

# **TRANSMISI DAYA LISTRIK**



DIKTAT DISUSUN OLEH

IR. SOWARDIYONO

( TIDAK DIPERDAGANGKAN / HANYA UNTUK KALANGAN SENDIRI )

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEMARANG  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

1999

## DAFTAR ISI .

### I. Pendahuluan .

1. umum .
2. Saluran transmisi AC dan DC .
3. Tegangan transmisi
4. Komponen utama saluran udara .
  1. Menara / tiang .
  2. Isolator .
  3. Kawat penghantar .
  4. Kawat tanah .
  5. Conductor .
    1. Tahanan .
      - Resistansi .
      - Induktansi .
      - Reaktansi .
      - Kapasitansi .
    2. Kabel .
6. Perlengkapan penghantar .
  1. Sambungan / joint
  2. Pemasangan spacer .
  3. Armor Rods .
  4. Pemasangan / damper .

### II. Isolator .

1. jenis isolator .
2. Karakteristik isolator .
3. Pasangan isolator
4. jepitan / clamp .
5. Perburuan isolator .

### III. Konstruksi pemompaan .

1. jenis pemompaan .
  1. Baja
  2. Beton .
  3. Kayu .

2. beban pada konstruksi penampang.

1. Angin .
2. Tarik .
3. Beban baja .
3. Menara baja .

IV. Presentasi saluran transmisi.

1. Pendahuluan
2. Representasi saluran .
3. Klarifikasi
4. Diagram pengganti
5. Saluran transmisi panjang .

V. Konstanta? cume saluran .

1. Kutub empat, A, B, C dan D .
2. Saluran pendek .
3. Saluran menengah  
- nominal T .  
- nominal II .

VI. Diagram lingkaran daya .

2. Pendahuluan .
2. Peramaan Vektor .
3. Lingkaran ujung beban .
4. Lingkaran daya ujung kirim .
5. Koreksi faktor daya .

VII. Kapasitas hantar arus .

1. Kapasitas penyaluran kawat .
2. Korona .

VIII. Kompensasi saluran .

1. Pendahuluan .
2. Kompensasi shunt .
3. Kompensasi seri .

IX. Perencanaan konstruksi saluran udara .

1. Perencanaan listrik .
2. Perencanaan mekanis
3. Contd ?

## PENDAHULUAN

### 1. UMUM

Tenaga listrik sangat berguna karena tenaga listrik itu dapat dengan mudah di-transportasikan/disalurkan dan juga mudah diatur. Tenaga listrik dibangkitkan di pusat-pusat listrik tenaga (PLT), seperti : tenaga air (PLTA), tenaga uap (PLTU), tenaga panas bumi (PLTP), tenaga gas (PLTG), tenaga disel (PLTD), tenaga nuklir (PLTN) dan lain sebagainya.

Pusat-pusat listrik tenaga itu, terutama yang menggunakan tenaga air (PLTA), umumnya terletak jauh dari tempat-tempat di mana tenaga listrik itu digunakan atau pusat-pusat beban (load centres). Karena itu tenaga listrik yang dibangkitkan harus disalurkan melalui kawat-kawat atau saluran transmisi. Karena tegangan generator pada umumnya rendah, antara 6 KV sampai 24 KV, maka tegangan ini biasanya dinaikkan dengan pertolongan transformator daya ke tingkat tegangan yang lebih tinggi antara 30 KV sampai 500 KV (di beberapa negara maju bahkan sudah sampai 1.000 KV).

Tingkat tegangan yang lebih tinggi ini, selain untuk memperbesar daya hantar dari saluran yang berbanding lurus dengan kuadrat tegangan, juga untuk memperkecil rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran. Sudah jelas, dengan mempertinggi tegangan tingkat isolasi-pun harus lebih tinggi, dengan demikian biaya peralatan juga tinggi.

Penurunan tegangan dari tingkat tegangan transmisi pertama-tama dilakukan pada gardu induk (GI), di mana tegangan diturunkan ke tegangan yang lebih rendah, misalnya : dari 500 KV ke 150 KV atau dari 150 KV ke 70 KV. Kemudian penurunan kedua dilakukan pada gardu induk distribusi dari 150 KV ke 20 KV atau dari 70 KV ke 20 KV. Tegangan 20 KV ini disebut tegangan distribusi primer.

Ada dua kategori saluran transmisi : saluran udara (overhead lines) dan saluran kabel tanah (underground cable). Yang pertama menyalurkan tenaga listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada menara atau tiang transmisi dengan perantara isolator-isolator, sedang kategori kedua menyalurkan tenaga listrik melalui kabel-kabel yang ditanam di bawah permukaan tanah. Kedua cara penyaluran di atas mempunyai untung ruginya sendiri-sendiri. Dibandingkan dengan saluran udara, saluran bawah tanah tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, taufan, hujan angin, bahaya petir dan sebagainya. Lagi pula, saluran bawah tanah lebih estetik karena tidak mengganggu pandangan. Karena alasan terakhir ini, saluran-saluran bawah tanah lebih disukai, terutama untuk daerah yang padat penduduknya dan di kota-kota besar. Namun biaya pembangunannya jauh lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara, dan perbaikannya lebih sukar bila terjadi gangguan hubung singkat dan kesukaran-kesukaran lain.

## 2. SALURAN TRANSMISI AC ATAU DC

Menurut jenis arusnya dikenal sistem arus bolak-balik (AC = Alternating Current) dan sistem arus searah (DC = Direct Current). Di dalam sistem AC penaikan dan penurunan tegangan mudah dilakukan yaitu dengan menggunakan transformator. Itulah sebabnya maka dewasa ini saluran transmisi di dunia sebagian besar adalah saluran AC. Di dalam sistem AC ada sistem satu fasa dan sistem tiga fasa. Sistem tiga fasa mempunyai kelebihan dibandingkan dengan sistem satu fasa karena,

- a. daya yang disalurkan lebih besar,
- b. nilai sesaatnya (instantaneous value) konstan, dan
- c. mempunyai medan magnet putar.

Berhubung dengan keuntungan-keuntungannya, hampir seluruh penyaluran tenaga listrik di dunia dewasa ini dilakukan dengan arus bolak balik. Namun, sejak beberapa tahun terakhir ini penyaluran arus searah mulai dikembangkan di beberapa bagian dunia ini. Penyaluran DC mempunyai keuntungan karena misalnya, isolasinya yang lebih sederhana, daya guna (efficiency) yang lebih tinggi (karena faktor dayanya 1) serta tidak adanya masalah stabilitas, sehingga dimungkinkan penyaluran jarak jauh. Tetapi persoalan ekonominya masih harus diperhitungkan. Penyaluran tenaga listrik dengan sistem DC baru dapat dianggap ekonomis (dapat bersaing dengan sistem AC) bila jarak saluran udara lebih jauh, antara 400 sampai 600 km, atau untuk saluran bawah tanah lebih panjang dari 50 km. Ini disebabkan karena biaya peralatan pengubah dari AC ke DC dan sebaliknya (converter dan inverter equipment) mahal.<sup>1</sup>

Di dalam buku ini hanya dibicarakan sistem arus bolak balik (AC).

## 3. TEGANGAN TRANSMISI

Untuk daya yang sama, maka daya guna penyaluran akan naik oleh karena rugi-rugi transmisi turun, apabila tegangan transmisi ditinggikan. Namun, peninggian tegangan transmisi berarti juga penaikan isolasi dan biaya peralatan dan gardu induk. Oleh karena itu pemilihan tegangan transmisi dilakukan dengan memperhitungkan daya yang disalurkan, jumlah rangkaian, jarak penyaluran, keandalan (reliability),

biaya peralatan untuk tegangan tertentu, serta tegangan-tegangan yang sekarang ada dan yang direncanakan. Kecuali itu, penentuan tegangan harus juga dilihat dari segi standarisasi peralatan yang ada. Penentuan tegangan merupakan bagian dari perancangan sistem secara keseluruhan.

Meskipun tidak jelas menyebutkan keperluannya sebagai tegangan transmisi, di Indonesia, pemerintah telah menyeragamkan deretan tegangan tinggi sebagai berikut :<sup>2</sup>

Tegangan Nominal (KV) : (30) – 66 – 150 – 220 – 380 – 500.

Tegangan tertinggi untuk perlengkapan (KV) : (36) – 72,5 – 170 – 245 – 420 – 525.

Tegangan nominal 30 KV hanya diperkenankan untuk daerah asuhan di mana tegangan distribusi 20 KV tidak dipergunakan. Penentuan deretan tegangan di atas disesuaikan dengan rekomendasi International Electrotechnical Commission (IEC).

#### 4. KOMPONEN-KOMPONEN UTAMA DARI SALURAN UDARA

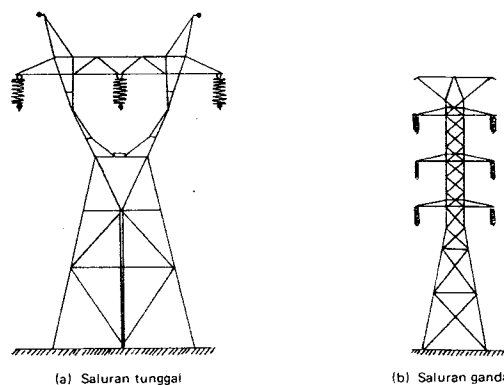
Komponen-komponen utama dari saluran transmisi terdiri dari :

- Menara transmisi atau tiang transmisi beserta fondasinya,
- Isolator-isolator,
- Kawat penghantar (conductor), dan
- Kawat tanah (ground wires).

##### 4.1. Menara atau Tiang Transmisi

Menara atau tiang transmisi adalah suatu bangunan penopang saluran transmisi, yang bisa berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang dan tiang kayu. Tiang-tiang baja, beton atau kayu umumnya digunakan pada saluran-saluran dengan tegangan kerja relatif rendah (di bawah 70 KV) sedang untuk saluran transmisi tegangan tinggi atau ekstra tinggi digunakan menara baja, lihat Gambar 1.1.

Menara baja dibagi sesuai dengan fungsinya, yaitu : menara dukung menara sudut, menara ujung, menara percabangan dan menara transposisi.



GAMBAR 1-1. Menara transmisi.

#### 4.2. Isolator-isolator

Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Menurut penggunaan dan konstruksinya dikenal tiga jenis isolator, yaitu : isolator jenis pasak, isolator jenis pos-saluran dan isolator gantung, lihat Gambar 1.2.

Isolator jenis pasak dan pos-saluran digunakan pada saluran transmisi dengan tegangan kerja relatif rendah (kurang dari 22 – 33 KV), sedang isolator gantung dapat digandeng menjadi rentengan isolator yang jumlahnya disesuaikan dengan kebutuhan.

#### 4.3. Kawat Penghantar

Jenis-jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (CU 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5% (CU 97,5%) atau aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut :<sup>5</sup>

- AAC = "All-Aluminium Conductor", yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- AAAC = "All-Aluminium-Alloy Conductor", yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
- ACSR = "Aluminium Conductor, Steel-Reinforced", yaitu kawat penghantar aluminium ber-inti kawat baja.
- ACAR = "Aluminium Conductor, Alloy-Reinforced", yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Kawat penghantar tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi kelemahannya ialah, untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium, dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan tembaga.

Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (aluminium alloy). Untuk saluran-saluran transmisi tegangan tinggi, di mana jarak antara dua tiang/menara jauh (ratusan meter), dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi. Untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR.

#### 4.4. Kawat Tanah

Kawat tanah atau "ground wires" juga disebut sebagai kawat pelindung ("shield wires") gunanya untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat-kawat fasa terhadap sambaran petir. Jadi kawat tanah itu dipasang di atas kawat fasa. Sebagai kawat tanah umumnya dipakai kawat baja (steel wires) yang lebih murah, tetapi tidaklah jarang digunakan ACSR.

4.5

### 4-3. Conductor / Penghantar

5

#### 4-1. - Penghantar Telanjang

Jenis kawat penghantar :

- Tembaga dengan konduktivitas 100 %.
- Aluminium dengan konduktivitas 61 %.

Penghantar aluminium terdiri dari :

- AAC = All Aluminium Conductor ( seluruhnya dari aluminium ).
- AAAC = All Aluminium Alloy Conductor ( seluruhnya terbuat dari campuran aluminium ).
- ACSR = Aluminium Conductor Steel Reinforced ( aluminium berinti kawat baja ).
- ACAR = Aluminium Conductor Alloy Reinforced ( aluminium yang diperkuat dengan logam campuran ).

Kawat Tembaga :

Keuntungannya adalah

- Konduktivitas besar.
- Kuat tarik lebih tinggi.

Kerugiannya adalah :

- Tahanan yang sama lebih berat.
- Harganya lebih mahal.

Untuk penghantar transmisi dan distribusi tinggi JTM/ JTR digunakan ACSR ( aluminium berinti baja ) untuk memperbesar kuat tarik.

5



## Karakteristik dari Saluran Transmisi / Distribusi

Pada jaringan transmisi / distribusi ada 4 parameter yaitu :

1. Resistansi ( tahanan )..
2. Induktansi.
3. Kapasitansi.
4. Konduktansi.

### 1. Resistansi / Tahanan ( R )

Tahanan dari conductor :

$$R_o = \rho \frac{l}{A}$$

Dimana :

$R_o$  = tahanan DC - ohm.

$\rho$  = resistivitas - ohm cmil per feet / ohm meter.

$l$  = panjang - feet/meter. ( $l$ )

$A$  = luas penampang - cmil/mm<sup>2</sup>.

Tahanan kawat berubah oleh temperatur, dalam batas temperatur 10 derajat Celsius sampai 100 derajat Celsius, untuk kawat tembaga dan aluminium berlaku :

$$R_{t_2} = R_{t_1} [ 1 + \alpha_{t_1} ( t_2 - t_1 ) ]$$

Dimana :

$R_{t_2}$  = tahanan pada temperatur  $t_2$ .

$R_{t_1}$  = tahanan pada temperatur  $t_1$ .

$\alpha_{t_1}$  = koefisien temperatur dari tahanan pada temperatur  $t_1$  derajat Celsius.

$$\text{atau} \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

Dimana :

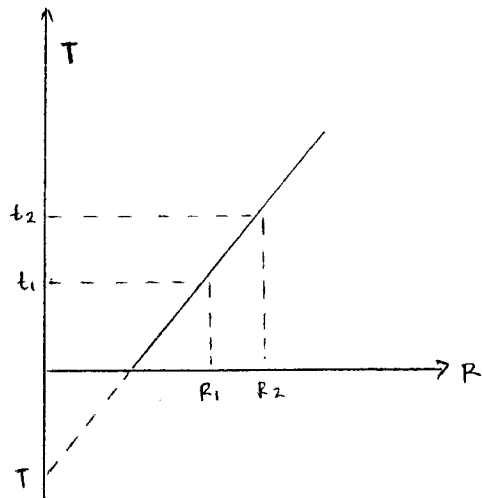
$R_2$  = tahanan pada  $t_2$ .

$R_1$  = tahanan pada  $t_1$ .

$t_1$  = temperatur.

$t_2$  = temperatur.

$T$  = Konstanta.



Harga konstanta  $T$  :

$T = 234,5 \longrightarrow \text{Cu} \longrightarrow 100 \%$

$T = 241 \longrightarrow \text{Cu} \longrightarrow 97,3 \%$

$T = 228 \longrightarrow \text{Aluminium} \longrightarrow 61,0 \%$

Contoh ( II-12 )

Hitunglah tahanan DC per mile untuk solid conductor hard drawn copper yang mempunyai luas penampang 400.000 cmil pada temperatur 25 dan 50 derajat Celsius.

Jika diketahui resistivity pada 20 derajat Celsius untuk :

- tembaga <sup>annealed</sup> = 10,37 ohm / cmil feet.

- tembaga " hard drawn " = 10,66 ohm / cmil feet.

- hard drawn aluminium = 17,00 ohm / cmil feet.

Jawab :

$l \rightarrow e$

$R_o = \frac{\rho}{A}$  ohm

$\rho = 10,66$  ohm / cmil feet.

dijadikan ohm / cmil mile.

1 mile = 1609 m.  
 1 feet = 0,3048 m.  
 1 mile = 1609 / 0,3048 feet  
 = 5279 feet.

$$\begin{aligned}
 R_0 &= \frac{P.L.}{A} \\
 &= \frac{10,66 \cdot 5279}{400.000} \\
 &= 0,14 \text{ ohm.}
 \end{aligned}$$

Tahanan DC pada temperatur 25 derajat Celsius :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

Dimana :

T = 234,5 anealed cupper.

T = 241 hard drawn cupper.

T = 228 hard drawn aluminium.

$$\frac{R_{25}}{0,14} = \frac{241 + 25}{241 + 20} \Rightarrow$$

R<sub>25</sub> derajat Celsius adalah :

$$\begin{aligned}
 &= \frac{266}{261} \times 0,14 \\
 &= \underline{\underline{0,14268 \text{ ohm / mile.}}}
 \end{aligned}$$

7

Tahanan DC pada temperatur 50 derajat Celsius :

$$R_{50} = \frac{241 + 50}{0,14 \cdot 241 + 20} \Rightarrow$$

$R_{50}$  derajat Celsius adalah

$$= \frac{291}{261} \times 0,14$$

$$= 0,156 \text{ ohm / mile.}$$

Contoh ( II-13 ) :

Hitung tahanan DC dari konduktor  $253 \text{ mm}^2$  (  $500.00 \text{ cm}^2$  ) dalam *ohm* per km pada temperatur 25 derajat Celsius menggunakan Cu 97,5 %. Jika  $\rho_{25}$  ( Cu 97,5 % ) = 1,8 mikro ohm cm.

Jawab :

$$\rho_{25} = 1,8 \text{ mikro ohm cm.}$$

$$L = 1 \text{ km} = 10^5 \text{ cm.}$$

$$A = 253 \text{ mm}^2 = 253 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2.$$

$R_{25}$  derajat Celsius adalah

$$= \frac{\rho_{25} \cdot L}{A}$$

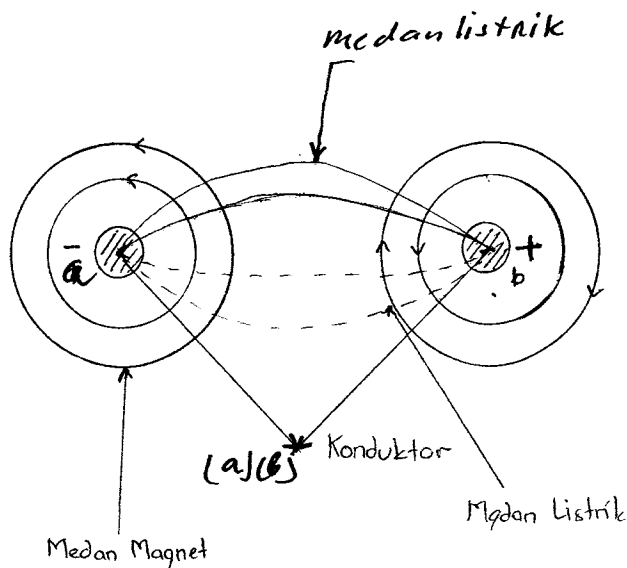
$$= \frac{1,8 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5}{253 \cdot 10^{-2}}$$

$$= 0,0711 \text{ ohm / km}$$

## 2. Induktansi, reaktansi

Arus listrik mengalir pada penghantar / kawat timbul :

- di sekitar konduktor timbul medan magnit.
- medan listrik.



Konduktor : (a) dan (b) dilalui arus.

Timbul :

- medan magnet di sekitar konduktor.
- medan listrik antara konduktor (a) dan (b).

Variasi arus yang mengalir melalui konduktor-konduktor tersebut akan mengakibatkan perubahan dari garis-garis gaya medan magnet di sekeliling konduktor.

Perubahan garis-garis gaya medan magnet akan menginduksikan tegangan pada jaringan, tegangan yang diinduksikan sebanding dengan besarnya perubahan flux tersebut.

Induktansi sifat jaringan / rangkaian yang menghubungkan tegangan yang diimbaskan oleh perubahan flux dengan kecepatan perubahan arus yang melaluinya :

$$L = \frac{\Phi}{i}$$

$\Phi = \text{flux}$

$I = \text{arus}$

Perhitungan Induktansi :

1. Satu phasa / satu group

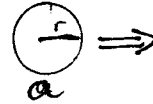
- a. Kawat solid
  - $O_a$
  - $O_b$
  - $O_c$

$$D_{aa} = D_{bb} = D_{cc} = r' = 0.7788 r \text{ (ft)}$$

$r$  = radius / jari-jari konduktor dalam feet.

Konduktor  $\Rightarrow$

$$D_{aa} = r' = 0.7788 r \text{ (ft)}$$



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

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{bc}} \text{ (ft)}$$

$$L = 0.7411 \log GMD/GMR \text{ mh / mile atau}$$

$$2.10^{-7} \ln GMD/GMR \text{ H/m}$$

$$XL = 2 \pi f L \text{ ohm/mile}$$

Dimana :

$GMR = D_s$  = Geometric Mean Radius / Radius rata-rata geometrik.

$GMD = D_m$  = Geometric Mean Distance / Jarak rata-rata geometrik.

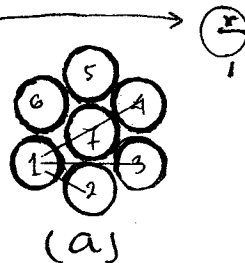
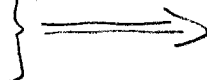
- b. Jika konduktor "stranded" dengan posisi tetap seperti diatas dan misal tiap konduktor ini ada 7 stranded

$$GMR = 0.7788 r = r' = D_{11}$$

$$D_{12} = 2r$$

$$D_{13} = 2r\sqrt{3}$$

$$D_{14} = 4r$$



Jadi matrik :  $D_{aa} = D_{bb} = D_{cc} = GMR_{\text{strand}}$

$GMR_{\text{strand}} =$

$$= \sqrt[49]{(r')^7 (D_{12}^2 \cdot D_{13}^2 \cdot D_{14}^2 \cdot D_{17})^6 \cdot (2r)^6} \text{ (ft)}$$

$$GMR = \left\{ (0.7788r)^7 (2^2 r^2 \cdot 3 \cdot 2^2 r^2 \cdot 2^2 r \cdot 2r \cdot 2r)^6 \right\}^{1/49}$$

$$= \frac{2r \{ 3(0.7788)^7 \}^{1/7}}{6^{1/49}} = 2.177.r$$

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

Mencari GMD → Sama diatas.

$$L = 0,7411 \log GMD/GMR \text{ mh/mile} \text{ atau}$$

$$2 \cdot 10^{-7} \ln GMD/GMR \text{ H/m}$$

$$XL = 2 \pi f L \text{ ohm/mil}$$

$$D_{aa} = D_{bb} = D_{cc} = GMR \text{ sendiri.}$$

$$1 \text{ cm mil} = 5,0671 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

$$1 \text{ mil} = 1/1000 \text{ inch}$$

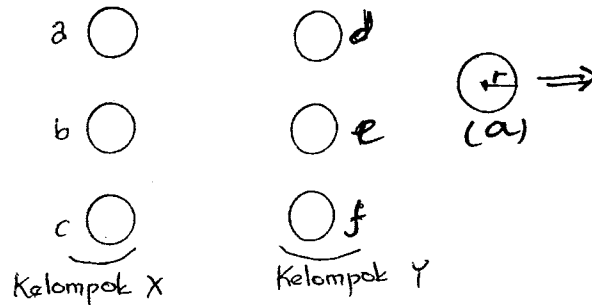
$$1 \text{ feet} = 12 \text{ inch}$$

$$1 \text{ mil} = 1609 \text{ m}$$

$$1 \text{ H (kaki)} = 0,3048 \text{ m}$$

2. Satu phasa / 2 group

a. konduktornya masing-masing solid



$$D_{aa} = r' = 0,7788 r$$

r = jari-jari konduktor

$$D_{bb} = D_{cc} = D_{dd} = D_{ee} = D_{ff} = D_{aa} = r'$$

GMD antara kelompok X dan kelompok Y

$$GMD = DM =$$

$$= \sqrt[9]{D_{ad} \cdot D_{ae} \cdot D_{af} \cdot D_{bd} \cdot D_{be} \cdot D_{bf} \cdot D_{cd} \cdot D_{ce} \cdot D_{cf}} \text{ (ft)}$$

$D_{ad}$  = jarak konduktor antara (a) dan (d) dalam (ft)

GMR untuk kelompok X

$$\text{GMR}_X =$$

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

$$D_{aa} = D_{bb} = D_{cc} = r' = 0,7788 \cdot r$$

$D_{ab}$  = jarak konduktor antara a dan b dalam (ft)

GMR untuk kelompok Y

$$\text{GMR}_Y =$$

$$= \sqrt[9]{D_{dd} \cdot D_{de} \cdot D_{df} \cdot D_{ee} \cdot D_{ef} \cdot D_{ed} \cdot D_{ff} \cdot D_{fe} \cdot D_{fd}} \quad (\text{ft})$$

$$D_{dd} = D_{ee} = D_{ff} = r' = 0,7788 \cdot r$$

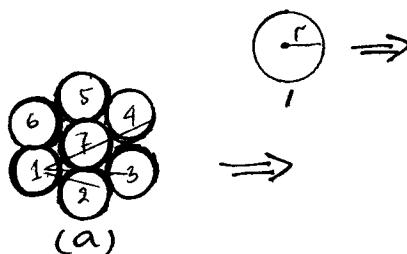
$$L_X = 0,7411 \log \text{GMD}/\text{GMR}_X \quad \text{mh/mil} \quad \text{atau} \\ 2 \cdot 10^{-7} \ln \text{GMD}/\text{GMR}_X \quad \text{H/m}$$

$$L_Y = 0,7411 \log \text{GMD}/\text{GMR}_Y \quad \text{mh/mil} \quad \text{atau} \\ 2 \cdot 10^{-7} \ln \text{GMD}/\text{GMR}_Y \quad \text{H/m}$$

$$L = L_X + L_Y$$

$$X_L = 2 \pi f L \quad \text{ohm/mil}$$

b. Konduktor stranded, misal 7 stranded posisi seperti diatas



$$D_{11} = r' = 0,7788 \cdot r$$

$$D_{12} = 2 \cdot r$$

$$D_{13} = 2 \cdot r \sqrt{3}$$

$$D_{14} = 4 \cdot r$$



Jadi untuk masing-masing konduktor ( stranded )  
dihitung GMR nya

GMR stranded ~~(konduktor)~~ =

$$= 49 \sqrt{(r')^7 (D_{12}^2 \cdot D_{13}^2 \cdot D_{14} \cdot D_{17})^6 \cdot (2r)^6} \text{ (ft)}$$

$$= 2,177 r$$

$$r' = 0,7788 r$$

untuk GMD = DM =  $D_{cq}$  = tetap tidak berubah seperti  
di atas.

GMR untuk kelompok X

$$GMR_x = \rightarrow a, b, c$$

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

$$D_{aa} = D_{bb} = D_{cc} = GMR_{\text{kond (strand)}}$$

GMR untuk kelompok Y

$$GMR_y = \rightarrow d, e, f$$

$$= \sqrt[9]{D_{dd} \cdot D_{de} \cdot D_{df} \cdot D_{ee} \cdot D_{ef} \cdot D_{ed} \cdot D_{ff} \cdot D_{fe} \cdot D_{fd}} \dots \text{ (ft)}$$

$$D_{dd} = D_{ee} = D_{ff} = GMR_{\text{kond (strand)}}$$

GMD

$$L_x = 0,7411 \log \frac{\text{GMD}}{GMR_x} \text{ . mh / mile} \Rightarrow$$

atau

$$2.10^{-7} \ln \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}_x} \cdot H / \text{mile}$$

$$L_y = 0,7411 \log \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}_y} \cdot \text{mh} / \text{mile}$$

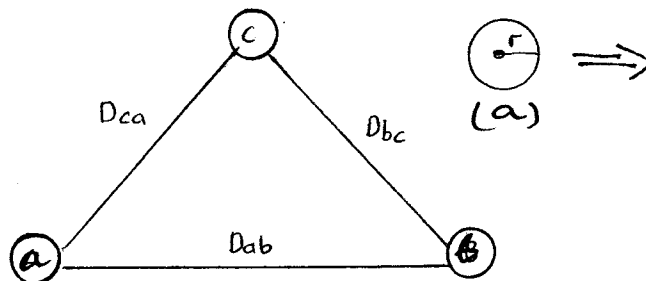
$$L = L_x + L_y \rightarrow \text{mh/mile} \text{ dirubah } H / \text{mile}$$

$$XL = 2 \pi f L \dots\dots \text{ohm/mile}$$

$\uparrow$   
*di Henry/mil*

### 3. Tiga phasa / satu group

#### a. Konduktor solid



$r$  = diameter konduktor

$$r' = 0.7788 r$$

$$\text{GMR} = D_s = r' = 0.7788 r$$

$$\text{GMD} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} \quad (\text{ft})$$

$$L = 0,7411 \cdot \log \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}} \dots\dots \text{mh/phase/mil} \rightarrow H/\text{phase/mil}$$

$L$  = induk per fasa  $\rightarrow$  jika  $r_a = r_b = r_c$  maka

$$L_a = L_b = L_c$$

$$XL = 2 \pi f L \quad \text{ohm/phase/mil}$$

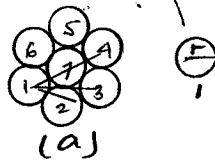
b. Konduktor 7 strand posisi sama diatas

$$r' = 0,7788 \cdot r \text{ (ft)}$$

$$D_{12} = 2 \cdot r$$

$$D_{13} = 2 \cdot r \sqrt{3}$$

$$D_{14} = 4 \cdot r$$



untuk masing-masing konduktor dihitung GMR.

GMR kond ( stranded ) =

$$= \sqrt[49]{(r')^7 (D_{12}^2 \cdot D_{13}^2 \cdot D_{14} \cdot D_{17})^6 \cdot (2r)^6 \text{ (ft)}}$$

$$= 2,177 \cdot r$$

$$r' = 0,7788 \cdot r \text{ (ft)}$$

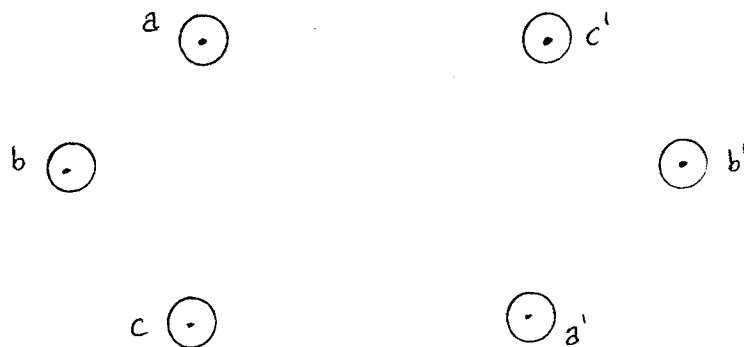
$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} \text{ (ft)}$$

$$L = 0,7411 \log GMD / GMR \text{ kond (st) - mh/phase/mil}$$

$$XL = 2 \pi f L \text{ ohm/mil/phase}$$

$$L \text{ diubah} = H/\text{phase/mil}$$

4. Jaringan tiga phasa double circuit



Bila : kawat : solid

a // a' : phasa : a

b // b' : phasa : b

c // c' : phasa : c

Untuk memperhitungkan GMD atau  $D_{eq}$  : pertama :  
 dihitung mutual GMD antara fasa : yaitu  $D_{ab}$ ,  $D_{ac}$ ,  
 $D_{bc}$  mutual GMD antara phasanya :

$$D_{ab} = \sqrt{D_{ab} \cdot D_{ab'}} \quad \text{ft} \rightarrow d_{ab} = \text{jarak a dan b}$$

$$D_{ac} = \sqrt{D_{ac} \cdot D_{ac'}} \quad \text{ft} \rightarrow d_{ac} = \text{jarak a dan c}$$

$$D_{bc} = \sqrt{D_{bc} \cdot D_{bc'}} \quad \text{ft} \rightarrow d_{bc} = \text{jarak b dan c}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{bc}} \quad \text{ft}$$

Induktansi :

$$L = 2.10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \quad \text{H / mil}$$

$$L = 0,7411 \log \frac{D_{eq}}{D_s} \quad \text{mh / mil}$$

$D_s$  adalah harga jari-jari menengah (GMR) rata-rata  
 untuk kedudukan :  $aa'$ ;  $cc'$  dan  $bb'$  dihitung sebagai  
 berikut :

$$\text{GMR}_{aa'} = \sqrt{r' d_{aa'}} \quad \text{ft} \rightarrow r' = 0,7788 r$$

$d_{aa'} = \text{jarak a dan a'}$

$$\text{GMR}_{bb'} = \sqrt{r' d_{bb'}} \quad \text{ft} \rightarrow r' = 0,7788 r$$

$d_{bb'} = \text{jarak b dan b'}$

$$\text{GMR}_{cc'} = \sqrt{r' d_{cc'}} \quad \text{ft} \rightarrow r' = 0,7788 r$$

$d_{cc'} = \text{jarak c dan c'}$

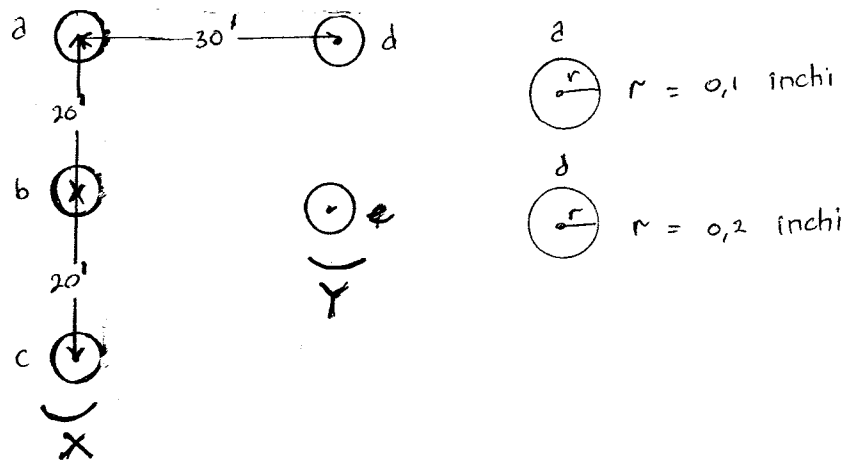
$$\text{sehingga } D_s = \sqrt{GMR_{aa'} \cdot GMR_{bb'} \cdot GMR_{cc'}}$$

Jika kawat strand / pilin berarti

$r' = GMR \text{ strand}$

Contoh ( II-14 ) :

Jaringan ~~distribusi~~ satu fasa terdiri dari 3 kawat solid masing-masing mempunyai jari-jari 0,1 inchi jaringan balikan ( return ) terdiri dari dua kawat mempunyai jari-jari 0,2 inchi Adapun susunan konduktor tersebut sebagai berikut :



Hitunglah :

Induktansi untuk setiap sisi dan induktansi untuk seluruh jaringan tersebut, jika beroperasi pada  $f = 50 \text{ Hz}$

Jawab :

GMD antara kelompok X dan Y

$$\begin{aligned} GMD &= DM = \sqrt[6]{D_{ad} \cdot D_{ae} \cdot D_{bd} \cdot D_{be} \cdot D_{cd} \cdot D_{ce}} \quad (\text{ft}) \end{aligned}$$

$$D_{ad} = D_{be} = 30 \text{ ft}$$

$$D_{ae} = D_{bd} = D_{ce} = \sqrt{20^2 + 30^2} = \sqrt{1300 \text{ ft}}$$

$$= (1300)^{1/2}$$

$$D_{ed} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \text{ ft}$$

$\nearrow D_{cd}$

$$GMD = DM = \sqrt[6]{30^2 + 50 + 1300^{3/2}} = 35.8 \text{ ft}$$

GMR = Ds untuk kelompok X

$$GMR = Ds =$$

$$= \sqrt[9]{D_{aa} \cdot D_{ab} \cdot D_{ac} \cdot D_{ba} \cdot D_{bb} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca} \cdot D_{cb} \cdot D_{ce}}$$

$$D_{aa} = D_{bb} = D_{cc} = r' = 0.7788 r$$

$$r = \text{jari-jari konduktor} = 0.1 \text{ in} = 0.1 / 12 \text{ ft}$$

$$1 \text{ ft} = 12 \text{ inch}$$

$$r' = \frac{0.7788 \cdot 0.1}{12} \text{ ft}$$

$$GMR = Ds =$$

$$= \sqrt[9]{\left[ \frac{0.7788 \cdot 0.1}{12} \right]^3 \cdot 20^4 \cdot 40^2} \text{ ft}$$

$$= 1.605 \text{ ft}$$

GMR = Ds untuk kelompok Y

$$GMR = Ds =$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt[4]{D_{dd} \cdot D_{de} \cdot D_{ee} \cdot D_{ed}} \quad (\text{ft}) \\
 D_s &= \sqrt[4]{\left[ \frac{0.7788 \cdot 0.1}{12} \right]^2 \cdot 20^2} \text{ ft} \\
 &= 0.509 \text{ ft}
 \end{aligned}$$

Induktansi

$$\begin{aligned}
 L &= 0.7411 \log \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}} \quad \text{mh/mile} \\
 &= 0.7411 \log D_m/D_s
 \end{aligned}$$

Untuk kelompok X

$$L_x = 0.7411 \log \frac{35.8}{1.605} = 1 \text{ mh/mile}$$

Untuk kelompok Y

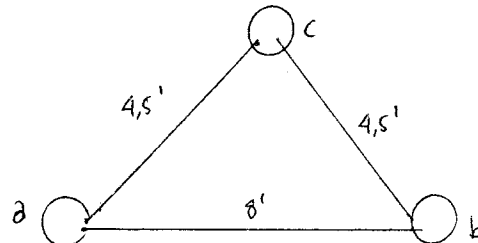
$$L_y = 0.7411 \log \frac{35.8}{0.509} = 1.38 \text{ mh/mile}$$

$$\begin{aligned}
 L &= L_x + L_y \\
 &= 1 + 1.38 \\
 &= 2.38 \text{ mh/mil}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_L &= 2\pi f L \quad \text{ohm/mil} \\
 X_L &= 2.314 \cdot 50 \cdot 2.38 \cdot 10^{-3} \text{ ohm/mil} \\
 &= \underline{\underline{0.748 \text{ ohm/mil}}}
 \end{aligned}$$

Contoh ( II-15 ) :

Suatu jaringan 3 phasa single circuit beroperasi pada  $f = 50$  HZ dengan susunan konduktor seperti dibawah setiap konduktor terdiri kawat single strand hard drawn copper dengan diameter 0,258 inch.



Hitunglah :

Induktansi dan reaktansi per phasa

Jawab :

$$GMR = D_s = 0,7788 \text{ r}$$

$$\frac{0,258 \cdot 0,7788}{2 \cdot 12} = 0,00836 \text{ ft}$$

*Karena diameter  $\rightarrow r = \frac{\text{diameter}}{2}$*

$$GMD = D_m = :$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} \text{ (ft)} \\ &= \sqrt[3]{4,5 \cdot 4,5 \cdot 8} \\ &= 5,45 \text{ ft} \end{aligned}$$

Induktansi :

$$L = 0,7411 \log \frac{GMD}{GMR}$$

$$\begin{aligned} &= 0,7411 \log 5,45 / 0,00836 \\ &= 2,083 \text{ mh/phase/mil} \end{aligned}$$



$$L = 0,7911 \log \frac{GMD}{GMR} = m$$

$$1 mH = 10^{-3} H$$

$$L = 0,7911 \log \frac{GMD \rightarrow mcm}{GMR} = mH$$

Reaktansi :

$$XL = 2 \pi f L$$

$$= 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2,083 \cdot 10^{-3}$$

$$= 0,654 \text{ ohm/phase/mil}$$

PR :

1. Pada contoh soal ( II-14 ) jika konduktor terdiri dari 7 strand, dengan jari-jari sama dan susunan sama.

Hitung : Induktansi dan reaktansi.

2. Pada contoh soal ( II-15 ) jika konduktornya terdiri dari 7 strand, sedang yang lain sama.

Tentukan : Induktansi dan reaktansi.

### 3. Kapasitansi pada Jaringan

Perbedaan potensial antara kedua konduktor pada jaringan sama halnya seperti plate kapasitor yang mempunyai perbedaan tegangan.

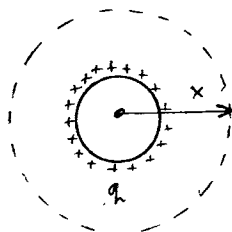
Kapasitansi diantara dua konduktor adalah pengisian per unit dari perbedaan tegangannya.

Kapasitansi dari konduktor-konduktor yang diperoleh adalah konstan tergantung dari besarnya konduktor dan jarak diantara konduktor-konduktor tersebut.

Untuk jaringan yang panjangnya < 50 mile ( 80 km ) maka kapasitansi diantara keduanya biasanya diabaikan.

Untuk jaringan yang > 50 mile ( 80 km ) dan tegangan lebih maka adanya kapasitansi perlu diperhatikan.

- Medan Listrik pada Konduktor



20

konduktor dengan panjang 1 meter, muatan konduktor tersebut =  $q$  c/m  $\rightarrow$  coulomb/meter

$x$  = jarak dari konduktor ( m ) terhadap titik tersebut.

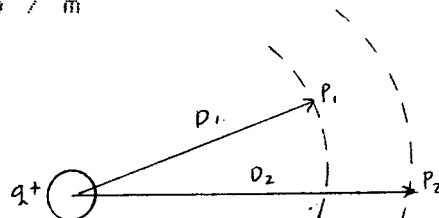
Kerapatan fluks listrik pada jarak  $x$  dari konduktor adalah :

$$D = \frac{q}{2\pi x} \quad \text{c / m}^2 \rightarrow c = \text{coulomb} \dots\dots\dots (1)$$

Intensitas medan listrik / kuat medan listrik

$$= \frac{q}{2\pi xk} \quad \text{volt/meter} \rightarrow k = \text{permitivitas} \dots\dots\dots (2)$$

- Perbedaan tegangan dua titik yang berjarak  $D_1$  dan  $D_2$  dari konduktor yang bermuatan positif sekitar  $q$  coulomb / m

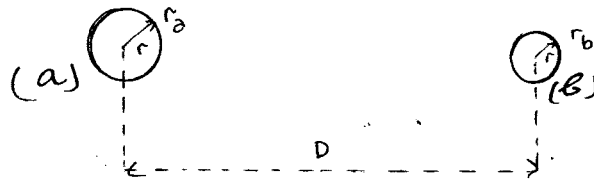


Konduktor yang bermuatan positif sebesar  $q$  coulomb/meter, dan  $P_1$ ,  $P_2$  adalah titik berjarak  $D_1$  dan  $D_2$ , maka kerja sesaat voltage drop antara  $P_1$  dan  $P_2$  adalah :

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} \sum dx = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi kx} dx = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{D_2}{D_1} \quad \text{volt} \quad (3)$$

$q$  adalah kerja muatan sesaat.

## 1. Capacitansi dari dua buah konduktor



Capacitansi diantara dua konduktor ialah muatan dari pada konduktor-konduktor tersebut per unit perbedaan potensial diantara konduktor tersebut.

Maka persamaan capacitansi per unit panjang :

$$c = q / v \text{ farad/meter} \quad (4)$$

Dimana :

$c$  = capacitansi.

$q$  = muatan konduktor ( c/m ).

$v$  = perbedaan tegangan diantara kedua konduktor tersebut ( volt ).

Berdasarkan persamaan ( 3 ) maka beda tegangan antara konduktor a dan b adalah :

$$V_{ab} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \frac{D}{r_a} + \frac{q_b}{2\pi k} \ln \frac{D}{r_b} \dots \text{ volt}$$

karena  $q_a$       karena  $q_b$

dan jika  $q_a = -q_b$  untuk kedua konduktor tersebut

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

$$V_{ab} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \left( \frac{D^2}{r_a \cdot r_b} \right) \text{ volt}$$

Kapasitansi antara dua konduktor tersebut adalah

$$C_{ab} = \frac{q_a}{V_{ab}} = \frac{2\pi k}{D^2 \ln \frac{r_b}{r_a}} \text{ farad / meter ... ( 5 )}$$

Permeativitas ruano bebas :

$$K_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ farad/meter}$$

Permeativitas relatif :

$$K_r = k / k_0$$

Untuk persamaan ( 5 ) jika  $K_r = 1$  maka

$$C_{ab} = \frac{0.0388}{D^2 \ln \frac{r_b}{r_a}} \mu F / \text{mile}$$

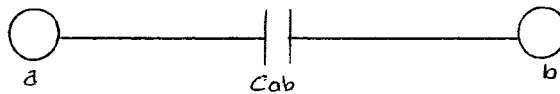
Jika  $r_a = r_b$  maka :



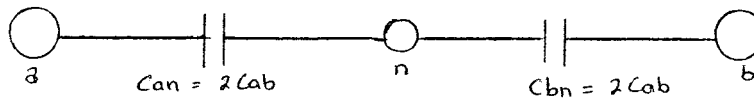
$$C_{ab} = \frac{0.0388}{2 \log \frac{D}{r}} = \frac{0.0194}{\log \frac{D}{r}} \mu F / \text{mile .. ( 6 )}$$

Persamaan ( 6 ) jika dipakai untuk menghitung kapasitansi diantara konduktor pada jaringan dua kawat.

Jika dua kawat dan ditengahnya terdapat kawat neutral maka :



Kapasitansi phasa dengan phasa



Kapasitansi phasa dengan neutral

$$C_n = C_{an} = C_{bn} = \frac{0.0388}{\log\left(\frac{D}{r}\right)} \mu F / \text{mile to neutral}$$

Persamaan diatas dipakai jika muatan listrik pada konduktor adalah uniform, tetapi jika tidak uniform maka dipakai rumus :

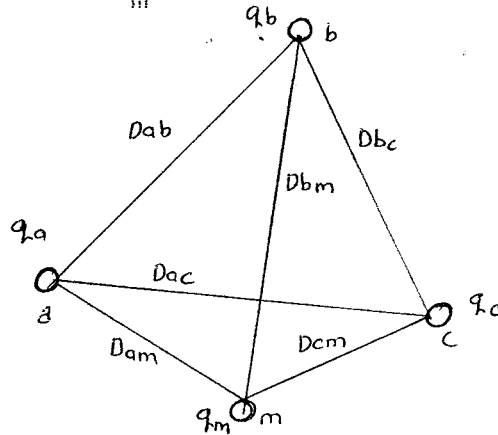
$$C_n = \frac{0.0388}{\log\left(\frac{D}{2r} + \sqrt{\frac{D^2}{4r^2} - 1}\right)} \mu F / \text{mile to neutral}$$

Sehingga reaktansi antara phasa to neutral dapat dihitung dengan rumus

$$X_C = 1 / 2\pi f C$$

$$= \frac{4,093}{f} \cdot 10^6 \log \frac{D}{r} \text{ ohm / mile to neutral}$$

2. Beda tegangan antara dua konduktor yang terletak pada satu group konduktor yang bermuatan  
 Konduktor : a, b, c, ... m dengan  
 $r_a, r_b, r_c, \dots, r_m$



$q_a$  = muatan konduktor a ( c / m ).  
 $q_b$  = muatan konduktor b.  
 $q_c$  = muatan konduktor c.  
 $q_m$  = muatan konduktor m.

Beda tegangan antara konduktor (a) dan (b)

$$V_{ab} =$$

$$= \frac{1}{2\epsilon k} (q_a \ln \frac{D_{ab}}{r_a} + q_b \ln \frac{r_b}{D_{ba}} + q_c \ln \frac{cb}{D_{ca}} + \dots + q_m \ln \frac{D_{mb}}{D_{ma}})$$

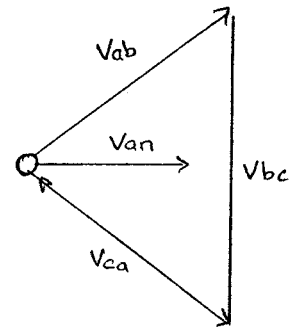
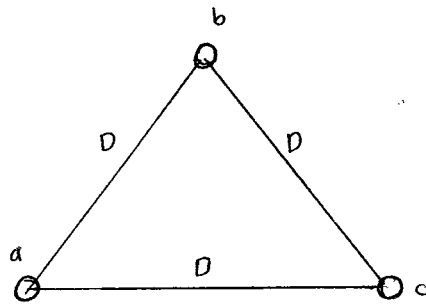
$$V_{ac} =$$

$$= \frac{1}{2\epsilon k} (q_a \ln \frac{D_{ac}}{r_a} + q_b \ln \frac{D_{bc}}{D_{ba}} + q_c \ln \frac{r_c}{D_{ca}} + \dots + q_m \ln \frac{D_{mc}}{D_{ma}})$$

$$V_{am} =$$

$$= \frac{1}{2\epsilon k} (q_a \ln \frac{D_{am}}{r_a} + q_b \ln \frac{D_{bm}}{D_{ba}} + q_c \ln \frac{D_{cm}}{D_{ca}} + \dots + q_m \ln \frac{r_m}{D_{ma}})$$

Kapasitansi untuk jaringan 3 phase yang jarak antara konduktor sama



Beda tegangan antara a dan b

Vektor diagram

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

Beda tegangan antara a dan c

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} \left( q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{D}{D} + q_c \ln \frac{r}{D} \right) \text{ volt}$$

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} \left[ 2 q_a \ln \frac{D}{r} + (q_b + q_c) \ln \frac{r}{D} \right] \text{ volt}$$

Jika dianggap tidak ada muatan lain disekitar konduktor tersebut, maka jumlah muatan pada 3 konduktor tersebut adalah nol : dan  $-q_a = q_b + q_c$  .... jadi

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{3q_a}{2\pi K} \ln \frac{D}{r} \text{ ..... volt}$$

Dari gambar vektor diagram dapat dilihat bahwa

$$\begin{aligned} V_{ab} &= \sqrt{3} V_{an} (0,866 + j 0,5) \\ V_{ac} &= -V_{ca} = \sqrt{3} V_{an} (0,866 - j 0,5) \\ V_{ab} + V_{ac} &= 3 V_{an} \end{aligned}$$

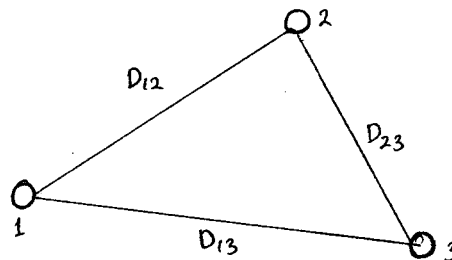
$$V_{an} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \frac{D}{r} \text{ volt}$$

$$C_n = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi k}{\ln D/r} \text{ Farad / m}$$

Jika  $k r = 1$  maka :

$$C_n = \frac{0,038}{\log D/r} \mu F / \text{mile} \text{ atau } \frac{2\pi k}{\ln(D/r)} F / \text{meter}$$

3. Kapasitansi untuk jaringan 3 phase dengan jarak antara konduktor tidak sama.



Jika kedudukan dari konduktor seperti di atas maka beda tegangan diantara konduktor dihitung seperti dalam keadaan transposisi dalam 3 konduktor berbeda.

Pada kondisi a pada 1 : b pada posisi 2 : c pada posisi 3

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left( q_a \ln \frac{D_{12}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{12}} + q_c \ln \frac{D_{23}}{D_{21}} \right) \cdot \text{volt}$$



Pada kondisi a pada 2: b pada posisi 3 dan c pada posisi 1

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left( q_a \ln \frac{D_{23}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{23}} + q_c \ln \frac{D_{31}}{D_{12}} \right) \text{ volt}$$

Pada kondisi a pada 3: b pada posisi 1 dan c pada posisi 2

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left( q_a \ln \frac{D_{31}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{31}} + q_c \ln \frac{D_{12}}{D_{23}} \right) \text{ volt}$$

$V_{ab}$  rata-rata dengan anggapan bahwa sama muatan untuk semua konduktor sama dengan memperlakukan seperti pada transposisi maka  $V_{ab}$  rata-rata dapat dihitung

$$V_{ab} = \frac{1}{6\pi k} \left( q_a \ln \frac{D_{12} D_{23} D_{31}}{r^3} + q_b \ln \frac{r^3}{D_{12} D_{23} D_{31}} + q_c \ln \frac{D_{12} D_{23} D_{31}}{D_{12} D_{23} D_{31}} \right)$$

$$= \frac{1}{2\pi k} \left( q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{eq}} \right) \text{ volt}$$

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

Dengan cara yang sama maka beda tegangan antara a dan c.

