

II SALURAN TRANSMISI

1. UMUM

Saluran transmisi mempunyai empat parameter yang mempengaruhi kemampuan untuk berfungsi sebagai bagian dari suatu sistem tenaga yaitu: resistensi, induktansi, kapasitansi dan konduktansi.

Keuntungan dari transmisi dengan tegangan yang lebih tinggi ialah meningkatkan kemampuan transmisi dari suatu saluran transmisi (Transmission capability). Kemampuan ini biasanya dinyatakan dalam megavolt ampere (MVA), kemampuan transmisi juga dipengaruhi oleh limit thermal dari penghantar, tegangan jatuh (voltage drop) yang diperbolehkan, keandalan, dan persyaratan kestabilan sistem.

2. JENIS-JENIS PENGHANTAR

Pada masa awal dari transmisi sistem tenaga listrik penghantar terbuat dari tembaga, setelah ilmu logam

mengalami kemajuan, ternyata alumunium menggantikan kedudukan tembaga karena alumunium lebih murah, lebih ringan untuk suatu resistensi yang sama.

Untuk suatu resistensi yang sama alumunium mempunyai diameter yang lebih besar bila dibandingkan dengan tembaga, tetapi hal ini lebih menguntungkan sebab garis fluk listrik dari penghantar akan lebih berjauhan satu dengan yang lain untuk tegangan yang sama, sehingga timbulnya corona sedikit berkurang.¹⁾

Jenis-jenis penghantar alumunium beserta lambang-lambangnyanya adalah sebagai berikut:

- AAC = All Aluminium Conductors, seluruhnya terbuat dari alumunium
- AAAC = All Aluminium Alloy Conductors, seluruhnya terbuat dari campuran alumunium
- ACSR = Aluminium Conductors Steel Reinforced, penghantar alumunium yang diperkuat dengan baja
- ACAR = Aluminium Conductors Alloy Reinforced, penghantar alumunium yang diperkuat dengan logam campuran

Penghantar yang terbuat dari campuran alumunium mempunyai kekuatan tarik yang lebih besar daripada

1) William D., Stevenson, Jr. "Analisis Sistem Tenaga Listrik", Erlangga, Jakarta 1983, p. 43.

penghantar alumunium biasa.

ACSR terdiri dari inti serat baja ditengah, dikelilingi oleh lapisan-lapisan serat alumunium.

ACAR mempunyai inti ditengah yang terbuat dari alumunium berkekuatan tinggi yang dikelilingi oleh lapisan lapisan penghantar alumunium biasa.

Suatu penghantar yang dikenal dengan nama ACSR diperluas (expaded ACSR), mempunyai semacam pengisi biasanya kertas yang memisahkan serat baja ditengah dan serat alumunium yang diluar. Tujuan pengisian kertas disini ialah agar diameter penghantar lebih besar sehingga gejala terjadinya corona dapat berkurang.

Pada saluran EHV jenis ACSR yang diperluas inilah yang paling banyak digunakan, sedang Kontruksi penghantarnya menggunakan penghantar berkas, berkas ini dapat terdiri dari dua, tiga atau empat penghantar. Dengan menggunakan dua atau lebih konduktor perfasa yang disusun berdekatan, maka gradien tegangan tinggi pada penghantar dalam daerah EHV dapat banyak dikurangi sehingga kemungkinan timbulnya corona lebih dapat ditekan.

3. TAHANAN SALURAN

Tahanan dari penghantar saluran trasmisi adalah

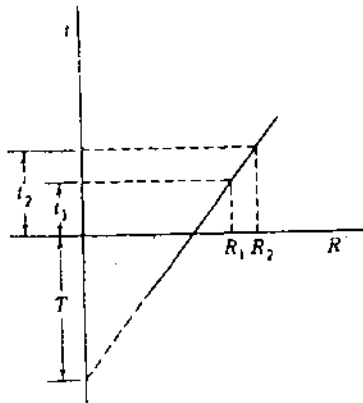
penyebab yang terpenting dari rugi daya (power loss) pada saluran transmisi. Bila tidak ada keterangan lain yang dimaksud dengan resistensi adalah resistensi efektif yang didefinisikan sebagai berikut:

$$R = \text{rugi daya pada penghantar} / |I|^2 \dots\dots\dots (1)$$

dimana: daya dalam watt

arus dalam ampere

Gambar 1 menggambarkan hubungan antara resistensi (R) dan suhu(t) adalah linier.



GAMBAR 1
RESISTENSI PENGHANTAR LOGAM SEBAGAI FUNGSI DARI SUHU

Dengan ilmu ukur diperoleh

$$R_2/R_1 = (T+t_2) / (T + t_1) \dots\dots\dots (2)$$

dimana R = tahanan penghantar pada suhu t dan t dalam derajat celcius

T = suatu konstante yang ditentukan dari grafik

- = 234,5 untuk tembaga annealed dengan konduktifitas 100%
- = 241 untuk tembaga hard drawn dengan konduktifitas 97,3%
- = 228 untuk aluminium hard drawn dengan konduktifitas 61%

Distribusi yang merata diseluruh penampang suatu penghantar hanya terdapat pada arus searah, pada arus bolak-balik dengan meningkatnya frekwensi menyebabkan tidak meratanya kerapatan arus (current dencity). Fenomena ini disebut efek kulit (skin effect). Efek kulit ini merupakan faktor yang penting sebab menurut hukum Lens tegangan yang diimbaskan akan melawan perubahan arus yang menyebabkan, dan meningkatnya tegangan imbas pada serat-serat dibagian dalam menyebabkan meningkatnya kerapatan arus pada serat yang lebih dekat kepermukaan penghantar dan karena itu resistensi efektifpun meningkat.

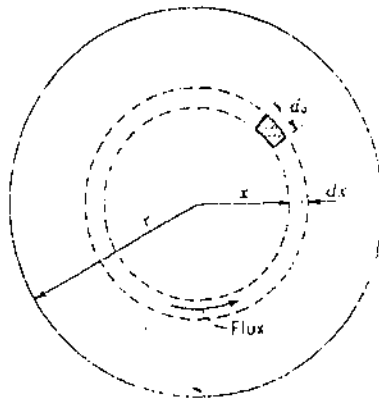
4. INDUKTANSI SALURAN TRANSMISI

4.1. Induktansi Yang Disebabkan Oleh Fluk Dalam

Berubahnya garis fluk didalam penghantar juga memberikan pengaruh pada tegangan imbas pada rangkaian juga dan juga pada induktansi. Nilai induktansi yang

sesungguhnya yang disebabkan oleh fluk dalam dapat dihitung sebagai perbandingan dari fluk gandeng terhadap arus dengan memperhitungkan juga bahwa setiap garis fluk dalam hanya menggandengkan sebagian kecil dari arus total.

