



BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Tenaga listrik sangat berguna karena tenaga listrik itu dapat dengan mudah ditransportasikan/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 diesel (PLTD), tenaga nuklir (PLTN) dan lainnya.

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 listrik tegangan yang lebih tinggi antara 30 KV sampai 500 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 perelatan juga tinggi.

Penurunan tegangan dari tingkat tegangan transmisi pertama-tama dilakukan pada gardu induk (GI), di mana tegangan diturunkan ke tegangan yang lebih rendah, misalkan : dari 500 KV ke 150 KV atau dari 150 KV ke 70 KV. Kemudian penurunan kedua dilakukan pada gardu induk distribus dari 150 KV ke 20 KV atau dari 70 KV ke 20 KV. Tegangan 20 KV ini disebut tegangan distribusi primer. Pada umumnya saluran transmisi dalam penggunaannya dapat dibagi dua :

1. Saluran udara (overhead lines) adalah saluran transmisi yang menyalurkan tenaga listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada menara atau tiang transmisi dengan perantaraan isolator-isolator, sedangkan kategori kedua



menyalurkan tenaga listrik melalui kabel-kabel yang ditanam di bawah permukaan tanah.

2. Saluran kabel tanah (underground cable) adalah saluran transmisi yang menyalurkan 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.

2.2 Klasifikasi Saluran Transmisi

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.

Behubungan dengan keuntungan-keuntungan, hamper seluruh penyaluran tenaga listrik didunia 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 ekonomisnya 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. ³

2.2.1 Klasifikasi Untuk Keperluan Diagram Pengganti

Untuk keperluan analisa dan perhitungan maka digunakan diagram pengganti. Diagram pengganti biasanya dibagi dalam tiga kelas, yaitu :

- a. Saluran transmisi pendek, dimana transmisi disalurkan dengan jarak sampai dengan 80 Km.
- b. Saluran transmisi menengah, dimana transmisi disalurkan dengan jarak 80 sampai dengan 250 Km.
- c. Saluran transmisi panjang, dimana transmisi disalurkan dengan jarak lebih dari 250 Km.

2.2.2 Klasifikasi Menurut Level Tegangan

Di Indonesia standar tegangan transmisi adalah : 66, 150, 380, dan 500 KV, dan klasifikasi menurut tegangan ini masih belum nyata. Klasifikasi jaringan berdasarkan kelompok level tegangan :

1. Jaringan tegangan ultra tinggi (UHV), diatas 765 KV.
2. Jaringan tegangan extra tinggi (EHV), yaitu jaringan tenaga listrik dengan tegangan diatas 245 KV s/d 765 KV.
3. Jaringan tegangan tinggi (HV), yaitu jaringan tenaga listrik dengan tegangan diatas 35 KV s/d 245 KV.
4. Jaringan tegangan menengah (MV), yaitu jaringan tenaga listrik dengan tegangan diatas 1 KV s/d 35 KV.
5. Jaringan tegangan rendah (LV), yaitu jaringan tenaga listrik dengan tegangan diatas 50 volt s/d 1 KV.
6. Jaringan extra rendah (ELV), yaitu jaringan tenaga listrik dengan tegangan dibawah 50 volt.

³ Hutaeruk, T.S. Prof. Ir. M,Sc., 1996, *Transmisi Daya Listrik*, Jakarta : Erlangga.



2.2.3 Klasifikasi Jaringan Berdasarkan Fungsinya.

Berdasarkan Fungsinya, jaringan transmisi dibagi 5 jaringan yaitu :

1. Jaringan Interkoneksi, yaitu jaringan yang menghubungkan dua jaringan dengan level tegangan yang sama.
2. Jaringan Transportasi, yaitu jaringan tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik secara besar-besaran dari pusat energi ke pusat-pusat beban. Dalam prakteknya jaringan ini disebut jaringan transmisi atau jaringan sub-transmisi.
3. Jaringan Distribusi, yaitu jaringan tenaga listrik yang berfungsi mendistribusikan energi dari pusat beban ke konsumen. Perlu di ingat bahwa jaringan terdiri dari primer dan sekunder.
4. Jaringan Utilitas, yaitu jaringan yang langsung menghubungkan antara sumber energi dengan peralatan yang membutuhkan energi listrik.
5. Jaringan kontrol, yaitu jaringan yang terdapat dalam peralatan beban dan berfungsi untuk pengoperasian alat. ¹⁰

2.3 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 kenaikan isolasi dan biaya peralatan dan gardu. 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 :

¹⁰ Zuhal, 1995, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*.



- a. Tegangan Nominal (KV) : (30)–66–150–220–380–500.
- b. Tegangan Tertinggi (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 diatas disesuaikan dengan rekomendasi Internasional Elecrtotechnical Commission (IEC).²

2.4 Komponen Utama Pada Saluran Transmisi

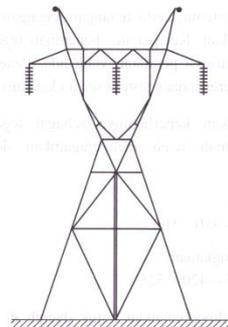
Komponen-komponen utama dari saluran transmisi terdiri dari :

- a. Menara transmisi atau tiang transmisi beserta fondasinya,
- b. Isolator-isolator,
- c. Kawat penghantar (conductor),
- d. Kawat tanah (ground wires).

2.4.1 Menara Atau Tiang Transmisi

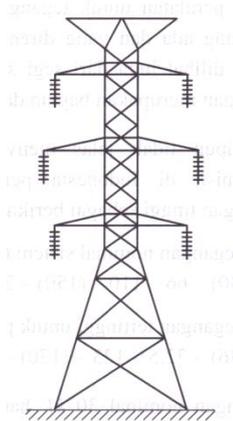
Menara atau tiang transmisi adalah suatu bangunan penopang saluran transmisi, yang bisa berupa menara baja, menara beton bertulang dan menara kayu. Tiang baja, beton atau kayu umumnya digunakan pada saluran dengan tegangan kerja relative rendah (dibawah 70 KV), sedangkan untuk saluran tegangan tinggi atau ekstra tinggi menggunakan menara baja, seperti pada Gambar 2.1.a dan 2.1.b.

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



Gambar 2.1.a Saluran transmisi tunggal

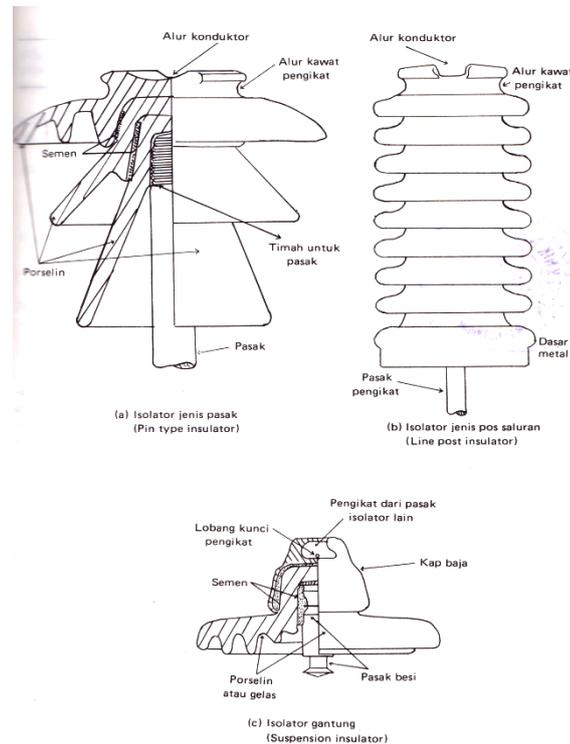
² Cekdin, C. Barlian, T., 2013. *Transmisi Daya Listrik*, Yogyakarta : ANDI.



