

TRANSMISI DAYA

SALURAN transmisi membawa tenaga listrik dari pusat-pusat pembangkitan ke pusat-pusat beban melalui saluran tegangan tinggi 150 kV, atau melalui saluran ekstra tegangan tinggi 500 kV. Trafo penurunan akan merendahkan tegangan ini menjadi tegangan subtransmisi 70 kV, yang kemudian di gardu induk (GI) diturunkan lagi menjadi tegangan distribusi primer 20 kV. Pada gardu induk distribusi yang tersebar di pusat-pusat beban, tegangan diubah oleh trafo distribusi menjadi tegangan rendah 220/380 V; lihat Gambar 1.6.

Peningkatan tegangan pada saluran transmisi mempunyai nilai ekonomis yang sangat penting, mengingat keuntungan-keuntungan sebagai berikut:

- (a) Untuk penyaluran daya yang sama, arus yang dialirkan menjadi berkurang. Ini berarti penggunaan bahan tembaga pada kawat penghantar akan berkurang dengan bertambah tingginya tegangan transmisi.
- (b) Luas penampang konduktor yang digunakan berkurang, karena itu struktur penyangga konduktor menjadi lebih kecil.
- (c) Oleh karena arus yang mengalir di saluran transmisi menjadi lebih kecil, maka jatuh tegangan juga menjadi lebih kecil.

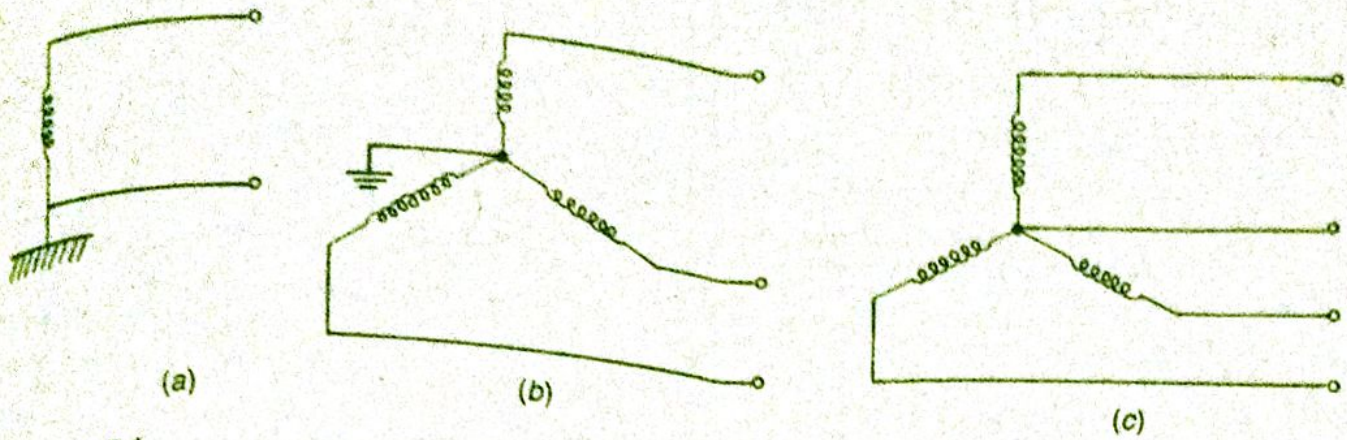
Akan tetapi, dengan bertambah tingginya tegangan transmisi, berarti jarak bebas antara kawat penghantar harus lebih lebar, panjang gandengan isolator harus lebih besar, yang berarti meningkatnya biaya menara dan konstruksi penopang.

Dilihat dari jenisnya, dikenal dua macam saluran transmisi yaitu:

- (1) Saluran udara (*overhead line*), yang menyalurkan tenaga listrik melalui kawat-kawat yang digantungkan pada tiang-tiang transmisi dengan perantara isolator.
- (2) Saluran bawah tanah (*underground*), yang menyalurkan tenaga listrik melalui kabel bawah tanah.

Meskipun saluran bawah tanah lebih aman dan sesuai dengan persyaratan estetis, namun biaya pembangunannya jauh lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara, di samping bila terjadi gangguan hubungan singkat dan lain

sebagainya, perbaikannya juga lebih sukar dilakukan. Energi listrik arus bolak-balik dapat disalurkan dengan cara-cara (perhatikan Gambar 9.1a, b, dan c): (a) fasa-tunggal, dua kawat, (b) fasa-tiga, tiga kawat, (c) fasa-tiga, empat kawat.



