

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka Relevan

Dalam mengkaji Kelayakan Teknis Dan Ekonomis Perluasan Jaringan Tegangan Rendah Dan Gardu Distribusi, diperlukan pemahaman yang mendalam terkait pembahasan tersebut pada penelitian – penelitian sebelumnya. Dibawah ini merupakan penelitian relevan yang digunakan penulis sebagai sumber referensi :

(A.R. Hakim., 2015) penelitian berjudul ”Analisis Teknis dan Ekonomis Perbaikan Tegangan pada Jaringan Distribusi 20 kV Pujon Menggunakan Analisis Sensitivitas Rugi-Rugi”. Penelitian ini membahas upaya peningkatan kualitas tegangan dan efisiensi energi pada jaringan distribusi PT PLN (Persero) di wilayah Pujon melalui pemasangan kapasitor shunt. Penelitian ini menganalisis pengaruh pemasangan kapasitor terhadap profil tegangan, rugi-rugi daya, serta manfaat ekonomis yang dihasilkan menggunakan metode *Newton-Raphson* dan analisis sensitivitas rugi-rugi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor sebesar 4034 kVAR mampu meningkatkan tegangan bus terendah dari 17,894 kV menjadi 19,060 kV, menurunkan rugi daya dari 0,418 MW menjadi 0,227 MW, serta menghasilkan penghematan biaya sebesar Rp 3,56 miliar per tahun dengan periode pengembalian investasi hanya 0,23 tahun atau sekitar tiga bulan. Dengan demikian, pemasangan kapasitor terbukti efektif dan ekonomis dalam memperbaiki profil tegangan serta mengurangi kerugian daya pada jaringan distribusi 20 kV.

(Rio Afrianda et al., 2020) penelitian ini berjudul “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Efisiensi Transformator Distribusi (Studi Gardu PT PLN Area Bekasi)”. Penelitian ini membahas dampak ketidakseimbangan beban antar fasa pada transformator distribusi terhadap efisiensi dan rugi-rugi daya. Penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan arus antar fasa menyebabkan timbulnya arus netral yang mengalir ke tanah dan menimbulkan rugi-rugi daya (losses), terutama pada waktu beban puncak malam hari. Hasil pengukuran menunjukkan ketidakseimbangan beban tertinggi terjadi pada malam hari sebesar 31%, dengan efisiensi transformator menurun hingga 92%. Kondisi ini dapat memperpendek umur trafo dan menurunkan keandalan sistem distribusi listrik. Sebagai

solusi, disarankan dilakukan pemeliharaan rutin dan penyeimbangan beban dengan cara memutar fasa atau memindahkan beban antar pelanggan agar distribusi daya lebih merata dan efisiensi transformator tetap optimal.

(C. Widyastuti et al., 2021) penelitian ini berjudul “Kriteria Desain Sistem Jaringan Distribusi untuk Evaluasi Kondisi Eksisting Kelistrikan Suatu Wilayah”. Penelitian ini membahas pentingnya perencanaan dan evaluasi sistem distribusi tenaga listrik yang sesuai dengan standar teknis guna menjaga kualitas, keandalan, dan efisiensi penyaluran energi listrik. Penelitian ini mengevaluasi kondisi eksisting jaringan distribusi di Area Jaringan Tangerang berdasarkan tiga kriteria utama, yaitu jatuh tegangan, pembebanan penyulang, dan keandalan sistem. Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa penyulang mengalami drop tegangan dan pembebanan melebihi batas kriteria desain, serta terdapat penyulang yang dikategorikan tidak andal berdasarkan indeks keandalan SAIFI dan SAIDI. Untuk mengatasi hal tersebut, direkomendasikan dilakukan rekonfigurasi jaringan dan pemindahan beban antar penyulang agar kinerja sistem distribusi memenuhi standar keandalan dan efisiensi yang diharapkan.

(Adri Senen et al. 2023) penelitian ini membahas “Penambahan Gardu Distribusi Berdasarkan Pertumbuhan Beban Listrik Menggunakan GUI Matlab di Wilayah Tangerang” membahas perencanaan pengembangan sistem distribusi tenaga listrik dengan mempertimbangkan peningkatan kebutuhan beban di wilayah urban. Penelitian ini menekankan pentingnya proyeksi penambahan gardu distribusi dan transformator agar penyaluran tenaga listrik tetap efisien dan andal. Dengan menggunakan aplikasi *Graphical User Interface (GUI)* Matlab, perhitungan kebutuhan tambahan kapasitas transformator dan gardu distribusi dapat dilakukan dengan lebih mudah, cepat, dan akurat. Berdasarkan hasil simulasi selama periode 10 tahun, wilayah Tangerang diproyeksikan membutuhkan tambahan kapasitas transformator sebesar 1,6 MVA dengan penambahan 7 gardu distribusi pada beberapa kelurahan, serta total tambahan transformator sebanyak 642 unit dan gardu distribusi sebanyak 589 unit. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan GUI Matlab sangat membantu dalam merencanakan kebutuhan infrastruktur distribusi listrik berdasarkan pertumbuhan beban secara efektif dan efisien.

