

6. SALURAN TRANSMISI

6.1 Pendahuluan

Sinyal merambat dengan kecepatan terbatas. Hal ini menimbulkan waktu tunda ketika sinyal bergerak didalam saluran/interkoneksi. Jika digunakan sinyal sinusoidal, maka waktu tunda ini mengakibatkan pergeseran fasa negatif pada sinyaltersebut. Jika pergeseran fasanya signifikan, maka analisa saluran transmisi harus digunakan, karena sekarang interkoneksi akan memepengaruhi sinyal.

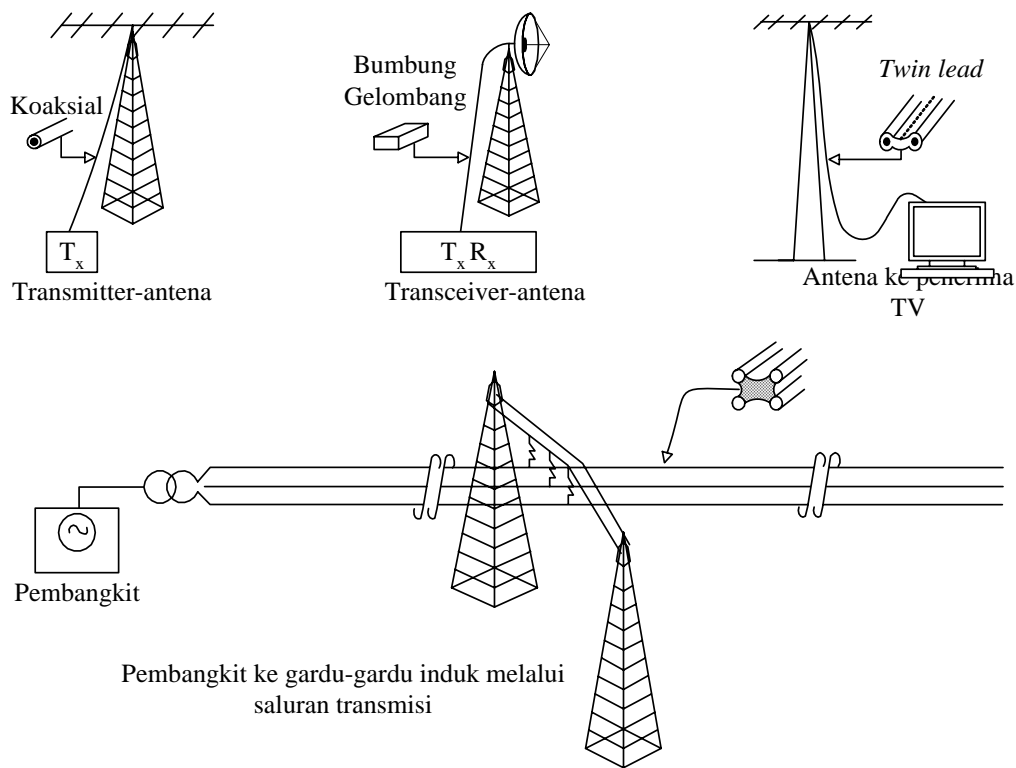
Gelombang disekitar saluran memiliki besaran-besaran yang dapat dianalogikan dengangelombang EM yang merambat didalam medium bebas, seperti yang terdaftar didalam Tabel 6.1 berikut ini.

Tabel 6.1 Analogi besaran-besaran EM dalam saluran dengan gelombang dalam medium bebas

Gelombang Elektromagnetik (dalam ruang bebas)	Rangkaian Elektrik (gelombang sekitar saluran)
\vec{E} [V / m] (medan listrik)	V [Volt] (tegangan)
\vec{H} [A/m] (medan magnet)	I [A] (arus)
\vec{P} [W/m ²] (rapat daya)	W [W] (daya)
Z_1 [Ω] (impedansi intrinsik)	Z_0 [Ω] (impedansi karakteristik)
$\gamma = \alpha + j\beta$; α [dB/m] atau α [Np/m] ; β [rad/m] (sama)	
$\Gamma = \Gamma e^{j\varphi}$ (sama)	
$S = SWR$ (sama)	

Saluran transmisi banyak dipakai dalam kehidupan sehari-hari, misalnya untuk menyalurkan sinyal yang diterima antenna ke pesawat TV, bumbung gelombang yang menyalurkan energi dari penguat RF ke antenna parabola dan jala-jala

listrik yang menyalurkan energi dari pembangkit ke rumah-rumah. Berbagai contoh penggunaan saluran ini dilukiskan dalam Gambar 6.1.



Gambar 6.1 Berbagai macam saluran transmisi

Pada kuliah sebelumnya konstanta fasa (β) untuk gelombang sinusoid dinyatakan sebagai

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v_p} \text{ rad/m} \tag{6.1}$$

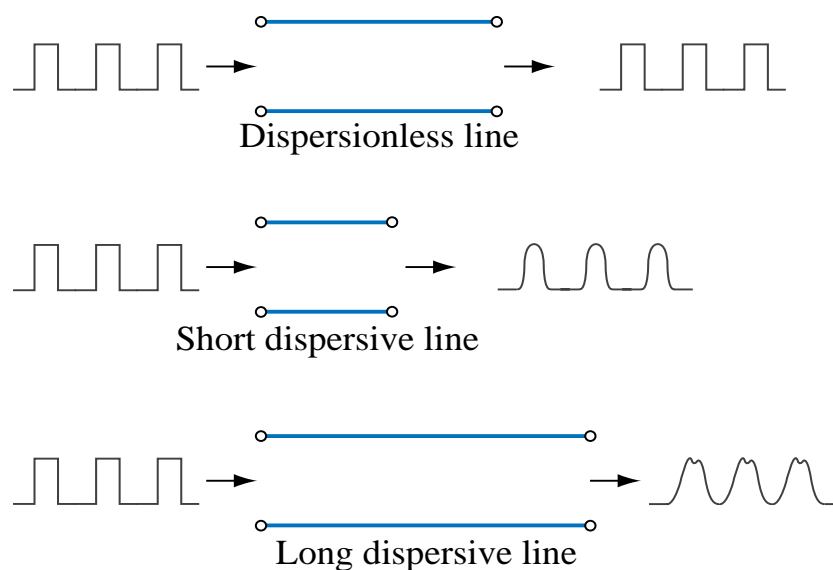
Maka, pergeseran fasa pada domain spasial sejauh l , adalah

$$\beta l = 2\pi \frac{l}{\lambda} \text{ radians} \tag{6.2}$$

Jadi ada ketergantungan antara pergeseran fasa ini dengan frekuensinya. Jika l/λ sangat kecil, pengaruh saluran transmisi bisa diabaikan (inilah yang terjadi pada analisa Rangk. Listrik). Sedangkan jika $l/\lambda \geq \sim 0.1$, makapengaruhnya perlu diperhitungkan.

6.2 Dispersi Dalam Saluran

Jika kecepatan fasa (atau, secara ekuivalen β) dari suatu saluran transmisi bergantung pada frekuensi, maka saluran ini disebut bersifat dispersif. Hal ini mengakibatkan distorsi pulsa, karena komponen frekuensi dari sinyal berjalan dengan kecepatan yang berlainan sepanjang saluran. Contoh saluran yang dispersif adalah: bumbung gelombang, serat optic, dan berbagai saluran transmisi yang tercetak (berbentuk *planar*) pada PCB/substrat, misalnya PCB didalam sirkuit komputer. Distorsi pulsa akibat disperse dilukiskan pada Gb. 6.2.



Gambar 6.2 Distorsi pulsa akibat dispersi saluran

6.3 Berbagai Mode dalam Saluran

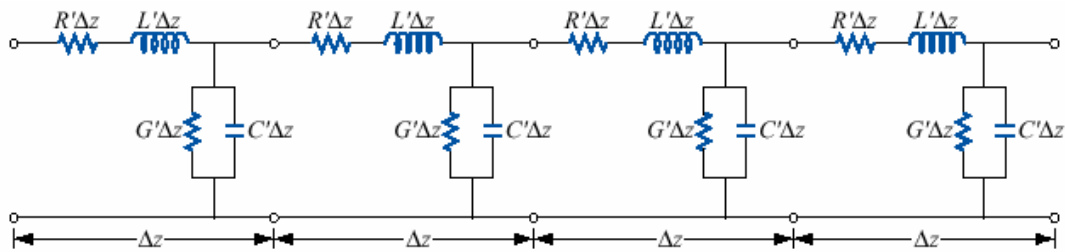
Dalam suatu saluran (mode) TEM (Transverse ElectroMagnetic), medan listrik dan medan magnet seluruhnya transversal terhadap arah perambatan. Pada umumnya diperlukan sedikitnya dua buah konduktor. Pada saluran transmisi orde-tinggi, gelombang memiliki setidaknya satu komponen medan pada arah perambatan. Pada pembahasan ini, kita hanya berurusan dengan saluran dengan mode TEM saja.

Suatu saluran dapat digambarkan sebagai kaskade dari rangkaian RLC, seperti diperlihatkan pada Gb.6.3. Notasi pada model ini memiliki arti sebagai berikut:

R' = tahanan persatuan panjang

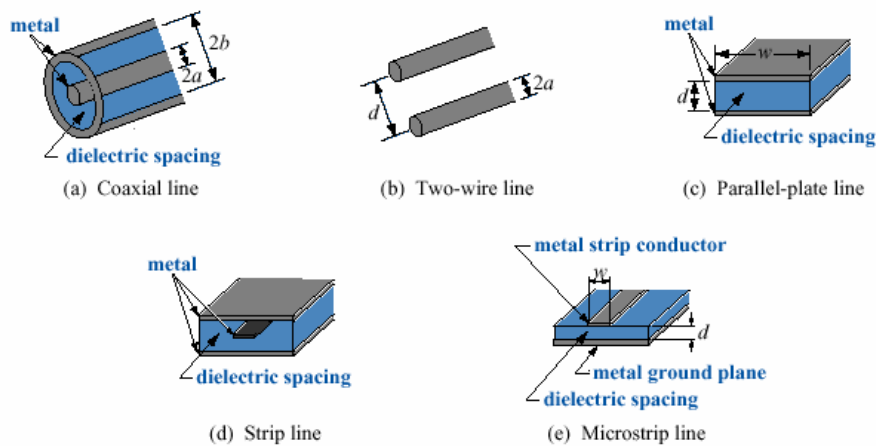
L' = induktansi persatuan panjang

G' = konduktansi persatuan panjang
 C' = kapasitansi persatuan panjang
 Δz = pertambahan/inkremensi panjang



Gambar 6.3 Saluran sebagai kaskade R-L-C elementer

Dengan menganalisa model rangkaian ini, kita bisa mendapatkan persamaan gelombang untuk tegangan dan arus disetiap titik pada saluran. Selanjutnya persamaan tersebut akan dipecahkan untuk kasus keadaan-tunak sinusoid (*sinusoidal steady-state*), sehingga diperoleh rumusan bagi solusi masalah yang lebih umum. Analisa saluran TEM ini akan mengantarkan ke berbagai konsep yang berhubungan dengan studi EM dan propagasi gelombang. Berbagai contoh saluran TEM diperlihatkan pada Gb.6.4.