Gambar 2.1.b Saluran transmisi ganda

2.4.2 Isolator

Isolator berfungsi untuk menggantungkan kawat-kawat penghantar listrik dan sebagai media isolasi listrik yang baik antara kawat yang bertegangan tinggi dengan menara penyangga. Jenis isolator yang digunakan dalam saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Menurut penggunaan dan konstruksinya dikenal ada tiga jenis isolator, yaitu jenis pasak, isolator jenis pos saluran dan isolator gantung. Isolator jenis pasak dan isolator pas saluran digunakan pada saluran transmisi dengan tegangan kerja yang relative rendah (kurang dari 22-23 KV), sedangkan isolator gantung dapat digandeng menjadi rentang isolator yang jumlahnya disesuaikan dengan kebutuhan. Jenis-jenis isolator ini dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Macam-macam isolator porselin

2.4.3 Kawat Penghantar

Kawat penghantar berfungsi untuk mengalirkan arus listrik dari suatu tempat ke tempat yang lain. Kawat penghantar tembaga mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena produktivitas dan kuat produknya lebih tinggi, tetapi kelemahannya ialah untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat daripada aluminium dan juga harganya lebih mahal. Oleh karena itu kawat aluminium telah menggantikan kawat tembaga. Untuk memperbesar kuat tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (aluminium alloy). Untuk saluran-saluran transmisi, dimana jarak antara dua menara jauh (ratusan meter) yang membutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi maka digunakan kawat penghantar Jenis ACSR (Aluminium conductor steel reinforced) yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja. Penghantar untuk saluran transmisi lewat udara (atas tanah) adalah kawat-kawat tanpa isolasi (bare) yang padat (solid), berlilit (stranded) atau



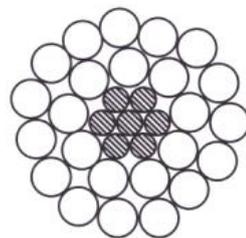
berongga (hollow) dan terbuat dari logam biasa, logam campuran (alloy) atau logam paduan (composite).

Namun biasanya, 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 tembaga mempunyai kelebihan dibandingkan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Kelemahannya, untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan kawat tembaga.

Untuk membesarkan kuat tarik dari kawat aluminium digunakan campuran aluminium (Aluminium Alloy). Untuk saluran transmisi tegangan tinggi, dimana jarak antar tiang/menara jauhnya sampai ratusan meter, maka dibutuhkan kuat tarik yang lebih tinggi. Untuk itu digunakan kawat penghantar ACSR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced) yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran. ³

Gambar 2.3 memperlihatkan penampang dari suatu kawat penghantar ACSR yang banyak digunakan. Penghantar tersebut terdiri dari 7 serat baja/steel (St) yang membentuk inti tengah, sedangkan di sekelilingnya terdapat dua lapisan serat aluminium (Al) dengan 24 serat. Kawat penghantar semacam ini dispesifikasikan sebagai 24Al/7St atau 24/7 saja.



Gambar 2.3 Penampang kawat penghantar ACSR yang terdiri dari 7 serat baja dan 24 serat aluminium ²

³ Hutauruk, T.S. Prof. Ir. M,Sc., 1996, *Transmisi Daya Listrik*, Jakarta : Erlangga.

² Cekdin, C. Barlian, T., 2013. *Transmisi Daya Listrik*, Yogyakarta : ANDI.



2.4.4 Kawat Tanah

Kawat tanah atau ground wires juga disebut dengan kawat pelindung (shield wires) gunannya untuk melindungi kawat-kawat penghantar atau kawat fasa terhadap sambaran petir. Jadi kawat tanah ini dipasang diatas kawat fasa. Sebagai kawat tanah umumnya dipakai kawat baja (steel wires) yang lebih murah tetapi tidaklah jarang digunakan ACSR.³

2.5 Konstanta Saluran Transmisi

Saluran transmisi tenaga listrik yang merupakan sarana penyaluran tenaga listrik yang telah dibangkitkan oleh suatu sistem pembangkit, mempunyai konstanta-konstanta yang dapat mempengaruhi karakteristik dalam menyalurkan tenaga listrik. Adapun konstanta-konstanta tersebut adalah resistansi, induktansi, kapasitansi. Kapasitansi pada saluran transmisi dengan panjang saluran menengah dan tegangan menengah (≥ 150 KV) maka kapasitansi tidak dapat diabaikan. Konstanta-konstanta utama dari saluran transmisi terdiri dari :

- a. Resistansi.
- b. Induktansi.
- c. Kapasitansi.

2.6.1 Resistansi

Resistansi dari penghantar saluran transmisi adalah penyebab yang terpenting dari rugi daya (power loss) pada saluran transmisi. Dalam sistem MKS satuan untuk resistivitas p diberikan dalam ohmmeter (m), panjang dalam meter (m) dan luas dalam meter kuadrat (m²). Sistem yang lain (CGS), p diberikan dalam mikro-ohm-centimeter (μ cm), panjang dalam centimeter (cm) dan luas dalam centimeter kuadrat (cm²).

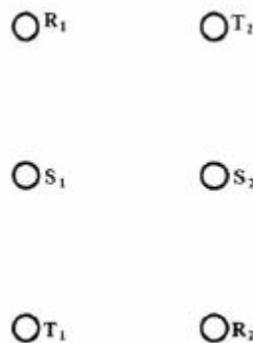
2.6.2 Induktansi

Induktansi saluran yang terdiri dari penghantar-penghantar terpadu, pada keadaan yang sama semua serat adalah identik yang membagi arus rata yang

³ Hutaaruk, T.S. Prof. Ir. M,Sc., 1996, *Transmisi Daya Listrik*, Jakarta : Erlangga.



mengatur di dalamnya. Metode ini dapat diperluas, sehingga berlaku untuk jenis penghantar yang berisi serat-serat dengan ukuran yang berbeda-beda. Metode ini juga menentukan induktansi dan saluran yang terhubung paralel, karena dua penghantar yang terpadu, seperti yang terlihat pada gambar :



Gambar 2.4 Salah Satu Konfigurasi Penghantar dari Saluran Transmisi

Dari gambar 2.4 diatas, memperlihatkan susunan yang khas dari suatu saluran tiga-fasa rangkaian paralel.

2.6.3 Kapasitansi

Kapasitansi suatu saluran transmisi adalah akibat beda potensial antara penghantar (konduktor), kapasitansi menyebabkan penghantar tersebut bermuatan seperti terjadi pada plat kapasitor bila terjadi beda potensial di antaranya. Kapasitansi antara penghantar adalah muatan per-unit beda potensial. Kapasitansi antara penghantar sejajar adalah suatu konstanta yang tergantung pada ukuran dan jarak pemisah antara penghantar. Untuk saluran daya yang panjangnya lebih dari 80 Km (50 mil), pengaruh kapasitansinya besar dan biasanya tidak dapat diabaikan. Untuk saluran-saluran yang lebih panjang dengan tegangan yang lebih tinggi, kapasitansi menjadi bertambah penting. ⁵

2.7 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

⁵ Nasar Syed A, 2006, *Electric Power Systems*.