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} \left( q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_c \ln \frac{r}{D_{eq}} \right) \text{ volt}$$

$$3 V_{an} = V_{ab} + V_{ac}$$

$$= \frac{1}{2\pi k} \left( 2q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{eq}} + q_c \ln \frac{r}{D_{eq}} \right)$$

Untuk iaringan 3 phase yang seimbang maka  $q_a + q_b + q_c = 0$

$$3 V_{an} = \frac{3}{2\pi k} q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} \text{ volt dan}$$

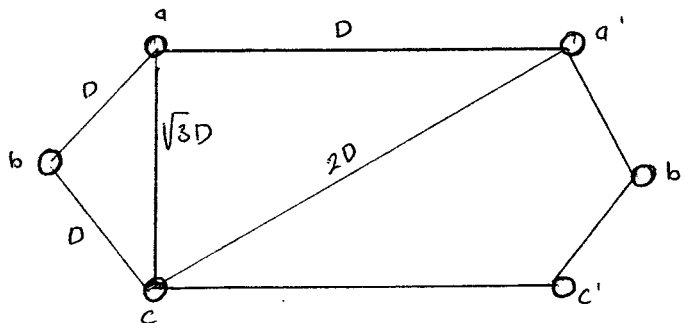
$$C_n = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi k}{\ln(D_{eq}/r)} \text{ Farad / meter to netral}$$

Untuk  $k = 1$

$$D_{eq} = \sqrt{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ac}}$$

$$C_n = \frac{0,0388}{\log(D_{eq}/r)} \mu F / \text{mile to netral}$$

#### 4. Kapasitansi iaringan 3 phase double circuit



$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} \left[ q_a \left( \ln \frac{D}{r} + \ln \frac{\sqrt{3}}{2} + q_b \left( \ln \frac{r}{D} + \ln \frac{2}{\sqrt{3}} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + q_c \left( \ln \frac{1}{\sqrt{3}} + \ln \sqrt{3} \right) \right] \right]$$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi k} (q_a - q_b) \ln \frac{\sqrt{3} D}{2r} \text{ volt}$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi k} (q_a - q_c) \ln \frac{\sqrt{3} D}{2r} \text{ volt}$$

$$V_{ab} + V_{ac} = 3 V_{an} = \frac{1}{2\pi k} (2q_a - q_b - q_c) \ln \frac{\sqrt{3} D}{2r} \text{ volt}$$

$$q_a + q_b + q_c = 0 \\ 3 V_{an} = \frac{3 q_a}{2\pi k} \ln \frac{\sqrt{3} D}{2r} \text{ volt}$$

maka:

$$C_n = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi k}{\ln \frac{\sqrt{3} D}{2r}} \text{ F / meter / cond netral}$$

$$C_n = \frac{0.0388}{\log \frac{\sqrt{3} D}{2r}} \mu F / \text{mile} / \text{cond to netral}$$

Persamaan diatas adalah kapasitansi untuk tiap kon-  
duktor. sedangkan tiap phase ada 2 konduktor. Jadi  
besar kapasitansi per phase adalah dua kalinya.

$$C_n = 2 \cdot \frac{0,0388}{\log \frac{\sqrt{3} D}{2r}} \quad \mu F / \text{mile} / \text{phase} / \text{to netral}$$

Contoh ( II-16 ) :

Hitunglah capacitive susceptance per mile iaringan  
single phase yang terdiri dari 2 konduktor dengan  
frekuensi 50 CPS. Masing konduktor hard drawn  
copper dengan jarak 18 ft dan diameter konduktor  
0,368 inc

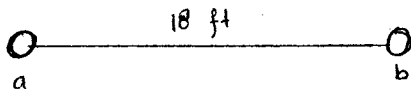
Jawab :

*satuan ft  $\rightarrow$   $\mu F/\text{mile}$*

Diameter : 0,368 inc

0,368

$$r = \frac{0,368}{2 \times 12} = 0,0153 \text{ ft}$$



Capasitansi iaringan :

$$C_{ab} = \frac{0,0388}{2 \log \frac{D}{r}} = \frac{0,0194}{\log \frac{D}{r}} \quad \mu F / \text{mile}$$

$$D = D_{ab} = 18 \text{ ft}$$

$$C_{ab} = \frac{0.0194}{18} = 0.0063 \text{ } \mu\text{F / mile}$$

$$= 0.0063 \cdot 10^{-6} \text{ F/mile}$$

Reaktansi kapasitansi iaringan

$$X_C = \frac{1}{2\pi f c} = \frac{1 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,0063} = 0,505 \cdot 10^6 \text{ } \Omega/\text{mil to netral}$$

Subseptance Reaktansi ( Y )

$$Y = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{0,505 \cdot 10^6} = 1,98 \cdot 10^{-6} \text{ mho/mile}$$

Reaktansi capacitive dan suceptansi capacitive  
line to line

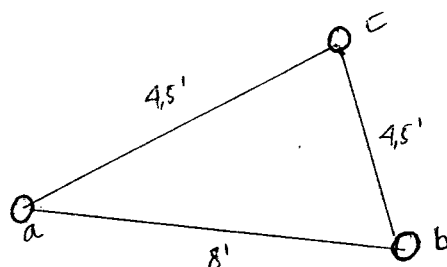
$$X_C = 2 \cdot 0,505 \cdot 10^6 = 1.1 \cdot 10^6 \text{ ohm / mile}$$

$$Y = \frac{1,98 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,99 \cdot 10^{-6} \text{ mho/mile}$$

Contoh ( II-17 ) :

Jaringan 3 phase dengan konfigurasi seperti gambar.  
Masing-masing konduktor terdiri #2 single starnd  
hard drawn ceeper diameter #2 = 0.258 inc

Hitunglah : Kapasitansi dan reaktansi ?



Jawab :

$$r = \frac{0,258}{2} = 0,129 \text{ ft}$$

$$D_{eo} = \sqrt[3]{\frac{2 \times 12 \times \text{diameter}}{2}} = \sqrt[3]{4,5 \times 4,5 \times 8} = 5,45 \text{ ft}$$

Capasitansi :

$$C_n = \frac{0,0388}{\log \frac{D_{eo}}{r}} \text{ } \mu\text{F / mile to netral}$$

$$= \frac{0,0388}{\log \frac{5,45}{0,129}} = 0,01438 \text{ } \mu\text{F / mil to netral}$$

Reaktansi

$$X_c = \frac{1}{2 \pi f c} = \frac{10^6}{2 \times 3,14 \times 50 \times 0,01438} = 0,221 \times 10^6 \text{ ohm/mil to netral}$$

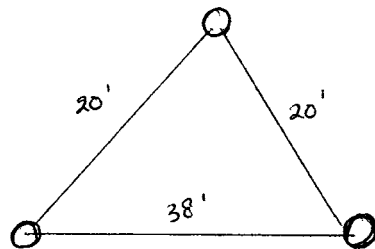
Substansi

$$Y = \frac{1}{X_c} = \frac{1}{0,221 \times 10^6} = 4,5248 \times 10^{-6} \text{ ohm/mil to netral}$$

FR :

1. Carilah kapasitansi dan reaktansi kapasitif untuk 1 mil saluran konfigurasi seperti dibawah. Jika panjang saluran 175 mil. dan  $f = 60$  CPS.

Tentukan reaktansi kapasitif to netral untuk saluran



diameter konduktor

$$= 1.108 \text{ inc}$$

2. Carilah substansi kapasitif per mil saluran phase tunggal dengan  $f = 60$  Hz. Penghantarnya partidge dan jarak pemisahannya adalah 20 kaki antara pusatnya

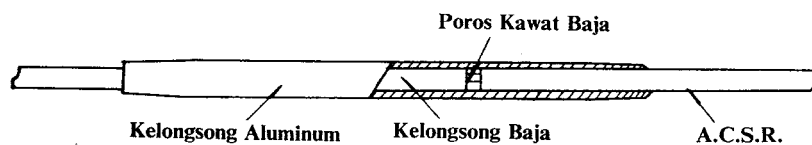
Dengan diameter konduktor 0.642 inc

## 2.4.6 Perlengkapan Penghantar

### 2.4.1. Sambungan Penghantar (Joints)

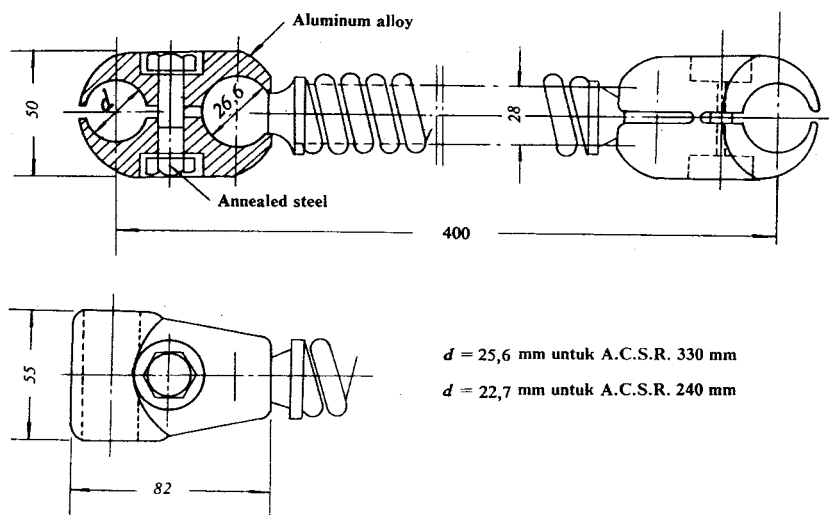
Sambungan (joints) penghantar harus mempunyai konduktivitas listrik yang baik serta kekuatan mekanis dan ketahanan (durability) yang tangguh. Sambungan-sambungan yang biasanya dipakai adalah:

- (1) Sambungan kompresi: Di sini kelongsong (sleeves) sambungan yang terbuat dari bahan yang sama dengan penghantar dipasang pada sambungan penghantar dengan tekanan minyak; periksa Gbr. 8. Cara ini dapat diandalkan dan banyak dipakai untuk penghantar-penghantar berukuran besar.



Gbr. 8 Sambungan Kompresi untuk A.C.S.R.

- (2) Sambungan belit: Dalam hal ini penghantar-penghantar yang hendak disambung dimasukkan dalam kelongsong berbentuk bulat telur yang kemudian dibelit beberapa kali dengan 1-unci belit (twisting wrench). Karena pengerjaannya sederhana dan mudah, cara ini banyak dipakai untuk kawat lilit dengan penampang kurang dari 125 mm<sup>2</sup>.
- (3) Sambungan untuk penghantar yang berlainan: apabila permukaan kontak antara dua penghantar yang berlainan jenis basah, maka salah satu penghantar akan berkarat. Oleh karena itu digunakan kelongsong khusus dengan logam tertentu untuk memungkinkan disambungannya dua penghantar tadi.



Gbr. 9 Perentang Per jenis Ball & socket untuk Kawat-Berkas.



6.

**2.4.2. Perentang (Spacer)**

Untuk sistim kawat-berkas, dipasang perentang (spacer) untuk menghindarkan agar kawat-kawat penghantar dalam satu fasa tidak mendekat atau bertumbukan karena gaya-gaya elektromekanis atau angin, periksa Gbr. 9. Perentang ini dipasang pada jarak 15–40 m satu sama lain di dekat tiang-tiang penunjang dan 60–80 m di tengah rentangan (midspan).

6

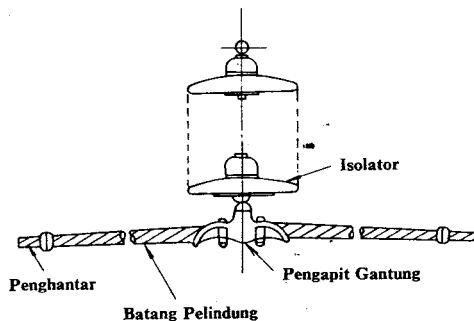
**2.4.3. Batang-batang Pelindung (Armor Rods)**

Guna menghindarkan kelelahan penghantar karena getaran (vibration fatigue) maka dipasang batang-batang pelindung (armor rods) sebagai penguatan di tempat penghantar digantungkan. Bentuk batang-batang ini terlihat pada Gbr. 10.

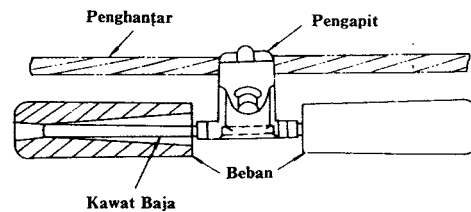
6

**2.4.4. Peredam (Dampers)**

Peredam (dampers) dipasang dekat pengapit (clamps) untuk menghindarkan kelelahan kawat-kawat komponen karena getaran (vibration). Banyak jenis peredam yang dikenal, antara lain, Stockbridge (Gbr. 11), torsional, dsb.



Gbr. 10 Batang Pelindung.



Gbr. 11 Peredam Stockbridge.

**2.5 Referensi**

Di dalam Bab 2 digunakan referensi terhadap sumber-sumber dari luar sebagai berikut:

- 1) J. G. Anderson et al, "Ultrahigh-Voltage Power Transmission", *Proceedings IEEE*, vol. 59, No. 11, November 1971, hal. 1548–1556.
- 2) Study Committee, *Research Report concerning Improvement of Power Transmission Function*, vol. 1 (Overhead Transmission Lines), Central Research Institute of Electric Power Industry (Japan), 1965, hal. 15.
- 3) *Handbook of Electrical Engineering*, Institute of Electrical Engineers of Japan, 1967, hal. 357.

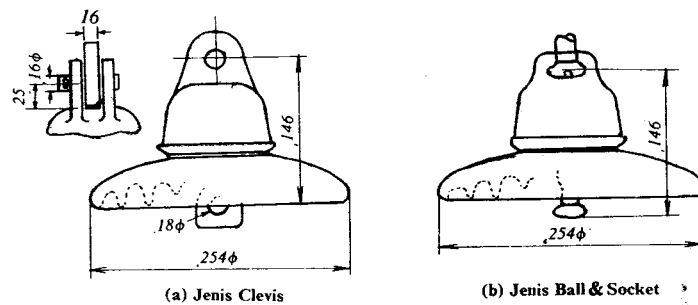
## BAB 3. ISOLATOR PORSELIN

### 2.1 Jenis Isolator Porselin

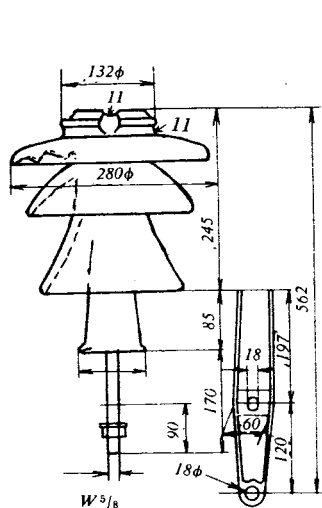
Isolator untuk saluran transmisi diklasifikasikan menurut penggunaan dan konstruksinya menjadi *isolator gantung* (suspension), jenis pasak (pin-type), jenis batang panjang (long-rod) dan jenis pos-saluran (line post).

Gandengan *isolator gantung* pada umumnya dipakai pada saluran transmisi tegangan tinggi, sedang isolator batang-panjang dipakai di tempat-tempat dimana pengotoran udara karena garam dan debu banyak terjadi. Kedua jenis yang lain dipakai pada saluran transmisi yang relatif rendah (kurang dari 22–33 kV).

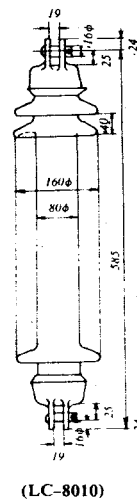
Pada isolator gantung dikenal dua jenis, yakni clevis type dan ball-and-socket type, yang masing-masing terbuat dari porselin dengan tutup (cap) dari besi tempaan (malleable iron) di satu pihak dan pasak baja di lain pihak, yang keduanya diikatkan pada



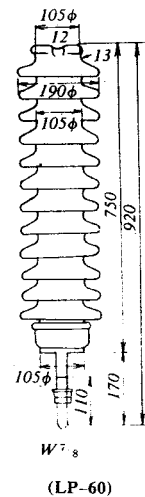
Gbr. 12 Isolator Gantung 250 mm.



Gbr. 13 Isolator Jenis Pasak.



Gbr. 14 Isolator Batang Panjang.



Gbr. 15 Isolator Pos Saluran.

porselinnya dengan semen berkwalitas baik. Ukuran yang dikenal adalah dengan piringan bergaris-tengah 250 mm (di Jepang ukuran standar), 180 mm, 280 mm, dan 320 mm, masing-masing dengan gaya mekanis 12000 kg dan 16500 kg (standar), 6000 kg, 21000 kg dan 30000 kg. Isolator gantung digandeng-gandengkan menurut kebutuhan isolasi karena tegangannya.

Jenis *pasak* dan *line-post* terbuat dari porselin, yang bagian bawahnya diberi tutup (thimble, cap) besi cor yang disemenkan pada porselin serta pasak baja yang disekrupkan padanya. Karena jenis-jenis ini dipakai sendiri (tidak dalam gandengan) serta kekuatan mekanisnya rendah, maka mereka tidak dibuat dalam ukuran-ukuran yang besar.

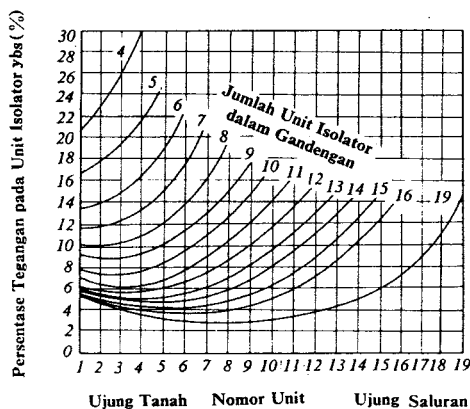
Jenis *batang-panjang* mempunyai sedikit bagian logam sehingga tidak mudah menjadi rusak. Oleh karena rusuknya yang sederhana maka ia mudah tercuci oleh hujan, sehingga jenis ini sesuai sekali untuk penggunaan pada tempat-tempat yang banyak dikotori garam dan debu.

## 3.2 Karakteristik Isolator

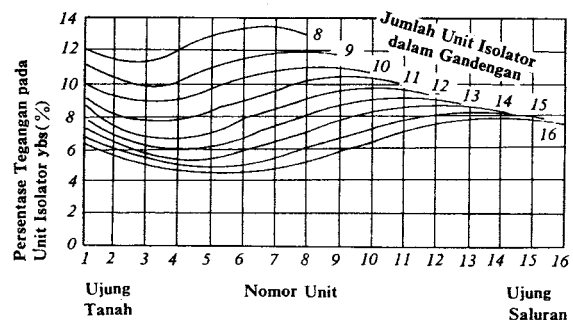
### 3.2.1. Karakteristik Listrik

Isolator terdiri dari badan porselin yang diapit oleh elektroda-elektroda. Dengan demikian maka isolator terdiri dari sejumlah *kapasitansi*. Kapasitansi ini diperbesar oleh terjadinya lapisan yang menghantarkan listrik karena kelembaban udara, debu dan bahan-bahan lainnya pada permukaan isolator tersebut. Karena kapasitansi ini, maka distribusi tegangan pada sebuah gandengan isolator tidak seragam. Potensial pada bagian yang terkena tegangan (ujung saluran) adalah paling besar; periksa Gbr. 16. Dengan memasang tanduk busur api (arcing horn), maka distribusi tegangan diperbaiki; periksa Gbr. 17.

*Tegangan lompatan api* (flashover voltage) pada isolator terdiri atas tegangan-tegangan lompatan api frekwensi rendah (bolak-balik), impuls dan tembus dalam minyak (bolak-balik frekwensi rendah). Tegangan lompatan api frekwensi rendah kering adalah tegangan lompatan api yang terjadi bila tegangan diterapkan di antara kedua elektroda isolator yang bersih dan kering permukaannya; nilainya konstan serta merupakan nilai



Gbr. 16 Distribusi Tegangan pada Gandengan Isolator (Tanpa Tanduk Busur Api).



Gbr. 17 Distribusi Tegangan pada Gandengan Isolator (Dengan Tanduk Busur Api).

dasar dari karakteristik isolator. Tegangan lompatan api basah adalah tegangan lompatan api yang terjadi bila tegangan diterapkan di antara kedua elektroda isolator yang basah karena hujan, atau dibasahi untuk menirukan keadaan hujan. Di Jepang, tahanan jenis (specific resistance, resistivity) air yang dipakai adalah  $10000 \Omega\text{cm}$  dan jumlah penyiramannya 3 mm/menit.<sup>1)</sup>

Tegangan lompatan api impuls adalah tegangan lompatan api yang terjadi bila tegangan impuls dengan gelombang standar diterapkan. Di Jepang gelombang ini adalah  $1,5 \times 40 \mu\text{s}$ ;<sup>2)</sup> menurut International Electrotechnical Commission gelombangnya adalah  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ .<sup>3)</sup> Karakteristik impuls terbagi atas polaritas positif dan negatif. Biasanya, tegangan dengan polaritas positif (yang memberikan nilai lompatan api yang lebih rendah) yang dipakai. Untuk polaritas positif tegangan lompatan api basah dan kering sama.

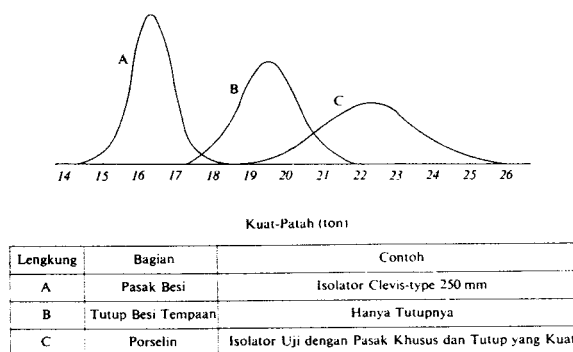
Tegangan tembus (puncture) frekwensi rendah menunjukkan kekuatan dielektrik dari isolator, dan terjadi bila tegangan frekwensi rendah diterapkan antara kedua elektroda isolator yang dicelup dalam minyak sampai isolator tembus. Untuk isolator dalam keadaan baik tegangan tembus ini lebih tinggi dari tegangan lompatan api frekwensi rendah, dan nilainya kira-kira 140 kV untuk isolator gantung 250 mm.

### 2.2.2. Karakteristik Mekanis

Kecuali harus memenuhi persyaratan listrik tersebut di atas, isolator harus memiliki kekuatan mekanis guna memikul beban mekanis penghantar yang diisolasiannya. Porselin, sebagai bagian utama sebuah isolator, mempunyai sifat sebagai besi cor, dengan kuat-tekan (compressive strength) yang besar dan kuat-tarik (tensile strength) yang lebih kecil. Kuat-tariknya biasanya  $400\text{--}900 \text{ kg/cm}^2$ , sedang kuat-tekannya 10 kali lebih besar.<sup>1)</sup>

Porselin harus bebas dari lubang-lubang (blowholes), goresan-goresan, keretakan-keretakan, dsb., serta mempunyai ketahanan terhadap perubahan suhu yang mendadak dan tumbukan-tumbukan dari luar.

Gaya-tarik terhadap isolator yang telah dipasang relatif besar, sehingga kekuatan porselin dan bagian-bagian yang disemenkan padanya harus dibuat lebih besar dari kekuatan bagian-bagian logamnya, periksa Gbr. 18.



Gbr. 18 Diagram Distribusi Kekuatan Mekanis pada Isolator Gantung 250 mm.

Kekuatan mekanis dari isolator gantung dan isolator batang-panjang (long-rod) harus diuji untuk mengetahui kemampuan mekanis dan keseragamannya. Kekuatan jenis pin-type dan line-post ditentukan oleh kekuatan pasaknya (pin) terhadap momen tekukan (bending moment) oleh penghantar. Pengujian kekuatannya karena itu dilakukan dengan memberikan beban kawat secara lateral terhadap pasak.

Karakteristik listrik dan mekanis dari isolator gantung, isolator jenis pin, jenis long-rod dan jenis line-post menurut standar Jepang tertera dalam Tabel 12, 13, 14, dan 15.<sup>4-7)</sup>

Dalam perencanaan isolasi saluran transmisi udara, tegangan lebih merupakan faktor penting. Di tempat-tempat dimana pengotoran udara tidak mengkhawatirkan, surja-hubung (switching-surge) merupakan faktor penting dalam penentuan jumlah isolator dan jarak isolasi. Karakteristik lompatan-api dari surja-hubung lain dari karakteristik frekwensi rendah dan impuls. Contoh karakteristik lompatan-api untuk isolator gantung 250 mm terlihat pada Gbr. 19.

**Tabel 12. Karakteristik Lompatan Api Isolator Gantung 250 mm<sup>5, 6)</sup>**

Jumlah Piringan	Tegangan Lompatan Api Frekwensi Rendah (kV)		Tegangan Lompatan Api Impuls 50% (kV)	
	Kering	Basah	Positif	Negatif
2	155	90	255	255
3	215	130	355	345
4	270	170	440	415
5	325	215	525	495
6	380	255	610	585
7	435	295	695	670
8	485	335	780	760
9	540	375	860	845
10	590	415	945	930
11	640	455	1025	1015
12	690	490	1105	1105
13	735	525	1185	1190
14	785	565	1265	1275
15	830	600	1345	1360
16	875	635	1425	1440
17	920	670	1505	1530
18	965	705	1585	1615
19	1010	740	1665	1700
20	1055	775	1745	1785
21	1100	810	1825	1870
22	1145	845	1905	1955
23	1190	880	1985	2040
24	1235	915	2065	2125
25	1280	950	2145	2210

Catatan: Clevis Type (JIS C 3810): Kekuatan Elektro-Mekanis: 12.000 kg; Ball & Socket Type (JIS C 3817): 16.500 kg

Tabel 13. Karakteristik Isolator Jenis Pasak<sup>7)</sup> (Pin Type)

Model	Tegangan Nominal (kV)	Jumlah Kupingan (Shed) Porselin	Diameter Maksimum (mm)	Tinggi		Tegangan Lompatan Api Frekwensi Rendah		Tegangan Lompatan Api Impuls 50% (kV)	Kuat-Pancang (Cantilever) (kg)	Berat dengan Barang Besi (kg)
				Minimum (mm)	Maksimum (mm)	Kering	Basah			
10	11	2	200	120	210	85	55	120	700	3,4
20	22	3	240	245	265	110	75	160	700	6,4
30	33	3	300	310	330	135	95	200	700	11,5
40	—	3	350	375	400	160	115	240	850	17,0
50	—	4	400	435	465	185	135	280	850	26,0
60	66	4	430	490	515	210	155	320	1.000	38,5

Tabel 14. Karakteristik Isolator Jenis Batang-Panjang (Long-Rod)<sup>7)</sup>

Model	Tegangan Nominal (kV)	Panjang (mm)	Jumlah Kupingan (Shed)	Diameter Kupingan (mm)	Diameter Badan (mm)	Tegangan Lompatan Api Frekwensi Rendah		Tegangan Lompatan Impuls 50% Flash-over (kV)	Kuat-Patah (kg)	Berat (kg)
						Kering (kV)	Basah (kV)			
LC-6505	22	385	5	145	65	115	65	170	7,500	7
LC-6507	33	485	7	145	65	150	95	230	7,500	9
LC-6510	66	585	10	145	65	185	125	290	7,500	10
LC-8005	22	385	5	160	80	115	65	170	12,000	10
LC-8007	33	485	7	160	80	150	95	230	12,000	12
LC-8010	66	585	10	160	80	185	125	290	12,000	14
LC-8013	77	725	13	160	80	235	160	380	12,000	18
LC-8017	77	875	17	160	80	285	200	470	12,000	22
LC-8021	110	1,025	21	160	80	335	240	560	12,000	26
LC-8024	110	1,175	24	160	80	385	280	650	12,000	29

Catatan: Isolator di atas mempunyai clevis (cantolan) pada kedua ujungnya. Ada jenis yang lain (LE) dengan clevis pada satu ujung dan mata pada ujung yang lain.

Tabel 15. Karakteristik Isolator Jenis Pos Saluran (Line Post)<sup>8)</sup>

Model	Tegangan Nominal (kV)	Jumlah Kupingan (Shed)	Diameter Kupingan (mm)	Diameter Badan (mm)	Tinggi (mm)	Tegangan Lompatan Api Frekwensi Rendah		Tegangan Lompatan Impuls 50% (kV)	Kuat-Pancang (Cantilever) (kg)	Berat (kg)
						Kering (kV)	Basah (kV)			
LP-10	11	4	145	65	240	80	50	120	700	5,7
LP-20	22	6	150	70	325	105	75	165	700	7,7
LP-30	33	8	160	80	420	135	100	220	700	11,5
LP-40	—	10	165	85	515	170	125	275	700	16,1
LP-60	66	12	190	105	740	240	180	385	700	27,6
LP-70	77	14	190	105	610	280	210	440	700	31,3

### 2.2.3. Pengujian Isolator

Pengujian (testing) pada isolator terdiri dari:

- (1) Pengujian konstruksi.
- (2) Pengujian semu (appearance).
- (3) Pengujian listrik.
- (4) Pengujian mekanis.
- (5) Pengujian elektromekanis.
- (6) Pengujian termis.
- (7) Pengujian keporian (porosity).
- (8) Pengujian galvanisasi.

Dalam pembelian isolator, perlu dilakukan pengujian jenis dan pengujian penerimaan (acceptance) sesuai dengan cara-cara yang berlaku.

## 2.3 Pasangan Isolator

Dalam kategori pasangan isolator (fittings) termasuk pasangan-pasangan logam dan perlengkapan-perengkapan lainnya guna menghubungkan penghantar, isolator dan tiang transmisi.

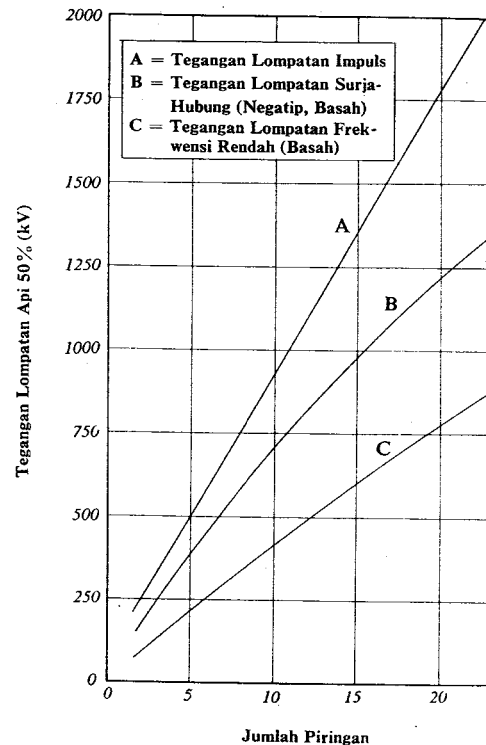
### 2.3.1. Pasangan Isolator

Pasangan isolator terbuat dari besi atau baja tempaan (malleable) yang ukurannya disesuaikan dengan tegangan, jenis dan ukuran penghantar, kekuatan mekanisnya, serta konstruksi penopangnya (supporting structure). Dengan demikian maka dikenal baut-U, klevis (clevis), link, mata (eye), ball and socket (bola-dan-lekuk), dsb., yang mudah dihubungkan, dan mudah dipertukarkan; periksa Gbr. 20. Permukaan pasangan logam ini biasanya digalvanisasikan.

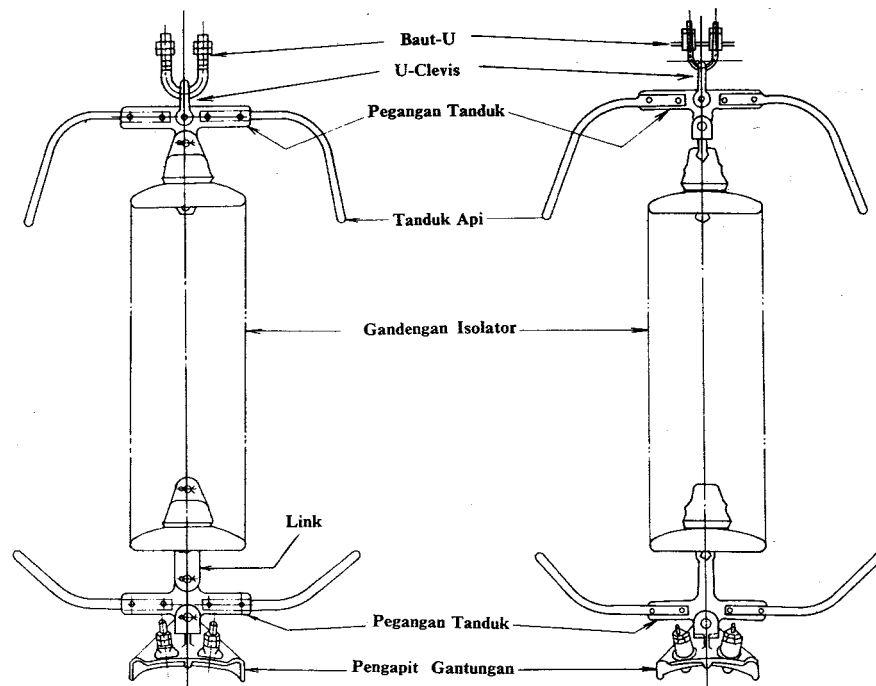
### 2.3.2. Tanduk Api dan Cincin Perisai

Bila terjadi lompatan api (flashover) pada gandengan isolator, maka isolatornya akan rusak karena busur apinya. Untuk menghindarkan kerusakan ini, maka pada gandengan isolator gantung dan isolator long-rod dipasang tanduk-tanduk api (arcing horns). Tanduk api dipasang pada ujung kawat dan ujung tanah dari isolator, serta dibentuk sedemikian sehingga busur api tidak akan mengenai isolator waktu lompatan api terjadi. Jarak antara tanduk atas dan bawah biasanya 75–85% dari panjang gandengan (periksa Gbr. 20). Tegangan lompatan api untuk gandengan isolator dengan tanduk api ditentukan oleh jarak tanduk ini; periksa Bab 8. Tanduk api biasanya dipakai untuk saluran transmisi dengan tegangan di atas 110 kV, atau di atas 66 kV di daerah-daerah dengan tingkat isokronik yang tinggi.

Cincin perisai (shield ring) dipasang pada ujung kawat dari isolator untuk mencegah terjadinya korona pada ujung tersebut. Efek pencegah korona juga dimiliki oleh tanduk api.



Gbr. 19 Karakteristik Lompatan Api Isolator Gantung 250 mm.



Gbr. 20 Gandengan Isolator Gantung Tunggal.

### 3.3.3. Jepitan

Untuk penghantar dipakai pengapit gantungan (suspension clamps) dan pengapit tarikan (tension clamps) sedang untuk kawat tanah dipakai pengapit sederhana. Ada dua jenis pengapit gantung, yang satu dengan, dan yang lain tanpa batang pelindung (armor rods). Pengapit-pengapit dipilih dengan memperhatikan macam dan ukuran kawat, kuat tarik maksimumnya, serta dibentuk sedemikian rupa sehingga tidak menimbulkan kerusakan dan kelelahan karena getaran (vibration) dan sudut andongan dari kawat.

Gandengan isolator gantung tunggal terlihat pada Gbr. 20, gandengan isolator tarik tunggal pada Gbr. 21, dan gandengan isolator tarik ganda pada Gbr. 22, masing-masing lengkap dengan pasangan isolatornya.

## 3.4 Pengotoran Isolator

Tahanan isolasi dari permukaan isolator yang bersih besar sekali. Nilainya menjadi sangat berkurang menjadi beberapa mega ohm saja, bila permukaannya menjadi kotor (polluted) karena isolator tersebut terpasang di daerah-daerah industri atau di tepi laut. Bila tegangan tinggi diterapkan pada isolator ini, lapisan permukaannya yang lembab menguap dan menimbulkan busur api setempat, yang kemudian bertambah besar sehingga menimbulkan lompatan api. Mekanisme dari gejala ini sukar diterangkan. Karakteristik lompatan api yang digunakan sebagai standar perencanaan (design) didapat dari pengalaman operasi dan pemeliharaan pada saluran transmisi, serta dari



data-data pengujian lompatan api pada isolator yang sengaja (artificially) dikotori atau yang dikotori secara alamiah.

#### 3.4.1. Karakteristik Lompatan Api dari Isolator Kotor

Untuk isolator gantung 250 mm yang dikotori (polluted) berlaku rumus tegangan lompatan api sbb:<sup>(8)</sup>

$$V = \frac{28N}{\left(\frac{W}{0,1}\right)^{1/5} \left\{1,5(k^{1/3} + 2) + \frac{5}{8}K\right\}} \quad (39)$$

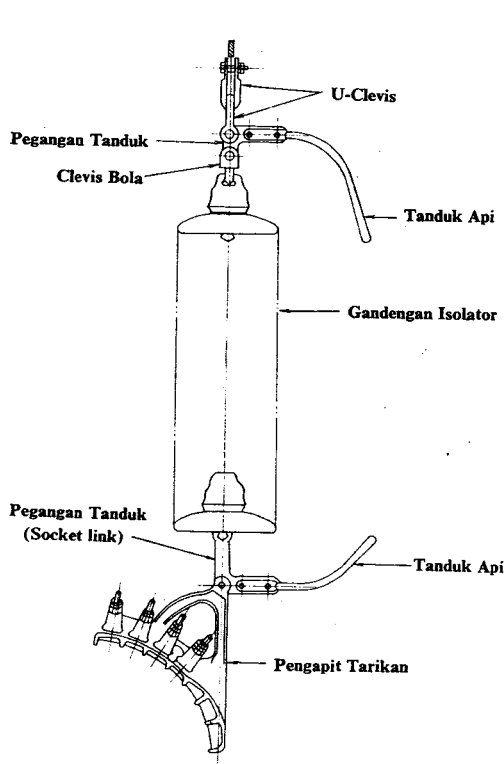
dimana  $V$  = tegangan lompatan api minimum untuk gandengan isolator gantung dengan  $N$  piringan (kV)

$W$  = kepadatan adhesi garam (mg/cm<sup>2</sup>)

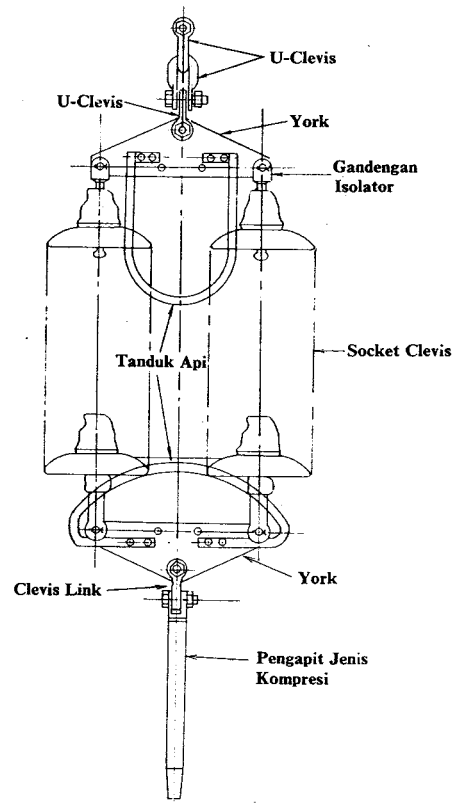
$K$  = kepadatan adhesi serbuk poles (polished) (mg/cm<sup>2</sup>)

$N$  = jumlah piringan isolator

Pada umumnya garam merupakan pengotoran terhadap isolator. Namun, untuk memperhitungkan pengaruh bahan-bahan yang tidak dapat dilarutkan, pengujiannya dilakukan dengan garam dan serbuk poles (polishing powder). Kepadatan serbuk  $K$  dianggap bernilai 0,1 mg/cm<sup>2</sup>.



Gbr. 21 Gandengan Isolator Tarik Tunggal.



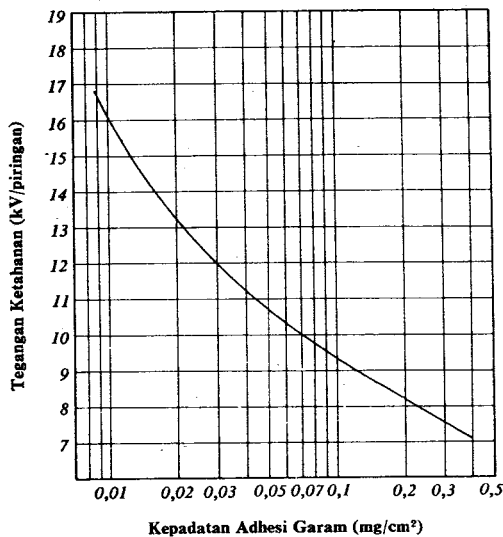
Gbr. 22 Gandengan Isolator Tarik Ganda.

Guna menampung perbedaan antara percobaan dengan keadaan sebenarnya, dipakai faktor koreksi  $k$ , yakni

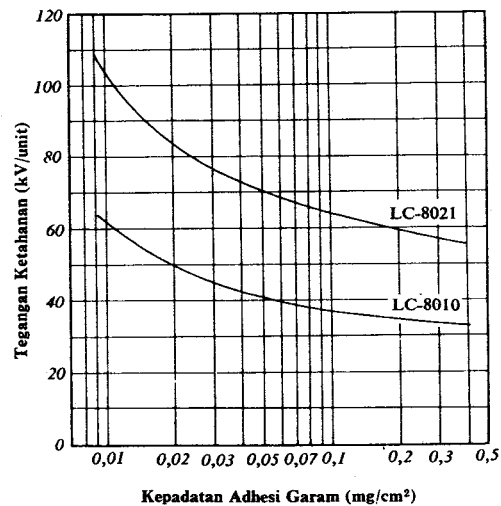
$$k = \frac{\text{tegangan ketahanan untuk perencanaan}}{\text{tegangan lompatan api minimum}} \quad (40)$$

Pada umumnya dipakai harga  $k = 1,25$ , meskipun untuk saluran-saluran transmisi penting atau tempat-tempat khusus, nilai  $k$  diatur menurut keperluannya antara 1,0 dan 1,25.

Dalam Gbr. 23 diberikan contoh karakteristik tegangan ketahanan (withstand voltage) untuk isolator gantung 250 mm, sedang Gbr. 24 menunjukkan karakteristik yang sama untuk isolator long-rod.



Gbr. 23 Karakteristik yang Direkomendasikan untuk Perencanaan Tegangan Ketahanan Isolator Gantung 250 mm.



Gbr. 24 Karakteristik yang Direkomendasikan untuk (Perencanaan) Tegangan Ketahanan Isolator Batang-Panjang (Long-Rod).

#### 3.4.2. Klasifikasi Daerah-daerah Pengotoran

Berdasarkan pengalaman mengenai kerusakan terhadap saluran transmisi, maka daerah-daerah pengotoran (contamination) diklasifikasikan menurut Tabel 16. Pembagian ini dipengaruhi oleh kondisi geografis, misalnya, daerah yang banyak mengalami banyak taufan (typhoon), daerah pegunungan, daerah dataran, dsb.

#### 3.4.3. Cara-cara Penanggulangan Pengotoran Garam dan Debu

Untuk menanggulangi pengotoran yang menyebabkan penurunan tegangan keta-

Tabel 16. Klasifikasi Daerah Pengotoran

Klasifikasi	A	B	C	D	E	F
Kepadatan Adhesi Garam (mg/cm <sup>2</sup> )	di bawah 0,01	0,01–0,03	0,03–0,06	0,06–0,12	0,12–0,25	di atas 0,25

Catatan: A, B ..... Pengotoran Ringan  
E, F ..... Pengotoran Berat

C, D ..... Pengotoran Sedang

hanan pada isolator, (periksa Gbr. 23 dan Gbr. 24) ditempuh cara-cara berikut:

- (1) Menambah isolasi (misalnya dengan menambah jumlah piringan dalam gandingan).
- (2) Mencuci isolator, yaitu dengan menyemprotnya dengan air, biasanya dalam keadaan bertegangan (hot-line washing).
- (3) Memberi lapisan campuran silikon pada isolator untuk menangkal air (water repellent).
- (4) Menurunkan tegangan sistim atau memutuskan arus saluran transmisi bila diperkirakan akan terjadi gangguan.

Data-data tentang pengotoran di Indonesia tidak ada, sehingga urgensi penerapan cara-cara di atas belum diketahui.

## 3.5 Pemburukan Isolator

Karena dipakai selama bertahun-tahun, isolator berkurang daya isolasinya, misalnya, karena mengalami keretakan pada porselinnya. Proses ini dinamakan pemburukan (deterioration) isolator. Sebab-sebab utama dari pemburukan isolator adalah pengembangan kimiawi dan pengembangan pembekuan dari semen, perbedaan dari pengembangan karena panas di berbagai bagian isolator; pengembangan panas karena arus bocor dan berkaratnya pasangan-pasangan logam.

Untuk mencegah proses pemburukan dilakukan hal-hal sebagai berikut:

- (1) Meningkatkan kuat-mekanis dari bagian porselin.
- (2) Membatasi pengembangan kimiawi dari bagian-bagian semen
- (3) Mengecat (buffer paint) bagian-bagian semen
- (4) Tidak menggunakan semen di dalam lapisan porselin.

Isolator jenis pasak (pin-type) paling banyak mengalami proses pemburukan sehingga sering menyebabkan gangguan pada saluran transmisi. Isolator gantung, isolator long-rod dan isolator line-post jarang menyebabkan gangguan karena pemburukan. Dengan kemajuan teknologi, maka isolator yang dibuat akhir-akhir ini sedikit sekali mengalami pemburukan.

## 3.6 Referensi

Referensi yang digunakan dalam Bab 3 adalah sebagai berikut:

- 1) *Testing Methods of Insulators*, Japanese Standards Association, JIS-C-3801, 1966.
- 2) *Impulse Voltage Testing*, Japanese Electrotechnical Committee, JEC-106, 1944.
- 3) *Recommendation on High-Voltage Test Techniques*, International Electrotechnical Commission, Publication 60, 1938 (Revised 1962).
- 4) *250 mm Clevis-Type Suspension Insulators*, Japanese Standards Association, JIS-C-3810, 1966.
- 5) *250 mm Ball-and-Socket-Type Suspension Insulators*, Japanese Standards Association, JIS-C-3817, 1971.
- 6) *Long-Rod Insulators*, Japanese Standards Association, JIS-C-3816, 1962.
- 7) *Line-Post Insulators*, Japanese Standards Association, JIS-C-3812, 1968.
- 8) Special Study Committee, "Counterplan for Salt Pollution of Transmission Line", *Results of Workshop on Transmission Lines*, Electrical Cooperative Research Association of Japan, vol. 20, No. 2, April 1964, hal. 101.

## BAB 3. KONSTRUKSI PENOPANG SALURAN TRANSMISI

### 3 4.1 Jenis Penopang

#### 4.1.1. Menara Baja dan Tiang Baja

Jenis-jenis bangunan penopang saluran transmisi yang dikenal adalah menara-menara baja, tiang-tiang baja, tiang-tiang beton bertulang dan tiang-tiang kayu.

Menara baja adalah bangunan tinggi terbuat dari baja yang bagian-bagian kakinya mempunyai pondasi sendiri-sendiri, sedang tiang baja mempunyai satu pondasi untuk semua bagian kakinya.

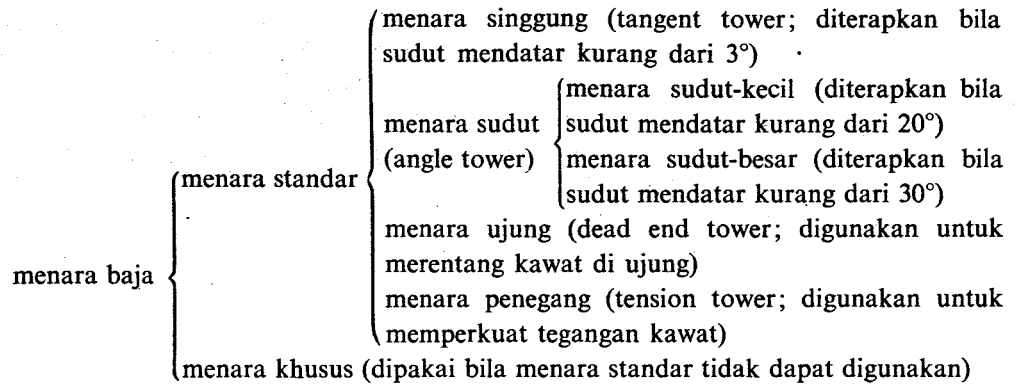
Menara baja untuk saluran transmisi dibagi menurut *bentuk* dan sifat konstruksinya menjadi menara persegi, menara persegi panjang, menara jenis korset, menara gantry, menara rotasi, menara M.C. dan menara bertali (guyed tower), periksa Gbr. 25. Tiang baja terbagi menjadi tiang persegi, tiang segitiga, tiang pipa baja dan tiang Panzer, periksa Gbr. 26.

Menara-menara persegi dan tiang-tiang persegi sama bentuk dan kekuatannya dan paling banyak disukai. Jenis-jenis ini banyak dipakai untuk saluran transmisi ganda (double). Menara persegi panjang sama bagian atas dan bawahnya, serta banyak dipakai untuk saluran tunggal dan saluran banyak (multicircuit). Menara jenis korset sempit di bagian tengahnya, dan biasanya dipakai untuk saluran tegangan tinggi rangkaian tunggal (single circuit), serta untuk gawang (span) yang lebar. Menara gantry digunakan bila saluran menyeberangi jalan kereta api, jalan raya serta kanal-kanal air. Menara rotasi adalah menara yang bagian atasnya diputar 45° di atas bagian bawahnya. Menara M.C. terbuat dari pipa-pipa baja yang diisi beton. Menara bertali mempunyai konstruksi berengsel yang menunjang beban mekanisnya dengan kawat-kawat penahan (stay wires).

Tiang-tiang baja segitiga adalah konstruksi yang terdiri dari tiga kaki yang mempunyai bagian-bagian segitiga samasisi (equilateral) dan diagonal-diagonal seperti pada tiang-tiang persegi. Tiang-tiang jenis ini dipakai pada kawat-kawat transmisi yang bebannya ringan. Tiang pipa baja dibuat dari pipa baja dengan penampang bulat. Tiang Panzer terbuat dari plat-plat baja tipis yang dipasang di tempat dengan penopang tiang.

Menara-menara transmisi terbagi menurut *karakteristiknya* menjadi menara baja kaku (rigid), lentur (flexible) dan setengah-lentur (semi-flexible). Menara kaku direncanakan untuk menahan beban yang diperkirakan oleh menara itu sendiri, sedang menara lentur dan setengah-lentur direncanakan tanpa atau sedikit sekali beban pada arah kawat.

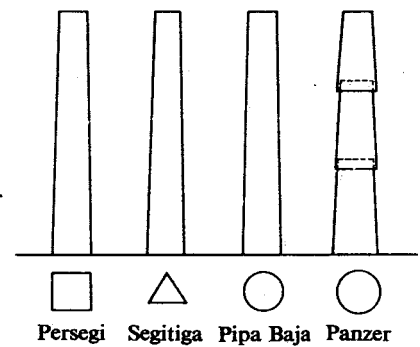
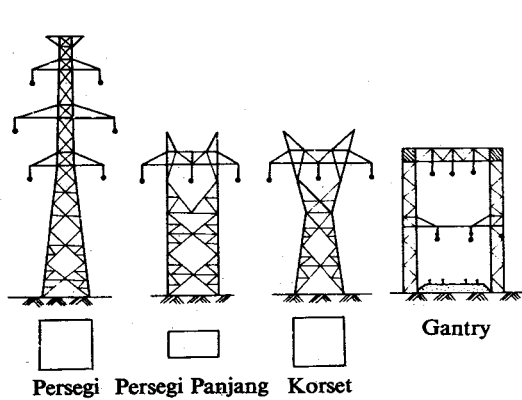
Menara transmisi baja dibagi menurut *objek* atau *tujuan* penggunaannya sebagai bagan berikut:



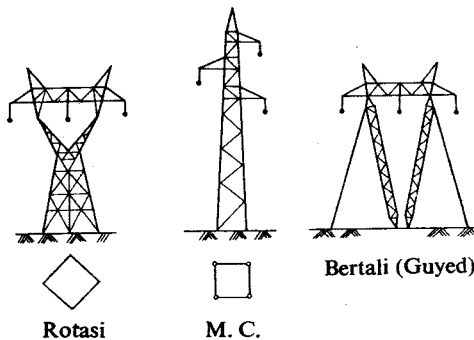
Menara-menara baja untuk gawang standar kadang-kadang disebut juga menara standar.

#### 4.1.2. Tiang Beton Bertulang

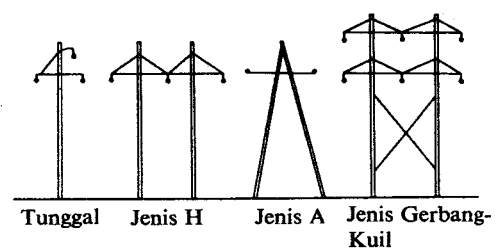
Tiang beton bertulang (steel reinforced concrete poles) dapat dikelasifikasikan menurut cara pembuatannya dan menurut cara menghimpunnya (assembling). Kelasi-



Gbr. 26 Jenis-Jenis Tiang-Baja.



Gbr. 25 Jenis-Jenis Menara Baja.



Gbr. 27 Klasifikasi Tiang Baja Bertulang dan Tiang Kayu menurut Cara Menghimpunnya.

fikasi menurut objek sama dengan menara baja.

Tiang beton bertulang diklasifikasikan menurut cara pembuatannya dalam pembuatan dipabrik atau pembuatan setempat (on-site).

Tiang beton bertulang diklasifikasikan menurut cara *menghimpunnya* sebagai tiang tunggal, jenis H, jenis A, atau jenis gerbang-kuil (shrine-gate), seperti terlihat pada Gbr. 27.

#### 4.1.3. Tiang Kayu

Oleh karena penanganannya (handling) yang sederhana dan harganya yang jauh lebih murah dibandingkan dengan tiang atau menara baja, maka penggunaannya sangat direkomendasikan untuk Indonesia. Harga yang lebih murah ini disebabkan karena perencanaan untuk penopang baja biasanya lebih konservatif dibandingkan dengan perencanaan tiang kayu. Pada umumnya, konstruksi baja direncanakan untuk dapat menampung secara aman putusnya satu atau dua kawat, sedang konstruksi kayu tidak. Oleh karena itu, masuk akal bahwa alasan untuk memilih konstruksi baja yang lebih mahal harus dikaitkan dengan kebutuhan akan perencanaan yang konservatif, dan bahwa kondisi yang dapat membenarkan pemakaian konstruksi kayu yang lebih murah dan berumur lebih pendek dikaitkan dengan bahaya gangguan yang sifatnya lebih teoritis. Keuntungan yang lain adalah bahwa kayu merupakan isolasi yang baik terhadap petir. Tiang kayu yang terhubung seri dengan isolator porselin memberikan perlindungan terhadap petir yang sama dengan isolator keramik yang ditanahkan apabila jumlah isolator dalam gandengan terakhir ini lebih banyak.

Rencana konstruksi penopang tergantung dari karakteristik penopang tersebut, artinya apakah ia kaku (rigid) atau ada kelenturannya (flexible) menurut arah saluran. Tiang kayu dan beberapa jenis konstruksi penopang baja (periksa 4.1.1) termasuk dalam kategori terakhir, dan dalam perencanaannya biasanya hanya dihitung tekanan angin melintang (transverse) terhadap saluran dan konstruksi penopangnya. Tarikan longitudinal oleh kawat biasanya diseimbangkan pada kedua belah pihak konstruksi. Tetapi bila satu atau dua kawat putus pada satu pihak, maka terjadilah beban yang tidak seimbang yang mungkin jauh lebih besar dari tekanan angin melintang tadi. Konstruksi penopang yang lentur (flexible) dapat menyerap dengan cepat ketidakseimbangan ini. Konstruksi pada kedua pihak gawang (span) melentur ke arah gawang-gawang yang berdekatan, dan pergerakan dari puncak tiang memungkinkan pengenduran tegangan kawat pada gawang-gawang tadi karena andongannya (sag) bertambah. Defleksi dari tiang yang kedua dan ketiga sesudah gawang yang lepas (putus) juga kelihatan, meskipun defleksinya makin lama makin kecil (biasanya tidak tampak lagi pada tiang kelima). Makin besar kelenturan konstruksi penopang, makin kecil beban tambahan yang harus dipikul oleh tiang manapun. Meskipun demikian, diadakan juga sekedar kekakuan longitudinal dengan memasang menara-menara penahan (anchoring towers) yang kaku dengan jarak antara 2 km, dengan maksud untuk menahan putusnya satu (di antara tiga) kawat pada satu pihak atau beban melintang.

