

BAB II

TEORI DASAR SISTEM PENYADAPAN DAYA MELALUI KAWAT TANAH PADA SALURAN TRANSMISI

2.1 Saluran Transmisi

Tenaga listrik sangat berguna karena tenaga listrik itu dapat mudah ditransportasikan/disalurkan dan juga mudah diatur. Tenaga listrik dibangkitkan dipusat-pusat tenaga (PLT), seperti : tenaga air (PLTA), tenaga uap (PLTU), tenaga panas bumi (PLTP), tenaga gas (PLTG), tenaga diesel (PLTD), tenaga nuklir (PLTN) atau lain sebagainya. Pusat-pusat 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 1000 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 ini disebut tegangan distribusi primer. Pada umumnya saluran transmisi dalam penggunaannya dapat dibagi dua :

1. **Saluran udara (*overhead lines*)** : saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antar menara atau tiang transmisi. Keuntungan dari saluran transmisi udara adalah lebih murah, mudah dalam perawatan, mudah dalam mengetahui letak gangguan, mudah dalam perbaikan, dan lainnya. Namun juga memiliki kerugian, antara lain: karena berada di ruang terbuka, maka cuaca sangat berpengaruh terhadap keandalannya, dengan kata lain mudah terjadi gangguan, seperti gangguan hubung singkat, gangguan tegangan lebih karena tersambar petir, dan gangguan-gangguan lainnya. Dari segi estetika/keindahan juga kurang, sehingga saluran transmisi bukan pilihan yang ideal untuk suatu saluran transmisi didalam kota.
2. **Saluran kabel tanah (*underground cable*)** : saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam didalam tanah. Kategori saluran transmisi seperti ini adalah yang favorite untuk pemasangan di dalam kota, karena berada didalam tanah, maka tidak mengganggu keindahan kota dan juga tidak mudah terjadi gangguan akibat kondisi cuaca atau kondisi alam. Namun juga memiliki kekurangan.

Seperti : mahal nya biaya investasi dan sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya.

2.1.1 Sistem Saluran transmisi Arus Bolak-Balik atau Searah

Menurut jenis arusnya dikenal sistem arus bolak-balik yaitu arus bolak-balik (*Alternating Current/AC*) dan arus searah (*Direct Current/DC*). Oleh karena itu di dalam sistem AC, kenaikan dan penurunan tegangannya sangat mudah dilakukan dengan bantuan transformator. Itulah sebabnya maka saluran transmisi di dunia sebagian besar adalah saluran AC. Di dalam sistem AC ada sistem fasa tunggal dan sistem fasa tiga. Sistem tiga fasa memiliki keuntungan lainnya, antara lain:

- a. Daya yang disalurkan lebih besar.
- b. Nilai sesaat (*instantaneous value*) konstan.
- c. Mempunyai medan magnet putar.

Berhubungan dengan keuntungan dan kerugiannya, dewasa ini saluran transmisi di dunia sebagian besar menggunakan saluran transmisi AC. Saluran transmisi DC baru dapat dianggap ekonomis jika jarak saluran udaranya antara 400 km sampai 600 km, atau untuk saluran bawah tanah dengan panjang 50 km. Hal itu disebabkan karena biaya peralatan pengubah dari AC ke DC dan sebaliknya (*converter & inverter*) masih sangat mahal, sehingga dari segi ekonomisnya saluran AC akan tetap menjadi pilihan dari saluran transmisi.

2.1.2 Tegangan pada Sistem Transmisi

Apabila tegangan transmisi dinaikkan, maka daya guna penyaluran akan naik, oleh karena rugi-rugi transmisi turun pada besaran daya yang disalurkan sama. Namun, penaikan tegangan transmisi berarti juga penaikan isolasi dan biaya peralatan juga biaya 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 akan di rencanakan. Penentuan tegangan juga harus dilihat dari segi standarisasi peralatan yang ada. Penentuan tegangan transmisi merupakan bagian dari perancangan system tenaga listrik secara keseluruhan.

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

Meskipun tidak jelas menyebutkan keperluannya sebagai tegangan transmisi, di Indonesia, pemerintah telah menyeragamkan deretan tegangan tinggi sebagai berikut:

- a. Tegangan Nominal (kV): (30) - 66 - 150 - 220 – 380 – 500,
- b. Tegangan tertinggi untuk perlengkapan (kV): (36) – 72,5 – 170 – 245 – 420 - 525.

Tegangan nominal 30 kV hanya diperkenankan untuk daerah yang tegangan distribusi primer 20 kV tidak dipergunakan. Penentuan deret tegangan diatas, disesuaikan dengan rekomendasi dari International Electrotechnical Commission (IEC).

2.1.3 Komponen Utama dari Saluran Transmisi

Kompenen-komponen utama dari saluran transmisi terdiri dari :

1. Menara atau tiang transmisi, adalah suatu bangunan penopang saluran transmisi, yang bisa berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang dan tiang kayu.
2. Isolator. Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas. Menurut penggunaannya dan konstruksinya dikenal tiga jenis isolator, yaitu isolator jenis pasak, isolator jenis pos-saluran, dan isolator gantung.
3. Kawat penghantar. Jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5%, atau aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61%).

4. Kawat tanah. Untuk penjelasan tentang kawat tanah akan dibahas secara khusus pada sub bab selanjutnya. Karena pada bab 2 ini akan membahas sistem penyaluran daya melalui kawat tanah.

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 direpresentasikan dengan rangkaian pengganti. Supaya dapat mempermudah melakukan proses sistem penyaluran daya pada saluran transmisi.

2.2 Klasifikasi Saluran Transmisi

2.2.1 Klasifikasi untuk Keperluan Rangkaian Pengganti

Untuk keperluan analisa dan perhitungan maka rangkaian pengganti dari saluran transmisi biasanya dibagi dalam 3 kategori, yaitu (a) saluran pendek (< 80 km); (b) saluran menengah ($80-250$ km); (c) saluran panjang (> 250 km).

Sebenarnya klasifikasi diatas sangat kabur dan sangat relatif. Klasifikasi saluran transmisi harus didasarkan atas besar kecilnya kapasitansi ke tanah. Jadi apabila kapasitansi saluran terhadap tanah kecil, maka presentase arus bocor ke tanah terhadap arus bebannya kecil, maka dalam hal ini kapasitansi ke tanah dapat diabaikan, dan saluran dikategorikan sebagai saluran pendek. Jika nilai kapasitansi sudah mulai besar sehingga tidak dapat lagi diabaikan, tetapi belum begitu besar sekali sehingga masih dapat dianggap seperti kapasitansi terpusat (

lumped capacitance), maka saluran transmisi tersebut digolongkan sebagai saluran jarak menengah. Jika nilai kapasitansi terhadap tanah besar sekali sehingga tidak mungkin lagi dianggap kapasitansi terpusat, dan harus dianggap terbagi rata sepanjang saluran, maka saluran transmisi tersebut dapat digolongkan sebagai saluran panjang.

Klasifikasi saluran transmisi yang didasarkan panjang saluran 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.