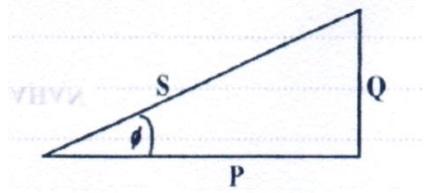
semua perhitungan dilakukan berdasarkan hubungan satu fasa sistem bintang. Dalam mempelajari karakteristik penyaluran daya yang meliputi variabel-variabel tegangan, arus, dan hilang daya, dapat dilakukan dengan menggunakan dua pendekatan yang berbeda, yaitu :

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

Beberapa perhitungan penting untuk analisis transmisi adalah :

- a. Menghitung perbedaan besaran antara tegangan pada pangkal pengiriman (V_S) dengan tegangan pada ujung penerimaan (V_R).
- b. Menghitung daya pada pangkal pengiriman dan ujung penerimaan.
- c. Menghitung daya guna transmisi (daya keluar/daya masuk).

Daya yang mengalir pada saluran transmisi seperti dilukiskan dalam segitiga daya berikut ini :



Gambar 2.5 Segitiga Daya

2.7.1 Daya Nyata

Daya nyata untuk tiga fasa dinyatakan dalam rumusan sebagai berikut :

$$P_S = \sqrt{3} V_{S(L-L)} I_S \cos \varphi_S \dots\dots\dots 2.1$$

Dimana :

P_S = daya nyata pada ujung kirim (MW).

$V_{S(L-L)}$ = tegangan pada ujung kirim line to line (KV).

I_S = arus pada ujung kirim (KA).

$\cos \varphi_S$ = faktor daya pada ujung kirim.



$$P_R = \sqrt{3} V_{R(L-L)} I_R \cos \varphi_R \dots\dots\dots 2.2$$

Dimana :

P_R = daya nyata pada ujung terima (MW).

$V_{R(L-L)}$ = tegangan pada ujung kirim line to line (KV).

I_R = arus pada ujung terima (KA).

$\cos \varphi_R$ = faktor daya pada ujung terima.

2.7.2 Daya Reaktif

Daya reaktif untuk tiga fasa dinyatakan dalam rumus sebagai berikut :

$$Q_S = \sqrt{3} V_{S(L-L)} I_S \sin \varphi_S \dots\dots\dots 2.3$$

Dimana :

Q_S = daya reaktif pada ujung kirim (MVAR).

$V_{S(L-L)}$ = tegangan pada ujung kirim line to line (KV).

I_S = arus pada ujung kirim (KA).

$\sin \varphi_S$ = faktor daya pada ujung kirim.

$$Q_R = \sqrt{3} V_{R(L-L)} I_R \sin \varphi_R \dots\dots\dots 2.4$$

Dimana :

Q_R = daya reaktif pada ujung terima (MVAR).

$V_{R(L-L)}$ = tegangan pada ujung terima line to line (KV).

I_R = arus pada ujung terima (KA).

$\sin \varphi_R$ = faktor daya pada ujung terima.

2.7.3 Daya Semu

Daya semu untuk tiga fasa dinyatakan dalam rumus sebagai berikut :

$$S_S = \sqrt{3} V_{S(L-L)} I_S \dots\dots\dots 2.5$$

Dimana :

S_S = daya semu pada ujung kirim (MVA).

$V_{S(L-L)}$ = tegangan pada ujung kirim line to line (KV).



I_S = arus pada ujung kirim (KA).

$$S_R = \sqrt{3} V_{R(L-L)} I_R \dots\dots\dots 2.6$$

Dimana :

Q_R = daya semu pada ujung terima (MVA).

$V_{R(L-L)}$ = tegangan pada ujung terima line to line (KV).

I_R = arus pada ujung terima (KA).⁶

2.8 Metode Penyelesaian Saluran Transmisi

Untuk perhitungan pada saluran transmisi dapat dilakukan dengan berbagai macam metode, antara lain metode nominal T, metode nominal π dan dapat juga dihitung dengan metode three condenser Dr. Steinmetz.

- Metode nominal T

Metode ini digunakan untuk perhitungan pada medium line, kapasitansi (c) perphasa dan line diasumsikan terkonsentrasi pada pusat dan separuh dari resistansi dan reaktansi pada sisi kedua kapasitor.

- Metode nominal PI

Metode ini digunakan untuk medium line. Separuh dan line di asumsikan terkonsentrasi pada ujung pengiriman (sending) dan ujung penerimaan (receiving).

- Metode three condensers Dr. Steinmetz

Metode ini digunakan pada medium line dengan asumsi 2/3 kapasitansi line pada pusat dan 1/6 pada ujung penerimaan (receiving) dan ujung pengiriman (sending).

2.9 Rugi-Rugi Saluran Transmisi

Rugi-rugi saluran terjadi karena adanya pengaruh dan resistansi (R) dan reaktansi induktif (X_L).

⁶ Ray Subir, 2007, *Electrical Power Systems*.



2.9.1 Rugi-Rugi Tegangan

Rugi-rugi tegangan atau jatuh tegangan adalah selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (sending end) dan tegangan pada ujung penerimaan (receiving end) tenaga listrik. Atau drop tegangan berdasarkan analytis solusi diatas adalah :

$$\Delta V = \text{Tegangan kirim} - \text{Tegangan Terima} \dots\dots\dots 2.7$$

Sedangkan kerugian tegangan yang terjadi pada saluran transmisi yang diperkenankan sesuai dengan standar SPLN adalah sebanyak 3 %.

2.9.2 Rugi-Rugi Daya

Rugi-rugi daya adalah selisih antara daya pada pangkal pengiriman (sending end) dan daya pada pada ujung penerimaan (receiving end). Besarnya rugi-rugi daya nyata yang terjadi pada saluran transmisi untuk tiga phasa adalah :

$$P_S = \sqrt{3} V_{S(L-L)} I_S \text{Cos } \varphi_S \dots\dots\dots 2.8$$

$$P_R = \sqrt{3} V_{R(L-L)} I_R \text{Cos } \varphi_R \dots\dots\dots 2.9$$

Maka :

$$P_{\text{LOSSES}} = P_S - P_R \dots\dots\dots 2.10$$

Dimana:

P_S = Daya pada ujung kirim (MW)

P_R = Daya pada ujung terima (MW)

P_{losses} = Rugi-rugi daya (MW)

V_S = Tegangan pada ujung kirim (KV)

I_S = Arus pada ujung kirim (KA)

V_R = Tegangan pada ujung terima (KV)



I_R = Arus pada ujung terima (KA)

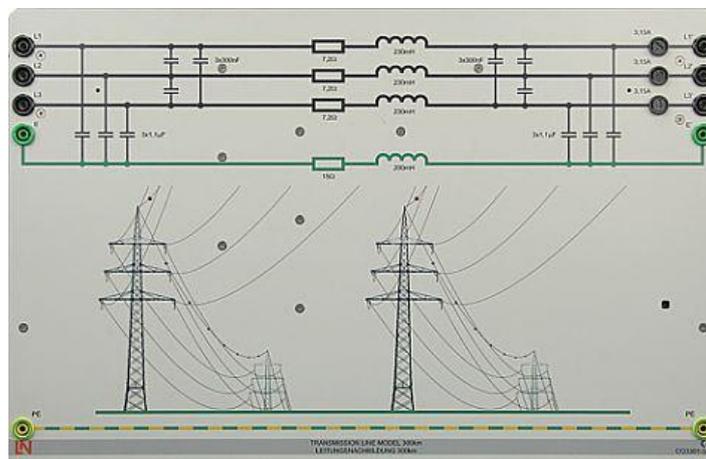
R = Resistansi

$\cos \varphi$ = faktor daya beban

I = Effisiensi transmisi ¹

2.10 Komponen Utama Pada Simulasi Saluran Transmisi Di Laboratorium Transmisi Dan Distribusi Teknik Listrik

2.10.1 Model Saluran Transmisi 150 Km / 300 Km (93.2 miles / 186.4 miles)



Gambar 2.6 Model saluran transmisi

Simulasi saluran tiga fasa adalah saluran udara tegangan tinggi dengan panjang yang berbeda untuk mengukur berbagai kondisi operasi (open line, matched, short circuit). Faktor skala 1/1000 untuk arus dan tegangan.

