

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Ketenagalistrikan⁸

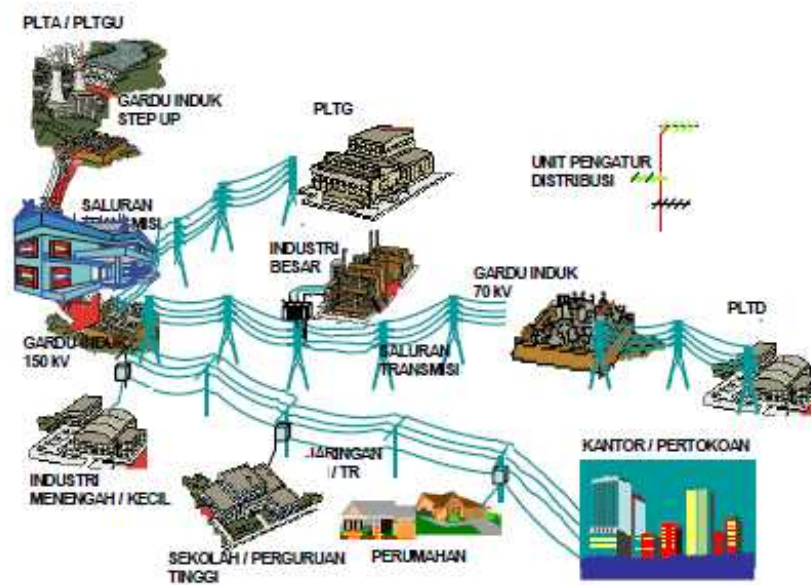
Dalam sepuluh tahun terakhir ini, masalah listrik menjadi polemik yang berkepanjangan dan telah memunculkan multi implikasi yang sangat kompleks di berbagai aspek kehidupan, antara lain : keuangan, ekonomi, sosial, budaya, politik, dan lain -lain. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa listrik telah menjadi bagian yang sangat penting bagi umat manusia. Oleh karenanya tak berlebihan bahwa listrik bisa dikatakan sebagai salah satu kebutuhan utama bagi penunjang dan pemenuhan kebutuhan hidup umat manusia. Beberapa tantangan besar yang dihadapi dunia pada masa kini, antara lain, bagaimana menemukan sumber energi baru, mendapatkan sumber energi yang pada dasarnya tidak akan pernah habis untuk masa mendatang, menyediakan energi di mana saja diperlukan, dan mengubah energi dari satu ke lain bentuk, serta memanfaatkannya tanpa menimbulkan pencemaran yang dapat merusak lingkungan hidup kita. Dibanding dengan bentuk energi yang lain, listrik merupakan salah satu bentuk energi yang praktis dan sederhana.

Di samping itu listrik juga mudah disalurkan dari dan pada jarak yang berjauhan, mudah didistribusikan untuk area yang luas, mudah diubah ke dalam bentuk energi lain, dan bersih (ramah lingkungan). Oleh karena itu, manfaat listrik telah dirasakan oleh masyarakat, baik pada kelompok perumahan, sosial, bisnis atau perdagangan, industri dan publik. Tenaga listrik sebagai bagian dari bentuk energi dan cabang produksi yang penting bagi negara sangat menunjang upaya dalam memajukan dan mencerdaskan bangsa. Sebagai salah satu hasil pemanfaatan kekayaan alam yang menguasai hajat hidup orang banyak, tenaga listrik perlu dipergunakan untuk kesejahteraan dan kemakmuran rakyat. Yang dimaksud dengan sistem tenaga listrik adalah sekumpulan pusat listrik dan gardu induk (pusat beban) yang satu dengan yang lain dihubungkan oleh jaringan terinterkoneksi. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu: pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi. Suatu sistem

⁸ Suhadi,dkk. 2008. *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1 dan 3*.



distribusi menghubungkan semua beban yang terpisah satu dengan yang lain kepada saluran transmisi. Hal ini terjadi pada gardu-gardu induk (*substation*) di mana juga dilakukan transformasi tegangan dan fungsi-fungsi pemutusan (*breaker*) dan penghubung beban (*switching*). Gambar 2.1 memperlihatkan sistem tenaga listrik mulai dari pembangkit sampai ke pengguna/pelanggan.



Gambar 2.1 Ruang Lingkup Sistem Tenaga Listrik⁸

2.2 Klasifikasi Sistem Tenaga Listrik

Tegangan pada generator besar biasanya berkisar di antara 13,8 kV dan 24 kV. Tetapi generator besar yang modern dibuat dengan tegangan bervariasi antara 18kV dan 24 kV. Tegangan generator dinaikkan ke tingkat yang dipakai untuk transmisi, yaitu 115 kV dan 765 kV. Tegangan tinggi standar (high voltage, HV standard) di luar negeri adalah 70 kV, 150 kV, dan 220 kV. Tegangan tinggi-ekstra standar (extra high voltage, HV standard) adalah 500 kV dan 700 kV.

Keuntungan transmisi (transmission capability) dengan tegangan lebih tinggi akan menjadi jelas jika kita melihat pada kemampuan transmisi (transmission capability) suatu saluran transmisi. Kemampuan ini biasanya dinyatakan dalam Mega-Volt-Ampere (MVA) . Tetapi kemampuan transmisi dari



suatu saluran dengan tegangan tertentu tidak dapat diterapkan dengan pasti, karena kemampuan ini masih tergantung lagi pada batasan-batasan termal dari penghantar, jatuh tegangan (drop voltage) yang diperbolehkan, keandalan, dan persyaratan kestabilan sistem.

Penurunan tegangan dari tingkat transmisi pertama-tama terjadi pada gardu induk bertenaga besar, di mana tegangan diturunkan ke daerah antara 70 kV dan 150 kV, sesuai dengan tegangan saluran transmisinya. Beberapa pelanggan yang memakai tenaga untuk keperluan industri sudah dapat dicatu dengan tegangan ini. Penurunan tegangan berikutnya terjadi pada gardu distribusi primer, di mana tegangan diturunkan lagi menjadi 1 sampai 30 kV. Tegangan yang lazim digunakan pada gardu-distribusi adalah 20.000 V antar-fasa atau 11.500 V antara fasa ke tanah. Tegangan ini biasanya dinyatakan sebagai 20.000 V/11.500 V. Sebagian besar beban untuk industri dicatu dengan sistem distribusi primer, yang mencatu transformator distribusi.

Transformator - transformator ini menyediakan tegangan sekunder pada jaringan tegangan rendah tiga-fasa empat-kawat untuk pemakaian di rumah-rumah tempat tinggal. Standar tegangan rendah yang digunakan adalah 380 V antara antar fasa dan 220V di antara masing-masing fasa dengan tanah, yang dinyatakan dengan 220/380 V.

2.3 Pengertian Distribusi Tenaga Listrik⁸

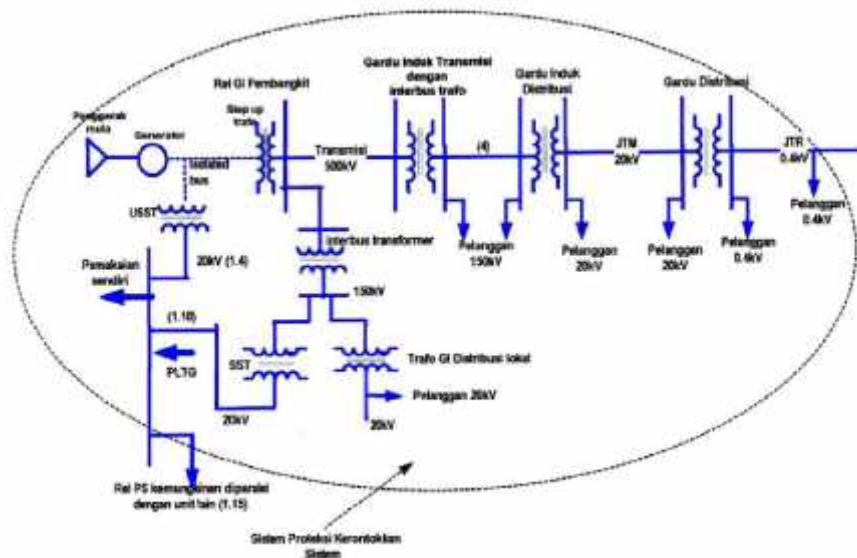
Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah; 1) pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan 2) merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringandistribusi. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV ,154 kV, 220 kV atau 500kV kemudian



disalurkan melalui saluran transmisi.

Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu – gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380Volt . Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan trafo-trafo step-up. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini (HV,UHV,EHV) menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahalnya harga perlengkapan-perlengkapannya, selain menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo-trafo step-down. Akibatnya, bila ditinjau nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga di titik beban, terdapat bagian-bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda.



Gambar 2.2 Sistem Penyaluran Tenaga Listrik⁸

2.4 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Untuk kemudahan dan penyederhanaan, lalu diadakan pembagian serta pembatasan-pembatasan seperti pada Gambar 2.3.

Daerah I : Bagian pembangkitan (Generation)

Daerah II : Bagian penyaluran (Transmission) , bertegangan tinggi (HV,UHV,EHV)

Daerah III : Bagian Distribusi Primer, bertegangan menengah (6 atau 20kV).

Daerah IV : (Di dalam bangunan pada beban/konsumen), Instalasi, bertegangan rendah

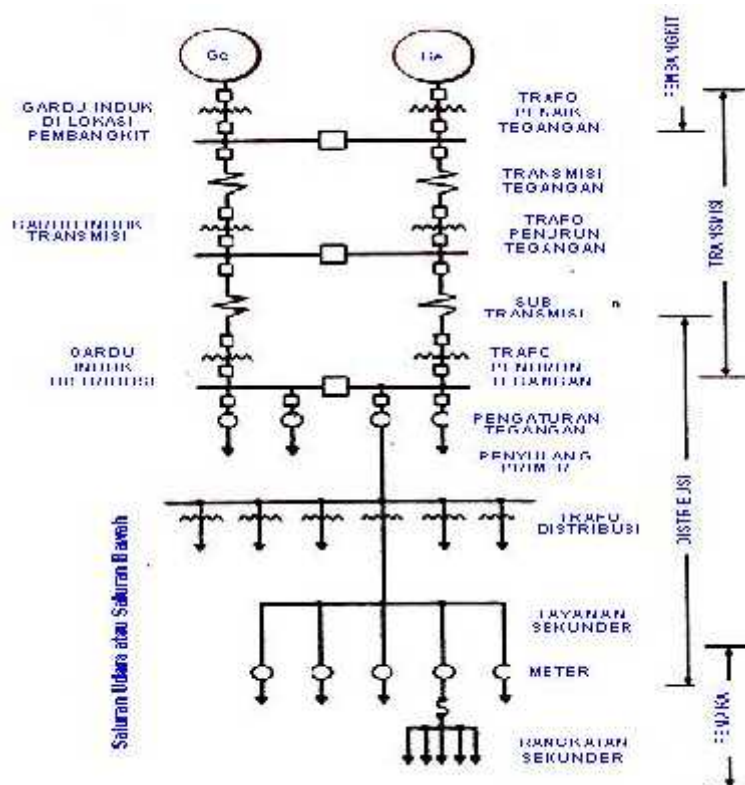
Berdasarkan pembatasan-pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa porsi materi Sistem Distribusi adalah Daerah III dan IV, yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara, bergantung dari segi apa klasifikasi itu dibuat.

Dengan demikian ruang lingkup Jaringan Distribusi adalah:

1. SUTM, terdiri dari : Tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan per-lengkapannya, serta peralatan pengaman dan pemutus.
2. SKTM, terdiri dari : Kabel tanah, indoor dan outdoor termination, batu bata, pasir dan lain-lain.



3. Gardu trafo, terdiri dari : Transformator, tiang, pondasi tiang, rangka tempat trafo, LV panel, pipa-pipa pelindung, Arrester, kabel-kabel, transformer band, peralatan grounding, dan lain-lain.
4. SUTR dan SKTR terdiri dari: sama dengan perlengkapan/ material pada SUTM dan SKTM. Yang membedakan hanya dimensinya.



Gambar 2.3 Pembagian/pengelompokan Tegangan Sistem Tenaga Listrik⁸

2.5 Klasifikasi Saluran Distribusi Tenaga Listrik

Secara umum, saluran tenaga Listrik atau saluran distribusi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

2.5.1 Menurut Nilai Tegangannya:

a. Saluran distribusi Primer

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik Sekunder trafo substation (G.I.) dengan titik primer trafo distribusi. Saluran ini bertegangan menengah 20kV. Jaringan listrik 70 kV atau 150 kV, jika langsung melayani pelanggan, bisa disebut jaringan distribusi.



b. Saluran Distribusi Sekunder

Terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban (Lihat Gambar 2.3)

2.5.2 Menurut Bentuk Tegangannya:

- a. Saluran Distribusi DC (Direct Current) menggunakan sistem tegangan searah.
- b. Saluran Distribusi AC (Alternating Current) menggunakan sistem tegangan bolak-balik.

2.5.3 Menurut Jenis/Tipe Konduktornya:

- a. Saluran udara, dipasang pada udara terbuka dengan bantuan support (tiang) dan perlengkapannya, dibedakan atas:
Saluran kawat udara, bila konduktornya telanjang, tanpa isolasi pembungkus dan saluran kabel udara, bila konduktornya terbungkus isolasi.
- b. Saluran Bawah Tanah, dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (ground cable).
- c. Saluran Bawah Laut, dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (submarine cable).

2.5.4 Menurut Susunan Rangkaiannya

Dari uraian diatas telah disinggung bahwa sistem distribusi di bedakan menjadi dua yaitu sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder.

a. Jaringan Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer diguna kan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban. Sistem ini dapat mengguna kan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer.



1. Jaringan Distribusi Radial.

Bila antara titik sumber dan titik bebannya hanya terdapat satu saluran (line), tidak ada alternatif saluran lainnya. Bentuk Jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani.

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya penca-bangan-pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar.

Oleh karena kerapatan arus (beban) pada setiap titik sepanjang saluran tidak sama besar, maka luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak harus sama. Maksudnya, saluran utama (dekat sumber) yang menanggung arus beban besar, ukuran penampangnya relatif besar, dan saluran cabang -cabangnya makin ke ujung dengan arus beban yang lebih kecil, ukurannya lebih kecil pula.

Spesifikasi dari jaringan bentuk radial ini adalah:

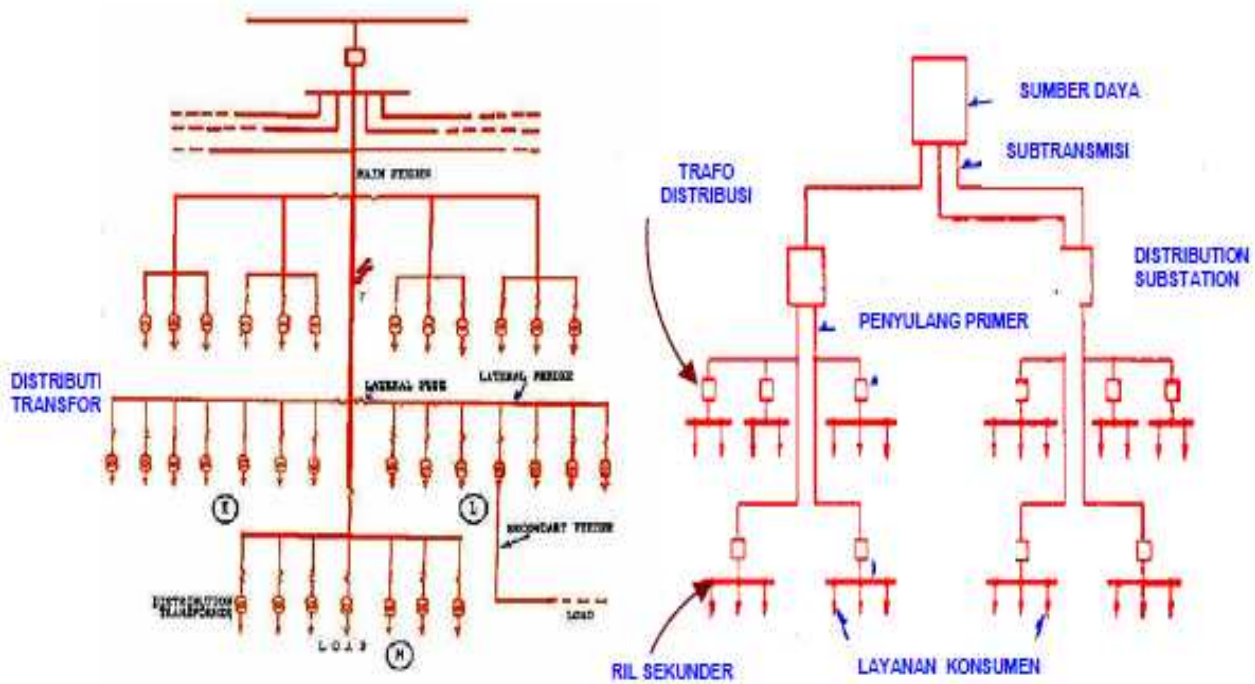
1. Bentuknya sederhana.(+)
2. Biaya investasinya relatif murah.(+)
3. Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar.(-)
4. Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin, sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami "black out" secara total.(-)