2.2.2 Klasifikasi Saluran Transmisi Menurut Tegangan Kerja

Di Indonesia standar tegangan transmisi adalah : 20, 30, 70, 150, 275, dan 500 kV, dan klasifikasi menurut tegangan ini masih belum nyata. Tetapi dinegara-negara yang telah maju, terutama dalam bidang transmisi, seperti USA, Rusia, Canada, dimana tegangan transmisi telah mencapai 1000 kV, maka pada negara-negara tersebut klasifikasi yang didasarkan pada tegangan adalah : (a) tegangan tinggi : sampai 138 kV; (b) tegangan ekstra tinggi (EHV): antara 220 sampai 765 kV; (c) tegangan ultra tinggi (UHV): diatas tegangan 765 kV.

2.2.3 Klasifikasi Berdasarkan Fungsinya dalam Operasi

Berdasarkan fungsinya dalam operasi, saluran transmisi dapat diklasifikasikan sebagai

- 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. Transmisi dengan tegangan antara 30 kV sampai 70 kV pada percabangan (region-region) disebut sebagai sub-transmisi.

2.3 Fungsi Kawat Tanah

Pada umumnya saluran transmisi hantaran udara dilengkapi dengan kawat tanah untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir. Kawat tanah atau Earth wire (kawat petir / kawat tanah) adalah konduktor yang dipasang sejajar diatas susunan kawat fasa, dan diketanahkan melalui menara transmisi untuk memberi jalan arus petir dan muatan induksi ke tanah.

Sambaran petir pada lokasi saluran transmisi dapat mengakibatkan gangguan. Jika kawat fasa terkena sambaran langsung, maka tegangan lebih pada isolatornya akan menimbulkan *flashover*. Hal ini biasanya diikuti dengan pemutusan aliran daya. Disamping itu kerusakan isolasi peralatan mungkin terjadi kalau pengamannya tidak ada. Oleh karena itu, gangguan tersebut harus dicegah. Pada saluran-saluran yang penting, penggunaan kawat tanah sebagai alat pelindung merupakan cara yang standar dipergunakan. Kawat ditempatkan sedemikian rupa, sehingga sambaran langsung akan lebih mudah mengenai

kawat tanah itu daripada kawat fasa. Jadi, bisa dikatakan kawat tanah berfungsi untuk mengurangi kemungkinan sambaran yang mengenai kawat fasa.

Pada dasarnya kawat tanah juga dapat dimanfaatkan untuk tujuan-tujuan lain, salah satunya digunakan sebagai media komunikasi pada sistem tenaga. Dalam hal ini, kawat tanah itu harus diisolasi terhadap tanah, sehingga pemasangannya pada menara transmisi memerlukan isolator. Pengisolasian kawat tanah tidak akan mengurangi fungsinya sebagai penangkal petir tetapi ada pengaruhnya juga sedikit. Hubungan antara kawat tanah dengan tanah dipisahkan oleh sebuah isolator, bila ada gangguan petir yang menyerang kawat tanah, maka arus petir tersebut akan melompat melalui isolator untuk mencari jalan ketanah, tentunya isolator yang digunakan tidak terlalu besar agar dapat terjadi loncatan arus petir ketanah, dengan ini maka pengisolasian kawat tanah tidak akan mengurangi fungsinya sebagai penangkal petir.

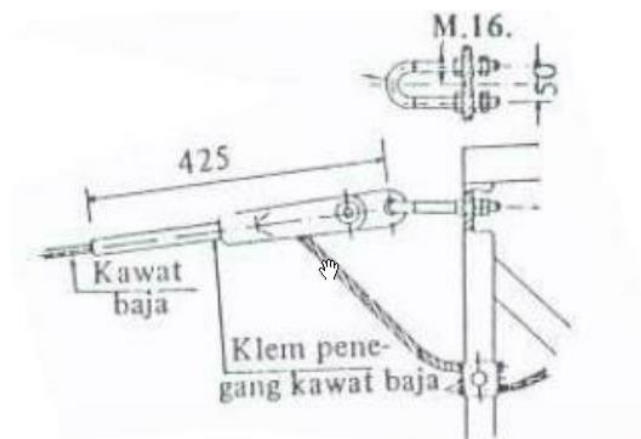
Selama ini diketahui bahwa pengiriman informasi dan data informasi saluran dapat dilakukan melalui kawat fasa, yang biasanya disebut komunikasi pembawa saluran tenaga (*Power Line Carrier*). Tetapi makin tinggi tegangan transmisi, maka makin besar pula daya yang harus dikeluarkan untuk peralatan pengait (*Coupling Equipment*). Disamping dari segi ini, penggunaan kawat tanah lebih menguntungkan.

Telah lama disadari bahwa kawat tanah yang diisolasi juga dapat berfungsi sebagai sumber daya. Pada waktu yang lalu, kemungkinan untuk memanfaatkan daya ini belum diperhatikan. Tetapi setelah saluran transmisi beroperasi dengan menggunakan Tegangan Ekstra Tinggi (*Extra High Voltage, EHV*) daya yang tersedia pada kawat menjadi cukup besar. Dengan cara tertentu yang disebut

sistem kopling kapasitif, daya ini dapat disadap dan digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban-beban daerah terpencil, baik yang berhubungan untuk kepentingan saluran, maupun tidak, misalnya daerah pedesaan. Jika letak beban dan keadaan alamnya mempersulit cara-cara yang lain, sedangkan daya yang dibutuhkan oleh beban itu tidak besar, maka penyadapan daya melalui kawat tanah (sistem kopling kapasitif) menjadi salah satu alternatif yang perlu dipertimbangkan.

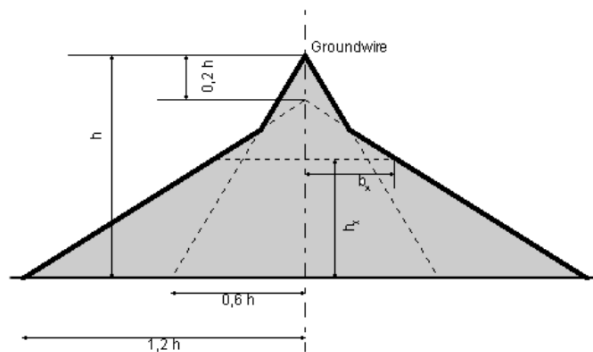
2.3.1 Prinsip Kerja Kawat Tanah

Kawat tanah atau *overhead grounding* adalah media pelindung kawat fasa dari sambaran petir. Kawat ini dipasang diatas kawat fasa dengan sudut perlindungan sekecil mungkin, karena diangkap petir menyambar diatas kawat.



Gambar 2.1 Pemasangan *Groundwire*

Pada umumnya *groundwire* terbuat dari kawat baja (*steel wire*) dengan kekuatan St 35 atau St 50, tergantung dari spesifikasi yang ditentukan oleh PLN. Dalam melindungi kawat fasa tersebut, daerah proteksi *groundwire* dapat digambarkan seperti gambar 2.2.



Gambar 2.2 Daerah Proteksi dengan menggunakan 1 buah *groundwire*

Dari gambar di atas, misalkan *groundwire* diletakkan setinggi h meter dari tanah. Dengan menggunakan nilai-nilai yang terdapat pada gambar tersebut, titik b dapat ditentukan sebesar $2/3 h$. Sedangkan zona proteksi *groundwire* terletak di dalam daerah yang diarsir. Di dalam zona tersebut, diharapkan tidak terjadi sambaran petir langsung sehingga di daerah tersebut pula kawat fasa dibentangkan.