(Albert Gifson et al. 2023) penelitian ini berjudul “Analisa Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Susut Daya Pada Transformator Distribusi di PT PLN UP3 Semarang”. Penelitian membahas pengaruh ketidakseimbangan beban pada gardu distribusi terhadap arus netral dan rugi-rugi daya (losses) pada sistem distribusi listrik. Penelitian ini dilakukan pada tiga gardu RJLS, RJKS, dan MAI untuk mengetahui sejauh mana ketidakseimbangan beban mempengaruhi efisiensi transformator. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban menyebabkan kenaikan arus netral dan peningkatan susut energi, yang berdampak langsung pada kerugian daya dan efisiensi sistem. Setelah dilakukan penyeimbangan beban menggunakan metode pertukaran fasa pada PHB-TR, nilai ketidakseimbangan, arus netral, dan rugi-rugi daya mengalami penurunan signifikan; misalnya, ketidakseimbangan di gardu RJLS turun dari 33% menjadi 16%, dan susut energi menurun dari 8,3% menjadi 3,5%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode penyeimbangan beban melalui pertukaran fasa merupakan cara efektif untuk mengurangi arus netral dan rugi-rugi daya, sehingga membantu PLN mencapai target efisiensi jaringan listrik.

(H. S. Dini et al., 2022) penelitian berjudul “Penentuan Kriteria Kapasitas Transformator Berdasarkan Proyeksi Kebutuhan Energi Secara Mikrospasial” membahas metode penentuan kapasitas dan jumlah transformator distribusi menggunakan pendekatan proyeksi kebutuhan energi berbasis mikrospasial di wilayah jaringan Tangerang. Penelitian ini membagi area pelayanan menjadi grid-grid kecil untuk melakukan analisis spasial dan pengelompokan (*clustering*) berdasarkan faktor geografis, demografis, ekonomi, dan kelistrikan guna memperkirakan kerapatan beban tiap wilayah. Hasil analisis menunjukkan bahwa proyeksi kebutuhan energi dapat diformulasikan menjadi kriteria dalam menentukan rating transformator dengan kapasitas antara 250 kVA hingga 1250 kVA. Selama periode perencanaan 10 tahun, diperkirakan terjadi pertumbuhan beban sebesar 8,4% per tahun dengan total penambahan daya 1.480 MVA, sehingga diperlukan tambahan 3.238 unit transformator dan 3.064 unit gardu distribusi. Dengan demikian, pendekatan mikrospasial ini dinilai efektif untuk meningkatkan akurasi perencanaan sistem distribusi listrik dan memastikan kinerja transformator tetap optimal seiring pertumbuhan beban di masa mendatang.

(Zainal et al., 2019) Dokumen berjudul “Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 kV dan Solusinya pada Jaringan Tegangan Rendah” membahas pengaruh ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi terhadap arus netral dan rugi-rugi daya pada sistem distribusi listrik. Penelitian ini dilakukan di jaringan distribusi PLN Rayon Rungkut, Surabaya Selatan, menggunakan software ETAP 12.6.0 dan data pengukuran lapangan. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban menyebabkan peningkatan arus netral dan rugi-rugi daya, dengan contoh kasus transformator BE1192 yang memiliki ketidakseimbangan sebesar 25,6% dan rugi-rugi daya mencapai 1,027 kW atau 9,14% dari total beban. Setelah dilakukan penyeimbangan beban dengan metode pemindahan beban antar fasa, ketidakseimbangan arus berkurang signifikan hingga mendekati seimbang. Dengan demikian, penelitian ini menyimpulkan bahwa upaya penyeimbangan beban pada transformator distribusi dapat menurunkan rugi-rugi daya dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik.

2.2 Tinjauan Pustaka

2.2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan tahapan akhir dari sistem tenaga listrik setelah pembangkitan dan transmisi. Menurut SPLN 1:1995, sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari jaringan tegangan menengah menuju pelanggan dengan mempertimbangkan aspek keandalan, kontinuitas pelayanan, dan efisiensi penyaluran [1]. Secara umum, energi listrik yang ditransmisikan melalui jaringan tegangan tinggi akan diturunkan tegangannya melalui gardu induk sebelum disalurkan ke jaringan distribusi.

Menurut IEC 60076, sistem distribusi yang baik harus memenuhi kriteria kualitas daya, stabilitas tegangan, serta memiliki proteksi yang memadai untuk menghindari gangguan yang dapat mengakibatkan pemadaman luas [3]. Dalam penelitian Suryana (2018), disebutkan bahwa pengembangan sistem distribusi pada daerah perumahan membutuhkan kajian teknis yang mendalam agar beban dapat disuplai tanpa menimbulkan rugi daya berlebih [4].

2. Klasifikasi Jaringan Distribusi Tegangan Menengah

Komponen sistem tenaga listrik yang menghubungkan gardu induk dan fasilitas pembangkit tenaga listrik dengan konsumen disebut sistem distribusi tenaga listrik. Sedangkan jaringan distribusi adalah suatu cara untuk mendapatkan energi ke konsumen melalui sistem distribusi tenaga listrik. Suatu sistem distribusi harus: disesuaikan dengan kondisi setempat dengan mempertimbangkan faktor beban, lokasi beban, keandalan, dan nilai ekonomi pada saat mendistribusikan listrik ke pusat beban.