Untuk melokalisir gangguan, pada bentuk radial ini biasanya dilengkapi dengan peralatan pengaman berupa fuse, sectionaliser, recloser, atau alat pemutus beban lainnya, tetapi fungsinya hanya mem-batasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah/dibelakang titik gangguan, selama gangguan belum teratasi. Jaringan distribusi radial ini memiliki beberapa bentuk modifikasi, antara lain:



1. Radial tipe pohon.

Bentuk ini merupakan bentuk yang paling dasar. Satu saluran utama dibentang menurut kebutuhannya, selanjutnya dicabangkan dengan saluran cabang (lateral penyulang) dan lateral penyulang ini dicabang-cabang lagi dengan sublateral penyulang (anak cabang). Sesuai dengan kerapatan arus yang ditanggung masing-masing saluran, ukuran penyulang utama adalah yang terbesar, ukuran lateral adalah lebih kecil dari penyulang utama, dan ukuran sub lateral adalah yang terkecil.



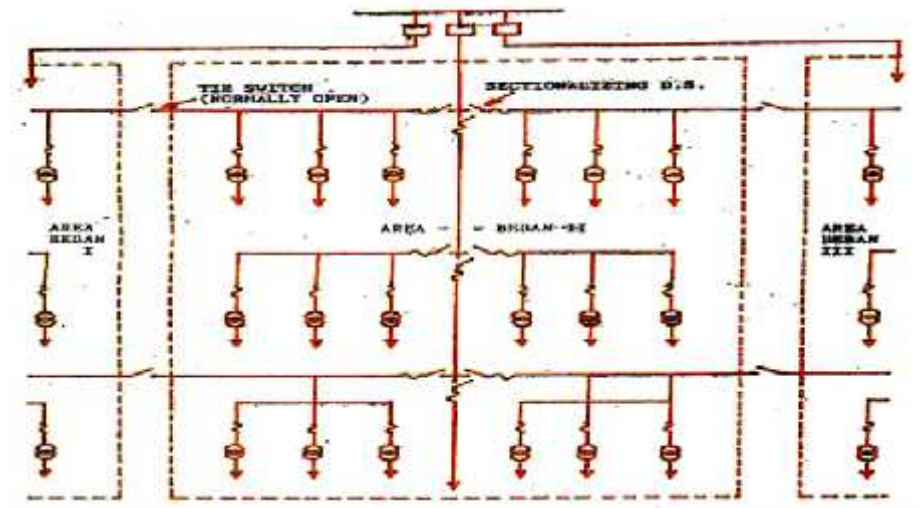
Gambar 2.4 Jaringan Radial Pohon⁸ **Gambar 2.5 Komponen Jaringan Radial⁸**

2. Radial dengan tie dan switch pemisah.

Bentuk ini merupakan modifikasi bentuk dasar dengan menambahkan tie dan switch pemisah, yang diperlukan untuk mempercepat pemulihan pelayanan bagi konsumen, dengan cara menghubungkan area-area yang tidak terganggu pada penyulang yang bersangkutan, dengan penyulang di sekitarnya. Dengan demikian bagian penyulang yang terganggu dilokalisasi, dan bagian penyulang



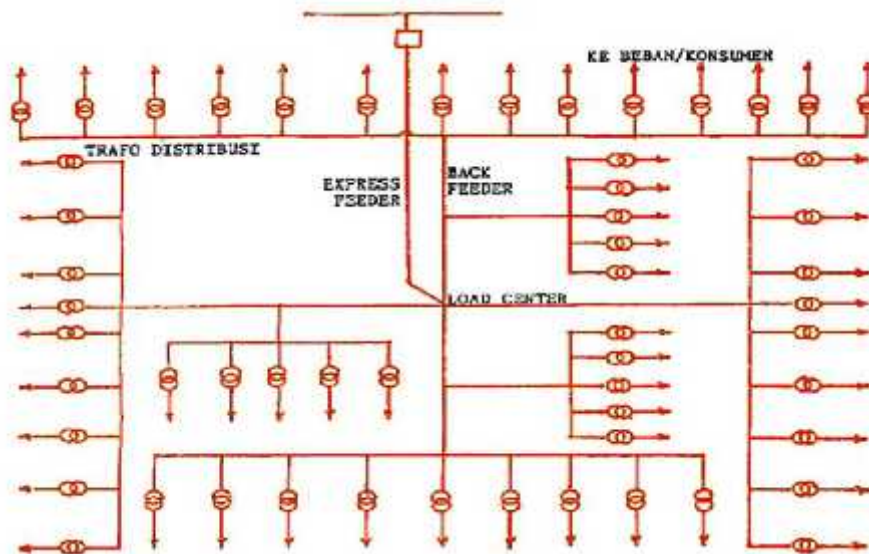
lainnya yang "sehat" segera dapat dioperasikan kembali, dengan cara melepas switch yang terhubung ke titik gangguan, dan menghubungkan bagian penyulang yang sehat ke penyulang di sekitarnya.



Gambar 2.6 Jaringan Radial dengan Tie dan Switch⁸

3. Radial dengan pusat beban.

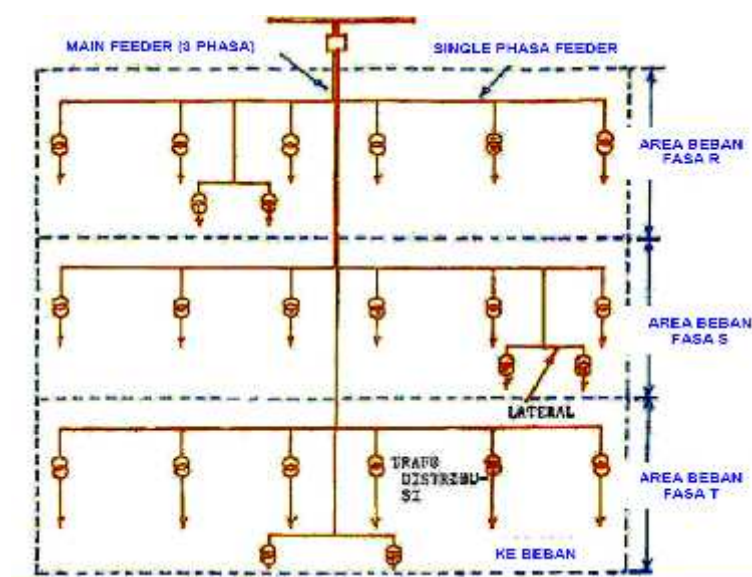
Bentuk ini mencatu daya dengan menggunakan penyulang utama (main feeder) yang disebut "express feeder" langsung ke pusat beban, dan dari titik pusat beban ini disebar dengan menggunakan "back feeder" secara radial.



Gambar 2.7 Jaringan Radial Tipe Pusat Beban⁸

4. Radial dengan pembagian phase area.

Pada bentuk ini masing-masing fasa dari jaringan bertugas melayani daerah beban yang berlainan. Bentuk ini akan dapat menimbulkan akibat kondisi sistem 3 fasa yang tidak seimbang (simetris), bila digunakan pada daerah beban yang baru dan belum mantap pembagian bebannya. Karenanya hanya cocok untuk daerah beban yang stabil dan penambahan maupun pembagian bebannya dapat diatur merata dan simetris pada setiap fasanya.



Gambar 2.8 Jaringan Radial dengan Tipe Fasa Area⁸



2. Jaringan Distribusi Ring (Loop)

Bila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu sumber. Jaringan ini merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan "loop". Susunan rangkaian penyulang membentuk ring, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil.