Cara menghimpun tiang kayu sama seperti tiang beton, periksa Gbr. 27. Di Amerika Serikat jenis H telah dipakai untuk saluran dengan kelas tegangan 110 kV, 132 kV, 154 kV dan 230 kV sejak 42 tahun yang lalu. Berdasarkan atas pengalaman ini, maka jenis H atau jenis gerbang-kuil telah dipakai untuk saluran dengan tegangan 345 kV sejak 10 tahun yang lalu. Penggunaan tiang kayu (biasanya tunggal) untuk saluran 66 kV adalah

hal yang biasa di Amerika Serikat; karena itu penggunaan tiang baja hanya dibenarkan bila salurannya berat sekali. Bentuk A atau H dipakai bila dikehendaki kekuatan melintang yang lebih besar (3–5 kali) dibandingkan dengan tiang tunggal. Kira-kira 40 tahun yang lalu di Inggris telah dikembangkan tiang ganda (double-pole structures) yang lebih efisien, misalnya tiang Rutter,<sup>1)</sup> yang memiliki ketahanan yang tinggi terhadap keruntuhan karena kekuatannya enam kali lebih besar dari tiang tunggal.

Ada tiga jenis kayu yang dipakai sebagai konstruksi penopang di Amerika Serikat, yaitu Douglas Fir (pohon den), Southern Yellow Pine (sejenis cemara) dan Western Red Cedar (pohon aras), yang semuanya diawetkan. Penggunaan kayu yang tidak diawetkan dianggap tidak ekonomis lagi, sesudah persediaan kayu keras (Chestnut dan Northern Cedar) habis. Pengawetan (preservative treatment) diperlukan karena kayu menjadi rusak oleh sejenis cendawan (fungus). Cendawan memerlukan udara, kelembaban dan makanan untuk hidupnya; makanan ini diambilnya dari kayu. Bahan pengawet mengandung racun yang mematikan cendawan tadi.

Ada dua kelas pengawet, yaitu yang larut air (water borne) dan yang larut minyak (oil borne). Pengawet larut air, misalnya CCA (Copper-Chrome-Arsenate), lebih bersih daripada pengawet larut minyak, seperti Creosote dan Pentachlorophenol (PCP). Kecuali itu, CCA mempunyai daya lekat yang kuat sehingga praktis tidak berkurang konsentrasinya setelah 20 tahun dan tidak memerlukan pemeliharaan. Namun, karena pengalaman lain yang memberikan hasil positif di Amerika Serikat ada kecenderungan untuk menggunakan pengawet larut minyak, terutama PCP.

Di Indonesia terdapat berjuta-juta hektar hutan kayu dengan k.l. 90 jenis kayu bangunan dan k.l. 10 jenis kayu yang dapat digunakan sebagai tiang transmisi. Menurut survey yang dilakukan oleh Lembaga Masalah Ketenagaan dalam tahun 1961, jenis kayu yang banyak dipakai oleh Perusahaan Listrik Negara terutama untuk distribusi adalah kayu Ulin (Eusidiroxylon Zwageri), Jati (Tectona Grandis), Rasamala (Altinghia Exelsa Noronha, sejak tahun 1938), Nani (Metrosideros Petiolata/Vera), Giam

Tabel 17. Perbandingan Sifat dan Kekuatan Tiang Kayu Amerika dan Indonesia

Jenis Kayu		% Kelembaban	Berat Jenis (gm/cm <sup>3</sup> )	Tegangan Serat (kg/cm <sup>2</sup> )	Modulus Elastisitas (kg/cm <sup>2</sup> )	Kuat Tindas <sup>1)</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )
Kayu Amerika	DOUGLAS FIR	12	0,47	548	137.000	522
	SOUTHERN YELLOW PINE	12	0,51	548	127.000	498
	WESTERN RED CEDAR	12	0,33	422	79.000	353
Kayu Indonesia	DAMAR (Agathis Laronthyfolia)	15,7	0,45	281	54.000	295
	RASAMALA (Altinghia Exelsa Noronha)	14,7	0,80	575	92.000	598
	ULIN (Eusidiroxylon Zwageri).	15,5	1,04	1113	184.000	734

<sup>1)</sup> Crushing Strength; Tekanan Sejajar dengan Serat (Grain).

(*Cotylebolium mula Utxylon Pere*) dan Bakau (*Shorea Elliptica*). Kecuali kayu Ulin yang keras, kayu-kayu lainnya diawetkan dengan berbagai cara.

Perbandingan sifat antara kayu Indonesia dan Amerika tertera pada Tabel 17. Dari Tabel ini dapat dilihat bahwa kayu Rasamala mempunyai sifat-sifat yang menyerupai Douglas Fir dan Southern Yellow Pine. Menurut pengalaman PLN umur tiang kayu Rasamala yang diawetkan berkisar antara 15–20 tahun. Karena kekerasan dan kekuatannya, kayu Ulin dapat digunakan tanpa diawetkan. Kayu Ulin yang tidak diawetkan telah dipasang di kota Jepara (Jawa Tengah) lebih dari 30 tahun yang lalu dan masih dalam keadaan baik.

Menurut pengalaman di Swedia, Amerika Serikat, Australia, dll. penggunaan tiang kayu ternyata menghasilkan penghematan biaya investasi yang tidak kecil. Di Amerika Serikat, penghematan tiang kayu terhadap tiang baja mencapai 10% dari biaya konstruksi (k.l. beberapa ribu dollar per km).<sup>2)</sup> Dalam penghematan ini termasuk pula penghematan dalam biaya pembebasan tanah untuk jalur transmisi. Penghematan juga terjadi karena pemeliharaan hampir dapat diabaikan. Sebaliknya, menara-menara baja memerlukan pemeliharaan yang tidak kecil. Sesudah 20–25 tahun menara-menara baja harus dicat kembali seluruhnya. pengecatan itu perlu diulangi tiap-tiap 7–8 tahun sesudah itu. Menurut pengalaman,<sup>2)</sup> biaya pengecatan setahun untuk menara 69 kV sepanjang 350 mil berjumlah \$70.000. Berdasarkan atas kenyataan di luar negeri ini, dan pengalaman dengan tiang distribusi di dalam negeri, maka dewasa ini usaha memperluas penggunaan tiang kayu terus dikembangkan.

## 4.2 Beban pada Konstruksi Penopang

Dalam merencanakan konstruksi-konstruksi penopang (supporting structure) diandaikan sesuatu beban tertentu. Beban ini biasanya ditetapkan dalam standar-standar. Oleh karena standar di Indonesia tidak ada, atau kurang sesuai, dalam buku ini akan digunakan standar Jepang.

### 4.2.1. Tekanan Angin

*Kecepatan angin untuk perencanaan*<sup>3)</sup> di Jepang adalah 40 m/sekon untuk masa April sampai Nopember, diukur pada ketinggian 15 m di atas tanah. Nilai ini didapat dari penyelidikan di seluruh negara dengan mengukur kecepatan angin maksimum rata-rata selama 10 menit.

Untuk musim suhu-rendah Desember sampai Maret kecepatan perencanaan adalah 27 m/sekon.

Apabila kecepatan maksimumnya besar, misalnya pada penyeberangan sungai atau untuk ketinggian yang lebih besar, kecepatan perencanaannya disesuaikan dengan hasil pengukuran.

Kecepatan naiknya kecepatan angin tergantung dari kondisi permukaan tanah dan skala kecepatan angin. Naiknya kecepatan angin di udara dapat ditulis dengan persamaan yang dihasilkan dari data-data di beberapa negara sebagai berikut:

$$V_h = V_0(h/h_0)^{1/7} \quad (41)$$

dimana  $V_h$  = kecepatan angin perencanaan pada ketinggian  $h$  meter (m/s)

$V_0$  = kecepatan angin perencanaan standar (m/s)

$h_0$  = ketinggian standar (15 m)

$h$  = tinggi dari permukaan tanah (m)



Tabel 18. Tekanan Angin dan Koefisien Tahanan (pada 40 m/s)

	Klasifikasi	Tekanan Angin (kg/m <sup>2</sup> )	Koefisien Tahanan	Catatan
Jenis Konstruksi Penopang	Tiang Kayu	80	0,8	
	Penampang Bulat	80	0,8	
	Penampang Segitiga atau Jajaran Genjang	190	1,9	
	Penampang Persegi terdiri dari Pipa-pipa Baja	150	1,5	
	Tiang Baja	220	2,2	Tiang Kisi-kisi Terdiri dari Baja Siku
	Lain-lain	240	2,4	
	Tiang Beton Bertulang	80	0,8	
	Lain-lain	120	1,2	
Jenis Kawat yang Ditentang	Menara Baja	170	1,7	
		290	2,9	
	Palang (Travers) pada Tiang Kayu, Tiang Baja atau Tiang Beton Bertulang	160	1,6	
		220	2,2	
	Penghantar Tunggal	100	1,0	
	Kawat Berkas	90	0,9	Setiap Dua Kawat Berkas Dipasang Mendatar dengan Jarak Kurang dari Dua puluh kali Diameter Penghantar
	Gandengan Isolator	140	1,4	Hanya untuk Saluran Tegangan Tinggi Khusus

Beban yang disebabkan karena tekanan angin terhadap konstruksi penopang, kawat-kawat dan gandengan isolator dinyatakan oleh persamaan:

$$P = C[(1/2)\rho V^2]S \quad (42)$$

dimana  $P$  = beban karena tekanan angin (kg)

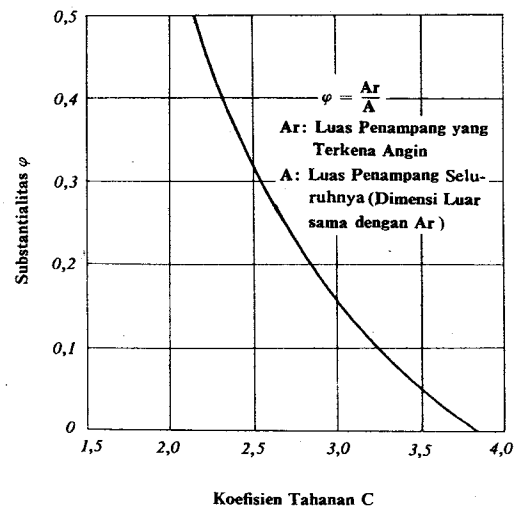
$C$  = koefisien tahanan yang berubah menurut bentuk barang

$V$  = kecepatan angin (m/s)

$\rho$  = kepadatan udara (kgs/m<sup>4</sup>)

$S$  = permukaan yang kena angin (m<sup>2</sup>)

Oleh karena harga  $C$  berubah dengan barang yang kena angin, maka pengujian-pengujian di terowongan angin perlu diadakan untuk menentukan koefisien tahanan apabila menara baru dibangun. Koefisien ini sukar ditentukan, apalagi untuk benda-benda tiga dimensi seperti menara atau tiang baja, karena ia tergantung bukan saja kepada bentuk seksional dari bagian-bagiannya, tetapi juga kepada faktor substansialitas, yaitu perbandingan antara luas bagian-bagian pada suatu panel terhadap luas seluruh panel, dan faktor magnifikasi, yaitu perbandingan antara jarak bagian depan dan belakang terhadap lebar bagian. Contoh dari ketergantungan koefisien tahanan dari substansialitas ini terlihat pada Gbr. 28. Koefisien tahanan untuk benda-benda yang penampangnya bulat seperti tiang kayu, pipa-pipa baja dan kawat-kawat tergantung dari kecepatan angin (40 m/s) dan diameter luarnya. Koefisien tahanan untuk berbagai jenis konstruksi tertera pada Tabel 18. Untuk kecepatan 20–40 m/s koefisien tahanan dapat dianggap konstan.



Gbr. 28 Koefisien Tahanan untuk Menara Persegi.

Dalam perhitungan *tekanan angin* untuk menara dan tiang baja daerah proyeksi dari satu permukaan konstruksi adalah daerah yang terkena angin, dengan menga-

Tabel 19. Tekanan Angin Ekvivalen pada Menara Baja

Tinggi Menara (m)	Menara Sudut		Menara Pipa	
	Biasa (kg/m <sup>2</sup> )	Untuk EHV (kg/m <sup>2</sup> )	Biasa (kg/m <sup>2</sup> )	Untuk EHV (kg/m <sup>2</sup> )
kurang dari 40	290	310	170	180
50	310	330	180	190
60	330	350	190	200
70		370		210
80		390		220

baikan kemiringan (inclination) bagian-bagian komponennya. Daerah proyeksi (projected area) untuk tiang kayu, tiang beton bertulang dan gandingan isolator adalah daerah konstruksi yang terkena angin.

Untuk perencanaan konstruksi penopang digunakan tekanan angin standar, yang contohnya tertera dalam Tabel 18. Dalam praktek perencanaan menara-menara tegangan tinggi EHV, menara-menara banyak-rangkaian dan menara-menara penyeberang sungai atau lembah, tekanan angin untuk menara-menara baja dinaikkan untuk menampung kenaikan kecepatan karena ketinggian tempat serta kenaikan koefisien tahanan karena substansialitas menurun. Oleh karena itu untuk menara-menara baja yang tingginya lebih dari 40 meter digunakan harga-harga seperti pada Tabel 19.

#### 4.2.2. Kuat-Tarik Penghantar

Kuat-tarik kerja maksimum untuk kawat yang direntang diandaikan sbb:

- (1) kurang dari  $\frac{1}{2}$ , 2 kali kuat-tarik maksimumnya (ultimate tensile strength), untuk penghantar tembaga "hard-drawn".
- (2) kurang dari  $\frac{1}{2}$ , 5 kali kuat-tarik maksimumnya, untuk penghantar lilit.

Bila ada sudut mendarat pada saluran transmisi, maka terdapat *komponen gaya mendarat* karena tarikan kawat. Komponen ini dinyatakan oleh rumus (periksa Gbr. 29):

$$\text{dalam hal biasa: } H_a = 2P \sin \theta/2 \quad (43)$$

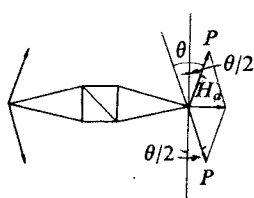
$$\text{dalam hal khusus: } H_a = P_1 \sin \theta_1 + P_2 \sin \theta_2 \quad (44)$$

dimana  $H_a$  = komponen gaya mendarat (kg)  
 $P$  = tarikan kawat yang diandaikan (kg)  
 $\theta, \theta_1, \theta_2$  = sudut-sudut mendarat

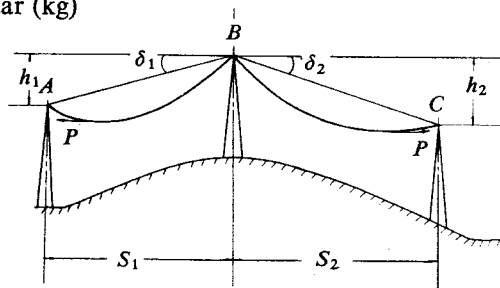
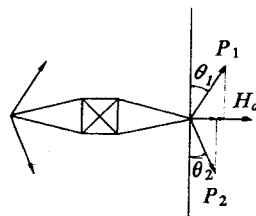
*Beban tegak* terhadap titik topang adalah jumlah berat kawat dan gandingan isolator ditambah dengan komponen tegak dari tarikan penghantar. Beban tegak pada titik B (Gbr. 30) dinyatakan oleh persamaan:

$$W_c = \frac{1}{2}(w_c + w_s)(S_1 + S_2) + P(\tan \delta_1 + \tan \delta_2) + w_i \quad (45)$$

dimana  $W_c$  = jumlah beban tegak (kg)  
 $w_c$  = berat satuan penghantar (kg/m)  
 $w_s$  = berat satuan benda-benda lain pada penghantar, misalnya es dan salju (kg/m)  
 = 0 untuk Indonesia  
 $w_i$  = berat gandingan isolator (kg)  
 $P$  = tegangan kawat mendarat (kg)



Gbr. 29



Gbr. 30

$S_1, S_2$  = lebar gawang sebelah menyebelah (m)

$\delta_1, \delta_2$  = sudut tegak terhadap tiang-tiang sebelah menyebelah

Kecuali beban-beban di atas, beban-beban lain seperti beban eksentrik tegak dan beban-beban tak-seimbang perlu diperhitungkan bila ada.

### 4.2.3. Tegangan pada Bagian-Bagian Baja

Tegangan (stress) yang diperbolehkan terhadap bagian-bagian menara transmisi ditetapkan dalam standar-standar. Di Jepang, misalnya digunakan standar-standar sebagai berikut:<sup>3,4)</sup>

tegangan-tarik (tensile stress) yang diperbolehkan

$$\left( \text{asal kurang dari } \frac{0,7\sigma_B}{1,5} \right) = \frac{\sigma_Y}{1,5} \quad (46)$$

$$\text{tegangan-tekan (compression stress) yang diperbolehkan} = \frac{\sigma_Y}{1,5} \quad (47)$$

$$\text{tegangan-lentur (bending stress) yang diperbolehkan} = \frac{\sigma_Y}{1,5} \quad (48)$$

tegangan-geser (shearing stress) yang diperbolehkan

$$\left( \text{asal kurang dari } \frac{0,7\sigma_B}{1,5\sqrt{3}} \right) = \frac{\sigma_Y}{1,5\sqrt{3}} \quad (49)$$

$$\text{tegangan-pikul (bearing stress) yang diperbolehkan} = 1,1\sigma_Y \quad (50)$$

tegangan-lekuk (buckling stress) yang diperbolehkan dinyatakan oleh persamaan-persamaan berikut:

• bila  $0 < \lambda_k < \Lambda$ :

$$\sigma_{ka} = \frac{\sigma_Y}{1,5} \left\{ K_0 - K_1 \left( \frac{\lambda_k}{\pi \sqrt{E/\sigma_Y}} \right) - K_2 \left( \frac{\lambda_k}{\pi \sqrt{E/\sigma_Y}} \right)^2 \right\}; \quad (51)$$

• bila  $\Lambda \leq \lambda_k$ :

$$\sigma_{ka} = \frac{1}{2,2} \frac{\pi^2 E}{\lambda_k^2} \quad (52)$$

$$\text{asal } \Lambda = \pi \sqrt{\frac{1,5E}{2,2K\sigma_Y}}$$

dimana

$\sigma_Y$  = tegangan lumer (yielding stress) dari bahan (kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_B$  = tegangan-tarik maksimum dari bahan (kg/cm<sup>2</sup>)

$$\lambda_k = \text{perbandingan kerampingan efektif} = \frac{l_k}{r} \quad (53)$$

$l_k$  = panjang "buckling" dari bahan (cm)

$r$  = jari-jari girasi (gyration) dari daerah permukaan bahan (cm)

$E$  = modulus elastisitas =  $2,1 \times 10^6$  (kg/cm<sup>2</sup>)

$\Lambda$  = nilai batas dari  $\lambda_k$

$K, K_0, K_1, K_2$  = koefisien yang tergantung dari konstruksi dan bentuk bagian bahan seperti tertera dalam Tabel 20.

Perbandingan kerampingan ( $l_k/r$ ) dari bagian-bagian yang tertekan dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

- tidak lebih dari 200 untuk bagian-bagian utama (termasuk lengan/palang);
- tidak lebih dari 220 untuk bagian-bagian yang tertekan, kecuali bagian-bagian utama;

Tabel 20. Nilai-Nilai  $K$ ,  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ 

Eksentrisitas	$K$	$K_0$	$K_1$	$K_2$
(1) Kecil sekali, misalnya pada pipa baja, penampang persegi, dsb.	0,6	1,0	0	0,352
(2) Relatip kecil, misalnya pada bagian-bagian utama yang terdiri dari baja siku sama-sisi pada satu lapisan.	0,5	0,945	0,0123	0,316
(3) Besar, seperti bila bagian-bagian kecil terhubung pada satu flange.	0,3	0,939	0,424	0

Catatan: Untuk (3) digunakan persamaan

$$\sigma_{ka} = \frac{0,6}{1,5} \sigma_y$$

- (c) tidak lebih dari 250 untuk bagian-bagian pelengkap (auxiliary) yang memperkuat bagian-bagian yang tertekan.

Dalam standar-standar ditetapkan ketebalan minimum dari bagian-bagian menara dan tiang baja sebagai berikut:<sup>5)</sup>

- (a) Untuk lempeng baja biasa: 4 mm untuk bagian-bagian utama dari tiang (termasuk palang), 5 mm untuk bagian-bagian utama dari menara, serta 3 mm untuk bagian-bagian lainnya.
- (b) Untuk pipa baja: 2 mm untuk bagian-bagian utama dari tiang baja, 2,4 mm untuk bagian-bagian utama dari menara baja, serta 1,6 mm untuk bagian-bagian lainnya.

Untuk melindungi bagian-bagian baja dari karat dipakai cara mengecat dan cara galvanisasi. Cara terakhir lebih disukai di Jepang, yaitu dengan "hot-dipping".

3

### 4.3 Menara Baja Transmisi

#### 4.3.1. Rencana Menara Baja Transmisi

Penentuan *gawang* (span) standar merupakan kunci dalam perencanaan (design) menara dan saluran transmisi secara keseluruhan. Oleh sebab itu hal ini harus ditetapkan mengingat pertimbangan-pertimbangan ekonomis dilihat dari segi tegangan, jumlah rangkaian, konstruksi penghantar dan menara, keadaan udara serta penggunaan tanah. Sebagai contoh, Tabel 21 menunjukkan gawang standar yang dipakai di Jepang.<sup>6)</sup>

*Lebar kaki* (stance) menara ditentukan secara ekonomis mengingat jenis menara, beban, tinggi menara, jenis bagian-bagian menara, keadaan tanah dan penggunaan tanah. Untuk menara standar (jenis persegi) lebar kaki ini diberikan dalam Tabel 22.

Tabel 21. Gawang Standar

Tegangan Nominal	Gawang Standar (m)
kurang dari 77 kV	200 – 250
154 kV	250 – 300
275 kV	300 – 350

Tabel 22. Lebar Kaki (Stance) Menara Baja

Jenis Menara	Lebar Kaki
Menara Singgung atau Menara Sudut-Kecil	$\frac{1}{7} - \frac{1}{4,5}$ dari Tinggi Menara
Menara Sudut-Besar atau Menara Ujung	$\frac{1}{5,5} - \frac{1}{4}$ dari Tinggi Menara

Tabel 23. Kombinasi Beban pada Menara Baja

Jenis Menara	Kondisi	Arah Angin Terhadap Kawat	Kombinasi Beban									
			Beban Vertikal		Beban Mendatar Melintang				Beban Mendatar Longitudinal			
			$W_t$	$W_c$	$H_t$	$H_c$	$H_a$	$q$	$H_t'$	$P_1$	$P_2$	$q'$
Menara Singgung atau Menara Sudut	Normal	Tegak lurus	○	○	○	○	○					
		Sejajar	○	○			○		○			
	Kawat Putus	Tegak lurus	○	○	○	○	○	○			○	○
		Sejajar	○	○			○	○	○		○	○
Menara ujung	Normal	Tegak lurus	○	○	○	○				○		
		Sejajar	○	○					○	○		
	Kawat Putus	Tegak lurus	○	○	○	○		○			○	○
		Sejajar	○	○				○	○		○	○
Menara Penegang	Normal	Tegak lurus	○	○	○	○				○		
		Sejajar	○	○					○	○		
	Kawat Putus	Tegak lurus	○	○	○	○		○			○	○
		Sejajar	○	○				○	○		○	○

Catatan: Beban yang ditandai dengan ○ diperhitungkan secara Simultan.

$W_t$  = Berat Menara,  $W_c$  = Berat Saluran Udara dan Isolator

$H_t'$  = Tekanan Angin pada Menara karena Angin Tegaklurus pada Saluran (atau Sejajar)

$H_c$  = Tekanan Angin pada Saluran dan Isolator karena Angin Tegaklurus pada Saluran

$H_a$  = Komponen Mendatar Melintang dari Tegangan Maksimum Saluran karena Sudut Mendatar dari Saluran. (atau Sejajar)

$q, q'$  = Gaya Putar (Torsional) karena Putusnya Kawat

$P_1$  = Tegangan Tak-Seimbang Normal

$P_2$  = Tegangan Tak-Seimbang karena Putusnya Kawat

Ada dua jenis beban yang diandaikan (assumed), yang pertama beban yang normal dimana kawat tidak putus, yang kedua beban tidak normal dimana kawat putus. Dalam Tabel 23 ditunjukkan contoh berbagai jenis beban yang diterapkan pada beberapa jenis menara. Gaya-gaya yang tidak seimbang berubah menurut jenis menara, jumlah rangkaian, dsb. Oleh karena itu hal ini ditetapkan dalam standar-standar.

Sesuai dengan kombinasi berbagai beban yang diandaikan maka gaya yang bekerja setiap bagian menara dihitung. Harga maksimum dari perhitungan ini ditetapkan sebagai tegangan perencanaan normal dan luar-biasa. Dalam hal palangnya (arms), nilai yang tertinggi dari tegangan perencanaan normal dan tegangan perencanaan luar-biasa ditetapkan sebagai tegangan perencanaan (design stress).

Perhitungan gaya (tegangan-stress) untuk bagian-bagian menara dilakukan dengan cara diagramatik dan cara komputasi; cara diagramatik lebih mudah dan lebih disukai. Dewasa ini perhitungan-perhitungan banyak dilakukan dengan komputer.

Untuk tegangan perencanaan normal, gaya yang diperbolehkan untuk perencanaan normal adalah seperti diuraikan dalam 4.2.3, serta untuk gaya perencanaan luar biasa gaya yang diperbolehkan sebesar 1,5 kali gaya normal juga dipakai; yang terbesar diantaranya dipakai untuk penampang bagian-bagian menara.

### 4.3.2. Pondasi Menara

*Kuat-pikul tekanan* (compression bearing strength) dari pondasi adalah kuat-pikul tekanan pada tanah di dasar pondasi. *Kuat-pikul angkatan* (uplift bearing strength) dari pondasi adalah jumlah berat pondasi, berat tanah pada dasar pondasi serta gaya tahanan pada permukaan sorong (sliding surface).

Kuat-pikul mendatar dari pondasi (horizontal bearing strength) terdiri dari kuat-pikul dari tanah di sisi pondasi serta gaya pergeseran pada dasarnya.

Dengan memperhatikan faktor-faktor seperti tertera dalam Tabel 24 maka perhitungan *perencanaan pondasi* dilakukan dengan cara berikut:

- (1) Perhitungan kuat-pikul untuk pondasi dimana gaya tekan ditambahkan dinyatakan oleh persamaan:

$$\frac{q'}{F} \geq \frac{C + G + W_s}{A} \quad (54)$$

dimana  $q'$  = kuat-pikul tekanan terhadap tanah ( $t/m^2$ )  
 $F$  = faktor keamanan  
 $C$  = gaya tekan (yang dihitung) oleh menara (t)  
 $G$  = berat pondasi (t)  
 $W_s$  = berat tanah pada pondasi (t)  
 $A$  = luas permukaan pada dasar pondasi ( $m^2$ )

- (2) Perhitungan kuat-pikul untuk pondasi dimana gaya angkat ditambahkan dinyatakan oleh persamaan:

$$\frac{r'(V_e - V'_e) + G}{F} \geq T \quad (55)$$

dimana  $r'$  = berat tanah per satuan isi ekuivalen ( $t/m^3$ )  
 $V_e$  = isi piramid terbalik pada pondasi dihitung dengan sudut efektif dari tanah terhadap gaya angkatnya

$$= D'(B^2 + 2BD' \tan \theta + \frac{4}{3} D'^2 \tan^2 \theta) \text{ untuk piramid} \quad (56)$$

$$= \frac{\pi}{4} D'(B^2 + 2BD' \tan \theta + \frac{4}{3} D'^2 \tan^2 \theta) \quad (57)$$

untuk teras bundar (circular core)

$V'_e$  = isi pondasi di bawah permukaan tanah ( $m^3$ )  
 $T$  = gaya angkat yang dihitung dari menara (t)  
 $B, D'$  = jarak-jarak seperti pada Gbr. 31  
 $\theta$  = sudut efektif dari tanah yang menentang gaya angkat.

Tabel 24. Kondisi-Kondisi untuk Perhitungan Pondasi

Faktor	Kasus-I	Kasus-II	Kasus-III	Kasus-IV
Sudut Effektif dari Tekanan terhadap Pengangkatan	30°	20°	10°	0°
Berat Tanah $r'(\text{t/m}^3)$	1,6	1,5	1,4	1,3
Kuat-Pikul Tekanan $q'(\text{t/m}^2)$	60	40	20	10

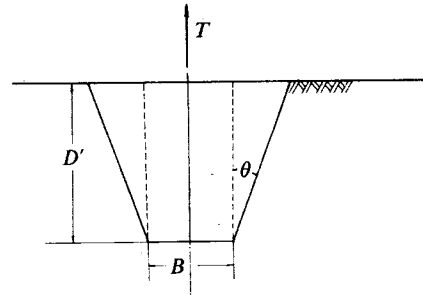
Catatan: Kasus-I: Tanah Keras (di Daerah Pegunungan, dsb)

Kasus-II: Tanah Lembek (di Sawah, dsb)

Kasus-III: Tanah Sangat Lembek (di Rawa, dsb)

Kasus-IV: Tanah Sangat Lembek dan Banyak Air Memancar Keluar

- (3) Gaya mendatar tergantung dari keadaan waktu menimbun tanah kembali (backfilling) dan biasanya diperkirakan sebesar  $\frac{1}{3} - \frac{2}{3}$  kuat-tekan dari tanah. Gaya ini tidak penting untuk pondasi-pondasi beton, tetapi perlu diperhatikan dalam hal pondasi kerangka baja.



Gbr. 31 Pondasi Menara Baja.

3

## 4.4 Tiang Transmisi Baja

### 4.4.1. Perencanaan Tiang

Dalam pemasangan tiang baja harus diperhatikan bagaimana caranya agar pekerjaan-pekerjaan pada tiang (termasuk perawatannya) dapat dengan mudah dilakukan; juga agar terjamin jarak-bebas (clearance) dengan penghantar dan kawat penahan (guy wire).

Lebar kaki tiang persegi adalah  $\frac{1}{10} - \frac{1}{15}$  dari tinggi tiang untuk tiang singgung

Tabel 25. Kombinasi Beban pada Tiang Baja

Jenis Tiang	Arah Angin terhadap Saluran			Kombinasi Beban				
		Beban Vertikal		Beban Mendatar Melintang			Beban Mendatar Longitudinal	
		Berat Tiang	Berat Penghantar	Komponen Vertikal karena Kawat Penahan	Tekanan Angin pada Tiang	Tekanan Angin pada Kawat	Komponen Melintang karena Sudut Mendatar	Tekanan Angin pada Tiang
Tiang Siggung	Tegak Lurus	○	○	○	○	○		
Tiang Sudut	Sejajar	○	○	○		○	○	
Tiang Ujung	Tegak lurus	○	○	○	○	○		○
	Sejajar	○	○	○			○	○
Tiang Penegang	Tegak lurus	○	○	○	○	○		○
	Sejajar	○	○	○			○	○



(tangent pole) dan tiang sudut (angle pole) serta  $\frac{1}{6} - \frac{1}{8}$  dari tinggi tiang untuk tiang sudut-besar dan tiang ujung.

*Beban yang diandaikan* pada tiang baja serupa dengan beban pada menara baja, sedang kombinasi bebannya diterapkan pada kondisi bahwa berbagai beban seperti tertera dalam Tabel 25 dijumlahkan secara simultan.

Kuat-tarik dalam keadaan tidak seimbang karena putusnya penghantar tidak dipertimbangkan untuk tiang singgung dan tiang sudut; tetapi untuk tiang ujung (dead end poles) kuat-tarik tidak seimbang ini dipertimbangkan. Untuk tiang penegang (tension) beban yang tidak seimbang sebesar  $\frac{1}{3}$  dari gaya kerja maksimum diterapkan.

Bila digunakan tali penahan (stay wires) direncanakan penahanan  $\frac{1}{2}$  dari tekanan angin terhadap penghantar dan tiang oleh tiangnya sendiri.

Seperti juga pada menara baja *perhitungan tegangan* (stress) pada tiang baja dilakukan dengan cara diagramatik dan cara komputasi. Karena konstruksinya yang lebih sederhana, cara komputasi digunakan:

- (1) Tegangan pada bagian-bagian utama:

$$P_p = \frac{\Sigma M}{mB} \sec \alpha \pm \frac{1}{n} (W_t + \Sigma W_c) \quad (58)$$

dimana  $P_p$  = tegangan bagian utama (kg)

$\Sigma M$  = jumlah momen terhadap beban mendatar (kg.m)

$B$  = jarak antara bagian-bagian utama (m)

$W_t$  = berat tiang baja (kg)

$\Sigma W_c$  = jumlah beban tegak dari kawat dan isolator (kg)

$\alpha$  = kemiringan bagian utama

$m, n$  = koefisien yang tergantung dari jenis tiang:

$m = 2 \quad n = 4$  untuk tiang persegi dan  $m = 1 \quad n = 3$  untuk tiang segitiga

$\pm = +$  artinya tegangan-tekan dan  $-$  artinya tegangan-tarik

- (2) Tegangan pada bagian-bagian penguat (bracing member)

$$P_b = \frac{1}{m} \Sigma H \sec \beta \quad (59)$$

dimana  $P_b$  = gaya terhadap bagian penguat (kg)

$\Sigma H$  = jumlah beban mendatar yang tergantung di atas titik tertentu (kg)

$\beta$  = sudut gradien terhadap garis mendatar dari bagian penguat

$m$  = koefisien yang tergantung dari jenis tiang, seperti pada bagian utama

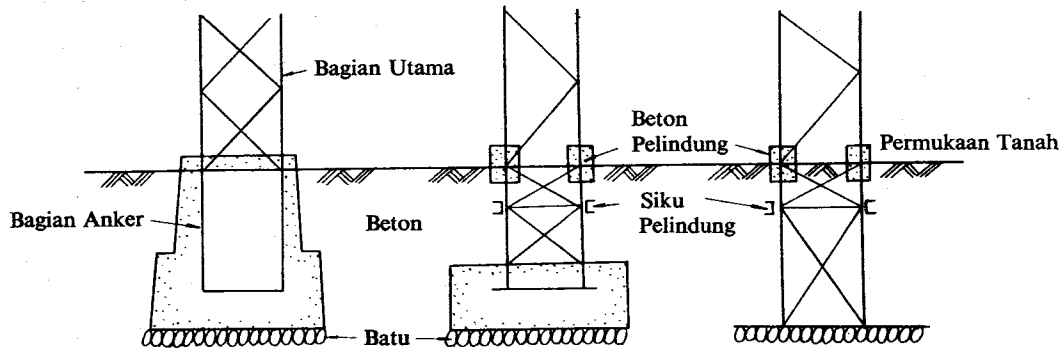
*Tegangan yang diperbolehkan* serta pemilihan bagian-bagiannya serupa dengan ketentuan pada menara-menara baja, meskipun di sini tidak ada pemisahan antara beban normal dan luar biasa. Semua perhitungannya dilakukan seperti dalam keadaan normal pada menara baja.

Gaya tarik pada kawat penahan (stay-wire) adalah jumlah dari  $\frac{1}{2}$  kali tekanan udara terhadap tiang dan kawat, beban sudut mendatar serta kuat-tarik tak-seimbang. Perhitungan dilakukan dengan beban-beban tadi pada arah kawat penahan.

Beban tarik yang diperbolehkan kurang dari  $1/2,5$  dari kuat-tarik maksimum dari kawat penahan dengan harga maksimum 440 kg.

#### 4.4.2. Pondasi Tiang

Ada dua jenis pondasi untuk tiang baja: (a) pondasi beton dan (b) pondasi kerangka baja. Untuk pondasi kerangka baja dasarnya diberi kerikil atau beton untuk menguatkan kuat-pikulnya. Di sisi pondasi dipasang anker (guy anchor), periksa Gbr. 32.



Gbr. 32 Pondasi Tiang Baja.

### 4.5 Tiang Beton Bertulang

#### 4.5.1. Perencanaan Tiang

Beban yang diandaikan serta kombinasi-kombinasinya serupa dengan tiang baja. Oleh karena itu, hanya hal-hal lain yang dianggap perlu terutama dalam hal tiang beton yang dibuat setempat yang akan diuraikan dibawah.

*Tegangan yang diperbolehkan*<sup>7)</sup> untuk tulang (reinforcement) baja adalah 1800 kg/cm<sup>2</sup> untuk tegangan-tarik dan tegangan-tekan, bila baja SS-41 dipakai. Tegangan tekan sesudah 4 minggu untuk betonnya adalah 200 – 240 kg/cm<sup>2</sup>. Tegangan tekanan standar yang diperbolehkan adalah  $\frac{1}{4}$  dari gaya tekanan sesudah 4 minggu. Tegangan geser yang diperbolehkan adalah 4,5 kg/cm<sup>2</sup> bersama dengan tegangan adhesi yang diperbolehkan sebesar 5,5 kg/cm<sup>2</sup>.

Kekuatan tiang beton bertulang jenis bulat dinyatakan oleh persamaan-persamaan:<sup>7)</sup>

$$e = \frac{M}{N} \quad (60)$$

$$\sigma_c = N \frac{x}{G_i} \quad (61)$$

$$\sigma_s = Nn \frac{(D - a - x)}{G_i} \quad (62)$$

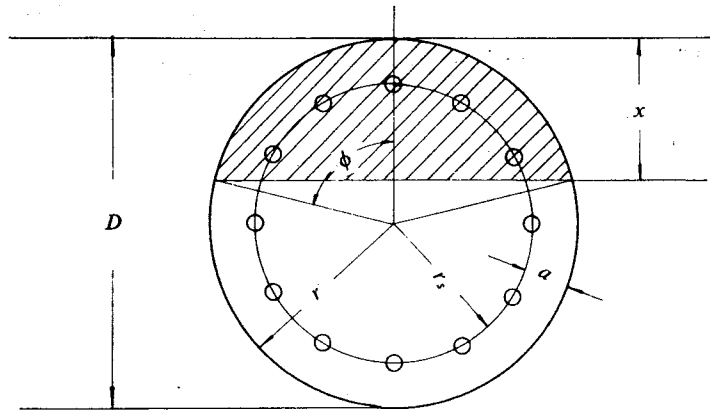
dimana  $e$  = jarak eksentrik ekivalen dari poros tengah penampang (cm)  
 $M$  = jumlah momen-lentur karena beban yang diandaikan pada titik yang ditentukan (kg/cm)  
 $N$  = jumlah beban vertikal karena beban yang diandaikan pada titik yang ditentukan (kg)  
 $\sigma_c$  = tegangan-tekan maksimum dari beton (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_s$  = tegangan-tarik maksimum dari tulang baja (kg/cm<sup>2</sup>)

$n$  = koefisien yang untuk perbandingan baja dan beton  
= 15

$D$  = garis tengah tiang (cm); periksa Gbr. 33

$a$  = dalamnya penulangan (cm); periksa Gbr. 33

$x$  = jarak antara ujung tekanan sampai poros netral yang dinyatakan oleh persamaan



Gbr. 33 Penampang Tiang Beton Bertulang.

$$x = \frac{D}{2} - e + \frac{I_t}{G_t} \text{ dengan pengandaian (periksa Gbr. 33)} \quad (63)$$

$$x = r(I - \cos \varphi) \quad (64)$$

$$G_t = r^3 \left\{ \frac{\sin \varphi}{3} (2 + \cos^2 \varphi) - \varphi \cos \varphi - n\pi P \cos \varphi \right\} \quad (65)$$

$$I_t = r^4 \left[ \varphi \left( \frac{1}{4} + \cos^2 \varphi \right) - \sin \varphi \cos \varphi \left( \frac{13}{12} + \frac{1}{6} \cos^2 \varphi \right) + n\pi P \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{r_s}{r} \right)^2 + \cos^2 \varphi \right\} \right] \quad (66)$$

dimana  $r$  = jari-jari tiang (cm)

$r_s$  = jari-jari sampai titik berat dari tulang baja (cm)

$P$  = perbandingan penulangan

3

## 4.6 Tiang Kayu

### 4.6.1. Perhitungan Tegangan

Kecuali untuk tiang-tiang kayu khusus, perhitungan tegangan dilakukan atas dasar tekanan angin terhadap kawat dan tiang. Bila ada sudut mendatar dan tegangan tidak-seimbang pada gawang yang lebar, tiang harus dilengkapi dengan kawat-kawat penahan. Faktor keamanan untuk tiang kayu adalah 3,0 dan perhitungan gaya dilakukan sesuai dengan persamaan-persamaan sebagai berikut:<sup>5)</sup>

(1) Untuk tiang tunggal tanpa kawat penguat:

$$\frac{\sigma_b}{F} \geq 10K \frac{40D_0 H^2 - 24H^3 + S(\Sigma 10dh)}{D_0^3} \quad (67)$$

- (2) Untuk tiang tunggal dengan kawat penguat:

$$\frac{\sigma_b}{F} \geq 10K \frac{20D_0H^2 - 12H^3 + 0,5S(\Sigma 10dh)}{D_0^3} \quad (68)$$

- (3) Untuk jenis *H* atau *A* tanpa kawat penguat:

$$\frac{\sigma_b}{F} \geq 10K \frac{40D_0H^2 - 24H^3 + 0,5S(\Sigma 10dh)}{D_0^3} \quad (69)$$

- (4) Untuk jenis *H* atau *A* dengan kawat penguat:

$$\frac{\sigma_b}{F} \geq 10K \frac{20D_0H^2 - 12H^3 + 0,25S(\Sigma 10dh)}{D_0^3} \quad (70)$$

dimana  $S$  = gawang pembebanan (m)  
 $d$  = garis tengah kawat yang direntang (mm)  
 $h$  = tinggi titik topang dari kawat (m)  
 $D_0$  = garis tengah tiang pada permukaan tanah  
 $= D + 0,9H$  (cm)  
 $D$  = garis tengah tiang pada puncaknya (cm)  
 $H$  = panjang tiang di atas permukaan tanah (m)  
 $\sigma_b$  = tegangan-patah (breaking strength) dari tiang (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $F$  = faktor keamanan dari tiang  
 $K$  = koefisien angin (1,0 atau 0,5)

Di dalam empat persamaan di atas ruas kanan menyatakan beban yang harus dipikul, sedang ruas kiri menunjukkan persyaratan yang harus dipenuhi oleh tiang kayu untuk memikul beban tadi. Untuk keperluan terakhir ini tiang kayu harus diuji. Di Amerika Serikat, misalnya, kemampuan tiang kayu dapat diketahui dari hasil pengujian (dengan Cantilever Method), yaitu dengan menghitung tegangan serat maksimum (maximum fibre stress) pada permukaan tanah:<sup>8)</sup>

$$\sigma_f = \frac{32\pi^2 Pa}{C^3} \quad (71)$$

dimana  $\sigma_f$  = tegangan serat maksimum pada permukaan tanah (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $P$  = beban pada saat patahnya tiang (kg)  
 $a$  = jarak dari permukaan tanah ketitik pembebanan (cm)  
 $C$  = keliling (circumference) tiang pada permukaan tanah (cm)

Bila tegangan serat maksimum di tempat patahnya tiang ingin diketahui, maka rumus yang digunakan adalah:<sup>8)</sup>

$$\sigma_b = \frac{32\pi^2 Pa'}{C_a^3} \quad (72)$$

dimana  $\sigma_b$  = tegangan serat maksimum (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $P$  = beban pada saat tiang patah (kg)  
 $a'$  = jarak dari titik patah ke titik pembebanan (cm)  
 $C_a$  = keliling tiang pada titik patah (cm)

Tegangan serat menyatakan kekuatan tiang kayu, karena tegangan (stress) adalah gaya dalam (internal force), yang melawan gaya luar, per satuan luas. Gaya luar ini berbentuk beban yang disebabkan oleh beratnya kawat dan isolator, tekanan angin, dsb. Oleh

karena gaya luar ini, maka tiang melentur, sehingga tegangan serat maksimum sama dengan tegangan lentur maksimum (ultimate bending strength) atau tegangan lentur patah, atau, seperti di atas, tegangan patah (breaking strength).

Faktor keamanan (safety factor)  $F$  dalam persamaan-persamaan di atas digunakan sebagai jaminan keandalan dan keamanan, karena kekuatan kayu serta konstruksi tiangnya dipengaruhi oleh berbagai faktor, dan karena diperlukan toleransi dalam ketelitian perhitungan, kesalahan pada pengujian, dsb. Karena dalam perencanaan tiang saluran transmisi selalu diperhitungkan dua keadaan, yaitu keadaan normal (tanpa kawat putus) dan keadaan abnormal (dengan kawat putus), maka faktor keamanannya pun berbeda. Untuk beberapa jenis kayu Indonesia direkomendasikan faktor-faktor keamanan 3,6–4,2 untuk keadaan normal dan 2,4–2,8 untuk keadaan tidak normal.

Di beberapa negara yang sudah lama menggunakan tiang kayu, spesifikasi dan ukuran tiang ditetapkan dalam standar. Di Amerika, tiang kayu dibagi menjadi 10 kelas; pembagiannya diatur sehingga kekuatannya (nominal ultimate strength) sama untuk semua ukuran panjang dan semua jenis untuk kelas yang sama.<sup>9)</sup> Dalam standar ini juga ditetapkan ukuran keliling tiang 183 cm (= 6 feet) dari pangkalnya, untuk setiap kelas dan jenis kayu dengan kekuatan tertentu. Kekuatan nominal ini didapat dari perhitungan rata-rata yang konservatif dari tegangan serat maksimum dari sejumlah tiang kayu yang diuji. Ukuran puncak tiang juga ditetapkan, tetapi hanya diameter minimumnya saja dan besarnya sama untuk semua jenis kayu.

#### 4.6.2. Pondasi dan Kawat Penguat

Kedalaman tiang kayu ditanam ditentukan dalam standar-standar. Di Jepang ditentukan bahwa bila panjang tiang kurang dari 15 m, maka  $\frac{1}{6}$  dari tiang ditanam dalam tanah. Bila panjang tiang lebih dari 15 m, maka tiang ditanam sedalam lebih dari 2,5 m. Bila kondisi tanah kurang baik, maka dipakai angker-angker penguat. Kawat-kawat penahan (stay wire) dipasang sesuai dengan ketentuan-ketentuan yang berlaku untuk tiang baja dan tiang beton bertulang.

Kekuatan pondasi tiang kayu sukar dinyatakan dalam angka-angka dan tidak begitu penting dilihat dari segi keamanan konstruksi seperti pada menara baja. Kegagalan pondasi tiang kayu, dalam artian seperti pada perencanaan menara baja (yaitu pergerakan kaki menara dalam tanah), tidak besar akibatnya kecuali bahwa tiang harus ditegakkan dan kawatnya harus direntang kembali. Atas dasar pemikiran ini serta pengalaman beberapa puluh tahun, maka di Amerika Serikat kedalaman tiang kayu ditetapkan sebagai berikut:

Panjang tiang (m):	9,15	10,65	12,20	13,70	15,25	16,75	18,30	19,80
Kedalaman tanam (m):	1,68	1,83	1,83	1,98	2,12	2,12	2,28	2,43

Kedalaman ini kelihatannya kurang masuk akal oleh karena kekuatan tiang atau kondisi tanah (seperti pada standar Jepang di atas) tidak diperhatikan. Namun, apa yang ditetapkan tadi dapat diterima, bila diingat bahwa tujuan penanaman dengan kedalaman tertentu adalah untuk mencegah terangkatnya tiang (kicking out of) dari tanah timbunannya, dan bukan untuk mendapatkan pondasi yang kuat (rigid). Sejalan dengan jalan pikiran ini, maka, seperti di Jepang, di Amerika Serikat juga digunakan

kawat-kawat penahan (guy wires) untuk memperkuat pasangan tiang serta guna menahan lenturan karena beban yang berat.

Berdasarkan pengalaman di Swedia dibedakan antara dua jenis tanah, yakni tanah friksi dan tanah kohesi. Untuk kedua jenis tanah ini digunakan pondasi normal dan pondasi khusus. Dalam kelompok pondasi normal termasuk pondasi dari batu dan penimbunan kembali dengan tanah. Pondasi khusus digunakan bila kondisi tanah kurang baik.

#### 4.7 Referensi

Di dalam Bab 4 digunakan referensi terhadap karya-karya sebagai berikut:

- 1) W. B. Woodhouse, "Overhead Electric Lines", *Journal I.E.E.E.*, vol. 67, 1929, hal. 217.
- 2) T. W. Schroeder, J. E. O'Neil, "Investigations on Wood Pole 345-kV Test Line", *Proceedings, American Power Conference*, vol. XXIII, 1961, hal. 737-744.
- 3) Japanese Electrotechnical Committee, *Design Standard for Steel Transmission Towers*, JEC-127, Denki Shoin, 1965.
- 4) Japanese Electrotechnical Committee, *Design Standard for Steel Transmission Poles*, JEC-128, Denki Shoin, 1965.
- 5) *Notice of Ministry of International Trade and Industry regarding the Detailed Technical Standards of Electrical Installations (Japan)*, June 1968.
- 6) *Handbook of Electrical Engineering*, Institute of Electrical Engineers of Japan, 1967, hal. 1202.
- 7) *Ibid*, hal. 1205.
- 8) *Standard Methods of Static Tests of Wood Poles*, ASTM Designation: D1036-58, Adopted, 1958, American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA.
- 9) *Specifications and Dimensions for Wood Poles*, 05.1-1963, Approved March 5, 1963, American Standards Association.

## REPRESENTASI SALURAN TRANSMISI, RELASI-RELASI ARUS DAN TEGANGAN

### 1. PENDAHULUAN

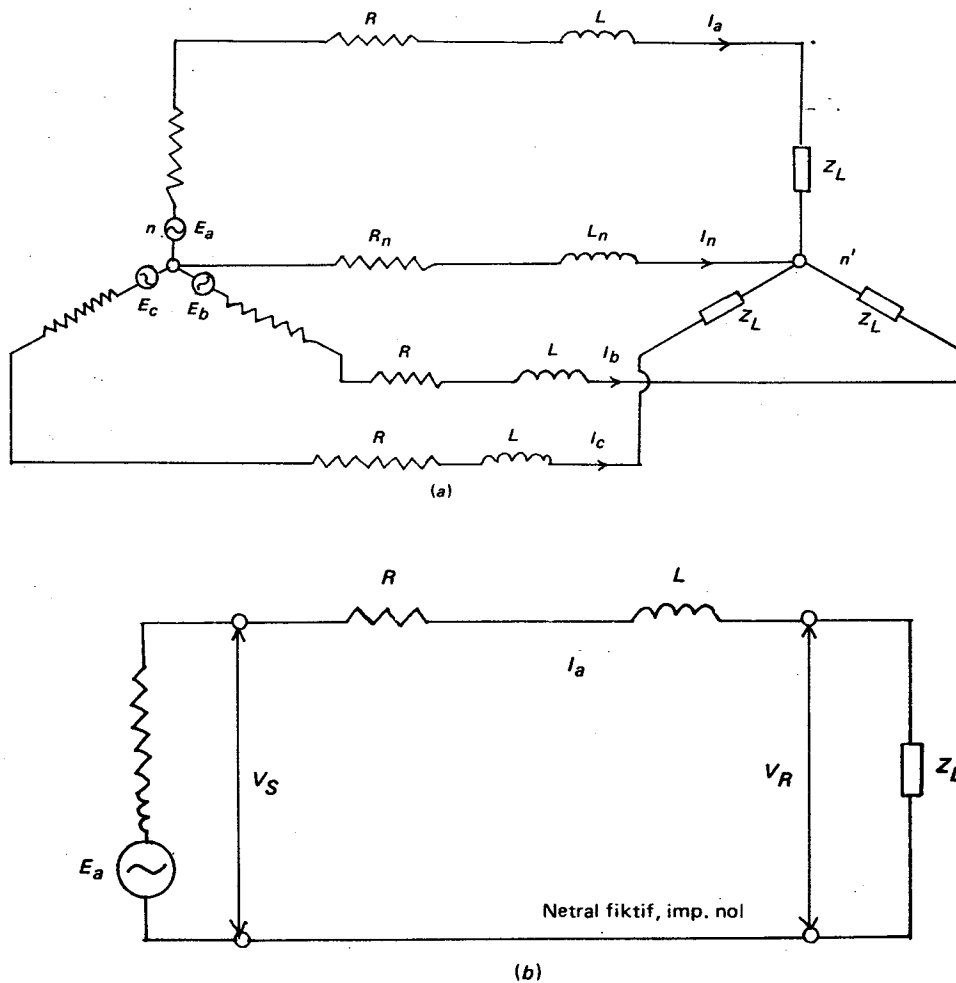
Di dalam saluran transmisi persoalan tegangan sangat penting. Baik dalam keadaan operasi maupun dalam perancangan harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik dalam saluran. Besar perubahan tegangan yang diperbolehkan biasanya berkisar antara  $-10\%$  sampai  $+5\%$ .

Sebelum analisa dan perhitungan dapat dilakukan, terlebih dahulu saluran transmisi itu harus direpresentasikan dengan diagram pengganti.

### 2. REPRESENTASI SALURAN TRANSMISI

Seperti telah disinggung dalam bab terdahulu, pada umumnya saluran-saluran transmisi itu adalah fasa tiga, Gambar 3-1.

Dalam Gambar 3-1(a), diperlihatkan saluran fasa tiga dengan kawat netral  $n$ . Dalam keadaan tegangan dan arus yang simetris tidak ada arus yang mengalir pada kawat netral  $n - n'$ . Oleh karena ketiga fasanya simetris, artinya ketiga fasanya tergeser  $-120^\circ$  dan  $120^\circ$  terhadap fasa referensi, maka analisisnya cukup dilakukan dengan berdasarkan satu fasa, dan biasanya dipilih fasa  $a$  sebagai fasa referensi, dengan jalan balik arus yang fiktif tanpa impedansi, Gambar 3-1(b). Besaran-besaran untuk fasa  $b$  dan fasa  $c$  diperoleh dengan memutar besaran fasa  $a$  dengan sudut  $-120^\circ$  dan  $+120^\circ$ .



GAMBAR 3-1. Representasi saluran transmisi fasa tiga.