Panjang saluran transmisi : 150 km 300 km.

Panjang saluran transmisi : 93,2 mil 196,4 mil.

- Resistansi per fasa : 3,6 Ohm sampai dengan 7,2 Ohm.
- Induktansi per fasa : 115 mH sampai dengan 230 mH.
- Kapasitas per fasa :

Fasa ke fasa : 2 x 150 nF sampai dengan 300 nF.

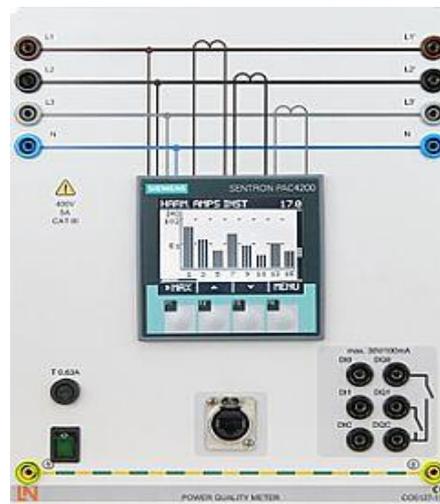
Fasa ke tanah : 2 x 0,55 μ F sampai dengan 1,1 μ F.

¹ Arismunandar, A. Kuwahara, S., 1993, *Teknik Tenaga Listrik Jilid II*.



- Konsumsi daya maksimum : 1 kW.
- Tegangan : 3 x 400 V ; 50/60 Hz.
- Arus : 2 A.
- Input/output : soket keselamatan 4 mm.
- Ukuran : 297 x 456 x 125 mm (HxWxD).
- Berat : 6 kg.

2.10.2 Alat Ukur Pada Saluran Di Sisi Kirim Dan Sisi Terima Pada Model Saluran Transmisi



Gambar 2.7 Alat Ukur

Alat ukur tiga fasa memungkinkan pengukuran dan tampilan parameter jaringan listrik yang relevan. Alat ini mampu mengukur satu, dua fasa atau tiga fasa pengukuran. Tampilan dan operasi dilakukan dengan menggunakan menu navigasi melalui layar LC atau tampilan Ethernet yang terintegrasi. Pilihan perangkat lunak SCADA menyediakan untuk tampilan semua pengukuran dan memungkinkan pelaksanaan dan analisis jaringan pintar (smart meter). Meteran pintar (smart meter) berfungsi sebagai meteran listrik digital pada titik akhir dari jaringan listrik untuk mengukur pemakaian listrik dan dapat digunakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan beban tergantung pada kondisi/keadaan.



- Tiga tahap pengukuran : arus dan tegangan 3 x 400 V / 5 A.
- Pengukuran phasa tegangan, phasa ke phasa tegangan dan arus.
- Penentuan daya nyata, aktif dan reaktif.
- Penentuan frekuensi dan faktor distorsi untuk arus dan tegangan.
- Tampilan dalam tabel, diagram dan diagram vektor.
- Navigasi dalam menu bahasa Jerman / Inggris / Perancis / Spanyol / Italia / Portugis / Turki / Cina / Rusia / Polandia.
- Alat ukur demonstrasi/percobaan untuk operasi jaringan.

Nilai pengukuran maksimum :

- Tegangan antara phasa ke phasa : 690 V.
- Arus : 5 A.

Keakuratan pengukuran :

- Tegangan 0,2 %.
- Arus 0,2 %.
- daya semu 0,5%.
- daya aktif 0,2%.
- Daya reaktif 1%.
- Kelas energi aktif 0,2.
- Kelas energi reaktif 2.
- Tegangan operasi : 110 V – 230 V, 50/60 Hz.
- Ukuran : 297 x 228 x 140mm (HxWxD).
- Berat : 2 kg.



2.10.3 Power Supply 3 Phasa Sebagai Pengganti Generator



Gambar 2.8 Power Supply

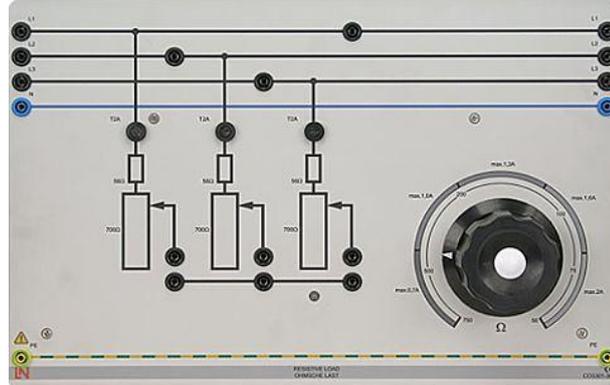
Power supply 3 phasa dikontrol dengan satuan 0 ... 255 / 450 V untuk meneruskan supply 3 phasa.

- Sambungan daya : 230/400 V, 50/60 Hz.
- Tegangan output : 3 x 0 ... 400 V, 50/60Hz variabel dengan mengatur transformator 3 phasa (toleransi 0,5%).
- DC Output : 0 ... 250 V.
- Arus output : 2 A.
- soket keselamatan 4 mm (L1, L2, L3, N, PE, L-, L+).
- 1 Voltmeter : 0 ... 450 V (menggerakkan jarum ukur pada alat ukur).
- 1 Ampermeter : 0 ... 3 A (menggerakkan jarum ukur pada alat ukur).
- Pengendali lampu 3 phasa.
- 1 titik selektor pemilih/pemindah pengukuran : L1-N, L2-N, L3-N, L1-L2, L1-L3, L2-L3.
- 1 titik selector pemilih/pemindah pengukuran : L1, L2, L3.
- Proteksi : 3 thermo circuit breakers (CB) dengan sistem magnetik, Relay pengaman dapat diatur dari 1,6 ... 2.5 A dengan tegangan di bawah itu akan trip.
- Ukuran : 175 x 370 x 260 mm (HxWxD).
- Berat : 15 kg.



2.10.4 Model Beban R, L, dan C

2.10.4.1 Beban Resistif (R)

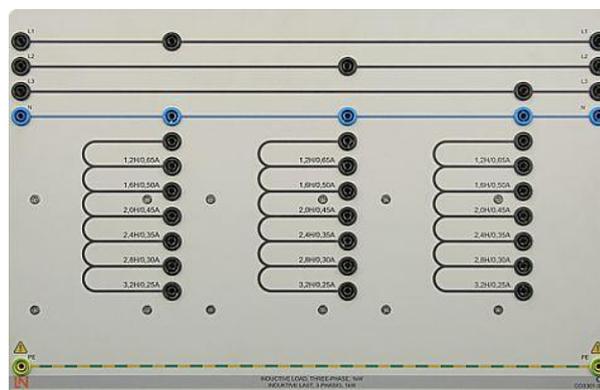


Gambar 2.9 Beban Resistif

Tiga beban rheostats dapat diatur dengan diputar skala 100-0%, masing-masing dengan sekering dalam hubungan kontak geser.