Gambar 9.1

Saluran transmisi dengan menggunakan sistem arus bolak-balik tiga fasa merupakan sistem yang banyak digunakan saat ini mengingat beberapa kelebihan sebagai berikut:

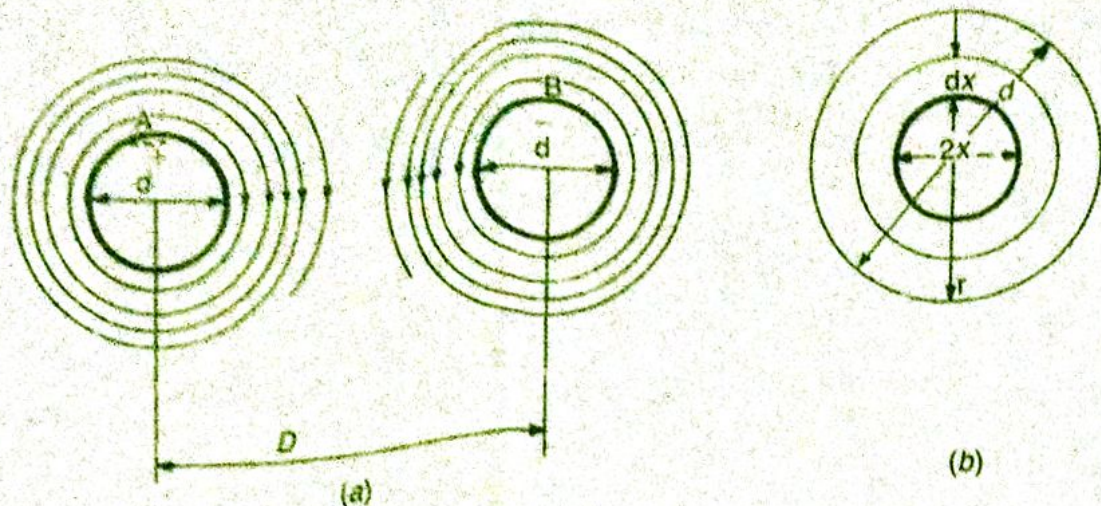
- (a) mudah pembangkitannya (generator sinkron);
- (b) mudah pengubahan tegangannya (transformator);
- (c) dapat menghasilkan medan magnet putar;
- (d) dengan sistem tiga fasa, daya yang disalurkan lebih besar dan nilai sesaatnya konstan.

Di beberapa bagian dunia, saluran transmisi dengan sistem arus searah, akhir-akhir ini juga sudah banyak digunakan. Saluran transmisi arus searah meskipun mempunyai beberapa keuntungan seperti: isolasinya yang lebih sederhana, daya guna (efisien) yang tinggi (karena faktor dayanya = 1.0) serta tidak ada masalah stabilitas, namun persoalan ekonominya masih perlu diperhitungkan. Mahalnya sistem saluran arus searah terutama disebabkan karena pada sistem ini diperlukan biaya peralatan pengubah arus: inverter dan konverter, yang cukup tinggi.

Pada bab ini akan diuraikan beberapa aspek penting permasalahan saluran transmisi, antara lain yang menyangkut: konstanta saluran, karakteristik penyaluran daya, pengaturan tegangan sistem serta aliran daya nyata dan reaktif.

INDUKTANSI SALURAN

Induktansi, di samping tahanan dan kapasitansi saluran transmisi, dinamakan konstanta saluran dan merupakan bagian penting dalam perhitungan karakteristik saluran. Gambar 9.2a memperlihatkan dua konduktor dengan diameter d , dipisahkan antara keduanya dengan jarak D . Pada kedua konduktor tersebut (A dan B), mengalir arus listrik yang berlawanan arah.



Gambar 9.2

Perhitungan nilai induktansi pada konduktor tersebut, terbagi dalam dua bagian, yaitu: bagian induktansi di dalam konduktor dan bagian induktansi di luar konduktor. Untuk induktansi di dalam konduktor (lihat Gambar 9.2b), kuat medan H dapat dinyatakan dengan:

$$H = \frac{Ix}{2\pi r^2} \text{ ampere/meter}$$

Bila μ_r adalah permeabilitas bahan konduktor, maka kerapatan fluks B adalah:

$$B = \mu_r \mu_o H = \frac{Ix}{2\pi r^2} \mu_r \mu_o \text{ weber/m}^3$$

Garis-garis fluks ϕ untuk cincin kecil dengan lebar dx pada radius x , untuk suatu unit panjang konduktor tertentu adalah:

$$\begin{aligned} d\phi &= B \times \text{luas bidang} \\ &= B \times I \times dx \\ &= \frac{Ix}{2\pi r^2} \mu_r \mu_o dx \end{aligned}$$

Fluks linkages λ untuk luas bidang yang terletak di dalam lingkaran beradius x , adalah:

$$\lambda = \mu_o \mu_r \frac{Ix}{2\pi r^2} \frac{x^2}{r^2} dx$$

Harga λ untuk keseluruhan luas bidang antara 0 dan r dapat dinyatakan dengan harga integralnya:

$$\lambda = \int_0^r \frac{I}{2\pi r^2} \mu_0 \mu_r x^2 dx$$

$$= \mu_0 \mu_r \frac{I}{2\pi r^2} \frac{r^3}{3} = \frac{\mu_0 \mu_r I}{6\pi r}$$

Untuk induktansi di bagian luar konduktor, kuat medan H yang berjarak x meter dari titik pusat konduktor A, tidak hanya dipengaruhi oleh konduktor A tapi juga akan dipengaruhi oleh konduktor B.
Jadi:

$$H = \frac{I}{2\pi x} + \frac{I}{2\pi(D-x)}$$

Meskipun arus yang mengalir pada konduktor arahnya saling berlawanan, tetapi bila diperhitungkan dilakukan pada pertengahan jarak antara kedua konduktor itu, harga kuat medan akan saling menambah

$$B = I \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{D-x} \right)$$

untuk harga fluks dengan ketebalan konduktor dx yang sangat kecil:

$$d\phi = \frac{I \mu_0 \mu_r}{2\pi} dx \times \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{D-x} \right) \text{ weber}$$