Gambar 2 memperlihatkan garis fluk yang berada diluar penghantar. Tetapi sebenarnya sebagian dari medan magnet juga berada didalam penghantar



GAMBAR 2
PENAMPANG SUATU PENGHANTAR BERBENTUK SILINDER

Untuk mendapat nilai induktansi yang sebenarnya dari suatu saluran transmisi, maka fluk dalam masing-masing penghantar harus ditambahkan dengan fluk luar. Misalkan jalan kembali arus dalam penghantar pada gambar 2 sedemikian jauhnya sehingga tidak berpengaruh pada medan magnet penghantar, maka gaya gerak magnet dalam ampereturn sepanjang jalur tertutup yang manapun adalah sama dengan arus dalam ampere yang dikelilingi oleh jalur tersebut.

$$\text{mmf} = \oint H \, dS = I \text{ ampereturn} \quad \dots \dots \dots (3)$$

dimana H = Kuat medan magnet, ampereturn/m

S = jarak, meter

I = arus yang dilingkupi, ampere

Misalkan bahwa kuat medan pada jarak x meter dari tengah penghantar adalah H_x , karena medan simetris H_x adalah konstan untuk semua titik, bila dilakukan integrasi pada persamaan (3) maka:

$$\oint H_x dS = I_x \dots\dots\dots (4)$$

$$2\pi x H_x = I_x \dots\dots\dots (5)$$

dimana I_x adalah arus yang dikelilingi oleh jalur, misalkan arus merata maka

$$I_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} I \dots\dots\dots (6)$$

dimana I adalah arus total dalam penghantar .

$$H_x = x I / (2\pi r^2) \text{ ampturn/m} \dots\dots\dots (7)$$

sedang besarnya kerapatan fluk (flux dencity)

$$B_x = \mu H_x = -\mu x I / (2\pi r^2) \dots\dots\dots (8)$$

dimana μ = permeabilitas dari dari penghantar

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

besarnya fluk per meter panjang adalah

$$d\phi = -\mu x I / (2\pi r^2) dx \dots\dots\dots (9)$$

sedangkan besarnya fluk gandeng $d\phi$ permeter panjang yang disebabkan oleh fluk pada elemen berbentuk pipa tersebut adalah perkalian fluk permeter panjang dan dari bagian

arus yang digandengkannya, jadi

$$d\psi = \pi x^2 / (\pi r^2) d\phi = \mu I x^3 / (2\pi r^4) dx$$

$$= \int_0^r \frac{3}{2\pi r^4} I x^3 dx$$

$$= \mu I / (8\pi) \text{ weberturn/m} \dots\dots\dots (10)$$

untuk permeabilitas relatif = 1 ; $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Henry/m

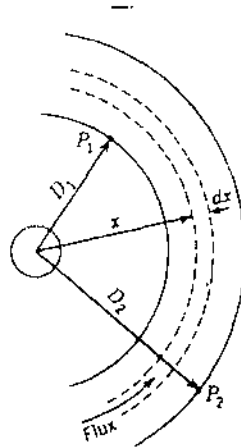
$$= 1/2 \cdot 10^{-7} \text{ weberturn/m} \dots\dots\dots (11)$$

$$L_{int} = 1/2 \cdot 10^{-7} \text{ Henry/m} \dots\dots\dots (12)$$

4.2 Fluk Gandeng Antara Dua Titik Diluar Penghantar Yang Terpisah

Perhatikan dua buah titik P dan P berada diluar penghantar pada Gambar 3. Pada penghantar mengalir arus sebesar I ampere. Pada elemen berbentuk tabung pada jarak x meter dari titik tengah penghantar kuat medan adalah Hx, maka besarnya mmf disepanjang elemen adalah:

$$2\pi x Hx = I \dots\dots\dots (13)$$



GAMBAR 3
 FLUX GANDENG ANTARA DUA TITIK DI
 LUAR PENGHANTAR YANG TERSENDIRI

Kerapatan fluk Bx

$$B_x = \mu I / (2\pi x) \quad \text{weber/m} \quad \dots\dots\dots (14)$$

Fluk $d\phi$ pada elemen berbentuk pipa dengan tebal dx adalah

$$d\phi = \mu I / (2\pi x) dx \quad \dots\dots\dots (15)$$

Fluk gandeng $\psi_{12} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\mu I}{2\pi x} dx$
 $= \mu I / 2\pi \ln (D_2/D_1) \quad \dots\dots\dots (16)$

untuk permeabilitas relatif = 1

$$\psi_{12} = 2 \times 10^{-7} I \ln D_2/D_1 \quad \text{H/m} \quad \dots\dots (17)$$

Induktansi yang disebabkan oleh fluk yang berada di antara P_1 dan P_2 adalah

$$L_{12} = 2 \times 10^{-7} \ln D_2/D_1 \quad \dots\dots\dots (18)$$

4.3 Induktansi Dua Kawat Berfasa Tunggal

Dari gambar 4, induktansi dari rangkaian yang

disebabkan oleh arus pada penghantar 1 sesuai dengan persamaan (4), dengan jarak D antara penghantar 1 dan 2 menggantikan D dan radius r dari penghantar 1 menggantikan D untuk fluk luar saja

$$L_{in\phi} = 2 \times 10^7 \ln D/r_1 \text{ H/m} \dots\dots\dots (19)$$

untuk fluk dalam saja

$$L_{i\phi x} = 1/2 \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \dots\dots\dots (20)$$

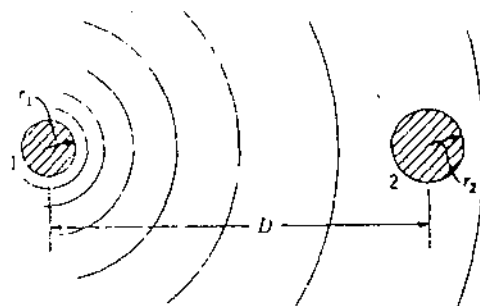
induktansi total

$$L_1 = (1/2 + 2 \ln D/r_1) \cdot 10^{-7} \dots\dots\dots (21)$$

karena $\ln \epsilon^{1/4} = 1/4$, maka persamaan (21) menjadi

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} (\ln \epsilon^{1/4} + \ln D/r_1) \dots\dots\dots (22)$$

