaritma magnitudo terhadap variasi frekuensi dalam skala logaritmik, dan yang kedua merupakan penggambaran nilai pergeseran sudut (phasa) terhadap variasi frekuensi dalam skala logaritmik.

Logaritma magnitudo biasanya dinyatakan dalam satuan decibel (dB) yang mempunyai kesetaraan terhadap magnitudo sebagai berikut :

$$1 \text{ dB } |G(j\omega)| = 20 \log |G(j\omega)|$$

Contoh :

1. $|G(j\omega)| = 1 \rightarrow 20 \log |G(j\omega)| = 20 \log 1 = 0 \text{ dB}$
2. $|G(j\omega)| = 10 \rightarrow 20 \log |G(j\omega)| = 20 \log 10 = 20 \text{ dB}$
3. $|G(j\omega)| = 100 \rightarrow 20 \log |G(j\omega)| = 20 \log 100 = 40 \text{ dB}$
4. $|G(j\omega)| = 0.1 \rightarrow 20 \log |G(j\omega)| = 20 \log (1/10) = -20 \text{ dB}$
5. $|G(j\omega)| = 0.01 \rightarrow 20 \log |G(j\omega)| = 20 \log (1/100) = -40 \text{ dB}$

Untuk membuat suatu gambar diagram Bode dari suatu fungsi alih yang kompleks, maka fungsi alih tersebut dapat dipisah-pisahkan menjadi beberapa faktor perkalian. Tujuannya adalah untuk mendapatkan cara menggambar yang lebih mudah

untuk faktor-faktor yang lebih sederhana tersebut. Kemudian karena fungsi dari magnitude merupakan operasi logaritmik, gambar faktor-faktor tersebut dapat dijumlahkan untuk mendapatkan gambar logaritma magnitude vs frekuensi. Demikian pula dengan gambar sudut vs frekuensi, karena faktor pengalian merupakan penjumlahan sudut, secara mudah kita dapat menjumlahkan sudut-sudut yang dihasilkan oleh masing-masing faktor pengali membentuk gambar sudut vs frekuensi.

Misal diberikan suatu fungsi alih :

$$G(j\omega) = \frac{j\omega}{(1 + j\omega)(1 - j\omega)}$$

maka fungsi alih tersebut dapat kita bagi menjadi faktor-faktor pengali sebagai berikut :

$$G(j\omega) = [j\omega][1 + j\omega]^{-1}[1 - j\omega]^{-1}$$

Terdapat tiga pengali yaitu masing-masing : $j\omega$, $(1 + j\omega)^{-1}$, dan $(1 - j\omega)^{-1}$. Masing-masing faktor pengali ini bisa dicari diagram Bodanya, kemudian setelah itu masing-masing ditambahkan untuk mendapatkan gambar diagram Bode yang lengkap dari fungsi alih yang diberikan.

6.2.1. Faktor-Faktor Pengali

Secara umum faktor-faktor pengali dapat dikelompokkan menjadi empat : gain K , $(j\omega)^{\pm 1}$, $(1 + j\omega T)^{\pm 1}$, dan $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{\pm 1}$.

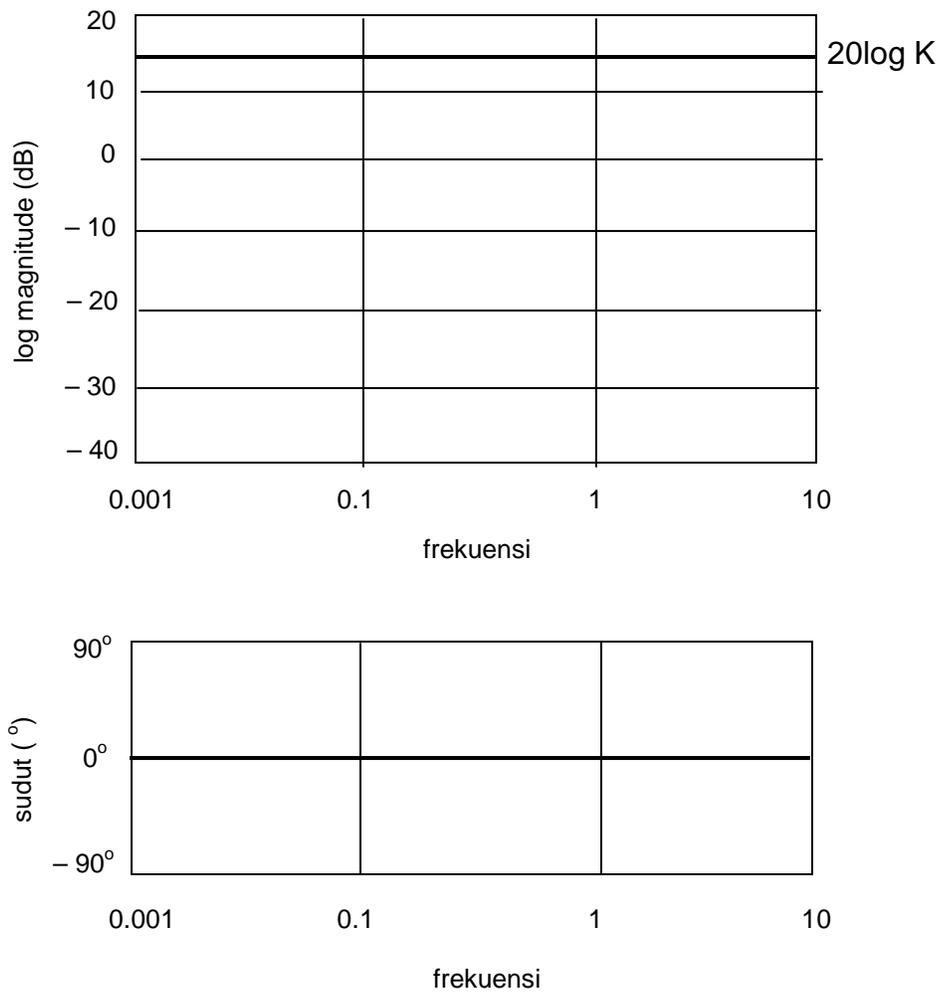
a. Faktor Pengali Gain K

Karakteristik logaritmik dari gain K adalah sebagai berikut :