2.4 Tegangan Induksi pada Kawat Tanah

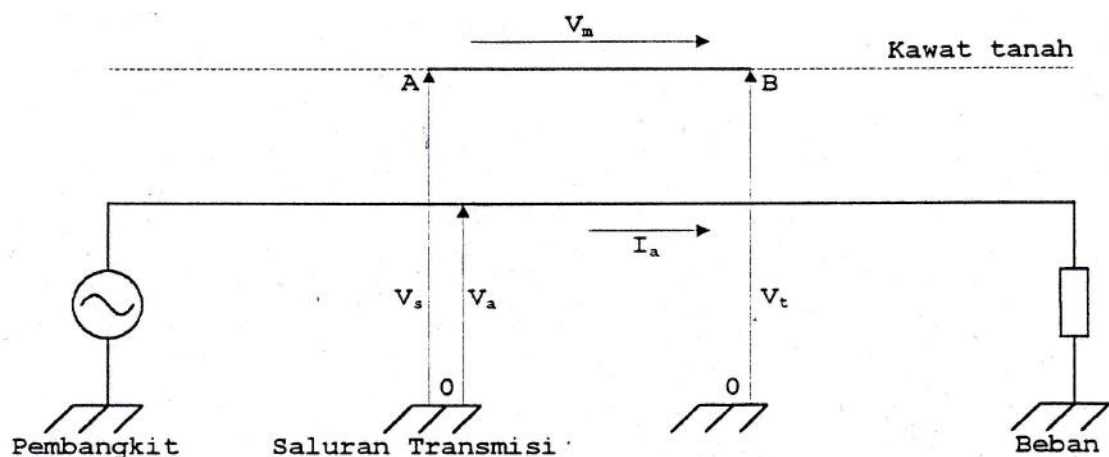
Pada saluran transmisi hantaran udara, kawat fasa merupakan konduktor yang digunakan untuk menyalurkan daya listrik. Muatan dan arus listrik pada konduktor ini menimbulkan medan elektrostatis dan elektromagnetis. Dalam hal tertentu, pengaruh medan-medan ini seringkali menyebabkan kerugian, seperti gangguan pada saluran komunikasi, rugi-rugi daya pada kawat tanah, dan bahaya tegangan induksi pada manusia. Makin besar tegangan transmisi dan makin besar arus yang mengalir pada kawat fasa, masalah akan berkembang menjadi semakin penting.

Kawat tanah terletak sejajar dengan kawat fasa disepanjang saluran transmisi. Dalam medan elektrostatis dan elektromagnetis, kawat tanah tidak

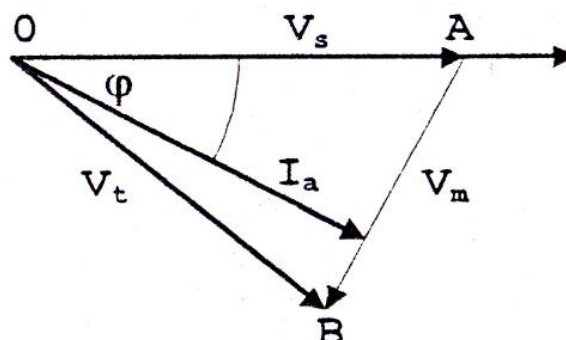
diketanahkan mempunyai tegangan tertentu yang terjadi secara induksi. Tegangan ini dapat diuraikan menjadi dua tegangan induksi, yang masing-masing didefinisikan sebagai berikut :

1. Tegangan induksi elektrostatis, adalah pada potensial antara kawat tanah dengan tanah, merupakan fungsi tegangan kawat fasa.
2. Tegangan induksi elektromagnetis, adalah gaya gerak listrik induksi yang dibangkitkan sepanjang kawat tanah, merupakan fungsi arus yang mengalir pada kawat fasa.

a) Tegangan induksi pada kawat tanah yang diisolasi



b) Diagram phasor tegangan induksi tersebut



Gambar 2.3 (a) dan (b)

Induksi elektrostatik dan elektromagnetik pada kawat tanah menghasilkan tegangan yang berbeda, masing-masing adalah V_s dan V_m , seperti terlihat pada gambar 2.3 (a). Beda fasa antara V_s dan V_m tergantung pada beda fasa antara tegangan V_a dan arus I_a pada kawat fasa. Superposisi kedua tegangan induksi, V_s dan V_m adalah V_t , yaitu tegangan induksi paduan seperti terlihat pada gambar 2.3 (b).

Jika titik A dan B merupakan ujung-ujung kawat tanah yang diisolasi, dan titik 0 menyatakan titik referensi dengan potensial tanah, maka interpretasi fisis tegangan V_s , V_m dan V_t adalah sebagai berikut :

1. A dan B diisolasi terhadap tanah, maka $V_s = V_{A0}$ dan $V_m = V_{BA}$
2. A diketanahkan secara langsung dan B tetap diisolasi, maka $V_s = 0$ dan $V_m = V_{BA} = V_{B0}$.
3. A diketanahkan dengan impedansi yang cukup besar dan B tetap diisolasi, sehingga $V_{A0} = V_s$ maka $V_m = V_{BA}$ dan $V_t = V_{B0}$

Untuk kawat tanah yang diketanahkan melalui setiap menara transmisi, beda potensialnya terhadap tanah yang sama dengan nol. Tetapi gaya gerak listrik tetap ada, dan menyebabkan arus induksi mengalir pada rangkaian tertutup yang dibentuk oleh kawat tanah, menara dan tanah. Akibatnya, arus ini menimbulkan rugi-rugi daya I^2R pada kawat tanah tersebut. Bagi saluran transmisi yang panjang dan berkapasitas besar, rugi-rugi daya ini tidak dapat diabaikan. Pada umumnya, usaha untuk mengurangi rugi-rugi daya tersebut dapat dilakukan dengan mengisolasi kawat tanah tersebut. Hal ini bersesuaian dengan maksud

menggunakan kawat tanah tersebut sebagai media komunikasi atau untuk penyesapan daya

Dalam penyesapan daya melalui kawat tanah dibutuhkan sumber daya yang bertegangan konstan. Tegangan induksi elektromagnetis merupakan fungsi arus pada kawat fasa yang besarnya tidak konstan. Tegangan ini terdistribusi disepanjang kawat tanah. Jika suatu rangkaian tertutup dibentuk dengan salah satu ujung kawat tanah diketanahkan dan memasang beban diujung lain, maka arus induksi yang mengalir pada rangkaian ini juga akan menimbulkan rugi-rugi daya I^2R . Dengan demikian, maksud mengurangi rugi-rugi daya pada kawat tanah tidak dapat dilaksanakan. Berdasarkan alasan inilah, tegangan elektrostatik dipilih. Tegangan ini konstan, karena tegangan kawat fasa atau tegangan transmisi dianggap tidak berubah.