- Bisa digunakan untuk rangkaian paralel, seri, bintang dan delta.
- Resistansi : 3 x 750 Ohm.
- Sekarang : 3 x 2 A.
- Input/output : soket keselamatan 4 mm.
- Ukuran : 297 x 456 x 125 mm (HxWxD).
- Berat : 8 kg.

2.10.4.2 Beban Induktif (L)



Gambar 2.10 Beban Induktif (L)

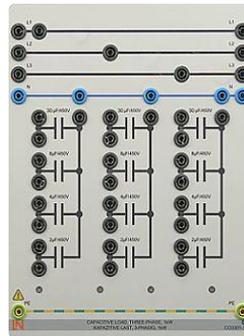


Terdiri dari tiga beban induktif dengan ukuran sebagai berikut :

1,2 H (0,65 A); 1,6 H (0,5 A); 2 H (0,45A); 2,4 H (0,35 A); 2,8 H (0,30A); 3,2 H (0,25 A).

- Bisa digunakan untuk rangkaian paralel, seri, bintang dan delta.
- Tegangan : 400V maksimum.
- Input/output : soket keselamatan 4 mm.
- Ukuran : 297 x 456 x 125mm (HxWxD).
- Berat : 8 kg.

2.10.4.3 Beban Kapasitif (C)



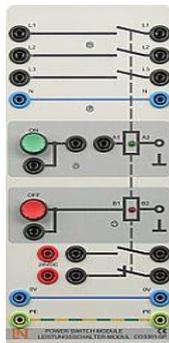
Gambar 2.11 Beban Kapasitif (C)

Tiga kelompok MP kapasitor, masing-masing terdiri empat kapasitor :

- Bisa digunakan untuk rangkaian paralel, seri, bintang dan rangkaian delta.
- Kapasitas : 3 x 2/4/8/30 uF, 450 V.
- Input/output : soket keselamatan 4 mm.
- Ukuran : 297 x 228 x 125mm (HxWxD).
- Berat : 3 kg.



2.10.5 Modul Saklar Daya / Tenaga



Gambar 2.12 Modul Saklar Daya / Tenaga

Tegangan dapat menghidupkan dan mematikan rangkaian secara manual atau otomatis.

- Tegangan nominal : 230/400 V, 50/60 Hz.
- Tegangan kontrol : 24 V.
- Arus operasi nominal : 16 A.
- Fungsi : 2 tombol tekan switch dan remote control untuk saklar dari relay
- Indikator : lampu sinyal untuk "on" dan "off".
- Kontak : 3 n.o. & 1 n.o. bantu.
- Input / output : soket keselamatan 4 mm.
- Ukuran : 297 x 114 x 95 mm (HxWxD).
- Berat : 2 kg. ⁴

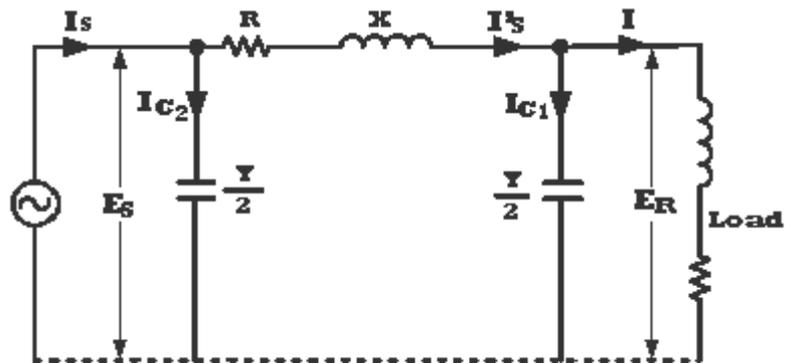
2.10.6 Metode Jaringan Transmisi Dengan Menggunakan Metode Nominal PI

Untuk perhitungan pada simulasi saluran sistem transmisi menengah dengan jarak 80 sampai dengan 250 Km dan sistem transmisi panjang dengan jarak lebih dari 250 Km di laboratorium transmisi dan distribusi teknik listrik Politeknik Negeri Sriwijaya, metode yang digunakan adalah metode nominal PI. Di bawah ini adalah gambar dari rangkaian metode nominal PI dan diagram phasornya.

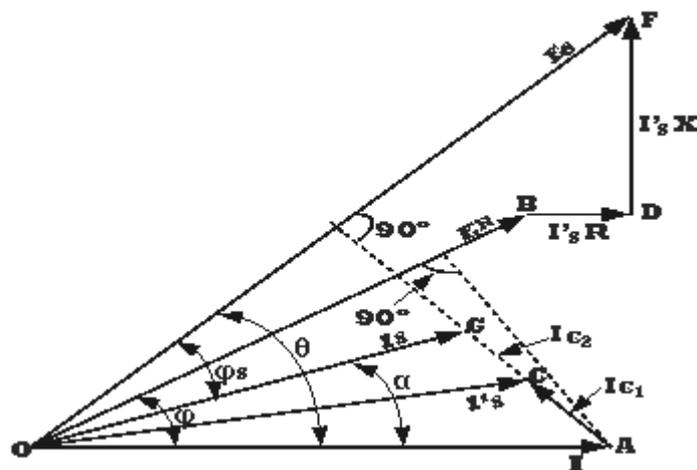
⁴ Lucas Nulle, *EUL 1 Investigations on Three Phase Transmission Lines*, di akses April 2015 <http://www.lucas-nuelle.com/316/apg/1294/EUL-1-Investigations-on-Three-phase-Transmisson-lines.htm>.



Dalam metode ini separuh dari kapasitansi line diasumsikan lokasinya pada kedua ujung dari line seperti representasi gambar berikut :



Gambar 2.13 Representasi dari Metode Nominal PI



Gambar 2.14 Diagram Vektor Untuk Metode Nominal PI

Analitis Solusi

OA = Arus beban

Tegangan ujung penerimaan ER lead dari I oleh sudut φ

$Y = j Wc$ (admitansi shunt) dimana C adalah kapasitansi line per phasa

Admitansi shunt pada masing-masing ujung dari line adalah $Y/2$

- Arus I_{c1} pada ujung penerimaan dinyatakan dengan AC leading dari ER oleh sudut 90° .
- Arus dalam line adalah I_s' merupakan jumlah vector I dan I_{c1} .



- Drop resistip dalam line adalah $I_s'R$ dinyatakan sebagai BD parallel dengan OC.
- Drop reaktansi dalam line adalah $I_s'X$ leading BD oleh 90° dinyatakan dengan DF.
- Tegangan ujung pengiriman E_s adalah jumlah vector ER dan drop line BF dinyatakan sebagai OF.

Admitansi shunt (admitansi cabang) pada ujung pengiriman dengan arus I_{c2} leading dari E_s oleh 90° dinyatakan sebagai CG. Demikian arus ujung pengiriman I_s adalah OG.