- $|G(j\omega)| = K$, $K > 1 \rightarrow 20 \log |G(j\omega)| = 20 \log K$
- $|G(j\omega)| = K$, $K < 1 \rightarrow 20 \log |G(j\omega)| = -20 \log K$

- $|G(j\omega)| = K \times 10^n$, $\rightarrow 20 \log |G(j\omega)| = 20 \log K + 20n$

Gambar logaritma magnitude dari gain K adalah berupa garis lurus dengan slope tertentu. Sedangkan sudutnya bernilai nol. Perhatikan Gambar 6.2.



Gambar 6.2. Diagram Bode untuk Faktor Pengali Gain K

b. Faktor Pengali $(j\omega)^{\pm 1}$

Log magnitude dari $(j\omega)^{-1}$ dalam desibel adalah

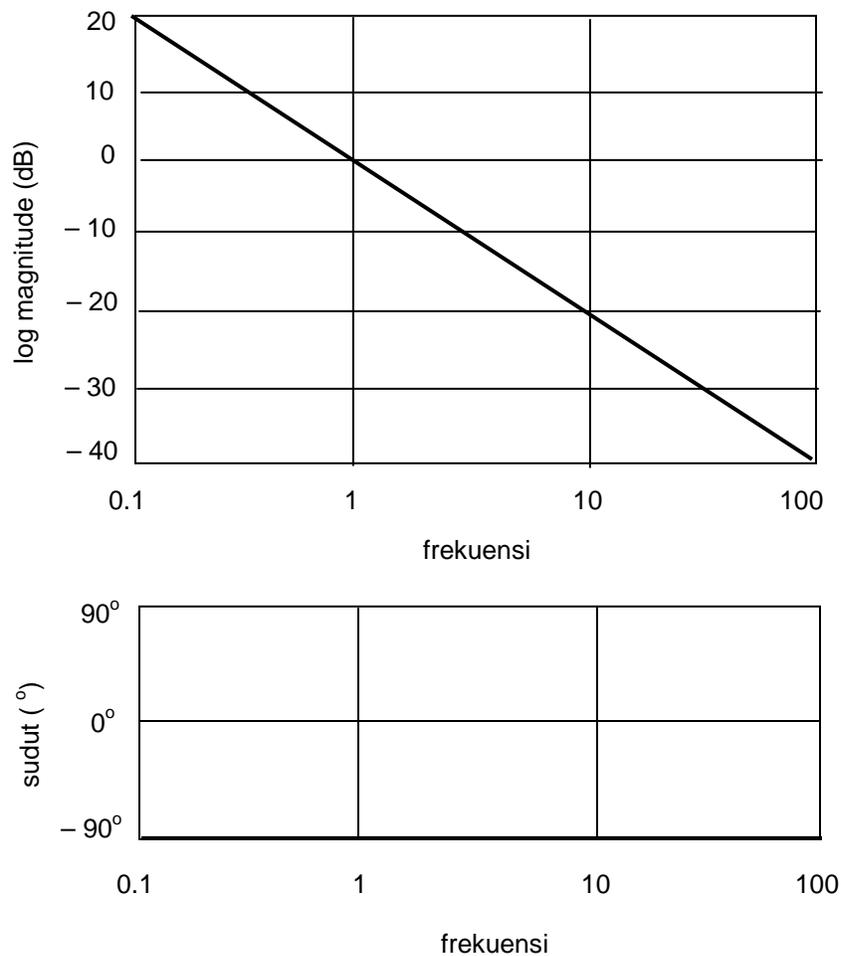
$$20 \log |(j\omega)^{-1}| = -20 \log \omega \text{ dB}$$

Sudut dari $(j\omega)^{-1}$ adalah konstan, yaitu -90° .

Karakteristik log magnitude terhadap kenaikan frekuensi adalah :