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln D/(r_1 \epsilon^{1/4}) \dots\dots\dots (23)$$



GAMBAR 4
 PENGHANTAR DENGAN JARI-JARI BERBEDA DAN MEDAN MAGNET
 YANG DITIMBULKAN OLEH ARUS PADA PENGHANTAR 1 SAJA

bila $r_1 = r_1 \epsilon^{1/4}$

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln D/r'_1 \dots\dots\dots (24)$$

dengan cara yang sama diperoleh

$$L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln D/r'_2 \dots\dots\dots (25)$$

untuk keseluruhan rangkaian

$$L = L_1 + L_2 = 4 \times 10^{-7} \ln D/\sqrt{r'_1 r'_2} \dots\dots (26)$$

Jika $r'_1 = r_2 = r'$, maka

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln D/ r' H/m \dots\dots\dots (27)$$

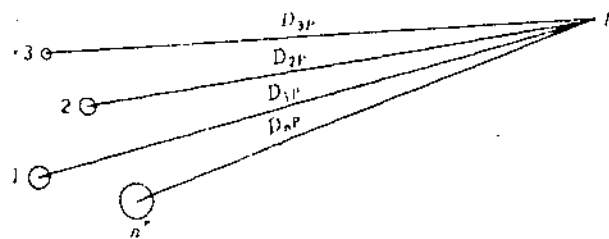
4.4 Fluk Gandeng Sebuah Penghantar Dalam Suatu Kelompok

Bila sebuah penghantar berada dalam suatu kelompok penghantar, dimana jumlah arus diseluruh penghantar adalah nol. Penghantar-penghantar 1,2,3,4....n, dialiri oleh arus $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$, seperti gambar 5. Jarak penghantar-penghantar ini dari suatu titik P yang jauh adalah $D_{1p}, D_{2p}, D_{3p}, \dots, D_{np}$

Besarnya fluk gandeng penghantar 1 yang disebabkan oleh I termasuk fluk gandeng dalam tetapi tidak termasuk fluk yang berada diluar titik P, dari persamaan (21) dan (27)

$$\psi_{1P1} = (1/2 + 2 I \ln D /r)10 \dots\dots\dots (28)$$

$$= 2 I \ln D /r \text{ Weberturn/m} \dots\dots\dots (29)$$



GAMBAR 5
 FLUX GANDENG SEBUAH
 PENGHANTAR DALAM SUATU KELOMPOK

Fluk gandeng ψ_{ip2} dengan penghantar 1 yang disebabkan oleh I_2 , tetapi tidak termasuk fluk diluar P, adalah sama dengan fluk yang dihasilkan oleh I_2 diantara titik P dan penghantar 1

$$\psi_{ip2} = 2 \times 10^{-7} I_2 \ln D_{2P}/D_{12} \dots \dots \dots (30)$$

Fluk gandeng ψ_{ip} dengan penghantar 1 yang disebabkan oleh seluruh penghantar adalah

$$\psi_{ip} = 2 \times 10^{-7} (I_1 \ln D_{1P}/r'_1 + I_2 \ln D_{2P}/D_{12} + \dots + I_n \ln D_{nP}/D_{1n}) \dots \dots \dots (31)$$

dengan menguraikan faktor logaritma dan mengelompokkan kembali diperoleh

$$\psi_{ip} = 2 \times 10^{-7} (I_1 \ln 1/r'_1 + I_2 \ln 1/D_2 + I_3 \ln 1/D_3 + \dots + \ln 1/D_n + I_1 \ln D_{1P} + I_2 \ln D_{2P} + \dots + I_n \ln D_{nP}) \dots \dots \dots (32)$$

karena $I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0$

dan $I_n = - (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_{n-1}) \dots \dots \dots (33)$

dari persamaan (32) dan (33) diperoleh

$$\begin{aligned}
&= 2 \times 10^{-7} (I_1 \ln 1/r'1 + I_2 \ln 1/D12 + I_3 \ln 1/D13 + \dots \\
&\quad + I_n \ln 1/D1n + I_1 \ln D1p/Dnp + I_2 \ln D2p/Dnp + \dots \\
&\quad + I_{n-1} \ln(D_{n-1}/Dnp)) \dots \dots \dots (34)
\end{aligned}$$

dengan menganggap P sampai tak terhingga jauhnya maka persamaan (2.34) menjadi

$$\begin{aligned}
&= 2 \times 10^{-7} (I_1 \ln D1p/Dnp + I_2 \ln D2p/Dnp + I_3 \ln D3p/Dnp \\
&\quad + \dots + I_n \ln 1/Dn) \dots \dots \dots (35)
\end{aligned}$$

4.5 Induktansi Saluran Tiga Fasa dengan Jarak Yg Sama

Pada penghantar-penghantar dari suatu saluran tiga fasa yang terpisah sedemikian sehingga membentuk sudut-sudut suatu segitiga sama sisi.

Pada keadaan setimbang

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

dari persamaan (35) dapat ditentukan besarnya flux gandang penghantar a

$$= 2 \times 10^{-7} (I_a \ln 1/D_s + I_b \ln 1/D + I_c \ln 1/D) \text{ wbt/m} \dots (36)$$

Karena $I_a = - (I_b + I_c)$ maka persamaan (2.36) menjadi

$$\begin{aligned}
&= 2 \times 10^{-7} (I_a \ln 1/D_s - I_a \ln 1/D) \\
&= 2 \times 10^{-7} (I_a \ln D/D_s) \text{ wbt/m} \dots \dots \dots (37)
\end{aligned}$$

maka

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln D/D_s \text{ H/m} \dots \dots \dots (38)$$

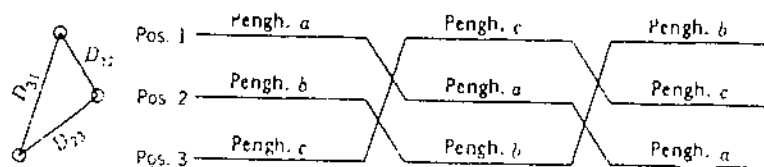
dimana

D_s = radius rata-rata geometri

$$= \sqrt[9]{(D_{aa} D_{ab} D_{ac}) (D_{ba} D_{bb} D_{bc}) (D_{ca} D_{cb} D_{cc})}$$

4.6 Induktansi Saluran 3 Fasa Dengan Jarak Pemisah Tidak Simetris

Jika jarak pemisah penghantar-penghantar suatu saluran 3 fasa tidak sama, maka flux gandeng dan induktansi masing-masing fasa menjadi tidak sama. Suatu induktansi yang berbeda pada setiap fasa akan menghasilkan suatu rangkaian yang tidak setimbang. Untuk mengembalikan kesetimbangan ketiga fasa dilakukan dengan mempertukarkan kedudukan-kedudukan penghantar pada selang jarak yang teratur di sepanjang saluran (transposisi).