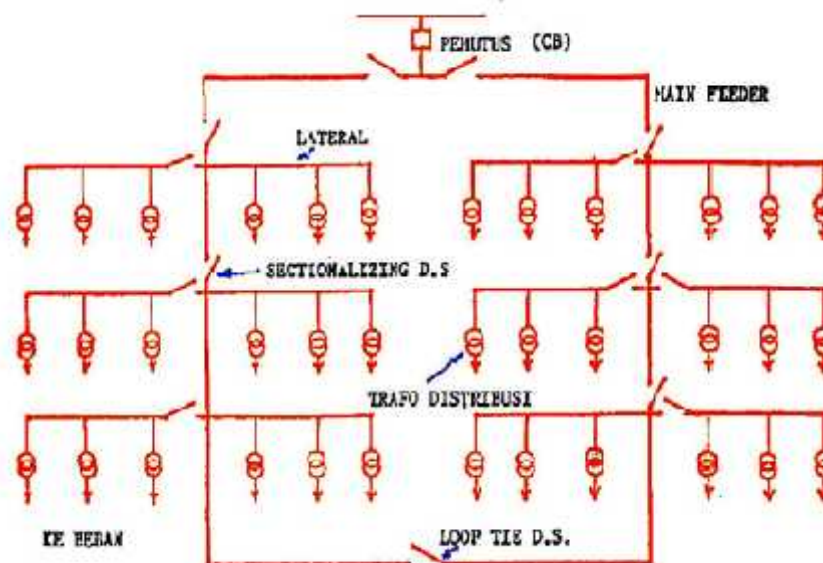
Bentuk loop ini ada 2 macam, yaitu:

a. Bentuk Open Loop

Bila dilengkapi dengan normally-open switch, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

b. Bentuk close loop

Bila dilengkapi dengan normally-close switch, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.



Gambar 2.9 Jaringan Distribusi Tipe Ring⁸

3. Jaringan distribusi Jaring-jaring (NET)

Merupakan gabungan dari beberapa saluran mesh, dimana terdapat lebih satu sumber sehingga berbentuk saluran interkoneksi. Jaringan ini berbentuk jaring-jaring, kombinasi antara radial dan loop.



Titik beban memiliki lebih banyak alternatif saluran/penyulang, sehingga bila salah satu penyulang terganggu, dengan segera dapat digantikan oleh penyulang yang lain. Dengan demikian kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin.

Spesifikasi Jaringan NET ini adalah

1. Kontinuitas penyaluran daya paling terjamin.(+)
2. Kualitas tegangannya baik, rugi daya pada saluran amat kecil.(+) 3. Dibanding dengan bentuk lain, paling flexible (luwes) dalam mengikuti pertumbuhan dan perkembangan beban. (+)
3. Sebelum pelaksanaannya, memerlukan koordinasi perencanaan yang teliti dan rumit. (-)
4. Memerlukan biaya investasi yang besar (mahal) (-)
5. Memerlukan tenaga-tenaga terampil dalam pengoperasiannya.(-)

Dengan spesifikasi tersebut, bentuk ini hanya layak (feasible) untuk melayani daerah beban yang benar-benar memerlukan tingkat keandalan dan kontinuitas yang tinggi, antara lain: instalasi militer, pusat sarana komunikasi dan perhubungan, rumah sakit, dan sebagainya. Karena bentuk ini merupakan jaringan yang menghubungkan beberapa sumber, maka bentuk jaringan NET atau jaring-jaring disebut juga jaringan "interkoneksi".

4. Jaringan Distribusi Spindle

Selain bentuk-bentuk dasar dari jaringan distribusi yang telah ada, maka dikembangkan pula bentuk-bentuk modifikasi, yang bertujuan meningkatkan keandalan dan kualitas sistem. Salah satu bentuk modifikasi yang populer adalah bentuk spindle, yang biasanya terdiri atas maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. Saluran 6 penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban dinamakan "working feeder" atau saluran kerja, dan satu saluran yang dioperasikan tanpa beban dinamakan "express feeder".

Fungsi "express feeder" dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu "working feeder", juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan operasi normal. Dalam keadaan normal memang "express feeder" ini



sengaja dioperasikan tanpa beban. Perlu diingat di sini, bahwa bentuk- bentuk jaringan beserta modifikasinya seperti yang telah diuraikan di muka, terutama dikembangkan pada sistem jaringan arus bolak-balik (AC).

5. Saluran Radial Interkoneksi

Saluran Radial Interkoneksi yaitu terdiri lebih dari satu saluran radial tunggal yang dilengkapi dengan LBS/AVS sebagai saklar inerkoneksi. Masing-masing tipe saluran tersebut memiliki spesifikasi sendiri, dan agar lebih jelas akan dibicarakan lebih lanjut pada bagian lain. Pada dasarnya semua beban yang memerlukan tenaga listrik, menuntut kondisi pelayanan yang terbaik, misalnya dalam hal stabilitas tegangannya, sebab seperti telah dijelaskan, bila tegangan tidak nominal dan tidak stabil, maka alat listrik yang digunakan tidak dapat beroperasi secara normal, bahkan akan mengalami kerusakan. Tetapi dalam prakteknya, seberapa besar tingkat pelayanan terbaik dapat dipenuhi, masih memerlukan beberapa pertimbangan, mengingat beberapa alasan.

Digunakan untuk daerah dengan :

- Kepadatan beban yang tinggi
- Tidak menuntut keandalan yang terlalu tinggi

Secara umum, baik buruknya sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik terutama adalah ditinjau dari hal-hal berikut ini:

1. Kontinuitas Pelayanan yang baik, tidak sering terjadi pemutusan, baik karena gangguan maupun karena hal-hal yang direncanakan. Biasanya, kontinuitas pelayanan terbaik diprioritaskan pada beban -beban yang dianggap vital dan sama sekali tidak dikehendaki mengalami pemadaman, misalnya: instalasi militer, pusat pelayanan komunikasi, rumah sakit, dll.
2. Kualitas Daya yang baik, antara lain meliputi:
 - kapasitas daya yang memenuhi.
 - tegangan yang selalu konstan dan nominal.
 - frekuensi yang selalu konstan (untuk sistem AC).

Catatan: Tegangan nominal di sini dapat pula diartikan kerugian tegangan yang terjadi pada saluran relatif kecil sekali.



3. Perluasan dan Penyebaran daerah beban yang dilayani seimbang. Khususnya untuk sistem tegangan AC 3 fasa, faktor keseimbangan/kesimetrisan beban pada masing-masing fasa perlu diperhatikan. Bagaimana pengaruh pembebanan yang tidak simetris pada suatu sistem distribusi, akan dibicarakan lebih lanjut dalam bagian lain.
4. Fleksibel dalam pengembangan dan perluasan daerah beban.
5. Perencanaan sistem distribusi yang baik, tidak hanya bertitik tolak pada kebutuhan beban sesaat, tetapi perlu diperhatikan pula secara teliti mengenai pengembangan beban yang harus dilayani, bukan saja dalam hal penambah kapasitas dayanya, tetapi juga dalam hal perluasan daerah beban yang harus dilayani.
6. Kondisi dan Situasi Lingkungan. Faktor ini merupakan pertimbangan dalam perencanaan untuk menentukan tipetipe atau macam sistem distribusi mana yang sesuai untuk lingkungan bersangkutan, misalnya tentang konduktornya, konfigurasinya, tata letaknya, dsb. termasuk pertimbangan segi estetika (keindahan) nya.
7. Pertimbangan Ekonomis. Faktor ini menyangkut perhitungan untung rugi ditinjau dari segi ekonomis, baik secara komersiil maupun dalam rangka penghematan anggaran yang tersedia.

b. Jaringan Sistem Distribusi Sekunder

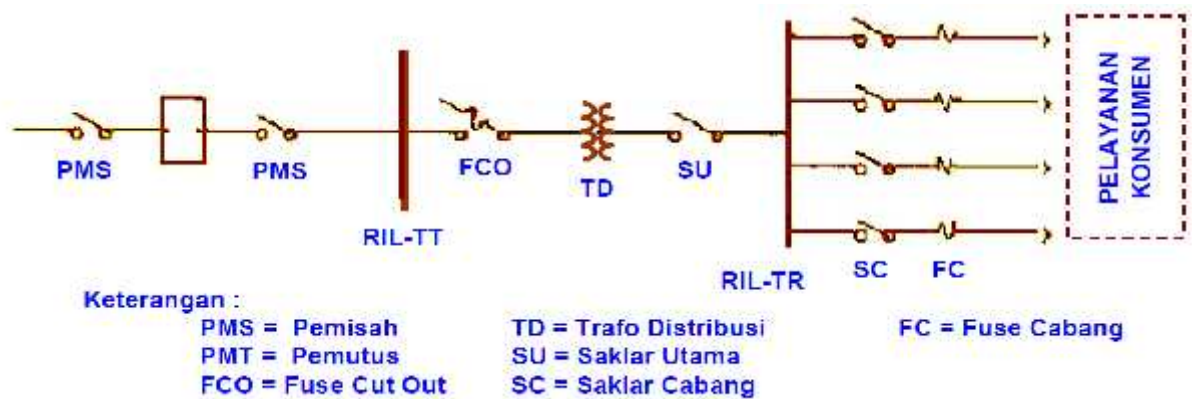
Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada konsumen/pemakai tenaga listrik dengan melalui peralatan-peralatan sbb:

1. Papan pembagi pada trafo distribusi,
2. Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder).
3. Saluran Layanan Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai)



4. Alat Pembatas dan pengukur daya (kWH. meter) serta fuse atau pengaman pada pelanggan.

Komponen saluran distribusi sekunder seperti ditunjukkan pada gambar 2.10 berikut ini.