2.5 Kopling Kapasitif Antara Kawat Tanah dan Kawat Fasa

Muatan listrik pada kawat fasa yang bertegangan merupakan sumber medan elektrostatik dari saluran transmisi, sehingga kopling kapasitif antara kawat fasa dan kawat tanah menyebabkan induksi muatan listrik pada kawat tanah itu. Beda potensial antara kawat tanah dan tanah akan terjadi, jika kawat tanah diketanahkan. Hal ini menunjukkan adanya suatu sumber daya dengan kawat tanah sebagai jepitannya. Kawat tanah yang dihubungkan ketanah melalui beban dengan impedansi yang cukup besar akan memberi jalan bagi muatan induksi, dan sekaligus menjaga agar tegangan kawat tanah itu selalu ada. Dengan impedansi yang bersifat resistif, beban tersebut menerima daya aktif. Seluruh proses ini disebut penyesapan daya melalui kawat tanah.

Pada saluran transmisi arus bolak-balik, tegangan kawat fasa berubah menurut waktu dengan frekuensi tertentu, yang berarti bahwa muatan listrik pada kawat fasa itu juga berubah dengan frekuensi yang sama. Perubahan muatan listrik mengakibatkan perubahan fluksi listrik yang dihasilkannya. Berdasarkan hukum Gauss, untuk muatan $q = q(t)$,

$$\frac{d}{dt} \oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \oint \mathbf{D} \cdot \frac{d\mathbf{s}}{dt} = \frac{dq}{dt} \quad (2.1)$$

Jika hubungan linier antara muatan dan potensial dideferensiasi terhadap waktu maka diperoleh :

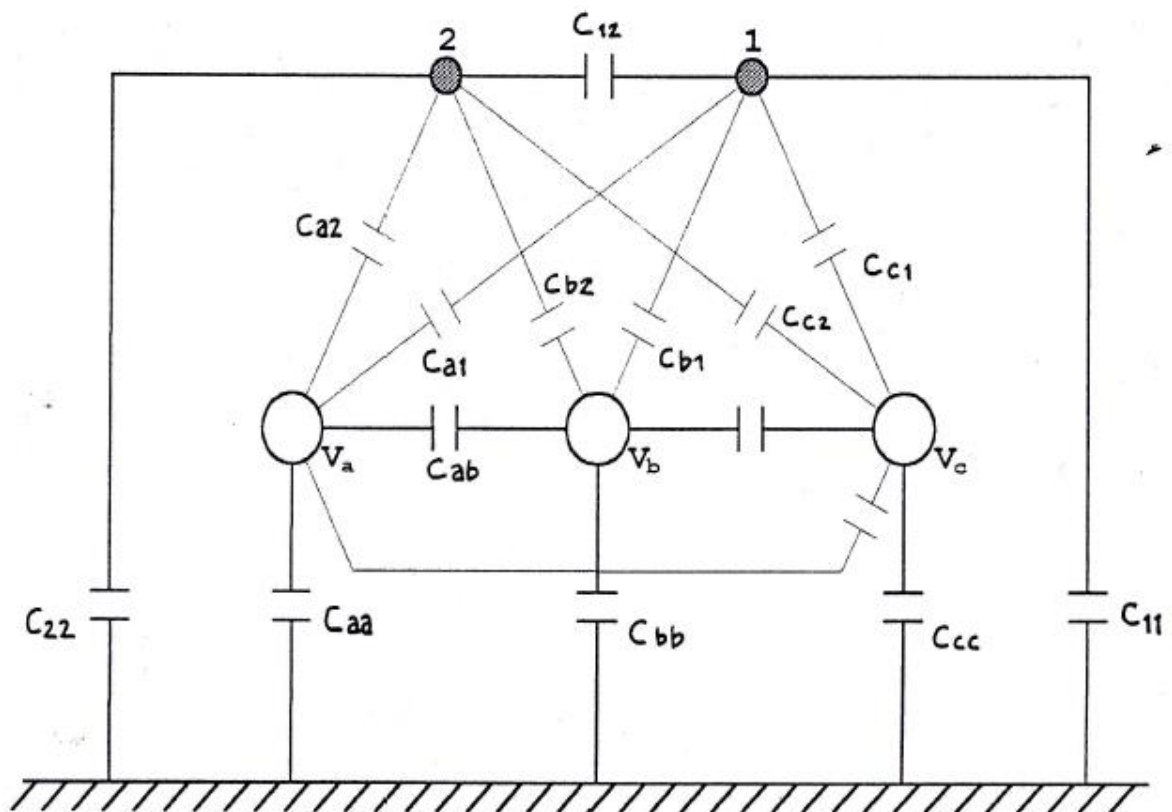
$$\frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt} = i_c \quad (2.2)$$

Dalam rangkaian listrik, i_c dapat diinterpretasikan sebagai arus yang mengalir melalui kapasitor C, jika diantara kedua elektrodanya dipasang tegangan $v = v(t)$. Pada saluran transmisi, arus ini disebut arus pengisian (*charging current*), yaitu salah satu komponen arus yang harus dicatu oleh pembangkit. Arus pengisian selalu terjadi, jika beda potensial antara konduktor dan antara konduktor tanah berubah-ubah menurut waktu. Besar arus pemuatan tergantung pada tegangan dan kapasitansi kawat fasa terhadap tanah dan konduktor-konduktor yang lain.

Masalah medan listrik yang dihadapi dalam penyadapan daya memerlukan penyederhanaan kedalam bentuk rangkaian listrik. Saluran transmisi di representasikan dengan suatu jaringan kapasitansi. Selanjutnya, analisa jaringan

ini merupakan masalah rangkaian, yang dapat dikerjakan dengan bantuan sebuah simpul. Setiap simpul dihubungkan dengan tanah dan simpul-simpul lainnya melalui kapasitansi. Tanah menjadi referensi potensial. Jika sumber-sumber bertegangan konstan dipasang antara kawat-kawat fasa dan tanah, maka setiap simpul pada diagram ini mempunyai tegangan tertentu. Jaringan seperti ini disebut jaringan aktif, yaitu jaringan yang berfungsi sebagai sumber daya.

Sebagai contoh, pada gambar 2.4 dilukiskan suatu diagram kapasitansi untuk saluran transmisi tiga fasa rangkaian tunggal dengan dua kawat tanah. Susunan simpul digambarkan sesuai dengan konfigurasi saluran tersebut. Simpul a, b, dan c adalah kawat-kawat fasa, sedangkan simpul 1 dan 2 adalah kawat-kawat tanah yang tidak diketanahkan. Setiap kawat fasa merupakan konduktor bermuatan dengan potensial yang konstan terhadap tanah. Diagram kapasitansi saluran-saluran transmisi yang lain dapat disusun dengan cara yang sama.



Gambar 2.4 Diagram kapasitansi saluran tiga fasa rangkaian tunggal dengan dua kawat tanah yang diisolasi.