Fluks total

$$= \int_r^{D-r} d\phi$$

$$= \int_r^{D-r} \frac{I \mu_0 \mu_r}{2\pi} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{D-x} \right] dx$$

$$= \frac{I}{2\pi} \mu_0 \mu_r [\ln x - \ln(D-x)]_r^{(D-r)}$$

$$= \frac{I}{2\pi} \mu_0 \mu_r \ln \frac{D-r}{r}$$

Jadi fluks linkage untuk masing-masing konduktor dapat dituliskan:

$$\lambda = \frac{1}{2\pi} \mu_0 \mu_r \ln \frac{D-r}{r} \text{ weber}$$

λ untuk bagian dalam dan luar konduktor adalah penjumlahan dari:

$$\frac{\mu_0 \mu_r I}{8\pi} + \frac{1}{2\pi} \mu_0 \mu_r \ln \frac{D-r}{r}$$

Karena induktansi adalah λ /ampere, maka nilai induktansi per konduktor menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 \mu_r}{8\pi} + \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \ln \frac{D-r}{r} \text{ henry} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7}}{8\pi} \left\{ 1 + 4 \ln \frac{D-r}{r} \right\} \text{ H/meter} \\ &= 10^{-7} \left\{ 0.5 + 2 \ln \frac{D-r}{r} \right\} \text{ H/meter} \\ &= \left\{ 0.5 + 4.6 \log_{10} \frac{D-r}{r} \right\} \times 10^{-7} \text{ H/meter} \end{aligned}$$

Pada saluran transmisi tiga fasa, nilai induktansi/fasa adalah sama dengan nilai induktansi per konduktor, yaitu:

$$L = \left\{ 0.5 + 4.6 \log_{10} \frac{D-r}{r} \right\} \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

di mana D adalah jarak antara konduktor dan r adalah radius masing-masing konduktor tersebut. Bila letak konduktor tidak simetris, maka D pada persamaan di atas perlu diganti dengan:

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

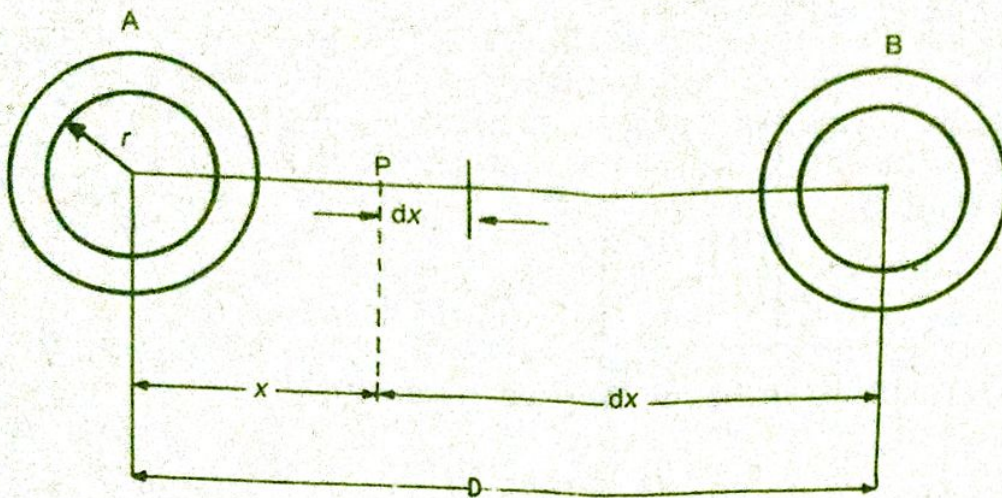
di mana D_{12} , D_{23} , dan D_{31} menunjukkan jarak letak konduktor satu sama lain.

Nilai induktansi L pada persamaan di atas memakai permisalan beban jaringan seimbang. Bila beban tidak seimbang dan letak konduktor tidak simetris, maka

persoalan saluran transmisi tersebut harus dipecahkan dengan menggunakan teori komponen-komponen simetris.

KAPASITANSI SALURAN

Bila pada dua konduktor yang terpisah oleh jarak tertentu, dialirkan arus listrik, maka akan terbentuk fluks elektrostatis dan dua konduktor tersebut berfungsi sebagai kapasitor. Nilai kapasitansinya semata-mata tergantung dari jari-jari konduktor dan jarak antara kedua konduktor tersebut serta tidak dipengaruhi oleh besarnya medan magnet.