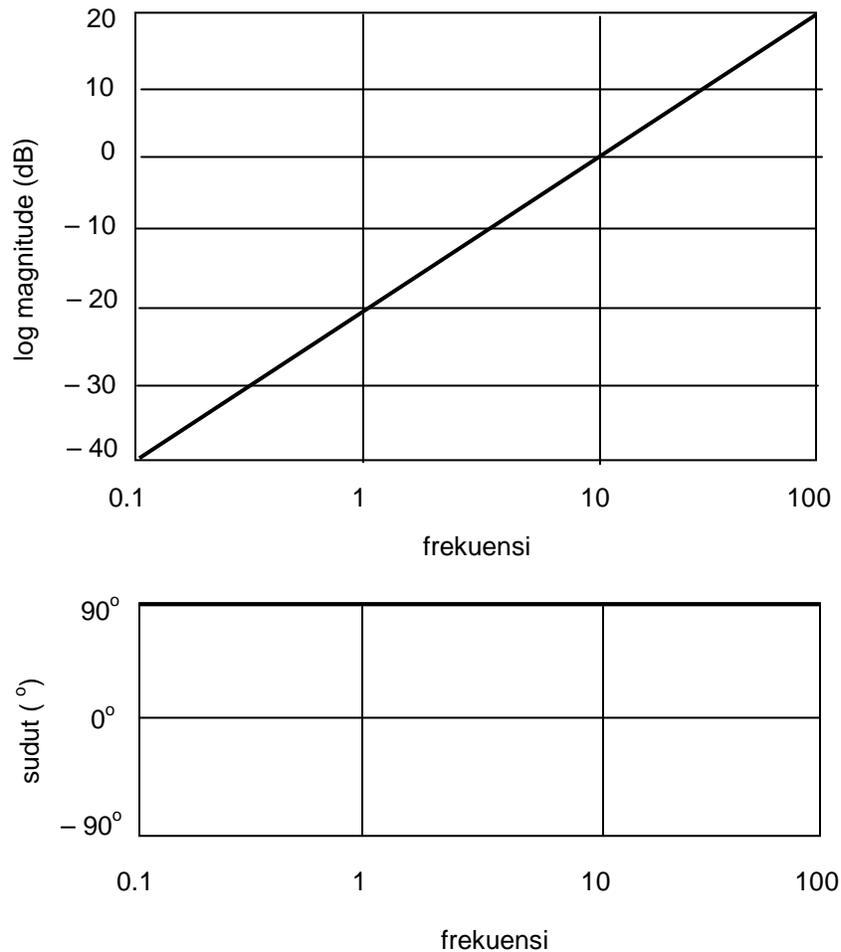
- $\omega = 0.01 \rightarrow -20 \log (1/100) = 40 \text{ dB}$
- $\omega = 0.1 \rightarrow -20 \log (1/10) = 20 \text{ dB}$
- $\omega = 1 \rightarrow -20 \log (1) = 0 \text{ dB}$
- $\omega = 10 \rightarrow -20 \log (10) = -20 \text{ dB}$
- $\omega = 100 \rightarrow -20 \log (100) = -40 \text{ dB}$

sehingga gambar log magnitude merupakan garis lurus dengan penurunan (slope turun) sebesar -20 dB/decade . Gambar 6.3 adalah gambar diagram Bode untuk faktor pengali ini.



Gambar 6.3. Diagram Bode untuk Faktor Pengali $(j\omega)^{-1}$

Identik dengan faktor pengali $(j\omega)^{-1}$, log magnitude untuk faktor pengali $(j\omega)^{+1}$ adalah merupakan garis lurus dengan kenaikan (slope naik) 20 dB/decade dan mempunyai sudut konstan 90° . Gambar 6.4 menunjukkan diagram Bode untuk faktor pengali $(j\omega)^{+1}$.



Gambar 6.4. Diagram Bode untuk Faktor Pengali $(j\omega)^{+1}$

c. Faktor Pengali $(1 + j\omega T)^{\pm 1}$

Log magnitude dari faktor pengali $(1 + j\omega T)^{-1}$ adalah :

$$20 \log |(1 + j\omega T)^{-1}| = -20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \text{ dB}$$

Untuk frekuensi rendah dimana nilai ω jauh lebih kecil dari $1/T$, log magnitude dapat didekati oleh persamaan :

$$-20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \approx -20 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

Ini berarti untuk frekuensi-frekuensi rendah, kurva log magnitude akan mendekati suatu nilai konstan 0 dB (kurva log magnitude mempunyai suatu asimptot yaitu garis lurus pada nilai konstan 0 dB).

Untuk frekuensi tinggi dimana nilai ω jauh lebih besar dari $1/T$, log magnitude dapat didekati oleh persamaan :

$$-20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \approx -20 \log \omega T$$

Untuk mendapatkan pendekatan kurva pada frekuensi tinggi, kita perlu mencari beberapa titik untuk menggambarkan garis asimptot kurva tersebut :

$$\omega = 1/T \rightarrow -20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} = 0 \text{ dB}$$

$$\omega = 10/T \rightarrow -20 \log \sqrt{1 + \omega^2 T^2} = -20 \text{ dB}$$

Dari dua titik tersebut, kita dapatkan suatu garis asimptot dengan penurunan (slope turun) sebesar -20 dB/decade . Pada frekuensi tinggi dimana nilai ω jauh lebih besar dari $1/T$, kurva log magnitude akan berhimpit dengan garis ini.

Kedua garis asimptot kurva log magnitude tersebut akan saling berpotongan pada frekuensi $\omega = 1/T$. Frekuensi dimana kedua asimptot tersebut saling bertemu disebut frekuensi sudut (*corner frequency*). Gambar eksak kurva log magnitude diberikan pada Gambar 6.5.