Gambar 2.10 Komponen Sistem Distribusi⁸

Ada bermacam-macam sistem tegangan distribusi sekunder menurut standar; EEI : Edison Electric Institut, NEMA (National Electrical Manufactures Association). Pada dasarnya tidak berbeda dengan sistem distribusi DC, faktor utama yang perlu diperhatikan adalah besar tegangan yang diterima pada titik beban mendekati nilai nominal, sehingga peralatan/beban dapat dioperasikan secara optimal. Ditinjau dari cara pengawatannya, saluran distribusi AC dibedakan atas beberapa macam tipe, dan cara pengawatan ini bergantung pula pada jumlah fasanya, yaitu:

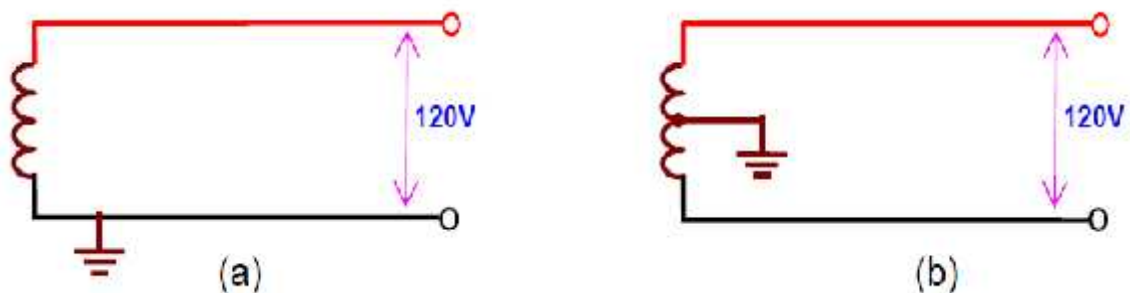
1. Sistem satu fasa dua kawat 120 Volt
2. Sistem satu fasa tiga kawat 120/240 Volt
3. Sistem tiga fasa empat kawat 120/208 Volt
4. Sistem tiga fasa empat kawat 120/240 Volt
5. Sistem tiga fasa tiga kawat 240 Volt
6. Sistem tiga fasa tiga kawat 480 Volt
7. Sistem tiga fasa empat kawat 240/416 Volt
8. Sistem tiga fasa empat kawat 265/460 Volt
9. Sistem tiga fasa empat kawat 220/380 Volt



Di Indonesia dalam hal ini PT. PLN menggunakan sistem tegangan 220/380 Volt. Sedang pemakai listrik yang tidak menggunakan tenaga listrik dari PT. PLN, menggunakan salah satu sistem diatas sesuai dengan standar yang ada. Pemakai listrik yang dimaksud umumnya mereka bergantung kepada negara pemberi pinjaman atau dalam rangka kerja sama, dimana semua peralatan listrik mulai dari pembangkit (generator set) hingga peralatan kerja (motor-motor listrik) di suplai dari

negara pemberi pinjaman/kerja sama tersebut. Sebagai anggota, IEC (International Electrotechnical Commission), Indonesia telah mulai menyesuaikan sistem tegangan menjadi 220/380 Volt saja, karena IEC sejak tahun 1967 sudah tidak mencantumkan lagi tegangan 127 Volt. (IEC Standard Voltage pada Publikasi nomor 38 tahun 1967 halaman 7 seri 1 tabel 1). Diagram rangkaian sisi sekunder trafo distribusi untuk masing-masing sistem tegangan tersebut ditunjukkan pada gambar berikut ini:

1. Sistem Distribusi Satu Fasa Dengan Dua Kawat



Gambar 2.11 Sistem Satu Fasa Dua Kawat Tegangan 120Volt⁸

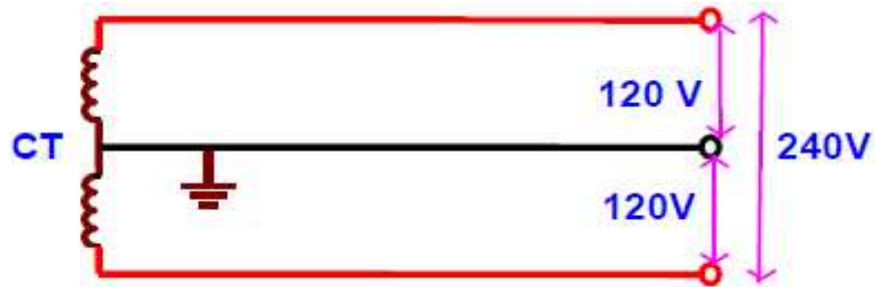
Tipe ini merupakan bentuk dasar yang paling sederhana, biasanya digunakan untuk melayani penyalur daya berkapasitas kecil dengan jarak pendek, yaitu daerah perumahan dan pedesaan. Ditinjau dari sisi sekunder trafo distribusinya, tipe ini ada 2(dua) macam, seperti ditunjukkan apada gambar 2.11.

2. Sistem Distribusi Satu Fasa Dengan Tiga Kawat

Pada tipe ini, prinsipnya sama dengan sistem distribusi DC dengan tiga kawat, yang dalam hal ini terdapat dua alternatif besar tegangan. Sebagai saluran “netral” disini dihubungkan pada tengah belitan (center-tap) sisi sekunder



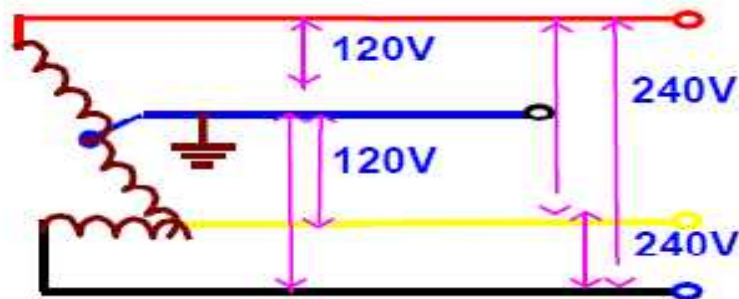
trafo, dan diketanahkan, untuk tujuan pengamanan personil. Tipe ini untuk melayani penyalur daya berkapasitas kecil dengan jarak pendek, yaitu daerah perumahan dan pedesaan.



Gambar 2.12 Sistem satu fasa tiga kawat tegangan 120/240 Volt⁸

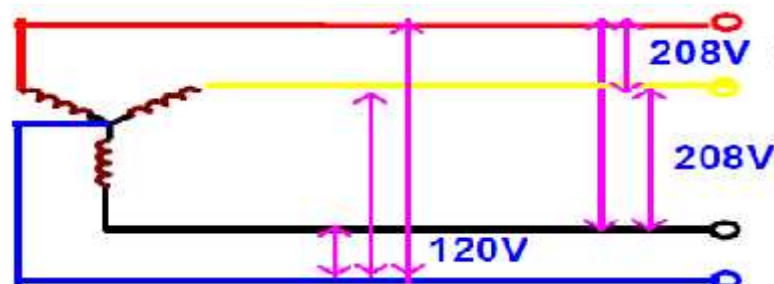
3. Sistem Distribusi Tiga Fasa Empat Kawat Tegangan 120/240 Volt

Tipe ini untuk melayani penyalur daya berkapasitas sedang dengan jarak pendek, yaitu daerah perumahan pedesaan dan perdagangan ringan, dimana terdapat dengan beban 3 fasa.