GAMBAR 6
PERIODA TRANSPOSISI

Besarnya induktansi saluran a dapat diperoleh dari persamaan (36). Pada saat a pada posisi 1, b posisi 2 dan c posisi 3

$$L_{a1} = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln 1/D_s + I_b \ln 1/D_{12} + I_c \ln 1/D_{31}) \text{ wbt/m} \dots \dots \dots (39)$$

Dengan a pada posisi 2, b pada posisi 3 dan c pada posisi 1

$$\psi_{a2} = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln 1/D_s + I_b \ln 1/D_{23} + I_c \ln 1/D_{12}) \text{ wbt/m} \quad \dots \dots \dots (40)$$

dan a pada posisi 3, b pada posisi 1, dan c pada posisi 2

$$\psi_{a3} = 2 \times 10^{-7} (I_a \ln 1/D_s + I_b \ln 1/D_{31} + I_c \ln 1/D_{23}) \text{ wbt/m} \quad \dots \dots \dots (2.41)$$

maka nilai rata-rata flux gandeng a adalah

$$\psi = \frac{\psi_{a1} + \psi_{a2} + \psi_{a3}}{3}$$

$$\psi = \frac{2 \times 10^{-7}}{3} (3 I_a \ln 1/D_s + I_b \ln(1/D_{12} D_{23} D_{31}) + I_c \ln 1/D_{12} D_{23} D_{31}) \quad \dots \dots \dots (42)$$

karena $I_a = - (I_b + I_c)$

$$= \frac{2 \times 10^{-7}}{3} (3 I_a \ln 1/D_s - I_a \ln (1/D_{12} D_{23} D_{31}))$$

$$= 2 \times 10^{-7} I_a \ln \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}} / D_s \quad \text{wbt/m} \quad \dots \dots \dots (43)$$

maka induktansi rata-rata per fasa

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \text{Deq}/D_s \quad \text{H/m} \quad \dots \dots \dots (44)$$

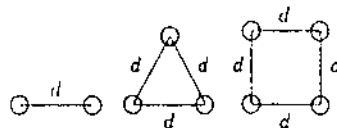
dimana

$$\text{Deq} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}}$$

5. PENGHANTAR BERKAS

Pada tegangan extra tinggi (EHV), korona dengan akibatnya yang berupa rugi daya dan timbulnya interferensi dengan saluran komunikasi, akan menjadi sangat berlebihan bila tiap fasa hanya terdiri dari penghantar. Dengan menggunakan dua penghantar atau lebih perfasa yang disusun

berdekatan dibandingkan dengan jarak pemisah antar fasanya, maka gradien tegangan tinggi pada penghantar dalam daerah EHV dapat banyak dikurangi. Saluran semacam ini dikatakan sebagai penghantar berkas (bundeed conductor).



GAMBAR 7
SUSUNAN BERKAS

Arus tidak akan terbagi rata pada penghantar-penghantar dalam berkas, jika tidak dilakukan transportasi pada berkas.

Keuntungan lain ialah penurunan harga reaktansi. Peningkatan jumlah penghantar dalam suatu berkas mengurangi efek-efek corona dan mengurangi reaktansi. Pengurangan reaktansi disebabkan oleh kenaikan GMR dari berkas

untuk berkas dua penghantar

$$D_s = \sqrt{\frac{b}{4} (D_s \times d)^2} = \sqrt{D_s \times d} \dots \dots \dots (45)$$

untuk berkas tiga penghantar

$$D_s = \sqrt{\frac{b}{9} (D_s \times d \times d)^3} = \sqrt[3]{D_s \times d^2} \dots \dots \dots (46)$$

untuk berkas empat penghantar

$$D_s = \sqrt[4]{\frac{b}{16} (D_s \times d \times d \times d \times 2)^4} = 1,09 \sqrt[3]{D_s \times d} \dots \dots \dots (47)$$

6. KAPASITANSI SALURAN TRANSMISI

Timbulnya Kapasitansi pada saluran transmisi adalah akibat beda potensial antara penghantar-penghantar. Kapasitansi menyebabkan penghantar-penghantar itu bermuatan seperti yang terjadi pada pelat-pelat kapasitor bila ada beda tegangan.

Untuk saluran tenaga < 80 km Kapasitansi dapat diabaikan, karena pengaruhnya kecil saja.

Aliran muatan yang berupa arus dan arus ini disebabkan oleh pengisian dan pengosongan bolak-balik suatu saluran karena tegangan bolak - balik disebut arus pengisian saluran. Arus pengisian menyebabkan voltage drop disepanjang saluran, efisiensi dan faktor daya saluran serta kestabilan sistem.

6.1 Kapasitansi Saluran Dua Kawat

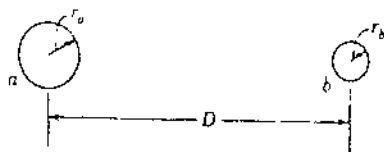
Kapasitansi antara dua penghantar pada saluran dua kawat didefinisikan sebagai muatan pada penghantar-penghantar itu per unit selisih potensial antar keduanya. Dalam bentuk persamaan, Kapasitansi per unit panjang adalah:

$$C = q/v \quad F/m \quad \dots\dots\dots (45)$$

dimana

q = muatan pada saluran dalam C/m

v = beda potensial antar kedua penghantar dalam volt.