### 3. KLASIFIKASI SALURAN TRANSMISI

#### 3.1. Klasifikasi untuk Keperluan Diagram Pengganti

Untuk keperluan analisa dan perhitungan maka diagram pengganti biasanya dibagi dalam 3 kelas, yaitu:<sup>5)</sup> (a) kawat pendek ( $< 80$  km); (b) kawat menengah ( $80 - 250$  km); (c) kawat panjang ( $> 250$  km).

Sebenarnya klasifikasi di atas sangat kabur dan sangat relatif. Klasifikasi saluran transmisi harus didasarkan atas besar kecilnya kapasitansi ke tanah. Jadi bila kapasitansi kecil, dengan demikian arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka



dalam hal ini kapasitansi ke tanah dapat diabaikan, dan dinamakan kawat pendek. Tetapi bila kapasitansi sudah mulai besar sehingga tidak dapat diabaikan, tetapi belum begitu besar sekali sehingga masih dapat dianggap seperti kapasitansi terpusat (*lumped capacitance*), dan ini dinamakan kawat menengah. Bila kapasitansi itu besar sekali sehingga tidak mungkin lagi dianggap sebagai kapasitansi terpusat, dan harus dianggap terbagi rata sepanjang saluran, maka dalam hal ini dinamakan kawat panjang.

Di atas telah disebutkan bahwa klasifikasi berdasarkan panjang kawat sangat kabur. Seperti diketahui makin tinggi tegangan operasi maka kemungkinan timbulnya korona sangat besar. Korona ini akan memperbesar kapasitansi, dengan demikian memperbesar arus bocor. Jadi ada kalanya walaupun panjang saluran hanya 50 km, misalnya, dan bila tegangan kerja sangat tinggi (Tegangan Ekstra Tinggi, EHV, apalagi Tegangan Ultra Tinggi, UHV) maka kapasitansi relatif besar sehingga tidak mungkin lagi diabaikan walaupun panjang saluran hanya 50 km.<sup>11</sup>

Jadi untuk memperoleh hasil yang teliti, sebelum kita dapat menggambarkan diagram pengganti saluran transmisi, lebih baik bila dihitung terlebih dahulu kapasitansi termasuk pengaruh korona.

Dalam praktek klasifikasi saluran transmisi menurut panjangnya seperti tertera di atas sudah memadai.

### 3.2. Klasifikasi Saluran Transmisi menurut Tegangan Kerja

Di Indonesia standard tegangan transmisi adalah: 66, 150, 380, dan 500 KV, dan klasifikasi menurut tegangan ini masih belum nyata.<sup>2)</sup> Tetapi di negara-negara yang telah maju, terutama dalam bidang transmisi, seperti: USA, Rusia, Canada, di mana tegangan transmisi telah mencapai harga 1.000 KV, maka di sana klasifikasi berdasarkan tegangan adalah: (a) Tegangan tinggi: sampai 138 KV; (b) Tegangan Ekstra Tinggi (Extra High Voltage, EHV) antara 220 sampai 765 kV; (c) Tegangan Ultra Tinggi (Ultra High Voltage, UHV) di atas tegangan 765 KV.

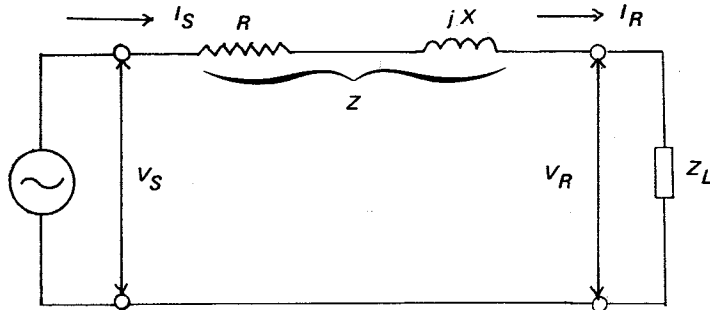
### 3.3. Klasifikasi Berdasarkan Fungsinya dalam Operasi

Berdasarkan fungsinya dalam operasi, saluran transmisi sering diberi nama:<sup>7</sup>  
 (a) *transmisi*: yang menyalurkan daya besar dari pusat-pusat pembangkit ke daerah beban, atau antara dua atau lebih sistem. Yang terakhir ini disebut juga sebagai saluran interkoneksi atau "tie-line".  
 (b) *sub-transmisi*: sub-transmisi ini biasanya adalah transmisi percabangan dari saluran yang tinggi ke saluran yang lebih rendah;  
 (c) *distribusi*: di Indonesia telah ditetapkan bahwa tegangan distribusi adalah 20 KV.

## 4. DIAGRAM PENGGANTI SALURAN TRANSMISI

### 4.1. Saluran Pendek

Dalam Gambar 3-2 diberikan diagram pengganti dari saluran pendek. Di sini kapasitansi saluran diabaikan.



GAMBAR 3-2. Diagram penganti saluran pendek.

Dalam Gambar 3-2:

- $V_S$  = tegangan pada ujung kirim atau ujung generator.
- $I_S$  = arus pada ujung kirim atau ujung generator.
- $V_R$  = tegangan pada ujung terima atau ujung beban.
- $I_R$  = arus pada ujung terima atau ujung beban.
- $Z = R + jX$  = impedansi saluran.

Maka relasi tegangan dan arus,

$$\begin{aligned} V_S &= V_R + Z I_R \\ I_S &= I_R \end{aligned} \quad (3-1)$$

Pengaturan Tegangan atau "Voltage Regulation" (VR) didefinisikan sebagai:

$$VR (\%) = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100\% \quad (3-2)$$

di mana,

- $|V_{R(NL)}|$  = tegangan skalar ujung beban pada beban nol (No load).
- $|V_{R(FL)}|$  = tegangan skalar ujung beban pada beban penuh (Full load).

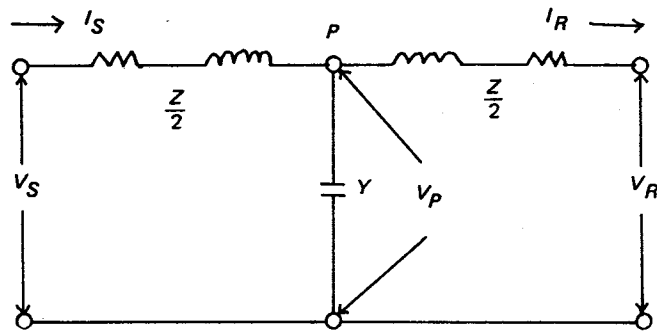
Untuk kawat pendek  $|V_{R(NL)}| = |V_S|$  dan  $|V_{R(FL)}| = |V_R|$ , maka

$$VR (\%) = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \times 100\%$$

#### 4.2. Saluran Menengah

Pada saluran menengah kapasitansi itu dapat dipusatkan pada satu titik (nominal T), atau pada dua titik nominal PI).

## 4.2.1. Nominal T



GAMBAR 3-3. Diagram pengganti saluran menengah, nominal T.

Relasi tegangan dan arus:

$$V_S = V_R + I_R \frac{Z}{2} + I_S \frac{Z}{2}$$

Tetapi,

$$I_S = I_R + V_P Y = I_R + (V_R + I_R \frac{Z}{2}) Y$$

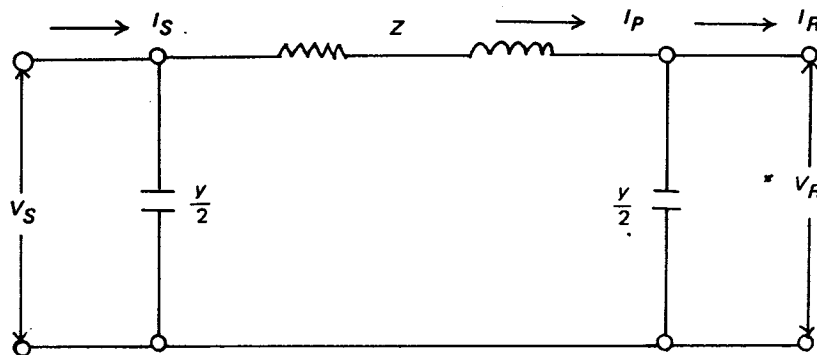
$$I_S = Y V_R + (1 + \frac{ZY}{2}) I_R$$

maka,

$$V_S = (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + (Z + \frac{Z^2 Y}{4}) I_R$$

$$I_S = Y V_R + (1 + \frac{ZY}{2}) I_R \quad (3-3)$$

## 4.2.2. Nominal PI



GAMBAR 3-4. Diagram pengganti saluran menengah, nominal PI.

Relasi tegangan dan arus:

$$V_S = V_R + I_P Z$$

tetapi,

$$I_P = I_R + V_R \frac{Y}{2}$$

Jadi,

$$V_S = V_R + (I_R + V_R \frac{Y}{2}) Z$$

$$V_S = (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + Z I_R$$

Arus,

$$I_S = I_P + V_S \frac{Y}{2}$$

$$I_S = I_R + V_R \frac{Y}{2} + (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + Z I_R \frac{Y}{2}$$

$$I_S = (Y + \frac{ZY^2}{4}) V_R + (1 + \frac{ZY}{2}) I_R$$

Jadi,

$$\begin{aligned} V_S &= (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + Z I_R \\ I_S &= (Y + \frac{ZY^2}{4}) V_R + (1 + \frac{ZY}{2}) I_R \end{aligned} \quad (3.4)$$

Pengaturan tegangan untuk nominal  $PI$  atau  $T$ ,

$$V_{R(NL)} = \frac{V_S}{1 + \frac{ZY}{2}}; \quad V_{R(FL)} = V_R$$

maka,

$$VR(\%) = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100\%$$

$$VR(\%) = \frac{\left| \frac{V_S}{1 + \frac{ZY}{2}} \right| - |V_R|}{|V_R|} \times 100\% \quad (3.5)$$

Contoh 3-1. Suatu saluran transmisi fasa tiga, 50 km, 70 KV, mempunyai konstanta:  $R = 0,20$  ohm per km;  $X = 0,608$  ohm per km;  $Y = j 4,0 \times 10^{-6}$  mho per km. Saluran transmisi tersebut mensuplai beban 30 MW dan faktor daya  $pf = 0,9$  terbelakang.

$$R = 0,22 \Omega/k, \quad X = 0,62 \Omega/k, \quad \text{Beban } 30 \text{ MW pada}$$

$$pf = 0,85 \text{ terbelakang}$$

Tegangan pada ujung beban 70 KV. Hitunglah: (a) tegangan pada ujung kirim; (b) Daya pada ujung kirim; (c) efisiensi transmisi; (d) pengaturan tegangan.

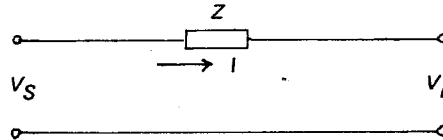
Jawab.

(a) Karena panjang saluran 50 km, jadi ini adalah saluran pendek.

Jadi:

$$I_S = I_R = I$$

$$V_S = V_R + IZ$$



$$P_R = 30 \text{ MW}; \text{ pf} = 0,9 \text{ terbelakang}$$

$$V_R = 70 \text{ KV (L-L)} = 70/\sqrt{3} \text{ KV (L-N)} \times$$

$$= 40.416 \text{ Volt (L-N)}$$

$$|I_R| = \frac{P_R}{\sqrt{3} V_R (L-L) \cdot \text{pf}}$$

Jadi:

$$I_R = \frac{30.000 \text{ KW} \angle -25,84^\circ}{\sqrt{3} \times 70 \text{ KV} \times 0,9} \text{ Amper}$$

$$= 274,94 \angle -25,84^\circ \text{ Amper}$$

$$Z = (0,2 + j 0,608) 50 \text{ ohm}$$

$$= 10 + j 30,4 \text{ ohm} = 32 \angle 71,8^\circ \text{ ohm} \times$$

$$V_S = V_R + IZ$$

$$= 40.416 + 274,94 \angle -25,84^\circ \times 32 \angle 71,8^\circ \text{ Volt}$$

$$= 40.416 + 8.798 \angle 45,96^\circ$$

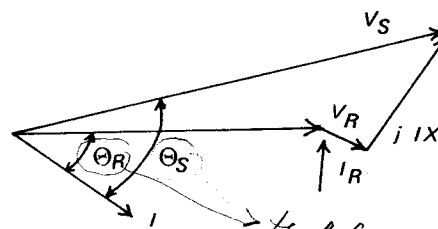
$$= 40.416 + 6.116 + j 6.324$$

$$= 46.532 + j 6.116 \text{ Volt} = 46,93 \angle 7,49^\circ \text{ KV (L-N)}$$

atau

$$|V_S| = 46,93 \text{ KV (L-N)} = \underline{\underline{81,28 \text{ KV (L-L)}}}$$

(b) Daya pada ujung kirim:



$$P_S = \sqrt{3} |V_S| |I| \cos \theta_S$$

$$\theta_S = 7,49 - (-25,84) = 33,33^\circ$$

$$\begin{aligned}
 P_S &= \sqrt{3} \times 81,28 \times 274,94 \times \cos 33,33^\circ \text{ KW} \\
 &= 32.339 \text{ KW} \\
 &= \underline{\underline{32,34 \text{ MW}}}
 \end{aligned}$$

(c) Efisiensi transmisi:

$$\begin{aligned}
 \text{Eff} &= \frac{P_R}{P_S} = \frac{30}{32,34} \times 100\% \\
 &= \underline{\underline{92,6\%}}
 \end{aligned}$$

(d) Pengaturan tegangan:

$$VR(\%) = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100\%$$

$$|V_{R(NL)}| = |V_S| = 81,28 \text{ KV}$$

$$|V_{R(FL)}| = |V_R| = 70 \text{ KV}$$

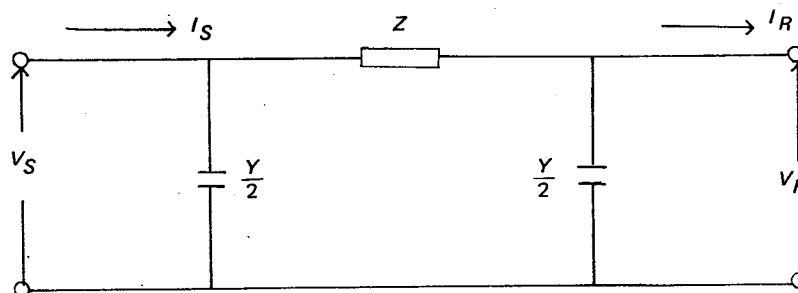
$$\begin{aligned}
 VR(\%) &= \frac{81,28 - 70}{70} \times 100\% \\
 &= 16,11\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \theta &= 0,55275,8^\circ \quad \gamma = 5,0 - 60^\circ \angle 90^\circ \\
 &\quad 210 \text{ km} \quad 220 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

Contoh 3.2. Suatu saluran transmisi fasa tiga, 200 km, 220 KV. Konstanta kawat:  $Z = 0,64 \angle 71,8^\circ \text{ ohm/km}$ ;  $Y = 4,0 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ mho/km}$ . Saluran transmisi di atas menyalurkan daya sebesar 100 MW dan  $pf = 1,0$  pada ujung beban. Tegangan pada ujung beban 220 KV. Dengan menggunakan representasi nominal  $\pi$  tentukanlah: (a) tegangan dan arus pada ujung kirim; (b) efisiensi transmisi; (c) pengaturan tegangan.

Jawab.

$$125 \text{ MW} \text{ } pf = 1$$



$$(a) P_R = 100 \text{ MW}; pf = 1,0; V_R = 220 \text{ KV (L-L)} \quad \checkmark$$

$$I_R = \frac{100.000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot \cos \varphi = 1} = 262,4 \angle 0^\circ \text{ Amper} \quad \checkmark$$

$$V_R = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ KV (L-N)} \quad \checkmark$$

$$Z = 0,64 \times 200 \angle 71,8^\circ \text{ ohm} = 128 \angle 71,8^\circ \text{ ohm} \quad \checkmark$$

$$Y = 4 \times 200 \times 10^{-6} / 90^\circ \text{ mho} = 0,8 \times 10^{-3} / 90^\circ \text{ mho} /$$

$$V_S = (1 + \frac{ZY}{2}) V_R + Z I_R$$

$$I_S = (1 + \frac{ZY}{4}) Y V_R + (1 + \frac{ZY}{2}) I_R$$

$$\begin{aligned} 1 + \frac{ZY}{2} &= 1 + 128 / 71,8^\circ \times 0,4 \times 10^{-3} / 90^\circ \\ &= 1 + 0,051 / 161,8^\circ \\ &= 1 - 0,0484 + j 0,0159 = 0,9516 + j 0,0159 \\ &= 0,9517 / 0,96^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 + \frac{ZY}{4} &= 1 + 0,0255 / 161,8^\circ = 0,9758 + j 0,008 \\ &= 0,9758 / 0,47^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_S &= 0,9517 / 0,96^\circ \times 127.000 + 128 / 71,8^\circ \times 262,4 / 0^\circ \text{ Volt} \\ &= 120.849 + j 2.025 + 10.490 + j 31.907 \text{ Volt} \\ &= 131,339 + j 33,932 \text{ KV (L-N)} \\ &= 135,65 / 14,48^\circ \text{ KV (L-N)} = 234,94 / 14,48^\circ \text{ KV (L-L)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_S &= 0,9758 / 0,47^\circ \times 0,8 \times 10^{-3} / 90^\circ \times 127.000 + 0,9517 / 0,96^\circ \times \\ &\quad 262,4 / 0^\circ \\ &= 99,14 / 90,47^\circ + 249,73 / 0,96^\circ \\ &= -0,81 + j 99,14 + 249,69 + j 4,18 \\ &= 248,88 + j 103,32 = 269,47 / 22,54^\circ \text{ Amper} \end{aligned}$$

$$\theta_S = 14,48 - 22,54^\circ = -8,06^\circ$$

$$\begin{aligned} P_S &= 3 \times 135,65 \times 269,47 \cos 8,06^\circ \text{ KW} \\ &= 108.577,56 \text{ KW} = 108,58 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$(b) \text{ Eff} = \frac{P_R}{P_S} = \frac{100}{108,58} \times 100\% = 91,1\% \checkmark$$

$$(c) \text{ VR (\%)} = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} V_{R(NL)} &= \frac{|V_S|}{|1 + \frac{ZY}{2}|} \\ &= \frac{135,65}{0,9517} = 142,53 \text{ KV} \end{aligned}$$

$135,65$   
 $\frac{234,94}{2} = 117,47$   
 $1 + \frac{128 \angle 71,8^\circ \times 0,8 \times 10^{-3} \angle 90^\circ}{2}$

$$V_{R(FL)} = 127 \text{ KV}$$

$$\text{VR (\%)} = \frac{142,53 - 127}{127} \times 100\% = 12,23\% \checkmark$$

**Contoh 3-3. Penentuan Besar Beban pada Rugi-rugi Tertentu.** Tentukanlah jumlah daya pada ujung beban, bila faktor daya beban  $\cos \Theta_R$ , yang dapat ditransmisikan melalui saluran pendek dengan tegangan ujung kirim  $V_S$  dan rugi-rugi transmisi yang diijinkan  $L$ .

*Jawab.* Misalkan  $P_R$ ,  $I_R$ ,  $V_R$  adalah harga-harga yang tidak diketahui pada ujung beban, per fasa.

Maka:

$$P_R = |V_R| |I_R| \cos \Theta_R \quad (1)$$

Bila  $L$  = rugi-rugi transmisi per fasa, dalam persen

$R$  = tahanan saluran per km per fasa

$l$  = panjang saluran transmisi, km

maka:

$$\frac{L P_R}{100} = |I_R|^2 R l$$

$$P_R = \frac{100 |I_R|^2 R l}{L} \quad (2)$$

Dari (1) dan (2):

$$\frac{|V_R|}{|I_R|} = \frac{100 R l}{L \cos \Theta_R} = |Z_R| \quad (3)$$

di mana:

$|Z_R|$  = impedansi ujung beban.

Misalkan:

$$V_R = |V_R| \angle 0^\circ \text{ (referensi)}$$

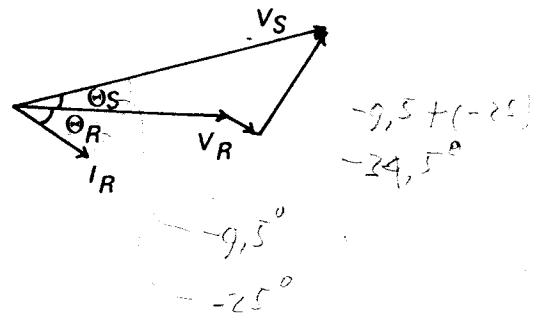
$$V_S = |V_S| \angle \delta_S$$

$$I_R = |I_R| \angle \Theta_R$$

$$Z = |Z| \angle \alpha = (R + jX)l$$

$$V_R = V_S + I_R Z$$

$$V_S = V_R + \frac{V_R}{Z_R} Z$$



atau

$$|V_S| \angle \delta_S = |V_R| + \frac{|V_R|}{|Z_R|} |Z| \angle \alpha + \Theta_R$$

$$= |V_R| \left( 1 + \frac{|Z|}{|Z_R|} \angle \alpha + \Theta_R \right)$$

Jadi,

$$|V_R| \angle -\delta_S = \frac{|V_S|}{1 + \frac{|Z|}{|Z_R|} \angle \alpha + \Theta_R} \quad (4)$$



dan

$$P_R = |V_R| |I_R| \cos \Theta_R$$

Jadi bila diketahui:

$$(a) l = 20 \text{ mile} = 32,18 \text{ km}$$

$$Z = 0,263 + j 0,765 \text{ ohm/mile} = 0,808 \angle 71^\circ \text{ ohm/mile}$$

$$R = \quad \quad \quad = 0,502 \angle 71^\circ \text{ ohm/km}$$

Rugi-rugi yang diperbolehkan tidak boleh lebih dari 10% dari  $P_R$ . Faktor daya beban:  $\cos \Theta_R = 0,906$  (terbelakang);  $\Theta_R = -25^\circ$ .

Tegangan ujung kirim  $V_S = 30 \text{ KV (L-L)}$ ;  $V_S = 19 \text{ KV (L-N)}$ .

Maka dari (3),

$$|Z_R| = \frac{100 \times 0,263 \times 20}{10 \times 0,906} = 58,1 \text{ ohm}$$

$$Z_R = 58,1 \angle 25^\circ \text{ ohm}$$

Dari (4),

$$|V_R| \angle -\delta_S = \frac{19.000}{1 + \frac{0,808 \times 20 \angle 71^\circ - 25^\circ}{58,1}} = 15.660 \angle -9,5^\circ \text{ Volt}$$

Jadi,

$$|V_R| = 15,66 \text{ KV (L-N)}$$

$$|I_R| = \frac{15.660}{58,1} = 269,5 \text{ Amper}$$

$$P_R = 15,66 \times 269,5 \cos(-25^\circ)$$

$$= 3.825 \text{ KW/fasa}$$

$$= 11.475 \text{ KW/3 fasa}$$

$$\Theta_S = -25^\circ - 9,5^\circ = -34,5^\circ$$

$$P_S = 19,0 \times 269,5 \cos 34,5^\circ$$

$$= 4.220 \text{ KW/fasa}$$

$$= 12.660 \text{ KW/3 fasa}$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{3.825}{4.220} = 0,906$$

$$\text{Rugi-rugi} = 4.220 - 3.825 = 395 \text{ KW/fasa}$$

$$= 10,32\% \times P_R$$

$$VR (\%) = \frac{19,0 - 15,66}{15,66} \times 100\% = 21,3\%$$

- (b) Bila panjang saluran transmisi 100 miles,  $L = 15\% \times P_R$ , tentukan  $P_R$  bila  $\cos \Theta_R = 0,906$  (terbelakang),  $Y = 5,58 \times 10^{-4} \angle 90^\circ$ ,  $V_S = 66 \text{ KV (L-L)}$   
atau 38,05 KV (L-N).

Jawab. Secara pendekatan dapat dicari impedansi pada ujung beban,

$$Z_R = \frac{100 \times 0,263 \times 100}{15 \times 0,906} \angle 25^\circ = 193,5 \angle 25^\circ \text{ ohm} \rightarrow \frac{100 \cdot R \cdot L}{L \cdot \cos \Theta_R}$$

$$|V_S = V_R(1 + Z_S Y) + I_R(2 + Z_S Y)Z_S \text{ (nominal T)}| \rightarrow Z_S = \frac{Z}{2}$$

Tetapi,

$$I_R = \frac{V_R}{Z_R}, \text{ jadi}$$

$$V_S = V_R [1 + Z_S Y + (Z_S Y + 2) \frac{Z_S}{Z_R}]$$

di mana:

$$Z_S = \frac{Z}{2} = 40,4 \angle 71^\circ \text{ ohm} \rightarrow \text{debelakang}$$

Langkah-langkah selanjutnya dengan mencoba-coba harga  $Z_R$  yang lebih besar sedikit dengan harga di atas. Misalkan,

$$Z_R = 200 \angle 25^\circ$$

$$|V_S| \angle \delta_S = |V_R| [1 + \frac{ZY}{2} + (\frac{ZY}{2} + 2) \frac{Z}{2Z_R}]$$

$$|V_R| \angle -\delta_S = \frac{|V_S|}{1 + \frac{ZY}{2} + (1 + \frac{ZY}{4}) \frac{Z}{Z_R}}$$

$$= \frac{38,05}{1 + 40,4 \angle 71^\circ \times 5,58 \times 10^{-4} \angle 90^\circ + (1 + \frac{40,4 \angle 71^\circ \times 5,58 \times 10^{-4} \angle 90^\circ}{4})} \times \frac{80,8 \angle 71^\circ}{200 \angle 25^\circ}$$

$$= 29,46 \angle -13,3^\circ \text{ KV (L-N) (dengan } V_S \text{ sebagai referensi)}$$

$$I_R = \frac{2.940 \angle 0^\circ}{200 \angle 25^\circ} = 147,3 \angle -25^\circ \text{ Amper (dengan } V_R \text{ sebagai referensi)}$$

$$P_R = 29,46 \times 147,3 \times \cos 25^\circ = \underline{\underline{3.930 \text{ KW/fasa}}}$$

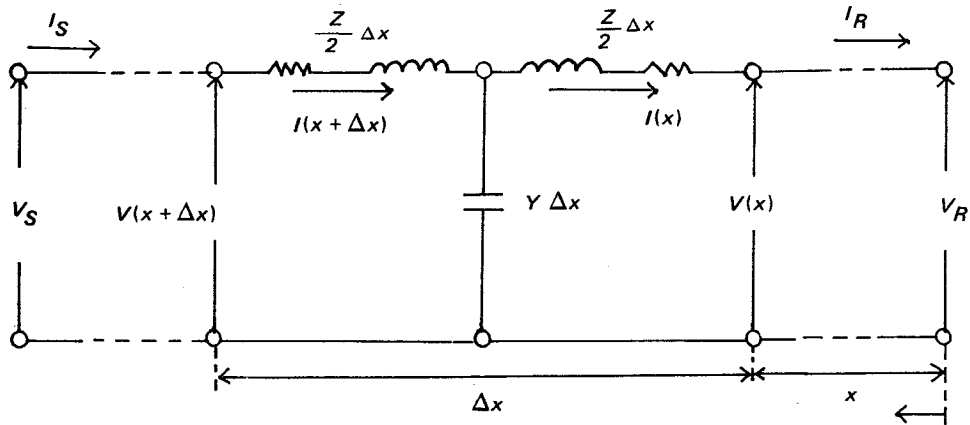
$$I_S = V_R \left[ \frac{1 + \frac{ZY}{2}}{Z_R} + Y \right] = 134,5 \angle -32,6^\circ$$

$$P_S = 38,05 \times 134,5 \cos 32,6^\circ = 4.310 \text{ KW/fasa}$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{3.930}{4.310} \times 100\% = \underline{\underline{91,2\%}}$$

$$\begin{aligned} \text{Rugi-rugi} &= 4.310 - 3.920 = 380 \text{ KW} \\ &= \underline{\underline{9,68\% \times P_R.}} \end{aligned}$$

#### 4.3. Saluran Panjang



GAMBAR 3-5. Saluran panjang.

Misalkanlah:  $Z \approx$  impedansi per satuan panjang.

$Y =$  admitansi shunt per satuan panjang.

Pandanglah bagian kecil,  $\Delta x$ , dari kawat transmisi itu yang jaraknya  $x$  dari ujung terima.

$$V(x + \Delta x) = \left[ 1 + \frac{ZY}{2} (\Delta x)^2 \right] V(x) + Z \Delta x \left[ 1 + \frac{ZY}{4} (\Delta x)^2 \right] I(x)$$

$$I(x + \Delta x) = Y \Delta x V(x) + \left[ 1 + \frac{ZY}{2} (\Delta x)^2 \right] I(x) \quad (3-6)$$

atau,

$$V(x + \Delta x) - V(x) = \Delta V(x) = \frac{ZY}{2} (\Delta x)^2 V(x) + Z \Delta x \left[ 1 + \frac{ZY}{4} (\Delta x)^2 \right] I(x)$$

$$I(x + \Delta x) - I(x) = \Delta I(x) = Y \Delta x V(x) + \frac{ZY}{2} (\Delta x)^2 I(x) \quad (3-6a)$$

$$\frac{\Delta V(x)}{\Delta x} = \frac{ZY}{2} V(x) \Delta x + Z \left( 1 + \frac{ZY}{4} (\Delta x)^2 \right) I(x)$$

$$\frac{\Delta I(x)}{\Delta x} = Y V(x) + \frac{ZY}{2} I(x) \Delta x \quad (3-7)$$

$\Delta V(x)$  dan  $\Delta I(x)$  adalah kenaikan tegangan dan arus bila bergerak dari titik  $x$  ke titik  $(x + \Delta x)$ , yaitu sejauh  $\Delta x$ .

Bila  $\Delta x$  dibiarkan menjadi kecil sekali sehingga mendekati nol, maka:

$$\left\| \begin{array}{l} \frac{\Delta V(x)}{\Delta x} \text{ mendakati } \frac{dV(x)}{dx} \text{ dan} \\ \frac{\Delta I(x)}{\Delta x} \text{ mendekati } \frac{dI(x)}{dx} \end{array} \right.$$

Juga suku-suku yang mengandung  $\Delta x$  akan hilang. Jadi Persamaan (3-7) menjadi

$$\left\| \begin{array}{l} \frac{dV}{dx} = Z I \\ \frac{dI}{dx} = Y V \end{array} \right. \quad (3-8)$$

Subskrip  $x$  tidak perlu lagi untuk  $V$  dan  $I$  karena relasi di atas berlaku untuk setiap titik. Oleh karena semua suku-suku yang berbeda pada representasi  $PI$  dan  $T$ , mengandung  $\Delta x$ , maka hasil yang sama akan diperoleh juga seandainya kita memulai dengan representasi  $PI$ .

Kalau (3-8) didiferensir sekali lagi terhadap  $x$ ,

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V}{dx^2} &= Z \frac{dI}{dx} \longrightarrow \frac{d^2 V}{dx^2} = ZY V \\ \frac{d^2 I}{dx^2} &= Y \frac{dV}{dx} \longrightarrow \frac{d^2 I}{dx^2} = ZY I \end{aligned} \quad (3-9)$$

Misalkan solusi dari persamaan diferensial linier tingkat dua itu;

$$V = A e^{mx}$$

Maka,

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V}{dx^2} &= A m^2 e^{mx} = ZY A e^{mx} \\ m^2 &= ZY \\ m_1 &= \sqrt{ZY} \\ m_2 &= -\sqrt{ZY} \end{aligned}$$

Maka,

$$V = A_1 e^{\sqrt{ZY} x} + A_2 e^{-\sqrt{ZY} x} \quad (3-10)$$

Dengan jalan yang sama,

$$I = B_1 e^{\sqrt{ZY} x} + B_2 e^{-\sqrt{ZY} x} \quad (3-11)$$

Pada  $x = 0$

$$\left. \begin{aligned} V &= V_R \\ I &= I_R \end{aligned} \right\}$$

dan juga

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dx} \Big|_{x=0} &= Z I_R \\ \frac{dI}{dx} \Big|_{x=0} &= Y V_R \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dx} &= A_1 \sqrt{ZY} e^{\sqrt{ZY} x} - A_2 \sqrt{ZY} e^{-\sqrt{ZY} x} \\ \frac{dV}{dx} \Big|_{x=0} &= A_1 \sqrt{ZY} - A_2 \sqrt{ZY} = Z I_R \end{aligned} \quad (3-12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dx} &= B_1 \sqrt{ZY} e^{\sqrt{ZY} x} - B_2 \sqrt{ZY} e^{-\sqrt{ZY} x} \\ \frac{dI}{dx} \Big|_{x=0} &= B_1 \sqrt{ZY} - B_2 \sqrt{ZY} = Y V_R \end{aligned} \quad (3-13)$$

untuk  $x = 0$ ,

$$V_{x=0} = V_R = A_1 + A_2 \quad (3-14)$$

$$I_{x=0} = I_R = B_1 + B_2 \quad (3-15)$$

Jadi sekarang telah ada 4 persamaan dengan 4 unsur yang tidak diketahui:  $A_1, A_2, B_1, B_2$ , yaitu

$$\begin{aligned} \sqrt{ZY} (A_1 - A_2) &= Z I_R \\ \sqrt{ZY} (B_1 - B_2) &= Y V_R \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 + A_2 &= V_R \\ B_1 + B_2 &= I_R \end{aligned} \right\} \quad (3-16)$$

Dari keempat persamaan itu diperoleh:

$$\boxed{\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} (V_R + \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R) \\ A_2 &= \frac{1}{2} (V_R - \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R) \end{aligned}}$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{1}{2}(I_R + \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R) \\ B_2 &= \frac{1}{2}(I_R - \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R) \end{aligned} \quad (3-17)$$

Maka:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2}(V_R + \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R) e^{\sqrt{ZY} x} + \frac{1}{2}(V_R - \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R) e^{-\sqrt{ZY} x} \\ I &= \frac{1}{2}(V_R + \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R) e^{\sqrt{ZY} x} + \frac{1}{2}(I_R - \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R) e^{-\sqrt{ZY} x} \end{aligned} \quad (3-18)$$

karena :

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

maka :

$$\begin{aligned} V &= V_R \cosh \sqrt{ZY} x + \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R \sinh \sqrt{ZY} x \\ I &= I_R \cosh \sqrt{ZY} x + \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R \sinh \sqrt{ZY} x \end{aligned} \quad (3-19)$$

Bentuk lain diperoleh dengan mengingat:

$$\cosh x = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \frac{x^6}{6!} + \dots$$

$$\sinh x = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \frac{x^7}{7!} + \dots$$

Maka,

$$\begin{aligned} V &= \left(1 + \frac{ZYx^2}{2} + \frac{Z^2Y^2x^4}{24} + \dots\right) V_R + \\ &\quad Z \times \left(1 + \frac{ZYx^2}{6} + \frac{Z^2Y^2x^4}{120} + \dots\right) I_R \\ I &= \left(1 + \frac{ZYx^2}{2} + \frac{Z^2Y^2x^4}{24} + \dots\right) I_R + \\ &\quad Y \times \left(1 + \frac{ZYx^2}{6} + \frac{Z^2Y^2x^4}{120} + \dots\right) V_R \end{aligned} \quad (3-20)$$

Misalkan panjang kawat itu  $l$ , maka pada

$$\begin{aligned}x &= l \\V &= V_S \\I &= I_S\end{aligned}$$

Definisi:

$$\sqrt{\frac{Z}{Y}} = Z_k = \text{impedansi karakteristik.} \quad (3-21)$$

Maka pada  $x = l$  dan setelah  $Z_k$  diisikan dalam Persamaan (3-18) dan (3-19) diperoleh,

$$\left\{ \begin{aligned} V_S &= \frac{V_R + Z_k I_R}{2} e^{\sqrt{ZY}l} + \frac{V_R - Z_k I_R}{2} e^{-\sqrt{ZY}l} \\ I_S &= \frac{I_R + V_R/Z_k}{2} e^{\sqrt{ZY}l} + \frac{I_R - V_R/Z_k}{2} e^{-\sqrt{ZY}l} \end{aligned} \right\} \quad (3-22)$$

dan

$$\begin{aligned}V_S &= V_R \cosh \sqrt{ZY}l + Z_k I_R \sinh \sqrt{ZY}l \\ I_S &= I_R \cosh \sqrt{ZY}l + V_R/Z_k \sinh \sqrt{ZY}l\end{aligned}$$

atau:

$$\begin{aligned}V_R &= V_S \cosh \sqrt{ZY}l - I_S Z_k \sinh \sqrt{ZY}l \\ I_R &= I_S \cosh \sqrt{ZY}l - V_S/Z_k \sinh \sqrt{ZY}l\end{aligned} \quad (3-23)$$

#### 4.3.1. Variasi Tegangan dan Arus Sepanjang Kawat; Propagasi

Tegangan dan arus adalah sebagai fungsi :

$$e^{\sqrt{ZY}x} \quad \text{dan} \quad e^{-\sqrt{ZY}x}$$

Sebutlah:  $\gamma = \sqrt{ZY} = \text{konstanta propagasi}$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

$\alpha$  = konstanta redaman (neper per satuan panjang)

$\beta$  = konstanta pergeseran fasa (radian per satuan panjang) atau konstanta panjang gelombang, atau panjang elektrik per satuan panjang.

$$e^{\pm \sqrt{ZY}x} = e^{\pm \alpha x} e^{\pm j\beta x}$$

$e^{\alpha x}$  menyatakan bila  $x$  bertambah besar  $e^{\alpha x}$  bertambah besar.

$e^{-\alpha x}$  menyatakan bila  $x$  bertambah besar  $e^{-\alpha x}$  bertambah kecil.

$e^{j\beta x}$  menyatakan rotasi, sudut fasa maju dengan bertambahnya  $x$ .

$e^{-j\beta x}$  menyatakan rotasi, sudut fasa mundur dengan bertambahnya  $x$ .

$$V = \underbrace{\frac{1}{2} (V_R + Z_k I_R) e^{\alpha x} e^{j\beta x}}_{I = V_f} + \underbrace{\frac{1}{2} (V_R - Z_k I_R) e^{-\alpha x} e^{-j\beta x}}_{II = V_r} \quad (3-24)$$

Suku pertama (I) bertambah besar dan fasanya maju dengan bertambahnya  $x$  (forward wave). Sebaliknya bila berangkat dari ujung kirim dan maju ke ujung beban  $x$  berkurang, jadi tegangan berkurang dan fasanya mundur ke belakang (reflected wave). Inilah karakteristik dari gelombang berjalan (traveling wave).

Suku pertama (I) disebut: gelombang datang atau incident wave.

Suku kedua (II) disebut: gelombang refleksi atau reflected wave.

Pada suatu titik jumlah tegangan adalah superposisi dari gelombang datang dan gelombang refleksi.

#### 4.3.2. Keadaan Khusus

Ada 3 keadaan khusus yang menarik tergantung dari beban  $Z_L$ .

- 1)  $Z_L = \infty$
- 2)  $Z_L = 0$
- 3)  $Z_L = Z_k$

- 1)  $Z_L = \infty$  (Hubung Terbuka).

$$I_R = 0$$

$$V_S = V_R \cosh \sqrt{ZY} l \quad (V_S < V_R)$$

$$I_S = \frac{V_R}{Z_k} \sinh \sqrt{ZY} l$$

$$\frac{V_S}{I_S} = Z_k \frac{\cosh \sqrt{ZY} l}{\sinh \sqrt{ZY} l} = Z_k \operatorname{ctnh} (\sqrt{ZY} l)$$

Jadi,

$$Z_{(\text{open circuit})} = Z_k \operatorname{ctnh} \sqrt{ZY} l \quad (3-25)$$

- 2)  $Z_L = 0$  (Hubung Singkat)

$$V_R = 0$$

$$V_S = Z_k I_R \sinh \sqrt{ZY} l$$

$$I_S = I_R \cosh \sqrt{ZY} l$$

$$\frac{V_S}{I_S} = Z_{(\text{short circuit})} = Z_k \tanh \sqrt{ZY} l \quad (3-26)$$



3)  $Z_L = Z_k$  (ditutup dengan impedansi karakteristik)

$$V_R = Z_L I_R = Z_k I_R = \sqrt{\frac{Z}{Y}} I_R$$

atau,

$$I_R = \frac{V_R}{Z_k} = \sqrt{\frac{Y}{Z}} V_R$$

maka

$$V = V_R (\cosh \sqrt{ZY} x + \sinh \sqrt{ZY} x)$$

$$I = \frac{V_R}{Z_k} (\cosh \sqrt{ZY} x + \sinh \sqrt{ZY} x)$$

Jadi,

$$\frac{V}{I} = Z_k$$

Jadi bila saluran itu ditutup dengan impedansi yang sama dengan impedansi karakteristiknya, maka pada setiap titik sepanjang saluran,

$$\frac{V}{I} = Z_k,$$

tidak tergantung pada  $x$ . Ini berarti bahwa tidak ada gelombang refleksi yang datang dari ujung saluran. Suatu saluran yang tak terhingga panjangnya tidak akan mempunyai gelombang refleksi. Jadi saluran yang dibebani dengan beban yang sama dengan impedansi karakteristik berlaku sebagai kawat yang tak terhingga panjangnya.

$$\begin{aligned} Z_{(\text{open circuit})} &= Z_k \coth \sqrt{ZY} l \\ Z_{(\text{short circuit})} &= Z_k \tanh \sqrt{ZY} l \\ Z_k &= \sqrt{Z_{(\text{open circuit})} \times Z_{(\text{short circuit})}} \end{aligned} \quad (3-27)$$

#### 4.3.3. Panjang Gelombang

Apabila sepanjang  $x_1$ ,  $\beta x_1 = 2\pi$  maka vektor tegangan/arus akan sefasa. Jarak  $x_1$  di sini disebut satu panjang gelombang dan diberi notasi:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (3-28)$$

Bila  $f$  = frekuensi dari gelombang  
 $v$  = kecepatan propagasi

maka:

$$v = \lambda f = \frac{2\pi f}{\beta}$$

atau

$$\beta = \frac{2\pi f}{v} \quad (3-29)$$

Untuk kawat tanpa rugi-rugi,  $R = G = 0$ , maka:

$$Z = jX$$

$$Y = jB = \frac{j}{X'}$$

Jadi,

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{ZY} = j\sqrt{\frac{X}{X'}} = j\sqrt{XY} \quad (\text{karena } \alpha = 0)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{X}{X'}} = 2\pi f \sqrt{LC} = \frac{2\pi f}{v} \quad (3-30)$$

Kecepatan propagasi,

$$v = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{2\pi f}{2\pi f \sqrt{LC}}$$

atau,

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 186.270 \text{ mile/detik} \approx 300.000 \text{ km/detik} \quad (3-31)$$

#### 4.3.4. Ekuivalen PI dan T

$$V_S = V_R \cosh \sqrt{ZY} l + Z_k I_R \sinh \sqrt{ZY} l$$

$$V_S = V_R \left(1 + \frac{Z' Y'}{2}\right) + Z' I_R$$

(ekivalen PI)

$$V_S = V_R \left(1 + \frac{Z'' Y''}{2}\right) + Z'' I_R \left(1 + \frac{Z'' Y''}{4}\right)$$

(ekivalen T)

$$I_S = I_R \cosh \sqrt{ZY} l + \frac{V_R}{Z_k} \sinh \sqrt{ZY} l$$

$$I_S = I_R \left(1 + \frac{Z' Y'}{2}\right) + Y' V_R \left(1 + \frac{Z' Y'}{4}\right)$$

(ekivalen PI)

$$I_S = I_R \left(1 + \frac{Z'' Y''}{4}\right) + Y'' V_R$$

(ekivalen T)

Ekuivalen PI

$$1 + \frac{Z' Y'}{2} = \cosh \sqrt{ZY} l \quad (3-32)$$

$$Z' = Z_k \sinh \sqrt{ZY} l \quad (3-33)$$

Substitusi (3-33) dalam (3-32),

$$1 + \frac{Y' Z_k \sinh (\sqrt{ZY} l)}{2} = \cosh \sqrt{ZY} l$$

$$\boxed{\frac{Y'}{2} = \frac{\cosh \sqrt{ZY} l - 1}{Z_k \sinh \sqrt{ZY} l}} \quad a.$$

Tetapi,

$$\frac{\cosh \sqrt{ZY} l - 1}{\sinh \sqrt{ZY} l} = \tanh \frac{\sqrt{ZY} l}{2}$$

Juga (3-33) dapat dirubah sebagai berikut:

$$Z' = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh \sqrt{ZY} l \times \sqrt{\frac{Z l}{Z l}}$$

$$Z' = Z l \frac{\sinh \sqrt{ZY} l}{\sqrt{ZY} l}$$

Jadi,

$$\boxed{Z' = Z l \frac{\sinh \sqrt{ZY} l}{\sqrt{ZY} l}} \quad \checkmark \quad b.$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_k} \tanh \left( \frac{\sqrt{ZY} l}{2} \right) = \frac{Y}{2} l \frac{\tanh \left( \frac{\sqrt{ZY} l}{2} \right)}{\frac{\sqrt{ZY} l}{2}} \quad (3-34)$$

$$\frac{\sinh \sqrt{ZY} l}{\sqrt{ZY} l} = 1 + \frac{ZY l^2}{6} + \frac{Z^2 Y^2 l^4}{120} + \dots$$

$$\frac{\tanh \frac{\sqrt{ZY} l}{2}}{\frac{\sqrt{ZY} l}{2}} = 1 - \frac{ZY l^2}{12} + \frac{Z^2 Y^2 l^4}{120} + \dots$$

Ekivalen T

$$\boxed{\frac{Z''}{2} = \frac{Z l}{2} \frac{\tanh \frac{\sqrt{ZY} l}{2}}{\frac{\sqrt{ZY} l}{2}}} \quad c.$$

$$\left\{ \begin{aligned} \cosh \sqrt{ZY} &= \cosh(a+jb) = \cosh a \cdot \cos b + j \sinh a \cdot \sin b \\ \sinh \sqrt{ZY} &= \sinh(a+jb) = \sinh a \cdot \cos b + j \cosh a \cdot \sin b \end{aligned} \right\} \text{Rad}$$

$$\sqrt{ZY} = \sqrt{A \angle \phi} = \sqrt{A} \angle \frac{\phi}{2}$$

$$Y'' = Y l \frac{\sinh \sqrt{ZY} l}{\sqrt{ZY} l} \quad (3-35)$$

**Contoh 3-4.** Kawat transmisi fasa tiga 338 mm<sup>2</sup> (666.600 CM) ACSR, 54/7, konfigurasi horizontal datar, jarak antara dua kawat berurutan 22 kaki, ditransposisi dan panjang 250 miles. Tegangan 220 KV (L-L) pada ujung beban.  $0,16 + j0,8152 \text{ } \Omega/\text{mil}$ .

Pertanyaan:

- (1) Z dan Y pada 50°C untuk 250 mil,

$$Z = 40,0 + j203,8 = 207,7 \angle 78,89^\circ \text{ ohm.} \rightarrow 0,16 + j0,8152$$

$$Y = 250 (j5,187 \times 10^{-6}) = j0,001297 \text{ mho.} \rightarrow 0,001297 \angle 90^\circ$$

(2)  $\cosh \sqrt{ZY} l = 0,8706 + j0,02484 = 0,871 \angle 1,64^\circ$

$$\frac{\sinh \sqrt{ZY} l}{\sqrt{ZY} l} = 0,9566 \angle 0,51^\circ$$

$$207,7 \angle 78,89^\circ \cdot 0,001297 \angle 90^\circ = 0,2694 \angle 168,89^\circ$$

$$\sqrt{ZY} l = 0,5191 \angle 89,44^\circ$$

(3)  $V_S$  dan  $I_S$  bila  $I_R = 250$  Amper, pada 0,97 pf terbelakang.

$$Z_k = \sqrt{Z/Y} \rightarrow (3-23) \left\{ \begin{aligned} V_S &= (131,3 + j48,31) = 139,9 \angle 20,20^\circ \text{ KV (L-N). } \cosh \sqrt{ZY} l = \cosh(a+jb) \\ I_S &= 211,3 + j110,7 = 238,5 \angle 17,65^\circ \text{ Amper.} \end{aligned} \right.$$

$$\cosh 0,0502 \cos 0,5165 + j \sinh 0,0502 \cdot \sin 0,5165 =$$

- (4) a). Faktor daya ujung kirim:

$$\cos \Theta_S = \cos 7,45^\circ = 0,9916 \text{ terdahulu.}$$

b).  $\pi = \text{Eff} = \frac{P_S - P_L}{P_S} = \frac{P_R}{P_S}$  ( $P_L$  = rugi daya pada saluran transmisi).

$$\begin{aligned} P_L &= P_S - P_R \\ P_S &= 99,258 \text{ MW} \\ P_R &= 92,394 \text{ MW} \\ P_L &= 6,864 \text{ MW} \\ \text{Eff} &= 1 - \frac{6,864}{99,258} \\ &= 93,08\% \end{aligned}$$

$$\sinh \sqrt{ZY} l = \sinh(0,0502 + j0,5165)$$

$$\sinh 0,0502 \cdot \cos 0,5165 + j \cosh 0,0502 \cdot \sin 0,5165$$

$$= 0,0502 \cdot 0,8695 + j1,0012 \cdot 0,4938$$

$$= 0,0436 + j0,4943 = 0,4962 \angle 84,959^\circ$$

$$\frac{\sinh \sqrt{ZY} l}{\sqrt{ZY} l} = \frac{0,4962 \angle 84,959^\circ}{0,5191 \angle 89,44^\circ} = 0,956 \angle 0,51^\circ$$

- (5) Ekuivalen PI dan T

a.  $\frac{Y'}{2} = 0,000663 \angle 89,74^\circ \text{ mho}$

b.  $Z' = 198,7 \angle 79,4^\circ \text{ ohm}$

c.  $\frac{Z''}{2} = 106,2 \angle 78,63^\circ \text{ ohm}$

(3-35) d.  $Y'' = 0,001241 \angle 90,51^\circ \text{ mho}$

$$P_S = I_S \cdot V_S \cdot \cos \Theta_S \quad (3-6)$$

$$P_R = I_R \cdot V_R \cdot \cos \Theta_R \quad (3-6)$$

$$\text{Eff} = \frac{P_R}{P_S} \cdot 100\%$$

- (6) Bila tegangan  $V_S$  hasil dari (3) dipertahankan tetap, hitung  $V_R$  dan  $I_S$  apabila ujung ( $V_S = 139,9 \angle 20,2^\circ$ ) beban terbuka.

$$\begin{aligned} V_R &= 160,6 \angle 18,56^\circ \text{ KV.} \\ I_S &= 199,3 \angle 109,09^\circ \text{ A.} \end{aligned} \quad \rightarrow (3-23)$$

- (7) Sama seperti (6), tetapi ujung beban hubung singkat, hitung  $I_S$  dan  $I_R$ . ( $V_S = 139,9 \angle 20,2^\circ$ )

$$\begin{aligned} I_S &= 613,3 \angle -57,56^\circ \text{ A.} \\ I_R &= 704,1 \angle -59,2^\circ \text{ A.} \end{aligned}$$

- (8) Sama seperti (6), tetapi ujung beban ditutup dengan impedansi karakteristik, hitung  $I_S$ .

$$\begin{aligned} Z_k &= 400,2 \angle -5,56^\circ \text{ ohm.} \rightarrow (3-27) \\ I_S &= 349,6 \angle 25,76^\circ \text{ A.} \rightarrow (3-28) \end{aligned}$$

- (9)  $\gamma, \alpha, \beta, v$  untuk 60 Hertz.

$$\begin{aligned} \gamma &= 0,002076 \angle 84,44^\circ \text{ radian/mile.} \rightarrow \gamma = \sqrt{\alpha \beta} \rightarrow \gamma = \alpha + j\beta \\ \alpha &= 0,0002011 \text{ radian/mile.} \\ \beta &= 0,0020066 \text{ radian/mile.} \\ v &= 182.500 \text{ mile/detik.} \end{aligned} \quad \begin{aligned} & \beta = \frac{2\pi f}{v} \\ & v = 186,210 \text{ mile/detik} \end{aligned}$$

## 5. SALURAN TRANSMISI PANJANG DAN DAYA KARAKTERISTIK; DAYA NATURAL $P_N$ ATAU SURGE IMPEDANCE LOADING (SIL)

### 5.1. Definisi Daya Karakteristik

Daya karakteristik ialah daya maksimum yang dapat ditransmisikan bila tegangan ujung beban dan tegangan ujung kirim sama dan dibebani dengan beban karakteristik.

Untuk kawat panjang :

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R \cdot Z_k \sin \gamma l$$

$$I_S = I_R \cosh \gamma l + \frac{V_R}{Z_k} \sinh \gamma l \quad (3-36)$$

Bila rugi-rugi diabaikan, maka daya karakteristik disebut daya natural atau "Surge Impedance Loading" (SIL) =  $P_N$ .

$$\gamma l = (\alpha + j\beta) l \text{ dan } \alpha = 0$$

Persamaan (3-36) berubah menjadi :

$$V_S = V_R \cos \beta l + j I_R Z_0 \sin \beta l$$

$$I_S = I_R \cos \beta l + j \frac{V_R}{Z_0} \sin \beta l \quad (3-37)$$

Dalam (3-37) :

$$\boxed{\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{impedansi surja (untuk saluran tanpa rugi-rugi).} \\ \beta &= \omega \sqrt{LC} = \text{konstanta pergeseran fasa.} \end{aligned}}$$

Sama dengan penurunan di atas diperoleh,

$$\begin{aligned} V_R &= V_S \cos \beta l - j I_S Z_0 \sin \beta l \\ I_R &= I_S \cos \beta l - j \frac{V_S}{Z_0} \sin \beta l \end{aligned} \quad (3-38)$$

Dari (3-37) :

$$I_R = \frac{V_S - V_R \cos \beta l}{j Z_0 \sin \beta l}$$

Daya  $S_R$  :

$$\begin{aligned} S_R &= V_R \hat{I}_R^* (*) \\ S_R &= V_R \frac{(\hat{V}_S - \hat{V}_R \cos \beta l)}{-j Z_0 \sin \beta l} \end{aligned} \quad (3-39)$$

$$S_R = j \frac{V_R \hat{V}_S}{Z_0 \sin \beta l} - j \frac{V_R \hat{V}_R \cos \beta l}{Z_0 \sin \beta l} \quad (3-40)$$

Bila

$$\begin{aligned} V_R &= |V_R| \angle 0^\circ \\ V_S &= |V_S| \angle \delta^\circ \\ \hat{V}_S &= |V_S| \angle -\delta^\circ \end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned} S_R &= j \frac{|V_R| |V_S| (\cos \delta - j \sin \delta)}{Z_0 \sin \beta l} - j \frac{|V_R|^2 \cos \beta l}{Z_0 \sin \beta l} \\ S_R &= \frac{|V_R| |V_S| \sin \delta}{Z_0 \sin \beta l} + j \left[ \frac{|V_R| |V_S| \cos \delta}{Z_0 \sin \beta l} - \frac{|V_R|^2 \cos \beta l}{Z_0 \sin \beta l} \right] \end{aligned} \quad (3-41)$$

(\*)  $\hat{I}_R$  adalah complex conjugate dari  $I_R$ .