Gambar 9.3

Bila pada Gambar 9.3 titik P yang berjarak x meter dari konduktor A, dan berjarak $(D - x)$ dari konduktor B, maka intensitas listrik di titik P yang diakibatkan oleh muatan $+q$ pada konduktor A adalah:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r x} \text{ volt/m arahnya menuju konduktor B}$$

Dengan cara yang sama dapat ditentukan intensitas listrik pada titik P yang dipengaruhi oleh muatan $-q$ pada konduktor B:

$$E = \frac{-q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r (D - x)} \text{ volt/m, arahnya menuju konduktor A}$$

Jadi intensitas total di titik P adalah:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{D - x} \right] \text{ volt/m}$$

Beda potensial antara kedua konduktor tersebut:

$$dV = E dx$$

$$= \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{D-x} \right] dx$$

Jadi

$$V = \int E dx = \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} [\ln x - \ln(D-x)]_r^{D-r}$$

$$= \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left[\ln(D-r) - \ln r - \ln r + \ln(D-r) \right]$$

$$= \frac{q}{\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left[\ln \frac{D-r}{r} \right]$$

Karena nilai D jauh lebih besar daripada nilai r , maka

$$\ln \frac{D-r}{r} \approx \ln \frac{D}{r}$$

Jadi

$$V = \frac{q}{\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{D}{r}$$

Karena $q = CV$, kapasitansi C dapat dihitung:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln D/r} \text{ farad/meter}$$

$$= \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_r}{2.303 \log_{10} D/r} \text{ F/m}$$

Kapasitansi untuk masing-masing konduktor terhadap titik netral adalah:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln D/r} \text{ F/m}$$

Nilai letak konduktor tidak simetris, nilai kapasitansi antara kawat fasa-kawat netral dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}/r)}$$

di mana D_{12} , D_{23} , dan D_{31} menunjukkan jarak letak konduktor satu sama lain.

TAHANAN SALURAN

Nilai tahanan saluran transmisi dipengaruhi oleh resistivitas konduktor, suhu, dan efek kulit (*skin effect*). Tahanan merupakan sebab utama timbulnya rugi tegangan pada saluran transmisi. Dikenal dua macam tahanan, yaitu tahanan arus searah dan tahanan arus bolak-balik. Tahanan arus searah ditentukan oleh nilai resistivitas material konduktor:

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A} \Omega$$

di mana

R_{dc} = tahanan arus searah, Ω

ρ = resistivitas, $\Omega \text{ m}$

l = panjang konduktor, m

A = luas penampang bidang, m^2

Nilai tahanan ini berubah dengan suhu menurut rumus:

$$R_t = R_{t_0} [1 + \alpha(t - t_0)]$$

di mana

R_t = tahanan pada suhu t

R_{t_0} = tahanan pada suhu t_0

α = koefisien suhu massa konstan

Konduktor-konduktor dengan diameter yang besar mempunyai harga tahanan bolak-balik (R_{ac}) yang lebih besar, karena adanya pengaruh efek kulit; namun demikian pengaruhnya kecil sehingga dapat diabaikan. Gejala efek kulit mengakibatkan distribusi arus yang tidak merata pada penampang konduktor. Arus bolak-balik yang mengalir dalam suatu konduktor, cenderung untuk terkonsentrasi pada tepi bagian luarnya atau "kulit"-nya. Oleh karena itu, luas penampang efektif dari konduktor tersebut menjadi berkurang yang menyebabkan nilai efektif tahanan arus bolak-balik pada frekuensi 50 Hz, beberapa persen lebih kecil daripada harga tahanan arus searah.

KARAKTERISTIK PENYALURAN DAYA

Tenaga listrik disalurkan melalui jaringan transmisi dari pusat pembangkit yang disebut pangkal pengiriman, menuju pusat-pusat beban yang disebut ujung penerimaan. Meskipun tenaga listrik disalurkan dengan sistem tiga fasa, tetapi semua perhitungan dilakukan berdasarkan hubungan satu fasa sistem bintang. Dalam mempelajari karakteristik penyaluran daya yang meliputi variabel-variabel tegangan, arus, dan hilang daya, dapat dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan yang berbeda yaitu:

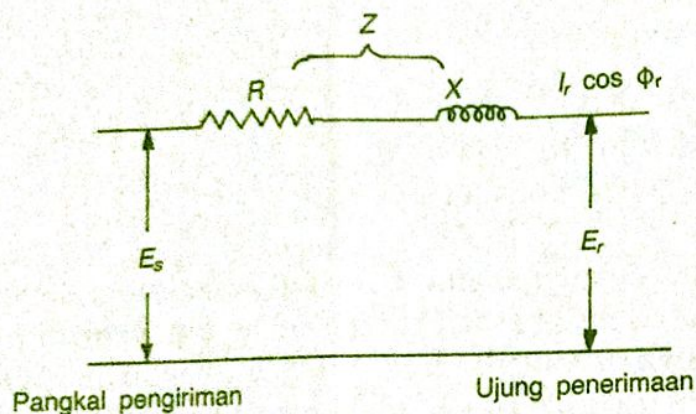
- Rangkaian yang parameter atau konstanta-konstantanya dikonsentrasikan (*lumped*), pendekatan ini digunakan untuk analisis saluran transmisi jarak pendek.
- Rangkaian yang parameter atau konstanta-konstantanya didistribusikan sepanjang saluran transmisi.

Beberapa perhitungan penting untuk analisis transmisi adalah:

- Menghitung perbedaan besaran antara tegangan pada pangkal pengiriman (E_s) dengan tegangan pada ujung penerimaan (E_r).
- Menghitung faktor daya pada pangkal pengiriman dan ujung penerimaan.
- Menghitung daya guna transmisi (daya keluar/daya masuk).