Power factor ujung pengiriman = $\cos \phi_s$

dimana ϕ_s = sudut FOG

- Tegangan ujung pengiriman dapat juga diperoleh dengan Metode Analytis
Solution seperti berikut :

➤ $I = I + j 0$, arus beban 2.11

➤ $E_R = E_R (\cos \phi + j \sin \phi) = E_x + j E_y$ (misal) 2.12

➤ $I_{c1} = (E_x + j E_y) (0 + j Y/2)$ 2.13

➤ Arus dalam line penerimaan, $I_s' = I + I_{c1}$

$$I_s' = (I + j 0) + E_x + j E_y (0 + j \frac{Y}{2}) = I_x + j I_y \text{ (misal) } \dots\dots 2.14$$

➤ Drop line = $(I_x + j I_y) (R + j X) = V_x + j V_y$ (misal) 2.15

➤ $E_s = E_R + \text{drop line}$

$$E_s = (E_x + j E_y) + (V_x + j V_y) = (E_x + V_x) + j (E_y + V_y) \dots\dots 2.16$$

➤ E_s lead dari I load sudut Θ , dimana $\tan \Theta = \frac{E_y + V_y}{E_x + V_x}$ 2.17

➤ $I_{c2} = E_x + V_x + j (E_y + V_y) (0 + j \frac{Y}{2}) = I'_x + j I'_y$ (misal)... 2.18

➤ Arus dalam line pengiriman, $I_s = I_s' + I_{c2}$

$$I_s = (I_x + j I_y) + (I'_x + j I'_y) = (I_x + I'_x) + j (I_y + I'_y) \dots\dots 2.19$$

➤ I_s led dari I oleh sudut a , $\tan a = \frac{I_y + I'_y}{I_x + I'_x}$ 2.20

➤ Sudut phasa antara arus dan tegangan ujung pengiriman $\phi_s = \Theta - a$ 2.21⁹

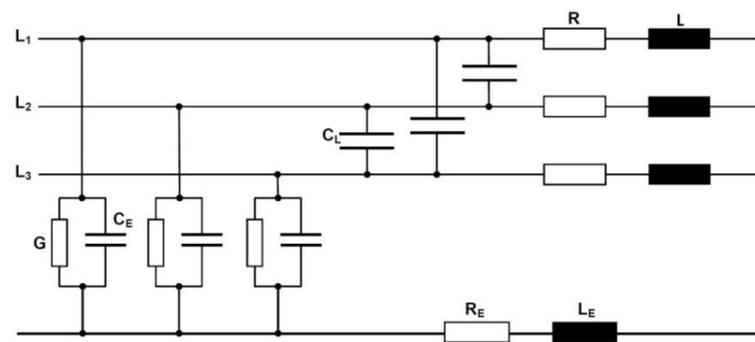
⁹ Uppal S.L, 1980, *Electrical Power*, khanna publishers, Delhi.



2.11 EUL : Transmisi Power (Transmisi Tenaga)

• Teori Fundamental

Sebuah garis yang digambarkan melalui parameter karakteristik yang terdiri dari resistansi, induktansi dan kapasitansi. Ungkapan “line” berfungsi sebagai istilah umum untuk saluran udara dan kabel bawah tanah yang pada dasarnya menunjukkan perilaku yang sama. Ketiga parameter karakteristik tersebut merupakan konstanta yang berlaku pada setiap titik sepanjang garis (jumlah per satuan panjang). Pada panjang 100-400 km khusus jalur tegangan ekstra-tinggi, namun, konsentrasi elemen dapat dianggap, tanpa kerugian signifikan dalam akurasi, sehingga mengakibatkan tiga-fasa diagram rangkaian ekuivalen berikut :



Gambar 2.15 Diagram rangkaian Tiga fasa saluran transmisi listrik yang terdiri dari unsur terkonsentrasi

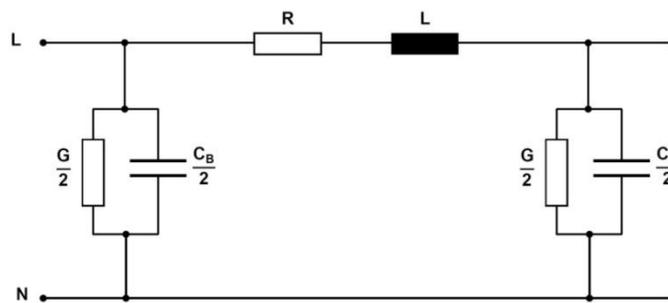
Tahanan aktif (R) ditentukan oleh bahan konduktor, penampang dan, panjang. Induktansi (L) untuk medan magnet yang dihasilkan ketika arus mengalir melalui loop konduktor. Sebuah perbedaan dibuat antara dua jenis kapasitansi. Kapasitansi C_L adalah kapasitansi antara dua konduktor luar, sedangkan C_E adalah kapasitansi antara konduktor luar dan bumi. Kerugian disipasi yang disebabkan oleh kebocoran arus dan, khususnya, kerugian korona pada arus tinggi, dijelaskan oleh konduktansi G. Akhirnya, karakteristik konduktor kembali (bumi, kawat bumi) yang diwakili melalui parameter R_E dan L_E. Model baris terdiri dari saluran udara 380 kV-terdiri dari empat kelompok dan memiliki penampang dari 4x300 mm² (aluminium).



Model ini memiliki data longitudinal berikut (konstanta) :

$$R' = 0,024 \Omega / \text{km}, L' = 0,77 \text{ mH} / \text{km}, C_B' = 13,07 \text{ nF} / \text{km}.$$

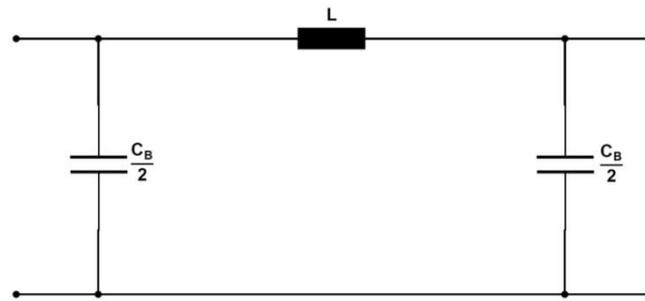
Representasi fasa tunggal cukup jika kondisi operasi dalam simetris (tegangan identik dan arus untuk tiga konduktor luar). Garis dan kapasitansi bumi pada berbagai tegangan diubah menjadi variable baru yang efektif atau kerja kapasitansi C_B . Dalam kasus ini : $C_B = C_E + 3 C_L$. Harus dicatat bahwa kabel bawah tanah memiliki kerja kapasitansi jauh lebih tinggi dari saluran udara. Apapun, representasi dengan memakai bantuan Π -elemen lebih menguntungkan daripada jenis diagram-T. Hal ini menyebabkan representasi berikut :



Gambar 2.16 Diagram rangkaian Satu fasa ekivalen baris

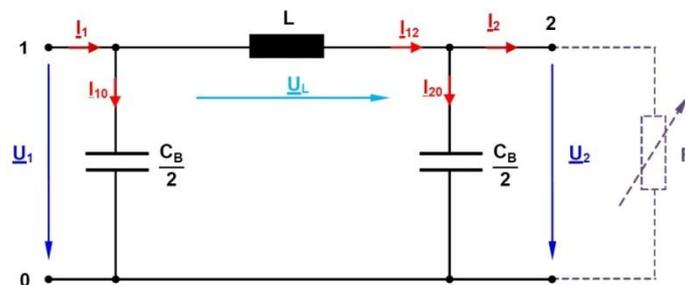
Untuk menjaga kerugian transmisi diusahakan dalam prakteknya yaitu meminimalkan resistansi konduktor R dan memaksimalkan konduktansi G . Oleh karena itu, $R \ll \omega L$ dan $G \gg \omega C_B$.