Berdasarkan tegangan pengenalnya sistem jaringan distribusi dibedakan menjadi dua macam, yaitu :

- Sistem jaringan tegangan primer atau Medium Voltage Network (JTM) yaitu berupa Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) atau Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Tegangan yang disuplai oleh jaringan ini, yang menghubungkan sisi sekunder transformator daya di gardu induk ke gardu distribusi, adalah 6 kV, 12 kV, atau 20 kV.
- Rute yang menghubungkan gardu distribusi dan sisi sekunder trafo distribusi ke pelanggan dikenal sebagai jaringan tegangan distribusi sekunder, kadang-kadang dikenal sebagai jaringan tegangan rendah (JTR). 220 dan 380 volt adalah tegangan sistem yang digunakan.

3. Ruang Lingkup Jaringan Distribusi

Ruang lingkup dari jaringan distribusi adalah sebagai berikut:

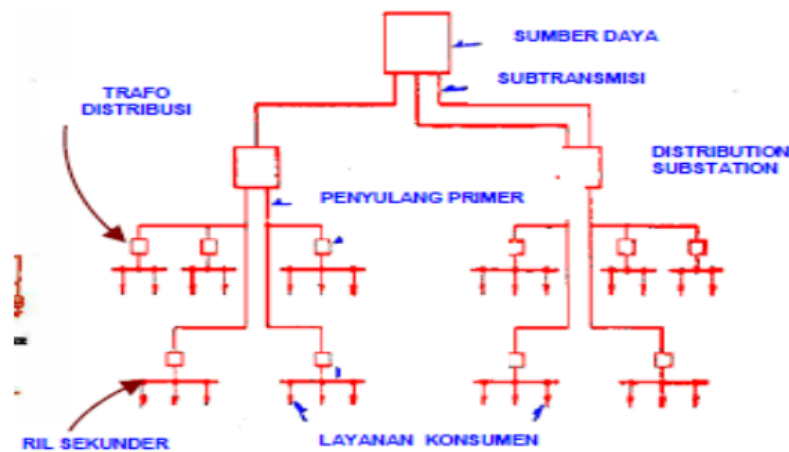
- a. SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah), terdiri dari : Tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan per-lengkapannya, serta peralatan pengaman dan pemutus.
- b. SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah),, terdiri dari : Kabel tanah, indoor dan outdoor termination, batu bata, pasir dan lain-lain.
- c. 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.

- d. SUTR (Saluran Udara Tegangan Rendah) dan SKTR (Saluran Kabel Tegangan Rendah), terdiri dari: sama dengan perlengkapan/ material pada SUTM dan SKTM yang membedakan hanya dimensinya.

Beberapa Tipe Sistem Jaringan Distribusi Primer:

1. Sistem Radial

Sistem radial memiliki jumlah sumber dan penyulang hanya satu buah. Bila terjadi gangguan pada salah satunya (baik sumber maupun penyulangnya), maka semua beban yang dilayani oleh jaringan ini akan padam. Nilai kehandalan dari sistem radial ini adalah rendah. Kehandalan sistem memenuhi kontinuitas tingkat 1 dan umumnya merupakan jaringan luar kota

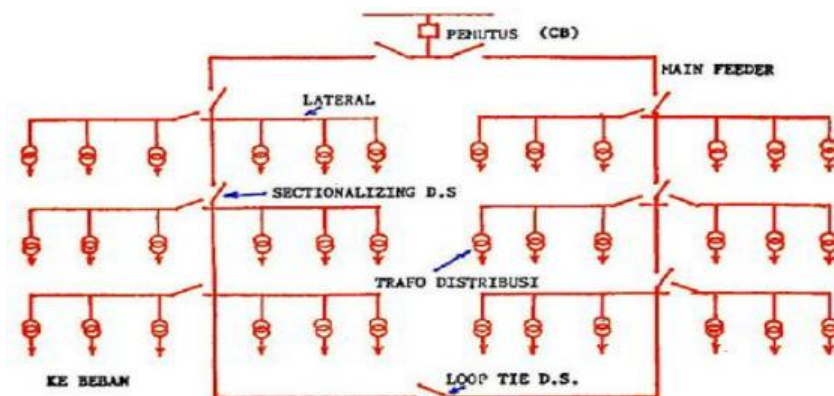


Gambar 2. 2 SLD Sistem Radial

2. Sistem Lingkar (Loop/Ring)

Sistem Lingkar (loop/ ring) ini merupakan gabungan dari dua buah sistem radial. Secara umum operasi normal sistem ini hampir sama seperti sistem radial. Sistem ini sudah mempunyai tingkat kehandalan dan kontinuitas yang lebih baik dibandingkan dengan sistem radial. Hal ini dikarenakan jumlah sumber dan penyulang yang ada pada suatu jaringan adalah lebih dari satu buah.

Pada sistem ini terdapat dua sumber dan arah pengisian yang satu dapat sebagai cadangan, sehingga tingkat kehandalannya cukup tinggi. Sistem ini banyak dipergunakan pada jaringan umum rumah sakit, pusat-pusat pemerintahan dan instansi-instansi penting lainnya serta industri.