GAMBAR 8
PENAMPANG SUATU SALURAN KAWAT SEJAJAR

Kapasitansi antara dua penghantar dapat diperoleh dengan

$$V_{ab} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \frac{D}{r_a} + \frac{q_b}{2\pi k} \ln \frac{r_b}{D} \quad \dots\dots\dots (46)$$

karena q_a karena q_b

dan karena $q_a = -q_b$

$$V_{ab} = \frac{q_a}{2\pi k} \left(\ln \frac{D}{r_a} - \ln \frac{r_b}{D} \right) \quad \dots\dots\dots (47)$$

dengan menggabungkan suku logaritmis

$$V_{ab} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \frac{D^2}{r_a r_b} \quad V \quad \dots\dots\dots (48)$$

dan kapasitansi antar penghantar - penghantar adalah

$$C_{ab} = \frac{q_a}{V_{ab}} = \frac{2\pi k}{\ln(D^2 / r_a r_b)} \quad F/m$$

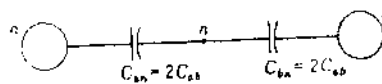
jika $r_a = r_b = r$

$$C_{ab} = \frac{\pi k}{\ln(D/r)} \quad F/m \quad \dots\dots\dots (49)$$

Bila penghantar dicatu oleh trafo yang sekundernya di ketanahkan maka beda potensial antara masing-masing

penghantar dan tanah adalah setengah dari selisih potensial antara kedua penghantar tersebut dan Kapasitansi ke tanah, atau kapasitansi ke netral adalah:

$$C_n = C_{an} = C_{bn} = \frac{2\pi k}{\ln(D/r)} \text{ F/m} \quad \dots\dots\dots (51)$$



GAMBAR 9
KAPASITANSI ANTAR SALURAN DAN SALURAN KE NETRAL

Besarnya reaktansi kapasitif adalah:

$$X_c = 1/(2\pi fC)$$

$$= \frac{2,862}{f} 10^9 n D/r \quad \Omega m \quad \dots\dots\dots (52)$$

Karena X_c terhubung paralel sepanjang saluran, X_c dalam ohm-meter harus dibagi dengan panjang saluran dalam meter untuk mendapatkan reaktansi kapasitif dalam ohm terhadap netral untuk seluruh panjang saluran. Maka persamaan (52) dibagi dengan 1609 untuk merubah ke dalam ohm-mil.

$$X_c = \frac{1,779}{f} 10^6 \ln D/r \quad \Omega \text{mil ke netral} \quad \dots\dots\dots (53)$$

6.2. Kapasitansi Saluran Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah Yang Sama

Tegangan antara dua penghantar yang disebabkan muatan pada masing-masing penghantar dinyatakan oleh persamaan (46) dengan menganggap distribusi muatan pada penghantar seragam. Jadi tegangan V_{ab} pada saluran tiga fasa yang hanya disebabkan oleh muatan penghantar a dan b adalah

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} (q_a \ln D/r + q_b \ln r/D) V \dots\dots\dots (54)$$

untuk tiga penghantar maka persamaan (54) menjadi

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} (q_a \ln D/r + q_b \ln r/D + q_c \ln D/D)$$

demikian pula

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} (q_a \ln D/r + q_b \ln D/D + q_c \ln r/D) \dots (55)$$

Penjumlahan persamaan (54) dan (55) menghasilkan

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} (2q_a \ln D/r + (q_a + q_c) \ln r/D) V \dots (56)$$

Dalam penurunan persamaan diatas tanah dianggap sangat jauh dan tidak berpengaruh, karena jumlah muatan dalam

2) Ibid p. 84

tiga penghantar tersebut nol maka:

$$q_a = - (q_b + q_c)$$

dan

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{3q_a}{2\pi k} \ln D/r \quad V \quad \dots\dots\dots (57)$$

Gambar 10 adalah phasor untuk tegangan, dari gambar ini terlihat antara tegangan saluran V_{ab} dan V_{ac} dan tegangan V_{an} dari saluran a ke netral untuk rangkaian tiga phasa sebagai berikut:

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_{an} (0.866 + j 0.5) \quad \dots\dots\dots (58)$$

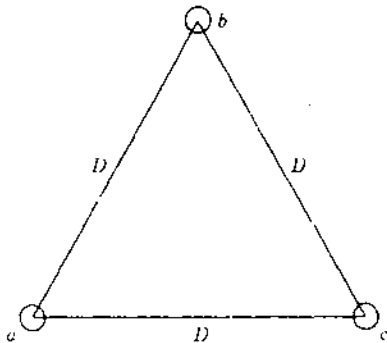
$$V_{ab} = - V_{ca} = \sqrt{3} V_{an} (0.866 - j 0.5) \quad \dots\dots\dots (59)$$

penjumlahan persamaan (58) dan (59) menghasilkan :

$$V_{ab} + V_{ac} = 3 V_{an} \quad \dots\dots\dots (60)$$

dengan menggantikan $3 V_{an}$ untuk $V_{ab} + V_{ac}$ dalam persamaan (2.60) diperoleh

$$V_{an} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln D/r \quad V \quad \dots\dots\dots (61)$$



GAMBAR 10
PENAMPANG SUATU SALURAN TIGA FASA
DENGAN JARAK PEMISAH YANG SAMA

maka besarnya kapasitansi ke netral adalah

$$C_n = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi k}{\ln(D/r)} \quad \text{F/m ke netral} \quad \dots\dots\dots (62)$$

Arus pengisian dipakai untuk arus yang ada hubungannya dengan kapasitansi saluran untuk suatu rangkaian fasa tunggal, besarnya arus pengisian

$$I_{chg} = r_w C_{ab} V_{ab} \quad \dots\dots\dots (63)$$

untuk saluran tiga fasa

$$I_{chg} = r_w C_n V_{an} \quad \dots\dots\dots (64)$$

6. 3. Pengaruh Bumi Pada Kapasitansi Saluran Transmisi Tiga Fasa

Bumi mempengaruhi kapasitansi saluran transmisi karena kehadirannya merubah medan listrik saluran. Bila bumi dianggap sebagai penghantar sempurna dalam bentuk suatu bidang mendatar yang tak terhingga luasnya. Medan listrik yang ditimbulkan oleh penghantar yang bermuatan terpaksa harus menyesuaikan diri dengan adanya permukaan bumi.

Apabila suatu rangkaian yang terdiri dari sebuah penghantar tunggal dengan jalur kembali melalui tanah, dalam pengisian muatan pada penghantar muatan datang dari bumi dan menetap pada penghantar, sehingga selisih potensial terjadi antar penghantar dan tanah. Bumi mempunyai suatu muatan yang sama besarnya dengan yang

terdapat pada penghantar tetapi berlawanan tandanya.

Fluk listrik dari muatan - muatan pada penghantar kemuatan pada bumi adalah tegak lurus pada permukaan ekipotensial bumi, karena permukaan bumi dimisalkan sebagai penghantar yang sempurna. Apabila penghantar khayal dengan ukuran dan bentuk yang sama dengan penghantar yang sebenarnya dan berada tepat dibawahnya dengan jarak dua kali lipat jarak penghantar ke bumi.