Jadi,

$$P_R = \frac{|V_R| |V_S| \sin \delta}{Z_0 \sin \beta l} \quad (3-42)$$

Harga maksimum  $P_R$  diperoleh bila  $|V_R| = |V_S| = |V|$  dan ujung beban ditutup dengan suatu tahanan yang sama dengan impedansi surja dari saluran.

Harga  $|V|^2/Z_0$  disebut Daya Natural atau Pembebanan Impedansi Surja (Surge Impedance Loading, disingkat SIL).

Jadi,

$$P_R = P_N = \frac{|V|^2}{Z_0} = \text{Daya Natural atau SIL} \quad (3-43)$$

Untuk saluran transmisi udara :

$$Z_0 \approx 400 \text{ Ohm}$$

Jadi,

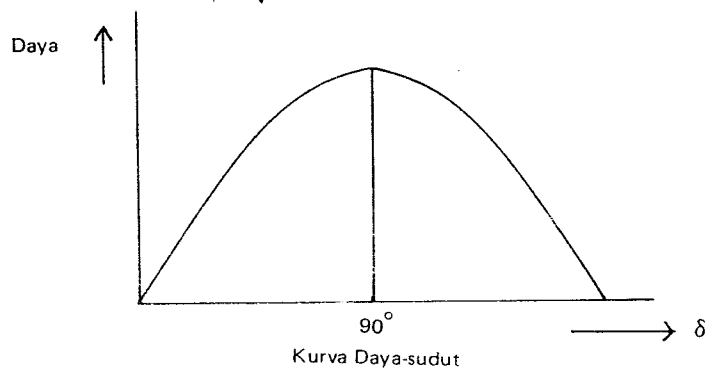
$$P_N = 2,5 (KV_{L-L})^2 \text{ KW} \quad (3-44)$$

### 5.2. Harga Maksimum $\beta l$

Dalam keadaan mantap (steady state) harga maksimum teoritis dari  $\beta l = 90^\circ$ . Tetapi dalam praktek  $\beta l$  harus dibatasi antara  $20^\circ$  sampai  $30^\circ$ . Hal ini dilakukan untuk menjaga stabilitas saluran.

$$\beta l = 2\pi f \sqrt{LC} l$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 300.000 \text{ km/detik}$$



Harga  $\beta l$  sering disebut sebagai panjang elektrik dari saluran. Jadi bila  $\beta l = 90^\circ = 1,57$  radian, maka :

$$l = \frac{1,57 \times 300.000}{2\pi f}$$

Bila

$$f = 50 \text{ Hertz} \quad : \quad l = 1.500 \text{ km}$$

$$f = 25 \text{ Hertz} \quad : \quad l = 3.000 \text{ km}$$

$$f = 0 \text{ (DC)} \quad : \quad l = \infty$$

Dalam praktek panjang saluran dibatasi oleh :

$$\beta l = 30^\circ = 0,523 \text{ radian}$$

Jadi,

$$l = \frac{0,523 \times 300.000}{2\pi f}$$

$$l = 500 \text{ km untuk } f = 50 \text{ Hertz}$$

$$l = 1.000 \text{ km untuk } f = 25 \text{ Hertz}$$

$$l = \infty \text{ untuk } f = 0 \text{ (DC)}$$

Jadi, jelas kelihatan bahwa transmisi daya bolak-balik terbatas panjangnya, sedang transmisi arus searah tidak.

Bila panjang elektrik saluran transmisi itu lebih besar dari  $30^\circ$  maka harus diadakan kompensasi. Untuk saluran transmisi tegangan ekstra tinggi dan tegangan-ultra tinggi, walaupun panjang elektriknya kurang dari  $30^\circ$ , sering dilengkapi dengan alat kompensasi. Hal ini disebabkan timbulnya korona yang besar sehingga kapasitansinya bertambah besar.

Pembahasan persoalan kompensasi ini diberikan pada Bab VII.

**Contoh 3.5.** Suatu saluran transmisi fasa tiga, 200 km, 220 KV. Konstanta kawat :

*Soal*

$$Z = 0,64 \angle 71,8^\circ \text{ ohm/km} \rightarrow 0,1998 + j0,607$$

$$Y = 4,0 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ mho/km.}$$

**Pertanyaan.** (1) Tentukanlah impedansi karakteristik saluran transmisi itu. (2) Tentukanlah impedansi surja dan daya natural. (3) Tentukanlah konstanta propagasi. (4) Tentukanlah konstanta panjang gelombang. (5) Tentukanlah panjang elektrik (dalam derajat listrik).

**Jawab :**

$$Z = 0,64 \angle 71,8^\circ \text{ ohm/km}$$

$$Y = 4 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ mho/km}$$



1. Impedansi karakteristik :

$$Z_k = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{0,64 \angle 71,8^\circ}{4 \times 10^{-6} \angle 90^\circ}} = 400 \angle -9,1^\circ \text{ ohm} \quad \text{hal 74}$$

2. Impedansi surja :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{j X}{Y}} = \sqrt{\frac{0,608}{4 \times 10^{-6}}} = 390 \text{ ohm} \quad \text{hal 81}$$

3. Konstanta propagasi :  $\rho_N = \frac{KV^2}{Z_0} = \frac{(220)^2}{390} = 124,217 \omega$

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(0,64 \angle 71,8^\circ)(4 \times 10^{-6} \angle 90^\circ)} \\ &= 1,6 \times 10^{-3} \angle 80,9^\circ \\ &= (0,253 + j 1,580) \times 10^{-3} \quad \text{hal 77+78} \end{aligned}$$

4. Konstanta panjang gelombang :

$$\beta = 1,58 \times 10^{-3} \text{ radian/km}$$

5. Panjang elektrik :

$$\begin{aligned} \theta &= \beta l = 200 \times 1,58 \times 10^{-3} \times 57,3^\circ \\ \theta &= 18,1^\circ \end{aligned}$$

**Contoh 3.6.** Suatu saluran transmisi fasa tiga, tunggal, 220 KV, panjang 300 km, mempunyai

$$Z = 0 + j 0,48 \text{ Ohm per km}$$

$$X' = 0,30 \text{ Mega ohm-km}$$

Tentukanlah : (a) Impedansi karakteristik; (b) Konstanta propagasi; (c) Daya natural; (d) Panjang elektrik saluran; (e) Konstanta pada representasi ekui-valen  $PI$ .

*Jawab.*

$$\begin{aligned} a) \quad Z_K &= \sqrt{\frac{Z}{Y}} ; \quad X = 0,48 \text{ Ohm/km} \\ &= \sqrt{X X'} \quad X' = 0,3 \times 10^6 \text{ Ohm-km} \\ &= \sqrt{0,48 \times 0,3 \times 10^6} \text{ Ohm} \\ &= \underline{380 \text{ Ohm}} \end{aligned}$$

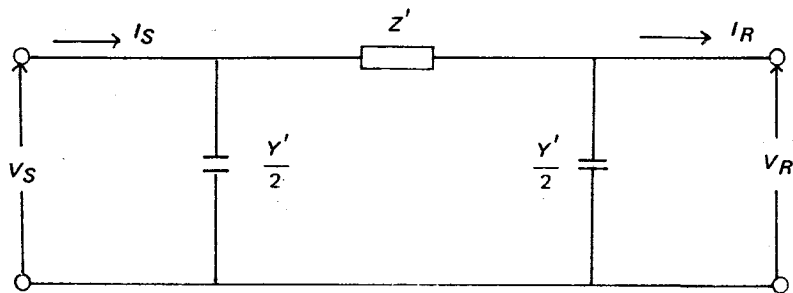
$$\begin{aligned} b) \quad \gamma &= \alpha + j\beta = \sqrt{ZY} = \sqrt{j 0,48 \times j 3,333 \times 10^{-6}} \\ \gamma &= 0 + j \underline{1,265 \times 10^{-3} \text{ radian per km}} \end{aligned}$$

$$c) \quad P_N = \frac{KV^2}{Z_0} = \frac{220^2}{380} \text{ MW} = \underline{\underline{127,4 \text{ MW}}}$$

d) Panjang elektrik :

$$\theta = \beta l = 1,265 \times 10^{-3} \times 300 \times 57,3^\circ = \underline{\underline{21,8^\circ}}$$

e) Konstanta  $Z'$  dan  $\frac{Y'}{2}$  :



$$Z' = Z \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}$$

$$\gamma l = 0 + j \beta l$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{\tanh \frac{\gamma l}{2}}{\frac{\gamma l}{2}}$$

$$\sinh j \beta l = j \sin \beta l$$

$$\gamma l = \alpha l + j \beta l = j \beta l$$

$$\tan \gamma l/2 = \frac{\sinh \gamma l/2}{\cosh \gamma l/2}$$

$$\beta l = 21,8^\circ = 0,38 \text{ radian}$$

$$= \frac{j \sin \beta l/2}{\cos \beta l/2}$$

$$\frac{\beta l}{2} = 10,9^\circ = 0,19 \text{ radian}$$

$$= j \tan \beta l/2$$

$$Z' = j 0,48 \times 300 \times \frac{j 0,375}{j 0,38} = j 144 \text{ ohm}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} j \frac{\tan \beta l/2}{\beta l/2} = j \frac{10^{-6}}{0,3} \times \frac{300}{2} \times \frac{j 0,193}{j 0,19}$$

$$\frac{Y'}{2} = \underline{\underline{j 0,5 \times 10^{-3} \text{ mho}}}$$

### 5.3. Pemilihan Tegangan Kerja

(a) Penentuan tegangan kerja berdasarkan Daya Natural

$$P_N = \frac{KV^2}{Z_0} = 2,5 \text{ KV}^2 \text{ KW}$$

Bila daya yang akan ditransmisikan 100 MW, maka :

$$KV = \sqrt{\frac{100.000}{2,5}} = \sqrt{40.000} = 200 \text{ KV}$$

(b) Rumus Empiris Alfred Still

$$KV = 5,5 \sqrt{l + \frac{KW_{maks.}}{100}} = 5,5 \sqrt{l + \frac{100.000}{100}} \quad (3-45)$$

di mana  $l$  = panjang kawat dalam mile = 100 mile (ditentukan) maka :

$$KV = 5,5 \sqrt{100 + 1.000} = 180 \text{ KV}$$

### 5.4. Memperbesar Daya Natural

Untuk memperbesar daya natural dapat ditempuh dua cara :

- 1)  $KV$  dinaikkan : ini sudah jelas dari Persamaan (3-43).
- 2)  $Z_0$  diturunkan :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} : L \text{ diturunkan dengan kapasitor seri atau}$$

$C$  dinaikkan dengan kapasitor shunt

$C$  dinaikkan dipakai pada kawat transmisi menengah

$L$  diturunkan dipakai pada kawat transmisi panjang.

### SOAL-SOAL

3.1. Saluran transmisi, fasa tiga, 275 KV, panjang 500 km. Konstanta-konstanta saluran adalah :

$$R_a = 0,078 \text{ ohm per km}$$

$$X_1 = 0,534 \text{ ohm per km}$$

$$Y = j 3,68 \times 10^{-6} \text{ mho per km}$$

### 5.3. Pemilihan Tegangan Kerja

(a) Penentuan tegangan kerja berdasarkan Daya Natural

$$P_N = \frac{KV^2}{Z_0} = 2,5 \text{ KV}^2 \text{ KW}$$

Bila daya yang akan ditransmisikan 100 MW, maka :

$$KV = \sqrt{\frac{100.000}{2,5}} = \sqrt{40.000} = 200 \text{ KV}$$

(b) Rumus Empiris Alfred Still

$$KV = 5,5 \sqrt{l + \frac{KW_{maks.}}{100}} = 5,5 \sqrt{l + \frac{100.000}{100}} \quad (3-45)$$

di mana  $l$  = panjang kawat dalam mile = 100 mile (ditentukan) maka :

$$KV = 5,5 \sqrt{100 + 1.000} = 180 \text{ KV}$$

### 5.4. Memperbesar Daya Natural

Untuk memperbesar daya natural dapat ditempuh dua cara :

- 1)  $KV$  dinaikkan : ini sudah jelas dari Persamaan (3-43).
- 2)  $Z_0$  diturunkan :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} : L \text{ diturunkan dengan kapasitor seri atau}$$

$C$  dinaikkan dengan kapasitor shunt

$C$  dinaikkan dipakai pada kawat transmisi menengah

$L$  diturunkan dipakai pada kawat transmisi panjang.

### SOAL-SOAL

3.1. Saluran transmisi, fasa tiga, 275 KV, panjang 500 km. Konstanta-konstanta saluran adalah :

$$R_a = 0,078 \text{ ohm per km}$$

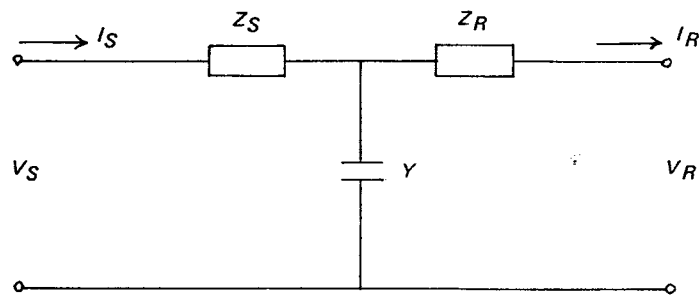
$$X_1 = 0,534 \text{ ohm per km}$$

$$Y = j 3,68 \times 10^{-6} \text{ mho per km}$$

Besar beban adalah 840 Amper pada faktor daya 0,85 terbelakang dan tegangan beban 275 KV.

(a) Dengan menggunakan nominal *PI* tentukanlah :  $V_S$ ,  $I_S$  dan  $V_R$  (%). (b) Dengan menggunakan rumus-rumus saluran panjang tentukanlah :  $V_S$ ,  $I_S$  dan  $V_R$  (%).

3.2. Untuk sirkuit umum T : (a) Turunkanlah persamaan-persamaan tegangan dan arus pada ujung kirim, dinyatakan dalam tegangan dan arus pada ujung terima.



(b) Tentukanlah impedansi yang diukur pada ujung kirim apabila : (i) ujung terima terbuka ( $Z_{SO}$ ), (ii) ujung terima terhubung-singkat ( $Z_{SS}$ ); (c) Tentukanlah impedansi yang diukur pada ujung terima apabila (i) ujung kirim terbuka ( $Z_{RO}$ ), (ii) ujung kirim terhubung-singkat ( $Z_{RS}$ ).

3.3. Lakukanlah hal yang sama seperti pada Soal 3.2 untuk sirkuit umum *PI*.

3.4. Buktikanlah bahwa sirkuit T mempunyai impedansi hubung terbuka dan impedansi hubung singkat yang sama seperti pada sirkuit *PI* bila konstanta-konstanta sirkuit T, yang dinyatakan dalam konstanta-konstanta sirkuit *PI*, diberikan oleh persamaan-persamaan :

$$Y = Y_S + Y_R + Z Y_S Y_R$$

$$Z_S = \frac{Z Y_R}{Y_S + Y_R + Z Y_S Y_R}$$

$$Z_R = \frac{Z Y_S}{Y_S + Y_R + Z Y_S Y_R}$$

3.5. Buktikanlah bahwa sirkuit *PI* mempunyai impedansi hubung terbuka dan impedansi hubung singkat yang sama seperti pada sirkuit T bila konstanta-konstanta sirkuit *PI*, yang dinyatakan dalam konstanta-konstanta sirkuit T, diberikan oleh persamaan-persamaan :

$$Z = Z_S + Z_R + Z_S Z_R Y$$

$$Y_S = \frac{Z_R Y}{Z_S + Z_R + Z_S Z_R Y}$$

$$Y_R = \frac{Z_S Y}{Z_S + Z_R + Z_S Z_R Y}$$

3.6. Suatu saluran transmisi fasa-tiga mempunyai konstanta-konstanta :

$$Z = 0,105 + j 0,500 \text{ Ohm per km}$$

$$X' = 0,3065 \text{ Mega Ohm-km}$$

Panjang saluran 150 km dan frekuensi 50 Hz. (a) Tentukanlah konstanta-konstanta dari representasi nominal T dari saluran tersebut. (b) Dengan menggunakan representasi nominal T, hitunglah tegangan ujung terima pada beban nol, bila tegangan ujung kirim 208 KV (jala-jala).

3.7. Untuk saluran pada Soal 3.6. (a) Tentukanlah konstanta-konstanta dari representasi nominal *PI*. (b) Buktikanlah bahwa pada beban nol, tegangan ujung terima sama seperti yang diperoleh pada representasi nominal T.

3.8. Pecahkanlah Soal 3.6 bila panjang saluran 400 km. Gunakanlah representasi nominal T.

3.9. Tegangan ujung terima pada Soal 3.6, dengan panjang 150 km, adalah 220 KV (jala-jala). Arus pada ujung terima 300 Amper pada faktor daya 0,95 terbelakang. Tentukanlah tegangan dan arus pada ujung kirim dengan menggunakan representasi nominal T.

3.10. Pecahkan Soal 3.9 dengan menggunakan representasi nominal *PI*.

3.11. Pecahkanlah Soal 3.8 dengan menggunakan representasi ekuivalen T dan tentukanlah besar kesalahan dalam persen dari hasil yang diperoleh dengan menggunakan representasi nominal T.

3.12. Impedansi saluran transmisi fasa tiga adalah  $0,105 + j 0,500$  ohm per km dan reaktansi kapasitif 0,3065 Mega ohm-km. Panjang saluran 500 km. Bila tegangan ujung terima 220 KV jala-jala, arus ujung terima 300 amper pada faktor daya 0,995 terbelakang, tentukanlah tegangan, arus dan faktor daya pada titik-titik 100, 200, 300, 400 dan 500 km dari titik ujung terima.

3.13. Untuk saluran transmisi Soal 3.12, tentukanlah  $\cosh \sqrt{ZY}$  dan  $\sinh \sqrt{ZY}$ . Tentukanlah juga tegangan ujung terima pada beban nol bila tegangan ujung kirim 230 KV jala-jala.

3.14. Untuk saluran transmisi Soal 3.12, tentukanlah : (a) konstanta-konstanta untuk representasi ekuivalen T dan *PI*. (b) Dengan menggunakan ekuivalen T dan *PI* tentukanlah tegangan dan arus pada ujung kirim bila tegangan ujung terima 220 KV jala-jala dan arus 300 amper pada faktor daya 0,995 terbelakang.

3.15. Untuk saluran pada Soal 3.12, tentukanlah : (a) impedansi karakteristik; (b) konstanta propagasi; (c) daya natural; (d) panjang elektrik saluran.

3.16. Sebuah pusat pembangkit dihubungkan dengan saluran transmisi fasa tiga yang mempunyai konstanta sebagai berikut :

$$Z = 300 \angle 75^\circ \text{ Ohm}$$

$$Y = 0,0025 \angle 90^\circ \text{ Mho}$$

Besar daya yang diberikan pusat pembangkit 40 MVA pada faktor daya 1,0 dan tegangan 120 KV. Di tengah-tengah saluran ada beban 10 MVA dengan faktor daya 1,0. Tentukanlah tegangan dan beban pada ujung saluran.

3.17. Suatu saluran tunggal, fasa tiga, 275 KV; 400 km, 50 Herz. Konstanta saluran adalah :

$$R_a = 0,035 \text{ Ohm/km}$$

$$L_1 = 1,0 \text{ mili henri/km}$$

$$C = 0,01 \text{ mikro Farad/km}$$

Bila tegangan 275 KV, tentukanlah rating MVA dari reaktor shunt yang diperlukan untuk mempertahankan tegangan 275 KV pada ujung beban tanpa beban. Gunakanlah representasi nominal  $PI$ .

## KONSTANTA-KONSTANTA UMUM SALURAN TRANSMISI

### 1. RANGKAIAN KUTUB EMPAT

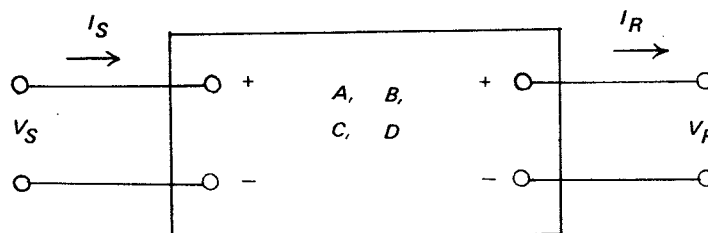
Dalam banyak keperluan di dalam teknik transmisi daya listrik, misalnya diagram-diagram lingkaran, perencanaan saluran transmisi dan lain-lain, sering perlu menyatakan konstanta-konstanta saluran transmisi ke dalam Konstanta-konstanta Umum Saluran.

Karena saluran transmisi tersebut selalu dapat digambarkan sebagai kotak dengan dua jepitan masuk dan dua jepitan keluar, dan karena memenuhi persyaratan dari kutub empat, maka saluran transmisi dapat dilayani sebagai kutub empat.

Suatu rangkaian listrik yang PASIP, LINIER dan BILATERAL, selalu dapat direpresentasikan sebagai kutub empat. *Pasip* berarti tidak ada sumber (internal voltage), *linier* berarti impedansinya tidak tergantung dari besar arus, dan *bilateral* berarti impedansi sama dilihat dari kedua pihak atau tidak tergantung dari arah arus.

Pada hakekatnya saluran transmisi itu tidak linier karena bagaimanapun juga impedansinya tergantung dari temperatur, jadi tergantung dari arus. Tetapi karena di dalam perhitungan kita selalu menentukan temperatur kerja tertentu, maka pada temperatur itu konstanta kawat adalah konstan.

Jadi karena saluran transmisi (termasuk transformator) memenuhi ketiga syarat-syarat di atas, maka saluran transmisi (dan transformator) dapat direpresentasikan sebagai kutub empat, Gambar 4-1.



GAMBAR 4-1. Kutub empat.



Dalam Gambar 4-1,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  adalah konstanta-konstanta umum dari rangkaian itu. Relasi tegangan dan arus untuk suatu kutub empat adalah :

$$\begin{aligned} V_S &= A V_R + B I_R \\ I_S &= C V_R + D I_R \end{aligned} \quad (4-1)$$

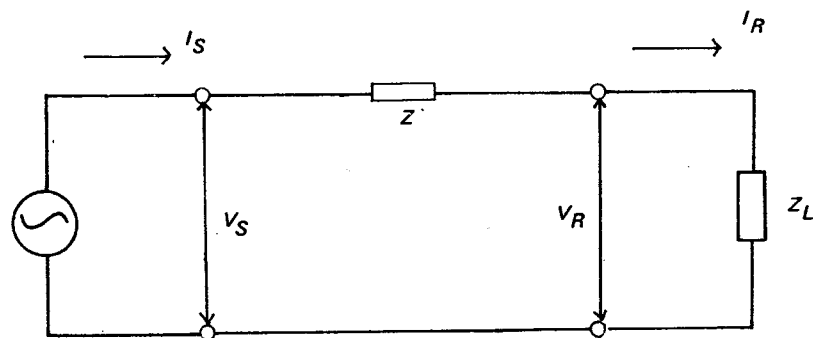
dan

$$\begin{aligned} V_R &= D V_S - B I_S \\ I_R &= -C V_S + A I_S \end{aligned} \quad (4-2)$$

## 2. SALURAN TRANSMISI SEBAGAI KUTUB EMPAT

### 2.1. Saluran Pendek

Gambar 4-2 menggambarkan saluran transmisi pendek.



GAMBAR 4-2. Saluran transmisi pendek

Relasi tegangan dan arus untuk saluran pendek :

$$\begin{aligned} V_S &= V_R + Z I_R \\ I_S &= 0 + I_R \end{aligned} \quad (4-3)$$

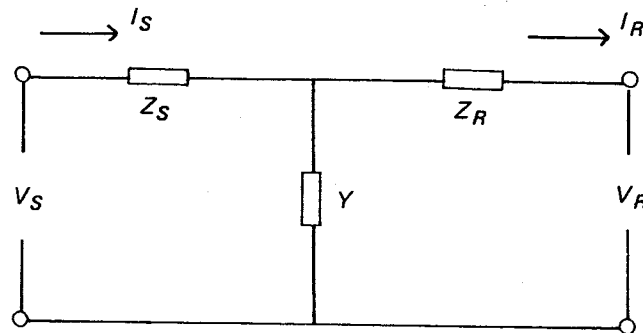
Dengan membandingkan Persamaan (4-3) dengan Persamaan (4-2) maka :

$$A = 1; B = Z; C = 0; D = 1$$

### 2.2. Saluran Menengah

#### 2.2.1. Nominal $T$

Untuk representasi Nominal  $T$ , Gambar 4-3 diperoleh relasi tegangan dan arus :

GAMBAR 4-3. Gambar nominal  $T$  saluran menengah.

Dari Gambar 4-3 dapat diturunkan,

$$V_S = (1 + Y Z_S) V_R + (Z_S + Z_R + Z_S Y Z_R) I_R$$

$$I_S = Y V_R + (1 + Y Z_R) I_R$$

Jadi

$$A = 1 + Y Z_S$$

$$B = Z_S + Z_R + Z_S Y Z_R$$

$$C = Y$$

$$D = 1 + Y Z_R$$

(4-4)

dan bila  $Z_S = Z_R = \frac{Z}{2}$

maka

$$A = 1 + \frac{Z Y}{2}$$

$$B = Z + \frac{Z^2 Y}{4}$$

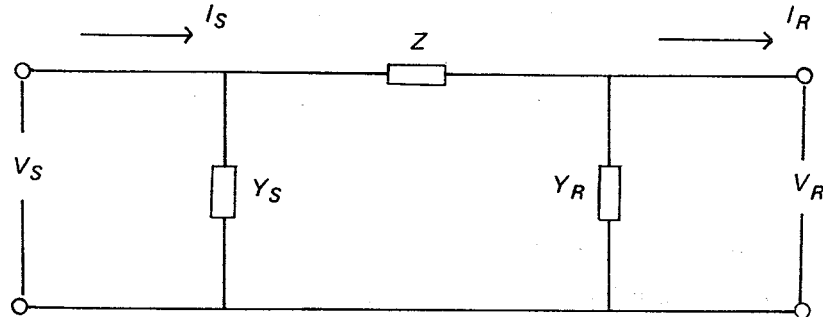
$$C = Y$$

$$D = A$$

(4-5)

### 2.2.2. Nominal $PI$

Untuk nominal  $PI$ , Gambar 4-4, diperoleh relasi tegangan dan arus.

GAMBAR 4-4. Gambar nominal  $\pi I$  saluran menengah.

Dari Gambar 4-4 dapat diturunkan,

$$V_S = (1 + Y_R Z) V_R + Z I_R$$

$$I_S = (Y_S + Y_R + Y_S Z Y_R) V_R + (1 + Y_S Z) I_R$$

Jadi

$$A = 1 + Y_R Z; \quad B = Z$$

$$C = Y_S + Y_R + Y_S Z Y_R$$

$$D = 1 + Y_S Z$$

dan bila  $Y_S = Y_R = \frac{Y}{2}$

maka,

$$A = D = 1 + \frac{Y Z}{2}$$

$$B = Z$$

$$C = Y + \frac{Y^2 Z}{4}$$

(4-6)

### 2.3 Saluran Panjang

Dari Persamaan (3-36) persamaan untuk saluran panjang :

$$V_S = (\cosh \gamma l) V_R + (Z_k \sinh \gamma l) I_R$$

$$I_S = \left( \frac{\sinh \gamma l}{Z_k} \right) V_R + (\cosh \gamma l) I_R$$

Jadi :

$$\begin{aligned} A &= D = \cosh \gamma l \\ B &= Z_k \sinh \gamma l \\ C &= \frac{\sinh \gamma l}{Z_k} \end{aligned} \quad (4-7)$$

### 3. SIFAT-SIFAT KUTUB EMPAT

#### 3.1 Kutub Empat Simetris

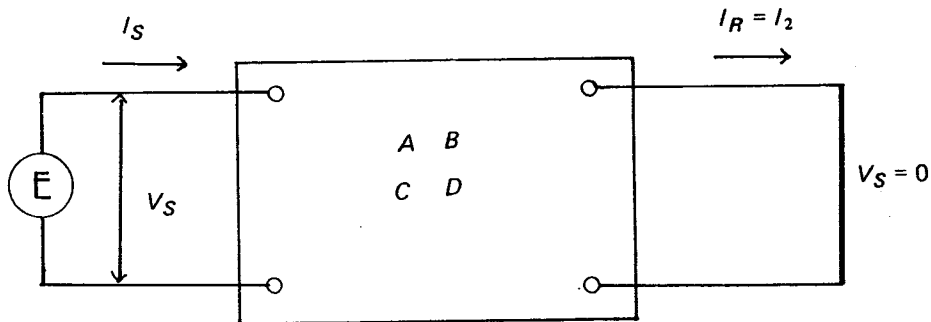
Suatu kutub empat simetris ialah bilamana rangkaian itu sama dipandang dari kedua ujungnya. Dalam hal saluran transmisi menengah bila  $Z_S = Z_R$ , atau  $Y_S = Y_R$ . Untuk kutub empat yang simetris diperoleh:

$$A = D$$

#### 3.2. Pada Kutub Empat Berlaku Relasi : $AD - BC = 1$

*Bukti :*

Masukkanlah tegangan yang diketahui,  $E$ , pada jepitan ujung kiri dan hubung singkat jepitan ujung beban, Gambar 4-5.

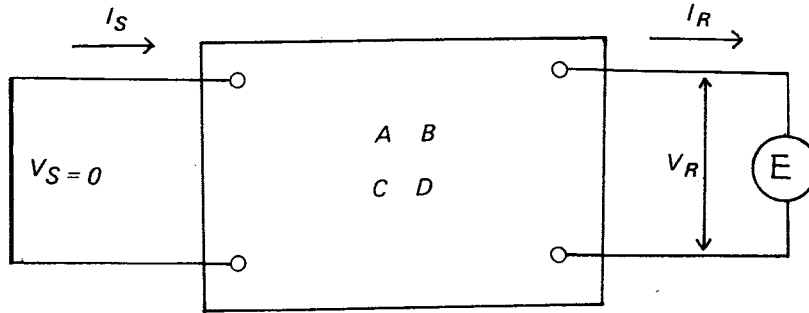


GAMBAR 4-5. Kutub empat, ujung beban dihubung singkat.

Dari Gambar 4-5 :

$$\begin{aligned} V_S &= E = A V_R + B I_R \\ &= 0 + B I_2 \\ I_2 &= \frac{E}{B} \end{aligned}$$

Sekarang jepitan ujung kiri dihubungkan singkat dan pada jepitan ujung beban dimasukkan tegangan  $E$ , Gambar 4-6.



GAMBAR 4-6. Kutub empat, ujung kirim dihubungkan singkat.

Dalam hal ini :

$$V_R = E$$

$$I_S = -I_2$$

$$V_S = A V_R + B I_R$$

$$0 = A E + B I_R$$

$$I_R = -\frac{A E}{B}$$

$$I_S = C V_R + D I_R$$

$$-I_2 = C E + D \left( -\frac{A E}{B} \right)$$

atau

$$-\frac{E}{B} = C E - \frac{A D}{B} E$$

$$-\frac{1}{B} = C - \frac{A D}{B}$$

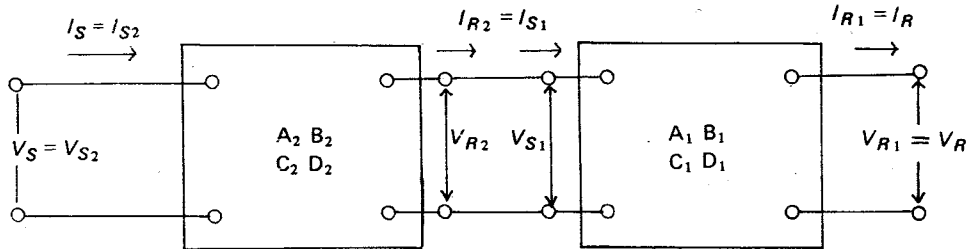
atau

$$AD - BC = 1 \text{ q.e.d.}$$

(4-8)

#### 4. DUA KUTUB EMPAT DALAM SERI DAN PARALEL

##### 4.1. Hubungan Seri



GAMBAR 4-7. Hubungan seri dua buah kutub empat.

$$V_{S1} = A_1 V_{R1} + B_1 I_{R1}$$

$$I_{S1} = C_1 V_{R1} + D_1 I_{R1}$$

$$V_{S2} = A_2 V_{R2} + B_2 I_{R2}$$

$$I_{S2} = C_2 V_{R2} + D_2 I_{R2}$$

$$I_{R2} = I_{S1}$$

$$V_{R2} = V_{S1}$$

$$V_{S1} = A_1 V_R + B_1 I_R$$

$$I_{S1} = C_1 V_R + D_1 I_R$$

$$V_S = A_2 V_{S1} + B_2 I_{S1}$$

$$I_S = C_2 V_{S1} + D_2 I_{S1}$$

$$V_S = A_2(A_1 V_R + B_1 I_R) + B_2(C_1 V_R + D_1 I_R)$$

$$I_S = C_2(A_1 V_R + B_1 I_R) + D_2(C_1 V_R + D_1 I_R)$$

$$V_S = (A_1 A_2 + B_2 C_1)V_R + (A_2 B_1 + B_2 D_1)I_R$$

$$I_S = (A_1 C_2 + C_1 D_2)V_R + (B_1 C_2 + D_1 D_2)I_R$$

Konstanta umum ekivalen dari penggabungan seri :

$$A = A_1 A_2 + B_2 C_1$$

$$B = A_2 B_1 + B_2 D_1$$

$$C = A_1 C_2 + C_1 D_2$$

$$D = B_1 C_2 + D_1 D_2$$

(4-9)

Akan dibuktikan :  $AD - BC = 1$

$$\begin{aligned} \text{bila :} \quad A_1 D_1 - B_1 C_1 &= 1 \\ A_2 D_2 - B_2 C_2 &= 1 \end{aligned}$$

*Bukti:*

$$AD - BC = [A_1 A_2 + B_2 C_1] [B_1 C_2 + D_1 D_2] - [A_2 B_1 + B_2 D_1] [A_1 C_2 + C_1 D_2]$$

$$AD - BC = A_1 A_2 B_1 C_2 + A_1 A_2 D_1 D_2 + B_2 C_1 B_1 C_2 + B_2 C_1 D_1 D_2 - A_1 A_2 B_1 C_2 - A_2 B_1 C_1 D_2 - B_2 D_1 A_1 C_2 - B_2 D_1 C_1 D_2$$

$$\begin{aligned} AD - BC &= A_2 D_2 [A_1 D_1 - B_1 C_1] - B_2 C_2 [A_1 D_1 - B_1 C_1] \\ &= 1 \qquad \qquad \qquad = 1 \end{aligned}$$

$$AD - BC = A_2 D_2 - B_2 C_2$$

$$AD - BC = \underline{\underline{1.}}$$

Jadi rangkaian dua kutub empat yang diseri, juga merupakan kutub empat.

Konstanta umum ekivalen dari  $n$  buah kutub empat yang dihubungkan seri diberikan oleh operasi matriks di bawah ini :

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{n-1} & B_{n-1} \\ C_{n-1} & D_{n-1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

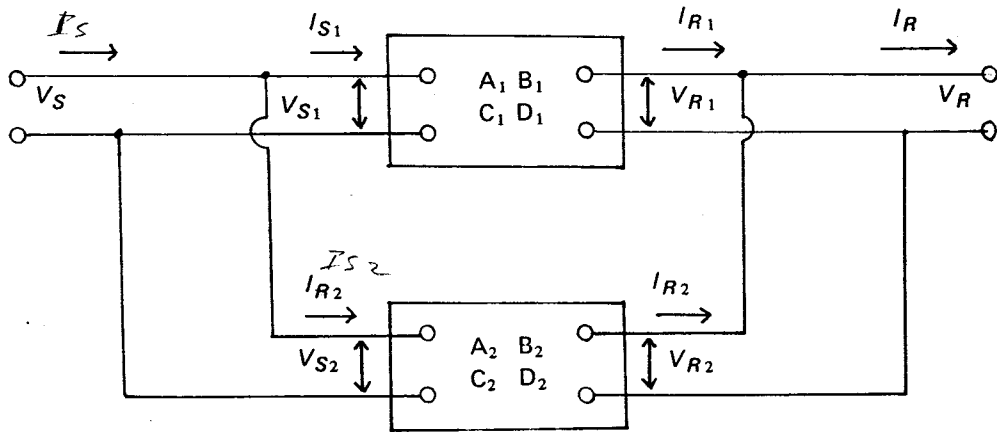
Jadi bila  $n = 2$ , maka

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 A_2 + B_2 C_1 & A_2 B_1 + B_2 D_1 \\ A_1 C_2 + C_1 D_2 & B_1 C_2 + D_1 D_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi} \quad A &= A_1 A_2 + B_2 C_1 \\ B &= A_2 B_1 + B_2 D_1 \\ C &= A_1 C_2 + C_1 D_2 \\ D &= B_1 C_2 + D_1 D_2 \end{aligned}$$

dan yang terakhir ini sama dengan Persamaan (4-9).

## 4.2. Hubungan Paralel



GAMBAR 4-8. Hubungan paralel dua buah kutub empat.

$$I_S = I_{S1} + I_{S2}$$

$$I_R = I_{R1} + I_{R2}$$

$$V_S = V_{S1} = V_{S2}$$

$$V_R = V_{R1} = V_{R2}$$

$$\begin{aligned} V_{S1} &= A_1 V_{R1} + B_1 I_{R1} \\ V_{S2} &= A_2 V_{R2} + B_2 I_{R2} \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \times B_2 \\ \times B_1 \end{array} \right|$$

$$B_2 V_{S1} = A_1 B_2 V_{R1} + B_1 B_2 I_{R1}$$

$$B_1 V_{S2} = A_2 B_1 V_{R2} + B_1 B_2 I_{R2}$$

$$\frac{B_1 V_{S2} + B_2 V_{S1}}{(B_1 + B_2)V_S} = \frac{A_1 B_2 V_{R1} + A_2 B_1 V_{R2} + B_1 B_2 I_{R2}}{(B_1 + B_2)V_R + (B_1 B_2)I_R}$$

$$V_S = \frac{(A_1 B_2 + A_2 B_1)}{B_1 + B_2} V_R + \frac{B_1 \cdot B_2}{B_1 + B_2} I_R$$

$$V_{S1} - V_{S2} = (A_1 - A_2)V_R + B_1 I_{R1} - B_2 I_{R2} = 0$$

$$I_{R1} + I_{R2} = I_R$$

$$I_{R2} = I_R - I_{R1}$$

$$(A_1 - A_2)V_R + B_1 I_{R1} - B_2 (I_R - I_{R1}) = 0$$

$$(A_1 - A_2)V_R + (B_1 + B_2)I_{R1} - B_2 I_R = 0$$



$$I_{R_1} = -\frac{A_1 - A_2}{B_1 + B_2} V_R + \frac{B_2}{B_1 + B_2} I_R$$

Juga :

$$I_{R_2} = \frac{A_1 - A_2}{B_1 + B_2} V_R + \frac{B_1}{B_1 + B_2} I_R$$

$$I_S = I_{S_1} + I_{S_2} = (C_1 V_R + D_1 I_{R_1}) + (C_2 V_R + D_2 I_{R_2})$$

$$I_S = (C_1 + C_2) V_R + D_1 I_{R_1} + D_2 I_{R_2}$$

$$I_S = (C_1 + C_2) V_R + D_1 \left[ -\frac{A_1 - A_2}{B_1 + B_2} V_R + \frac{B_2}{B_1 + B_2} I_R \right] + D_2 \left[ \frac{A_1 - A_2}{B_1 + B_2} V_R + \frac{B_1}{B_1 + B_2} I_R \right]$$

$$I_S = \left[ C_1 + C_2 - \frac{(A_1 - A_2)(D_1 - D_2)}{B_1 + B_2} \right] V_R + \left[ \frac{B_1 D_2 + D_1 B_2}{B_1 + B_2} \right] I_R$$

$$V_S = \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{B_1 + B_2} V_R + \frac{B_1 \cdot B_2}{B_1 + B_2} I_R$$

Jadi :

$$A = \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{B_1 + B_2}$$

$$B = \frac{B_1 \cdot B_2}{B_1 + B_2}$$

$$C = C_1 + C_2 - \frac{(A_1 - A_2)(D_1 - D_2)}{B_1 + B_2}$$

$$D = \frac{B_1 D_2 + B_2 D_1}{B_1 + B_2} \quad (4-10)$$

Kalau :

$$A_1 D_1 - B_1 C_1 = 1$$

$$A_2 D_2 - B_2 C_2 = 1$$

Buktikan :

$$AD - BC = 1$$

**Contoh 4-1.** Suatu saluran transmisi dengan  $R_a = 0,0582$  ohm/km,  $X = 0,44686$  ohm/km dan  $X' = 0,3921$  Mega ohm-km, panjang saluran 160,9 km. Saluran ter-

sebut dihubungkan seri dengan sebuah trafo pada ujung kirim. Trafo itu direpresentasikan sebagai rangkaian  $T$  dengan parameter :

$$\begin{aligned} Z_S &= Z_R = 1,0 + j 23,2 \text{ ohm} \\ Y &= (6,2 - j 87,0) 10^{-6} \text{ mho.} \end{aligned}$$

*Trafo*

Tentukanlah konstanta  $ABCD$  dari kedua rangkaian itu.

*Jawab.* Impedansi dan reaktansi kapasitif saluran :

$$Z = (0,0582 + j 0,44686) 160,9 = 72,6 / 82,57^\circ \text{ ohm.}$$

$$X' = \frac{0,3921}{160,9} = 0,00244 \text{ Mega ohm, atau } Y = 4,1 \times 10^{-4} / 90^\circ \text{ mho.}$$

*Saluran*

Jadi,

$$A_1 = 1 + \frac{Z Y}{2} = 0,9853 / 0^\circ$$

$$B_1 = Z = 72,6 / 82,57^\circ \text{ ohm.}$$

$$C_1 = Y \left( 1 + \frac{Z Y}{4} \right) = 4,86 \times 10^{-4} / 90^\circ \text{ ohm.}$$

$$A_1 = D_1$$

$$A_2 = 1 + Z_S Y = 1,002 / 0^\circ$$

*Saluran*

$$B_2 = Z_S + Z_R + Z_S Y Z_R = 2 + j 46,8 = 46,8 / 87,55^\circ \text{ ohm.}$$

$$C_2 = Y = 87,0 / -85,9^\circ \times 10^{-6}; D_2 = A_2$$

$$A = A_1 A_2 + B_2 C_1 = 0,9633 / 0^\circ$$

$$B = A_2 B_1 + B_2 D_1 = 11,4 + j 118,0 = 119,0 / 83,5^\circ \text{ ohm.}$$

$$C = A_1 C_2 + C_1 D_2 = 4,0 \times 10^{-4} / 86,5^\circ \text{ mho.}$$

$$D = B_1 C_2 + D_1 D_2 = 0,9915 / 0^\circ$$

## 5. MENENTUKAN KONSTANTA UMUM $A, B, C, D$ DENGAN PENGUKURAN

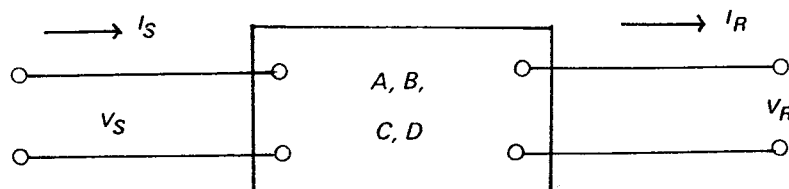
Misalkan :

$Z_{SO}$  = impedansi ujung kirim dengan ujung beban terbuka.

$Z_{SS}$  = impedansi ujung kirim dengan ujung beban hubung singkat.

$Z_{RO}$  = impedansi ujung beban dengan ujung kirim terbuka.

$Z_{RS}$  = impedansi ujung beban dengan ujung kirim hubung singkat.



$$\begin{aligned} V_S &= A V_R + B I_R \\ I_S &= C V_R + D I_R \end{aligned}$$

Ujung beban terbuka, jadi  $I_R = 0$ , maka

$$\left. \begin{aligned} V_S &= A V_R + 0 \\ I_S &= C V_R + 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{V_S}{I_S} &= \frac{A}{C} \\ Z_{SO} &= \frac{A}{C} \end{aligned}$$

Ujung beban dihubung singkat, jadi  $V_R = 0$ , maka

$$\left. \begin{aligned} V_S &= B I_R \\ I_S &= 0 + D I_R \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{V_S}{I_S} &= \frac{B}{D} \\ Z_{SS} &= \frac{B}{D} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} V_R &= D V_S - B I_S \\ I_S &= -C V_S + A I_S \end{aligned} \right\} \begin{aligned} V_R &= D V_S - A(-I_S) \\ -I_R &= -C V_S + A(-I_S) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_R &= D V_S + B I_S \\ I_R &= C V_S + A I_S \end{aligned}$$

Ujung kirim terbuka :  $I_S = 0$ , maka

$$\left. \begin{aligned} V_R &= D V_S \\ I_R &= C V_S \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{V_R}{I_R} &= \frac{D}{C} \\ Z_{RO} &= \frac{D}{C} \end{aligned}$$

Ujung kirim dihubung singkat :  $V_S = 0$ , maka

$$\left. \begin{aligned} V_R &= B I_S \\ I_R &= A I_S \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{V_R}{I_R} &= \frac{B}{A} \\ Z_{RS} &= \frac{B}{A} \end{aligned}$$

jadi

$$\left. \begin{aligned} Z_{SO} &= \frac{A}{C} \\ Z_{SS} &= \frac{B}{D} \\ Z_{RO} &= \frac{D}{C} \\ Z_{RS} &= \frac{B}{A} \end{aligned} \right\}$$

maka

$$Z_{RO} - Z_{RS} = \frac{D}{C} - \frac{B}{A} = \frac{AD - BC}{AC} = \frac{1}{AC}$$

atau

$$\frac{Z_{RO} - Z_{RS}}{Z_{SO}} = \frac{1}{AC} \cdot \frac{C}{A} = \frac{1}{A^2}$$

Jadi :

$$A = \sqrt{\frac{Z_{SO}}{Z_{RO} - Z_{RS}}}$$

$$B = Z_{RS} \sqrt{\frac{Z_{SO}}{Z_{RO} - Z_{RS}}} = Z_{RS} \cdot A$$

$$C = \frac{Z_{RS}}{Z_{RO} Z_{SS}} A$$

$$D = \frac{Z_{RS}}{Z_{SS}} A \quad (4-11)$$

## SOAL-SOAL

**Soal 4-1.** Konstanta umum suatu saluran adalah  $A = D = 0,8940 + j 0,0202$  ohm;  $B = 32,2 + j 172,1$  ohm;  $C = (-0,008 + j 1,168) \times 10^{-3}$  mho. (a) Periksa apakah konstanta umum di atas memenuhi  $AD - BC = 1$ . (b) Tegangan pada ujung terima adalah 220 kv jala-jala dan arus ujung terima 325 amper. Vektor arus mendahului vektor tegangan dengan sudut  $5,75^\circ$ , tentukanlah tegangan dan arus pada ujung kirim. (c) Bila tegangan dan arus pada ujung kirim 230 kv jala-jala dan 340 amper, sedang arus

mendahului tegangan dengan sudut  $5,75^\circ$ , tentukanlah tegangan dan arus pada ujung terima.

**Soal 4-2.** Konstanta representasi ekivalen  $PI$  suatu saluran adalah  $\frac{Y'}{2} = 0,652 \angle 89,8^\circ$  mho;  $Z' = 200 \angle 81,6^\circ$  ohm. (a) Tentukanlah konstanta umum  $ABCD$  dari saluran itu. (b) Periksa apakah  $AB - BC = 1$ . (c) Bila panjang saluran itu 400 km, tegangan dan arus ujung terima adalah 220 kv dan 300 amper pada faktor daya 0,992 terbelakang, tentukanlah tegangan dan arus ujung kirim dengan menggunakan konstanta umum  $ABCD$ .

**Soal 4-3.** Saluran pada Soal 4-1 dihubung seri pada sebelah kirinya dengan sebuah impedansi sebesar  $Z = 3,185 + j 39,82$ . Tentukanlah konstanta umum dari gabungan itu. Periksa juga apakah  $AD - BC = 1$ .

**Soal 4-4.** Dua jaringan mempunyai konstanta umum:  $A_1 = D_1 = 0,995 + j 0,0024$ ;  $B_1 = 13,8 + j 31,8$ ;  $C_1 = j 0,00034$ .  $A_2 = D_2 = 0,972 + j 0,0064$ ;  $B_2 = 6,78 + j 29,7$ ;  $C_2 = (-3 + j 1,850) \times 10^{-6}$ . Tentukanlah konstanta umum dari kedua jaringan terhubung paralel. Periksa apakah jaringan baru memenuhi  $AD - BC = 1$ .

**Soal 4-5.** Pecakanlah Soal 4-4 bila kedua jaringan terhubung seri.

**Soal 4-6.** Tentukanlah konstanta dari representasi  $PI$  dan  $T$  dari Soal 4-1.

# DIAGRAM LINGKARAN DAN ALIRAN DAYA PADA SALURAN TRANSMISI

## 1. PENDAHULUAN

Dalam sistem tenaga listrik, khususnya dalam saluran transmisi, tegangan, arus dan daya selalu berubah-ubah dari saat ke saat. Seperti telah kita lihat dalam perhitungan-perhitungan yang menyangkut tegangan, arus dan daya sangat panjang dan memakan waktu. Oleh karena itu untuk menghemat waktu sangat menolong bila pemecahan dilakukan secara grafik dengan pertolongan diagram lingkaran. Diagram lingkaran juga sangat menolong dalam perencanaan dan dalam bidang operasi. Di samping itu dengan pertolongan diagram lingkaran dapat diterangkan hasil-hasil yang diperoleh.

Dalam teknik transmisi tenaga listrik dikenal berbagai diagram lingkaran, dan di sini akan diberikan diagram lingkaran daya, diagram rugi-rugi konstan dan diagram efisiensi konstan.

## 2. PERSAMAAN VEKTOR DARI LINGKARAN<sup>1</sup>

Karena besaran-besaran listrik adalah vektor maka lebih baik bila persamaan lingkaran itu diberikan dalam bentuk vektor. Ada dua bentuk persamaan vektor dari lingkaran, yaitu bentuk linier dan bentuk kuadrat.

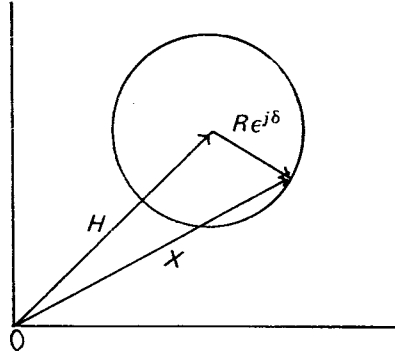
### 2.1. Persamaan Vektor Lingkaran bentuk Linier

$$X = H + Re^{j\delta} \quad (5-1)$$

$X, H, R$  = vektor.

Dalam koordinat kartesian persamaan lingkaran adalah :

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$



GAMBAR 5-1. Diagram lingkaran.

atau

$$x^2 - 2ax + y^2 - 2by + (a^2 + b^2 - r^2) = 0$$

## 2.2. Persamaan Vektor Lingkaran bentuk Kuadrat

$$X - H = R e^{j\delta}$$

$$\hat{X} - \hat{H} = \hat{R} e^{-j\delta}$$

$$(X - H)(\hat{X} - \hat{H}) = R e^{j\delta} \hat{R} e^{-j\delta}$$

$$|X|^2 - X\hat{H} - \hat{X}H + |K|^2 = 0 \quad (5-2)$$

di mana :

$$|K|^2 = |H|^2 - |R|^2$$

Bukti bahwa (5-2) persamaan lingkaran.

Misalkanlah :

$$X = x + jy; \quad \hat{X} = x - jy; \quad |X|^2 = x^2 + y^2$$

$$H = a + jb; \quad \hat{H} = a - jb; \quad |H|^2 = a^2 + b^2$$

$$|R| = r$$

Maka,

$$x^2 + y^2 - (x + jy)(a - jb) - (x - jy)(a + jb) + a^2 + b^2 - r^2 = 0$$

atau,

$$x^2 + y^2 - 2ax - 2by + a^2 + b^2 = r^2$$

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

dan yang terakhir ini adalah persamaan lingkaran.