Nilai sudut dari faktor pengali $(1 + j\omega T)^{-1}$ adalah :

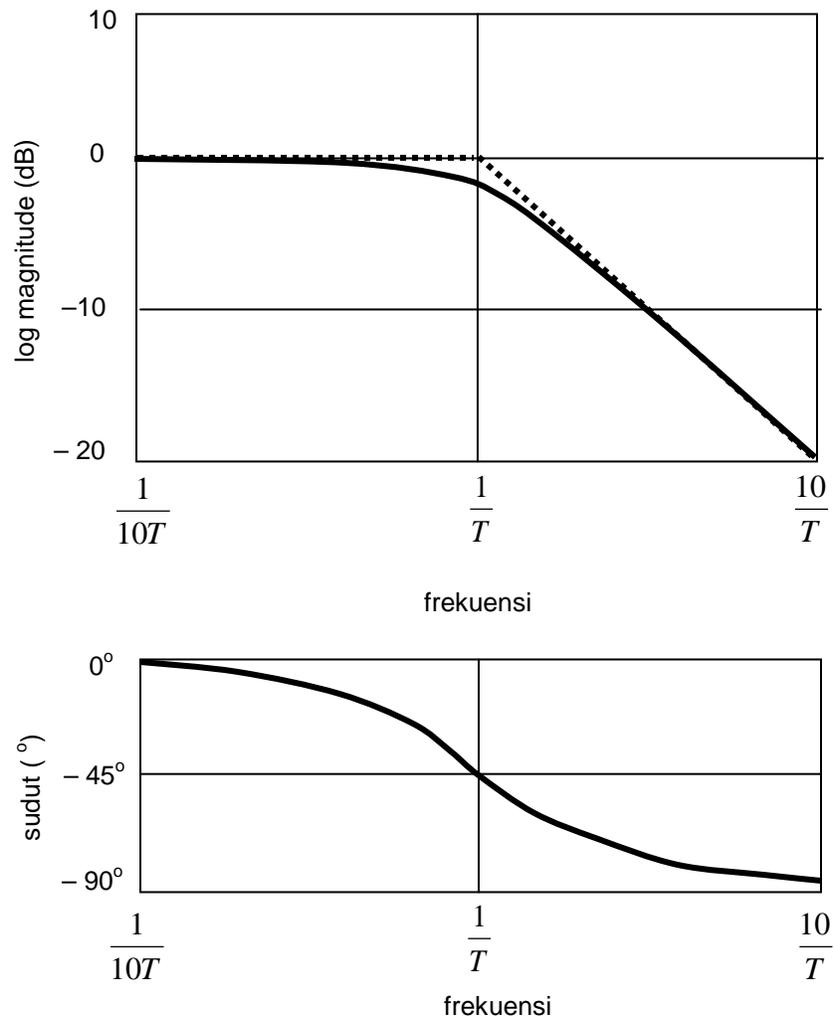
$$\phi = -\tan^{-1} \omega T$$

$$\omega = 0 \rightarrow -\tan^{-1} \omega T = -\tan^{-1} 0 = 0^\circ$$

$$\omega = 1/T \text{ (pada frekuensi sudut)} \rightarrow -\tan^{-1} \omega T = -\tan^{-1} 1 = -45^\circ$$

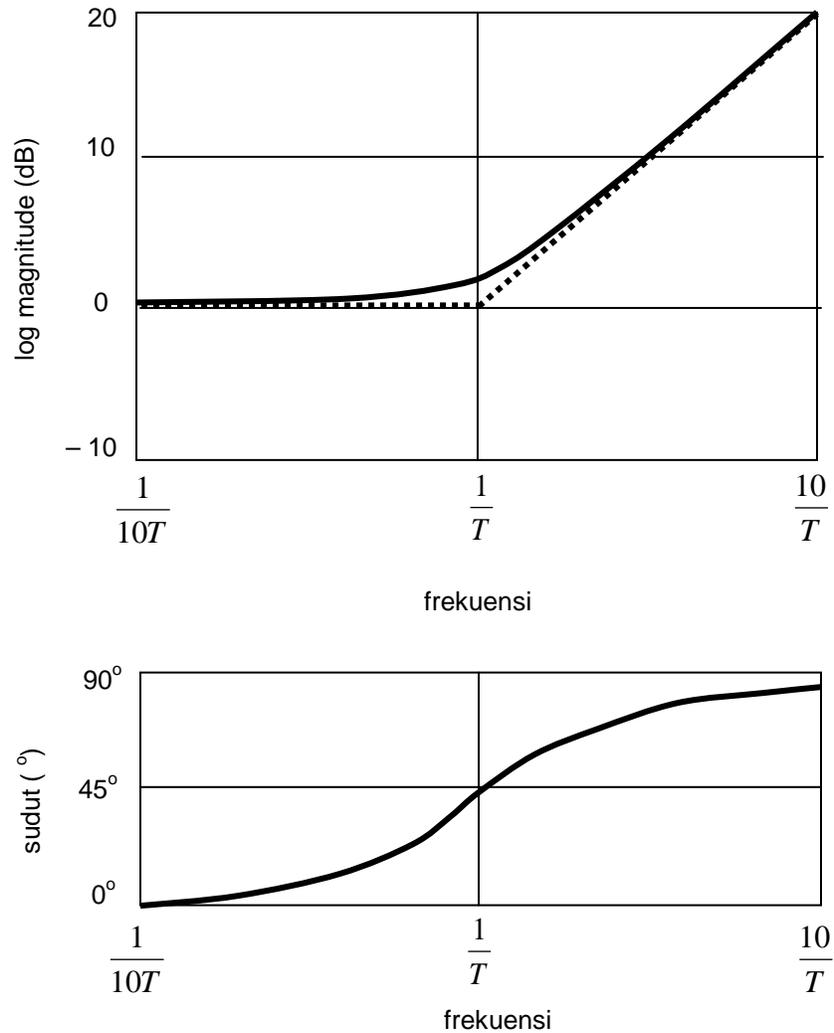
$$\omega = \infty \rightarrow -\tan^{-1} \omega T = -\tan^{-1} \infty = -90^\circ$$

Kurva sudut ini digambarkan oleh Gambar 6.5.