Baris dengan sifat ini digambarkan sebagai kerugian yang rendah. Meskipun garis lossless tidak dapat direalisasikan dalam prakteknya, penyederhanaan di atas menjadi lebih akurat dianggap tingkat tegangan naik. Hal ini berlaku terutama ketika menyelidiki respon steady-state. Untuk perhitungan kasar, terbatas pada aspek-aspek penting, diagram rangkaian ekivalen yang ditunjukkan di bawah ini dapat digunakan untuk mewakili operasi pada kerugian daya nol.



Gambar 2.17 Diagram rangkaian Single-fasa ekivalen baris lossless

Untuk penyelidikan lebih lanjut (misalnya penentuan efisiensi dan transmisi kerugian), maka perlu untuk setidaknya mempertimbangkan perlawanan aktif serta R . Untuk model yang tepat (misalnya ketika menyelidiki proses yang melibatkan bepergian gelombang), garis panjang l harus terdiri dari jumlah tak terbatas π - elemen masing-masing dengan panjang diferensial dari dl . Representasi ini dapat digunakan untuk menurunkan persamaan garis yang dibutuhkan untuk perhitungan yang tepat dari garis panjang. Persamaan ini termasuk faktor yang ditunjuk karakteristik impedansi Z_w . Dengan asumsi garis lossless, faktor ini dihitung dengan menggunakan persamaan $Z_w = \sqrt{L / C_B}$. Jika garis terkena beban resistif sama besarnya dengan impedansi karakteristik, salah satu berbicara tentang pencocokan. Keadaan ini sangat ideal dalam hal kerugian transmisi. Sebuah resistor beban variabel pada akhir baris dapat digunakan untuk secara jelas menunjukkan tiga negara yang terdiri dari tanpa beban, pencocokan dan (simetris) korsleting.



Gambar 2.18 Garis Lossless dalam berbagai kondisi beban



- $R = \infty$ - > tanpa beban
- $R = Z_w$ - > Pencocokan
- $R = 0$ - > sirkuit pendek

Dalam kasus representasi fasa tunggal, selalu diperlukan untuk memperhitungkan tegangan awal, yaitu terjadi antara fasa dan titik netral (tegangan diukur antara dua konduktor luar ditunjuk tegangan line-to-line U_{Δ} sini.) Pada transisi ke sistem tiga fasa, semua ini dihitung dalam representasi fasa tunggal yang harus dikalikan dengan faktor 3 untuk mendapatkan daya total. Sebutan tercantum di bawah digunakan (variable kompleks digaris bawahi).

$\underline{U}_1, \underline{U}_2$: tegangan masing-masing di awal dan akhir garis itu.

\underline{U}_L : Penurunan Tegangan sepanjang garis.

$\underline{I}_1, \underline{I}_2$: Arus masing-masing di awal dan akhir garis itu.

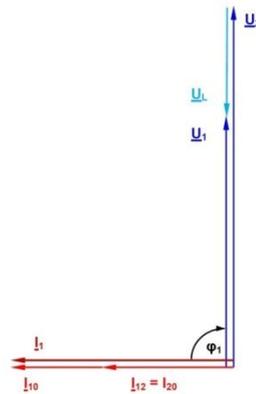
$\underline{I}_{10}, \underline{I}_{20}$: Arus melalui cabang melintang masing-masing di awal dan akhir garis itu.

\underline{I}_{12} : Arus melalui cabang membujur garis itu.

Dalam keadaan tanpa beban, resistansi R berakhir pada akhir baris yang besarnya tak sehingga, sehingga $I_2 = 0$ sesaat. Proses yang terjadi di sirkuit beroperasi pada tegangan sinusoidal yang divisualisasikan melalui diagram fasor. Diagram ini memungkinkan representasi simultan besarnya dan sudut fasa dari jumlah AC. Fasor dapat ditambahkan atau dikurangi secara grafis, sehingga memungkinkan tampilan yang jelas, misalnya, tetes tegangan dalam jaringan. Semua fasor berputar pada kecepatan sudut dilambangkan dengan ω , diagram mereka melayani untuk menyediakan “snapshot” dari sistem yang sedang dipertimbangkan. Pajangan ini adalah murni bersifat kualitatif dan tidak benar dalam bentuk skala, sehingga hal hanya dimaksudkan untuk ilustrasi. Nilai numerik dapat ditentukan secara individual dengan bantuan perhitungan yang rumit.



Dalam diagram fasor gabungan arus / tegangan turun, vector tegangan pada akhir baris didefinisikan secara sewenang-wenang sebagai fasor referensi, dan ditarik dalam arah yang sama dengan sumbu nyata. Selain itu, seperti halnya praktik umum di bidang teknologi energi, sistem koordinat layar itu diputar oleh 90^0 sehingga titik sumbu nyata dalam arah y. Arus / tegangan diagram fasor bawah menggambarkan keadaan tanpa beban.



Gambar 2.19 Diagram fasor Arus / tegangan dari garis lossless dalam kondisi tanpa beban

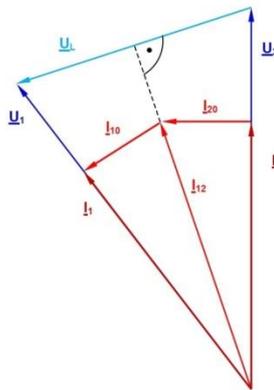
Diagram fasor menunjukkan bahwa dalam keadaan operasi, tegangan pada ujung garis itu lebih tinggi dari tegangan pada awal garis itu. Hal ini disebabkan kapasitansi kerja dan dikenal sebagai efek Ferranti. Tegangan pada akhir baris telah meningkat secara tidak proporsional sehubungan dengan panjang garis itu, sehingga upaya yang dilakukan untuk menghindari hal ini kondisi pengoperasian dalam praktek. Arus yang mengalir di Negara tanpa beban disebut arus pengisian, dan daya reaktif terkait pengisian daya. Seperti telah disebutkan, kabel bawah tanah memiliki kapasitansi kerja yang lebih tinggi dari saluran udara. Efek yang dijelaskan sebelumnya jauh lebih jelas di sini. Dalam hal pencocokan, resistansi beban R adalah persis sama dengan karakteristik impedansi. Daya yang dikonsumsi oleh resistansi aktif disebut kekuatan alami. Yang dihasilkan saat ini cukup tinggi sehingga konsumsi daya reaktif disebabkan oleh induktansi garis adalah persis sama dengan daya reaktif yang dihasilkan oleh kapasitansi kerja.



Politeknik Negeri Sriwijaya

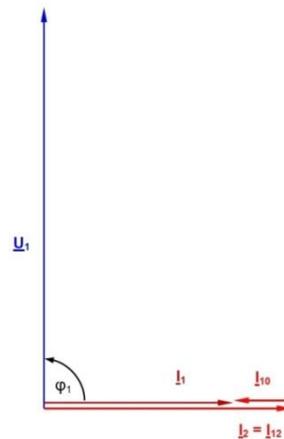
Selain itu, tegangan pada awal baris dalam hal ini memiliki besarnya dengan tegangan pada akhir baris.

Diagram fasor selanjutnya menjelaskan situasi ini.



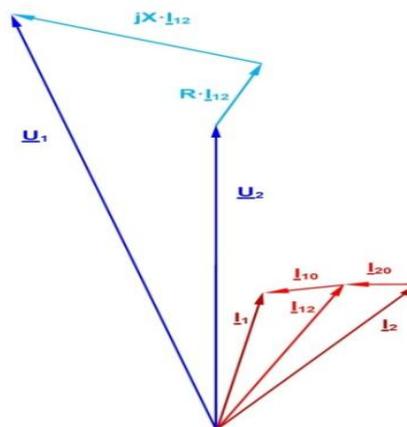
Gambar 2.20 Diagram fasor arus / tegangan dari garis lossless selama pencocokan (terminasi dengan karakteristik impedansi).