Jika bumi dihilangkan dan suatu muatan yang sama besar dan berlawanan tanda dengan muatan asli, bidang antar penghantar asli dan penghantara khayal adalah suatu pengahantar ekipotensial dan menempati posisi yang sama seperti permukaan ekipotensial bumi.

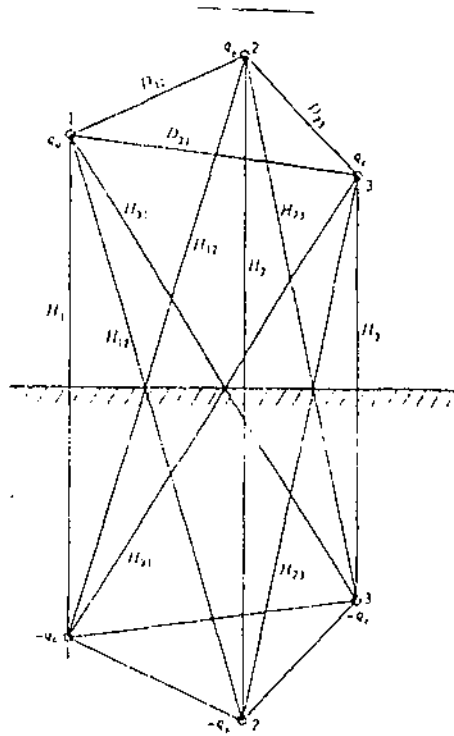
Untuk menghitung kapasitansi, bumi dapat digantikan oleh penghantar khayal yang bermuatn dibawah permukaan bumi pada jarak yang sama dengan penghantar asli di atas bumi. Besarnya tegangan yang timbul antara penghantar a dan b adalah

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left[q_a \left(\ln \frac{D_{12}}{r} - \ln \frac{H_{12}}{H_1} \right) + q_b \left(\ln \frac{r}{D_{12}} - \ln \frac{H_2}{H_{12}} \right) + q_c \left(\ln \frac{D_{23}}{D_{31}} - \ln \frac{H_{23}}{H_{31}} \right) \right] \dots \dots (65)$$

dan besarnya kapasitansi

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln(D_{eq}/r) - \ln\left(\frac{\sqrt{H_{12} H_{23} H_{31}}}{H_1 H_2 H_3}\right)} F/m \dots (66)$$

dan persamaan diatas terlihat bahwa bumi menambah besar nilai Kapasitansi.



GAMBAR 11
SALURAN TIGA FASA DENGAN BAYANGANNYA

6.4 Penghantar Berkas

Gambar 11 memperlihatkan penghantar berkas, tiap phasanya terdiri dari dari dua penghantar. Dengan

menganggap semua penghantara sejajar dan dan distribusi arus merata pada tiap penghantar dan karena d jauh lebih besar dari D maka $D_{12}-d$ dapat diganti dengan D_{12} dan ini berlaku untuk $D + d$ dst.

Jika muatan fasa a adalah q_a , maka penghantar a dan a bermuatan $q_a/2$, pembagian ini juga berlaku untuk fasa b dan c, maka

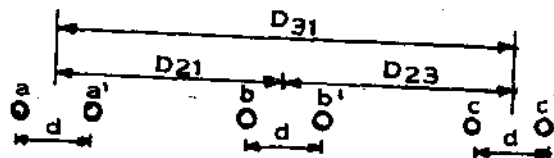
$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left[\left(\frac{q_a}{2} \ln \frac{D_{12}}{r} + \ln \frac{D_{12}}{d} \right) + \frac{q_b}{2} \left(\ln \frac{r}{D_{12}} + \ln \frac{d}{D_{12}} \right) + \frac{q_c}{2} \left(\ln \frac{D_{23}}{D_{31}} + \ln \frac{D_{23}}{D_{31}} \right) \right] \dots\dots (67)$$

atau

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left(q_a \ln \frac{D_{12}}{\sqrt{rd}} + q_b \ln \frac{\sqrt{rd}}{D_{12}} + q_c \ln \frac{D_{23}}{D_{31}} \right) \dots\dots\dots (68)$$

bila saluran ditransposisikan

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln (Deq/\sqrt{rd})} \text{ F/m ke netral} \dots\dots\dots (69)$$



GAMBAR 12
PENAMPANG SUATU SALURAN TIGA FASA
DENGAN PENGHANTAR BERKAS

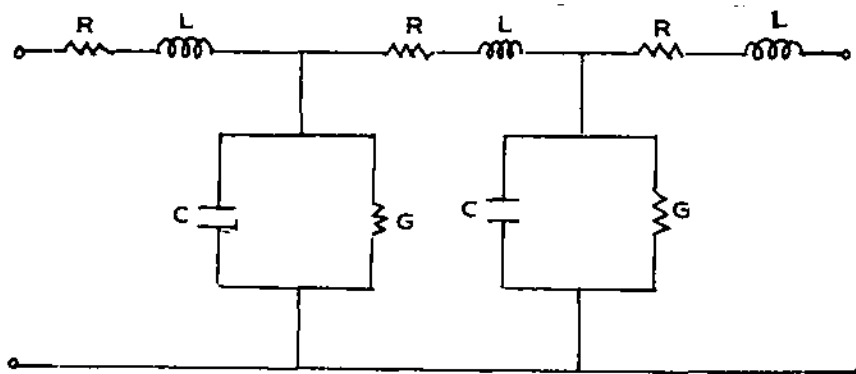
7. REPRESENTASI SALURAN

Dalam sistem tenaga listrik yang terpenting adalah pemeliharaan tegangan dalam batas - batas yang telah ditentukan pada berbagai titik dalam sistem tersebut. Untuk itu perlu diketahui besar tegangan arus serta daya yang mengalir pada setiap titik sepanjang saluran transmisi. Untuk merepresentasikan suatu saluran transmisi kedalam bentuk rangkaiannya simulasinya, tergantung kepada panjang dan saluran transmisi serta ketelitian yang diinginkan. Menurut panjangnya, saluran transmisi dapat digolongkan menjadi 3 yaitu:

- a. Saluran transmisi pendek (short line), adalah saluran transmisi yang penjangnya kurang dari 80 km.
- b. Saluran transmisi menengah (medium line) adalah transmisi yang panjangnya antara 80 km dan 240 km.
- c. Saluran transmisi panjang (long line) adalah saluran transmisi yang panjangnya lebih dari 240 km.