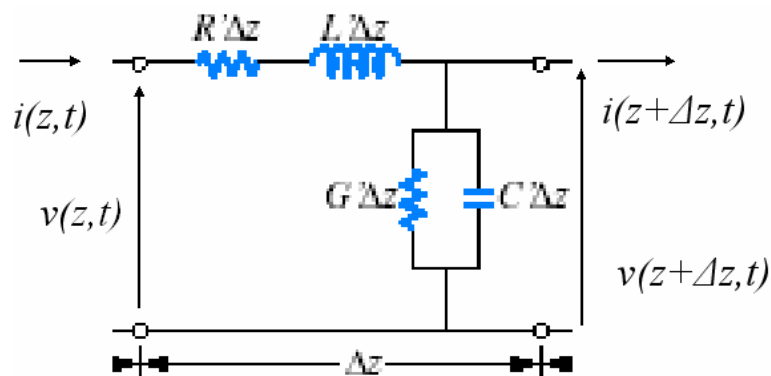
Gambar 6.4 Berbagai macam saluran TEM

Dari Gb 6.4 terlihat adanya variasi geometri dari berbagai saluran tersebut. Parameter-parameter saluran, R' , L' , G' , C' terkait erat dengan bentuk geometri

ini. Hubungan antara geometri dan parameter saluran diperlihatkan pada Tabel 6.2.

Tabel 6.2 Hubungan geometri dengan parameter saluran

	Coaxial	Two Wire	Parallel Plate	Unit
R'	$\frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$	$\frac{R_s}{\pi a}$	$\frac{2R_s}{w}$	Ω/m
L'	$\frac{\mu}{2\pi} \ln(b/a)$	$\frac{\mu}{\pi} \ln \left[(d/2a) + \sqrt{(d/2a)^2 - 1} \right]$	$\frac{\mu d}{w}$	H/m
G'	$\frac{2\pi\sigma}{\ln(b/a)}$	$\frac{\pi\sigma}{\ln \left[(d/2a) + \sqrt{(d/2a)^2 - 1} \right]}$	$\frac{\sigma w}{d}$	S/m
C'	$\frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)}$	$\frac{\pi\epsilon}{\ln \left[(d/2a) + \sqrt{(d/2a)^2 - 1} \right]}$	$\frac{\epsilon w}{d}$	F/m



Gambar 6.5 Potongan elementer saluran transmisi

Kita akan melakukan analisis pada suatu potongan elementer saluran (Gambar 6.5). Berdasarkan hubungan arus dan tegangan untuk saluran sepanjang Δz , dan dengan mengambil limit $\Delta z \rightarrow 0$:

$$-\frac{\partial v}{\partial z} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (6.3)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial z} = Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6.4)$$

Misalkan $v = V_m \cos \omega t = \text{Re}\{V_m e^{j\omega t}\} \equiv \bar{V}$, maka $\frac{d\bar{V}}{dt} = j\omega\bar{V}$. Dengan cara yang sama, fasor dari arus listrik dengan mendefinisikan $i \equiv \bar{I}$ akan diperoleh

$$-\frac{\partial \bar{V}}{\partial z} = R\bar{I} + L\frac{\partial \bar{I}}{\partial t} = (R + j\omega L)\bar{I} \quad (6.5)$$

$$-\frac{\partial \bar{I}}{\partial z} = G\bar{V} + C\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = (G + j\omega C)\bar{V} \quad (6.6)$$

Diferensiasi sekali lagi persamaan (6.5) terhadap z dan substitusi ke persamaan (6.6) akan menghasilkan

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial z^2} &= (R + j\omega L)(G + j\omega C)\bar{V} \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial z^2} &= \gamma^2 \bar{V} \end{aligned} \quad (6.7)$$

Dengan cara yang sama, untuk fasor arus listrik akan kita dapatkan

$$\frac{\partial^2 \bar{I}}{\partial z^2} = \gamma^2 \bar{I} \quad (6.8)$$

(6.7) dan (6.8) tidak lain adalah persamaan gelombang. Untuk fasor tegangan pada (6.7), kita memiliki solusi

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \bar{A}e^{-\gamma z} + \bar{B}e^{+\gamma z} \\ &= \bar{V}^+ + \bar{V}^- \end{aligned} \quad (6.9)$$

Dimana suku pertama ruas kanan menyatakan gelombang (tegangan) yang bergerak maju, sedangkan suku kedua menyatakan gelombang bergerak mundur.

Fasor arus dan fasor tegangan dihubungkan dengan suatu nilai impedansi, yang dalam hal ini adalah impedansi karakteristik Z_0

$$\bar{I}^+ = \frac{\bar{V}^+}{Z_o}, \text{ dan } \bar{I}^- = -\frac{\bar{V}^-}{Z_o} \quad (6.10)$$

Sehingga (6.8) memiliki solusi

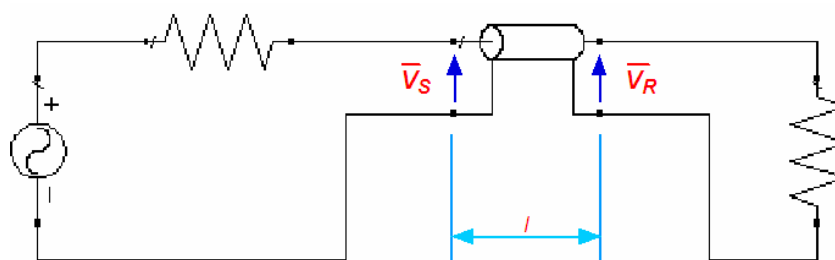
$$\bar{I} = \bar{I}^+ + \bar{I}^- = \frac{\bar{A}}{Z_o} e^{-\gamma z} - \frac{\bar{B}}{Z_o} e^{+\gamma z} \quad (6.11)$$

dimana γ adalah konstanta propagasi yang dapat dinyatakan dalam bentuk kompleks berikut ini

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \\ &= \alpha + j\beta \end{aligned} \quad (6.12)$$

dimana α adalah konstanta pelemahan (neper/m) dan β konstanta fasa (radian/m), dimana $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{u_p}$.

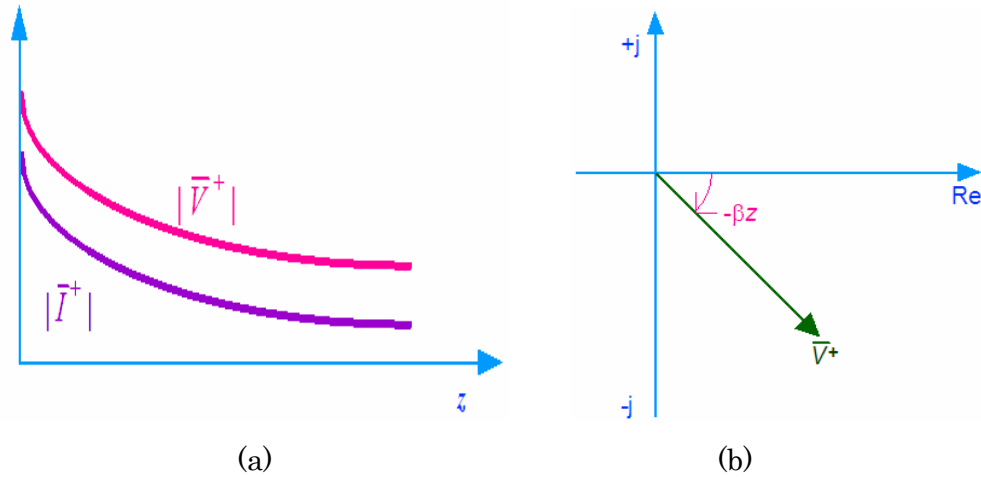
Konstanta pelemahan α terkait dengan rugi-rugi yang disebabkan oleh, rugi-rugi konduktor (yang biasanya meningkat dengan naiknya frekuensi akibat efek kulit / *skin effect*) dan rugi-rugi dielektrik/insulator.



Gambar 6.6 skema perhitungan rugi-rugi saluran

Gambar 6.6 menjelaskan perhitungan rugi-rugi yang dialami oleh gelombang ketika bergerak sepanjang satu potongan saluran. Misalkan $|\bar{V}_s| = |\bar{A}|$ di bagian

depan saluran, maka di ujung saluran akan berubah menjadi $|\bar{V}_R| = |\bar{A}|e^{-\alpha l}$. Pelemahan tegangan dan arus oleh faktor α dilukiskan pada Gambar. 6.7 (a).