### 3. DIAGRAM LINGKARAN DAYA

Daya kompleks didefinisikan sebagai :

$$S = V \hat{I} = P + jQ \quad (5-3)$$

dengan pengertian :

+ Q = daya reaktif induktif

- Q = daya reaktif kapasitif

Persamaan tegangan :  $V_S = A V_R + B I_R$

jadi  $I_R = \frac{V_S}{B} - \frac{A}{B} V_R$

dan  $\hat{I}_R = \frac{\hat{V}_S}{\hat{B}} - \frac{\hat{A}}{\hat{B}} \hat{V}_R$

Daya pada ujung beban :

$$S_R = V_R \hat{I}_R = P_R + jQ_R$$

maka

$$S_R = -\frac{\hat{A}}{\hat{B}} |V_R|^2 + \frac{\hat{V}_S V_R}{\hat{B}} \quad (5-4)$$

Daya pada ujung kirim :

$$V_R = D V_S - B I_S$$

$$I_S = -\frac{V_R}{B} + \frac{D}{B} V_S$$

$$S_S = V_S \hat{I}_S = P_S + jQ_S$$

maka :

$$S_S = \frac{\hat{D}}{\hat{B}} |V_S|^2 - \frac{V_S \hat{V}_R}{\hat{B}} \quad (5-5)$$

#### 3.1. Diagram Lingkaran Daya pada Ujung Beban

Misalkan :

$$V_R = |V_R| \angle 0^\circ$$

$$V_S = |V_S| \angle \delta^\circ$$

$$\hat{V}_S = |V_S| \angle -\delta^\circ$$



Jadi Persamaan (5-4) :

$$S_R = -\frac{\hat{A}}{\hat{B}} |V_R|^2 + \frac{|V_S| |V_R|}{\hat{B}} \angle -\delta^\circ \quad (5-6)$$

Pusat lingkaran :

$$H_R = -\frac{\hat{A}}{\hat{B}} |V_R|^2 \quad (5-7)$$

Radius lingkaran :

$$|R_R| = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|}$$

Bila

$$\begin{aligned} A &= |A| \angle \alpha \\ B &= |B| \angle \beta \\ D &= |D| \angle \Delta \end{aligned} \quad (5-9)$$

maka :

$$S_R = -\frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \angle \beta - \alpha + \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \angle \beta - \delta \quad (5-10)$$

Koordinat dari pusat lingkaran :

$$\text{Horizontal} : -\frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \cos (\beta - \alpha) \text{ watt}$$

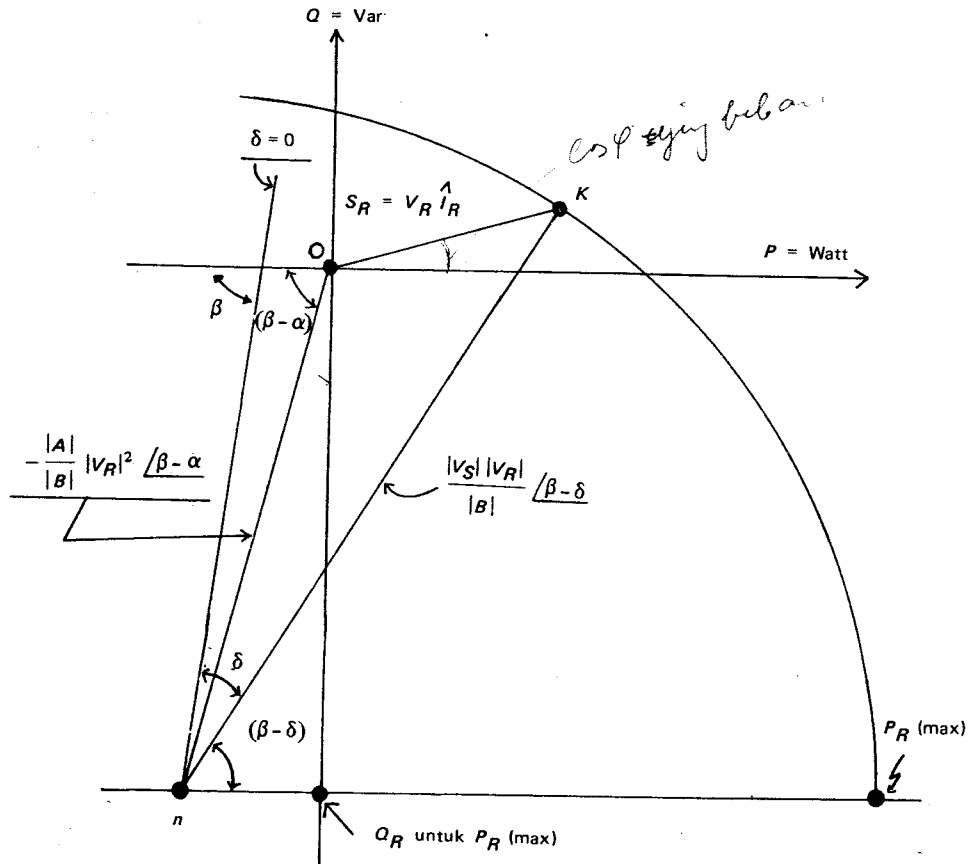
$$\text{Vertikal} : -\frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \sin (\beta - \alpha) \text{ var}$$

$$\text{dan Radius} : \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \text{ volt-amp.} \quad (5-11)$$

Pada Gambar 5-2 diberikan diagram lingkaran daya pada ujung beban.

### 3.2. Diagram Lingkaran Daya pada Ujung Kirim

$$S_S = \frac{\hat{D}}{\hat{B}} |V_S|^2 - \frac{V_S \hat{V}_R}{\hat{B}}$$



GAMBAR 5-2. Diagram lingkaran daya pada ujung beban.

Misalkan :

$$V_S = |V_S| \angle 0^\circ$$

$$V_R = |V_R| \angle -\delta$$

$$\hat{V}_R = |V_R| \angle \delta$$

Jadi:

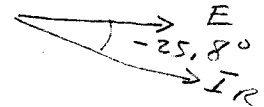
$$S_S = \frac{|D|}{|B|} |V_S|^2 \angle \beta - \Delta - \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \angle \beta + \delta \quad (5-12)$$



Jawab.

- $Z = 0,2 + j 0,667 \text{ ohm/km} = 20 + j 66,7 \text{ ohm untuk } 100 \text{ km.}$   
 $= 69,6 \angle 73,3^\circ \text{ ohm.}$   
 $Y = j 4,42 \times 10^{-6} \text{ mho/km} = j 4,42 \times 10^{-4} \text{ mho untuk } 100 \text{ km.}$   
 $V_R = 220 \text{ KV (L - L)} = 127 \text{ KV (L - N).}$   
 $P_R = 40 \text{ MW, pf} = 0,9 \text{ terbelakang}$

$$I_R = \frac{40.000}{\sqrt{3} \times 220 \times 0,9} = 116,6 \angle -25,8^\circ \text{ Amper} \rightarrow$$



$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_R + Z I_R$$

$$\frac{ZY}{2} = (20 + j 66,7)(j 2,21) \times 10^{-4}$$

$$= -0,0147 + j 0,0044$$

$$1 + \frac{ZY}{2} = 0,9853 + j 0,0044 = 0,9853 \angle 0^\circ$$

$$V_S = (0,9853 + j 0,0044) \times 127.000 + 69,6 \angle 75,3^\circ \times 116,6 \angle -25,8^\circ$$

$$= 125.133 + j 559 + 8.115 \angle 49,5^\circ$$

$$= 130.403 + j 6.730 \text{ Volt.}$$

$$= 130,58 \angle 2,9^\circ \text{ KV (L - N)} = 226,2 \angle 2,9^\circ \text{ KV (L - L).}$$

$$I_S = \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) Y V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_R$$

$$1 + \frac{ZY}{4} = 0,9926 + j 0,0022 = 0,9926 \angle 0^\circ$$

$$I_S = 0,9926 \times j 4,42 \times 10^{-4} \times 127.000 + 0,9853 \times 116,6 \angle -25,8^\circ$$

$$= 103,4 + j 5,7.$$

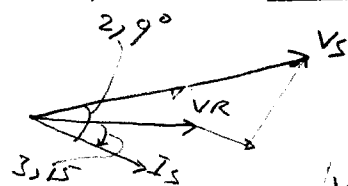
$$= 103,5 \angle 3,15^\circ \text{ Amper.}$$

$$\angle V_S = 2,9^\circ$$

$$\angle I_R = -25,8^\circ$$

- $\Theta_S = 2,9^\circ - 3,15^\circ = -0,25^\circ.$   
 Jadi faktor daya:  $\cos(-0,25^\circ) = 1,0.$

$$P_S = \frac{\sqrt{3} \times 226,2 \times 103,5 \times 1,0}{1.000} = 40,55 \text{ MW.} \rightarrow P_S = \sqrt{3} \cdot \frac{V_S \angle (L-L) |I_S| \cos \phi}{1000}$$



- Rugi-rugi transmisi =  $40,55 - 40 = 0,55 \text{ MW.}$

$$\text{Efisiensi} = \frac{40}{40,55} \times 100\% = 98,6\%.$$

- Pengaturan tegangan:

$$V_R \% = \frac{|V_R(NL)| - |V_R(FL)|}{|V_R(FL)|} \times 100\%$$

$$|V_{R(FL)}| = 127 \text{ KV } (L - N).$$

$$|V_{R(NL)}| = \frac{|V_S|}{|1 + \frac{ZY}{2}|} = \frac{130,58}{0,9853} = 132,53 \text{ KV } (L - N)$$

$$VR(\%) = \frac{132,53 - 127}{127} \times 100\% = \underline{\underline{4,35\%}}.$$

$$5. \quad A = 1 + \frac{ZY}{2} = 0,9853 + j 0,0044 = 0,9853 \angle 0^\circ \rightarrow \alpha = 0$$

$$B = Z = 20 + j 66,6 = 69,7 \angle 73,3^\circ \text{ ohm} \rightarrow \beta$$

$$C = (1 + \frac{ZY}{4})Y = 4,38 \times 10^{-4} \angle 90^\circ \text{ ohm}.$$

$$D = \underline{\underline{A}}; V_S = |V_S| \angle \delta; V_S = 130,58 \angle 2,9^\circ \text{ KV}.$$

6. Persamaan dari diagram lingkaran daya pada ujung beban :

$$S_R = - \frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \angle \beta - \alpha + \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \angle \beta - \delta$$

di mana :

$$|A| = 0,9853.$$

$$|B| = 69,7 \text{ ohm}.$$

$$|C| = 4,38 \times 10^{-4} \text{ mho}.$$

$$\alpha = 0^\circ; |V_R| = 220 \text{ KV } (L - L).$$

$$\beta = 73,3^\circ; |V_S| = 226,2 \text{ KV } (L - L).$$

Jadi :

$$S_R = - \frac{0,9853}{69,7} \times 220^2 \angle 73,3^\circ + \frac{220 \times 226,2}{69,7} \angle 73,3 - \delta$$

$$= -684,2 \angle 73,3^\circ + 714,0 \angle 73,3 - \delta \text{ MVA}$$

Titik pusat lingkaran :

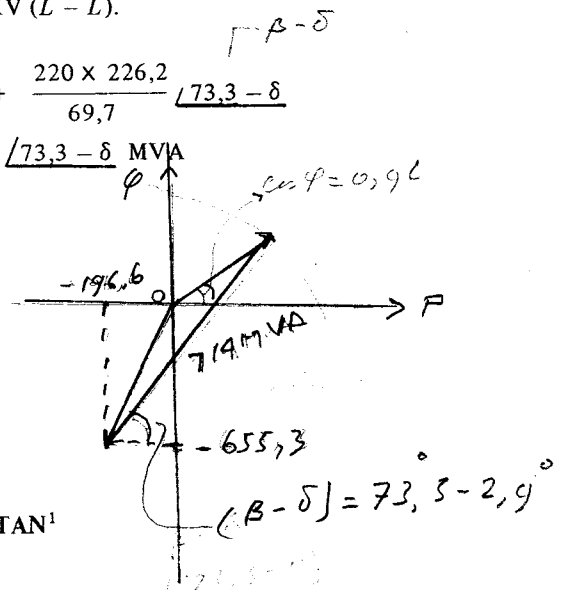
$$\text{Horizontal} = -684,2 \cos 73,3^\circ$$

$$= -196,6 \text{ MW}.$$

$$\text{Vertikal} = -684,2 \sin 73,3^\circ$$

$$= -655,3 \text{ MVAR}.$$

$$\text{Radius lingkaran} = \underline{\underline{714 \text{ MVA}}}.$$



#### 4. DIAGRAM LINGKARAN RUGI-RUGI KONSTAN<sup>1</sup>

Rugi-rugi daya kompleks adalah :

$$S_L = S_S - S_R$$

(5-13)

di mana,

$$S_S = V_S \hat{I}_S = (A V_R + B I_R) (\hat{D} \hat{I}_R + \hat{C} \hat{V}_R)$$

$$S_S = \hat{A}\hat{D} V_R \hat{I}_R + \hat{B}\hat{C} \hat{V}_R I_R + \hat{A}\hat{C} |V_R|^2 + \hat{B}\hat{D} |I_R|^2 \quad (5-14)$$

Tetapi

$$S_R = V_R \hat{I}_R \quad \text{dan} \quad \hat{S}_R = \hat{V}_R I_R$$

maka

$$S_S = \hat{A}\hat{D} S_R + \hat{B}\hat{C} \hat{S}_R + \hat{A}\hat{C} |V_R|^2 + \hat{B}\hat{D} |I_R|^2$$

dan

$$S_R \hat{S}_R = |S_R|^2 = |V_R|^2 |I_R|^2$$

atau

$$|I_R|^2 = \frac{|S_R|^2}{|V_R|^2}$$

jadi,

$$S_L = S_S - S_R = (\hat{A}\hat{D} - 1) S_R + \hat{B}\hat{C} \hat{S}_R + \hat{A}\hat{C} |V_R|^2 + \hat{B}\hat{D} |S_R|^2 / |V_R|^2 \quad (5-15)$$

Persamaan (5-15) adalah rugi-rugi dinyatakan dalam besaran-besaran ujung beban. Dengan jalan yang sama dapat diturunkan  $S_L$  dinyatakan dalam besaran-besaran ujung kirim.

$$S_L = -(\hat{A}\hat{D} - 1) S_S - \hat{B}\hat{C} \hat{S}_S + \hat{C}\hat{D} |V_S|^2 + \hat{A}\hat{B} |S_S|^2 / |V_S|^2 \quad (5-16)$$

Dari Persamaan (5-15) :

$$\hat{S}_L = \hat{B}\hat{C} S_R + (\hat{A}\hat{D} - 1) \hat{S}_R + \hat{A}\hat{C} |V_R|^2 + \hat{B}\hat{D} \frac{|S_R|^2}{|V_R|^2}$$

$$S_L + \hat{S}_L = 2 P_L$$

$$2 P_L = (\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1) S_R + (\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1) \hat{S}_R + (\hat{A}\hat{C} + \hat{A}\hat{C}) |V_R|^2 + (\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}) \frac{|S_R|^2}{|V_R|^2} \quad (5-17)$$

Kalikan Persamaan (5-17) dengan :

$$\frac{|V_R|^2}{(\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D})}$$

dan setelah diatur diperoleh :

$$|S_R|^2 + \left\{ |V_R|^2 \frac{\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \right\} S_R + \left\{ |V_R|^2 \frac{\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \right\} \hat{S}_R + \left\{ \frac{(\hat{A}\hat{C} + \hat{A}\hat{C}) |V_R|^4 - 2 P_L |V_R|^2}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \right\} = 0 \quad (5-18)$$

Variabel sekarang ialah  $S_R$  karena kita memandang dari tempat kedudukan diagram lingkaran daya beban dengan tegangan  $V_R$  yang tetap. Kalau Persamaan (5-18) dibandingkan dengan Persamaan (5-2)

$$|X|^2 - \hat{H}X - H\hat{X} + |K|^2 = 0$$

maka Persamaan (5-18) di atas adalah persamaan lingkaran di mana :

$$\begin{aligned} -\hat{H} &= |V_R|^2 \frac{\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \\ -H &= |V_R|^2 \frac{\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \\ |K|^2 &= \frac{(\hat{A}\hat{C} + \hat{A}\hat{C}) |V_R|^4 - 2 P_L |V_R|^2}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \end{aligned}$$

Pusat lingkaran :

$$\begin{aligned} R_{RL} &= \frac{|V_R|^2}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \sqrt{(\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1)(\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1) - (\hat{A}\hat{C} + \hat{A}\hat{C})(\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}) +} \\ &\quad \frac{2 P_L}{|V_R|^2} (\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}) \end{aligned} \quad (5-19)$$

Dengan mengingat relasi :

$$AD - BC = 1 \quad \text{atau} \quad \hat{A}\hat{D} - \hat{B}\hat{C} = 1$$

Persamaan (5-18) dan (5-19) dapat dirubah menjadi :

$$H_{RL} = -|V_R|^2 \frac{\hat{A}(D - \hat{D}) + \hat{C}(B + \hat{B})}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}}$$

dan

$$R_{RL} = \frac{|V_R|^2}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \sqrt{(A - \hat{A})(D - \hat{D}) - (B + \hat{B})(C + \hat{C}) + \frac{2 P_L}{|V_R|^2} (\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D})} \quad (5-20)$$

Dapat dilihat bahwa vektor  $H_{RL}$  yang menyatakan pusat lingkaran tidak tergantung dari  $S_R$ . Jadi bila  $V_R$  tetap  $H_{RL}$  tetap, sedang  $R_{RL}$  tergantung dari  $P_L$ . Dengan jalan yang sama dapat diturunkan :

$$H_{SL} = |V_S|^2 \frac{\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B}} = |V_S|^2 \frac{\hat{C}(B + \hat{B}) + \hat{D}(A - \hat{A})}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B}}$$

$$R_{SL} = \frac{|V_S|^2}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B}} \sqrt{(A - \hat{A})(D - \hat{D}) - (B + \hat{B})(C + \hat{C}) + \frac{2P_L}{|V_S|^2}(\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B})} \quad (5-21)$$

Dari Gambar 5-4 diberikan diagram lingkaran rugi-rugi konstan.

### 5. DIAGRAM LINGKARAN EFISIENSI KONSTAN<sup>1</sup>

Efisiensi dinyatakan oleh,

$$\eta = \frac{P_R}{P_R + P_L} \quad (5-22)$$

atau :

$$P_L = \frac{P_R (1 - \eta)}{\eta}$$

$\eta$  dinyatakan dalam pecahan, bukan dalam persen.

$$2P_R = S_R + \hat{S}_R$$

Jadi :

$$2P_L = \frac{(S_R + \hat{S}_R)(1 - \eta)}{\eta} \quad (5-23)$$

Dari Persamaan (5-23) dan Persamaan (5-17) :

$$\begin{aligned} 2P_L &= (\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1)S_R + (\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1)\hat{S}_R + (\hat{A}\hat{C} + \hat{A}\hat{C})|V_R|^2 + \\ &\quad (\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D})\frac{|S_R|^2}{|V_R|^2} \\ 2P_L &= \frac{(S_R + \hat{S}_R)(1 - \eta)}{\eta} \end{aligned} \quad (5-24)$$

Kalikan dengan :

$$\frac{|V_R|^2}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}}$$

dan setelah disusun diperoleh :

$$\begin{aligned} |S_R|^2 + \left\{ |V_R|^2 \frac{\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - \frac{1}{\eta}}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \right\} S_R + \left\{ |V_R|^2 \frac{\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - \frac{1}{\eta}}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} \right\} S_R \\ \frac{\hat{A}\hat{C} + \hat{A}\hat{C}}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}\hat{D}} |V_R|^4 = 0 \end{aligned}$$



Bandingkan dengan persamaan lingkaran :

$$|X|^2 - \hat{H}X - H\hat{X} + |K|^2 = 0$$

Maka :

$$H_{R\eta} = -|V_R|^2 \frac{\hat{A}D + \hat{B}C - \frac{1}{\eta}}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}D}$$

$$H_{R\eta} = -|V_R|^2 \frac{\hat{A}(D - \hat{D}) + \hat{C}(B + \hat{B}) - \frac{1 - \eta}{\eta}}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}D} \quad (5-25)$$

dan

$$R_{R\eta} = \frac{|V_R|^2}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}D} \sqrt{(\hat{A}\hat{D} + \hat{B}C - \frac{1}{\eta})(\hat{A}D + \hat{B}\hat{C} - \frac{1}{\eta}) - (\hat{A}\hat{C} + \hat{A}C)(\hat{B}\hat{D} + \hat{B}D)}$$

$$R_{R\eta} = \frac{|V_R|^2}{\hat{B}\hat{D} + \hat{B}D} \sqrt{\frac{1}{\eta} [(A - \hat{A})(D - \hat{D}) - (B + \hat{B})(C + \hat{C})] + (\frac{1 - \eta}{\eta})^2}$$

(5-26)

Untuk ujung kirim :

$$\eta = \frac{P_S - P_L}{P_S}; \quad P_L = P_S(1 - \eta)$$

$$2P_S = S_S + \hat{S}_S$$

$$2P_L = (S_S + \hat{S}_S)(1 - \eta)$$

$$S_L = -(A\hat{D} - 1)S_S - \hat{B}\hat{C}\hat{S}_S + \hat{C}\hat{D}|V_S|^2 + \hat{A}\hat{B} \frac{|S_S|^2}{|V_S|^2}$$

$$\hat{S}_L = -(\hat{A}\hat{D} - 1)\hat{S}_S - \hat{B}\hat{C}S_S + \hat{C}\hat{D}|V_S|^2 + \hat{A}\hat{B} \frac{|S_S|^2}{|V_S|^2}$$


---


$$S_L + \hat{S}_L = 2P_L = -(A\hat{D} + \hat{B}C - 1)S_S - (\hat{A}D + \hat{B}\hat{C} - 1)\hat{S}_S +$$

$$(\hat{C}\hat{D} + \hat{C}D)|V_S|^2 + (\hat{A}\hat{B} + \hat{A}B) \frac{|S_S|^2}{|V_S|^2}$$

Kalikan dengan :

$$\frac{|V_S|^2}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}B}$$

dan setelah diatur diperoleh :

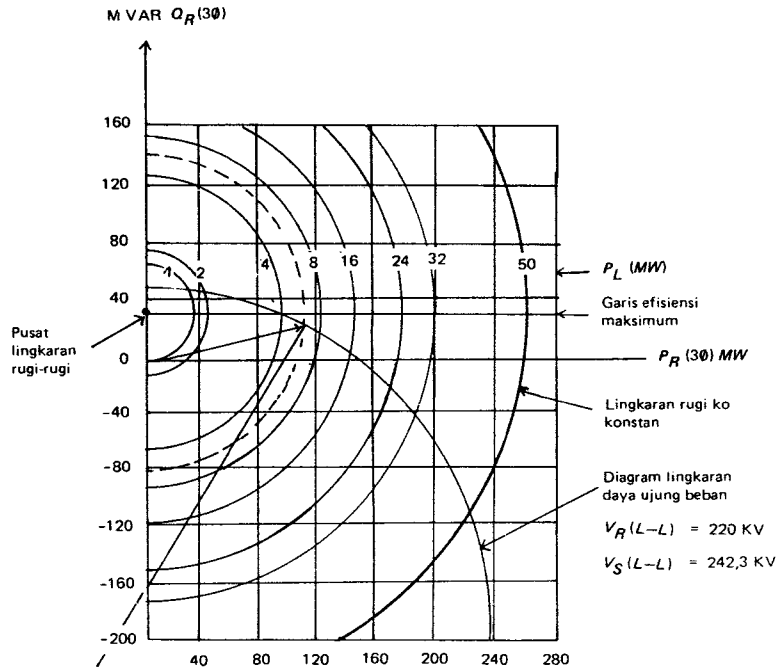
$$|S_S|^2 - |V_S|^2 \frac{(\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1)}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B}} S_S - |V_S|^2 \frac{(\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - 1)}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B}} \hat{S}_S + \frac{(\hat{C}\hat{D} + \hat{C}\hat{D}) |V_S|^4 - 2 P_L |V_S|^2}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B}} = 0 \quad (5-27)$$

Substitusikan  $2 P_L = (S_S - \hat{S}_S) (1 - \eta)$  dalam Persamaan (5-27), dan setelah diatur diperoleh harga-harga untuk pusat lingkaran dan radius lingkaran.

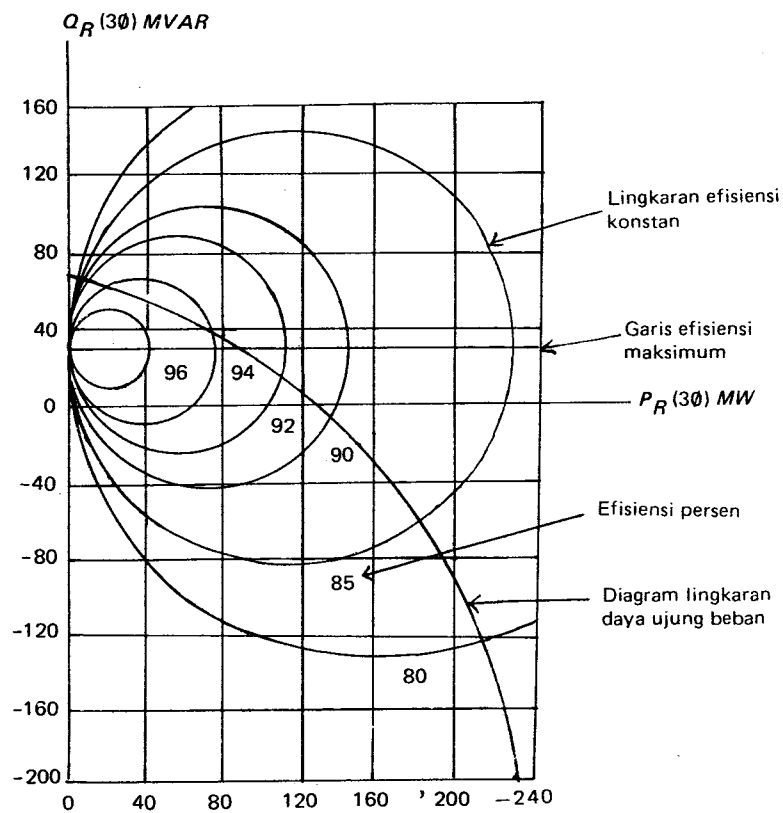
$$\begin{aligned} H_{S\eta} &= |V_S|^2 \frac{\hat{A}\hat{D} + \hat{B}\hat{C} - \eta}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B}} \\ &= |V_S|^2 \frac{\hat{C}(B + \hat{B}) + \hat{D}(A - \hat{A}) - (1 - \eta)}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B}} \end{aligned}$$

$$|R_{S\eta}| = \frac{|V_S|^2}{\hat{A}\hat{B} + \hat{A}\hat{B}} \sqrt{\eta [(A - \hat{A})(D - \hat{D}) - (B + \hat{B})(C + \hat{C})] + (1 - \eta)^2} \quad (5-28)$$

Dalam Gambar 5-5 diberikan diagram lingkaran efisiensi konstan.



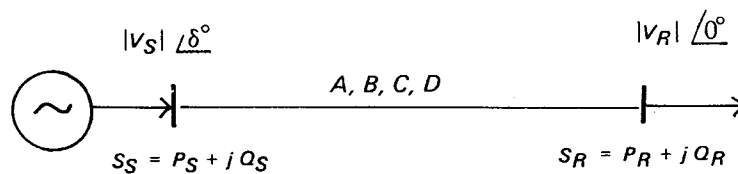
GAMBAR 5.4. Diagram lingkaran rugi-rugi konstan.<sup>1</sup>



GAMBAR 5-5. Diagram lingkaran efisiensi konstan.<sup>1</sup>

## 6. ALIRAN DAYA PADA SALURAN TRANSMISI<sup>4, 6, 10</sup>

Pandanglah saluran transmisi dengan konstanta umum  $ABCD$  di bawah ini, Gambar 5-6.



GAMBAR 5-6. Saluran transmisi dengan konstanta umum  $ABCD$

Daya pada ujung beban :

$$S_R = P_R + jQ_R = V_R \hat{I}_R$$

atau

$$S_R = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \angle \beta - \delta - \frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \angle \beta - \alpha \quad (5-10)$$

Bila  $V_S$  dan  $V_R$  tegangan jala-jala dalam KV maka *daya tiga fasa* adalah :

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{|V_S||V_R|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \cos(\beta - \delta) \text{ MW} \\ Q_R &= \frac{|V_S||V_R|}{|B|} \sin(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \sin(\beta - \delta) \text{ MVAR} \end{aligned} \quad (5-29)$$

Dari Persamaan (5-29) dapat dilihat bahwa daya maksimum dari  $P_R$  terjadi pada  $\delta = \beta$ . Jadi daya maksimum pada ujung beban,

$$P_{R(\max)} = \frac{|V_S||V_R|}{|B|} - \frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \cos(\beta - \alpha) \quad (5-30)$$

dan pada saat itu daya reaktif adalah,

$$Q_R = -\frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \sin(\beta - \alpha) \quad (5-30)$$

Jadi supaya diperoleh daya maksimum, maka beban harus dengan faktor daya negatif (leading power factor). Titik untuk  $P_{R(\max)}$  diberikan juga pada Gambar 5-2.

Pada representasi  $PI$  harga  $B = Z/\Theta$ , dan bila saluran itu pendek  $A = 1$  dan sudut  $\alpha = 0$ , maka :

$$\begin{aligned} P_{R(\max)} &= \frac{|V_S||V_R|}{|Z|} - \frac{|V_R|^2}{|Z|} \cos \Theta \\ &= \frac{|V_S||V_R|}{|Z|} - \frac{|V_R|^2}{|Z|^2} \times R \end{aligned}$$

Untuk saluran udara tegangan tinggi harga tahanan  $R$  biasanya kecil terhadap reaktansi  $X$ , jadi :

$$\Theta = \arctan \frac{X}{R} \approx 90^\circ$$

dan

$$\begin{aligned} P_R &= \frac{|V_S||V_R|}{X} \sin \delta \\ Q_R &= \frac{|V_S||V_R|}{X} \cos \delta - \frac{|V_R|^2}{X} \end{aligned} \quad (5-32)$$

Karena umumnya harga  $\delta$  kecil, maka :

$$\begin{aligned} \sin \delta &\approx \delta \\ \cos \delta &\approx 1 \end{aligned}$$

Jadi Persamaan (5-32) menjadi :

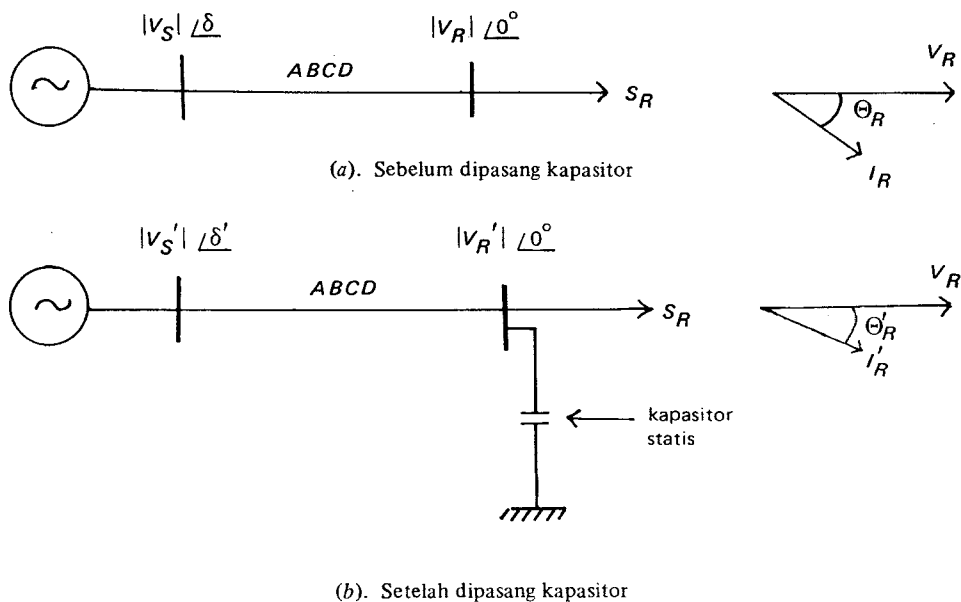
$$\begin{aligned} P_R &\approx \frac{|V_S| |V_R|}{X} \delta \\ Q_R &\approx \frac{|V_R|}{X} [|V_S| - |V_R|] \\ &\approx \frac{|V_R|}{X} \cdot \Delta V \end{aligned} \quad (5-33)$$

Dari Persamaan (5-33) dapat disimpulkan bahwa aliran daya aktif  $P_R$  sebanding dengan selisih sudut  $\delta$ , dan aliran daya reaktif  $Q_R$  sebanding dengan selisih tegangan  $\Delta V$ .

## 7. KOREKSI FAKTOR DAYA

Untuk memperbaiki faktor daya dari saluran maka untuk beban-beban yang mempunyai faktor daya yang jelek, misalnya di bawah 0,8, perlu dipasang kapasitor statis yang terhubung paralel dengan beban. Dengan pemasangan kapasitor tersebut, di samping memperbaiki faktor daya akan sekaligus memperbaiki pengaturan tegangan dan menaikkan penyaluran daya.

Pandanglah saluran transmisi, Gambar 5-7, dengan beban  $S_R$  dan sudut faktor daya terbelakang (lagging power factor)  $\Theta_R$ . Bila pada jepitan-jepitan beban dipasang kapasitor statis sehingga sudut faktor daya menjadi  $\Theta'_R$ , tentukanlah kapasitas dari kapasitor statis itu.



GAMBAR 5-7. Saluran transmisi dengan koreksi faktor daya.



atau besar kapasitor per fasa :

$$C = \frac{Q_{3 \text{ fasa}}}{w |V_{R(L-L)}|^2} \quad (5-40)$$

$$Q_{3 \text{ fasa}} = \text{MVAR.}$$

**Contoh 5-1.** Tentukanlah kapasitas dari kapasitor statis yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya dari 0,7 menjadi 0,9 dari suatu jala-jala 15 KV dengan beban 1,3 MW.

$$Q_{3 \text{ fasa}} = P_R (\tan \Theta_R - \tan \Theta'_R)$$

$$P_R = 1,3 \text{ MW}$$

$$\tan \Theta_R = 1,02$$

$$\tan \Theta'_R = 0,48$$

$$Q_{3 \text{ fasa}} = 1,3(1,02 - 0,48) = \underline{\underline{0,702 \text{ MVAR}}}$$

Harga kapasitansi dari kapasitor yang dipasang :

$$C = \frac{Q_{3 \text{ fasa}}}{w |V_R|^2_{L-L}} = \frac{0,702}{314 \times 15^2}$$

$$= \underline{\underline{10 \text{ mikro Farad per fasa}}}$$

Dalam contoh di atas kita tidak memperhatikan tegangan ujung kirim. Bila kita gunakan konstanta umum  $A$  dan  $B$ , dan tegangan ujung kirim. Misalkanlah tegangan jala-jala pada ujung beban dan pada ujung kirim tidak berubah. Misalkanlah daya beban  $P_R$  diketahui, maka :

$$P_R = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \cos(\beta - \alpha) \text{ MW} \quad (5-41)$$

Dari Persamaan (5-41) dapat dicari harga sudut  $\delta$ , dan selanjutnya harga  $Q_R$  dapat ditentukan dari Persamaan (5-29),

$$Q_R = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \sin(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \sin(\beta - \alpha) \text{ MVAR}$$

**Contoh 5-2.** Suatu saluran transmisi 275 KV dengan  $A = 0,85 \angle 5^\circ$  dan  $B = 200 \angle 75^\circ$  Ohm. (a). Tentukanlah besar daya  $P_R$  dalam MW dengan faktor daya  $pf = 1$  yang dapat diterima bila  $|V_S| = |V_R| = 275 \text{ KV}$ . (b). Tentukanlah kapasitas dalam MVAR dari kapasitor statis bila besar beban 150 MW dengan  $pf = 1,0$  supaya tegangan tetap 275 KV. (c). Dengan beban seperti pada (b) berapa besar tegangan  $V_R$  bila kapasitor statis tidak dipasang.

Jawab :

$$(a). |V_S| = |V_R| = 275 \text{ KV}$$

$$\alpha = 5^\circ$$

$$\beta = 75^\circ$$

Karena  $pf = 1,0$  maka daya reaktif  $Q_R = 0$ , jadi

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{275 \times 275}{200} \sin(75^\circ - \delta) - \frac{0,85}{200} \times 275^2 \sin(75^\circ - 5^\circ) \\ &= 378 \sin(75^\circ - \delta) - 302. \end{aligned}$$

$$\sin(75^\circ - \delta) = \frac{302}{378} = 0,7989 \quad \text{--- one sin } 0,7989 = 53^\circ$$

$$\delta = \underline{\underline{22^\circ}}$$

$$\begin{aligned} P_R &= 378,12 \cos(75^\circ - 22^\circ) - 321,4 \cos 70^\circ \\ &= 227,56 - 109,93 \end{aligned}$$

$$P_R = \underline{\underline{117,63 \text{ MW}}}$$

(b). Sekarang  $P_R = 150 \text{ MW}$  pada  $pf = 1,0$

$$|V_S| = |V_R| = 275 \text{ KV}$$

$$150 = \frac{275 \times 275}{200} \cos(75^\circ - \delta) - \frac{0,85}{200} \times 275^2 \cos 70^\circ$$

$$150 = 378,12 \cos(75^\circ - \delta) - 109,93$$

$$\cos(75^\circ - \delta) = 0,6874$$

$$\delta = 28,43^\circ$$

$$Q_R = \frac{275 \times 275}{200} \sin(75^\circ - 28,43^\circ) - \frac{0,85}{200} \times 275^2 \sin 70^\circ$$

$$= 275 - 302$$

$$Q_R = -27 \text{ MVAR}; \quad Q_{\text{Beban}} = 0 \quad (pf = 1,0)$$

$$\text{Jadi kapasitas kapasitor statis} = Q_R - Q_{\text{Beban}} = \underline{\underline{-27 \text{ MVAR}}}$$

(c). Bila tidak ada kapasitor statis,

$$P_R = 150 \text{ MW}$$

$$Q_R = 0$$

$$|V_S| = 275 \text{ KV}$$

Jadi

$$150 = \frac{275 |V_R|}{200} \cos(75^\circ - \delta) - \frac{0,85}{200} |V_R|^2 \cos 70^\circ \quad (i)$$

$$0 = \frac{275 |V_R|}{200} \sin(75^\circ - \delta) - \frac{0,85}{200} |V_R|^2 \sin 70^\circ \quad (ii)$$



Dari (ii),

$$\sin (75^{\circ} - \delta) = 0,0029 |V_R|$$

Jadi

$$\cos (75^{\circ} - \delta) = \sqrt{1 - 0,0029^2 |V_R|^2}$$

Substitusi dalam (i) diperoleh :

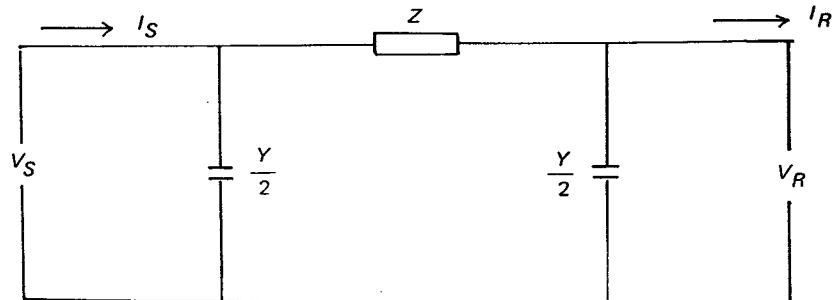
$$\begin{aligned} 150 &= 1,375 |V_R| \sqrt{1 - 0,0029^2 |V_R|^2} - 0,00145 |V_R|^2 \\ |V_R| &= \underline{\underline{244,9 \text{ KV}}} \end{aligned}$$

Dari contoh di atas dapat dilihat bahwa daya yang lebih besar akan dapat ditransmisikan pada tegangan tertentu bila dilengkapi dengan kapasitor statis pada ujung beban yang dapat memberi MVAR pada saluran.

**Contoh 5-3.** Suatu saluran transmisi fasa tiga, 150 KV, 110 km, 50 Hz, dengan  $Z = 0,2 + j 0,7$  ohm per km,  $Y = j 4,0 \times 10^{-6}$  mho per km. Saluran transmisi itu dianggap sebagai saluran menengah, dan penyelesaian dilakukan berdasarkan representasi nominal  $\pi$ .

**Pertanyaan.** 1. Bila tegangan ujung beban 150 KV ( $L - L$ ) dan beban 60 MW dengan faktor daya 0,90 terbelakang tentukanlah: (a) Tegangan dan arus ujung kirim, (b) Faktor daya dan daya ujung kirim, (c) Rugi-rugi transmisi, efisiensi dan pengaturan tegangan, (d) Konstanta umum  $ABCD$ . 2. Untuk saluran transmisi di atas dan kondisi pembebanan seperti pada pertanyaan 1, tentukanlah besar kapasitas dari kapasitor statis yang dipasang di ujung beban agar faktor daya menjadi 1,0 pada tegangan 150 KV. Dalam keadaan ini tentukanlah tegangan ujung kirim, dan juga pengaturan tegangan, rugi-rugi transmisi, dan efisiensi.

**Jawab.** Seluruh transmisi, tunggal, 150 KV, 110 km, 50 Hz:  $Z = 0,2 + j 0,7$  ohm/km,  $Y = j 4,0 \times 10^{-6}$  mho/km.



$$\begin{aligned} 1. \quad V_S &= A V_R + B I_R \\ I_S &= C V_R + D I_R \\ A &= D = 1 + \frac{ZY}{2} \\ C &= Y + \frac{ZY^2}{4} \end{aligned}$$

$$B = Z$$

$$Z = 110(0,2 + j0,7) \text{ ohm} \\ = 22 + j77 \text{ ohm}$$

$$Y = 110 \times j4 \times 10^{-6} \text{ mho} \\ = j4,4 \times 10^{-4} \text{ mho}$$

$$A = 1 + \frac{ZY}{2} = 1 + \frac{(22 + j77)j4,4 \times 10^{-4}}{2} \\ = 1 - 169,4 \times 10^{-4} + j48,4 \times 10^{-4} \\ = 1 - 0,0169 + j0,0048 \\ = 0,983 + j0,0048 \\ = 0,983 \angle 0,3^\circ$$

$$B = 22 + j77 \text{ ohm} = 80 \angle 74,1^\circ \text{ ohm}$$

$$C = Y(1 + \frac{ZY}{4}) \\ = Y(1 - 0,0085 + j0,0024) \\ = j4,4 \times 10^{-4}(0,9915 + j0,0024) = 0,436 \angle -89,86^\circ \text{ mho}$$

$$(a). V_S = (0,983 + j0,0048) \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{3}} + (22 + j77)I_R$$

$$I_R = \frac{60 \times 10^6 \angle -25,8^\circ}{\sqrt{3} \times 150 \times 10^3 \times 0,9} = 256,6 \angle -25,8^\circ \text{ A}$$

$$I_R = 256,6(0,9 - j0,436) = 230,9 - j111,9 \text{ A}$$

$$V_S = 0,983 \times \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{3}} + 80 \angle 74,1^\circ \times 256,6 \angle -25,8^\circ \text{ Volt} \\ = 85 \times 10^3 + 20,5 \times 10^3 \angle 48,3^\circ \text{ Volt} \\ = 85 + 20,5(0,665 + j0,746) \text{ KV}$$

$$V_S = 85,0 + 14,6 + j15,3 \\ = 99,6 + j15,3 \\ = 100,5 \angle 8,75^\circ \text{ KV (L-N)} = 174,1 \angle 8,75^\circ \text{ KV (L-L)}$$

$$I_S = Y(1 + \frac{ZY}{4})V_R + (1 + \frac{ZY}{4})I_R$$

$$I_S = j4,4 \times 10^{-4}(0,9915)V_R + 0,983 \angle 0,3^\circ \times 256 \angle -25,8^\circ \\ = 228 - j120 + j32,8 \\ = 228 - j87,2 \text{ Amp.}$$

$$I_S = \underline{\underline{244 \angle -20,95^\circ \text{ Amp.}}}$$

$$(b). \Theta_S = 8,75^\circ + 20,95^\circ$$

$$\Theta_S = 29,70^\circ$$

$$pf_S = \underline{\underline{0,869}}$$

$$P_S = 3 \times 100,5 \times 244 \times 0,869 \text{ KW} = 63.928,8 \text{ KW} \\ = \underline{\underline{63,93 \text{ MW}}}$$

$$(c). P_L = 3,93 \text{ MW}$$

$$E_{ff} = \frac{60}{63,93} = \underline{\underline{93,85\%}}$$

$$VR(\%) = \frac{|V_R(NL)| - |V_R(FL)|}{|V_R(FL)|} \times 100\%$$

$$|V_R(NL)| = \frac{|V_S|}{|A|}$$

$$|V_R(NL)| = \frac{100,5}{0,983} = 102$$

$$\% V_R = \frac{102 - 86,7}{86,7} = \frac{15,3}{86,7} = \underline{\underline{17,6\%}}$$

$$(d) A = 0,983 \angle 0,3^\circ$$

$$B = 80 \angle 74,1^\circ \text{ ohm}$$

$$C = j 4,36 \times 10^{-4} \text{ mho}$$

$$D = \underline{\underline{A}}$$

$$2. V_R = 150 \text{ KV } (L - L) = 86,7 \text{ KV } (L - N)$$

$$S_R = 60 \text{ MW} - j 29 \text{ MVAR}$$

$$Q_C = 29 \text{ MVAR} = \sqrt{3} \times 150 \times I_C$$

$$I_C = \frac{29 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 150}$$

$$I_C = 111,6 \text{ A}$$

$$Y = \frac{I_C}{V_R} = \frac{111,6}{86700} = 1,29 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$Y = \omega C$$

$$C = \frac{Y}{\omega} = \frac{1,29 \times 10^{-3}}{314} = 4,11 \text{ uF}$$

$$\begin{aligned} V_S &= A V_R + B I_R \\ &= 0,983 \times 86,7 + \frac{80 \angle 74,1^\circ \times 230,4 \angle 0^\circ}{1000} \\ &= 90,07 + j 17,7 \\ &= 91,9 \angle 11,1^\circ \text{ KV } (L - N) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_S &= C V_R + D I_R \\ &= j 32,8 + 230,4 \angle 0^\circ \times 0,983 \\ &= 226 + j 32,8 \\ &= 229,5 \angle 8,25^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_S &= 3 \times 91,9 \times 229,5 \cos(11,1 - 8,25) = 63,195 \text{ KW} \\ &= \underline{\underline{63,195 \text{ MW}}} \end{aligned}$$

$$Eff = \frac{60}{63,195} = \underline{\underline{94,44\%}}$$

Pengaturan tegangan :

$$|V_{R(NL)}| = \frac{|V_S|}{|A|} = \frac{91,9}{0,983} = 93,5 \text{ KV}$$

$$\begin{aligned} V_R (\%) &= \frac{93,5 - 86,7}{86,7} \times 100\% \\ &= \underline{\underline{7,84\%}} \end{aligned}$$

### SOAL-SOAL

**Soal 5-1.** Konstanta umum suatu saluran adalah:  $A = D = 0,919 + j 0,0124$ ;  $B = 22,5 + j 150,0$ ;  $C = -0,000.004 + j 0,001.039$ . Bila tegangan ujung kirim 230 KV ( $L - L$ ) dan tegangan ujung terima 220 KV ( $L - L$ ), tentukanlah radius dan pusat lingkaran daya ujung terima. Lukiskanlah lingkaran itu.

**Soal 5-2.** (a) Untuk Soal 5-1, tentukanlah garis untuk  $\delta = 0$ . (b) Tentukanlah radius dan pusat lingkaran daya ujung kirim, dan lukiskanlah lingkaran itu.

**Soal 5-3.** Untuk saluran dan kondisi pada Soal 5-1, kecuali tegangan jala-jala  $|V_S|$  tidak tetap, turunkan dan lukiskanlah lingkaran-lingkaran rugi-rugi tiga fasa pada diagram daya ujung terima untuk rugi-rugi: 1, 2, 4, 6, 12, 18 dan 24 MW.

**Soal 5-4.** Untuk saluran dan kondisi pada Soal 5-1, kecuali  $|V_S|$  jala-jala tidak tetap, turunkan dan lukiskanlah lingkaran-lingkaran efisiensi pada diagram daya tiga fasa ujung terima, untuk efisiensi: 80, 85, 90, 92, 94 dan 96 prosen.

**Soal 5-5.** Pada suatu saluran transmisi diketahui:  $Z = 5 + j 20 \text{ ohm}$ ;  $P_R = 30 \text{ MW}$  pada  $pf = 0,85$  terbelakang;  $|V_R| = 33 \text{ KV}$ . (a) Tentukanlah tegangan pada ujung kirim (b) Tentukanlah kapasitansi dan kapasitor statis yang dipasang pada jepitan-jepitan beban, terhubung bintang, agar faktor daya menjadi 1. (c) Tentukanlah  $MVAR$  dari kapasitor statis yang dipasang pada jepitan-jepitan beban agar  $|V_S| = |V_R| = 33 \text{ KV}$ . (d) Tentukanlah daya maksimum yang dapat disalurkan.

# KAPASITAS HANTAR ARUS (CURRENT CARRYING CAPACITY) DAN KORONA

## 1. KAPASITAS PENYALURAN KAWAT

Penaikan temperatur suatu kawat sangat penting artinya, karena penaikan temperatur yang berlebihan akan mempengaruhi andongan (sag) dan juga kekuatan tarik dari kawat tersebut. Jadi supaya penaikan temperatur jangan melebihi harga yang diijinkan (biasanya  $50^{\circ}\text{C}$ ) maka arus yang disalurkan oleh kawat itu dibatasi besarnya, dan ini dinamakan kapasitas *hantar arus* atau "current carrying capacity".

Salah satu rumus yang dapat dipakai untuk menghitung kapasitas hantar arus ialah rumus empiris dari SCHURIG dan FRICK.

Panas yang timbul,  $I^2 R$  = panas disipasi melalui konveksi di udara sekitar dan melalui radiasi pada obyek-obyek sekitar, atau dengan singkat dituliskan sebagai :

$$I^2 R = (W_c + W_r) A \text{ watt} \quad (6-1)$$

Dalam Rumus (6-1) :

- $I$  = arus kawat, Amper.
- $R$  = tahanan kawat, ohm per foot.
- $W_c$  = panas disipasi melalui konveksi, watt/inch<sup>2</sup>.
- $W_r$  = panas disipasi melalui radiasi, watt/inch<sup>2</sup>.
- $A$  = luas permukaan kawat, inch<sup>2</sup> per foot panjang kawat.

$$W_c = \frac{0,0128 \sqrt{pv}}{T_a^{0,123} \sqrt{d}} \Delta t \text{ watt/inch}^2 \quad (6-2)$$

di mana :

- $p$  = tekanan barometer, atmosfir.  
 $v$  = kecepatan udara/angin, foot per detik.  
 $T_a$  = temperatur absolut rata-rat dari kawat dan udara,  $K^\circ$ .  
 $d$  = diameter kawat, inch.  
 $\Delta t$  = kenaikan temperatur,  $C^\circ$ .

Bila  $p = 1$ ,  $v = 2$  ft./detik, dan  $T_a = (273 + 40)$ , maka :

$$W_c = \frac{0,009}{\sqrt{d}} \Delta t \quad (6-3)$$

Rumus (6-3) adalah pendekatan bila diameter kawat 0,3 – 5 inch dan kecepatan udara 0,2 – 5 ft./detik.

Panas disipasi karena radiasi :

$$W_r = 36,8 E [(T/1000)^4 - (T_o/1000)^4] \text{ watt/inch}^2 \quad (6-4)$$

di mana :

- $E$  = emisivitas relatif dari permukaan kawat (= 0,5 untuk Cu).  
 $T$  = temperatur absolut dari kawat,  $K^\circ$ .  
 $T_o$  = temperatur absolut dari udara sekitar,  $K^\circ$ .

Sebagai harga pendekatan :

$$W_r = 0,147 (T_o/1000)^3 \Delta t \quad (6-5)$$

dengan  $T - T_o = \Delta t = 40^\circ - 50^\circ C$ .

Dari (6-1), (6-3) dan (6-5) diperoleh harga pendekatan untuk kapasitas hantar arus :

$$I = \sqrt{\frac{A \Delta t}{R} (0,0025 + \frac{0,009}{\sqrt{d}})} \text{ amper} \quad (6-6)$$

Rumus lain yang dapat digunakan untuk menghitung kapasitas hantar kawat diberikan di bawah ini.<sup>12</sup>

$$I = \sqrt{\frac{\{H_w + (H_r + \frac{W_s}{\pi \phi})\eta\} \pi \cdot D \phi}{R}} \quad (6-7)$$

di mana :

$$H_w = \frac{0,00572}{(2(273 + T + \phi/2)^{0,123})} \sqrt{\frac{v}{D}} \quad (6-8)$$

$$H_r = 0,000576 \frac{\left(\frac{273 + T + \phi}{100}\right)^4 - \left(\frac{273 + T}{100}\right)^4}{\phi} \quad (6-9)$$

$$R = R_{20} \{1 + \alpha(t - 20^\circ)\}$$

$$\phi = t - T(^{\circ}\text{C})$$

$$I = \text{Rating termis konduktor (Amper).}$$

$$H_w = \text{Koefisien disipasi panas konveksi (W/^{\circ}\text{C-cm}^2).$$

$$H_r = \text{Koefisien disipasi panas radiasi (W/^{\circ}\text{C-cm}^2).$$

$$R = \text{Tahanan konduktor pada temperatur } t \text{ (Ohm/cm).}$$

$$R_{20} = \text{Tahanan konduktor pada } 20^{\circ}\text{C (Ohm/cm).}$$

$$\phi = \text{Kenaikan temperatur konduktor (^{\circ}\text{C}).}$$

$$T = \text{Temperatur sekeliling (^{\circ}\text{C}).}$$

$$W_s = \text{Energi radiasi matahari (W/cm}^2\text{), diasumsi 0,1.}$$

$$\eta = \text{Koefisien permukaan, diasumsi 0,9.}$$

$$D = \text{Diameter total konduktor (cm).}$$

$$v = \text{Kecepatan angin (m/detik).}$$

$$\alpha = \text{Koefisien temperatur tahanan (1/^{\circ}\text{C}).}$$

$$t = \text{Temperatur konduktor (^{\circ}\text{C}).}$$

## 2. KORONA (CORONA)

Bila tegangan arus bolak-balik pada suatu kawat dinaikkan terus-menerus, maka akan dicapai suatu harga yang dikenal sebagai tegangan kritis visual  $V_v$ , pada tegangan mana kelihatan cahayaviolet yang disebut korona. Korona ini dibarengi dengan suara berdesis dan menimbulkan bau ozon.

Pada tegangan  $V_o$ , sedikit di bawah tegangan  $V_v$ , tambahan rugi-rugi daya mulai terjadi dalam saluran. Rugi-rugi ini disebut rugi-rugi korona dan besarnya adalah ;

$$P_{kor} = K(V - V_o)^2 \quad (6-10)$$

di mana :

$$V_o = \text{tegangan kritis di mana korona mulai terjadi, KV.}$$

Rugi-rugi korona ini bertambah dengan cepat oleh kabut dan hujan.