Gambar 2. 3 SLD Sistem Lingkari (Loop/Ring)

3. Sistem Spindle

Sistem spindle merupakan modifikasi dari sistem lingkari (loop/ ring) yang terdiri dari beberapa sistem radial. Sistem ini terdiri dari beberapa penyulang, masing-masing penyulang berpangkal pada suatu gardu induk dan ujung-ujungnya akan terhubung di gardu hubung. Penyulang tersebut dibagi menjadi dua jenis yaitu :

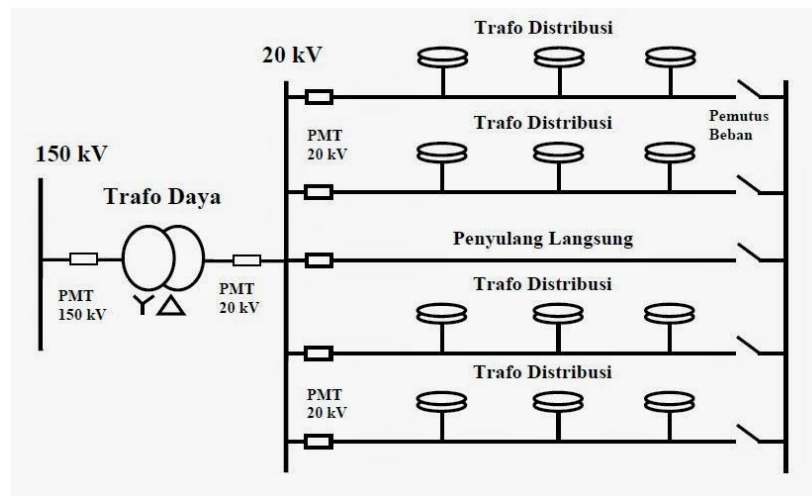
a. Penyulangkerja/ working feeder

Penyulang yang dioperasikan untuk mengalirkan daya listrik dari sumber pembangkit sampai kepada konsumen, sehingga penyulang ini dioperasikan dalam keadaan bertegangan dan sudah dibebani. Operasi normal penyulang ini hampir sama dengan sistem radial.

b. Penyulang cadangan/ express feeder

Penyulang yang menghubungkan gardu induk langsung ke gardu hubung dan tidak dibebani gardu-gardu distribusi. Pada operasi normal, penyulang ini tidak dialiri arus- arus beban dan hanya berfungsi sebagai penyulang cadangan untuk menyuplai penyulang tertentu yang mengalami gangguan melalui gardu hubung.

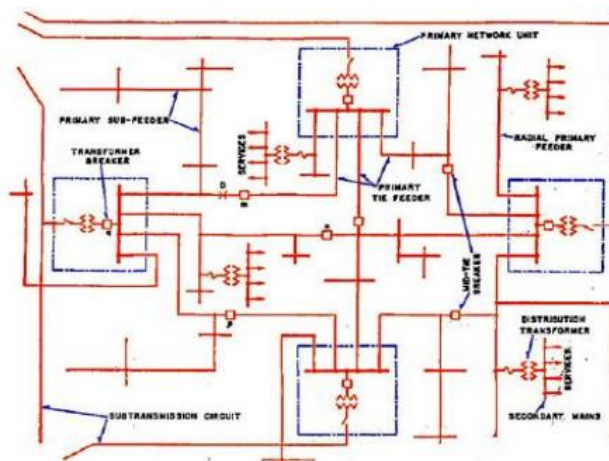
Jaringan ini memenuhi kontinuitas tingkat 2 dan jika dilengkapi dengan sarana kontrol jarak jauh dapat disebut memenuhi tingkat 3. Apabila seluruh pelanggan (gardu konsumen) dilengkapi dengan fasilitas kontrol jarak jauh dapat memenuhi kontinuitas tingkat 4. Jaringan ini dipasang di kota yang memiliki tingkat beban sangat tinggi.



Gambar 2. 4 SLD Sistem Spindle

4. Sistem Gugus (Mesh)

Konfigurasi Gugus banyak digunakan untuk kota besar yang mempunyai kerapatan beban yang tinggi. Dalam sistem ini terdapat saklar pemutus beban dan penyulang cadangan. Dimana penyulang cadangan ini berfungsi bila ada gangguan yang terjadi pada salah satu penyulang konsumen maka penyulang cadangan inilah yang menggantikan fungsi suplai ke konsumen.



Gambar 2. 5 SLD Sistem Mesh

2.2.2 Jaringan Tegangan Rendah (JTR)

Jaringan Tegangan Rendah (JTR) merupakan jaringan yang menyalurkan energi listrik dari sisi sekunder transformator distribusi dengan tegangan standar 220/380 V sesuai dengan PUIL 2011 [3]. JTR didesain untuk melayani pelanggan rumah tangga,

komersial, dan industri kecil dengan batas deviasi tegangan maksimum $\pm 5\%$ sesuai Permen ESDM No. 27 Tahun 2017 [2].