Gambar 2.13 Sistem Distribusi Tiga Fasa Empat Kawat Tegangan 120/240 Volt

4. Sistem Distribusi Tiga Fasa Empat Kawat Tegangan 120/208 Volt

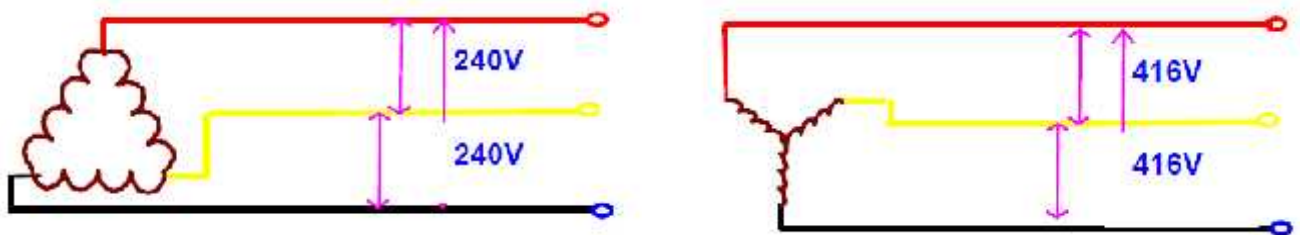


Gambar 2.14 Sistem Distribusi Tiga Fasa Empat Kawat Tegangan 120/208 Volt⁸



Untuk rangkaian seperti diatas terdapat pula sistem tegangan 240/416 Volt dan atau tegangan 265/460 Volt.

5. Sistem Distribusi Tiga Fasa dengan Tiga Kawat

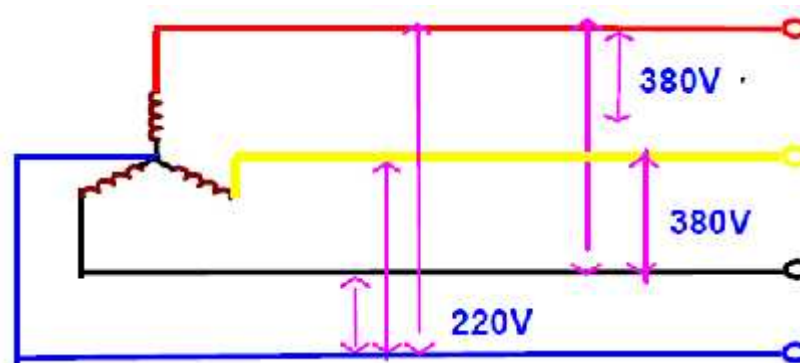


Gambar 2.15 Sistem Distribusi Tiga Fasa Tiga Kawat⁸

Tipe ini banyak dikembangkan secara ekstensif. Dalam hal ini rangkaian tiga fasa sisi sekunder trafo dapat diperoleh dalam bentuk rangkaian delta (segitiga) ataupun rangkaian wye (star/bintang).

Diperoleh dua alternatif besar tegangan, yang dalam pelaksanaannya perlu diperhatikan adanya pembagian seimbang antara ketiga fasanya. Untuk rangkaian delta tegangannya bervariasi yaitu 240 Volt, dan 480 Volt. Tipe ini dipakai untuk melayani beban-beban industri atau perdagangan.

6. Sistem Distribusi Tiga Fasa dengan Empat Kawat



Gambar 2.16 Sistem Distribusi Tiga Fasa Empat Kawat⁸

Pada tipe ini, sisi sekunder (output) trafo distribusi terhubung star, dimana saluran netral diambil dari titik bintangnya. Seperti halnya pada sistem tiga fasa



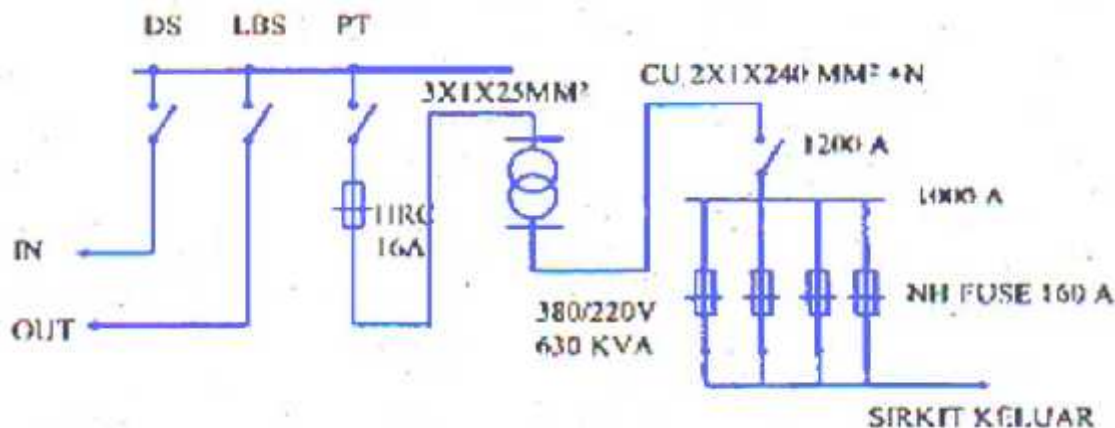
yang lain, di sini perlu diperhatikan keseimbangan beban antara ketiga fasanya, dan disini terdapat dua alternatif besar tegangan.

2.6 Gardu Distribusi⁸

Gardu listrik pada dasarnya adalah rangkaian dari suatu perlengkapan hubung bagi ; PHB tegangan menengah dan PHB tegangan rendah. Masing-masing dilengkapi gawai-gawai kendali dengan komponen proteksinya. Jenis-jenis gardu listrik atau gardu distribusi didesain berdasarkan maksud dan tujuan penggunaannya sesuai dengan peraturan Pemda setempat, yaitu: Gardu Distribusi konstruksi beton (Gardu Beton), Gardu Distribusi konstruksi metal clad (Gardu besi), Gardu Distribusi tipe tiang portal dan tipe tiang cantol (Gardu Tiang), dan Gardu Distribusi mobil tipe kios dan mobil tipe trailer (Gardu Mobil).

Komponen-komponen gardu: PHB sisi tegangan rendah, PHB pemisah saklar daya), PHB pengaman transformator, PHB sisi tegangan rendah, Pengaman tegangan rendah, Sistem pembumian dan alat-alat indikator. Instalasi perlengkapan hubung bagi tegangan rendah berupa PHB TR atau rak TR terdiri atas 3 bagian, yaitu : Sirkuit masuk + sakelar, Rel pembagi dan Sirkuit keluar + pengaman lebur maksimum 8 sirkuit. Spesifikasi mengikuti kapasitas transformator distribusi yang dipakai.

Instalasi kabel daya dan kabel kontrol, yaitu KHA kabel daya antara kubikel ke transformator minimal 125 % arus beban nominal transformator. Pada beban konstruksi memakai kubikel TM single core Cu : $3 \times 1 \times 25 \text{ mm}^2$ atau $3 \times 1 \times 35 \text{ mm}^2$. Antara transformator dengan Rak TR memakai kabel daya dengan KHA 125 % arus nominal. Pada beberapa instalasi memakai kabel inti tunggal masing-masing kabel per fasa, $\text{Cu } 2 \times 3 \times 1 \times 240 \text{ mm}^2 + 1 \times 240 \text{ mm}^2$.

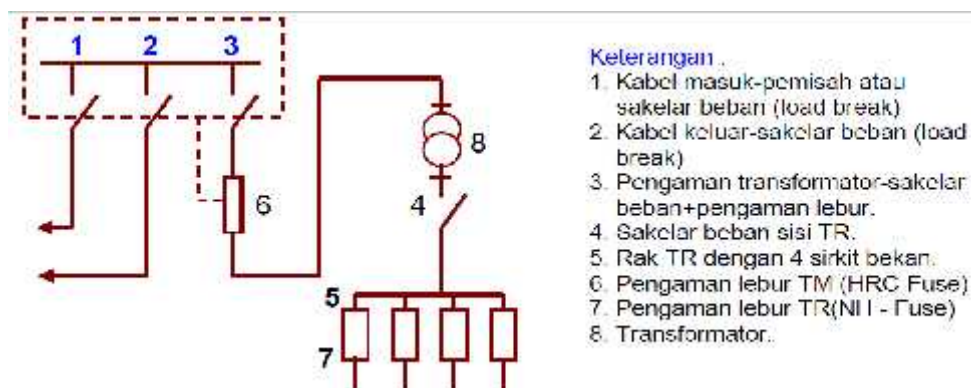


Gambar 2.17 Gambar Monogram Gardu Distribusi⁸

Instalasi lain yang ada pada gardu distribusi adalah Instalasi penerangan, terdiri dari; Instalasi alat pembatas dan pengukur, Instalasi kabel scada untuk kubikel dengan motor kontrol dan Instalasi pengaman pelanggan untuk APP pelanggan tegangan menengah.