Pada saluran transmisi *EHV*, masalah korona sudah harus diperhitungkan, sebab pada tegangan di atas 100 kv gejala korona sudah mulai serius. Untuk tegangan tembus udara 30 kv/cm, harga tegangan kritis di mana korona mulai terjadi dinyatakan dengan :

$$V_o = \frac{30}{\sqrt{2}} \delta^{\frac{2}{3}} \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta r}}\right) r \log\left(\frac{D}{r} \frac{1}{0,4343}\right) \text{ kv.} \quad (6-11)$$

dan rugi-rugi korona dapat dinyatakan (menurut Peek) :

$$P = \frac{1,286}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{D}{r}} r^2 \left( \log \frac{D}{r} \right)^2 (V_g - m \delta V'_{go}) 10^{-2} \quad (6-12)$$

(kW/km -- 1 kawat).

di mana :

$$\delta = \text{kepadatan udara relatif} = \frac{0,386b}{273 + t}$$

$b$  = tekanan udara (mmHg).

$t$  = suhu udara ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$r$  = jari-jari kawat (cm).

$D$  = jarak.

$V'_{go} = 21,1 \text{ kv/cm}$ .

$m = m_0 m_1$  ( $m_0$  faktor permukaan kawat = 1,0 untuk kawat halus, dan  $m_1$  faktor udara = 1,0 untuk udara baik dan 0,8 untuk hujan).

$$V_g = \text{gradien tegangan pada permukaan kawat untuk saluran transmisi 3 fasa}$$

$$= \frac{0,4343 \text{ V}}{r \log \frac{D}{r}} \text{ kV (V tegangan fasa dalam kV)}.$$

$f$  = frekuensi sistem.

Dari Persamaan (6-11) terlihat bahwa dengan memperbesar jari-jari konduktor, tegangan kritis akan lebih besar. Tetapi, dari Persamaan (6-12) rugi-rugi korona juga makin besar. Mengingat bahayanya bila terjadi korona lebih besar dibandingkan rugi-rugi daya (korona), maka pertimbangannya adalah tegangan kritisnya. Bahkan dengan memperbesar jari-jari konduktor, besarnya berisik korona (berbanding langsung dengan  $V_g$ ) yang dapat mengganggu komunikasi radio, juga akan berkurang.

Seperti telah dibahas pada Bab 11, memperbesar jari-jari konduktor ini dapat dibuat dengan menggunakan kawat berkas.



## KOMPENSASI PADA SALURAN TRANSMISI

### 1. PENDAHULUAN

Dalam Bab III telah disebut bahwa saluran transmisi jarak jauh dengan tegangan ekstra tinggi atau tegangan ultra tinggi membutuhkan peralatan kompensasi. Hal ini terutama dimaksudkan untuk mengontrol tegangan kerja di setiap titik sepanjang saluran, memperkecil panjang elektrik  $\Theta$  dari saluran jadi menaikkan batas stabilitas statis saluran dan untuk menaikkan kapasitas penyaluran.

Alat-alat kompensasi pada saluran-saluran transmisi adalah reaktor shunt, kapasitor seri atau kombinasi dari keduanya, Gambar 7-1. Kompensasi dengan reaktor shunt biasanya digunakan pada saluran transmisi jarak menengah dan kompensasi dengan kapasitor seri atau kombinasi reaktor shunt dan kapasitor seri digunakan pada saluran yang lebih panjang.

Pada kompensasi dengan kapasitor seri, bila yang dipentingkan hanya keadaan saluran pada ujung-ujungnya, saluran transmisi dan kapasitor seri itu cukup direpresentasikan dengan sirkuit nominal  $PI$  tanpa menimbulkan kesalahan yang berarti. Dalam hal ini penempatan fisik dari kapasitor seri sepanjang saluran tidak termasuk dalam perhitungan. Tetapi bila kondisi kerja sepanjang saluran perlu diperhatikan, letak fisik kapasitor harus diperhatikan. Hal ini dapat diperoleh dengan menentukan konstanta umum  $ABCD$  dari bagian saluran di masing-masing sisi dari kapasitor dan merepresentasikan kapasitor itu dengan konstanta  $ABCD$ -nya.

Pada kompensasi reaktor shunt, saluran transmisi dan reaktor shunt terhubung seri, demikian juga pada kompensasi kapasitor seri saluran transmisi dan kapasitor seri terhubung seri.

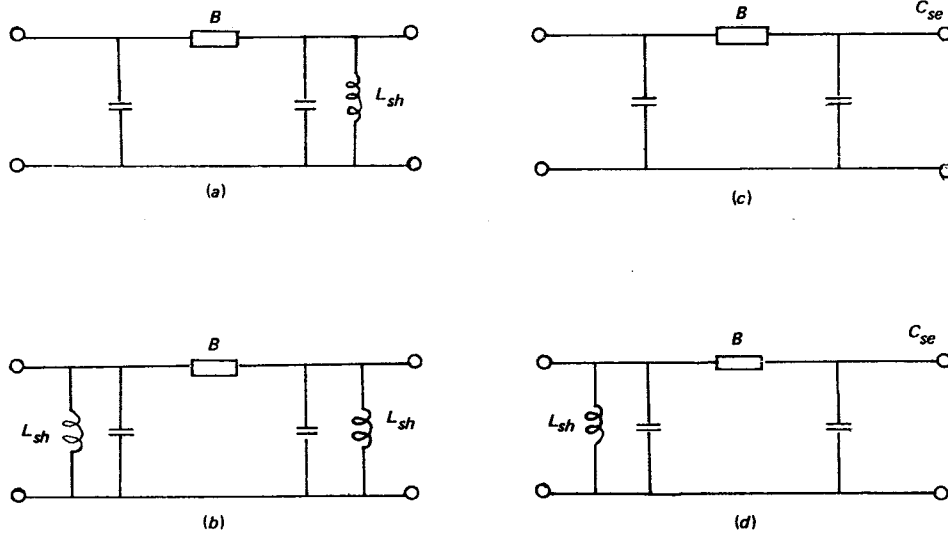
Menurut Persamaan (4-10), dua atau lebih kutub empat terhubung seri, konstanta umum dari gabungan seri itu adalah:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \quad (7-1)$$

Dengan contoh-contoh di bawah ini akan terlihat jelas bagaimana pengaruh-pengaruh dari reaktor shunt atau kapasitor seri terhadap pengaturan tegangan, kapasitas penyaluran dan panjang elektrik saluran.

Derajat kompensasi pada kompensasi dengan reaktor shunt adalah  $B_L/B_C$ , di mana  $B_L$  adalah suseptansi induktif dari reaktor shunt, dan  $B_C$  adalah suseptansi kapasitif total dari saluran.

Derajat kompensasi pada kompensasi dengan kapasitor seri adalah  $X_C/X_L$ , di mana  $X_C$  adalah reaktansi kapasitif dari kapasitor seri dan  $X_L$  adalah reaktansi induktif total dari saluran per fasa.



GAMBAR 17-1. Saluran transmisi yang dikompensasi. (a) Kompensasi reaktor shunt pada ujung beban; (b) kompensasi reaktor shunt pada kedua ujung; (c) kompensasi kapasitor seri pada ujung beban; (d) kombinasi kompensasi reaktor shunt dan kapasitor seri.

## 2. KOMPONEN REAKTOR SHUNT

Kompensasi reaktor shunt dilakukan dengan memasang reaktor shunt pada salah satu ujung atau pada kedua ujung saluran. Bila saluran itu panjang sekali, maka saluran dibagi dalam beberapa bagian dan setiap bagian dikompensasi.

Sebagaimana disebut dalam pasal 1 di atas tujuan dari kompensasi adalah untuk mengontrol tegangan kerja di setiap titik sepanjang saluran dan untuk memperkecil panjang elektrik saluran.

Pengaruh kompensasi shunt terhadap tegangan dan daya diberikan dalam contoh di bawah ini.

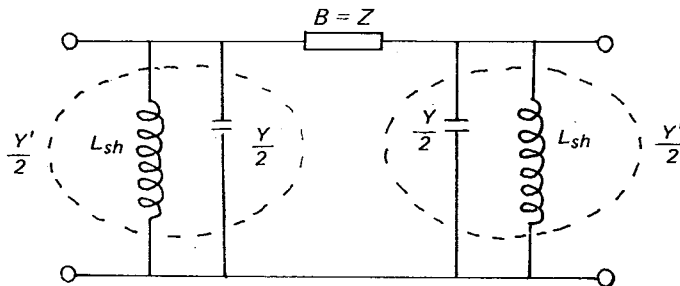
**Contoh 7-1.** Suatu saluran transmisi tunggal, fasa tiga, 50 Hertz, 500 KV, 250 km dengan konstanta sebagai berikut:  $Z = j 0,65 \text{ Ohm/km}$ ;  $Y = j 5,1 \times 10^{-6} \text{ mho/km}$ ; dan tahanan diabaikan. Untuk mengurangi panjang elektrik dan memperbaiki pengaturan tegangan dari saluran maka dipasang reaktor shunt yang sama besarnya pada kedua ujung saluran. Misalkanlah,  $|V_S| = |V_R| = 500 \text{ KV}$ . (a) Tentukanlah panjang elektrik saluran sebelum pemasangan reaktor shunt; (b) tentukanlah induktansi dari reaktor shunt dalam Henry agar panjang elektrik saluran berkurang menjadi  $20^\circ$ ; (c) tentukanlah daya natural sebelum dan setelah pemasangan reaktor shunt; (d) bila  $V_R = 500 \text{ KV}$ , dan beban  $P_R = 200 \text{ MW}$  pada faktor daya 0,9 terbelakang, tentukanlah pengaturan tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kompensasi reaktor shunt tersebut.

*Jawab.*

(a). Panjang elektrik saluran  $\Theta = \beta l$

$$\begin{aligned}\beta &= \sqrt{0,65 \times 5,1 \times 10^{-6}} \text{ radian per km} \\ &= 1,8207 \times 10^{-3} \text{ radian per km.} \\ \Theta &= \beta l = 1,8207 \times 10^{-3} \times 250 = 0,4552 \text{ radian.} \\ \Theta' &= 0,4552 \times 57,3^\circ = 26,1^\circ.\end{aligned}$$

(b).



Kita misalkan bahwa saluran itu direpresentasikan dengan sirkuit nominal  $\pi$ . Setelah pemasangan reaktor shunt, maka konstanta umum ekivalen  $A$  dan  $B$  dari ketiga sirkuit terhubung seri:

$$A = 1 + \frac{Y}{2} - \frac{j}{\omega L_{sh}} \quad \text{dan} \quad B = Z$$

Misalkanlah bahwa kombinasi saluran dan reaktor shunt itu merupakan saluran baru dengan admitansi shunt yang baru:

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} + \frac{1}{j \omega L_{sh}}$$

$$= \frac{Y}{2} - \frac{j}{X_{sh}}$$

dan  $B$  tidak mengalami perubahan. Bila,

$$\begin{aligned}\Theta &= \text{panjang elektrik sebelum pemasangan reaktor shunt} = 26,1^\circ \\ \Theta' &= \text{panjang elektrik setelah pemasangan reaktor shunt} = 20^\circ\end{aligned}$$

maka,

$$\frac{\Theta'}{\Theta} = \frac{\beta' l}{\beta l} = \frac{\sqrt{Z \times Y'}}{\sqrt{Z \times Y}} = \frac{20}{26,1} = 0,7663$$

$$\text{Jadi } Y' = (0,7663)^2 \times Y; \quad Y = j 5,1 \times 10^{-6} \times 250 = j 1,275 \times 10^{-3} \text{ mho.}$$

$$Y' = j 0,000749$$

$$\text{dan } \frac{Y'}{2} = j 0,0003745 \text{ mho}$$

Maka,

$$\frac{Y}{2} - \frac{j}{X_{sh}} = j 0,3745 \times 10^{-3}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{X_{sh}} &= 0,6375 \times 10^{-3} - 0,3745 \times 10^{-3} \\ &= 0,263 \times 10^{-3} \text{ mho}\end{aligned}$$

$$X_{sh} = 3,802 \times 10^3 \text{ ohm}$$

$$\text{Jadi, } L_{sh} = \frac{3,802 \times 10^3}{314} = \underline{\underline{12,11 \text{ Henry/fasa.}}}$$

(c). Daya natural sebelum dan setelah pemasangan reaktor shunt. Misalkanlah,

$P_o, Z_o$  = daya natural dan impedansi surja sebelum pemasangan reaktor shunt.

$P'_o, Z'_o$  = daya natural dan impedansi surja setelah pemasangan reaktor shunt.

Untuk panjang 250 km:  $Z = j 162,5 \text{ ohm}$ ,  $Y = j 1,275 \times 10^{-3} \text{ mho}$ .

$$Z_o = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{162,5}{1,275 \times 10^{-3}}} = 357 \text{ ohm.}$$

$$Z'_o = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{162,5}{0,749 \times 10^{-3}}} = 466 \text{ ohm.}$$

Maka :

$$P_o = \frac{500 \times 500}{357} = 700 \text{ MW}$$

$$P'_o = \frac{500 \times 500}{466} = 536 \text{ MW}$$

Jadi dengan pemasangan reaktor shunt tersebut daya natural berkurang dari 700 MW menjadi 536 MW. Ini berarti bahwa kemampuan menyalurkan daya setelah kompensasi dengan reaktor shunt tersebut berkurang.

$$(d). V_R = 500 \text{ KV (L-L) atau } 288,68 \text{ KV (L-N)}$$

$$P_R = 200 \text{ MW; faktor daya } = 0,90 \text{ terbelakang}$$

maka

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{200 \times 1000}{\sqrt{3} \times 500 \times 0,9} \angle -25,84^\circ \text{ Amp} \\ &= 256,6 \angle -25,84^\circ \text{ Amp.} \end{aligned}$$

$$V_S = A V_R + B I_R.$$

(i). Sebelum kompensasi :

$$A = 1 + \frac{Z Y}{2}$$

$$Z = j 162,5 \text{ ohm}$$

$$Y = j 1,275 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$A = 1 + \frac{j 162,5 \times j 1,275 \times 10^{-3}}{2} = 0,8964$$

$$B = Z$$

$$B = j 162,5 \text{ ohm}$$

$$\begin{aligned} V_S &= 0,8964 \times 288,68 + 162,5 \angle 90^\circ \times 256,6 \angle -25,84^\circ \times 10^{-3} \\ &= 258,8 + 41,7 \angle 64,16^\circ \\ &= 277 + j 37,5 \text{ KV (L-N)} \end{aligned}$$

$$|V_S| = 279,5 \text{ KV (L-N)} = 484,1 \text{ KV (L-L)}$$

$$\frac{|V_S|}{|A|} = \frac{484,1}{0,8964} = 540 \text{ KV (L-L)}$$

$$VR(\%) = \frac{540 - 500}{500} \times 100\% = \underline{\underline{8\%}}$$

(ii). Setelah kompensasi :

$$Z = j 162,5 \text{ ohm}$$

$$Y' = j 0,749 \times 10^{-3} \text{ mho}$$

$$A = 1 + \frac{Z Y'}{2} = 0,9391$$

$$V_S = A V_R + B I_R$$

$$\begin{aligned} V_S &= 0,9391 \times 288,68 + 41,7 \angle 64,16^\circ \\ &= 271,1 + 18,2 + j 37,5 = 289,3 + j 37,5 \text{ KV (L-N)} \end{aligned}$$

$$|V_S| = 291,7 \text{ KV (L-N) atau } 505 \text{ KV (L-L)}$$

$$\frac{|V_S|}{|A|} = \frac{505}{0,9391} = 538 \text{ KV (L-L)}$$

$$V_R (\%) = \frac{538 - 500}{500} \times 100\% = \underline{\underline{7,6\%}}$$

Jadi dari hasil-hasil di atas dapat dilihat bahwa dengan kompensasi shunt tersebut pengaturan tegangan diperbaiki dari 8% menjadi 7,6%. Tetapi bila reaktor shunt dipasang hanya selama keadaan tanpa beban, maka

$$\begin{aligned} V_R (\%) &= \frac{\frac{484,1}{0,9391} - 500}{500} \times 100\% \\ &= \underline{\underline{3,1\%}} \end{aligned}$$

**Contoh 7-2.** Suatu saluran transmisi fasa tiga, 370 km. Beban saluran 125 MW pada 215 KV dan faktor daya = 1,0. Konstanta saluran:  $Z = 0,524 \angle 79,04^\circ$  ohm/km;  $Y = 3,173 \times 10^{-6} \angle 90^\circ$  mho/km. Saluran tersebut dikompensasi dengan reaktor shunt pada ujung beban dengan derajat kompensasi 70%.

Tentukanlah. (a) Pengaturan tegangan sebelum kompensasi; (b) pengaturan tegangan setelah kompensasi.

Jawab.

$$\begin{aligned} (a) \quad \gamma_l &= \sqrt{ZYl} = \sqrt{0,524 \angle 79,04^\circ \times 3,173 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \times 370} \\ &= 0,4772 \angle 84,52^\circ \\ &= 0,0456 + j 0,4750 \end{aligned}$$

*cos 0,0456 = 0,9950  
+ j sin 0,0456 = 0,475*

$$\begin{aligned} Z_k &= \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{0,524 \angle 79,04^\circ}{3,173 \times 10^{-6} \angle 90^\circ}} \\ &= 406,4 \angle -5,48^\circ \text{ ohm} \end{aligned}$$

*= 1,001 - 0,00999  
+ j 0,0456 - 0,0008*

Konstanta umum saluran diberi notasi  $A_1, B_1, C_1, D_1$ .

$$\begin{aligned} A_1 &= D_1 = \cosh \gamma_l = 0,8904 \angle 1,34^\circ \\ B_1 &= Z' = Z_k \sinh \gamma_l = 186,78 \angle 79,46^\circ \text{ ohm} \\ C_1 &= \frac{1}{Z_k} \sinh \gamma_l = 0,00113 \angle 90,42^\circ \text{ mho} \end{aligned}$$

*= 1 + j 0,000369*

$$V_R = 215 \text{ KV (L-L)} = 124,13 \text{ KV (L-N)}$$

$$I_R = \frac{125 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 215} = 335,68 \angle 0^\circ \text{ Amp.}$$

$$\begin{aligned} V_S &= A_1 V_R + B_1 I_R \\ &= 0,8904 \angle 1,34^\circ \times 124,13 + \frac{186,78 \angle 79,46^\circ \times 335,68}{1000} \\ &= 110,52 \angle 1,34^\circ + 62,70 \angle 79,46^\circ \\ &= 110,49 + j 2,58 + 11,47 + j 61,42 \\ &= 121,96 + j 64 = 137,73 \angle 27,69^\circ \text{ KV (L-N)} \\ &= 238,55 \angle 27,69^\circ \text{ KV (L-L)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 VR(\%) &= \frac{\frac{|V_S|}{|A|} - |V_R|}{|V_R|} \times 100\% \\
 &= \frac{\frac{238,55}{0,8904} - 215}{215} \times 100\% \\
 &= \underline{\underline{24,61\%}}
 \end{aligned}$$

(b) Derajat kompensasi = 70%, jadi

$$\begin{aligned}
 \frac{B_L}{B_C} &= 0,7 \\
 B_C &= 3,173 \times 10^{-6} \times 370 \text{ mho} \\
 &= 0,001174 \text{ mho} \\
 B_L &= 0,7 \times 0,001174 = 0,000822 \text{ mho}
 \end{aligned}$$

Konstanta umum reaktor shunt,

$$\begin{aligned}
 A_2 &= D_2 = 1 \\
 B_2 &= 0 \\
 C_2 &= -j B_L \\
 &= -j 0,000822
 \end{aligned}$$

Konstanta umum dari gabungan seri saluran dan reaktor shunt,

$$\begin{aligned}
 A &= A_1 A_2 + B_1 C_2 \\
 B &= A_1 B_2 + B_1 D_2 \\
 C &= A_2 C_1 + C_2 D_1 \\
 D &= B_2 C_1 + D_1 D_2
 \end{aligned}$$

Jadi,

$$\begin{aligned}
 A &= 0,8904 \angle 1,34^\circ \times 1 + 186,78 \angle 79,46^\circ \times (-j 0,000822) \\
 &= 1,0411 \angle -0,4^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B &= 0,8904 \angle 1,34^\circ \times 0 + 186,78 \angle 79,46^\circ \times 1 \\
 &= 186,78 \angle 79,46^\circ \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C &= 1 \times 0,00113 \angle 90,42^\circ + (-j 0,000822) (0,8904 \angle 1,34^\circ) \\
 &= 0,0004 \angle 88,74^\circ \text{ mho}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D &= 0 \times 0,00113 \angle 90,42^\circ + 0,8904 \angle 1,34^\circ \times 1 \\
 &= 0,8904 \angle 1,34^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_S &= A V_R + B I_R \\
 &= 1,0411 \angle -0,4^\circ \times 124,13 + 186,78 \angle 79,46^\circ \times 335,68 \times 10^{-3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 129,23 \angle -0,4^\circ + 62,70 \angle 79,46^\circ \\
 &= 129,23 - j 0,90 + 11,47 + j 61,42 \\
 &= 140,7 + j 60,52 = 153,16 \angle 23,27^\circ \text{ KV (L-N)} \\
 &= 265,27 \angle 23,27^\circ \text{ KV (L-L)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 VR(\%) &= \frac{\frac{265,27}{1,0411} - 215}{215} \times 100\% \\
 &= \underline{\underline{18,5\%}}
 \end{aligned}$$

Terlihat di atas bahwa bila reaktor shunt tetap terhubung baik dalam keadaan beban maupun dalam keadaan tanpa beban, tegangan ujung kirim sudah terlalu tinggi, yaitu 265, 27 KV (L-L) atau 23,38% di atas nominal, dan ini tidak diperbolehkan. Oleh karena itu sebaiknya reaktor shunt itu hanya dipasang selama keadaan beban ringan, terutama selama keadaan tanpa beban.

Bila reaktor shunt itu hanya dipasang selama keadaan tanpa beban, maka pengaturan tegangan menjadi

$$\begin{aligned}
 VR(\%) &= \frac{\frac{238,55}{1,0411} - 215}{215} \times 100\% \\
 &= \underline{\underline{6,57\%}}
 \end{aligned}$$

### 3. KOMPENSASI SERI

Kompensasi seri ini dilakukan dengan kapasitor seri. Kapasitor seri dipasang pada salah satu ujung saluran dan bila saluran lebih panjang maka dipasang pada kedua ujung saluran. Pemasangan kapasitor seri di tengah-tengah saluran adalah lebih baik tetapi lebih mahal karena harus menambah gardu khusus untuk instalasi kapasitor tersebut.

Kapasitor seri lebih efektif untuk mengkompensasikan reaktansi seri, dengan demikian menaikkan limit daya statis atau menaikkan stabilitas saluran.

Kapasitor seri ini dilengkapi dengan suatu "spark gap" untuk perlindungan terhadap arus hubung singkat.

Salah satu yang perlu diperhatikan dengan kompensasi seri ini adalah derajat kompensasi. Derajat kompensasi tidak boleh terlalu besar. Kompensasi 100 persen jelas tidak diperbolehkan karena akan menimbulkan resonansi seri. Derajat kompensasi yang dekat dengan kompensasi 100 persen juga berbahaya, karena bila frekuensi turun, misalnya bila pembangkitan kurang, maka derajat kompensasi akan mendekati seratus persen, jadi akan terjadi resonansi. Ini disebut sebagai resonansi sub-sinkron. Misalkanlah

$$\begin{aligned}
 X &= \omega L = \text{reaktansi seri total saluran} \\
 C &= \text{kapasitansi dari kapasitor seri}
 \end{aligned}$$

Misalkanlah juga derajat kompensasi 90%, jadi:

$$\frac{1}{\omega C} = 0,9 \omega L$$



atau:

$$\frac{1}{\omega C \cdot \omega L} = 0,9$$

Sekarang bila frekuensi turun dari 50 Hertz menjadi 48,5 Hertz, jadi pengurangannya 3%, maka derajat kompensasinya sekarang menjadi:

$$\frac{1}{0,97 \omega C \cdot 0,97 \omega L} = \frac{90\%}{(0,97)^2} = \underline{\underline{95,65\%}}$$

Dan bila frekuensi turun menjadi 47,5 Hertz, jadi pengurangan frekuensi 5%, maka derajat kompensasinya menjadi:

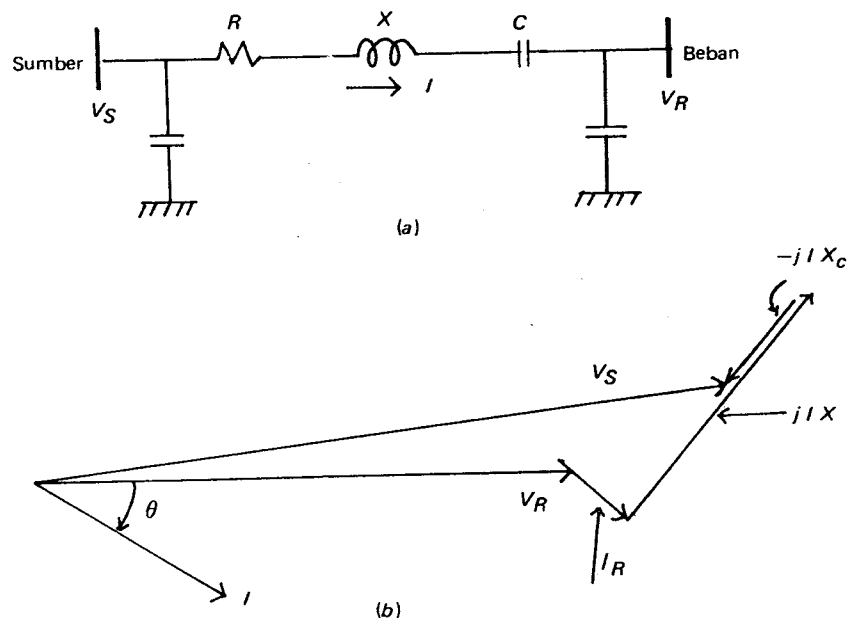
$$\frac{90\%}{(0,95)^2} = \underline{\underline{99,72\%}}$$

dan ini sudah hampir mencapai resonansi dan berbahaya.

Besar derajat kompensasi dalam praktek berkisar antara 40% sampai 60%.

### 3.1. Pengaruh Kapasitor Seri terhadap Tegangan

Dengan pemasangan kapasitor seri, reaktansi ekuivalen berkurang, dengan demikian jatuh tegangan berkurang, jadi pengaturan tegangan lebih baik, Gambar 7-2.



GAMBAR 7-2. (a) Diagram satu garis saluran yang dikompensasikan dengan kapasitor seri; (b) diagram vektor tegangan.

### 3.2. Pengaruh Kapasitor Seri terhadap Penyaluran Daya

Dengan kompensasi seri, reaktansi seri berkurang, jadi limit daya statis bertambah besar.

Besar daya yang disalurkan diberikan oleh Persamaan (7-2),

$$P_R = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \sin \delta \quad (7-2)$$

Untuk saluran menengah dengan representasi nominal  $PI$  dan tahanan diabaikan, harga  $|B|$  diberikan oleh  $X$  yaitu reaktansi seri saluran.

Jadi bila pada saluran dipasang kapasitor seri maka reaktansi berubah menjadi  $X - X_C$ , di mana  $X_C$  adalah reaktansi kapasitif dari kapasitor seri. Daya yang disalurkan menjadi,

$$P_R = \frac{|V_S| |V_R|}{X - X_C} \sin \delta \quad (7-3)$$

Dari Persamaan (7-3) dapat dilihat bahwa daya maksimum bertambah dengan pemasangan kapasitor seri.

**Contoh 7-3.** Saluran transmisi pada Contoh 7-1, yaitu saluran transmisi 500 KV, 250 km,  $Z = j 0,65 \text{ Ohm/km}$ ,  $Y = j 5,1 \times 10^{-6} \text{ mho/km}$  dan tahanan diabaikan. Untuk mengurangi panjang elektrik menjadi  $20^\circ$  dipasang kapasitor seri. Misalkanlah  $|V_S| = |V_R| = 500 \text{ KV}$ . (a) Tentukanlah besar kapasitansi dari kapasitor seri per fasa dan derajat kompensasi; (b) tentukanlah daya natural sebelum dan setelah pemasangan kapasitor seri.

*Jawab.*

- (a) Apakah kapasitor itu dipasang di tengah-tengah saluran atau di ujung saluran, konstanta umum  $B$  dari hubungan seri itu dapat ditulis sebagai  $Z - j X_C$  tanpa kesalahan yang berarti. Di sini  $Z = j X$ , jadi  $Z' = j(X - X_C)$ , maka,

$$\Theta' = \sqrt{Z' Y} = 20^\circ$$

Sebelum kompensasi :

$$\Theta = \sqrt{Z Y} = 26,1^\circ$$

jadi,

$$\frac{\Theta'}{\Theta} = \frac{\sqrt{Z'}}{\sqrt{Z}} = \frac{20^\circ}{26,1^\circ} = 0,7663$$

maka

$$\begin{aligned} Z' &= 0,5872 Z \\ &= j 0,5872 \times (0,65 \times 250) \\ &= j 95,42 \text{ Ohm.} \end{aligned}$$

Jadi,

$$\begin{aligned} (X - X_C) &= 95,42 \\ X_C &= 162,5 - 95,42 \\ &= 67,08 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

atau

$$\frac{1}{w C} = 67,08 \text{ Ohm}$$

jadi,

$$C = \frac{1}{314 \times 67,08} = \underline{\underline{4,75 \times 10^{-5} \text{ Farad/fasa}}}$$

$$\text{Derajat kompensasi} = \frac{X_C}{X_L} = \frac{67,08}{0,65 \times 250} \times 100\% = 41,3\%$$

- (b) Daya natural sebelum kompensasi seri = 700 MW (lihat Contoh 7-1). Setelah kompensasi seri impedansi surja menjadi,

$$Z'_o = \sqrt{\frac{Z'}{Y}} = \sqrt{\frac{95,42}{1,275 \times 10^{-3}}} = 273,6 \text{ Ohm}$$

dan daya natural menjadi,

$$P'_o = \frac{500 \times 500}{273,6} = \underline{\underline{914 \text{ MW}}}$$

Jadi dengan kompensasi daya natural bertambah besar, dari 700 MW menjadi 914 MW, jadi kemampuan penyaluran dari saluran transmisi bertambah besar.

#### 4. SALURAN PANJANG TANPA RUGI-RUGI; KONSEPSI PANJANG GELOMBANG

Konsepsi panjang gelombang,<sup>8</sup> sekalipun sudah sangat populer dalam teknik komunikasi, tetapi pada teknik transmisi daya sangat sedikit digunakan. Pada frekuensi 500 Hertz, panjang saluran udara tegangan tinggi yang sehubungan dengan frekuensi tersebut adalah 3.600 mil (= 5.790 km). Ini berarti bila panjang saluran 900 mil (= 1.477 km) adalah hampir sama dengan seperempat panjang gelombang. Pada transmisi yang demikian panjangnya, kenaikan tegangan dan kebutuhan daya reaktif sangat besar, dengan demikian dibutuhkan peralatan kompensasi.

Untuk saluran panjang tanpa rugi-rugi diperoleh :

$$A = D = \cos \beta l = \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \right)$$

$$B = j Z_o \sin \beta l = j Z_o \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \right)$$

$$C = j 1/Z_o \sin \beta l = j \frac{1}{Z_o} \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \right)$$

$$\gamma = j \beta l = j w \sqrt{LC} = \text{konstanta propagasi}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{w \sqrt{LC}} = \text{panjang gelombang}$$

$$Z_o = \sqrt{L/C} = \text{impedansi surja}$$

$$P_o = \text{daya natural} = 1/Z_o \text{ dalam per unit}$$

#### 4.1. Saluran Panjang tanpa Kompensasi

Misalkanlah,

$$\begin{aligned} V_{RO} &= \text{tegangan ujung beban tanpa beban dalam per unit.} \\ V_S &= \text{tegangan ujung kirim dalam per unit.} \end{aligned}$$

Bila panjang saluran transmisi mendekati seperempat panjang gelombang ( $\lambda/4$ ), maka

$$\frac{V_{RO}}{V_S} = \frac{1}{A} = \frac{1}{\cos(\pi/2)} = \text{tak terhingga} \quad (7-4)$$

Sekarang bila kedua ujungnya dipertahankan pada tegangan yang sama  $|V_S| = |V_R|$ , jadi kedua ujung saluran mempunyai sumber, maka tegangan sepanjang saluran akan naik, dan tegangan paling besar berada di tengah-tengah saluran, yang besarnya tergantung dari panjang saluran dan selisih sudut dari tegangan ujung kirim dan ujung beban,  $\delta$ . Sebutlah  $V_M$  tegangan di tengah-tengah saluran, maka

$$\frac{V_M}{V_S} = \frac{\cos(\delta/2)}{\cos(\pi/\lambda)} \quad (7-5)$$

Bila panjang saluran mendekati setengah panjang gelombang, maka tegangan di tengah-tengah saluran akan mendekati tak terhingga.

#### 4.2. Kompensasi Reaktor Shunt

Untuk memperoleh operasi praktis dan berguna bagi saluran transmisi di daerah seperempat sampai setengah panjang gelombang, perlu dipasang reaktor shunt untuk mengontrol karakteristik dari saluran tersebut.

Pandanglah representasi  $PI$  dari saluran itu. Cabang shunt dari representasi itu dapat dinyatakan sebagai,

$$Y = \frac{A - 1}{B} \quad (7-6)$$

Admitansi ini dapat ditiadakan atau dikompensir seluruhnya dengan menghubungkan admitansi shunt pada tiap ujung yang besarnya

$$y = \frac{1 - A}{B} \quad (7-7)$$

Untuk saluran transmisi tanpa rugi-rugi yang panjangnya kurang dari setengah panjang gelombang, elemen kompensasi ini adalah reaktansi induktif. Dengan hubungan di atas akan diperoleh  $A = 1$ , jadi  $V_{RO}/V_S = 1$ .

##### 4.2.1. Pengaruh Kompensasi Shunt terhadap Tegangan

Penurunan tegangan sepanjang saluran dapat diperoleh dengan memasang reaktor shunt pada satu atau lebih titik. Semakin banyak seksi semakin datar tegangan itu. Misalkanlah saluran itu dibagi dalam  $n$  seksi yang sama panjangnya, maka dalam hal ini konstanta umum  $A$  dan  $B$  dalam Persamaan (7-6) dan (7-7)

adalah konstanta umum  $A$  dan  $B$  untuk satu seksi. Dalam kondisi ini tegangan pada setiap lokasi reaktor akan sama dengan tegangan ujung kirim pada keadaan *beban nol* dan dalam keadaan *hubung terbuka*. Tegangan di tengah-tengah tiap seksi akan tetap lebih besar dari tegangan jepitan dan besarnya dapat dihitung dari Persamaan (7-5), dengan  $l$  sekarang menjadi  $l/n$  jadi

$$\frac{V_M}{V_S} = \frac{\cos \frac{\delta}{2n}}{\cos \left( \frac{\pi}{\lambda} \frac{l}{n} \right)} \quad (7-8)$$

Dengan menggunakan Persamaan (7-8) dengan  $\delta = 0^\circ$ , dapat ditentukan jumlah seksi  $n$  yang dibutuhkan untuk membatasi tegangan di tengah-tengah setiap seksi sampai pada harga yang diizinkan.

#### 4.2.2. Pengaruh Reaktor Shunt terhadap Penyaluran Daya

Dengan pemasangan reaktor shunt pada saluran transmisi, ternyata, makin banyak reaktor shunt yang digunakan maka makin berkurang kapasitas penyaluran.

Pandanglah suatu saluran transmisi panjang tanpa rugi-rugi yang tidak di-kompensasi, maka besar daya yang dapat disalurkan diberikan oleh persamaan,

$$P_R = \frac{|V_S| |V_R|}{|B|} \sin \delta = \frac{|V_S| |V_R| \sin \delta}{Z_o \sin \frac{2\pi}{\lambda} l} \quad (7-9)$$

dan bila  $P_o = 1/Z_o$  maka

$$\frac{P_R}{P_o} = \frac{|V_S| |V_R| \sin \delta}{\sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \right)} \quad (7-10)$$

Bila saluran itu dibagi dalam  $n$  seksi yang sama dan masing-masing seksi di-kompensasi sempurna, maka Persamaan (7-10) berubah menjadi,

$$\frac{P_R}{P_o} = \frac{|V_S| |V_R| \sin \delta}{n \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{l}{n} \right)} \quad (7-11)$$

Dari Persamaan (7-11) dapat dilihat, semakin banyak jumlah seksi  $n$  semakin berkurang besar daya yang dapat disalurkan. Jadi kompensasi dengan reaktor shunt akan memperkecil kapasitas penyaluran. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan kapasitor seri.

**Contoh 7-5.** Untuk saluran pada Contoh 7-1 dengan  $|V_S| = |V_R| = 500$  KV. (a) Tentukanlah tegangan di tengah-tengah saluran untuk harga  $\delta = 0^\circ$  dan  $30^\circ$  setelah kompensasi; (b) tentukanlah tegangan di tengah-tengah saluran untuk harga  $\delta = 0^\circ$  dan  $30^\circ$  sebelum kompensasi.

Jawab.

- (a) Tegangan di tengah-tengah saluran bila dilakukan kompensasi diperoleh dari Persamaan (7-5),

$$\frac{V_M}{V_S} = \frac{\cos \frac{\delta}{2}}{\cos \frac{\pi}{\lambda} l}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} = \beta \quad \text{atau} \quad \frac{\pi}{\lambda} = \frac{\beta}{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{2} &= \frac{1}{2} \sqrt{ZY'} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{0,65 \times 1,1715} \times 10^{-3} \\ &= 0,4363 \times 10^{-3} \text{ radian per km} \end{aligned}$$

jadi,

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{2} l &= 0,4363 \times 10^{-3} \times 400 = 0,1745 \text{ radian} \\ &= 10^\circ. \end{aligned}$$

Untuk harga  $\delta = 0^\circ$

$$V_M = \frac{\cos 0^\circ}{\cos 10^\circ} \times 500 = 508 \text{ KV}$$

$$\delta = 30^\circ$$

$$V_M = \frac{\cos 15^\circ}{\cos 10^\circ} \times 500 = \underline{\underline{490 \text{ KV}}}$$

- (b) Bila tidak ada reaktor shunt,

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{\lambda} &= \frac{\beta}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{ZY} = \frac{1}{2} \sqrt{0,65 \times 5,1} \times 10^{-3} \\ &= 0,91 \times 10^{-3} \text{ radian per km} \end{aligned}$$

Jadi

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{2} l &= 0,91 \times 400 \times 10^{-3} = 0,364 \text{ radian} \\ &= 20,86^\circ \end{aligned}$$

Untuk :

$$\delta = 0^\circ, \quad V_M = \frac{1}{\cos 20,86^\circ} \times 500 = 535 \text{ KV}$$

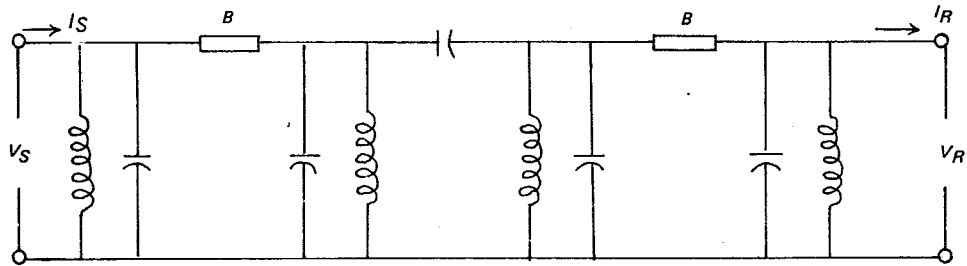
$$\delta = 30^\circ, \quad V_M = \frac{\cos 15^\circ}{\cos 20,86^\circ} \times 500 = \underline{\underline{517 \text{ KV}}}$$

Dari hasil (d) dan (e) dapat dilihat bahwa dengan pemasangan reaktor shunt itu diperoleh tegangan yang lebih baik atau pengaturan tegangan yang lebih baik.

### 4.3 Kompensasi Seri

Dalam pasal 4.2.2 telah kita lihat, semakin banyak jumlah seksi  $n$  semakin merata tegangan sepanjang saluran. Tetapi semakin banyak jumlah seksi  $n$  semakin berkurang besar daya yang dapat disalurkan. Untuk memperbesar daya yang dapat disalurkan digunakan kapasitor seri.

Apabila saluran transmisi itu dibagi dalam  $n$  seksi yang sama panjangnya dan tiap-tiap seksi dikompensasi sempurna seperti yang telah dijelaskan pada pasal 4.2 yang lalu, maka saluran itu dilihat dari jepitan-jepitannya seperti hanya terdiri dari impedansi seri saja yang sama dengan perjumlahan konstanta umum dari tiap seksi atau sama dengan  $nB$ , di mana  $B$  adalah konstanta umum dari tiap seksi. Impedansi seri ekivalen dari tiap seksi tidak berubah dengan pemakaian kapasitor seri, apabila kapasitor seri itu disisipkan di antara tiap seksi, sedang tiap seksi tetap dikompensasi sempurna (kompensasi shunt), Gambar 7-3.



**GAMBAR 7-3.** Kapasitor seri disisipkan antara dua seksi yang dikompensasi sempurna dengan reaktor shunt ( $n = 2$ ).

Impedansi seri keseluruhan, yaitu impedansi dari seluruh seksi adalah sama dengan jumlah aljabar dari konstanta  $B$  dan kapasitor seri tersebut. Bila jumlah seksi (sama panjang)  $n$ , konstanta umum tiap seksi  $B$ , dan kapasitor seri antara dua seksi adalah  $C_{se}$ , maka jumlah kapasitor seri adalah  $(n-1)$ , dan impedansi seri ekivalen setelah penyisipan kapasitor seri itu adalah :

$$B' = nB - \frac{(n-1)}{w C_{se}} \text{ Ohm } (n \geq 2)$$

atau

$$B' = n Z_o \sin \frac{2\pi}{\lambda} \frac{l}{n} - \frac{n-1}{w C_{se}} \quad (7-12)$$

Dengan pemasangan kapasitor seri itu maka besar daya yang dapat disalurkan,

$$P_R = \frac{|V_S| |V_R| \sin \delta}{n Z_o \sin \frac{2\pi}{\lambda} \frac{l}{n} - \frac{(n-1)}{w C_{se}}} \quad (n \geq 2) \quad (7-13)$$

bertambah bila dibandingkan dengan sebelum pemasangan kapasitor seri.

## SOAL-SOAL

**Soal 7-1.** Suatu saluran transmisi fasa tiga, 500 km, 500 KV, melayani beban sebesar 500 MVA dengan faktor daya 0,95 terbelakang pada tegangan 500 KV. Konstanta umum saluran transmisi adalah:  $A = D = 0,82 \angle 1,3^\circ$ ;  $B = 172 \angle 84,2^\circ$  ohm;  $C = 0,00193 \angle 90,4^\circ$  mho. Pada ujung beban dipasang suatu reaktor shunt sebesar 500 ohm per fasa, dan hanya dipasang selama keadaan tanpa beban. (a) Tentukan konstanta  $ABCD$  dari reaktor shunt; (b) tentukanlah konstanta  $ABCD$  dari gabungan seri saluran dan reaktor shunt; (c) tentukanlah tegangan pada ujung kirim sebelum pemasangan reaktor shunt; (d) tentukanlah pengaturan tegangan sebelum pemasangan reaktor shunt; (e) tentukanlah pengaturan tegangan setelah pemasangan reaktor shunt selama keadaan tanpa beban.

**Soal 7-2.** Saluran transmisi pada Soal 7-1, tetapi reaktor shunt dipasang tetap. (a) Tentukanlah tegangan pada ujung kirim setelah pemasangan reaktor shunt; (b) tentukanlah pengaturan tegangan; (c) bandingkanlah jawaban Soal 7-2(b) ini dengan jawaban Soal 7-1(e). Mana yang lebih baik, reaktor shunt dipasang tetap atau hanya dipasang selama keadaan tanpa beban.

**Soal 7-3.** Suatu saluran transmisi fasa tiga, 50 Hertz, 220 KV, 300 km, mempunyai konstanta sebagai berikut:  $Z = 0,524 \angle 79,04^\circ$  ohm/km;  $Y = 3,173 \times 10^{-6} \angle 90^\circ$  mho/km. Beban pada saluran itu adalah 120 MW pada 215 KV dengan faktor daya terbelakang 0,95. Untuk mengurangi arus pengisian dan membatasi tegangan pada ujung beban selama beban ringan, dipasang reaktor shunt sebesar 1.000 ohm/fasa. Reaktor shunt itu hanya dipasang selama keadaan tanpa beban. (a) Tentukanlah tegangan pada ujung kirim dan pengaturan tegangan tanpa reaktor shunt; (b) tentukanlah pengaturan tegangan bila reaktor shunt dipasang selama keadaan tanpa beban. Saluran transmisi dan reaktor shunt direpresentasikan sebagai sirkuit nominal  $\pi$ ; (c) tentukanlah pengaturan tegangan bila reaktor shunt dipasang selama keadaan tanpa beban. Saluran transmisi dan reaktor shunt direpresentasikan dengan konstanta  $ABCD$ -nya masing-masing.

**Soal 7-4.** Admitansi shunt suatu saluran transmisi sepanjang 400 km adalah  $Y = 4,27 \times 10^{-6}$  mho/km. Tentukanlah konstanta umum  $ABCD$  dari suatu reaktor shunt yang akan memberikan derajat kompensasi sebesar 50% dari admitansi total saluran.

**Soal 7-5.** Saluran pada Soal 7-3 di atas akan dikompensasi dengan kapasitor seri. (a) Tentukanlah besar kapasitor seri dalam Farad/fasa untuk kompensasi sebesar 40%; (b) Tentukanlah besar daya maksimum,  $P_{R \text{ maks}}$ , sebelum dan sesudah kompensasi seri.

**Soal 7-6.** Suatu saluran transmisi panjang tanpa rugi-rugi dengan panjang  $l = \lambda/12$  dan  $Z_0 = 400$  ohm, di mana  $\lambda$  = panjang gelombang. Bila besar tegangan pada kedua ujung saluran sama 500 KV dan perbedaan sudut daya  $\delta = \pi/6$  radian, tentukanlah : (a) Tegangan di tengah-tengah saluran; (b) besar daya yang disalurkan dalam MW.



## BAB 8. PERENCANAAN DAN KONSTRUKSI SALURAN UDARA

### 8.1 Perencanaan Listrik

#### 8.1.1. Tegangan Transmisi dan Jumlah Saluran

Dari segi keandalan (reliability), makin banyak jumlah rangkaian makin tinggi keandalannya, oleh karena rangkaian-rangkaian yang tidak terganggu pada suatu saluran dengan banyak rangkaian (multi-circuit) akan dapat menggantikan tugas satu rangkaian yang terganggu. Sebaliknya, saluran yang hanya terdiri dari satu rangkaian saja tidak mungkin menyalurkan tenaga listrik bila rangkaian itu terganggu.

Keandalan saluran ganda (double-circuit) yang kedua rangkaiannya terpasang pada satu menara kurang daripada keandalan saluran ganda yang terdiri dari dua rangkaian tunggal.

Tegangan transmisi dan jumlah rangkaian ditetapkan secara ekonomis dengan memperhatikan faktor-faktor peningkatan daya transmisi, besarnya hilang daya, biaya konstruksi, rencana pengembangan sistim dan keandalan sistim transmisi. Pada umumnya biaya konstruksi saluran untuk tegangan dan ukuran kawat yang sama adalah sbb:

Biaya menara 1-rangkaian dengan pasangan 1 rangkaian = 100 %

Biaya menara 2-rangkaian dengan pasangan 1 rangkaian = 120 %

Biaya menara 2-rangkaian dengan pasangan 2 rangkaian = 140 %

Biaya menara 2-rangkaian dengan pasangan tambahan 1 rangkaian = 40 %

#### 8.1.2. Perencanaan Isolasi Saluran Transmisi

*Tegangan-lebih dalam* (internal overvoltage) disebabkan karena surja-hubung (switching surge, yaitu karena pembukaan atau penutupan pemutus beban) dan karena berubahnya beban dengan cepat atau karena gangguan pada saluran (hubung-singkat).

Pada sistim yang tidak dibumikan efektif surja-hubung dapat mencapai 3 – 4 kali tegangan fasa, sedang pada sistim yang ditanahkan efektif kira-kira 3 kali tegangan fasa.<sup>1,2)</sup> Besarnya surja hubung dapat dikurangi menjadi 1,8 – 2 kali tegangan fasa dengan memasang tahanan paralel dengan pemutus beban waktu menutup pemutus tersebut. Di Jepang kelipatan surja hubung terhadap tegangan fasa (disebut faktor tegangan lebih<sup>1)</sup>) adalah 4 untuk sistim tidak ditanahkan; 3,3 untuk sistim dibumikan melalui tahanan atau reaktor; 2,8 untuk sistim ditanahkan efektif; dan 2,0 – 2,2 untuk sistim dengan tahanan peredam pada pemutus beban.

Kenaikan tegangan pada fasa-fasa yang sehat tidak terganggu bila terjadi hubung-singkat satu-fasa ke tanah adalah 0,8 kali tegangan kawat maksimum (tegangan antarfasa) untuk sistim ditanahkan dan 1,0 kali untuk sistim tidak-ditanahkan.

Perencanaan isolasi saluran transmisi harus didasarkan atas pertimbangan bahwa isolasi tersebut harus dapat diamankan dan tidak akan mengalami kegagalan karena tegangan-lebih dalam. Kegagalan terhadap tegangan-lebih luar, terutama karena petir, juga harus dibuat seminimum mungkin, karena adanya gangguan petir tidak dapat dihindarkan.

Tabel 35 menunjukkan standar Jepang tentang jumlah isolator gantung 250 mm yang diperlukan guna ketahanan terhadap surja-hubung tanpa pengotoran udara.<sup>3)</sup> Pada umumnya untuk saluran di atas 110 kV dipasang tanduk busur api (arcing horn) pada gandingan isolator guna melindunginya terhadap kerusakan yang disebabkan karena terjadinya lompatan-api. Panjang sela tanduk Z biasanya 75 – 80 % dari panjang gandingan isolator  $Z_0$ . Tabel 36 menunjukkan jumlah isolator dan jarak sela tanduk bila pada gandingan dipasang tanduk.<sup>4)</sup>

Jarak isolasi antara kawat dan tiang atau menara direncanakan menurut jarak isolasi standar, jarak isolasi minimum dan jarak isolasi darurat, yaitu guna menampung kemungkinan ayunan kawat karena angin. Jarak isolasi standar adalah jarak antara kawat penghantar dan menara, yang ekuivalen dengan tegangan lompatan impuls 50 % dari gandingan isolator.

**Tabel 35. Jumlah Isolator Saluran yang Diperlukan Guna Pengamanan terhadap Surja Hubung (Tanpa Tanduk Api)<sup>1)</sup>**

Tegangan Nominal (kV)	11	22	33	66	77	110	154	187	220	275
Tegangan Maksimum yang diperbolehkan $V_m$ (kV)	12	24	36	72	84	120	168	204	240	300
Tegangan Fasa Maksimum $V_m \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ (kV)	9,8	19,6	29,4	58,8	68,6	98	137	167	196	245
Faktor Tegangan Lebih $n$	4,0	4,0	4,0	3,3	3,3	3,3	3,3	2,8	2,8	2,8
Tegangan Surja Hubung $V_m \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times n$ (kV)	39,2	78,4	117,6	194	226	324	452	468	549	686
Daya Isolasi yang Diperlukan <sup>2)</sup> (kV)	47,0	94,0	141,0	233	271	389	543	562	660	824
Jumlah Isolator yang Diperlukan (A)	1	(2) 1	2	(4) 3	4	6	(9) 8	(10) 9	(12) 11	(15) 14
Selisih Isolasi dari (A)	1,66	(1,51) 0,83	1,01	0,95	1,05	1,06	(1,07) 0,97	(1,12)	(1,11)	(1,06)
Jumlah Isolator yang Diperlukan untuk Pemeliharaan	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Jumlah Isolator yang Digunakan (B) = (A) + 1	2	(3) 2	3	(5) 4	5	7	(10) 9	(11) 10	(13) 12	(16) 15
Selisih Isolasi dari (B)	3,20	(2,35) 1,51	1,57	(1,51) 1,22	1,29	1,18	(1,16) 1,07	(1,22) 1,12	(1,19) 1,11	(1,12) 1,06
Sistim Penumaian	Tidak Ditanahkan			Melalui Tahanan atau Reaktor			Efektif			

Catatan: <sup>1)</sup> Nilai-nilai dalam tanda kurung adalah yang sering dipakai

<sup>2)</sup> Nilainya didapat dari memperkalikan tegangan surja hubung dengan 1,2 yaitu guna memperhitungkan pengaruh ketinggian lokasi, pengurangan tekanan udara, dsb.

**Tabel 36. Jumlah Isolator Yang Diperlukan dan Lebar Sela Tanduk Guna Pengamanan terhadap Surja Hubung<sup>1)</sup>**

Tegangan Nominal (kV)		66	77	110	154	187	220	275
Tegangan Ketahanan terhadap Surja Hubung (kV)		233	271	389	543	562	660	824
$Z/Z_0 = 80\%$	Jumlah Isolator yang Diperlukan	(5) 4	(6) 5	(8) 7	10	(11) 10	(13) 12	(17) 16
	Lebar Sela Tanduk ( $Z = 0,8Z_0$ ) (m)	(0,59) 0,47	(0,71) 0,59	(0,94) 0,82	1,17	(1,29) 1,17	(1,52) 1,40	(1,98) 1,87
$Z/Z_0 = 75\%$	Jumlah Isolator yang Diperlukan	0	(6) 5	(8) 7	10	11	13	17
	Lebar Sela Tanduk ( $Z = 0,75Z_0$ ) (m)	0,55	(0,66) 0,55	(0,88) 0,77	1,09	1,21	1,43	1,86

Catatan: Seperti Catatan pada Tabel 35

**Tabel 37. Jarak Isolasi Standar dan Jarak Isolasi Minimum**

Tegangan Nominal (kV)			11	22	33	66	77	110	154	187	220	275
Tanpa Tanduk Busur Api	Jumlah Isolator		2	(3) 2	3	(5) 4	5	7	(10) 9	(11) 10	(13) 12	(16) 15
	Tegangan Lompatan Api 50 % untuk Gandengan Isolator (kV)		220	(306) 220	306	(455) 380	455	610	(843) 764	(920) 843	(1075) 997	(1312) 1232
	Jarak Isolasi Standar (m)		0,40	(0,55) 0,40	0,55	(0,80) 0,70	0,80	1,10	(1,50) 1,35	(1,65) 1,50	(1,90) 1,75	(2,30) 2,20
Dengan Tanduk Busur Api	Z/Z <sub>0</sub> 80%	Jumlah Isolator				(5) 4	(6) 5	(8) 7	10	(11) 10	(13) 12	(17) 16
		Sela Tanduk Api (m)				(0,59) 0,47	(0,71) 0,59	(0,94) 0,82	1,17	(1,29) 1,17	(1,52) 1,40	(1,98) 1,87
		Jarak Isolasi Standar (m)				(0,70) 0,55	(0,80) 0,70	(1,10) 0,95	1,35	(1,45) 1,35	(1,75) 1,60	(2,25) 2,10
	Z/Z <sub>0</sub> 75%	Jumlah Isolator				5	(6) 5	(8) 7	10	11	13	17
		Sela Tanduk Api (m)				0,55	(0,06) 0,55	(0,88) 0,77	1,09	1,21	1,43	1,86
		Jarak Isolasi Standar (m)				0,65	(0,75) 0,65	(1,00) 0,90	1,25	1,40	1,60	2,10
Jarak Isolasi Minimum			0,10	0,15	0,25	0,40	0,45	0,70	1,00	1,05	1,25	1,60

Catatan: Harga dalam tanda kurung adalah yang lazim digunakan

Jarak isolasi minimum adalah jarak ketahanan terhadap surja hubung. Di Jepang, jarak isolasi standar dan jarak minimum tertera pada Tabel 37.