Gambar 6.5. Diagram Bode untuk Faktor Pengali $(1 + j\omega T)^{-1}$

Identik dengan faktor pengali $(1 + j\omega T)^{-1}$, untuk faktor pengali $(1 + j\omega T)^{+1}$ gambar Bode diagramnya ditunjukkan oleh Gambar 6.6.

Gambar 6.6. Diagram Bode untuk Faktor Pengali $(1 + j\omega T)^{+1}$

d. Faktor Pengali $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{\pm 1}$

Untuk faktor pengali $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{-1}$, log magnitudenya diberikan oleh :

$$20 \log \left| \frac{1}{1 + 2\zeta \left(j \frac{\omega}{\omega_n} \right) + \left(j \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right| = -20 \log \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)^2}$$

Untuk frekuensi rendah dimana ω jauh lebih kecil dari ω_n , log magnitude dapat didekati oleh nilai :

$$-20 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

Ini berarti untuk frekuensi-frekuensi rendah, garis asimptotnya merupakan garis mendatar pada nilai 0 dB.

Untuk frekuensi tinggi dimana ω jauh lebih besar dari ω_n , log magnitude dapat didekati oleh persamaan :

$$-20 \log \frac{\omega^2}{\omega_n^2} = -40 \log \frac{\omega}{\omega_n} \text{ dB}$$

Untuk mendapatkan pendekatan kurva pada frekuensi tinggi, kita perlu mencari beberapa titik untuk menggambarkan garis asimptot kurva tersebut :

$$\omega/\omega_n = 1 \rightarrow -40 \log \omega/\omega_n = -40 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

$$\omega/\omega_n = 10 \rightarrow -40 \log \omega/\omega_n = -40 \log 10 = -40 \text{ dB}$$

Dari dua titik tersebut kita bisa menggambarkan asimptot dari kurva log magnitude pada frekuensi tinggi, yaitu berupa garis lurus dengan penurunan (slope turun) sebesar -40 dB/decade.

Kedua garis asimptot tersebut tidak dipengaruhi oleh besarnya nilai ζ . Dekat dengan frekuensi sudut, yakni pada $\omega = \omega_n$, terjadi puncak resonansi. Rasio peredaman ζ merupakan magnitude dari puncak resonansi ini, dimana untuk nilai yang semakin kecil puncak resonansi yang terjadi akan semakin besar, seperti yang terlihat pada Gambar 6.7.

Sudut dari faktor pengali $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{-1}$ diberikan oleh :

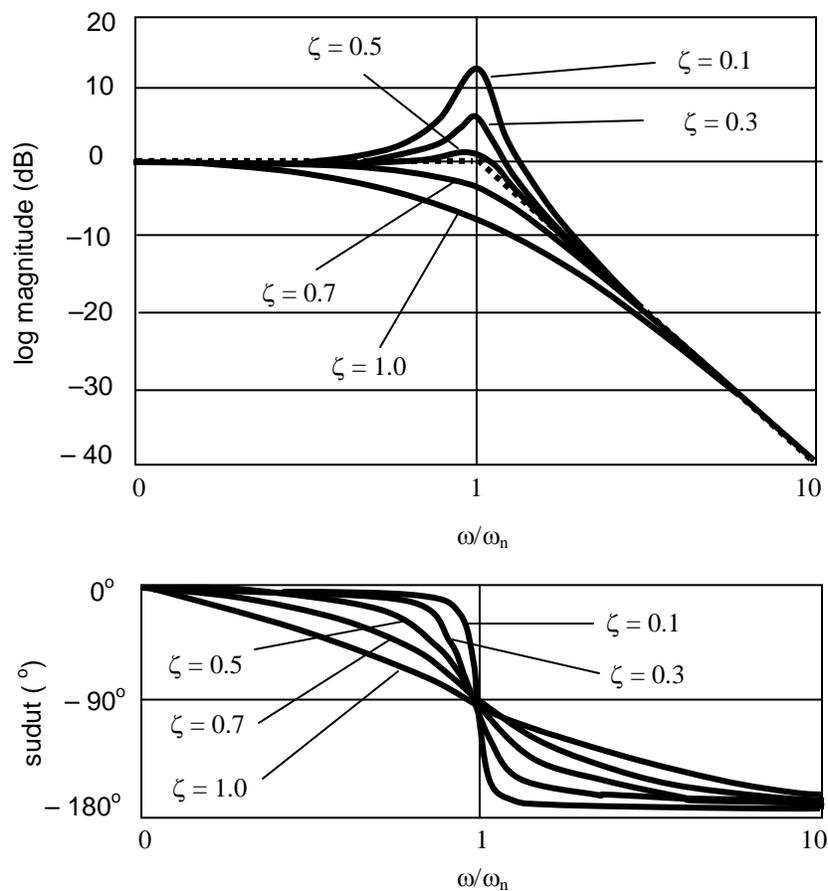
$$\phi = \angle \left[\frac{1}{1 + 2\zeta \left(j \frac{\omega}{\omega_n} \right) + 2 \left(j \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right] = -\tan^{-1} \left[\frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right]$$

$$\omega/\omega_n = 0 \rightarrow \phi = -\tan^{-1} (0/1) = 0^\circ$$

$$\omega/\omega_n = 1 \rightarrow \phi = -\tan^{-1} (2\zeta/0) = -90^\circ$$

$$\omega/\omega_n = \infty \rightarrow \phi = -\tan^{-1} (\infty/-\infty) = -180^\circ$$

Variasi nilai ζ menyebabkan adanya perubahan bentuk kurva sudut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.7.