Gambar 6.7 Pelemahan tegangan dan arus oleh faktor α

Faktor β berhubungan dengan pergeseran fasa sepanjang saluran transmisi karena waktu tunda yang disebabkan jarak z . Besar pergeseran ini adalah $\exp\{j\beta z\}$, seperti dilukiskan pada Gb 6.7(b). Kita tinjau kasus umum untuk saluran sepanjang l . Misalkan $\angle \bar{V}_S = \angle \bar{A}$ dan $\bar{V}_R = \bar{V}_S e^{-\gamma l} = \bar{V}_S e^{-\alpha l} e^{-j\beta l}$, maka sudut fasa di ujung saluran adalah $\angle \bar{V}_R = \angle \bar{V}_S - \beta l$. Selanjutnya, substitusi \bar{V}^+ , \bar{I}^+ menggunakan $\bar{V}^+ / \bar{I}^+ = Z_o$ akan menghasilkan

$$Z_o = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (6.13)$$

dari persamaan ini terlihat bahwa Z_o bernilai kompleks dan bergantung pada frekuensi. Pada $\omega = 0$, karena G' sangat kecil, maka nilai impedansi menjadi

$$Z_o = \sqrt{\frac{R'}{G'}} \rightarrow \infty \quad (\text{frekuensi rendah}) \quad (6.14)$$

Sebaliknya pada frekuensi tinggi, $\omega L' \gg R'$ dan $\omega C' \gg G'$

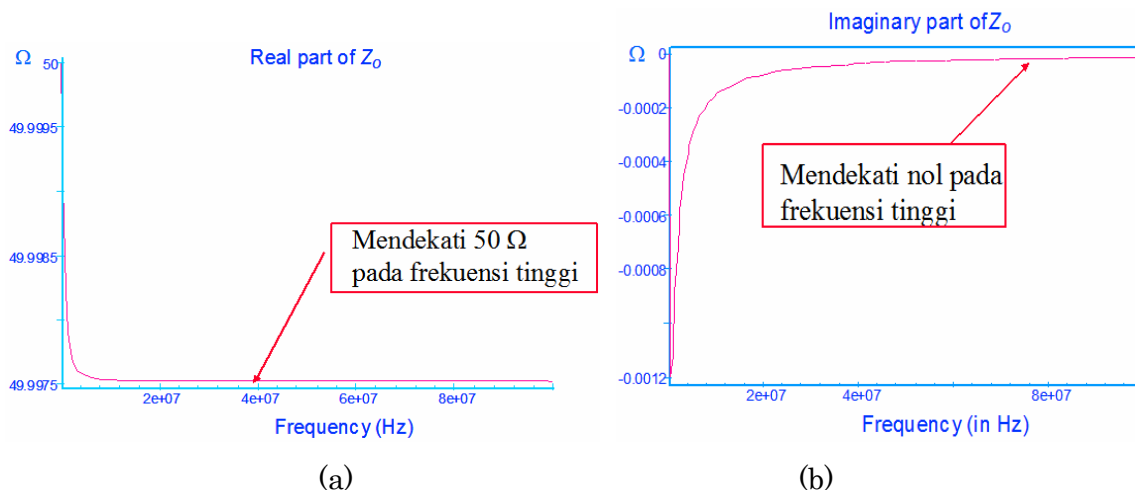
$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_o = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (\text{frekuensi tinggi}) \quad (6.15)$$

\

Sebagai contoh, tinjau kabel koaksial RG58-C/U dengan parameter berikut ini:

- R' = 1 W/m
- L' = 252 nH/m
- G' = 0.0004 S/m
- C' = 101 pF/m

Maka kurva dari impedansi Z_o terhadap frekuensi akan berbentuk seperti pada Gambar 6.8.



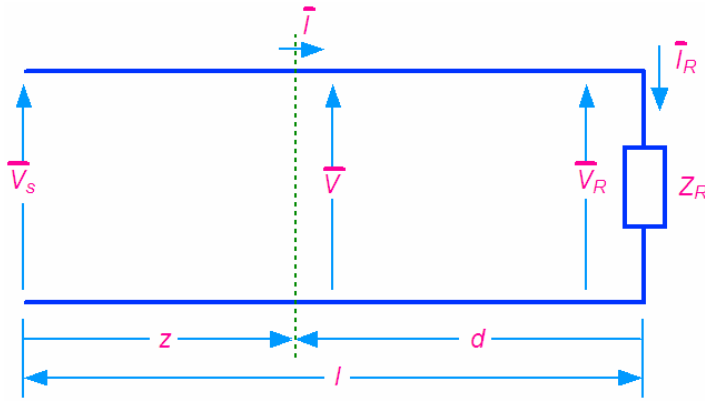
Gambar 6.8 Kurva Z_o terhadap frekuensi: (a) bagian riil dan (b) bagian imajiner

6.4 Pantulan Gelombang pada Saluran

Pada pembahasan sebelumnya telah dihasilkan formulasi perambatan tegangan dan arus dalam bentuk fasor, dan hubungan keduanya melalui impedansi yang dapat dituliskan kembali menjadi

$$\bar{V} = \bar{A}e^{-\gamma z} + \bar{B}e^{+\gamma z} \quad (6.16)$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{A}}{Z_o} e^{-\gamma z} - \frac{\bar{B}}{Z_o} e^{+\gamma z} = \frac{\bar{V}^+}{Z_o} - \frac{\bar{V}^-}{Z_o} \quad (6.17)$$



Gambar 6.9 Notasi pada analisis fasor di ujung saluran

Kita menggunakan diagram pada Gb. 6.9 untuk menganalisa fasor tegangan dan arus. Pada $z=l$, maka diperoleh nilai fasor tegangan dan arus sbb

$$\bar{V} = \bar{V}_R = \bar{A}e^{-\gamma l} + \bar{B}e^{+\gamma l} \quad (6.18)$$

$$\bar{I} = \bar{I}_R = \frac{\bar{A}}{Z_0}e^{-\gamma l} - \frac{\bar{B}}{Z_0}e^{+\gamma l} \quad \text{atau} \quad (6.19)$$

$$Z_0 \bar{I}_R = \bar{A}e^{-\gamma l} - \bar{B}e^{+\gamma l} \quad \text{dan juga} \quad (6.20)$$

$$\bar{V}_R = Z_R \bar{I}_R = \bar{A}e^{-\gamma l} + \bar{B}e^{+\gamma l} \quad (6.21)$$

Dua persamaan terakhir dapat dipecahkan secara serempak sehingga memberikan:

$$\bar{A} = \frac{\bar{I}_R}{2} [Z_R + Z_0] e^{+\gamma l} \quad (6.22)$$

$$\bar{B} = \frac{\bar{I}_R}{2} [Z_R - Z_0] e^{-\gamma l} \quad (6.23)$$

Selanjutnya substitusi persamaan untuk fasor A dan fasor B dan dengan menggunakan persamaan $d = l - z$, dengan d jarak dari beban ke ujung saluran, maka akan diperoleh

$$\bar{V} = \frac{\bar{I}_R}{2} [Z_R + Z_0] e^{+\gamma d} + \frac{\bar{I}_R}{2} [Z_R - Z_0] e^{-\gamma d} \quad (6.24)$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{I}_R}{2Z_0} [Z_R + Z_0] e^{+\gamma d} - \frac{\bar{I}_R}{2Z_0} [Z_R - Z_0] e^{-\gamma d} \quad (6.25)$$

Kedua persamaan tersebut dapat ditulis ulang menggunakan fungsi hiperbolik:

$$\cosh \gamma d = \frac{e^{\gamma d} + e^{-\gamma d}}{2}, \quad (6.26)$$

$$\sinh \gamma d = \frac{e^{\gamma d} - e^{-\gamma d}}{2} \quad (6.27)$$

sehingga menghasilkan

$$\bar{V} = \bar{I}_R [Z_R \cosh \gamma d + Z_O \sinh \gamma d] \quad \text{dan} \quad (6.28)$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{I}_R}{Z_O} [Z_O \cosh \gamma d + Z_R \sinh \gamma d] \quad (6.29)$$

Kita bisa mendefinisikan impedansi saluran sebagai nisbah dari tegangan saluran terhadap arus saluran pada jarak d dari beban:

$$Z = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = \frac{\bar{I}_R [Z_R \cosh \gamma d + Z_O \sinh \gamma d]}{\frac{\bar{I}_R}{Z_O} [Z_O \cosh \gamma d + Z_R \sinh \gamma d]}$$

yakni

$$Z = Z_O \left[\frac{Z_R + Z_O \tanh \gamma d}{Z_O + Z_R \tanh \gamma d} \right] \quad (6.30)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa impedansi Z berubah sepanjang saluran sebagai fungsi jarak d .

Pada praktek, kebanyakan saluran transmisi dapat dianggap tidak memiliki rugi-rugi (*lossless*). Hal ini terjadi karena $R' \ll \omega L'$ dan $G' \ll \omega C'$ sehingga bisa kita asumsikan $R' = G' = 0$. Akibatnya,

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{L'C'} \quad (\text{saluran tanpa rugi-rugi}) \quad (6.31)$$

sehingga konstanta pelemahan adalah $\alpha = 0$ dan konstanta fasa menjadi $\beta = \omega\sqrt{L'C'}$. Dengan demikian, impedansi akan berharga riil

$$Z_o = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (\text{saluran tanpa rugi-rugi}) \quad (6.32)$$

Berdasarkan definisi panjang gelombang dan kecepatan fasa pd pelajaran terdahulu kita peroleh:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{L'C'}} \quad \text{m} \quad (6.33)$$

$$u_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad \text{m/sec} \quad (6.34)$$

dan karena salurannya TEM, maka $L'C' = \epsilon\mu$, akibatnya

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad \text{rad/sec} \quad (6.35)$$

$$u_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad \text{m/sec} \quad (6.36)$$

Dalam persamaan sebelumnya, μ dan ϵ adalah, berturut-turut, permeabilitas magnetik dan permitivitas listrik dari bahan penyekat yang memisahkan konduktor saluran. Dalam praktek, bahan dipilih supaya

$$\mu = \mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (\text{non-feromagnetik})$$

$$= \epsilon_r \epsilon_o, \text{ dimana } \epsilon_o \cong [1/(36\pi)] \times 10^{-9} \text{ F/m}$$

Sehingga, panjang gelombang dalam saluran adalah:

$$\lambda = \frac{u_p}{f} = \frac{c}{f} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{panjang gelombang dalam saluran}) \quad (6.37)$$

dimana c adalah kecepatan cahaya dalam vakum (3×10^8 m/s) dan λ_o menyatakan panjang gelombang dalam medium bebas.