Suatu saluran transmisi sederhana, yang terdiri dari dua konduktor sejajar dan terisolasi diatas tanah, mempunyai diagram kapasitansi seperti gambar 2.4 (a). Simpul a dan 1 masing-masing adalah kawat fasa dan kawat tanah. Jika sumber bertegangan V_a dihubungkan dengan kawat fasa, maka tegangan kawat tanah adalah

$$V_{10} = \frac{C_{a1}}{C_{11} + C_{a1}} V_a \quad (2.3)$$

Dimana :

C_{a1} = kapasitansi antara kawat fasa a dengan kawat tanah 1

C_{11} = kapasitansi antara kawat tanah 1 dengan tanah (bumi)

V_a = tegangan sumber

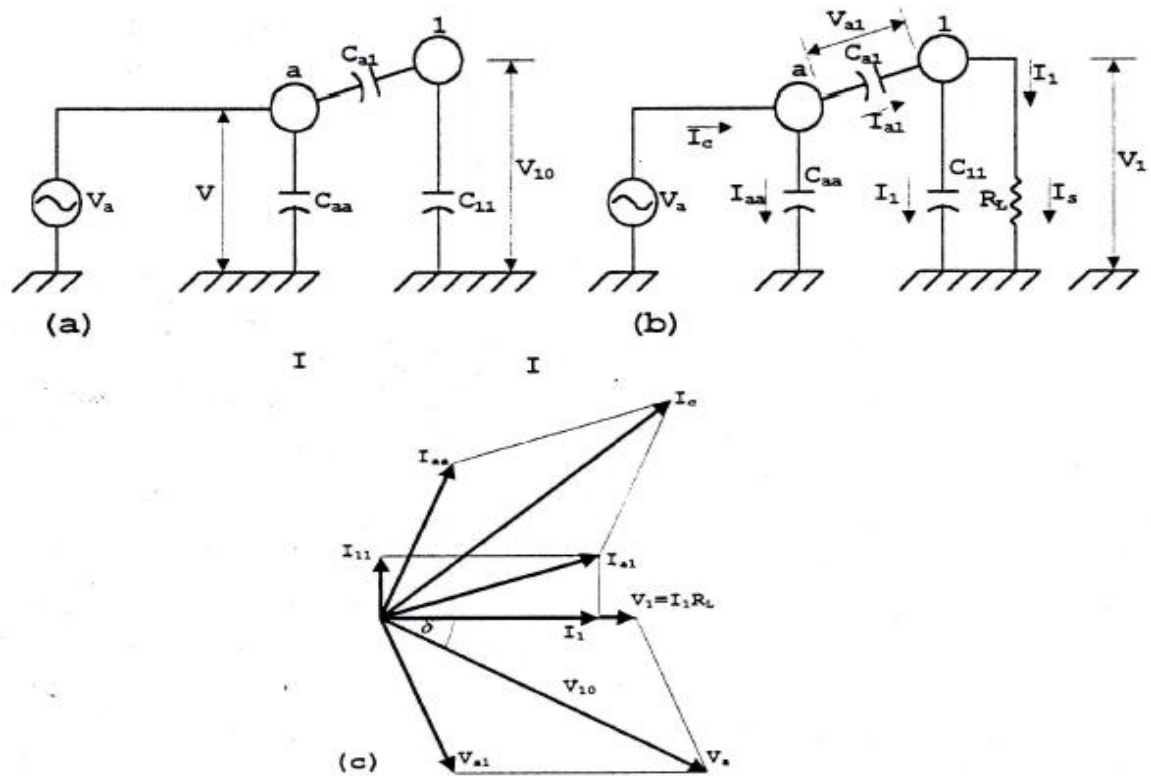
V_{10} = tegangan antara kawat tanah 1 dengan tanah (bumi)

Tegangan V_{10} disebut juga tegangan induksi elektrostatik. Dalam keadaan ini, V_{10} dan V_a sefasa. Perbandingan antara kedua tegangan ini dinyatakan sebagai faktor kopling kapasitif, yaitu :

$$K_{1a} = \frac{V_{10}}{V_a} = \frac{C_{a1}}{C_{11} + C_{a1}} \quad (2.4)$$

Jika beban dengan tahanan R_L dipasang antara kawat tanah dan tanah, seperti pada gambar 2.5 (b) maka tegangan kawat tanah itu menjadi :

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{J\omega R_L \cdot C_{a1}}{1 + J\omega R_L (C_{11} + C_{a1})} V_a \\ &= \frac{\omega R_L C_1 \sqrt{1 + \omega^2 R_L^2 (C_{11} + C_{a1})^2}}{1 + \omega^2 R_L^2 (C_{11} + C_{a1})^2} V_a \angle \theta \end{aligned} \quad (2.5)$$



Gambar 2.5

a) Diagram kapasitasansi dua konduktor sejajar dan terisolasi diatas tanah dengan sumber tegangan V_a pada kawat fasa

b) Beban dengan tahanan R_L dipasang pada kawat tanah

c) Diagram fasor tegangan dan arus.

Sementara itu Sementara itu δ , yaitu beda fasa antara V_1 dan V_a adalah :

$$\delta = \tan^{-1} \frac{1}{\omega R_L (C_{11} + C_{a1})} \quad (2.6)$$

Dimana : ω = frekuensi sudut, rad/s, $\omega = 2\pi f$

f = frekuensi, Hz

Dengan memperhatikan persamaan (2.5), jika C_{11} dan C_{a1} konstan (saluran dengan konfigurasi dan ukuran konduktor tetap), V_a dan ω konstan (sumber dengan tegangan dan frekuensi tetap), maka V_1 hanya merupakan fungsi R_L saja.

Diagram phasor tegangan dan arus untuk pembebanan dengan R_L tertentu dilukiskan pada gambar 2.5 (c). Dengan diagram ini diperhatikan beda fasa antara tegangan dan kawat tanah V_1 dan tegangan kawat fasa V_a , yaitu δ , serta arus pengisian I_c pada kawat fasa. Dalam hal ini V_1 merupakan phasor yang diletakkan pada sumbu datar diagram itu. Komponen arus pemuatan yang mengalir melalui kawat tanah, yaitu I_{a1} menyebabkan terjadinya daya aktif pada beban. Dalam penggambaran diagram I_{a1} merupakan jumlah vektoris (resultan) I_1 dan I_{11} yang saling tegak lurus. I_1 adalah arus resistif yang melalui beban dan sefasa dengan V_1 , sedangkan I_{11} adalah arus kapasitif pada kawat tanah. Dengan mengetahui I_{a1} , V_{a1} dapat digambarkan 90° terbelakang dari I_{a1} . Resultan V_{a1} dan V_1 menghasilkan V_a . Dengan demikian diperoleh sudut δ . Selanjutnya, I_{aa} digambarkan 90° terdahulu dari V_a . Resultan I_{aa} dan I_{a1} menghasilkan I_c .

Kopling kapasitif antara kawat fasa dan kawat tanah menghasilkan daya aktif. Berdasarkan penjelasan diatas, jika kawat tanah dibebani dengan tahanan R_L , maka besar daya itu dapat dinyatakan sebagai :