Karena bahan konduktif yang dibuat, setiap baris transmisi real juga memiliki ketahanan aktif, terhadap kerugian transmisi. Sebuah efisiensi sistem transmisi yang didefinisikan sebagai rasio antara kekuatan aktif pada output sistem dan masukan. Karena tidak ada daya reaktif maka harus ditransmisikan dalam hal pencocokan, efisiensi dimaksimalkan dalam kasus ini. Karena nilai garis beban yang ditentukan oleh perilaku konsumen yang terhubung daya reaktif juga tersedia sebagai pilihan untuk meminimalkan kerugian transmisi. Dalam kasus (tiga-kutub) sirkuit pendek, resistansi beban R memiliki nilai 0. Arus kemudian mengalir hanya dibatasi oleh garis impedansi (dengan asumsi bahwa hasil induktansi saluran transmisi lossless) dan karena itu jauh lebih tinggi dari nilai yang terjadi selama operasi normal. Ini harus dideteksi dan disolasi sesegera mungkin oleh perangkat perlindungan jaringan. Diagram Fasor di bawah menggambarkan situasi ini.



Gambar 2.21 Diagram fasor arus/tegangan dari garis lossless dalam hal hubungan pendek pada akhir garis itu.

Akhirnya, kita akan melihat diagram fasor dalam kasus beban resistif / induktif seperti yang terjadi paling sering selama operasi kehidupan nyata. Untuk representasi yang lebih tepat, garis Lossless diasumsikan di sini.



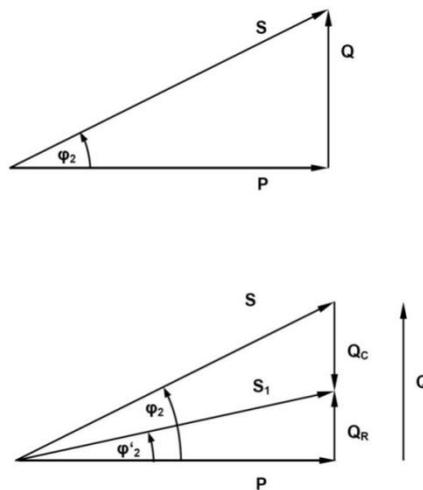
Gambar 2.22 Diagram fasor arus/tegangan dari garis-lossless dalam kasus campuran (resistif/induktif) beban.

Resultan arus I_2 melalui beban terdiri resistif dan komponen induktif sesuai dengan rasio daya aktif dan reaktif beban itu. Dalam prakteknya, pengaruh kapasitansi pada akhir baris adalah (kualitatif) lebih rendah daripada yang diindikasikan di dalam diagram fasor, yaitu I_2 dan I_{12} kira-kira sama. Dengan meningkatnya daya reaktif, begitu juga arus membujur melalui jalur dan,



akibatnya, kerugian yang dihasilkan oleh garis resistensi R. Untuk meminimalkan kerugian ini, perusahaan pemasok listrik menentukan nilai batas tertentu untuk daya reaktif dan factor daya $\cos \varphi$.

Dengan demikian, hal itu adalah umum untuk menuntut biaya tambahan pada tarif dasar listrik (klausul daya reaktif) dari nilai-nilai $\varphi \cos$ bawah 0,8. Salah satu alternatif bagi pelanggan adalah untuk mengkompensasi (biasanya) daya reaktif induktif dengan cara kapasitor terhubung secara paralel. Segitiga daya ditunjukkan di bawah ini menggambarkan hubungan yang terlibat di sini.



Gambar 2.23 Rasio daya dengan beban terkompensasi dan dikompensasi sebagian

P adalah daya aktif, daya reaktif Q, dan S yang daya semu. Untuk mengurangi daya semu dan, akibatnya, arus, daya reaktif biasa diturunkan, misalnya, dari nilai Q asli ke nilai sisa QR. Ini setara dengan memperbaiki factor daya dari $\cos \varphi_2$ ke $\cos \varphi'_2$. Seperti yang ditunjukkan dalam diagram, kompensasi daya reaktif QC dibutuhkan untuk ini karena :

$$QC = P * (\tan \varphi_2 - \tan \varphi'_2), \text{ dimana } P \text{ adalah total daya aktif dikonsumsi.}$$

Persamaan menunjukkan bahwa kapasitansi kompensasi tergantung beban. Tiga individu kapasitor C terhubung dalam konfigurasi bintang ditentukan oleh :

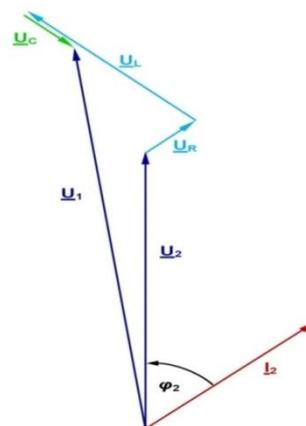
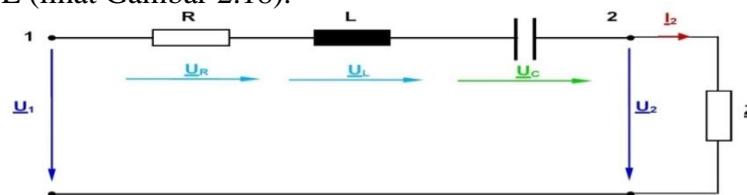
$$C = QC / (\omega * U_N^2)$$



Persamaan terakhir mengasumsikan bahwa tegangan nominal berada pada seluruh beban. Selain itu, setengah kapasitansi kerja berada pada akhir baris juga memberikan kontribusi yang sangat sedikit ke arah kompensasi. Namun, kedua pengaruh biasanya diabaikan selama desain mekanisme kompensasi. Untuk kompensasi penuh, φ'_2 harus nol, sehingga :

$$QC = P * \tan \varphi_2$$

Biasanya, hal itu sudah cukup untuk melakukan kompensasi daya reaktif sisa meninggalkan sisa di mana biaya tambahan untuk pekerjaan reaktif hanya dihindari. Selain kompensasi ini paralel (yang relevan dengan konsumen), ada juga kemungkinan kompensasi seri dalam kasus garis yang sangat panjang. Dilakukan oleh operator jaringan transmisi ini, jenis kompensasi dimaksudkan untuk mengurangi efek longitudinal konduktivitas L dan, karena itu, drop tegangan UL (lihat Gambar 2.18).



Gambar 2.24 Seri kompensasi : Diagram Circuit dan diagram fasor terkait.



Demi kesederhanaan, kapasitansi garis tidak dianggap karena mereka praktis tidak berpengaruh pada proses kompensasi. Jika seluruh drop tegangan UL yang akan dikompensasi, tiga kapasitor C harus memiliki nilai berikut :

$$C = 1 / (\omega^2 * L) = 1 / (\omega * X_L)$$

Atau

$$X_C = 1 / \omega C$$

$$X_L = \omega L$$

Dalam prakteknya, hanya kompensasi parsial sering dilakukan ke level 30% - 60% (reaktansi kapasitor dalam kaitannya dengan garis reaktansi XL). Sebisa mungkin, tiga kapasitor diposisikan sekitar pertengahan antara kedua ujung garis. ⁷

⁷ Schultz, G., Prof, *EUI : Power Transmission Version 4.0.*