Selanjutnya, dari (6.30) dan mengingat tidak terjadi peredaman maka $\tanh(\gamma d) = \tanh(j\beta d) = j\tan(\beta d)$, sehingga

$$Z = Z_0 \left[\frac{Z_R + jZ_0 \tan \beta d}{Z_0 + jZ_R \tan \beta d} \right] \quad (6.38)$$

Formula ini juga dipakai untuk menghitung impedansi masukan dari saluran sepanjang d .

Impedansi Z adalah fungsi dari $\tan(\beta d)$, oleh karena itu nilai numerik dari Z akan berulang untuk nilai βd yang bertambah sebesar π , yakni

$$\beta d = 2\pi \frac{d}{\lambda} = n\pi, \quad n = 1, 2, \dots \quad (6.39)$$

atau setiap penambahan jarak sebesar $d = \frac{n\lambda}{2}$, $n = 1, 2, \dots$. Dengan kata lain, Z berulang setiap setengah panjang gelombang sepanjang saluran transmisi, mis. $Z(d=0) = Z(d=\lambda/2) = Z(d=\lambda)$ dst. Jadi Z bersifat siklis terhadap frekuensi.

Ada tiga kasus khusus yang perlu diketahui, yakni saluran hubung singkat, saluran terbuka dan beban *matched*. Untuk $Z_R = 0 \Omega$, yaitu saat ujung saluran dihubung-singkat, maka impedansi nya akan reaktif murni sebesar

$$Z = jZ_0 \tan \beta d \quad (\text{saluran hubung singkat}) \quad (6.40)$$

Untuk saluran terbuka, maka impedansi beban adalah $Z_R = \infty \Omega$, sehingga diperoleh impedansi yang juga reaktif murni sebesar

$$Z = -jZ_0 \cot \beta d \quad (\text{saluran terbuka}) \quad (6.41)$$

Sedangkan saat beban *matched* dengan impedansi saluran ($Z_R = Z_0$), maka

$$Z = Z_0 \quad (\text{saluran } \textit{matched}) \quad (6.42)$$

artinya bahwa Z konstan (bukan fungsi jarak maupun frekuensi) dan nilainya sama dengan Z_0 .

Telah kita ketahui bahwa untuk saluran tanpa rugi-rugi ada hubungan berikut

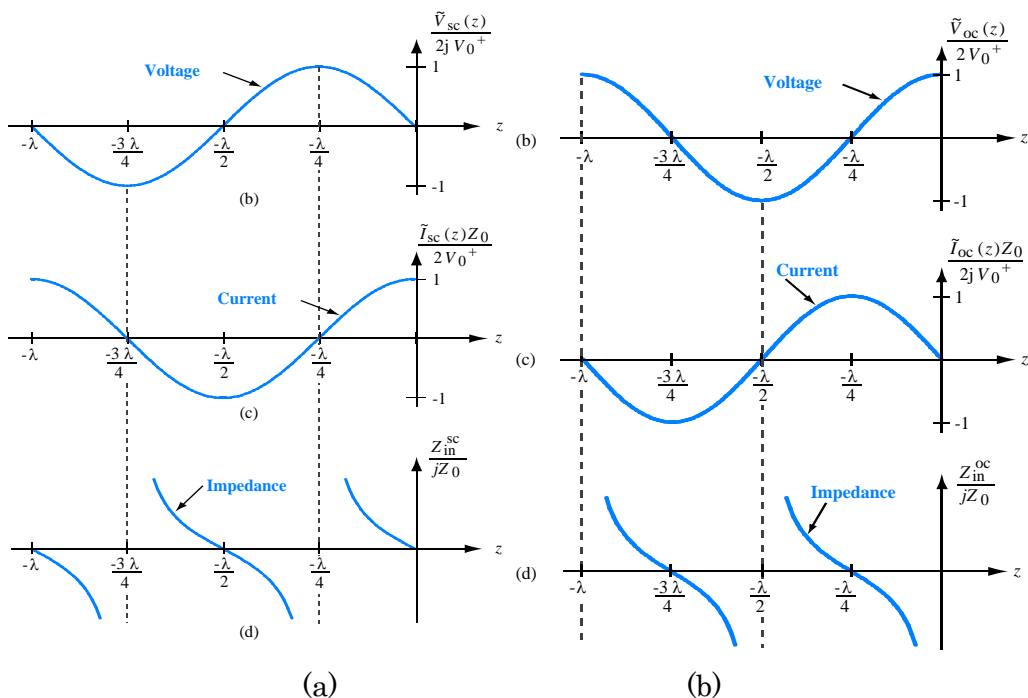
$$\cosh \gamma d = \cos \beta d \quad (6.43)$$

$$\sinh \gamma d = j \sin \beta d \quad (6.44)$$

substitusi keduanya ke persamaan fasor tegangan dan arus akan menghasilkan

$$\bar{V} = \bar{I}_R [Z_R \cos \beta d + jZ_0 \sin \beta d] \quad (6.45)$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{I}_R}{Z_0} [Z_0 \cos \beta d + jZ_R \sin \beta d] \quad (6.46)$$



Gambar 6.10 Kurva tegangan, arus dan impedansi dalam saluran
(a) hubung singkat dan (b) terbuka

Oleh karena itu, untuk saluran transmisi yang dihubung-singkat ($Z_R = 0\Omega$), maka:

$$\bar{V}_{sc} = \bar{I}_R [jZ_o \sin \beta d] \quad (6.47)$$

$$\bar{I}_{sc} = \bar{I}_R \cos \beta d \quad \text{dan} \quad (6.48)$$

$$Z_{sc} = jZ_o \tan \beta d \quad (6.49)$$

persamaan terakhir memperlihatkan bahwa impedansinya murni reaktif. Hubungan tegangan, arus dan impedansi dalam saluran hubung singkat diberikan pada kurva dalam Gb.6.10 (a).

Untuk saluran transmisi dengan ujung terbuka ($Z_R = \infty\Omega$):

$$\bar{V}_{oc} = \bar{I}_R [Z_R \cos \beta d] = \bar{V}_R \cos \beta d \quad (6.50)$$

$$\bar{I}_{oc} = \frac{\bar{I}_R}{Z_o} [jZ_R \sin \beta d] \quad (6.51)$$

$$Z_{oc} = -jZ_o \cot \beta d \quad (6.52)$$

Hubungan tegangan, arus dan impedansi dalam saluran hubung terbuka diberikan pada kurva dalam Gb.6.10(b).

6.5 Gelombang Berdiri

Gelombang berdiri (*standing wave*) terjadi karena sebagian dari gelombang yang dikirimkan kembali. Hal ini terjadi karena koefisien pantulan cukup besar akibat ketidaktepatan impedansi antara saluran dan beban. Tinjau fasor tegangan dan arus dalam saluran berikut ini

$$\tilde{V}(z) = V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z} \quad (6.53)$$

$$\tilde{I}(z) = \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z} \quad (6.54)$$

Kita juga punya relasi antara fasor tegangan yang berjalan maju dan mundur sebagai berikut

$$V_0^+ = \Gamma V_0^- \quad (6.55)$$

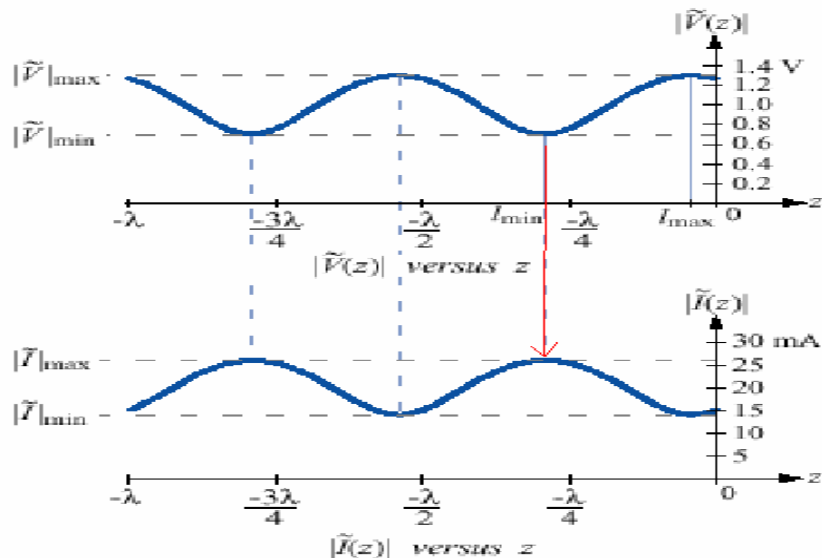
Akan kita hitung besarnya tegangan sebagai fungsi posisi sepanjang saluran transmisi.

$$|\tilde{V}(z)| = [\tilde{V}(z)\tilde{V}^*(z)]^{1/2}$$

Dari buku acuan diperoleh hasil penurunan:

$$|\tilde{V}(z)| = |V_0^+| \left[1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos(2\beta z + \theta_r) \right]^{1/2} \quad (6.56)$$

Perhatikan bahwa kita punya suku konstan $1 + |\Gamma|^2$ ditambah suku berubah, $\cos(\dots)$. Suku θ_r adalah sudut fasa dari koefisien pantulan.