Saluran Transmisi Jarak Pendek

Oleh karena pengaruh kapasitas dapat diabaikan pada saluran transmisi jarak pendek (kurang dari 20 km), maka konstanta saluran yang diperhitungkan hanyalah impedansi yang terdiri atas tahanan dan induktansi, (lihat Gambar 9.4).



Gambar 9.4

$$Z = R + jX$$

$$E_s = E_r + IR \cos \phi_r + IX \sin \phi_r$$

dengan pengaturan tegangan:

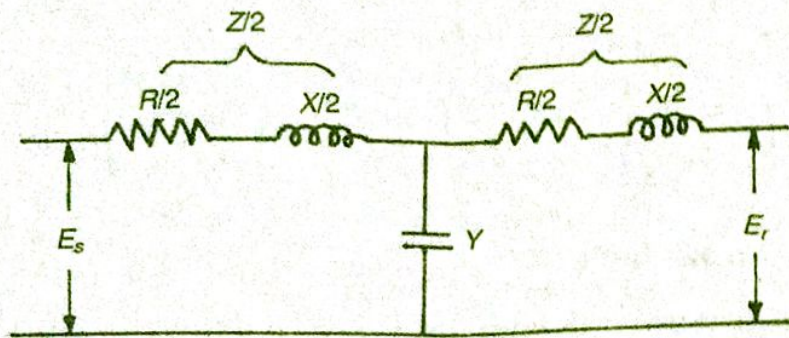
$$\frac{E_s - E_r}{E_r} = \frac{I}{E_r} (R \cos \phi_r + X \sin \phi_r)$$

di mana

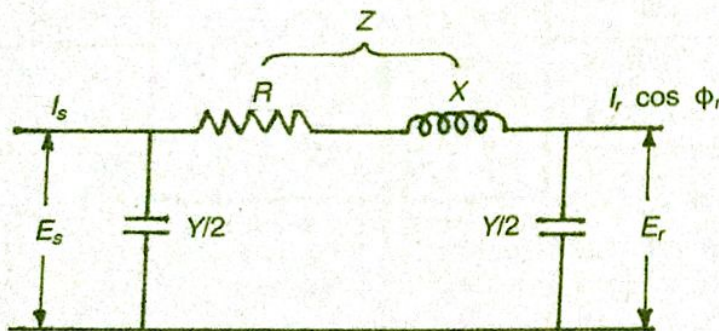
- Z = impedansi saluran
- R = tahanan saluran
- X = induktansi saluran
- E_s = tegangan pangkal pengiriman
- E_r = tegangan ujung panerimaan
- I_r = arus pada ujung penerima
- $\cos \phi_r$ = faktor daya pada ujung penerima

Saluran Transmisi Jarak Menengah

Persoalan saluran transmisi jarak menengah dapat diselesaikan memperlakukannya sebagai rangkaian T atau rangkaian π , periksa Gambar 9.5 dan Gambar 9.6.



Gambar 9.5



Gambar 9.6

Untuk rangkaian T , penggambaran kapasitansi saluran terletak di tengah (lihat Gambar 9.5), dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{E}_s = \dot{E}_r \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \right) + \dot{I}_r \dot{Z} \left(1 + \frac{\dot{E}\dot{Y}}{4} \right)$$

$$\dot{I}_s = \dot{I}_r \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \right) + \dot{E}_r \dot{Y}$$

di mana:

$Y = G + jB =$ admitansi saluran

$G =$ konduktansi saluran

$B =$ suseptansi saluran

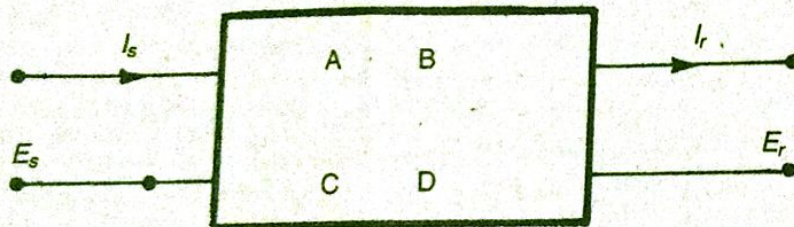
Penggambaran kapasitansi saluran pada rangkaian π adalah dengan cara membaginya menjadi dua, yaitu $C/2$ dan $C/2$ yang diletakkan pada kedua ujung saluran seperti terlihat pada Gambar 9.6. Persamaan untuk rangkaian π adalah:

$$\dot{E}_s = \dot{E}_r \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \right) + \dot{I}_r \dot{Z}$$

$$\dot{I}_s = \dot{I}_r \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \right) + \dot{E}_r \dot{Y} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4} \right)$$

Saluran Transmisi Jarak Jauh

Persoalan saluran transmisi jarak jauh diselesaikan dengan memisalkan kapasitansi saluran itu terbagi rata sepanjang jarak tempat pangkal pengiriman dan ujung penerimaan, sehingga persamaan umum dari suatu jaringan jarak jauh (Gambar 9.7) adalah:



Gambar 9.7

$$\begin{aligned} E_s &= AE_r + BI_r \\ I_s &= CE_r + DI_r \end{aligned}$$

di mana A , B , C , dan D disebut sebagai parameter saluran transmisi dan dapat ditentukan dengan memakai persamaan berikut:

$$A = \frac{E_s}{E_r} ; \text{ untuk nilai } I_r = 0$$

$$B = \frac{E_s}{I_r} ; \text{ untuk nilai } E_r = 0$$

$$C = \frac{I_s}{E_r} ; \text{ untuk nilai } I_r = 0$$

$$D = \frac{I_s}{I_r} ; \text{ untuk nilai } E_r = 0$$

Dengan melakukan pengukuran besarnya masukan (*input*) E_s dan I_s pada keadaan tanpa beban (*no-load*) dan hubungan singkat di ujung penerimaan, parameter saluran transmisi A , B , C , dan D dapat ditentukan. Atau sebaliknya dengan mengetahui parameter-parameter tersebut, nilai-nilai E_s dan I_s di pangkal pengiriman dapat ditentukan. Nilai parameter saluran transmisi dapat juga ditentukan dengan menggunakan perhitungan berikut:

$$A = \cosh \sqrt{yz}$$

$$B = \sqrt{z/y} \sinh \sqrt{yz}$$

$$C = \sqrt{y/z} \sinh \sqrt{yz}$$

$$D = \cosh \sqrt{yz}$$

ALIRAN DAYA NYATA DAN DAYA REAKTIF

Dengan mengetahui besaran dan sudut fasa tegangan-tegangan terminal (E_s dan E_r) serta impedansi suatu saluran transmisi, aliran daya nyata dan daya reaktif dari satu terminal ke terminal lainnya dapat dihitung. Misalkan suatu saluran transmisi hubungan π seperti pada Gambar 9.6 mengalirkan daya dari terminal 1 di sebelah kiri ke terminal 2 di sebelah kanan, maka tegangan fasa masing-masing terminal adalah:

$$\text{Terminal 1 : } V_{an} = V_1 \angle \phi_1$$

$$\text{Terminal 2 : } V_{an} = V_2 \angle \phi_2$$

Impedansi saluran Z dapat dinyatakan dengan nilai admitansinya Y_{12} . Karena nilai Z adalah positif, sudut Y_{12} adalah negatif:

$$1/Z = Y_{12} = G - jB$$

Daya kompleks yang mengalir dari terminal 1 ke terminal 2 adalah penjumlahan cabang *shunt* pada terminal 1 dan cabang seri yang menghubungkan terminal 1 dan 2. Daya kompleks yang mengalir pada cabang *shunt* adalah:

$$\begin{aligned} S_{s1} &= V_1 \angle \phi_1 [(Y/2) (V_1 \angle \phi_1)]^* \\ &= V_1^2 (Y/2)^* \end{aligned}$$

Karena nilai konduktansi dapat diabaikan, maka $Y/2$ semata-mata merupakan nilai reaktif, sehingga S_{s1} hanya terdiri atas daya reaktif. Daya kompleks pada cabang seri adalah:

$$\begin{aligned} S_{12} &= V_1 \angle \phi_1 [V_1 \angle \phi_1 - V_2 \angle \phi_2] Y_{12}^* \text{ atau,} \\ S_{12}^* &= V_1 \angle -\phi_1 (V_1 \angle \phi_1 - V_2 \angle \phi_2) (G - jB) \end{aligned}$$

Setelah melalui perkalian, persamaan di atas dapat dituliskan:

$$\begin{aligned} S_{12}^* &= [V_1^2 G - V_1 V_2 G \cos(\phi_2 - \phi_1) - V_1 V_2 B \sin(\phi_2 - \phi_1)] \\ &\quad + j[-V_1^2 B + V_1 V_2 B \cos(\phi_2 - \phi_1) - V_1 V_2 G \sin(\phi_2 - \phi_1)] \end{aligned}$$

Persamaan di atas dapat diuraikan menjadi bagian daya nyata dan bagian daya khayal sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{12} &= V_1^2 G - V_1 V_2 G \cos(\phi_2 - \phi_1) - V_1 V_2 B \sin(\phi_2 - \phi_1) \\ Q_{12} &= V_1^2 B - V_1 V_2 B \cos(\phi_2 - \phi_1) + V_1 V_2 G \sin(\phi_2 - \phi_1) \end{aligned}$$

V_1 dan V_2 pada bagian daya nyata P_{12} dalam keadaan operasi normal akan mempunyai nilai yang hampir sama, karena itu pendekatan trigonometri berikut dapat dipakai:

$$\begin{aligned} \cos(\phi_2 - \phi_1) &\approx 1.0 \\ \sin(\phi_2 - \phi_1) &\approx (\phi_2 - \phi_1) \end{aligned}$$