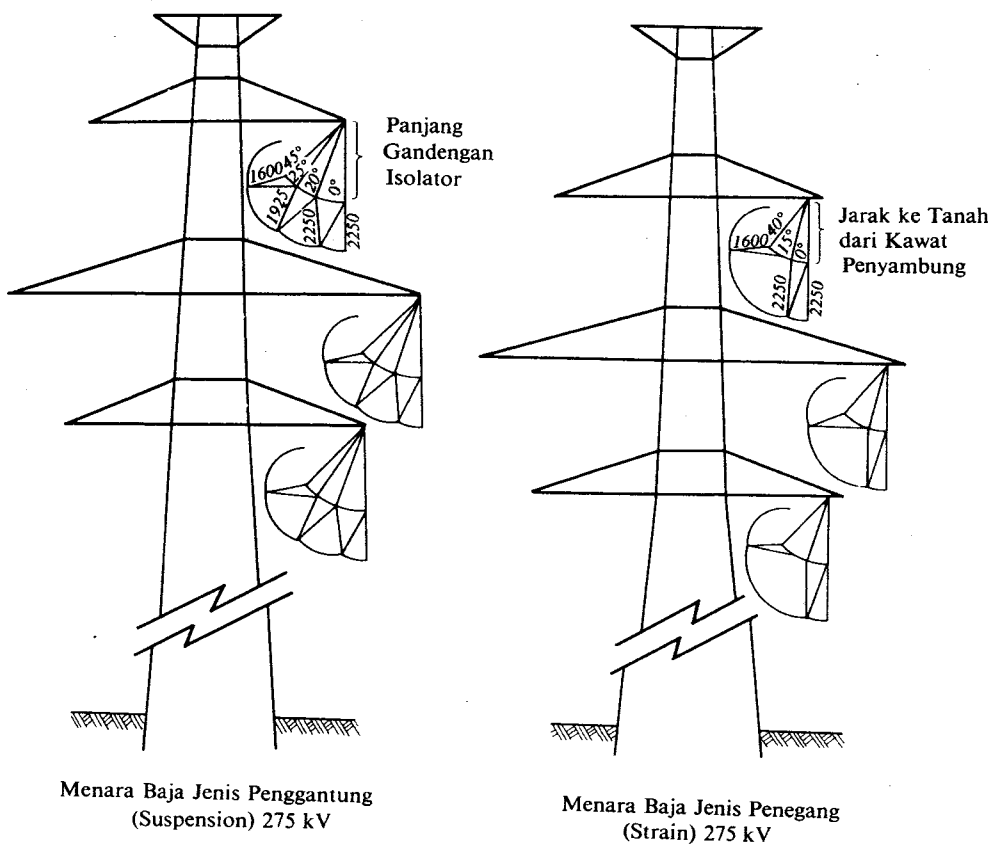
Jarak isolasi darurat adalah jarak yang tidak memungkinkan percikan atau lompatan (flashover) antara menara dan kawat pada tegangan maksimum dan tekanan angin maksimum (40 m/s).

Bentuk lengan dari menara atau tiang harus direncanakan sesuai dengan persyaratan jarak seperti diuraikan di atas; periksa contoh diagram jarak-bebas (clearance diagram) Gbr. 62. Untuk menara baja jenis penggantung (Gbr. 62 (a)) jarak isolasi standar ditentukan oleh sudut-ayun karena angin sebesar  $0 - 20^\circ$ , dan jarak isolasi minimum oleh sudut-ayun (swing angle) sebesar  $50^\circ$ . Untuk jarak isolasi darurat sudut-ayunnya antara  $70 - 80^\circ$ .

Jarak isolasi standar untuk menara baja jenis penegang (strain type: periksa Gbr. 62 (b)) adalah  $120\%$  dari jarak untuk menara jenis penggantung, karena berbagai pertimbangan instalasinya. Jarak ini diperhitungkan untuk sudut-ayun  $15^\circ$ , sedangkan untuk jarak isolasi minimum sudutnya tidak boleh melebihi  $40^\circ$ .

Dalam perencanaan saluran transmisi perlu diperhatikan bahwa tidak boleh terjadi lompatan antara kawat penghantar, meskipun kawat-kawat itu mendekati satu sama lain karena tiupan angin (es dan salju). Jarak antara kawat ditetapkan dengan mengingat jarak isolasi antara menara dan kawat, jarak yang optimum dilihat dari segi perawatannya, tegangan transmisi, lebar gawang, macam dan ukuran kawat, keadaan cuaca, geografi setempat dll.

Dalam hubungan di atas dikenal (a) jarak mendatar, (b) jarak tegak, (c) jarak miring (offset) dan (d) jarak bila gawangnya lebar (long span).



Gbr. 62 Contoh Diagram Jarak-Bebas.

Untuk rangkaian ganda yang tersusun tegak dan rangkaian tunggal segitiga, jarak mendatar adalah jarak antara kawat dan menara. Jarak mendatar ini dapat dirumuskan dengan persamaan-persamaan, salah satu diantaranya adalah sbb:<sup>6)</sup>

$$C_h = a\sqrt{f+i} + bV \quad (170)$$

dimana  $C_h$  = jarak mendatar antara kawat (m)

$a$  = konstanta 0,5 – 1,0

$f$  = andongan kawat (m)

$i$  = panjang gandengan isolator (m)

$b$  = konstanta 0,012 – 0,0007

$V$  = tegangan kawat (kV)

Jarak tegak antara kawat biasanya 60 – 100% dari jarak mendatar. Bila ada es dan salju jarak tegak menyempit karena ketidak-seimbangan muatan es dan salju pada kawat. Oleh karena itu biasanya kawat yang satu tidak dipasang tegak lurus terhadap yang lain tetapi agak miring (offset).

Untuk saluran-saluran yang lebar gawangnya besar, jarak antara kawat perlu diperbesar karena andongannya lebih besar dan kemungkinan terjadinya persinggungan lebih besar pula. Untuk saluran dengan gawang yang menaranya tidak sama tingginya jarak antara kawatnya juga harus diperbesar.

Andongan kawat (sag) berubah dengan suhu; periksa 2.3. Oleh karena itu perlu ada *jarak-bebas* (clearance) yang cukup agar kawat tidak menimbulkan gangguan lalu lintas, kereta api, saluran tilpon dll. yang ada di bawah saluran transmisi terutama bila suhunya mencapai angka maksimum. Di Jepang jarak bebas ini diatur dalam standar<sup>7)</sup> seperti tertera dalam Tabel 38. Standar ini agak lunak dibandingkan dengan standar Amerika.<sup>8)</sup> Karena ada kemungkinan kejutan listrik oleh induksi di bawah saluran tegangan tinggi sekali (EHV) maka jarak bebas itu perlu diperbesar, apalagi bila saluran melewati jalan darat yang ramai.

**Tabel 38. Jarak-Bebas Tegak terhadap Tanah**

Tegangan	Jarak-Bebas
Di bawah 35 kV	5 m (5,5 m bila saluran menyeberangi jalan-kereta api, dan 6 m bila saluran menyeberangi jalan raya)
35 – 160 kV	6 m (5 m bila saluran digantung di daerah-daerah pegunungan yang jarang didatangi manusia)
Di atas 160 kV	6 m ditambah 12 m untuk setiap 10 kV (5,5 m bila saluran digantung di daerah-daerah pegunungan)

Isolator akan terkena *pengotoran* (pencemaran, pollution) garam dan debu bila saluran terpasang di dekat laut, di daerah industri atau di daerah yang berdebu. Untuk mencegah memburuknya karakteristik isolasi karena pengotoran tadi isolator dicuci atau dilapisi campuran silikon. Bila hal itu tidak dilakukan, daya isolasinya ditambah dengan menggunakan isolator anti-kabut atau dengan menambah jumlah isolator dalam suatu gandengan. Penambahan isolator ini disesuaikan dengan banyaknya pengotoran garam pada isolator seperti tertera dalam contoh Tabel 39 untuk Jepang, yang banyak berpengalaman dalam hal ini.<sup>9)</sup>

Tabel 39. Jumlah Isolator Gantung Standar dalam suatu Gandengan untuk Keadaan Udara Cemar

Derajat Pengotoran			A	B	C	D	E	
Jumlah Ekuivalen Garam dalam Perencanaan (mg/muka bawah)			50 (0,0625)	100 (0,125)	200 (0,25)	400 (0,5)	Untuk Saluran Di tepi Laut	
							Jenis Penegang	Jenis Penggantung
Tegangan	Sistim Tidak Ditanahkan	11	2*	2*	2*	2*	2	2
		22	2	2	2	2	3	3
		33	3*	3	3	3	4	4
		66	4	5	6	6	7	8
		77	5	6	6	7	8	10
		110	7	8	9	10	11	14
		154	9	11	12	14	16	19
	Sistim Ditanahkan Efektif	187	11	13	15	17	19	23
		220	13	16	17	20	22	27
		275	16	19	22	25	28	34
Tegangan Perencanaan (kV/disc)			10,3	8,9	7,8	6,8	6,0	5,0

Catatan: \* Jumlah ini ditentukan bukan oleh pengotoran tapi oleh kebutuhan perencanaan isolasi

### 8.1.3. Perencanaan Tahan-Petir

Ada tiga jenis sambaran petir terhadap saluran transmisi:

- (1) Sambaran langsung pada kawat saluran, sehingga lompatan pada titik-topang atau tempat-tempat tertentu dalam gawang (span) tidak dapat dihindarkan.
- (2) Sambaran pada menara atau kawat-tanah-atas (overhead ground-wire) yang menyebabkan lompatan karena kenaikan potensial menara oleh sebab tingginya tahanan kaki menara.
- (3) Sambaran pada kawat-tanah-atas yang menyebabkan lompatan ke kawat karena curamnya muka-gelombang petir.

Untuk mencegah hubung-singkat karena lompatan (flashover) sambaran petir tadi perlu diadakan usaha-usaha pengamanan a.l. dengan selalu memasang kawat tanah, menurunkan tahanan kaki menara, atau memperlebar jarak antara kawat tanah dan kawat fasa. Beberapa hal yang berhubungan dengan pengamanan ini akan diuraikan lebih lanjut.

*Polaritas arus petir* biasanya negatif. Di beberapa negara tercatat bahwa arus petir maksimum adalah 160 – 220 kA.<sup>10)</sup> Namun, untuk perencanaan biasanya digunakan kebesaran antara 60 – 100 kA. Muka gelombang arus biasanya antara 1 – 10  $\mu$ s, sedang waktu sampai setengah-puncak biasanya antara 10 – 100  $\mu$ s. Beberapa data tentang besarnya arus petir pada menara baja tertera dalam Gbr. 63.<sup>11-15)</sup>

Satu *kawat-tanah* digunakan sebagai perisai terhadap kawat-kawat fasa bagi saluran-saluran yang jarang terkena petir atau yang kurang penting, sedang dua kawat-tanah digunakan pada saluran-saluran yang sering terkena petir atau yang penting. Pengaruh perisai dapat dihitung dengan berbagai teori; teori Mita<sup>16)</sup> yang

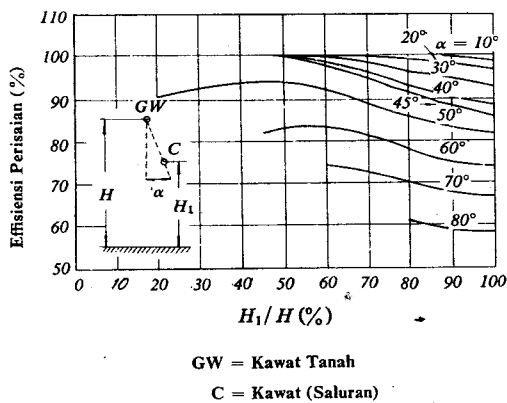
diterapkan di Jepang tertera dalam Gbr. 64 dan Gbr. 65.

Untuk menghindarkan lompatan pada titik-tengah dalam gawang, andongan (sag) kawat-tanah dibuat 80 % dari panjang kawat (saluran).

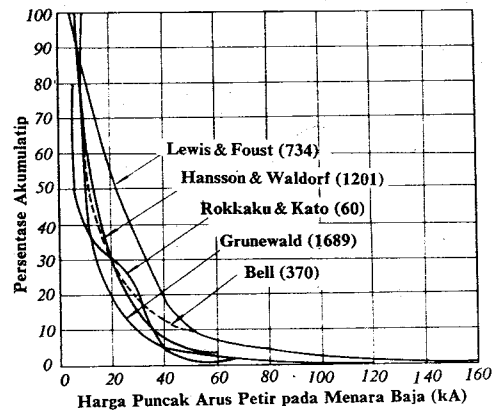
Seperti diuraikan di atas, *tahanan kaki menara* perlu dibuat sekecil mungkin (di Amerika: kurang dari 10 ohm) untuk menghindarkan lompatan karena naiknya potensial menara waktu terjadi sambaran petir. Tahanan ini ditentukan oleh bentuk fisik tahanan dan tahanan jenis dari tanah, seperti terlihat dari rumus-rumus berikut:

- (1) tahanan berbentuk elektrode batang ditanam tegak lurus ke dalam tanah:

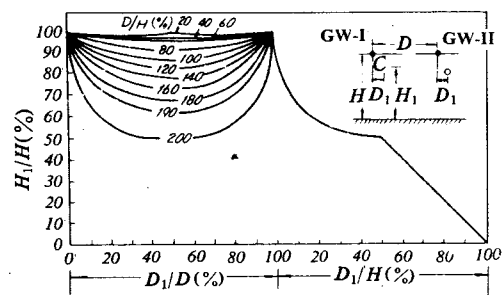
$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{r} - 1 \right) \quad H_1/H(\%) \quad (171)$$



Gbr. 64 Efisiensi Perisaian Sebuah Kawat Tanah.



Gbr. 63 Besarnya Arus Petir yang Diukur pada Menara Baja.



Gbr. 65 Perisaian 100 % dari Kawat Tanah Ganda.

- (2) tahanan berbentuk "counterpoise" (jaringan kawat yang ditanam, menyebar dari kaki menara):

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{r} + \ln \frac{2l}{t} - 2 + \frac{t}{l} \right) \quad (172)$$

dimana untuk rumus-rumus di atas

$\rho$  = tahanan jenis dari tanah (periksa Tabel 40)

$r$  = jari-jari elektroda (cm)

$l$  = panjang elektroda (cm)

$t$  = dalam penanaman "counterpoise" (cm)

Tabel 40. Nilai Tahanan Spesifik berbagai Jenis Tanah

Jenis Tanah	Resistivitas (kΩ-cm)
Sawah, Rawa (Tanah Liat)	0 – 15
Tanah Garapan (Tanah Liat)	1 – 20
Sawah, Tanah Garapan (Kerikil)	10 – 100
Pegunungan (Biasa)	20 – 200
Pegunungan (Batu)	200 – 500
Pinggir Sungai (Berbatu)	100 – 500

Bila tahanan dari menara atau tiang tidak cukup rendah, maka penambahan atau perluasan “counterpoise” dan penambahan batang-batang penghantar dapat membantu menurunkannya (sampai kira-kira 20 – 30 ohm). Oleh karena bentuk gelombang arus petir yang curam mukanya, penurunan tahanan itu tidak berlaku terhadap arus bolak-balik saja, tetapi juga penurunan impedansi terhadap arus impuls.

## 8.2 Perencanaan Mekanis

### 8.2.1. Tekanan Angin

Dalam perencanaan perlu diperhatikan kekuatan kawat dan menara atau tiang terhadap beban-beban mekanis yang ada, terutama tekanan angin:

$$p = kv^2 \quad (173)$$

dimana  $p$  = tekanan angin (kg/m<sup>2</sup>)

$v$  = kecepatan angin (m/s)

$k$  = konstanta

Yang dipakai sebagai standar<sup>17)</sup> di Jepang guna perencanaan saluran transmisi adalah tekanan angin topan (typhoon) dengan kecepatan maksimum rata-rata 40 m/s selama 10 menit atau setengah harga di atas untuk kawat-kawat yang diberati dengan es dalam musim dingin. Tekanan angin dengan kecepatan 40 m/s diambil dari Tabel 41. Harga-harga yang lebih tinggi digunakan bila kecepatan angin lebih tinggi atau bila menaranya (baja) lebih tinggi dari normal.

### 8.2.2. Penghantar

Penghantar harus cukup aman dalam menyalurkan tenaga listrik dilihat dari segi beban-beban mekanis yang diharapkan. Untuk itu daya kerja maksimum pada kawat harus ditambah dengan *faktor keamanan* 2,2 untuk kawat tembaga tarikan-keras (hard-drawn) dan 2,5 untuk kawat ACSR serta kawat-kawat lainnya. Bila tarikan sehari-hari pada kawat besar, maka penghantar mudah menjadi letih karena getaran; hal ini perlu diperhatikan dalam mempertimbangkan besarnya kekuatan kerja maksimum.

Apabila tegangan kerja maksimum telah ditetapkan, maka *andongan* dan tegangan tarik kawat dalam berbagai kondisi dapat dihitung. Untuk kawat yang membentuk lengkung parabolis andongan dan tarikannya adalah<sup>18)</sup>

$$D = \frac{\delta q_2 S^2}{8 f_2} \quad (174)$$

$$f_2^2 \{ f_2 - (K - \alpha t E) \} = M \quad (175)$$



Tabel 41. Tekanan Angin untuk Perencanaan (Kecepatan Angin 40 m/s)

Klasifikasi Obyek yang Terkena			Tekanan Angin per m <sup>2</sup> pada Permukaan Proyeksi
Konstruksi Penopang	Tiang Kayu		80 kg
	Tiang Baja	Bulat	80 kg
		Segitiga atau Belah Ketupat	190 kg
		Persegi, terdiri dari Pipa-pipa Baja	150 kg
		Lain-lain	Bila Penguat dipasang pada Dua Muka (Depan dan Belakang) menghadap angin 240 kg; untuk yang lain
	Tiang Beton Bertulang	Bulat	80 kg
		Lain-lain	120 kg
	Menara Baja	Terdiri dari Pipa-pipa Baja	170 kg
		Lain-lain	290 kg
Kawat yang Digantung	Kawat Berkas (Setiap Dua Kawat Berkas dipasang Mendatar dengan Jarak kurang dari Duapuluh kali Diameter Kawat)		90 kg
	Lain-lain		100 kg
Pasangan Isolator (untuk Tegangan Tinggi)			140 kg
Palang pada Tiang Kayu dan Tiang Baja (jenis bulat) dan Tiang Beton Bertulang (untuk Tegangan Tinggi)			160 kg; satu palang 220 kg; palang bertopang

$$K = f_1 - \frac{\delta^2 q_1^2 S^2 E}{24 f_1^2} \quad (176)$$

$$M = \frac{\delta^2 q_2^2 S^2 E}{24} \quad (177)$$

dimana  $D$  = andongan (sag) (m)

$f_2$  = tegangan tarik terhadap andongan  $D$  (kg/mm<sup>2</sup>)

$$\delta = W_c / A \quad (178)$$

$W_c$  = berat kawat (kg/m)

$A$  = luas penampang kawat (mm<sup>2</sup>)

$q_2$  = koefisien beban yang bersangkutan dengan andongan tertentu

$S$  = lebar gawang (m)

$\alpha$  = koefisien suhu linier (1/°C)

$t$  = perbedaan suhu keadaan terburuk dan suhu pada andongan tertentu (°C)

$E$  = koefisien elastisitas kawat (kg/mm<sup>2</sup>)

$f_1 = T/A$

$T$  = tegangan tarik kerja maksimum (kg)

$q_1$  = koefisien beban pada keadaan terburuk

Koefisien beban dihitung dari perbandingan antara beban akhir (resultant load) dari kawat terhadap beban kawat:

$$q = W/W_c \quad (179)$$

$$W = \sqrt{W_w^2 + (W_c + W_i)^2} \quad (180)$$

dimana  $q$  = koefisien beban

$W$  = beban akhir (kg/m)

$W_c$  = berat kawat (kg/m)

$W_w$  = beban angin terhadap kawat (kg/m)

$W_i$  = beban tegaklurus, misalnya karena es (kg/m)

Bila angin meniup secara konstan dan tegaklurus pada kawat, maka kawat tersebut akan bergetar naik turun karena ada perputaran udara di belakang kawat tersebut. Bila getaran ini sama frekwensinya dengan frekwensi osilasi alamiah (natural) dari kawat, maka terjadilah gelombang-gelombang berdiri (standing wave) antara titik-titik topang, yang dapat menyebabkan putusnya kawat karena letih. Gejala ini dapat terjadi bila kawatnya ringan dan tegangan tariknya besar.

Frekwensi osilasi alamiah dari kawat dinyatakan oleh rumus

$$f_c = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T_o}{W}} \quad (181)$$

sedang frekwensi karena angin oleh rumus

$$f_w = kv/D \quad (182)$$

dimana  $l$  = panjang saluran tertutup (m)

$T$  = tegangan kawat (kg)

$g$  = gravitas (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$W$  = berat kawat (kg/m)

$v$  = kecepatan angin (m/s)

$k$  = konstanta (dianggap = 185)

Resonansi terjadi bila

$$f_c = f_w \quad (183)$$

sedang panjang rangkaian resonansi dihitung dari rumus

$$l = \frac{D}{2kv} \sqrt{\frac{T_o}{W}} \quad (184)$$

Untuk menghilangkan getaran dipasang peredam (dampers) yang bertugas menyerap tenaga getaran tadi. Kecuali itu untuk menguatkan kawat pada titik-titik topang-

nya dipasang batang pelindung (armor rods). Pada umumnya, pemutusan kawat karena getaran tidak akan terjadi bila tegangan harian (everyday stress, disingkat EDS) tidak melebihi harga-harga tersebut dalam Tabel 42. Karena tekanan angin yang relatif rendah, maka pemutusan kawat karena getaran diperkirakan tidak akan terjadi di Indonesia.

**Tabel 42. Batas Harga Tegangan Harian (EDS) sehingga Tidak Terjadi Pemutusan Kawat karena Letih**

Kawat	Saluran Tanpa Pengamanan	Saluran dengan Batang Pelindung	Saluran dengan Peredam	Saluran dengan Batang Pelindung dan Peredam
Tembaga	26	—	—	—
ACSR	18	22	24	24
Aluminium	17	—	—	—
Aldrey	18	—	26	—
Baja				
(i) Pengapit Kaku	11	—	—	—
(ii) Pengapit Osilasi	13	—	—	—

## 8.3 Pemilihan Konstruksi Penopang

### 8.3.1. Jenis Konstruksi

Pemilihan dari segi jenis konstruksi (periksa Bab 4) harus dilakukan secara ekonomis dengan memperhatikan faktor-faktor pentingnya saluran, lintasan penyaluran, pengangkutan serta keadaan cuaca (terutama bila cuaca buruk sering terjadi).

Menara baja biasanya digunakan pada saluran-saluran terpenting di atas 66 kV. Menara baja ini baik sekali terutama karena dapat diandalkan pada beban-beban yang gawat (penampang kawat besar, tarikan besar, angin kencang, gawang lebar) serta memungkinkan penggunaan menara-menara yang lebih tinggi daripada normal untuk keperluan-keperluan tertentu. Daya tahannya biasanya 45 tahun, serta perawatannya sederhana.

Tiang baja lebih rendah kekuatannya dibandingkan dengan menara baja, sehingga digunakan bila beban mekanis tidak besar. Di Jepang tiang baja digunakan untuk saluran transmisi sampai 77 kV dengan gawang kurang dari 150 m. Akhir-akhir ini ada kecenderungan menggantikan tiang baja dengan tiang beton atau tiang kayu, meskipun tiang baja tetap dipakai bila diinginkan masa-tahan yang lebih lama atau bila situasi pengangkutan sulit. Di Eropa dan Amerika Serikat tiang baja bertali (guyed) kadang-kadang dipakai pada saluran tegangan tinggi bila tekanan angin tidak kencang, jalan (route) saluran mudah dan lurus serta karena perawatannya mudah.

Keunggulan tiang beton bertulang dibandingkan dengan konstruksi lainnya adalah karena daya tahannya yang boleh dikatakan permanen. Tetapi karena luar biasa berat-

nya, ia hanya dapat dipakai pada saluran-saluran yang mudah dicapai dengan kendaraan.

Keunggulan tiang kayu adalah karena mudahnya membuat dan harganya murah sekali dibandingkan dengan konstruksi-konstruksi lainnya. Oleh karena itu penerapannya di Indonesia sedang diselidiki dan dikembangkan seluas-luasnya.

### 9 8.3.2. Macam Beban Konstruksi

Perencanaan konstruksi didasarkan atas beban tertentu. Di Jepang ketentuan tentang hal ini diatur dalam standar-standar. Untuk menara baja dikenal klasifikasi berikut:<sup>7)</sup>

- (1) Menara singgung (Jenis A): dipasang menurut garis lurus, dengan bagian yang bersudut mendatar kecil (biasanya  $3^\circ$  untuk gawang standar).
- (2) Menara sudut (Jenis B dan C): dipasang dengan sudut mendatar tertentu; jenis B sudutnya  $20^\circ$  dan jenis C sudutnya  $30^\circ$ .
- (3) Menara ujung (Jenis D): dipasang pada ujung (dead end) semua kawat penghantar dan kawat tanah, sehingga perlu memiliki ketahanan yang besar.
- (4) Menara penegang (tension towers): digunakan sebagai penguat (reinforcement) di beberapa tempat pada saluran, yaitu bila pada menara singgung terjadi tarikan yang tidak seimbang karena perbedaan lebar gawang yang bersampingan.
- (5) Menara khusus: digunakan pada penyeberangan sungai atau lembah atau bila dipandang perlu.

Penerapan hal-hal di atas dapat dilihat pada diagram toleransi menara seperti tertera pada Gbr. 66. Dari sini dapat disimpulkan bahwa untuk sesuatu jenis menara makin lebar gawangnya makin kecil sudut mendatarnya.

## 9 8.4 Pembangunan Saluran Udara

### 8.4.1. Survey

9 Pemilihan lintasan yang akan dilalui saluran transmisi merupakan persoalan pokok bagi pembangunan saluran tersebut. Untuk ini perlu diadakan studi dan survey yang mendalam guna memungkinkan pembangunan saluran secara ekonomis dan dapat diandalkan, baik dilihat dari pembangunannya sendiri, maupun dari perawatannya nanti. Faktor-faktor yang terpenting adalah:

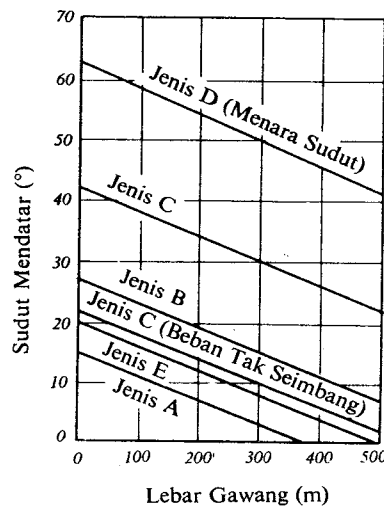
- (1) Keadaan cuaca (angin, hujan, salju, petir, dsb.)
- (2) Keadaan tanah (kemungkinan longsoran, banjir, rawa, dsb.)
- (3) Kondisi pengangkutan (pengangkutan barang dan bahan bagi pembangunan dan perawatan).
- (4) Letak terhadap bangunan-bangunan lain (saluran telekomunikasi, simpangan jalan raya, jalan kereta api, dsb.).
- (5) Bangunan perumahan (dijauhkan dari perumahan manusia).

Dari hasil survey ditentukan tinggi konstruksi, jenis menara dan cara menggantung kawat-kawat penghantarnya. Pada pokoknya kegiatan survey itu meliputi hal-hal berikut:

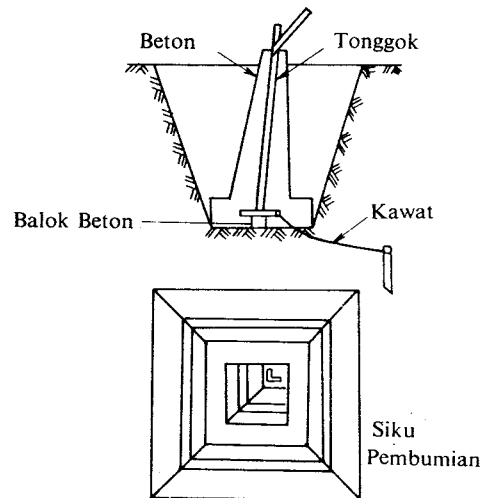
- (a) Survey garis pusat: di sini garis pusat (centerline) saluran ditetapkan; demikian pula kedudukan konstruksi penopangnya terhadap garis pusat tersebut.
- (b) Survey profil: di sini perbedaan tinggi permukaan tanah dan lebar gawang

(penampang tegak) ditetapkan sepanjang garis pusat tadi.

- (c) Survey tampak atas (plan survey): keadaan 50 – 100 m di kiri kanan garis pusat diperiksa.
- (d) Survey lokasi menara (tower site study): di sini jumlah tanah galian, cara pembuatan pondasi, dsb. diselesaikan.
- (e) Survey khusus: yang dilakukan adalah penyelidikan khusus dalam penyeberangan sungai, pertemuan dengan saluran lain, perhitungan induksi elektromagnetik terhadap saluran komunikasi, dsb.



Gbr. 66 Diagram Toleransi Menara.



Gbr. 67 Pondasi Beton dengan Penggalian Biasa.

#### 4.2. Pondasi Menara dan Tiang Baja

Pekerjaan-pekerjaan pondasi yang terpenting meliputi pemberian tanda-tanda, penggalian, pemasangan tonggok (stub setting), pengecoran beton, pengurukan, dsb.

Pemberian tanda-tanda (staking) dilakukan menurut rencana pondasi dengan mengingat tanda pusat (center peg) dari menara dan saluran.

Penggaliannya dilakukan dengan berbagai cara tergantung dari kondisi tanahnya. Dalam-penggalian serta lebar dasar lobangnya harus sesuai dengan yang telah direncanakan. Ada lima cara penggalian:

- (1) Penggalian biasa (plain excavation), yaitu penggalian biasa, tanpa persyaratan tertentu; kemiringan tebingnya tertentu, periksa Gbr. 67.
- (2) Penggalian dengan penguatan kayu (timbering excavation), yaitu dengan menanamkan balok-balok kayu ke dalam tanah agar tidak terjadi kelongsoran waktu penggalian; diterapkan bila tanahnya mudah longsor dan mengeluarkan air.
- (3) Penggalian dengan tong kayu (pail excavation), dilakukan bila tanahnya mudah longsor dan banyak sekali mengeluarkan air. Sebuah tong kayu tanpa dasar dipasang dan penggaliannya dilakukan di dalam air. Akhirnya dicor beton pada dasar tong ini untuk menghentikan aliran air tersebut.
- (4) Penggalian dengan tabung silinder (case excavation), dilakukan untuk penggalian di sungai, bila cara dengan ember tidak mungkin. Di sini sebuah tabung

silinder tanpa dasar yang dibuat dari beton bertulang ditempatkan dan penggaliannya dilakukan di dalam tabung itu. Tabung itu sendiri dibenamkan ke dalam sungai dengan beban mekanis, periksa Gbr. 68.

- (5) Penggalian sumber (well point excavation), dilakukan pada tanah pasir yang berair. Sejumlah pipa ditanam di dalam tanah di sekitar tempat yang akan digali. Kemudian air yang dikandung di dalam tanah disedot dari pipa-pipa tadi oleh sebuah pompa. Bila tanahnya sudah kering maka penggaliannya dapat dilakukan dengan cara (1).

Tahap berikutnya adalah pemasangan tonggok (stub). Tonggok ini dipasang pada balok beton yang ditempatkan pada dasar pondasi (periksa Gbr. 67). Bila tanahnya tidak kokoh atau bila pondasinya berkisi (grillage), maka ditambahkan pecahan batu sebagai penguat. Bila kondisi tanah buruk, maka dipasang pancang-pancang (piles) untuk menguatkan pondasinya.

Pekerjaan beton terdiri dari pengecoran campuran semen, pasir, kerikil (atau pecahan batu) dan air dalam perbandingan tertentu dalam cetakan plat baja atau kayu.

Pengurukan kembali penting artinya bagi kekuatan pondasi. Karena itu dalam pengurukan kembali tanahnya harus dientakkan (rammed) sebaik-baiknya dengan tanah aslinya.

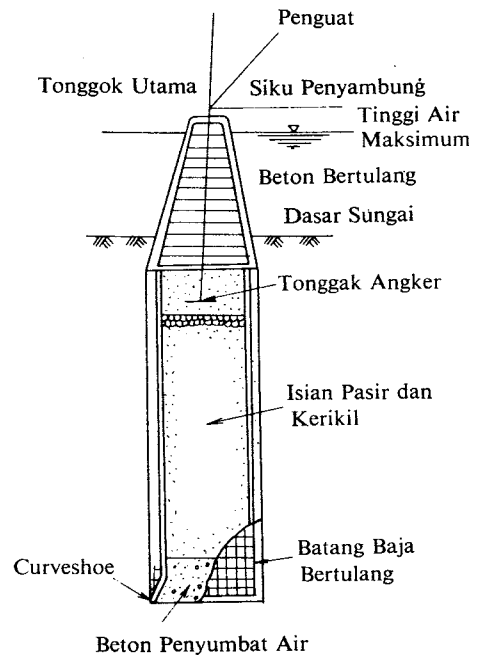
#### 9 8.4.3. Pendirian Tiang dan Menara Baja

Bila pondasinya selesai, bagian atas konstruksi didirikan. Ada dua cara pendiriannya:

- (a) Cara menyusun ke atas (assemble).
- (b) Cara menarik ke atas (pulling up).

Dalam cara pertama menara disusun ke atas bagian demi bagian. Setiap bagian digantung dengan pengangkat (lifting rod) untuk kemudian disekerup, bagian yang satu diatas yang lain.

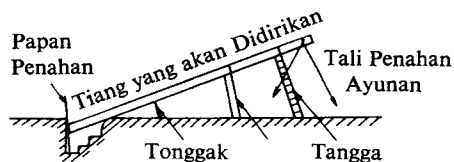
Cara lain adalah dengan lebih dahulu menyekerup bagian-bagiannya satu sama lain di tanah, untuk kemudian seluruh menaranya didirikan dengan keran atau mesin pengangkat lain (winch). Cara ini tepat guna pemakaian dimana alat-alat pengangkat berat semacam itu mudah diadakan serta mudah dibawa ke tempat-tempat pendirian menara. Di daerah pegunungan yang sukar dicapai bagian-bagian menara diangkut dengan helikopter lalu disusun di tempat dimana menara akan didirikan.



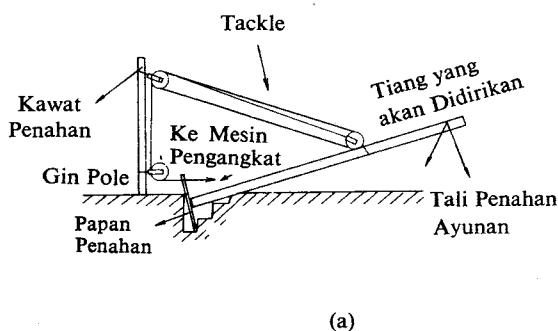
Gbr. 68 Penggalian Tabung Pondasi.

#### 8.4.4. Pendirian Tiang Kayu dan Tiang Beton

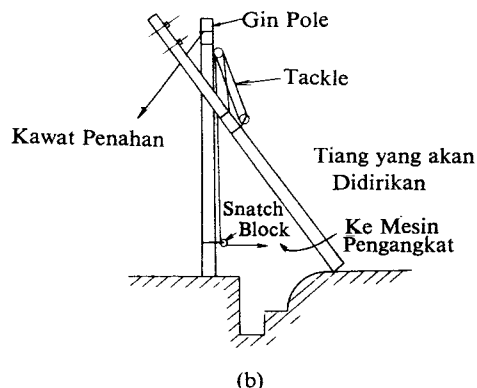
Untuk mendirikan tiang kayu atau tiang beton penggaliannya dapat dilakukan dengan cara-cara biasa. Bila kondisi tanah cukup baik dan daerahnya dapat dicapai dengan kendaraan, penggalian dapat dilakukan dengan mesin bor (auger machine). Tiang-tiang didirikan dengan menegakkannya (building-up; periksa Gbr. 69) atau dengan cara menggantungkannya (hanging-in; periksa Gbr. 70). Bila kendaraan dapat masuk mobil katrol dapat dipakai. Palang-palang (cross-arm, travers) dan pasangan (fittings) dapat dipasang sebelum tiang didirikan, terutama bila tidak terlalu ruwet. Namun, biasanya karena berbagai kesulitan, pasangan-pasangannya dipasang sesudah tiang didirikan.



Gbr. 69 Cara Mendirikan Tiang dengan Menegakkannya.



(a)



(b)

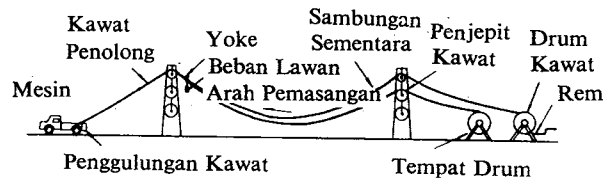
Gbr. 70 Dua Cara Mendirikan Tiang dengan Menggantungnya.

#### 8.4.5. Pemasangan Kawat

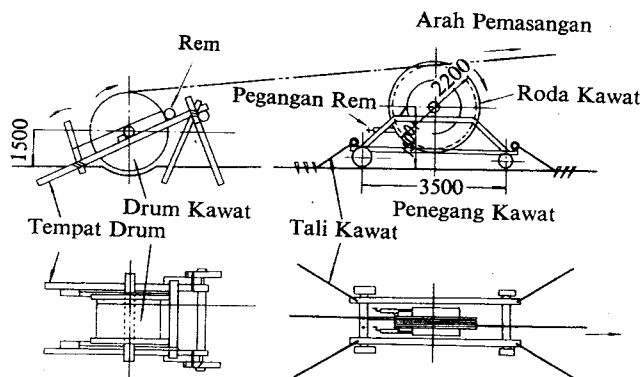
Kawat mula-mula dipasang pada tiang, kemudian ditarik sampai suatu ketegangan tertentu. Pemasangannya biasanya dilakukan untuk bagian saluran yang panjangnya k.l. 3 km. Salah satu cara dalam penarikan kawat adalah menariknya dengan mesin melalui penjepit kawat (snatch block) yang terpasang pada setiap lengan menara; periksa Gbr. 71. Kawat-kawat itu ditarik oleh mesin dengan bantuan kawat penolong (messenger wire). Cara lain adalah dengan merentangkan kawat di tanah, lalu mengangkatnya ke atas tiang. Cara kedua ini dapat merusak kawat ACSR, dan karenanya jarang dipakai.

Agar supaya tidak terjadi kerusakan kawat karena menggores tanah digunakan penegang kawat (tensioner); periksa Gbr. 72. Bila kawat menyeberangi saluran-saluran lain (transmisi, telpon) atau jalan (raya, kereta api) perlu diadakan pengamanan seperlunya agar kawat penghantar maupun kawat penolong tidak mengenai saluran-saluran tadi.

Pekerjaan penegangan dilakukan pada setiap bagian saluran dimana gandengan isolator penegang terpasang pada menara-menara sudut maupun menara-menara penegang; periksa Gbr. 73. Satu ujung kawat dipasang pada gandengan isolator pene-

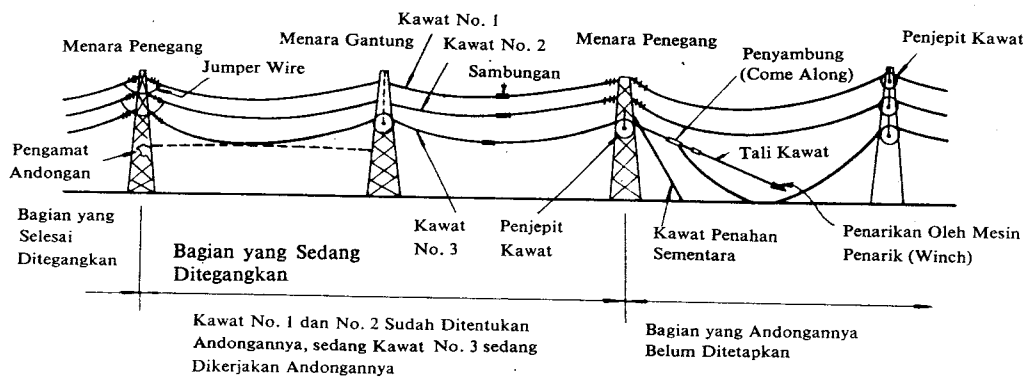


Gbr. 71 Cara Pemasangan Kawat.



Gbr. 72 Pasangan Drum dan Penegang Kawat.

gang (tension insulator string), sedang ujung lainnya ditarik oleh sebuah mesin penarik (winch) sampai suatu andongan tertentu. Ujung ini kemudian dihubungkan dengan gandingan isolator penegang yang lain. Sesudah kawatnya cukup tegang, ia dipindahkan pada gandingan isolator gantung dari penjepit kawat pada menara gantung. Sesudah itu peredam dan batang perisai dipasang.



Gbr. 73 Cara Menegangkan Kawat.



### Contoh:

Transmisi panjang mempunyai beban 60 MVA pada tegangan 154 kV, 50 Hz; 0,8 lagging.

Transmisi mempunyai besaran? per fas: admittance  
 $R = 25,3 \Omega$  (total);  $X = 66,5 \Omega$  (total); ~~capacitance~~

$$Y = j 0,442 \cdot 10^{-3} \text{ mho}$$

Tentukan:

- constant, A, B, C dan D.
- Tegangan, arus dan  $\cos \phi$  di penerima.
- efisiensi transmisi.
- Tegangan tanpa beban dan regulasi tegangan.

jawab:

$$\text{a) } Z = 25,3 + j 66,5 \Omega$$

$$Y = j 0,442 \cdot 10^{-3} \text{ mho}$$

$$\begin{aligned}\sqrt{ZY} &= \sqrt{(25,3 + j 66,5) j 0,442 \cdot 10^{-3}} \\ &= 0,0327 + j 0,174\end{aligned}$$

$$\sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{25,3 + j 66,5}{j 0,442 \cdot 10^{-3}}}$$

$$= 393 - j 72,3$$

$$A = \cosh \sqrt{ZY} = \cosh (0,0327 + j 0,174)$$

$$= 0,9855 + j 0,00553$$

$$A = D = 0,986 \angle 0,32^\circ$$

$$\begin{aligned}\ast \cosh \sqrt{ZY} &= \cosh (a + j b) \\ &= \cosh a \cdot \cos b + j \sinh a \cdot \sin b.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\ast \sinh \sqrt{ZY} &= \sinh (a + j b) \\ &= \sinh a \cdot \cos b + j \cosh a \cdot \sin b.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\ast \sinh a &\rightarrow \sinh 0,0327 \Rightarrow \\ &\text{tabel hyp} \rightarrow \text{tabel sin tulis } 0,0327 =\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sinh \sqrt{ZY} &= \sinh (0,0327 + j 0,174) \\ &= 0,0315 + j 0,1728\end{aligned}$$

$$B = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \cdot \sinh \sqrt{ZY}$$

$$= (393 - j72,3)(0,0315 + j0,1728)$$

$$= 25 + j65,6$$

$$B = 70,3 \angle 69,2^\circ$$

$$C = \frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{Z/Y}} = \frac{0,315 + j0,1728}{393 - j72,3}$$

$$= (0,00813 + j4,44) \cdot 10^{-4}$$

$$\approx j4,44 \cdot 10^{-4}$$

$$C = 4,44 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ$$

Bj. Beban 60 MVA, 154 kV (L-L).

$$I_r = \frac{60.000}{\sqrt{3} \cdot 154} = 225 \text{ Amp}$$

$I_r$  sebagai referensi:

$$I_r = 225 \angle 0^\circ \text{ Amp}$$

$$V_r = \frac{154}{\sqrt{3}} \angle 36,9^\circ \text{ kV/phase}$$

$$= 88,8 \angle 36,9^\circ \text{ kV/phase}$$

$$V_s = A V_r + B \cdot I_r$$

$$= (0,986 \angle 0,32^\circ)(88,8 \angle 36,9^\circ) + \frac{70,3 \angle 69,2^\circ \cdot 225}{1000}$$

$$= 75,32 + j67,58 \text{ kV}$$

$$= 101,2 \angle 41,9^\circ \text{ kV}$$

$$V_{s(L-L)} = 101,2 \angle 41,9^\circ \cdot \sqrt{3}$$

$$= 175,5 \text{ kV}$$

$$I_s = C V_r + D I_r$$

$$= (0,44 \cdot 10^{-4} \angle 90^\circ)(88,800 \angle 36,9^\circ) + (0,986 \angle 0,32^\circ)(225 \angle 0^\circ)$$

$$= 219,66 + j4,34$$

$$= 219,7 \angle 1,1^\circ \text{ Amp}$$

$$\theta_s = 41,9^\circ - 1,1^\circ = 40,8^\circ$$

$$\cos \theta_s = \cos 40,8^\circ = 0,757 \text{ lagging}$$

ej Tegangan input :

$$P_s = \sqrt{3} \cdot 175,5 \cdot 219,7 \cdot 0,757$$

$$= 50.600 \text{ kW}$$

$$P_r = 60.000 \cdot 0,8$$

$$= 48000 \text{ kW}$$

$$\text{eff} = \frac{48000}{50.600} \cdot 100$$

$$= 94,8\%$$

$$\text{dj. } V_r(L-L) \text{ tanpa beban} = \frac{V_s(L-L)}{A}$$

$$= \frac{175,5}{0,986} = 178 \text{ kV}$$

$$VR\% = \frac{V_{r \text{ tanpa beb}} - V_r}{V_r}$$

$$= \frac{178 - 154}{154}$$

$$= 15,4\%$$

Contoh 5.1. Saluran transmisi 60-Hz rangkaian tunggal panjangnya 370 mi (230 mi). Penghantarnya adalah dari jenis Rook dengan jarak pemisah mendatar rata dan 7,25 m (23,8 kaki) antara penghantar. Beban pada saluran itu adalah 125 MW pada 215 kV dengan faktor daya 100%. Hitunglah tegangan, arus, daya pada ujung pengirim saluran dan regulasi tegangan dari saluran. Tentukanlah juga panjang gelombang dan kecepatan rambat dari saluran.

JAWABAN: Kita pilih kaki dan mil dan bukannya meter dan kilometer untuk hitungan kita supaya kita dapat memakai Tabel A.1 – A.3.

$$D_{eq} = \sqrt[3]{23,8 \times 23,8 \times 47,6} \cong 30,0 \text{ ft}$$

dan dari tabel untuk Rook A1  $\times a \times d$   $A_2 = 0,2799 \log D$

$$z = 0,1603 + j(0,415 + 0,4127) = 0,8431 / 79,04^\circ \Omega/\text{mi}$$

$$y = j[1/(0,0950 + 0,1009)] \times 10^{-6} = 5,105 \times 10^{-6} / 90^\circ \text{ S/mi}$$

$$\begin{aligned} \gamma l &= \sqrt{yzl} = 230 \sqrt{0,8431 \times 5,105 \times 10^{-6}} / \frac{79,04^\circ + 90^\circ}{2} \\ &= 0,4772 / 84,52^\circ = 0,0456 + j0,4750 \end{aligned}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{0,8431}{5,105 \times 10^{-6}}} / \frac{79,04^\circ - 90^\circ}{2} = 406,4 / -5,48^\circ \Omega$$

$$V_R = \frac{215.000}{\sqrt{3}} = 124,130 / 0^\circ \text{ V ke netral}$$

$$I_R = \frac{125.000.000}{\sqrt{3} \times 215.000} = 335,7 / 0^\circ \text{ A}$$

Dari Persamaan (5.40) dan (5.41)

$$\begin{aligned} \cosh \gamma l &= \cosh 0,0456 \cos 0,475 + j \sinh 0,0456 \sin 0,475 \\ &= 1,0010 \times 0,8892 + j0,0456 \times 0,4573 \\ &= 0,8902 + j0,0209 = 0,8904 / 1,34^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sinh \gamma l &= \sinh 0,0456 \cos 0,475 + j \cosh 0,0456 \sin 0,475 \\ &= 0,0456 \times 0,8893 + j1,0010 \times 0,4573 \\ &= 0,0405 + j0,4578 = 0,4596 / 84,94^\circ \end{aligned}$$

Kemudian dari Persamaan (5.35)

$$\begin{aligned} V_S &= 124,130 \times 0,8904 / 1,34^\circ + 335,7 \times 406,4 / -5,48^\circ \times 0,4596 / 84,94^\circ \\ &= 110.495 + j2.585 + 11.480 + j61.642 \\ &= 137.851 / 27,77^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

dan dari Persamaan (5.36)

$$\begin{aligned} I_S &= 335,7 \times 0,8904 / 1,34^\circ + \frac{124,130}{406,4 / -5,48^\circ} \times 0,4596 / 84,94^\circ \\ &= 298,83 + j6,99 - 1,03 + j140,33 \\ &= 332,27 / 26,33^\circ \end{aligned}$$

$$\dagger 0,475 \text{ rad} = 27,2^\circ$$

Pada ujung pengirim

$$\begin{aligned} \text{Tegangan saluran} &= \sqrt{3} \times 137,85 = 238,8 \text{ kV} \\ \text{Arus saluran} &= 332,3 \text{ A} \\ \text{Faktor daya} &= \cos(27,78^\circ - 26,33^\circ) = 0,9997 \cong 1,0 \\ \text{Daya} &= \sqrt{3} \times 238,8 \times 332,3 \times 1,0 = 137.440 \text{ kW} \end{aligned}$$

Dari Persamaan (5.35) kita lihat bahwa dalam keadaan tanpa beban ( $I_R = 0$ )

$$V_R = \frac{V_S}{\cosh \gamma l}$$

3	Bel
2	Bel

Jadi regulasi tegangan adalah

$$\frac{137,85/0,8904 - 124,13}{124,13} \times 100 = 24,7\%$$

Panjang gelombang dan kecepatan rambat dihitung sebagai berikut:

$$\beta = \frac{0,4750}{230} = 0,002065 \text{ rad/mi}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{0,002065} = 3043 \text{ mi}$$

$$\text{Kecepatan} = f\lambda = 60 \times 3043 = 182.580 \text{ mi/s}$$

Dalam contoh ini terutama harus kita perhatikan bahwa dalam persamaan untuk  $V_S$  dan  $I_S$ , nilai tegangan harus dinyatakan dalam volt dan tegangannya haruslah tegangan dari saluran ke netral.

**Contoh 5.2.** Carilah penyelesaian tegangan dan arus ujung pengirim yang ditemukan dalam Contoh 5.1 dengan menggunakan perhitungan-perhitungan per satuan.

**JAWABAN:** Kita pilih 125 MVA, 215 kV sebagai dasar untuk mendapatkan nilai-nilai per-satuan yang paling sederhana dan kita hitung impedansi dasar dan arus dasar sebagai berikut:

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(215)^2}{125} = 370 \Omega$$

$$\text{Arus dasar} = \frac{125.000}{\sqrt{3} \times 215} = 335,7 \text{ A}$$

Jadi,

$$Z_c = \frac{406,4/-5,48^\circ}{370} = 1,098/-5,48^\circ \text{ per satuan}$$

$$V_R = \frac{215}{215} = \frac{215/\sqrt{3}}{215/\sqrt{3}} = 1,0 \text{ per satuan}$$

Untuk digunakan dalam Persamaan (5.35) kita pilih  $V_R$  sebagai tegangan acuan (reference). Jadi

$V_R = 1,0/0^\circ$  per satuan (sebagai tegangan saluran ke netral)  
dan karena beban mempunyai faktor daya 1

*Hubungan Arus dan Tegangan pada Saluran Transmisi*

99

$$I_R = \frac{337,5/0^\circ}{337,5} = 1,0/0^\circ$$

Jika faktor daya kurang dari 100%,  $I_R$  akan lebih besar dari 1,0 dan akan berada pada suatu sudut yang ditentukan oleh faktor daya.

Dari Persamaan (5.35)

$$\begin{aligned} V_S &= 1,0 \times 0,8904 + 1,0 \times 1,098/-5,48^\circ \times 0,4596/84,94^\circ \\ &= 0,8902 + j0,0208 + 0,0923 + j0,4961 \\ &= 1,1102/27,75^\circ \text{ per satuan} \end{aligned}$$

dan dari Persamaan (5.36)

$$\begin{aligned} I_S &= 1,0 \times 0,8904/1,34^\circ + \frac{1,0/0^\circ}{1,098/-5,48^\circ} \times 0,4596/84,94^\circ \\ &= 0,8902 + j0,0208 - 0,0031 + j0,4186 \\ &= 0,990/26,35^\circ \text{ per satuan} \end{aligned}$$

Pada ujung pengirim

$$\text{Tegangan saluran} = 1,1102 \times 215 = 238,7 \text{ V}$$

$$\text{Arus saluran} = 0,990 \times 335,7 = 332,3 \text{ A}$$

Perhatikanlah bahwa kita mengalikan tegangan dasar antar-saluran dengan besar-

0 kw

( $I_R = 0$ )

kut:

mi

s

a dalam persamaan  
t dan tegangannya

Ynu