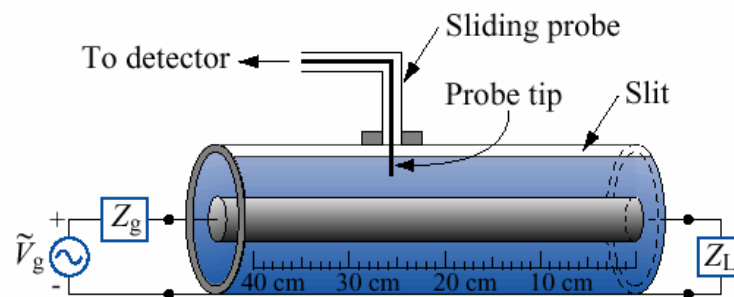
Gambar 6.11 Kurva magnitudo fasor tegangan pada daerah dekat perbatasan saluran-beban

Bisa diamati bahwa persamaan (6.56) menyatakan suatu suku konstan ditambah dengan fungsi kosinus. Maksima dan minima pada kurva dipisahkan jarak $\lambda/4$. Kurva dari (6.56) ditampilkan pada Gb.6.11 bagian bawah, sedangkan magnitudo dari fasor arus diperlihatkan pada bagian bawahnya. Sebagai contoh, untuk $Z_0 = 50\Omega$, $\Gamma = 0.3e^{j30^\circ}$ dan $|V_0^+| = 1$, akan diperoleh nilai perbandingan

magnitude tegangan maksimum terhadap minimumnya sebesar

$$S = \frac{\tilde{V}_{\max}}{\tilde{V}_{\min}} = \frac{1.3}{0.7} = 1.86.$$

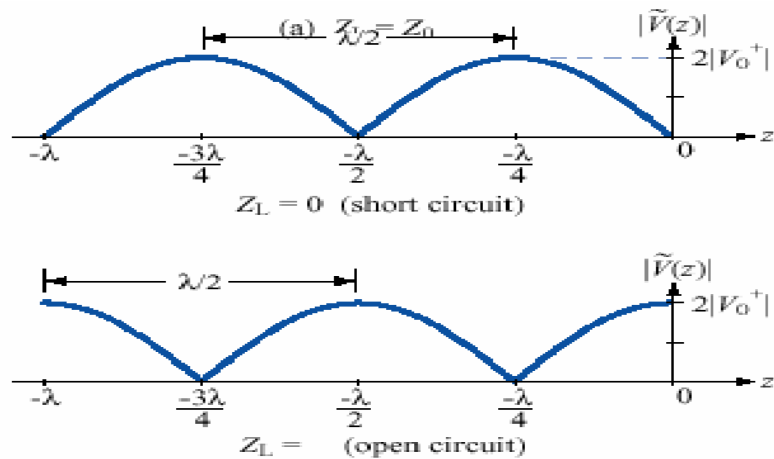
Nilai magnitudo tagangan dan arus adalah fungsi dari posisi. Pada maksima, gelombang datang dan g. pantul adalah se-fasa, yaitu, argumen dari kosinus ($2\beta z + \theta_r = -2n\pi$) sehingga kita pPeroleh magnitudo $(1 + |\Gamma|) |V_0^+| = 1.3$



Gambar 6.12 Saluran bercelah untuk pengukuran gelombang berdiri

Pada minima, terjadi interferensi yang saling menghapus, argumen kosinus menjadi $\{2\beta z + \theta_r = -2(n+1)\pi\}$, yakni, terjadi oposisi fasa dan kita peroleh magnitudo $(1 - |\Gamma|) |V_0^+| = 0.7$. Periode pengulangan gelombang berdiri adalah $\lambda/2$. Tetapi, jika tidak ada pantulan, maka tidak akan ada gelombang berdiri. Pengukuran tegangan sepanjang saluran dapat dilakukan apad saluran yang bercelah, seperti pada Gb 6.12. Pada kasus beban saluran hubung singkat dan saluran terbuka, kurva tersebut berubah dengan minimum yang lebih tajam, seperti dilukiskan pada Gambar 6.13.

Sekarang kita tahu bahwa saluran transmisi bisa mendukung keberadaan gelombang arus dan tegangan yang bergerak maju dan juga yang bergerak mundur. Gelombang-gelombang ini membentuk pola interferensi. Pada kasus saluran tanpa rugi-rugi, kita menyebutnya pola gelombang berdiri. Kita juga melihat bahwa impedansi saluran $Z = V/I$ berubah sepanjang saluran.



Gambar 6.12 Kurva magnitudo fasor tegangan gelombang berdiri pada kasus saluran hubung singkat (atas) dan saluran terbuka (bawah)

Kini, akan kita mengembangkan ekspresi umum untuk koefisien pantulan, dan menggunakannya untuk memahami interaksi antara gelombang maju dan gelombang mundur. Dengan mengidentifikasi komponen maju dan mundur, maka kita bisa menuliskan fasor tegangan maju dan mundur ini sebagai

$$\bar{V}^+ = \frac{\bar{I}_R}{2} [Z_R + Z_0] e^{+\gamma d} \quad (6.57)$$

$$\bar{V}^- = \frac{\bar{I}_R}{2} [Z_R - Z_0] e^{-\gamma d} \quad (6.58)$$

Kita definisikan koefisien pantulan sebagai nisbah gelombang berjalan maju (datang) dan mundur (terpantul):

$$\Gamma = \frac{\bar{V}^-}{\bar{V}^+} = \left(\frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} \right) e^{-2\gamma d} \quad (\text{koefisien pantulan}) \quad (6.59)$$

Pada umumnya koefisien ini bernilai kompleks dan bisa dituliskan sebagai $\Gamma = |\Gamma| \angle \theta$. Di sisi penerimaan (dimana $d=0$):

$$\Gamma_R = |\Gamma_R| \angle \theta_R = \frac{\bar{V}_R^-}{\bar{V}_R^+} \quad \text{atau}$$

$$\Gamma_R = \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} \quad (6.60)$$

Kombinasi dua persamaan tersebut (6.59) dan (6.60) akan menghasilkan

$$\Gamma = |\Gamma_R| e^{-2\alpha d} \angle(\theta_R - 2\beta d) \quad (6.61)$$

Terlihat bahwa, saat d meningkat, magnitudo koefisien refleksi berkurang (akibat rugi-rugi) dan ada pergeseran fasa negatif sebesar $2\beta d$ radian.

Untuk saluran tanpa rugi-rugi ($\alpha = 0$), fasor tegangan gelombang maju berbentuk

$$\bar{V}^+ = \frac{\bar{I}_R}{2} [Z_R + Z_0] e^{+j\beta d} = \bar{V}_R^+ e^{+j\beta d} \quad (6.62)$$

Sedangkan gelombang mundurnya adalah

$$\bar{V}^- = \frac{\bar{I}_R}{2} [Z_R - Z_0] e^{-j\beta d} = \bar{V}_R^- e^{-j\beta d} \quad (6.63)$$

Fasor tegangan total adalah

$$\bar{V} = \bar{V}_R^+ e^{+j\beta d} + \bar{V}_R^- e^{-j\beta d} = \bar{V}_R^+ e^{+j\beta d} \left\{ 1 + \frac{\bar{V}_R^-}{\bar{V}_R^+} e^{-j2\beta d} \right\} \quad (6.64)$$

tetapi karena $\bar{V}_R^+ e^{+j\beta d} = \bar{V}^+$ dan $\frac{\bar{V}_R^-}{\bar{V}_R^+} = \Gamma_R$, maka (6.64) akan menjadi

$$\bar{V} = \bar{V}^+ \{1 + \Gamma_R e^{-j2\beta d}\} = \bar{V}^+ \{1 + |\Gamma_R| \angle(\theta_R - 2\beta d)\} \quad (6.65)$$

dimana $\Gamma_R = |\Gamma_R| \angle\theta_R$. Persamaan (6.65) menunjukkan fasanya berubah terhadap d . Fasor arus diperoleh sebagai

$$\bar{I} = \bar{I}^+ \{1 - |\Gamma_R| \angle(\theta_R - 2\beta d)\} \quad (6.66)$$

disini terjadi perubahan tanda dari Γ karena $\bar{I} = -\bar{V} / Z_0$.

6.6 VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*)

VSWR memberikan gambaran keuntungan untuk sistem saluran transmisi dengan rugi-rugi. Besaran ini didefinisikan sebagai:

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} \quad (6.67)$$

dimana $V_{\max} = |\bar{V}^+| + |\bar{V}^-|$ dan $V_{\min} = |\bar{V}^+| - |\bar{V}^-|$. Dengan manipulasi aljabar kita dapatkan

$$VSWR = \frac{|\bar{V}^+| + |\bar{V}^-|}{|\bar{V}^+| - |\bar{V}^-|} = \frac{1 + |\bar{V}^-|/|\bar{V}^+|}{1 - |\bar{V}^-|/|\bar{V}^+|}$$

jadi, definisinya adalah

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (6.68)$$

Tetapi, untuk saluran dng rugi-rugi, maka $|\Gamma| = |\Gamma_R|$, sehingga

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma_R|}{1 - |\Gamma_R|} \quad (\text{saluaran dng rugi-rugi}) \quad (6.69)$$

Yang perlu diingat juga, karena $|\Gamma| \leq 1$, maka nilai SWR adalah $1 \leq VSWR < \infty$, yakni selalu lebih besar dan sama dengan 1.

Sebagai contoh, terminasi saluran terbuka ($Z_R = \Omega \infty$):

$$|\Gamma_R| = \lim_{Z_R \rightarrow \infty} \left| \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} \right| = 1 \Rightarrow VSWR = \infty$$

Untuk $Z_R = Z_0/3$

$$|\Gamma_R| = \frac{Z_0/3 - Z_0}{Z_0/3 + Z_0} = \frac{-2/3}{4/3} = 0.5 \Rightarrow VSWR = 3$$

Hubungan $VSWR$ dan $|\Gamma_R|$ untuk saluran tanpa rugi-rugi:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma_R|}{1 - |\Gamma_R|} \quad \text{dan} \quad (6.70)$$

$$|\Gamma_R| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (6.71)$$

Jadi, jika tahu yang nilai salah satu, maka yang lainnya dapat ditentukan.