Gambar 6.7. Diagram Bode untuk Faktor Pengali $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{-1}$

Frekuensi resonansi dan puncak resonansi dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

Magnitude dari $G(j\omega)$ adalah :

$$|G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2}} \equiv \frac{1}{g(\omega)}$$

nilai ini akan mempunyai nilai puncak pada frekuensi tertentu. Nilai puncaknya disebut dengan puncak resonansi, sedangkan frekuensinya disebut frekuensi resonansi. Nilai puncak akan terjadi bila nilai $g(\omega)$ minimum. Persamaan $g(\omega)$ dapat dituliskan kembali menjadi :

$$g(\omega) = \left[\frac{\omega^2 - \omega_n^2(1 - 2\zeta^2)}{\omega_n^2} \right]^2 + 4\zeta^2(1 - \zeta^2)$$

Nilai $g(\omega)$ akan minimum bila :

$$\omega^2 = \omega_n^2(1 - 2\zeta^2)$$

$$\omega = \omega_n^2 \sqrt{1 - 2\zeta^2} \rightarrow \omega = \omega_r \text{ (frekuensi resonansi)}$$

nilai frekuensi resonansi di atas hanya akan terjadi bila ζ bernilai $0 \leq \zeta \leq 0.707$, karena selebih nilai itu akan menghasilkan nilai akar yang imajiner dan itu tidak mungkin terjadi pada nilai frekuensi.

Nilai puncak didapatkan bila :

$$M_r = |G(j\omega)|_{\max} = |G(j\omega_r)| = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}, \quad 0 \leq \zeta \leq 0.707$$

Dari persamaan di atas dapat dibuktikan bahwa untuk nilai ζ yang lebih kecil akan menghasilkan nilai puncak (puncak resonansi) yang lebih besar.

Sudut yang terjadi pada frekuensi resonansi diberikan oleh :

$$\angle[G(j\omega)] = -\tan^{-1} \frac{\sqrt{1-2\zeta^2}}{\zeta} = -90^\circ + \sin^{-1} \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

Untuk faktor pengali $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{+1}$, metode penggambarannya identik dengan faktor pengali $[1 + 2\zeta(j\omega/\omega_n) + (j\omega/\omega_n)^2]^{-1}$. Hasil penggambarannya hanya merupakan pembalikan dari diagram Bode yang ditunjukkan pada Gambar 6.7.

6.2.2. Prosedur Umum Penggambaran Diagram Bode

Secara umum, penggambaran diagram Bode dapat dilakukan dengan urutan-urutan metode sebagai berikut :

1. Susun kembali persamaan fungsi alih sinusoidal menjadi perkalian dari faktor-faktor pengali seperti yang telah diberikan pada sesi sebelumnya.
2. Tentukan masing-masing gambar dari faktor pengali tersebut beserta garis-garis asimptotnya.
3. Jumlahkan garis-garis asimptot dari keseluruhan faktor pengali sehingga garis asimptot dari fungsi alihnya dapat digambarkan.
4. Gambarkan kurva sebenarnya berdasarkan garis asimptotnya.

Contoh :

Tentukan diagram Bode dari suatu sistem yang diberikan oleh persamaan fungsi alih sebagai berikut:

$$G(j\omega) = \frac{10(j\omega + 3)}{(j\omega)(j\omega + 2)[(j\omega)^2 + j\omega + 2]}$$

Penggambaran diagram Bode dilakukan dengan urutan-urutan sebagai berikut :

1. Susun kembali persamaan fungsi alih sinusoidal menjadi perkalian dari faktor-faktor pengali seperti yang telah diberikan pada sesi sebelumnya :

Dari fungsi alih yang diberikan, dapat kita bagi menjadi faktor-faktor pengali : konstanta 7.5, $(j\omega)^{-1}$, $(1 + j\omega/3)$, $(1 + j\omega/3)^{-1}$, dan $(1 + j\omega/2 + (j\omega)^2/2)$, sehingga fungsi alih dapat kita tulis ulang menjadi :

$$G(j\omega) = \frac{7.5(j\omega/3 + 1)}{(j\omega)(j\omega/2 + 1)((j\omega)^2/2 + j\omega/2 + 1)}$$