Menurut Wibowo (2020), salah satu masalah utama pada jaringan tegangan rendah adalah jatuh tegangan (voltage drop) akibat panjang jaringan dan pembebanan tidak merata [5]. Oleh karena itu, perhitungan jatuh tegangan menggunakan rumus $\Delta V = I \times (R \cos\phi + X \sin\phi)$ menjadi hal penting yang harus dipenuhi untuk memastikan tegangan pada titik pelanggan tetap sesuai standar.

Jaringan Tegangan Rendah ialah jaringan tenaga listrik dengan tegangan rendah yang mencakup seluruh bagian jaringan tersebut beserta perlengkapannya. dari sumber penyaluran tegangan rendah tidak termasuk SLTR. Sedangkan sambungan tenaga listrik tegangan rendah (SLTR) ialah penghantar di bawah atau di atas tanah termasuk peralatannya mulai dari titik penyambungan pada JTR sampai dengan alat pembatas dan pengukur (App).(SPLN No.56 tahun 1984). Jaringan tegangan rendah merupakan jaringan yang berhubungan langsung dengan konsumen tenaga listrik. Pada JTR sistem tegangan distribusi primer 20/11 kV diturunkan menjadi tegangan rendah 380/220V.

Tabel 2. 1 SR yang disadapkan dari JTR dengan rugi

Beban tersambung rata-rata per konsumen (VA)	Luas penampang kabel pilin (mm2)		Jumlah Sambungan Maksimum
	Cu	AAAC/L VTC	
$S \leq 450$	4	-	5
$S \leq 450$	6	10	5
$450 < S \leq 800$	10	16	7
$800 < S \leq 1250$	16	25	7

Sistem penyaluran daya listrik pada JTM maupun JTR dapat dibedakan menjadi dua yaitu sebagai berikut:

a. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)

Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel telanjang (tanpa isolasi) seperti kabel AAAC, kabel ACSR.

b. Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR)

Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel berisolasi seperti kabel LVTC (Low Voltage Twisted Cable). ukuran kabel LVTC adalah : $2 \times 10 \text{ mm}^2$, $2 \times 16 \text{ mm}^2$, $4 \times 25 \text{ mm}^2$, $3 \times 35 \text{ mm}^2$, $3 \times 50 \text{ mm}^2$, $3 \times 70 \text{ mm}^2$.

Jenis – jenis kabel yang digunakan pada JTR :

a. Kabel Pilin (Twisted Cable)

Biasanya dipakai sebagai penghantar udara pada jaringan tegangan rendah. Inti kabel berupa kawat tunggal (mis. aluminium) yang dipilin untuk membentuk penghantar fase dan netral. Contoh umum pada JTR udara: *NFAAX-T*.

b. Kabel NYY

Kabel tenaga non-armoured (tanpa pelindung baja) yang bisa diletakkan di tanah baik bawah tanah maupun duct/kanal. Sering dipakai pada kabel jurusan bawah tanah JTR.

c. Kabel NYFGBY (Armoured Cable)

Kabel tenaga berpelindung baja (armoured) sehingga lebih tahan tekanan mekanis dan cocok untuk pemasangan langsung di tanah tanpa perlindungan tambahan. Umum digunakan sebagai kabel utama dari gardu atau kabel distribusi bawah tanah JTR.

d. Kabel LVTC (Low Voltage Twisted Cable)

Kabel dengan inti lebih besar dan konstruksi twisted, dirancang khusus untuk saluran udara tegangan rendah pada JTR. Ukurannya bisa bervariasi, mis. $2 \times 10 \text{ mm}^2$, $3 \times 35 \text{ mm}^2$ dst.

e. Kabel Lainnya yang Sering Dipakai dalam JTR

Selain kabel di atas, banyak jenis kabel listrik lain yang juga dipakai tergantung kebutuhan jaringan dan instalasi lokal:

- NYA – kabel inti tunggal untuk instalasi dalam rumah dan distribusi kecil.
 - NYM – kabel fleksibel untuk instalasi permanen di dalam bangunan.
 - NYAF – kabel fleksibel untuk panel atau instalasi dengan banyak belokan.
- Semua ini sering juga dipakai di jaringan distribusi hibah atau sambungan rumah yang merupakan bagian dari JTR.

Penyambungan JTR menurut SPLN No.74 tahun 1987 yaitu “sambungan JTR adalah sambungan rumah (SR) penghantar di bawah tanah atau di atas tanah termasuk peralatannya mulai dari titik penyambungan tiang JTR sampai alat pembatas dan pengukur (APP)”. Spesifikasi umum sambungan rumah yaitu sebagai berikut :

a. Rugi Tegangan

Jatuh tegangan maksimum yang diperkenankan sepanjang penghantar SR ialah 2%. Dengan catatan dalam hal ini SR diperhitungkan dari titik penyambung pada STR. Khusus untuk penyambungan langsung dari papan bagi TR di gardu transformator jatuh tegangan diperkenankan maksimum 5%.

b. Ukuran Penghantar Minimum

Ukuran penghantar minimum saluran rumah (SLP dan SMP) ialah untuk SLP, baik di atas ataupun di bawah tanah minimal 10 mm² . Sedangkan untuk SMP penghantar aluminium minimal 10 mm² atau tembaga minimum 4 mm² . Sambungan rumah digunakan kabel pilin berinti tembaga atau aluminium, dengan ukuran inti tembaga adalah 4 mm² , 6 mm² , 10 mm² , 16 mm² , 25 mm² . Ukuran inti aluminium adalah 10 mm² , 16 mm² , 25 mm² , 35 mm² .

c. Jumlah Langganan / Sambungan Seri

Dengan memperhitungkan jatuh tegangan maksimum yang diizinkan, $\cos \theta = 0.850$, impedansi saluran dan "demand factor" = 0.5, maka didapatkan jumlah sambungan seri menurut ukuran dari jenis kabel SR, jarak SR dan besar beban tersambung rata-rata.