6.7 Smith Chart

Sudah kita lihat bersama, banyak kuantitas fisik didalam analisis saluran transmisi yang memiliki nilai kompleks, misalnya koefisien pantulan

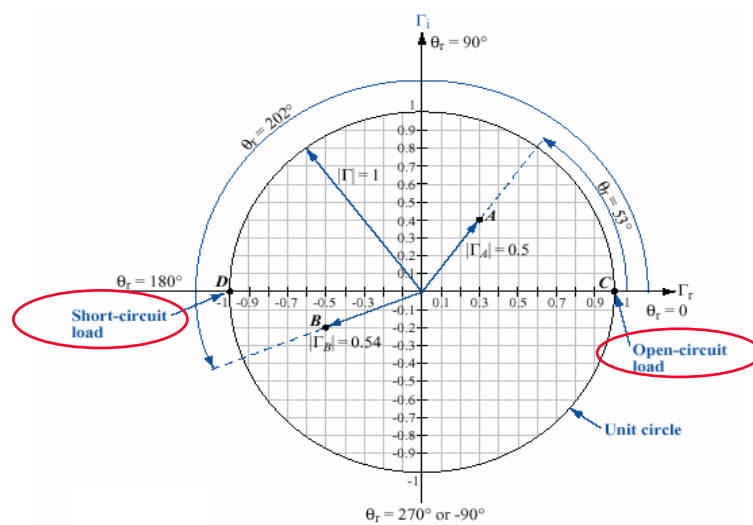
$$\Gamma = |\Gamma| e^{j\theta_r} = \Gamma_r + j\Gamma_i \quad (6.72)$$

Dengan demikian, kita bisa membuat grafik koefisien pantulan dalam bidang kompleks Γ , seperti diperlihatkan pada Gambar 6.13. Komponen riil dan imajiner nya adalah

$$\Gamma_r = |\Gamma| \cos \theta_r \quad (\text{komponen riil}) \quad (6.73)$$

$$\Gamma_i = |\Gamma| \sin \theta_r \quad (\text{komponen imajiner})$$

$$(6.74)$$



Gambar 6.13 Koefisien pantul digambarkan pada bidang kompleks

Kita perlu menyatakan hubungan antara impedansi dengan koefisien pantulan. Pertama-tama kita normalisasikan semua nilai impedansi terhadap impedansi karakteristik saluran:

$$z = \frac{Z}{Z_0} \quad (6.75)$$

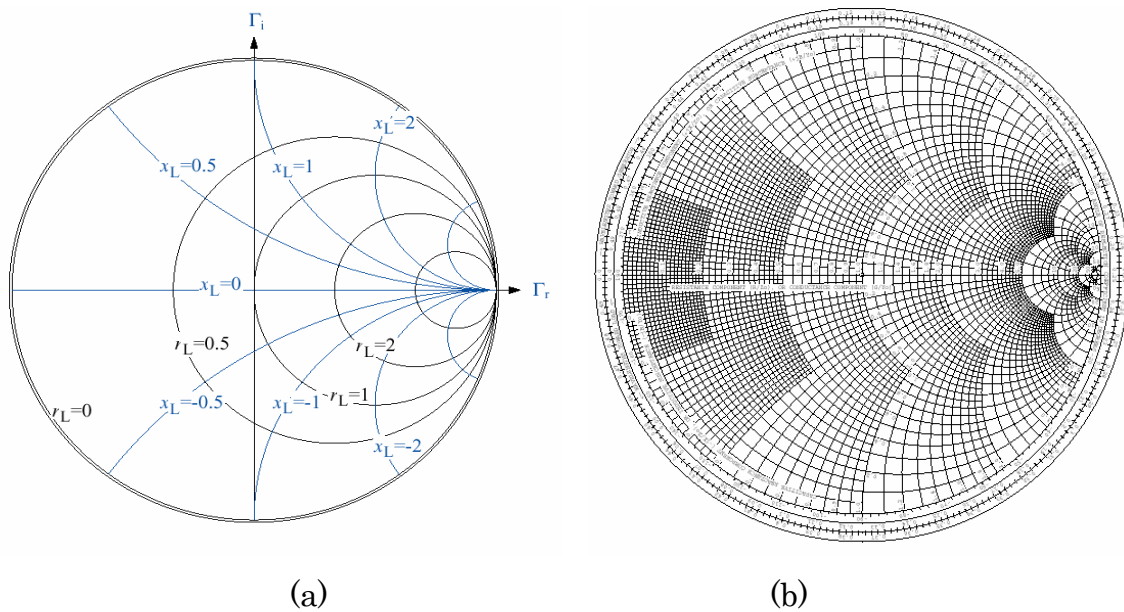
misalnya impedansi beban menjadi

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} \quad (6.76)$$

Untuk impedansi Z_R , maka koefisien pantul dinyatakan sebagai

$$\Gamma = \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0} = \frac{Z_R/Z_0 - 1}{Z_R/Z_0 + 1} = \frac{z_R - 1}{z_R + 1} \quad (6.77)$$

$$\Leftrightarrow z_R = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (6.78)$$



Gambar 6.14 Smith Chart: (a) sederhana dan (b) lengkap

Karena impedansi ternormalisasi bisa ditulis sebagai

$$z_R = r_R + jx_R \quad (6.79)$$

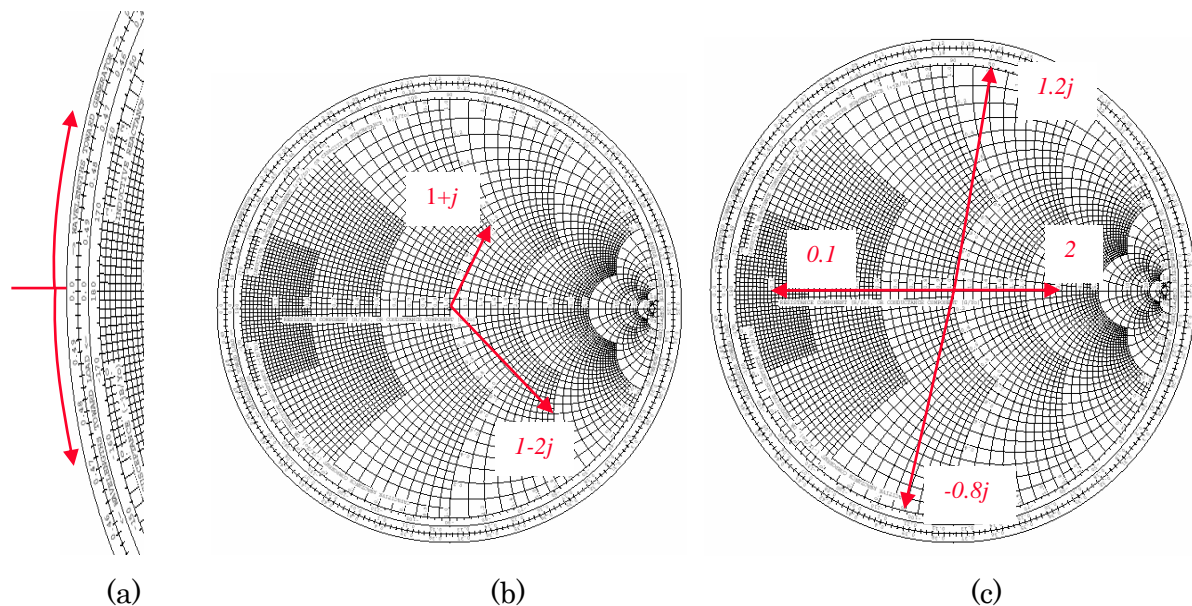
Kita samakan (6.79) dng (6.782) dengan menggunakan bagian riil an imajiner dari (6.72). sehingga diperoleh:

$$r_R + jx_R = \frac{(1 + \Gamma_R) + j\Gamma_i}{(1 - \Gamma_R) - j\Gamma_i} \quad (6.80)$$

Lalu kita bisa memecahkan r_R dan x_R dalam Γ . Sekumpulan grafik untuk semua solusi yang mungkin dari persamaan ini membentuk sebuah Smith Chart (Gb.6.14).

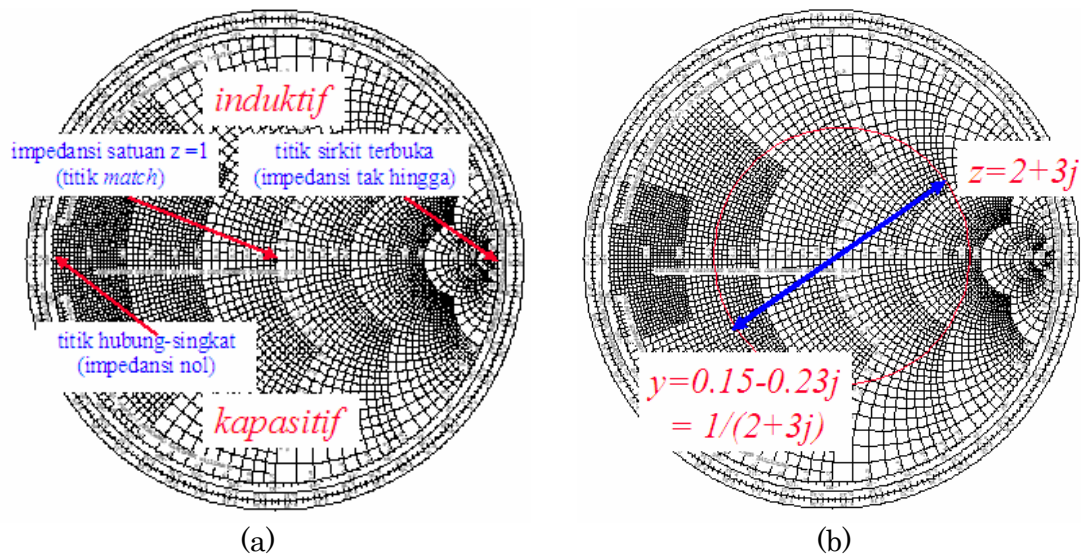
Smith chart adalah kurva polar dari Γ , dengan kontur bagian riil dan imajiner dari z ditumpang-tindih-kan di bagian atas. Hal ini memungkinkan konversi yang mudah antara impedansi ternormalisasi z dengan Γ . Skala radial sepanjang lingkaran luar dinyatakan dalam panjang gelombang. Hal ini bertujuan untuk menentukan panjang saluran.

Smith chart dipakai secara luas di buku acuan untuk memetakan impedansi sebagai fungsi frekuensi. Ada dua buah skala di pinggir (Gb.6.15 (a)) dinyatakan dalam panjang gelombang, satu ke arah generator (searah putaran jarum jam) dan satu lagi ke arah beban (berlawanan arah putaran jarum jam). Perhatikan juga bahwa satu putaran penuh setara dengan panjang $\lambda/2$.