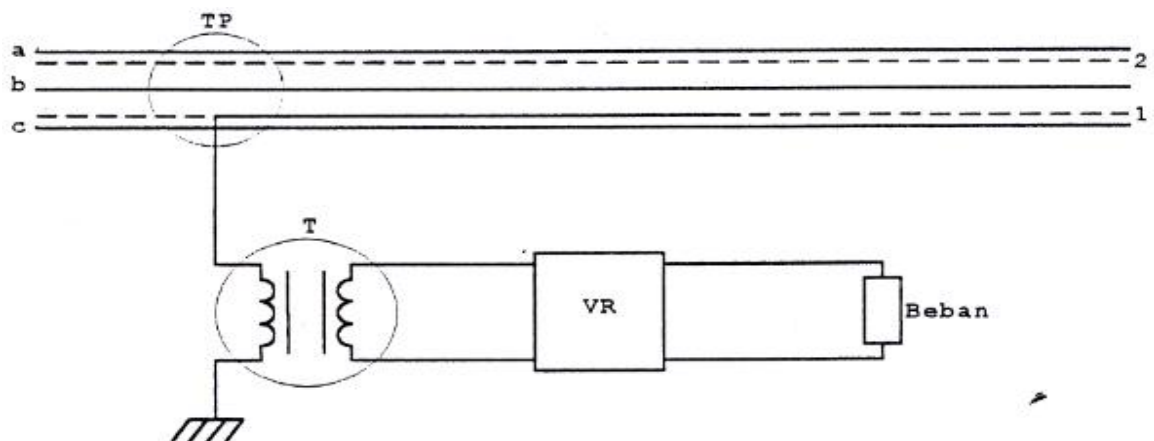
$$\begin{aligned}
 P_L &= \frac{V_1^2}{R_L} \\
 &= \frac{\omega^2 R_L C_{a1}^2}{1 + \omega^2 R_L^2 (C_{11} + C_{a1})^2} V_a^2
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Pada keadaan sebenarnya, saluran transmisi menggunakan lebih banyak konduktor, misalnya tiga kawat fasa dan dua kawat tanah. Diagram kapasitansi untuk saluran yang demikian menjadi lebih rumit seperti pada gambar 2.4. sehingga perhitungan dengan cara diatas akan mengalami kesulitan. Untuk mengatasi hal ini, jaringan kapasitansi saluran harus disederhanakan sebuah rangkaian pengganti.

2.6 Sistem Penjadapan Daya Melalui Kawat Tanah

Penjadapan dilakukan dengan mengisolasi kawat tanah, adapun pengisolasian kawat tanah tersebut diupayakan tidak melewati titik transposisi, karena efek dari transposisi dapat membuat kapasitansi antara kawat tanah dan kawat fasa menjadi nol.

Seperti telah diketahui, transposisi bermaksud untuk membuat seimbang masing-masing fasa, dengan cara menukar susunan kawat fasa pada titik-titik transposisi, yang akibatnya kopling kapasitif antara fasa dengan kawat tanah akan saling menghilang. Bagan dasar sistem penjadapan dapat dilukiskan seperti gambar 2.6 penjadapan daya ini dilakukan pada saluran transmisi tiga fasa rangkaian tunggal dengan dua kawat tanah. Bagan dibawah ini memperlihatkan hal tersebut.



Gambar 2.6 bagan dasar sistem penyaluran daya melalui kawat tanah

- a,b,c = kawat-kawat fasa

- 1 = kawat tanah yang diisolasi sebagian

- 2 = kawat tanah yang diketanahkan

- TP = titik penyaluran

- T = transformator satu fasa

- VR = pengatur tegangan

- Beban = peralatan listrik yang dicatu oleh sistem penyaluran

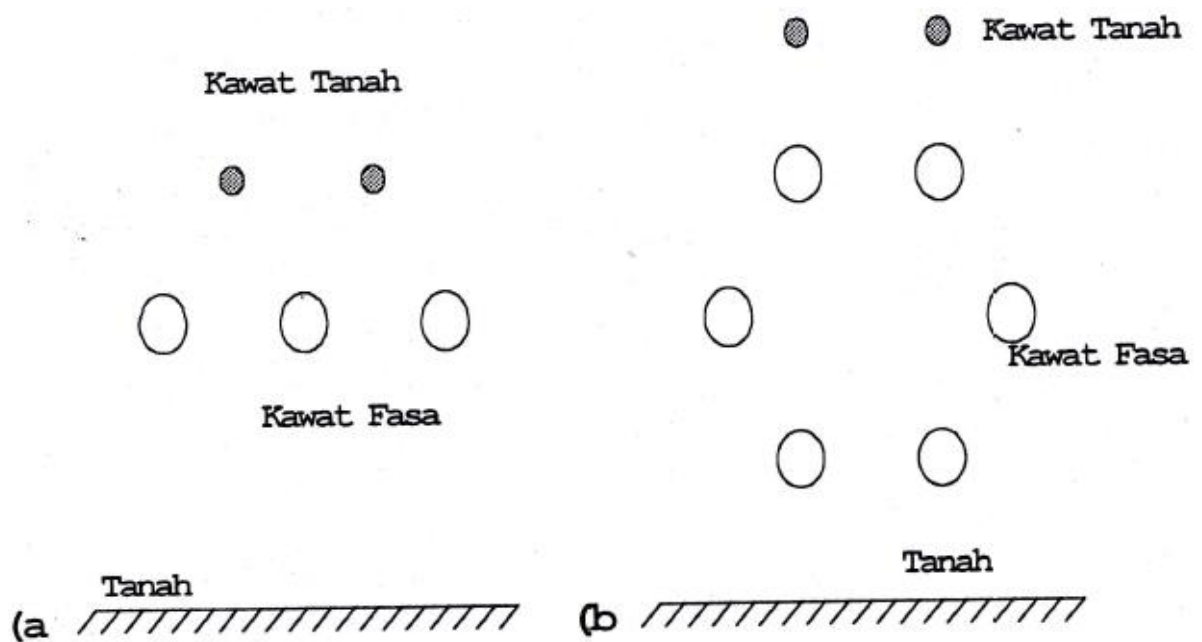
Kawat tanah 1 yang digunakan untuk penyaluran daya hanya diisolasi sebagian sesuai dengan daya yang dibutuhkan. Sementara itu, kawat tanah 2 diketanahkan. Titik penyaluran (*tapping point*, *TP*) adalah tempat dimana penyaluran dilakukan. Transformator T dipasang untuk menurunkan tegangan kawat tanah.

Salah satu kutub kumparan primer (tegangan tinggi) transformator T dihubungkan dengan kawat tanah 1, sedangkan kutub yang lain diketanahkan. Pada kumparan sekunder (tegangan rendah) dipasang pengatur tegangan VR. Alat ini diperlukan untuk menjaga agar beban dapat bekerja dengan konstan.

Sistem penyalutan terdiri dari tiga komponen dasar, yaitu kawat fasa, kawat tanah, dan rangkaian pembebanan. Kawat fasa adalah konduktor yang menghubungkan sumber daya (pembangkit) dengan bagian saluran transmisi dimana penyalutan dilakukan. Kawat tanah adalah konduktor yang digunakan untuk penyalutan daya secara kopling kapasitif. Rangkaian pembebanan (*loading circuit*) meliputi transformator, pengaturan tegangan dan alat-alat pengamanan yang diperlukan dalam pencatutan daya kebeban.