2.2.3 Gardu Distribusi

Gardu distribusi adalah instalasi yang menurunkan tegangan dari jaringan tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah untuk disalurkan kepada pelanggan. Berdasarkan SPLN 1:1995, gardu distribusi harus dilengkapi dengan transformator distribusi, panel tegangan rendah, serta sistem proteksi seperti arrester dan fuse [1].

Menurut IEC 60076, kapasitas trafo tidak boleh dibebani lebih dari 80% dari kapasitas nominalnya untuk menjaga umur peralatan [3]. Penelitian Arifin (2022)

menunjukkan bahwa banyak gardu distribusi di Makassar mengalami beban lebih dari 85%, sehingga memicu kenaikan suhu trafo dan mempercepat kerusakan komponen [6].

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

- a. Jenis pemasangannya :
 - 1. Gardu pasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol
 - 2. Gardu pasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios
- b. Jenis Konstruksinya :
 - 1. Gardu Beton (bangunan sipil : batu, beton)
 - 2. Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol
 - 3. Gardu Kios
- c. Jenis Penggunaannya :
 - 1. Gardu Pelanggan Umum
 - 2. Gardu Pelanggan Khusus

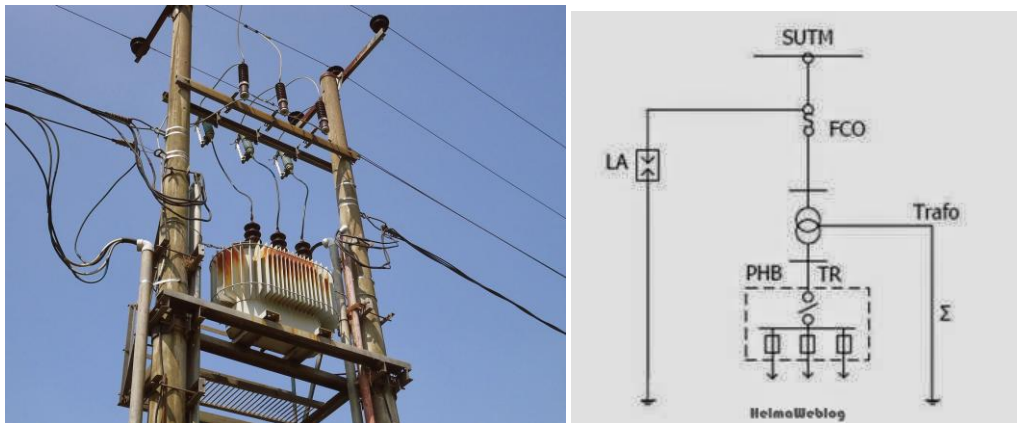
Khusus pengertian Gardu Hubung adalah gardu yang ditujukan untuk memudahkan manuver pembebanan dari satu penyulang ke penyulang lain yang dapat dilengkapi/tidak dilengkapi RTU (Remote Terminal Unit). Untuk fasilitas ini lazimnya dilengkapi fasilitas DC Supply dari Trafo Distribusi pemakaian sendiri atau Trafo distribusi untuk umum yang diletakkan dalam satu kesatuan.

a. Gardu Tiang

Menggunakan Tiang : beton, besi, kayu

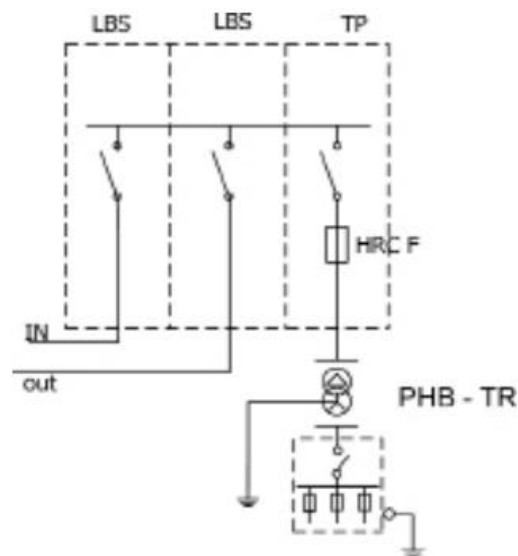
1. Gardu Portal

Umumnya konfigurasi Gardu Tiang yang dicatu dari SUTM adalah T section dengan peralatan pengaman Pengaman Lebur Cut-Out (FCO) sebagai pengaman hubung singkat transformator dengan elemen pelebur (pengaman lebur link type expulsion) dan Lightning Arrester (LA) sebagai sarana pencegah naiknya tegangan pada transformator akibat surja petir.