2. Tentukan masing-masing gambar dari faktor pengali tersebut beserta garis-garis asimptotnya :

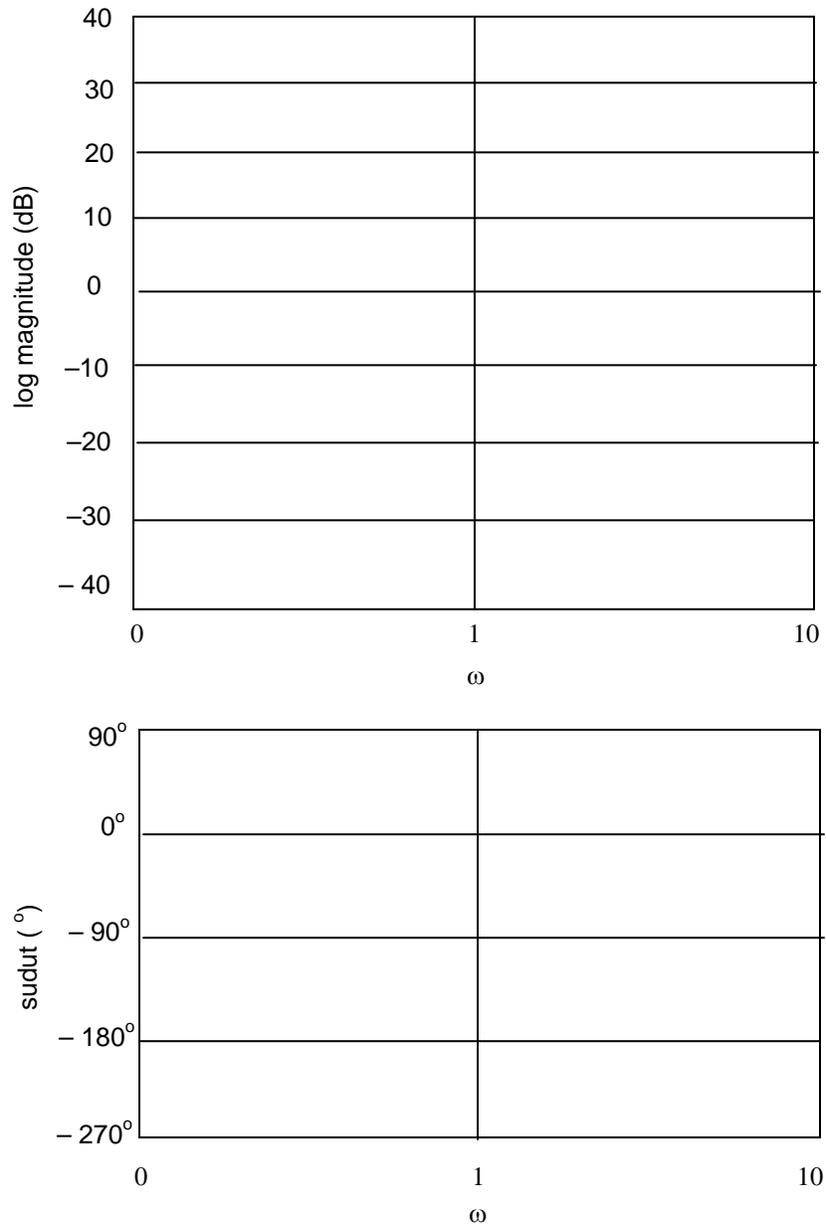
Gambar kurva dan asimptot untuk log magnitude dan sudut masing-masing faktor pengali diberikan pada Gambar 6.8.

3. Jumlahkan garis-garis asimptot dari keseluruhan faktor pengali sehingga garis asimptot dari fungsi alihnya dapat digambarkan:

Gambar garis asimptot yang merupakan penjumlahan dari garis-garis asimptot faktor-faktor pengali diberikan pada Gambar 6.8.

4. Gambarkan kurva sebenarnya berdasarkan garis asimptotnya:

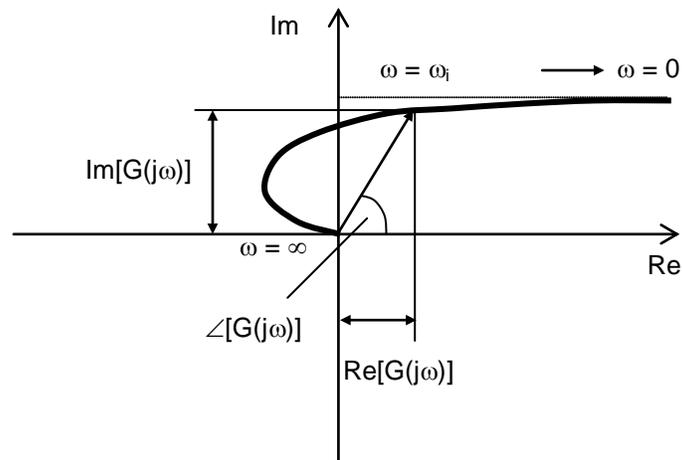
Kurva selengkapnya diberikan pada Gambar 6.8.



Gambar 6.8. Diagram Bode untuk Contoh

6.3. Nyquist (Polar) Plot

Nyquist plot adalah penggambaran magnitude vs sudut dari fungsi alih sinusoidal pada koordinat polar, dimana ω divariasikan dari nol hingga tak terhingga. Gambar 6.9 memberikan hubungan antara magnitude dan sudut dalam Nyquist plot.



Gambar 6.9. Hubungan Magnitude dan Sudut dalam Koordinat Polar

Fungsi alih sinusoidal suatu sistem diberikan oleh persamaan :

$$G(j\omega) = \frac{K(1 + j\omega T_a)(1 + j\omega T_b) \cdots}{(j\omega)^\lambda (1 + j\omega T_1)(1 + j\omega T_2) \cdots}$$