Parameter - parameter saluran sangat berpengaruh terhadap tegangan bus dan aliran daya yang mengalir pada saluran tersebut. Nilai dari parameter - parameter saluran sangat tergantung pada panjang salurannya. Suatu

saluran transmisi mempunyai parameter - parameter saluran antara lain tahanan, reaktansi, kapasitansi, serta konduktansi yang tersebar sepanjang saluran. Rangkaian setara untuk saluran transmisi secara umum dapat dilihat pada gambar 13



GAMBAR 13
RANGKAIAN SETARA DARI SALURAN TRANSMISI SECARA UMUM

7.1. Saluran Transmisi Pendek

Rangkaian setara untuk transmisi pendek dapat dilihat pada gambar 13. I_s dan I_r arus yang mengalir pada sisi kirim dan terima, V_s dan V_r adalah tegangan- tegangan sisi kirim dan sisi terima terhadap titik netralnya.

Parameter - parameter saluran diberikan dengan mengabaikan konduktansi dan kapasitansi totalnya. Rangkaian tersebut dapat diselesaikan seperti halnya dengan rangkaian arus bolak - balik dalam hubungan seri. Karena tidak terdapat cabang simpang maka arus mengalir

pada ujung sisi kirim akan sama dengan arus pada ujung sisi terima.

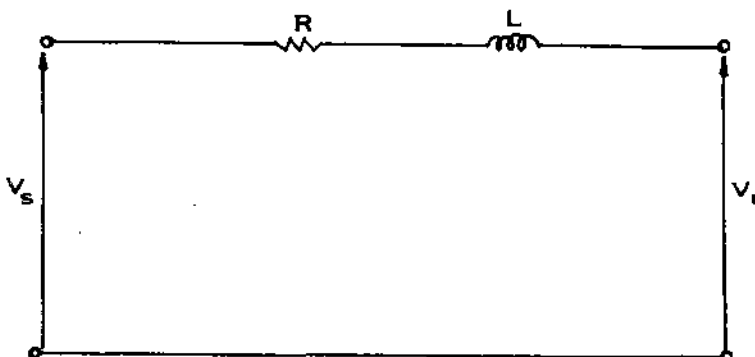
$$I_s = I_r \quad \dots\dots\dots (70)$$

tegangan pada ujung sisi kirim adalah:

$$V_s = V_r + I_r Z \quad \dots\dots\dots (71)$$

Regulasi tegangan dari saluran transmisi adalah kenaikan tegangan pada ujung sisi terima dan didefinisikan sebagai berikut

$$\frac{|V_{r, ne}| - |V_{r, fe}|}{|V_{r, fe}|} \quad \dots\dots\dots (72)$$



GAMBAR 14
RANGKAIAN SETARA SALURAN TRANSMISI PENDEK

7.2. Saluran Transmisi Menengah

Pada saluran transmisi jarak menengah, efek kapasitansi atau biasa disebut dengan kapasitansi simpang dari saluran telah diperhitungkan. Representasi saluran jarak menengah dapat dilihat pada gambar 15.

Pada gambar 15, terdapat 2 rangkaian setara saluran transmisi menengah, yaitu π dan T. Pada umumnya rangkaian lebih banyak digunakan daripada rangkaian T. Terdapat sedikit perbedaan dalam ketelitian dari kedua rangkaian diatas.

Untuk rangkaian π :

$$V_s = [ZY/2 + 1] V_r + Z I_r \quad \dots\dots\dots (73)$$

$$I_s = [1 + ZY/4] Y V_r + [ZY/2 + 1] I_r \quad \dots\dots\dots (74)$$

untuk rangkaian T :

$$V_s = [ZY/2 + 1] V_r + [1 + ZY/4] Z I_r \quad \dots\dots\dots (75)$$

$$I_s = [Y V_r + [ZY/2 + 1] I_r \quad \dots\dots\dots (76)$$

Persamaan - persamaan diatas merupakan persamaan dalam bentuk ABCD dimana, untuk rangkaian π :

$$A = 1 + ZY/2 \quad ; \quad B = Z$$

$$C = (1 + ZY/4) Y$$

untuk rangkaian T :

$$A = D = 1 + ZY/2 \quad ; \quad C = Y$$

$$B = (1 + ZY/4) Z$$

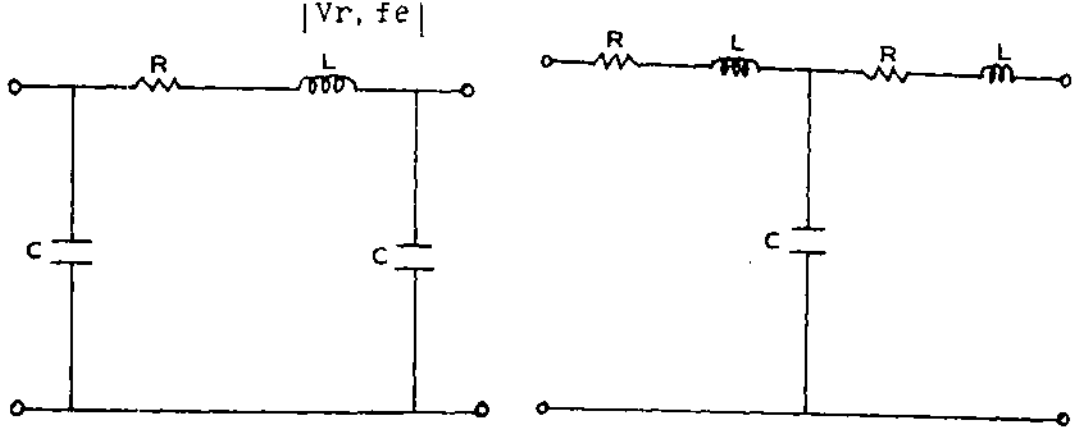
Konstanta - Konstanta ABCD ini disebut Konstanta rangkaian umum suatu saluran transmisi. Dengan membuat I_r sama dengan nol atau dalam keadaan tanpa beban maka didapat :

$$A = V_s / V_r$$

Konstanta A ini berguna untuk menghitung regulasi tegangan. Jika V_r , fl adalah tegangan pada ujung sisi terima pada saat beban penuh, maka regulasi tegangan dapat

ditulis sebagai:

$$\frac{|V_s|/|A| - |V_{r, fe}|}{|V_{r, fe}|} \dots\dots\dots (77)$$



GAMBAR 15
RANGKAIAN SETARA SALURAN TRANSMISI MENENGAH

7.3. Saluran Transmisi Panjang

Pada saluran transmisi panjang, parameter - parameter tidak terpusat melainkan tersebar secara merata disepanjang saluran. Perhitungan arus dan tegangan pada kedua ujung saluran didasarkan pada perbedaan tegangan dan arus persatuan panjang.