Gambar 6.15 (a) dua skala di pinggir Smith Chart, (b) daerah induktif dan kapasitif, dan (c) impedansi riil murni dan imajiner murni

Pada Smith Chart, semua impedansi di separuh bagian atas bersifat induktif, misalnya $1+j$. Sebaliknya, semua impedansi di separuh bagian bawah bersifat kapasitif, misalnya $1-2j$. Hal ini ditunjukkan pada Gb.6.15 (b). Impedansi riil murni berada sepanjang garis tengah mendatar dan impedansi imajiner murni berada sepanjang tepian *chart*, seperti ditunjukkan pada Gb.6.15 (c).

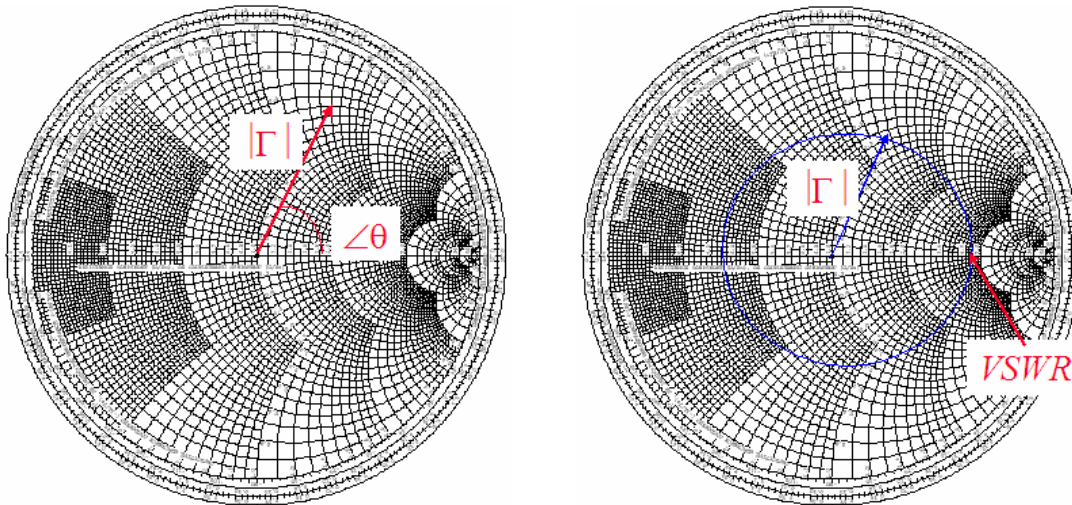


Gambar 6.16(a) lokasi titik-titik penting lainnya dalam Smith Chart, (b) konversi admitansi \leftrightarrow impedansi

Sebarang titik hasil refleksi melewati titik pusat akan mengubah admitansi (y) menjadi impedansi (z) dan demikian pula sebaliknya, seperti ditampilkan pada Gb.6.16.(b). Belahan atas berkaitan dengan reaktansi induktif atau susceptansi kapasitif, dan Belahan bawah berhubungan dengan reaktansi kapasitif atau susceptansi induktif.

Koefisien refleksi bernilai sebanding dengan panjang vektor radial pada chart. Panjang vektor radial ke pinggir berhubungan dengan $|\Gamma| = 1$. Sudut fasa dari koefisien pantulan diukur dari arah positif dari sumbu mendatar (Gb.6.17(a)). VSWR berhubungan dengan letak perpotongan rotasi dari koefisien pantulan

dengan sumbu riil +ve, seperti diperlihatkan pada Gb.6.17.(b), dan VSWR harus selalu ≥ 1 .



Gambar 6.17 (a) Koefisien refleksi dan (b) VSWR

Contoh: Diberikan impedansi beban (ternormalisasi) $Z_L = 2+3j$. Tentukan koefisien pantulan dan VSWR pada beban.

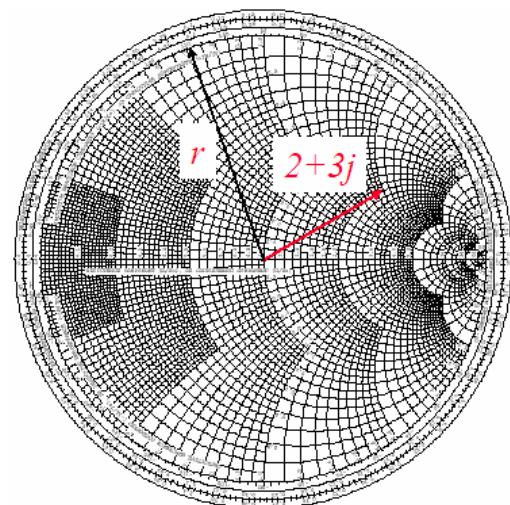
(a) Secara analitik

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{(2+3j-1)}{(2+3j+1)} = \frac{1+3j}{3+3j} = 0.667 + j0.333 = 0.745 \angle 26.5^\circ$$

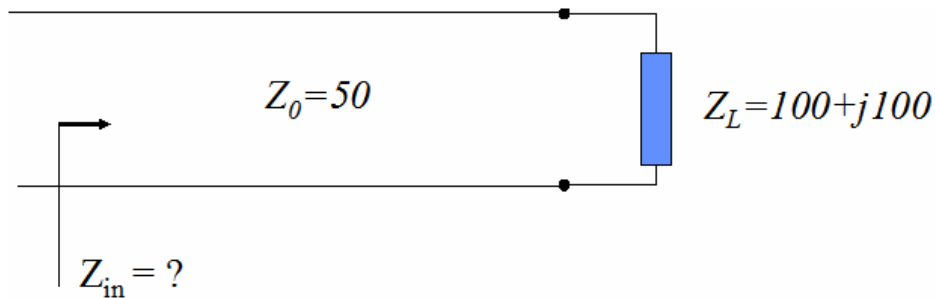
$$\text{Maka, } VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = \frac{1+0.745}{1-0.745} = 6.84$$

(b) Dengan Smith Chart

1. Tentukan titik (2+3j)
2. Ukur panjang garis
3. Ukur panjang jejari
4. nisbah dr (2):(3) menghasilkan $|\Gamma| = 0.745$
5. Ukur sudut (2+3j), dihasilkan 26.5 derajat
6. putar (2+3j) pada lingkaran kearah +ve sumbu riil, terbaca VSWR = 6.9

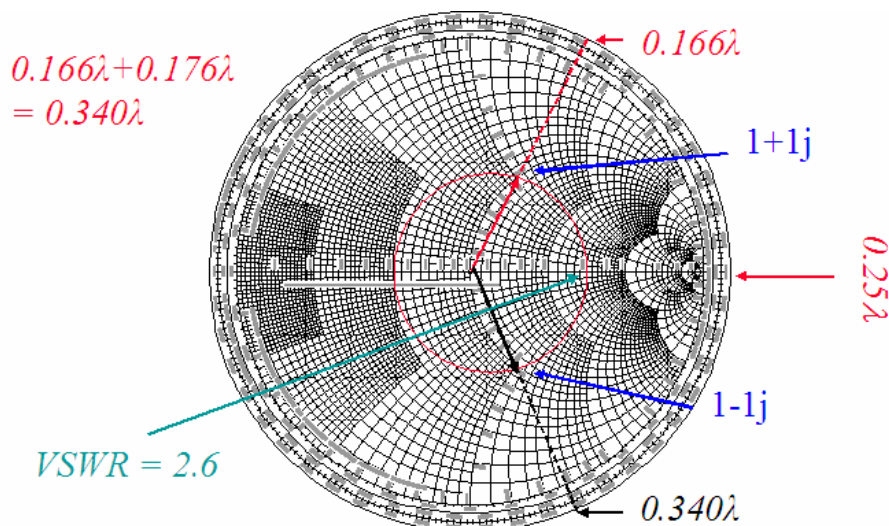


Contoh: rugi-rugi dengan parameter: $Z_0=100\Omega$. $Z_L=100+j100$, panjang saluran = 0.676λ



Jawab: Perhatikan bahwa panjang ternormalisasi $> \lambda/2$. Karena satu putaran penuh pada chart setara dengan setengah panjang gelombang, impedansi masukan berulang setiap $\lambda/2$. Kita dapat menuliskan $\ell = 0.676 \lambda = 0.5\lambda + 0.176\lambda$. Berikutnya, normalisasikan impedansi beban

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{100 + j100}{100} = 1 + j1$$



Tentukan lokasi titik ini pada chart dan kemudian gerakkan titik tsb ke arah generator (searah putaran jarum jam) 0.167λ , impedansi pada titik yg baru adalah $z_{in}=1-j1$, denormalisasi memberikan, $Z_{in}=100-j100$

6.8 Penyesuaian Impedansi

Telah kita lihat bahwa saluran transmisi dapat mendukung gelombang dan arus yang bergerak maju maupun mundur. Dalam Rekayasa Telekomunikasi, kita menaruh perhatian besar pada penyaluran energi (biasanya sinyal yang memuat informasi) dari satu titik ke titik yang lain (mis. dari satelit ke stasiun bumi). Dalam kuliah ini, kita akan menguji aliran daya yang dibawa gelombang maju (jatuh) dan mundur (pantul), dan melihat cara memaksimalkan energi yang dikirim ke titik beban terminasi. Pembahasan akan dibatasi hanya untuk saluran tak merugi (*lossless*).