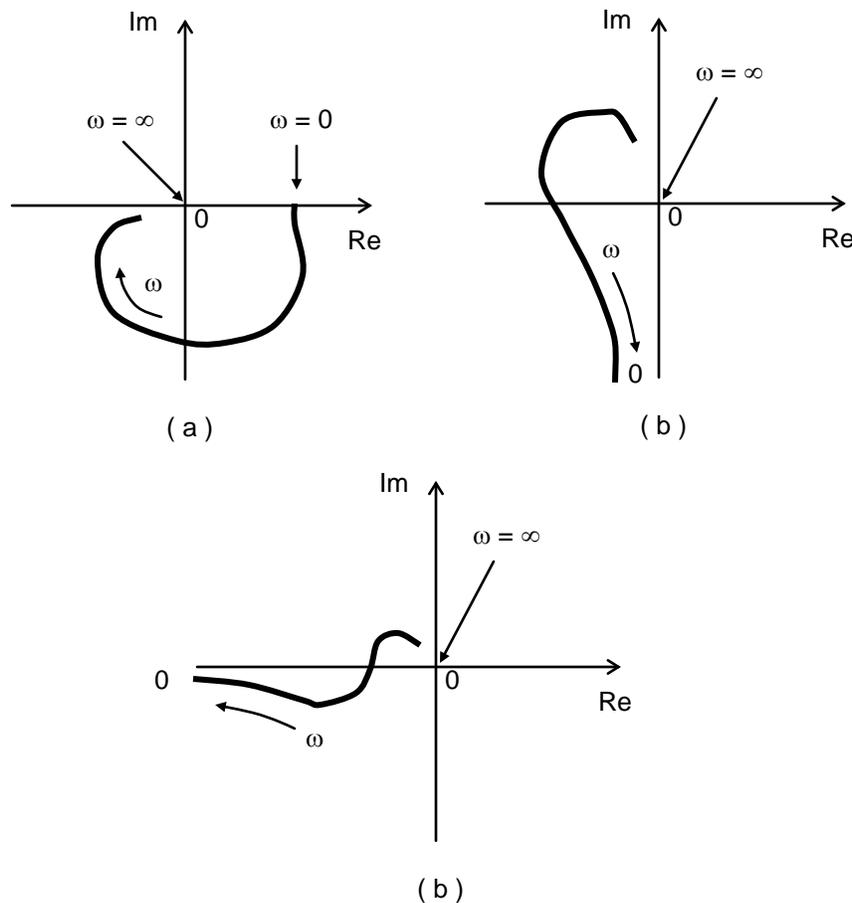
$$= \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \cdots}{a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \cdots}$$

Bila (hanya jika) $n > m$, maka penggambaran Nyquist plot dapat dilakukan dengan prosedur sebagai berikut :

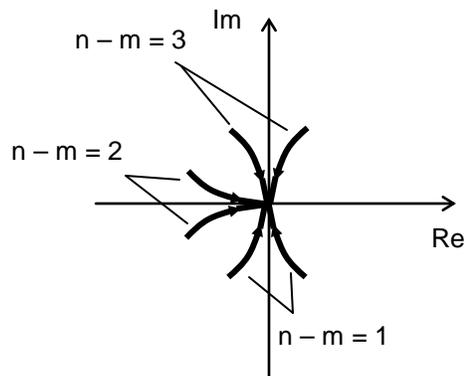
1. Untuk $\lambda = 0$ (sistem tipe 0), Nyquist plot akan mulai bergerak ($\omega = 0$) dari suatu titik tertentu pada sumbu real positif dan membentuk sudut tegak lurus terhadap sumbu real seperti terlihat pada Gambar 6.10.(a). Pada $\omega = \infty$, Nyquist plot akan berakhir di titik origin (titik nol) dan masuk sejajar dengan salah satu sumbu koordinat polar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.11.
2. Untuk $\lambda = 1$ (sistem tipe 1), Nyquist plot akan mulai bergerak ($\omega = 0$) dari suatu titik tak terhingga dan membentuk sudut -90° terhadap sumbu real positif. Pada frekuensi rendah, kurva yang terbentuk akan mengikuti suatu garis asimptot yang paralel dengan sumbu imajiner negatif. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 6.10.(b). Pada $\omega =$

∞ , Nyquist plot akan berakhir di titik origin (titik nol) dan masuk sejajar dengan salah satu sumbu koordinat polar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.11.

- Untuk $\lambda = 2$ (sistem tipe 2), Nyquist plot akan mulai bergerak ($\omega = 0$) dari suatu titik tak terhingga dan membentuk sudut -180° terhadap sumbu real positif. Pada frekuensi rendah, kurva yang terbentuk akan mengikuti suatu garis asimptot yang paralel dengan sumbu real negatif. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 6.10.(c). Pada $\omega = \infty$, Nyquist plot akan berakhir di titik origin (titik nol) dan masuk sejajar dengan salah satu sumbu koordinat polar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.11.



Gambar 6.10. Nyquist Plot untuk (a) Sistem Tipe 0, (b) Sistem Tipe 1,
(c) Sistem Tipe 2.



Gambar 6.11. Nyquist Plot untuk Frekuensi Tinggi

Kriteria Stabilitas Nyquist :

1. Kurva $G(j\omega)$ tidak mengelilingi titik $(-1 + j0)$: sistem stabil jika tidak terdapat pole dari $G(s)$ yang berada di sebelah kanan sumbu khayal, sebaliknya sistem tidak stabil.
2. Kurva $G(j\omega)$ mengelilingi titik $(-1 + j0)$ satu atau lebih melawan arah jarum jam: sistem stabil jika jumlah putaran adalah sama dengan jumlah pole sistem $G(s)$ yang berada di sebelah kanan sumbu khayal, dan sebaliknya sistem tak stabil.
3. Kurva $G(j\omega)$ mengelilingi titik $(-1 + j0)$, satu atau lebih searah putaran jarum jam: sistem tdk stabil.

• Hubungan ketiga kondisi diatas dinyatakan:

$$Z = N + P$$

dimana:

Z : Jumlah Zero dari $[1 + G(s)]$ disebelah kanan sumbu khayal

N : Jumlah kali kurva $G(j\omega)$ mengelilingi titik $(-1 + j0)$ searah putaran jarum jam

P : Jumlah pole dari sistem $G(s)$ di sebelah kanan sumbu khayal.

- Jika P tidak sama dengan nol , untuk sistem stabil, haruslah $Z = 0$, atau $N = -P$, kurva mengelilingi titik $(-1 + j0)$ berlawanan arah jarum jam.
- Jika $P = 0$ maka $Z = N$, untuk sistem stabil, kurva $G(j\omega)$ mengelilingi titik $(-1 + j 0)$.