2.7 Rangkaian Pengganti Sistem Penyalutan Daya Pada Saluran Transmisi Dengan Dua Kawat Tanah.

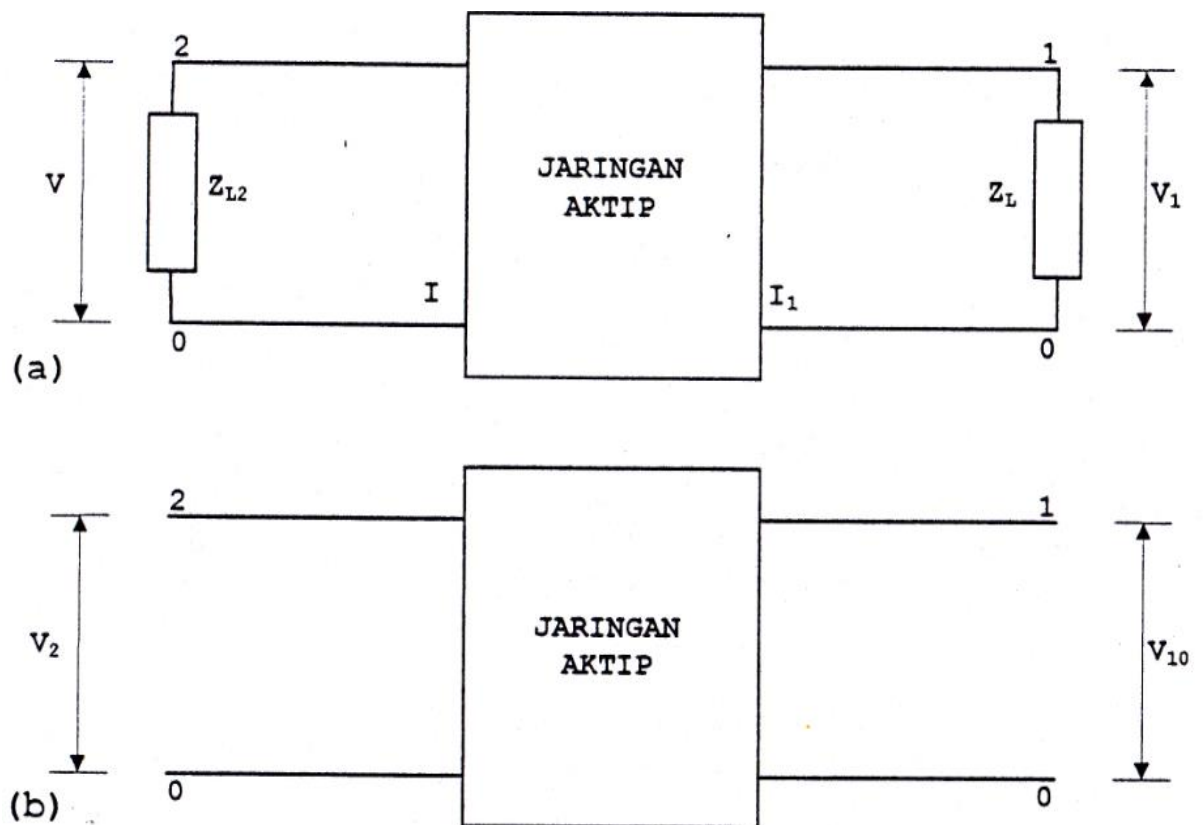
Konfigurasi saluran transmisi tiga fasa dengan dua kawat tanah dapat dilukiskan seperti gambar 2.7. kedua kawat tanah terletak sama tinggi dan simetris diatas susunan kawat fasa, baik pada rangkaian tunggal maupun pada rangkaian ganda.



Gambar 2.7 konfigurasi saluran transmisi tiga fasa dengan dua kawat tanah.

a) Rangkaian tunggal b) Rangkaian ganda

Sistem penyaluran daya melalui kawat tanah pada saluran transmisi dengan dua kawat tanah merupakan suatu jaringan aktif yang terdiri dari semua kapasitansi antara kawat fasa, kawat tanah dan tanah, serta semua sumber tegangan yang dihubungkan dengan kawat fasa. Jaringan ini dapat disederhanakan menjadi sebuah diagram balok empat kutub, seperti gambar 2.8 (a). Kutub 1 dan 2 masing-masing mempresentasikan kawat tanah 1 dan 2 yang diisolasi. Kutub 0 adalah tanah yang berfungsi sebagai referensi potensial, sehingga pada diagram balok itu terdapat dua jepitan, yaitu $1 - 0$ dan $2 - 0$. Beban dengan impedansi Z_{11} dan Z_{12} dipasang pada masing-masing jepitan.



Gambar 2.8

- a) Diagram blok empat kutub dengan impedansi beban Z_{L1} dan Z_{L2}
- b) Tegangan hubungan terbuka pada jepitan 1-0 dan 2-0

Penerapan teori Thevenin untuk jaringan aktif empat terminal tidak dapat dilakukan seperti halnya untuk jaringan aktif dua terminal karena karakteristik jaringan dilihat dari satu jepitan dipengaruhi oleh kondisi jepitan yang lain. Dengan demikian, konsep jaringan pasif empat terminal harus digunakan untuk menentukan konstanta-konstantanya. Jika beban Z_{L1} dan Z_{L2} dilepas, maka pada masing-masing jepitan terdapat tegangan V_{10} dan V_{20} , yaitu tegangan-tegangan hubungan terbuka yang ditentukan secara serentak, seperti gambar 2.8 (b). Kemudian semua sumber tegangan didalam jaringan itu dihubung singkat dan

diganti dengan impedansi dalamnya masing-masing, sehingga jaringan ini menjadi jaringan pasif.

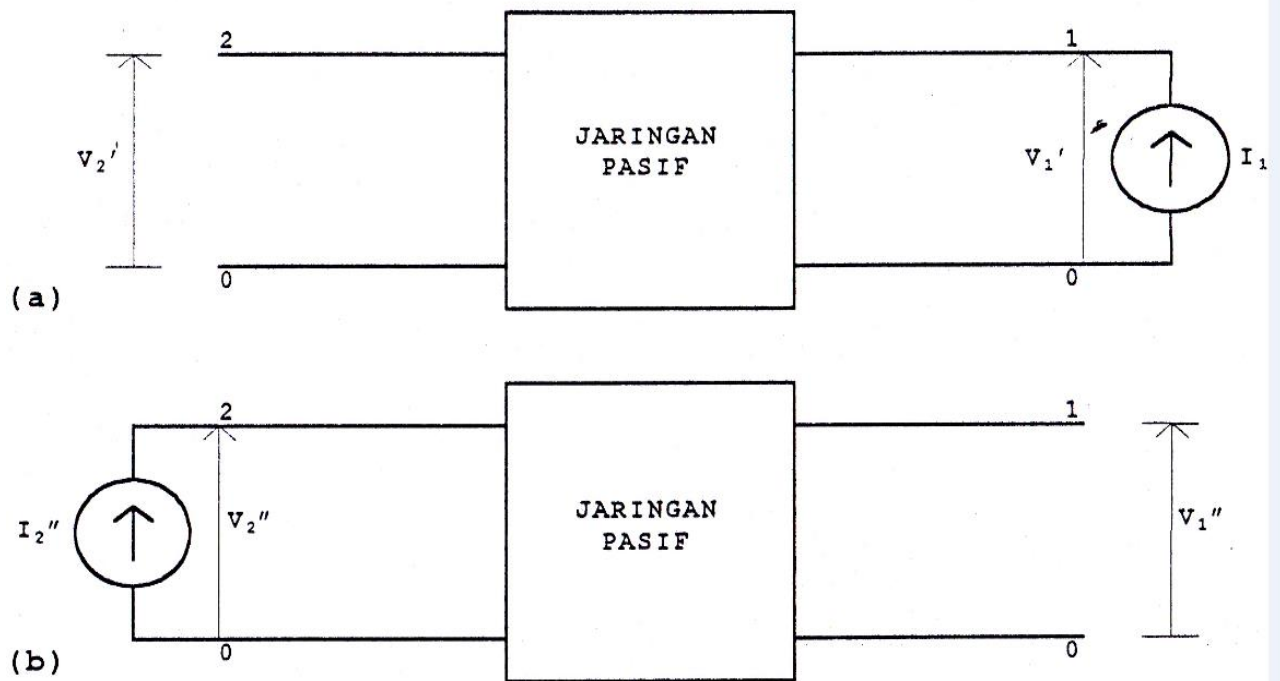
Pada jaringan pasif empat kutub dapat ditentukan impedansi *driving-point* dan impedansi transfer sebagai berikut.