Eksresi berikut ini dapat kita turunkan untuk tegangan dan arus jatuh maupun pantul pada jarak d ke arah belakang titik terminasi, dan juga dari definisi koefisien pantul

$$\bar{V}^- = \bar{V}_R^+ e^{j\beta d} \quad (6.81.a) \qquad \bar{I}^+ = \frac{\bar{V}^+}{Z_0} \quad (6.81.b)$$

$$\bar{V}^- = \Gamma \bar{V}^+ \quad (6.82.a) \qquad \bar{I}^- = -\Gamma \frac{\bar{V}^+}{Z_0} \quad (6.82.b)$$

Pada terminasi, $d=0$, sehingga ekspresi sebelumnya dapat disederhanakan:

$$\bar{V}^+ = \bar{V}_R^+ \qquad \bar{I}^+ = \frac{\bar{V}_R^+}{Z_0}$$

$$\bar{V}^- = \Gamma_R \bar{V}_R^+ \qquad \bar{I}^- = -\Gamma_R \frac{\bar{V}_R^+}{Z_0}$$

Daya jatuh sesaat yang dibawa gelombang jatuh *saat tiba pada titik* terminasi, dihitung sebagai:

$$\begin{aligned} P_R^+(t) &= v_R^+(t) \times i_R^+(t) = \text{Re} \left\{ \bar{V}_R^+ e^{j\omega t} \right\} \times \text{Re} \left\{ \bar{I}_R^+ e^{j\omega t} \right\} \\ &= \text{Re} \left\{ \left| \bar{V}_R^+ \right| \angle \phi_R^+ e^{j\omega t} \right\} \times \text{Re} \left\{ \frac{\left| \bar{V}_R^+ \right|}{Z_0} \angle \phi_R^+ e^{j\omega t} \right\} \end{aligned}$$

$$= |\bar{V}_R^+| \cos(\omega t + \phi_R^+) \times \frac{|\bar{V}_R^+|}{Z_0} \cos(\omega t + \phi_R^+)$$

sehingga
$$P_R^+(t) = \frac{|\mathbf{V}_R^+|^2}{Z_0} \cos^2(\omega t + \phi_R^+) \text{ Watts} \quad (6.83)$$

Selanjutnya, Daya sesaat yang dibawa oleh gelombang pantul *saat meninggalkan titik terminasi*, dengan mengingat $\Gamma_R = |\Gamma_R| \angle \theta_R = |\Gamma| \angle \theta_R$, dihitung sbb:

$$\begin{aligned} P_R^-(t) &= v_R^-(t) \times i_R^-(t) = \text{Re} \{ \bar{V}_R^- e^{j\omega t} \} \times \text{Re} \{ \bar{I}_R^- e^{j\omega t} \} \\ &= \text{Re} \left\{ |\Gamma| |\bar{V}_R^+| \angle (\phi_R^+ + \theta_R) e^{j\omega t} \right\} \times \text{Re} \left\{ -|\Gamma| \frac{|\bar{V}_R^+|}{Z_0} \angle (\phi_R^+ + \theta_R) e^{j\omega t} \right\} \\ &= |\Gamma| |\bar{V}_R^+| \cos(\omega t + \phi_R^+ + \theta_R) \times \left[-|\Gamma| \frac{|\bar{V}_R^+|}{Z_0} \cos(\omega t + \phi_R^+ + \theta_R) \right] \end{aligned}$$

sehingga:
$$P_R^-(t) = -|\Gamma|^2 \frac{|\bar{V}_R^+|^2}{Z_0} \cos^2(\omega t + \phi_R^+ + \theta_R) \text{ Watts} \quad (6.84)$$

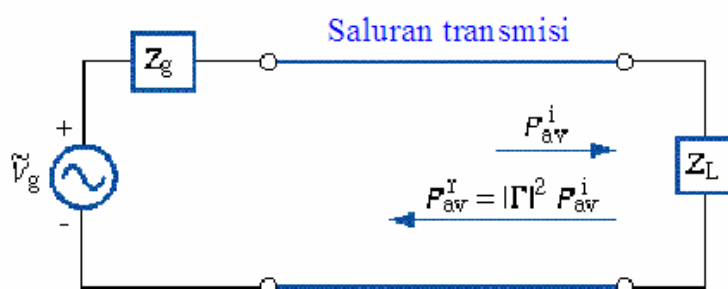
Dalam praktek, kita lebih tertarik pada daya rata-rata yang mengalir sepanjang saluran daripada daya sesaat. Kita dapat menghitung daya rata-rata menggunakan pendekatan kawasan waktu atau kawasan fasor yang lebih sederhana. Selanjutnya kita pertimbangkan kedua metoda tersebut untuk dibandingkan. Kita perlu merata-ratakan daya jatuh sesaat selama satu perioda waktu $T = 1/f = 2\pi/\omega$.

$$P_{av}^+ = \frac{1}{T} \int_0^T P_R^+(t) dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left[\frac{|\bar{V}_R^+|^2}{Z_0} \cos^2(\omega t + \phi_R^+) \right] dt$$

sehingga:
$$P_{av}^+ = \frac{|\bar{V}_R^+|^2}{2Z_0} \text{ Watts} \quad (6.85)$$

Faktor $\frac{1}{2}$ datang dari integrasi suku \cos^2 . Perata-rataan daya pantul sesaat untuk satu perioda waktu $T = 1/f = 2\pi/\omega$ menghasilkan

$$P_{av}^- = \frac{1}{T} \int_0^T P_R^-(t) dt = -|\Gamma|^2 \frac{|\bar{V}_R^+|^2}{2Z_0}$$



Selanjutnya, daya rata-rata netto yang terkirim ke titik terminasi menjadi

$$P_{av,term} = P_{av}^+ + P_{av}^- = \frac{|\bar{V}_R^+|^2}{2Z_0} [1 - |\Gamma|^2] \text{ Watts}$$

sehingga: $P_{av}^- = -|\Gamma|^2 P_{av}^+ \text{ Watts}$ (6.86)

Untuk sebarang gelombang yang merambat dengan fasor tegangan dan fasor arus, daya rata-rata-waktu yang dibawa oleh gelombang ini adalah:

$$P_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}\{\bar{V}I^*\} \tag{6.87}$$

dengan $(\cdot)^*$ melambangkan operasi konjugasi kompleks. Perhatikan bahwa nilai ini adalah daya rata-rata yang dibawa gelombang. Untuk saluran tak merugi, daya ini akan seragam di semua titik sepanjang saluran. Dengan demikian, daya jatuh adalah:

$$P_{av}^+ = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\bar{V}_R^+ \left(\frac{\bar{V}_R^+}{Z_0} \right)^* \right] = \frac{|\bar{V}_R^+|^2}{2Z_0} \quad (6.88)$$

Ini sama dengan persamaan yang diperoleh dari pendekatan kawasan waktu. Perhatikan pula bahwa Z_0 bernilai riil karena saluran tidak merugi.

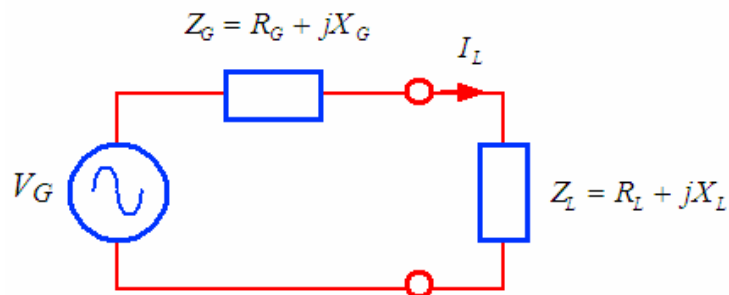
Sedangkan daya yang dipantulkan adalah:

$$P_{av}^- = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\Gamma_R \bar{V}_R^+ \left(-\Gamma_R \frac{\bar{V}_R^+}{Z_0} \right)^* \right] = -|\Gamma|^2 \frac{|\bar{V}_R^+|^2}{2Z_0} \quad (6.89)$$

Ini sama dengan persamaan yang diperoleh dengan pendekatan kawasan waktu. Perhatikan pula bahwa Z_0 bernilai riil karena saluran tidak merugi.

6.9 Alih Daya Maksimum

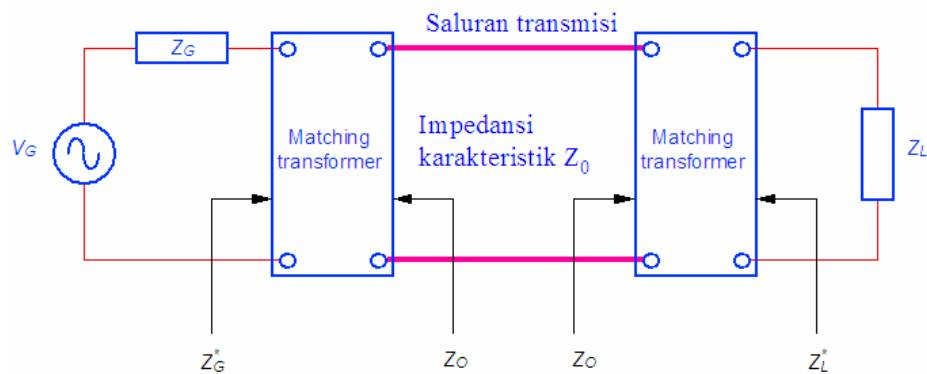
Dari teori rangkaian alih daya maksimum terjadi saat impedansi beban adalah konjugasi kompleks dari impedansi generator, yakni:



Gambar 6.18 Diagram alih daya sumber-ke-beban

dimana $R_L = R_G$ dan $X_L = -X_G$. Didalam saluran transmisi, matching harus dilakukan baik dari generator ke saluran dan dari saluran ke generator, seperti diperlihatkan pada Gb.6.19. Pada kasus demikian, Z_0 bernilai riil, dan impedansi disetiap titik adalah konjugasi dari impedansi yang terlitat dari arah sebaliknya. Dalam praktek, generator sinyal RF yang ada di pasaran dan penguat daya memiliki impedansi keluaran baku yang berhubungan erat dengan Z_0 dari saluran yang diproduksi. Sebagai contoh, RF umum dan

gelombang mikro memiliki impedansi 50Ω , TV dengan impedansi 75Ω dan untuk telefoni dipakai impedansi 600Ω . Dengan demikian, hanya beban saja yang perlu di-*match*-kan.



Gambar 6.19, Diagram *matching* impedansi dalam saluran transmisi

Ada beberapa cara untuk melakukan matching impedansi. Pada frekuensi RF biasanya digunakan transformator inti-besi, atau komponen L dan C. Pada frekuensi UHF dan gelombang mikro, potongan-potongan saluran transmisi digunakan, seperti: transformator seperempat-gelombang, penala *stub*-tunggal dan *stub*-ganda, dan *taper* eksponensial. Teknologi yang dipilih selalu merupakan teknologi yang memberikan kinerja terbaik dan biaya termurah.