Sehingga persamaan P_{12} menjadi sebagai berikut:

$$P_{12} = V_1 (V_1 - V_2) G - V_1 V_2 B (\phi_2 - \phi_1)$$

Mengingat nilai reaktansi induktif saluran transmisi umumnya jauh lebih besar daripada nilai tahanannya, maka B akan jauh lebih besar daripada G . Oleh karena

itu, bagian yang mengandung unsur B dari persamaan P_{12} di atas akan mendominasi aliran daya nyata dari terminal 1 menuju terminal 2:

$$P_{12} = V_1 V_2 B \sin(\phi_2 - \phi_1)$$

Dengan dalih yang sama, aliran reaktif dari terminal 1 menuju terminal 2, akan didominasi oleh:

$$Q_{12} = V_1 B (V_1 - V_2)$$

Dari persamaan P_{12} di atas, dapat diketahui bahwa perubahan kecil yang terjadi pada nilai V_1 dan V_2 tidak akan terlalu berpengaruh, sedangkan perubahan kecil pada nilai ϕ_1 dan ϕ_2 akan sangat mempengaruhi nilai P_{12} . Hal yang sebaliknya berlaku untuk persamaan Q_{12} , sehingga dapat disimpulkan kenyataan-kenyataan berikut:

- (1) Aliran daya nyata pada saluran transmisi dipengaruhi oleh perbedaan sudut fasa dari tegangan terminal E_s dan E_r .
- (2) Aliran daya reaktif pada saluran transmisi dipengaruhi oleh perbedaan besaran dari tegangan terminal E_s dan E_r . Konsep aliran daya kompleks ini akan dibahas lebih terperinci pada Bab 10.

Contoh 1

Transmisi saluran udara satu fasa menghantar 2200 kW pada 66 kV, faktor daya 0.8 terbelakang. Tahanan dan reaktansi induktif keseluruhan masing-masing sebesar 10 dan 50 ohm. Pada keadaan jarak pendek, tentukan:

- (a) Persentase pengaturan;
- (b) Efisiensi saluran transmisi.

Pemecahan

Besarnya tegangan pada sisi penerima $V_R = 66\,000 + j0$ Arus beban penuh $I_L = (2200 \times 1000)/(66\,000 \times 0.8) = 41.66$ ampere. Besarnya arus secara fasor $= 41.66(0.8 + j0.6)$

Tegangan pada sisi pengirim $= V_S = V_R + I_L Z = 66\,000 + j0 + 41.66(0.8 + j0.6)(10 + j15) = 66\,708.2 + j250$

$$|V_S| = \sqrt{66\,708.2^2 + 250^2} = 66\,710 \text{ volt}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ pengaturan} &= \frac{66\,710 - 66\,000}{66\,000} \times 100\% \\ &= 10.8\% \end{aligned}$$

Efisiensi saluran transmisi

$$= \frac{\text{daya pada sisi penerimaan}}{\text{daya pada sisi pengiriman}} \times 100\%$$

$$= \frac{2200}{2200 + 41.66^2 \times 10 \times 10^{-3}} \times 100\%$$

$$= \frac{2200}{2217.35} \times 100\%$$

$$= 99.2\%$$

Contoh 2

Beban seimbang dengan hubungan bintang sebesar $300 + j100\Omega$ disuplai saluran tiga fasa dengan panjang 40 km. Dengan impedansi saluran sebesar $0.6 + j0.7 \text{ ohm/km}$. Tentukanlah besar tegangan pada sisi penerimaan pada saat tegangan pada sisi pengiriman sebesar 66 kV. Bagaimanakah sudut fasa antara tegangan ini? Juga dapatkan efisiensi saluran transmisi.

Pemecahan

$$\text{Besarnya tahanan untuk } 40 \text{ km} = 0.6 \times 40 = 24\Omega$$

$$\text{Besarnya reaktansi untuk } 40 \text{ km} = 0.7 \times 40 = 28\Omega$$

$$\text{Impedansi beban pada hubungan bintang} = 300 + j100$$

$$\text{Tegangan per fasa pada sisi pengiriman} = 38\ 100 \text{ volt}$$

$$\text{Tegangan suplai } V_S = 38\ 100 + j0$$

$$\begin{aligned} \text{Besarnya arus saluran} &= \frac{38\ 100 + j0}{324 + j128} \\ &= 110 \angle -\tan^{-1} 0.4 \text{ ampere} \\ &= 110 \angle -34^\circ \text{ ampere} \end{aligned}$$

Tegangan pada sisi penerimaan

$$V_R = 38\ 100 (110 \angle -34^\circ) (24 + j28)$$

$$V_R = 35\ 590 \text{ volt (bentuk sederhana)}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ pengaturan} &= \frac{38\ 100 - 35\ 590}{35\ 590} \times 100\% \\ &= 7\% \end{aligned}$$

$$\eta \text{ transmisi} = \frac{\text{Daya keluar}}{\text{Daya masuk}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{110^2 \times 300}{110^2 \times 324} \times 100\% \\
 &= 92.6\%
 \end{aligned}$$

Contoh 3

Saluran transmisi 3 ϕ ; 50 Hz, panjang 100 km menghantar 200 MW pada faktor daya 0.9 terbelakang, pada tegangan 110 kV. Besar tahanan dan reaktansi dari saluran per fasa/km berturut-turut 0.2 ohm dan 0.4 ohm. Jika besarnya admitansi kapasitansi 2.5×10^{-7} mho/km. Hitunglah:

- (a) Tegangan dan arus pada sisi pengiriman
 (b) Efisiensi saluran transmisi

Gunakanlah metode rangkaian T (lihat Gambar 9.5)