2.6.1 Gardu Beton

Yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya terbuat dari beton (campuran pasir, batu dan semen). Gardu beton termasuk `gardu jenis pasangan dalam, karena pada umumnya semua peralatan peng-hubung/pemutus, pemisah dan trafo distribusi terletak di dalam bangunan beton. Dalam pembangunannya semua peralatan tersebut di disain dan diinstalasi di lokasi sesuai dengan ukuran bangunan gardu. Gambar 2.16 memperlihatkan sebuah gardu distribusi konstruksi beton.



Gambar 2.18 Bagan Satu Garis Gardu Beton⁸



Ketentuan teknis komponen gardu beton, komponen tegangan menengah (contoh rujukan PHB tegangan menengah), yaitu;

1. Tegangan perencanaan 25 kV
2. Power frekuensi withstand voltage 50 kV untuk 1 menit
3. Impulse withstand voltage 125 kV
4. Arus nominal 400A
5. Arus nominal transformator 50A
6. Arus hubung singkat dalam 1 detik 12,5 kA
7. Short circuit making current 31,5 kA.

Komponen tegangan rendah (contoh rujukan PHB tegangan rendah), yaitu;

1. Tegangan perencanaan 414 Volt(fasa-fasa);
2. Power frekuensi withstand 3 kV untuk 1 menit test fasa-fasa;
3. Impulse withstand voltage 20 kV;
4. Arus perencanaan rel/busbar 800 A, 1.200 A, 1.800 A;
5. Arus perencanaan sirkit keluar 400A;
6. Test ketahanan tegangan rendah

2.6.2 Gardu Metal Clad (Gardu Besi)

Yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya terbuat dari besi. Gardu besi termasuk gardu jenis pasangan dalam, karena pada umumnya semua peralatan penghubung/pemutus, pemisah dan trafo distribusi terletak di dalam bangunan besi. Semua peralatan tersebut sudah di instalasi di dalam bangunan besi, sehingga dalam pembangunannya pelaksana pekerjaan tinggal menyiapkan pondasinya saja.

2.6.3 Gardu Tiang Tipe Portal.

Gardu Tiang, yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya/penyangganya terbuat dari tiang. Dalam hal ini trafo distribusi terletak di bagian atas tiang. Karena trafo distribusi terletak pada bagian atas tiang, maka gardu tiang hanya dapat melayani daya listrik terbatas, mengingat berat trafo yang relatif tinggi, sehingga tidak mungkin menempatkan trafo berkapasitas besar di bagian



atas tiang (± 5 meter di atas tanah). Untuk gardu tiang dengan trafo satu fasa kapasitas yang ada maksimum 50 KVA, sedang gardu tiang dengan trafo tiga fasa kapasitas maksimum 160 KVA (200 kVA) . Trafo tiga fasa untuk gardu tiang ada dua macam, yaitu trafo 1x3 fasa dan trafo 3x1 fasa.

Gardu portal adalah gardu listrik tipe terbuka (outdoor) yang memakai konstruksi tiang/menara kedudukan transformator minimal 3 meter diatas platform. Umumnya memakai tiang beton ukuran 2x500 daN.



Gambar 2.19 Gardu Tiang Tipe Portal Dan Midel Panel⁸

Perlengkapan peralatan terdiri atas :

- a. Fuse cut out
- b. Arrester lighting
- c. Transformer type 250, 315, 400 WA
- d. Satu lemari PHB tegangan rendah maksimal 4
- e. Jurusan Isolator tumpu atau gantung

2.7 Trafo Distribusi

2.7.1 Pengertian Transformator Distribusi¹²

Transformator atau trafo adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian

¹² Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik.



listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi-elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika.

Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik memungkinkan terpilihnya tenaga yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pendistribusian listrik jarak jauh.

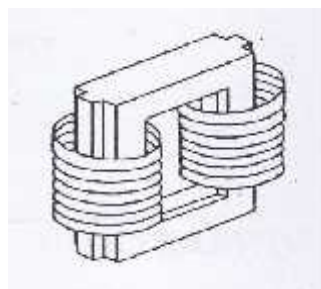
Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban ; untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain; dan untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut :

- 1) frekuensi daya, 50-60 c/s
- 2) frekuensi pendengaran, 50 c/s-20 kc/s
- 3) frekuensi radio, di atas 30 kc/s.

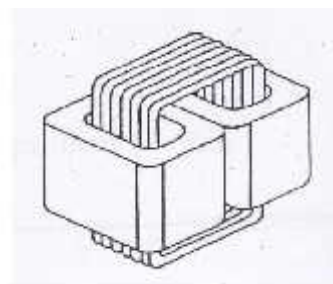
Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

- 1) transformator daya
- 2) transformator distribusi
- 3) transformator pengukuran : yang terdiri atas transformator arus dan transformator tegangan.

Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnetik, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama. Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.



Gambar 2.20 Tipe Inti¹²



Gambar 2.21 Tipe Cangkang¹²



2.7.2 Bagian-Bagian Transformator⁸

Bagian-bagian pada transformator terdiri dari :

1. Inti besi

Inti besi tersebut berfungsi untuk membangkitkan fluks yang timbul karena arus listrik dalam belitan atau kumparan trafo, sedang bahan ini terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis, hal ini dimaksudkan untuk mengurangi panas yang diakibatkan oleh arus eddy (*eddy current*).

2. Kumparan primer dan kumparan sekunder

Kawat email yang berisolasi terbentuk kumparan serta terisolasi baik antar kumparan maupun antara kumparan dan inti besi. Terdapat dua kumparan pada inti tersebut yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder, bila salah satu kumparan tersebut diberikan tegangan maka pada kumparan akan membangkitkan fluks pada inti serta menginduksi kumparan lainnya sehingga pada kumparan sisi lain akan timbul tegangan tersebut diatas disebut pernapasan trafo, akibatnya permukaan minyak akan bersinggungan dengan udara luar, udara luar tersebut lembab. Oleh sebab itu pada ujung pernapasan diberikan alat dengan bahan yang mampu menyerap kelembaban udara luar yang disebut kristal zat Hygrokopsis (*Clilicagel*).

3. Pendingin trafo

Perubahan temperatur akibat perubahan beban maka seluruh komponen trafo akan menjadi panas, guna mengurangi panas pada trafo dilakukan pendingin pada trafo. Sedangkan cara pendinginan trafo terdapat dua macam yaitu : alamiah/natural (*Onan*) dan paksa/tekanan (*Onaf*). Pada pendinginan alamiah (natural) melalui sirip-sirip radiator yang bersirkulasi dengan udara luar dan untuk trafo yang besar minyak pada trafo disirkulasikan dengan pompa. Sedangkan pada pendinginan paksa pada sirip-sirip trafo terdapat *fan* yang bekerjanya sesuai *setting* temperaturnya.

4. *Tap changer* trafo (perubahan tap)

Tap changer adalah alat perubah pembanding transformasi untuk



mendapatkan tegangan operasi sekunder yang sesuai dengan tegangan sekunder yang diinginkan dari tegangan primer yang berubah-ubah. *Tap changer* hanya dapat dioperasikan pada keadaan trafo tidak bertegangan atau disebut dengan “*Off Load Tap Changer*” serta dilakukan secara manual.

2.7.3 Prinsip Kerja Transformator¹

Transformator terdiri atas dua kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibatnya adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

¹ Badaruddin. 2012. Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon.