Pada gambar 16, dapat dilihat suatu unsur yang sangat kecil dari panjang suatu saluran transmisi (dX), dengan jarak X yang diukur dari ujung sisi terima. Dari unsur yang sangat kecil tersebut dapat dituliskan persamaan - persamaan untuk tegangan dan arusnya sebagai :

$$dV = I Z dX \text{ atau}$$

$$dV/dX = I Z \dots\dots\dots (78)$$

dan

$$dI = V y dX \text{ atau}$$

$$dI/dX = Vy \quad \dots\dots\dots (79)$$

di mana

Z = impedansi seri per fasa persatuan panjang

Y = admitansi simpang per fasa persatuan panjang

dengan mendiferensialkan persamaan (78) dan (79)

diperoleh

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = Z \frac{dI}{dx} \quad \dots\dots\dots (80)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = Y \frac{dV}{dx} \quad \dots\dots\dots (81)$$

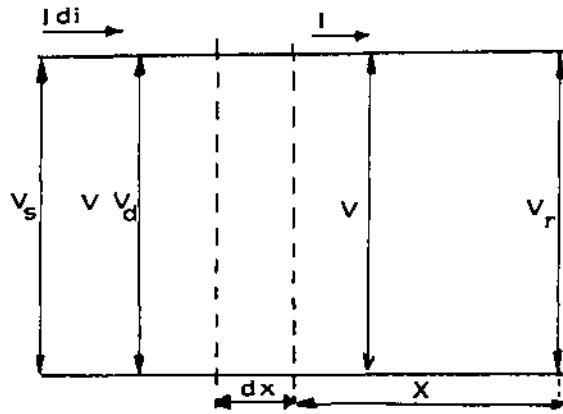
dengan mensubstitusikan persamaan (78) dan (79) kedalam persamaan (76) dan (77) didapat

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = Z Y V \quad \dots\dots\dots (82)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = Z Y I \quad \dots\dots\dots (83)$$

Bentuk penyelesaian dari persamaan (82) adalah

$$V = A1 \exp\sqrt{XYZ} + A2 \exp(-\sqrt{XYZ}) \quad \dots\dots\dots (84)$$



GAMBAR 16
 HUBUNGAN TEGANGAN DAN ARUS
 PADA UNSUR YANG SANGAT KECIL DARI SALURAN TRANSMISI

dengan persamaan (84) ke dalam persamaan (78) diperoleh

$$I = \frac{1}{\sqrt{(Z/Y)}} A_1 \exp \sqrt{XYZ} - \frac{1}{\sqrt{(X/Y)}} A_2 \exp (-\sqrt{XYZ}) \dots\dots\dots (85)$$

Konstanta - Konstanta A1 dan A2 dapat dihitung dengan memasukkan harga awalnya, yaitu :

$$V = V_r \text{ dan } I = I_r \text{ pada saat } X = 0$$

sehingga diperoleh :

$$A_1 = \frac{V_r + \sqrt{(Z/Y)}}{2} I_r$$

$$A_2 = \frac{V_r - \sqrt{(Z/Y)}}{2} I_r$$

$\sqrt{(Z/Y)}$ disebut impedansi karakteristik saluran dan biasa ditulis dengan Z_c dan konstanta rambatan dari pada saluran adalah $\tau = ZY$

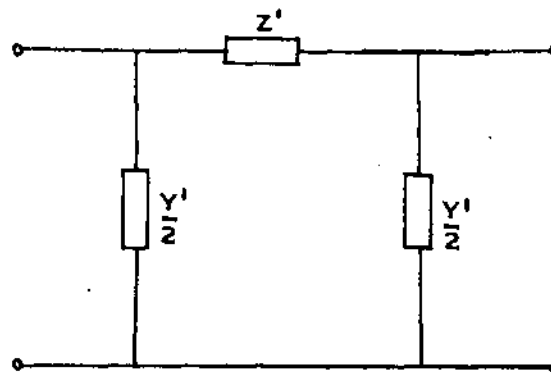
Persamaan - persamaan (84) dan (85) adalah persamaan untuk saluran transmisi panjang, bila ditulis dalam bentuk hiperbola:

$$V(x) = V_r \cosh \gamma x + I_r Z_c \sinh \gamma x \quad \dots\dots\dots (86)$$

$$I(x) = I_r \cosh \gamma x + V_r/Z_c \sinh \gamma x \quad \dots\dots\dots (87)$$

Pada gambar 17, terlihat rangkaian setara suatu saluran transmisi panjang, dimana Z' dan $Y'/2$ adalah impedansi seri dan admitansi simpangnya, untuk membedakan dengan rangkaian nominal pada rangkaian setar dari saluran transmisi menengah. Tegangan pada ujung sisi kirimnya adalah

$$V_s = (Z'Y'/2 + 1) V_r + Z' I_r \quad \dots\dots\dots (88)$$



GAMBAR 17
RANGKAIAN SETARA SALURAN TRANSMISI PANJANG

Dari persamaan (86) dan (88) diperoleh

$$\begin{aligned} Z' &= Z_c \sinh \gamma x = \sqrt{Z/Y} \sinh \gamma x \quad \dots\dots\dots (89) \\ &= Zx (\sinh \gamma x / \sqrt{XY'Z}) \end{aligned}$$

atau

$$Z' = Z (\sinh \gamma x / \gamma x)$$

Dari persamaan diatas terlihat $Z = Zx$ adalah total impedansi seri dari saluran dan suku $(\sinh \gamma x) / \gamma x$ adalah faktor pengali impedansi untuk mrngubah dari rangkaian

tertera diatas, adalah dari koefisien V_r , yaitu:

$$Z'Y'/2+1 = \cosh \gamma x$$

dengan memasukan $Z_c \sinh \gamma x$ sebagai ganti Z' diperoleh

$$\frac{Y'Z_c \sinh \gamma x}{2} + 1$$

atau

$$Y'/2 = (1/Z_c) \tanh (\gamma x/Z) \quad \dots\dots\dots (90)$$