Pemecahan

Tahanan total untuk panjang kabel 100 km = $0.2 \times 100 = 20$ ohm

Reaktansi total untuk panjang kabel 100 km = $0.4 \times 100 = 40$ ohm

Admitansi kapasitansi total = $2.5 \times 10^{-6} \times 100 = 2.5 \times 10^{-4}$ mho

Besarnya tegangan dari sisi penerimaan per fasa:

$$V_R = 110\,000/\sqrt{3} = 63\,500 + j0 \text{ volt}$$

Besar arus pada sisi penerimaan:

$$I_R = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 110\,000 \times 0.9} = 116.6 \text{ ampere}$$

Karena $Z = 20 + j40$ ohm

Maka tegangan V_{AB} yang melalui kapasitansi = $V_R + I_R Z/2$

$$63\,500 + j0 + 116.6(0.9 - j0.433)(10 + j20)$$

$$= 63\,500 + j0 + 2064 + j1590$$

$$V_{AB} = 65\,564 + j1590 \text{ volt}$$

Arus I_C pada V_{AB} terhubung secara bintang,

$$I_C = (65\,564 + j1590)j2.5 \times 10^{-4}$$

$$= 0.4 + j16.4 \text{ ampere}$$

Arus pada sisi pengiriman $I_S = I_R + I_C$

$$= 116.6(0.9 - j0.433) + (-0.4 + j16.4) \text{ ampere}$$

$$= 104.6 - j34.3$$

$$= 110.1 \angle -18^\circ \text{ ampere}$$

Tegangan pada sisi pengiriman

$$\begin{aligned} &= V_{AB} + \text{jatuh tegangan pada } Z/2 \\ &= 65\,564 + j1590 + (10 + j20)(104.6 - j34.3) \\ &= 65\,564 + j1590 + 1732 + j1750 \\ &= 67\,296 + j3340 \end{aligned}$$

$$|V_s| = 67\,360 \angle 3^\circ \text{ volt}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ pengaturan} &= \frac{67\,370 - 63\,500}{63\,500} \times 100\% \\ &= \frac{3870}{63\,500} \times 100\% \\ &= 6\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rugi-rugi pada saluran transmisi} \\ &= 3(116.6^2 \times 10 + 110.1^2 \times 10) \\ &= 771 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\eta \text{ saluran transmisi} = \frac{200\,000 \times 100\%}{200\,771} = 99.61\%$$

Contoh 4

Saluran transmisi 100 km, 3 fasa, 50 Hz mempunyai tahanan/fasa/km 0.1 ohm, reaktansi/fasa/km 0.8 ohm dan susceptansi/km 10×10^{-6} mho. Jika saluran mensuplai beban sebesar 20 MW pada faktor daya 0.9 terbelakang, pada tegangan 66 kV di sisi penerimaan, tentukanlah dengan metode rangkaian π persentase pengaturan dan efisiensi dari saluran transmisi (rugi-rugi saluran diabaikan).

Pemecahan

$$\text{Total tahanan/fasa} = 0.1 \times 100 = 10 \text{ ohm}$$

$$\text{Total reaktansi/fasa} = 0.8 \times 100 = 80 \text{ ohm}$$

$$\text{Total susceptansi kapasitansi} = 10 \times 10^{-6} \times 100 = 10^{-3} \text{ mho}$$

Di dalam metode rangkaian π , sebagian dari susceptansi berada pada sisi penerimaan dan sebagian lagi pada sisi pengiriman (lihat Gambar 9.6).

$$\text{Tegangan pada sisi penerimaan } V_R = 66\,000 + j0$$

$$\text{Besarnya daya pada sisi penerimaan} = 20\,000 \text{ kW pada faktor daya } 0.9 \text{ terbelakang}$$

Sehingga

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{20\,000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 66\,000 \times 0.9} \\ &= 195 \text{ ampere} \end{aligned}$$

Arus I_R secara vektor dapat ditulis:
 $I_R = 195 (0.9 - j0.433)$
 $= 176 - j84.6$ ampere
 Besar arus kapasitor

$$I_{C1} = (38\ 100) \frac{j10^{-3}}{2}$$

$$I_{C1} = j19.5 \text{ ampere}$$

Arus pada saluran transmisi
 $= 176 - j84.6 + j19.05$
 $= 176 - j65.55$ ampere

Jatuh tegangan pada saluran transmisi
 $= (176 - j65.55)(10 + j50) = 5060 + j8140$

Tegangan pada sisi pengiriman

$$\begin{aligned} V_S &= V_R + I_L Z \\ &= 38\ 100 + j0 + 5060 + j8140 \\ &= 43\ 160 + j8140 \\ &= 43\ 920 / 10.7^\circ \text{ volt} \end{aligned}$$

Arus pada sisi pengiriman

$$\begin{aligned} I_S &= (176 - j65.55) + (-4.1 + j21.0) \\ &= 172 - j44.0 \\ &= 177.5 / -14.5^\circ \text{ ampere} \end{aligned}$$

$$\% \text{ pengaturan} = \frac{43\ 920 - 38100}{38100} \times 100\%$$

$$= 15.1\%$$

Rugi-rugi pada saluran transmisi $= 3 \times 10 \times 10^{-3} = 1150 \text{ kW}$
 η saluran transmisi $= (20\ 000)/(21\ 150) \times 100\% = 94.6\%$.