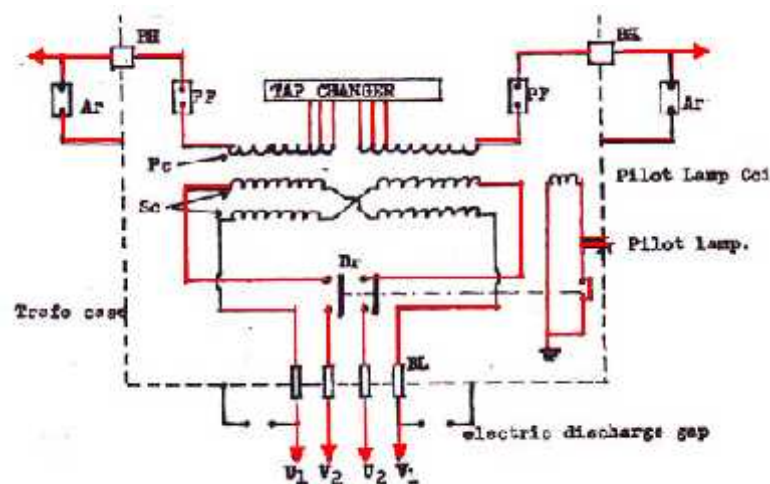


2.7.4 Trafo Buatan Indonesia⁸

Trafo distribusi yang digunakan di Indonesia saat ini pada umumnya adalah trafo produksi dalam negeri. Ada lima pabrik trafo di Indonesia yaitu:

Trafo distribusi yang digunakan di Indonesia saat ini pada umumnya adalah trafo produksi dalam negeri. Ada lima pabrik trafo di Indonesia yaitu: PT. UNINDO, PT. TRAFINDO dan PT. ASATA di Jakarta; PT. MURAWA di Medan : PT. Bambang Djaja di Surabaya. Ditinjau dari jumlah fasanya trafo distribusi ada dua macam, yaitu trafo satu fasa dan trafo tiga fasa.

Trafo tiga fasa mempunyai dua tipe yaitu tipe tegangan sekunder ganda dan tipe tegangan sekunder tunggal. Sedang trafo satu fasa juga mempunyai dua tipe yaitu tipe satu kumparan sekunder dan tipe dua kumparan sekunder saling bergantung, yang di kenal dengan trafo tipe "NEW JEC". Gambar 2.22 memperlihatkan sebuah trafo distribusi tiga fasa kelas 20 kV produksi PT. UNINDO Jakarta menurut standarisasi DIN, Jerman Barat. Bak trafo dapat diisi dengan minyak trafo biasa atau askarel (suatu bahan buatan) dan kelas ini untuk kapasitas daya lebih kecil dari 1000 kVA.



Gambar 2.22 Hubungan Dalam Trafo Distribusi Tipe "New Jec"⁸

Keterangan gambar 2.22

BH = Primarry Bushing High

Pc = Primarry coil



BL = Secondary Bushing Low

Sc = Secondary coil

Br = Breaker Switch

Ar = Arrester

PF = Power Fuse

Dengan mengubah posisi "tap changer" tegangan sisi sekunder dapat diatur dari 115 Volt sampai dengan 133 Volt. Keistimewaan trafo tipe New Jec ialah setiap fasa terdiri dari satu tabung dapat diinstalasi untuk mendapatkan dua sistem tegangan, yaitu sistem 127 Volt dan sistem 220 Volt,

2.7.5 Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator¹

Daya Transformator bila ditinjau dari sisi tegangan tinggi (primer) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3}.V.I \dots\dots\dots (2.1)^1$$

Dimana :

S : daya transformator (kVA)

V : tegangan sisi primer transformator (kV)

I : arus jala – jala (A)

Sehingga untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}.V_s} \dots\dots\dots (2.2)^1$$

Dimana :

I_{FL} : arus beban penuh (A)

S : daya transformator (kVA)

V_s : tegangan sisi sekunder transformator (kV)

Sedangkan untuk menghitung arus hubung singkat pada transformator digunakan rumus :

$$I_{SC} = \frac{S.100}{\% Z .\sqrt{3}.V_s} \dots\dots\dots (2.3)^1$$



Dimana :

I_{SC} : arus hubung singkat (A)

S : daya transformator (kVA)

V_S : tegangan sisi sekunder transformator (kV)

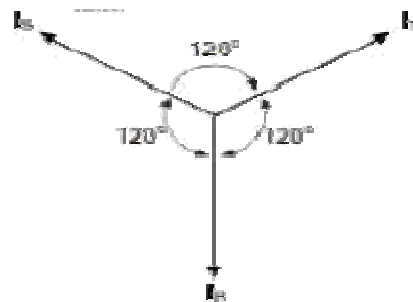
$\%Z$: persen impedansi transformator

2.8 Ketidakseimbangan Beban

2.8.1 Pengertian Tentang Beban Tidak Seimbang⁵

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana :

- Ketiga vektor arus / tegangan adalah sama besar
- Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain, seperti yang terlihat pada Gambar 2.23 di bawah ini :



Gambar 2.23 Vektor Diagram Arus Keadaan Seimbang⁵

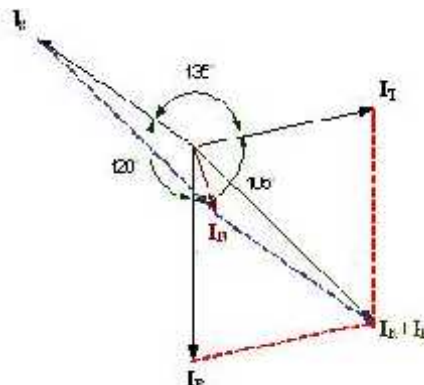
Dari gambar di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R I_S I_T) adalah sama dengan nol. Sehingga tidak muncul arus netral.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan setimbang tidak terpenuhi.

Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga yaitu :

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain
- Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.24 di bawah ini :

⁵Setiadji, Julius Sentosa, dkk. 2006. *Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi*.



Gambar 2.24 Vektor Diagram Arus Keadaan Tidak Seimbang⁸

Dari gambar di atas menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R I_S I_T) adalah tidak sama dengan nol sehingga muncul suatu besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung pada seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

2.8.2 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

Untuk menghitung arus rata-rata dapat digunakan rumus berikut ini :

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (2.4)^5$$

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata, maka koefisien a, b dan c diperoleh dengan :

$$a = \frac{I_R}{I} \dots\dots\dots (2.5)^5$$

$$b = \frac{I_S}{I} \dots\dots\dots (2.6)^5$$

$$c = \frac{I_T}{I} \dots\dots\dots (2.7)^5$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :



$$\% \text{ ketidakseimbangan beban} = \frac{|a-1| + |b-1| + |c-1|}{3} \times 100 \dots\dots\dots (2.8)^5$$

2.9 Arus Netral

Arus netral dalam sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral ini muncul jika :

- a. Kondisi beban tidak seimbang
- b. Karena adanya arus harmonisa akibat beban non-linear.

Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus bolak balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris.

2.9.1 Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang

Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris. Dengan menggunakan notasi-notasi yang sama seperti pada tegangan akan didapatkan persamaan-persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \dots\dots\dots (2.9)^5$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \dots\dots\dots (2.10)^5$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \dots\dots\dots (2.11)^5$$

Dengan tiga langkah yang telah dijabarkan dala, menentukan tegangan urutan positif, urutan negative, dan urutan nol terdahulu, maka arus-arus urutan juga dapat ditentukan dengan cara yang sama, sehingga kita dapatkan juga :

$$I_1 = 1/3 (I_a + a I_b + a^2 I_c) \dots\dots\dots (2.12)^5$$

$$I_2 = 1/3 (I_a + a^2 I_b + a I_c) \dots\dots\dots (2.13)^5$$

$$I_0 = 1/3 (I_a + I_b + I_c) \dots\dots\dots (2.14)^5$$

Di sini terlihat bahwa arus urutan nol (I_0) adalah merupakan sepertiga dari arus netral atau sebaliknya akan menjadi nol jika dalam sistem tiga fasa empat kawat.



Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral, menjadi :

$$I_N = I_a + I_b + I_c \dots \dots \dots (2.15)^5$$

Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral. Jika arus-arus fasanya seimbang maka arus netralnya akan bernilai nol, tapi jika arus-arus fasanya tidak seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem (arus netral akan mempunyai nilai dalam arti tidak nol).

2.9.2 *Losses* Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral¹

Akibat pembebanan di tiap fasa yang tidak seimbang, maka akan mengalir arus pada penghantar netral. Jika di hantaran pentanahan netral terdapat nilai tahanan dan dialiri arus, maka kawat netral akan bertegangan yang menyebabkan tegangan pada trafo tidak seimbang. Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar :

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots \dots \dots (2.16)^1$$

Keterangan :

P_N = *Losses* yang timbul pada penghantar netral (*watt*)

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat netral (*Ampere*)

R_N = Tahanan pada kawat netral (Ω)