1. sumber arus I_1' dipasang pada jepitan 1 – 0, dengan jepitan 2 – 0 terbuka, maka pada masing-masing jepitan terdapat tegangan V_1' dan V_2' seperti pada gambar 2.9 (a).
2. sumber arus I_2'' dipasang pada jepitan 2 – 0, dengan jepitan 1 – 0 terbuka, maka pada masing-masing jepitan terdapat tegangan V_1'' dan V_2'' seperti pada gambar 2.9 (b)
3. impedansi *driving-point* sebagai jaringan dinyatakan sebagai

$$Z_{11} = \frac{V_1'}{I_1'} \text{ dan } Z_{22} = \frac{V_2''}{I_2''} \quad (2.8)$$

4. impedansi transfer jaringan dinyatakan sebagai

$$Z_{21} = \frac{V_2'}{I_1'} \text{ dan } Z_{12} = \frac{V_1''}{I_2''} \quad (2.9)$$



Gambar 2.9 penentuan konstanta-konstanta jaringan pasif empat kutub dengan sumber arus

a) Pada jepitan 1-0

b) Pada jepitan 2-0

5. berdasarkan teori resiprositas, jika $I_2 = I_1$ maka $V_1 = V_1$ dan $Z_{12} = Z_{21}$

Dengan memperhatikan kembali gambar 2.8 (a), jika $I_1 \cdot Z_{11} = V_1$ dan $I_2 \cdot Z_{12} = V_2$, maka hubungan tegangan dan arus pada jaringan itu adalah :

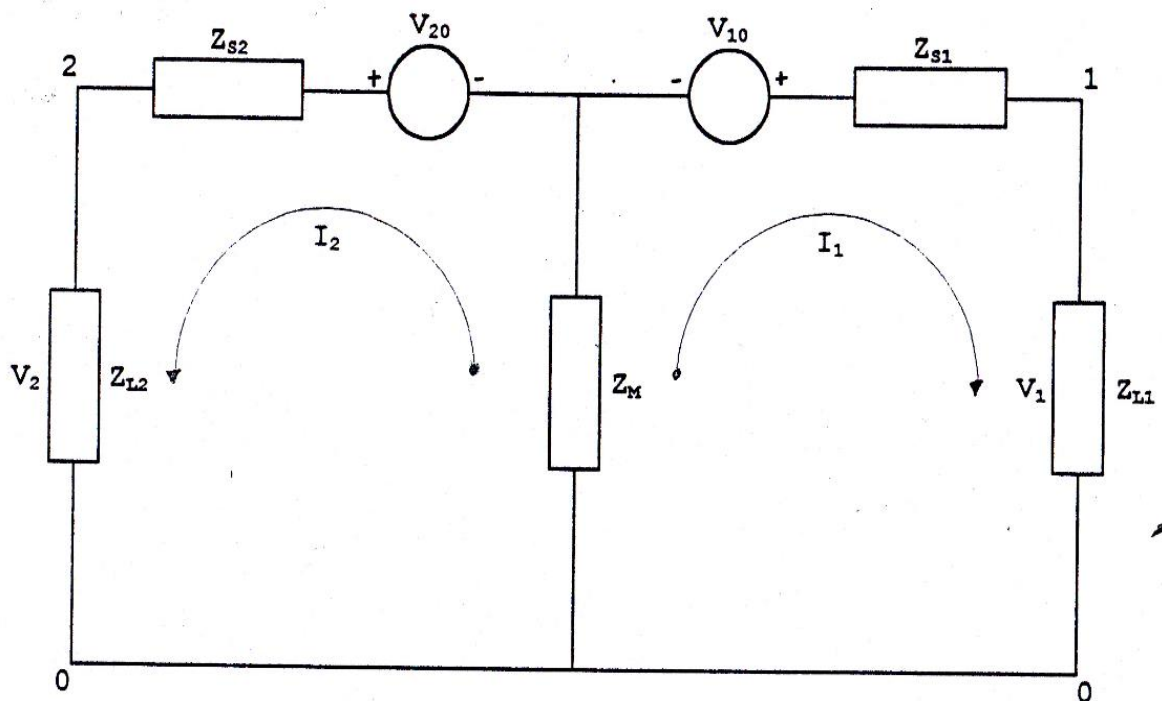
$$V_{10} - V_1 = I_1 \cdot Z_{11} + I_2 \cdot Z_{12}$$

$$V_{20} - V_2 = I_1 \cdot Z_{21} + I_2 \cdot Z_{22} \quad (2.10)$$

Berdasarkan persamaan (3.4) dapat disusun sebuah rangkaian pengganti yang terdiri dari dua mesh, dan memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. arus pada masing-masing mesh adalah I_1 dan I_2 .
2. sumber tegangan pada masing-masing mesh adalah V_{10} dan V_{20} .
3. tegangan beban pada masing-masing mesh adalah V_1 dan V_2 .
4. konstanta-konstanta rangkaian ini harus diturunkan dari Z_{11} , Z_{12} dan Z_{22} .
5. rangkaian pengganti yang dimaksud dapat dilukiskan seperti gambar 2.10

hubungan tegangan dan arus pada rangkaian itu adalah :



Gambar 2.10 Rangkaian pengganti sistem penyadapan untuk konfigurasi saluran dengan dua kawat tanah.

Keterangan gambar :

V_{10} dan V_{20} : tegangan antara kawat fasa dan tanah

V_1 dan V_2 : tegangan beban

I_1 dan I_2 : arus yang mengalir pada loop 1 dan loop 2

Z_m : impedansi mutual (impedansi antara kawat fasa dan kawat tanah)

Z_{s1} dan Z_{s2} : impedansi saluran

Z_{L1} dan Z_{L2} : impedansi beban

$$V_{10} - V_1 = I_1(Z_{s1} + Z_m) + I_2 \cdot Z_m$$

$$V_{20} - V_2 = I_1 \cdot Z_m + I_2(Z_{s2} + Z_m) \quad (2.11)$$

Jika persamaan (2.11) dibandingkan dengan persamaan (2.10), maka :

$$Z_m = Z_{12} = Z_{21}$$

$$Z_{s1} = Z_{11} - Z_m = Z_{11} - Z_{12}$$

$$V_{s2} = Z_{22} - Z_m = Z_{22} - Z_{12} \quad (2.12)$$

Untuk konfigurasi saluran dengan dua kawat tanah, kondisi setiap kawat tanah dipresentasikan dengan masing-masing mesh pada rangkaian pengganti, termasuk kopling bersama antara kedua kawat tanah tersebut. Tegangan sumber V_{10} dan V_{20} , impedansi dalam Z_{s1} dan V_{s2} , serta impedansi bersama Z_m , akan dibahas lebih lanjut pada pembahasan selanjutnya mengenai parameter-parameter penyaluran daya.