Gambar 2. 6 Gardu Portal dan Bagan satu garis

Untuk Gardu Tiang pada sistem jaringan lingkaran terbuka (open-loop), seperti pada sistem distribusi dengan saluran kabel bawah tanah, konfigurasi peralatan adalah π section dimana transformator distribusi dapat di catu dari arah berbeda yaitu posisi Incoming – Outgoing atau dapat sebaliknya.



Gambar 2. 7 Bagan satu garis konfigurasi π section Gardu Portal

Guna mengatasi faktor keterbatasan ruang pada Gardu Portal, maka digunakan konfigurasi switching/proteksi yang sudah terakit ringkas sebagai RMU (Ring Main Unit). Peralatan switching incoming-outgoing berupa Pemutus Beban atau LBS (Load Break Switch) atau Pemutus Beban Otomatis (PBO) atau CB (Circuit Breaker) yang bekerja secara manual (atau digerakkan dengan remote control).

Fault Indicator (dalam hal ini PMFD : Pole Mounted Fault Detector) perlu dipasang pada section jaringan dan percabangan untuk memudahkan pencarian titik gangguan, sehingga jaringan yang tidak mengalami gangguan dapat dipulihkan lebih cepat.

2. Gardu Cantol

Pada Gardu Distribusi tipe cantol, transformator yang terpasang adalah transformator dengan daya ≤ 100 kVA Fase 3 atau Fase 1. Transformator terpasang adalah jenis CSP (Completely Self Protected Transformer) yaitu peralatan switching dan proteksinya sudah terpasang lengkap dalam tangki transformator.



Gambar 2. 8 Gardu Tipe Cantol.

Perlengkapan perlindungan transformator tambahan LA (Lightning Arrester) dipasang terpisah dengan Penghantar pembumiannya yang dihubungkan langsung dengan badan transformator. Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) maksimum 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (type NH, NT) sebagai pengaman jurusan. Semua Bagian Konduktif Terbuka (BKT) dan Bagian Konduktif Ekstra (BKE) dihubungkan dengan pembumian sisi Tegangan Rendah.

3. Gardu Beton

Seluruh komponen utama instalasi yaitu transformator dan peralatan switching/proteksi, terangkai didalam bangunan sipil yang dirancang, dibangun dan difungsikan dengan konstruksi pasangan batu dan beton (masonrywall building).

Konstruksi ini dimaksudkan untuk pemenuhan persyaratan terbaik bagi keselamatan ketenagalistrikan.



Gambar 2. 9 Gardu Beton

4. Gardu Kios

Gardu tipe ini adalah bangunan prefabricated terbuat dari konstruksi baja, fiberglass atau kombinasinya, yang dapat dirangkai di lokasi rencana pembangunan gardu distribusi. Terdapat beberapa jenis konstruksi, yaitu Kios Kompak, Kios Modular dan Kios Bertingkat.



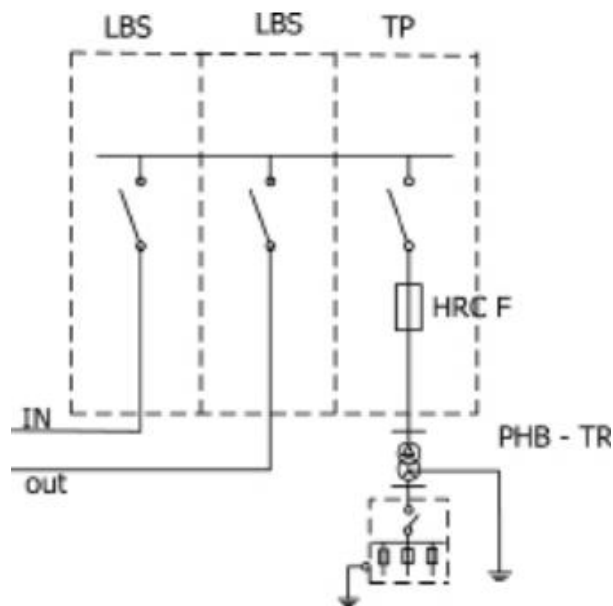
Gambar 2. 10 Gardu Kios

Gardu ini dibangun pada tempat-tempat yang tidak diperbolehkan membangun Gardu Beton. Karena sifat mobilitasnya, maka kapasitas transformator distribusi yang terpasang

terbatas. Kapasitas maksimum adalah 400 kVA, dengan 4 jurusan Tegangan Rendah. Khusus untuk Kios Kompak, seluruh instalasi komponen utama gardu sudah dirangkai selengkapanya di pabrik, sehingga dapat langsung di angkut kelokasi dan disambungkan pada sistem distribusi yang sudah ada untuk difungsikan sesuai tujuannya.

5. Gardu Pelanggan Umum

Umumnya konfigurasi peralatan Gardu Pelanggan Umum adalah π section, sama halnya seperti dengan Gardu Tiang yang dicatu dari SKTM.



Gambar 2. 11 Bagan satu garis Konfigurasi π section Gardu Pelanggan Umum

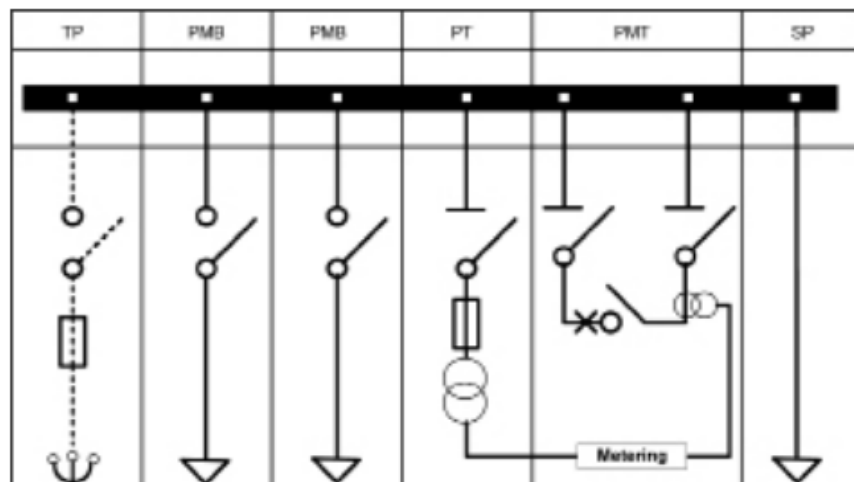
Karena keterbatasan lokasi dan pertimbangan keandalan yang dibutuhkan, dapat saja konfigurasi gardu berupa T section dengan catu daya disuplai PHB-TM gardu terdekat yang sering disebut dengan Gardu Antena.

Untuk tingkat keandalan yang dituntut lebih dari Gardu Pelanggan Umum biasa, maka gardu dipasok oleh SKTM lebih dari satu penyulang sehingga jumlah saklar hubung lebih dari satu dan dapat digerakan secara Otomatis (ACOS : Automatic Change Over Switch) atau secara remote control.

6. Gardu Pelanggan Khusus

Gardu ini dirancang dan dibangun untuk sambungan tenaga listrik bagi pelanggan berdaya besar. Selain komponen utama peralatan hubung dan proteksi, gardu ini dilengkapi dengan alat-alat ukur yang dipersyaratkan.

Untuk pelanggan dengan daya lebih dari 197 kVA, komponen utama gardu distribusi adalah peralatan PHB-TM, proteksi dan pengukuran Tegangan Menengah. Transformator penurun tegangan berada di sisi pelanggan atau diluar area kepemilikan dan tanggung jawab PT PLN (Persero). Pada umumnya, Gardu Pelanggan Khusus ini dapat juga dilengkapi dengan transformator untuk melayani pelanggan umum.



Gambar 2. 12 Bagan Satu Garis Gardu Pelanggan Khusus

Keterangan :

- TP = Pengaman Transformator
- PMB = Pemutus Beban – LBS
- PT = Trafo Tegangan
- PMT = Pembatas Beban Pelanggan
- SP = Sambungan Pelanggan

7. Gardu Hubung

Gardu Hubung disingkat GH atau Switching Substation adalah gardu yang berfungsi sebagai sarana manuver pengendali beban listrik jika terjadi gangguan aliran listrik, program pelaksanaan pemeliharaan atau untuk maksud mempertahankan kountinuitas pelayanan.

Isi dari instalasi Gardu Hubung adalah rangkaian saklar beban (Load Break switch – LBS), dan atau pemutus tenaga yang terhubung paralel. Gardu Hubung juga dapat dilengkapi sarana pemutus tenaga pembatas beban pelanggan khusus Tegangan Menengah. Konstruksi Gardu Hubung sama dengan Gardu Distribusi tipe beton. Pada

ruang dalam Gardu Hubung dapat dilengkapi dengan ruang untuk Gardu Distribusi yang terpisah dan ruang untuk sarana pelayanan kontrol jarak jauh. Ruang untuk sarana pelayanan kontrol jarak jauh dapat berada pada ruang yang sama dengan ruang Gardu Hubung, namun terpisah dengan ruang Gardu Distribusinya.

Berdasarkan kebutuhannya Gardu Hubung dibagi menjadi:

- Gardu Hubung untuk 7 buah sel kubikel.
- Gardu Hubung untuk (7 + 7) buah sel kubikel.
- Gardu Hubung untuk (7 + 7 + 7 + 7) buah sel kubikel.

Penggunaan kelompok – kelompok sel tersebut bergantung atas sistem yang digunakan pada suatu daerah operasional, misalnya Spindel, Spotload, Fork, Bunga, dan lain – lain. Spesifikasi teknis sel – sel kubikel Gardu Hubung sama dengan spesifikasi teknis Gardu Distribusi, kecuali kemungkinan kemampuan Arus Nominalnya yang bisa berbeda.

2.2.4 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain tanpa merubah frekuensi dari sistem, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Trafo digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan trafo dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap - tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.



Gambar 2. 13 Transformator

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

1. Transformator daya, trafo ini biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
2. Transformator distribusi, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
3. Transformator instrument, digunakan untuk pengukuran yang terdiri atas transformator arus (*current transformer-CT*) dan transformator tegangan (*potential transformer-PT*).

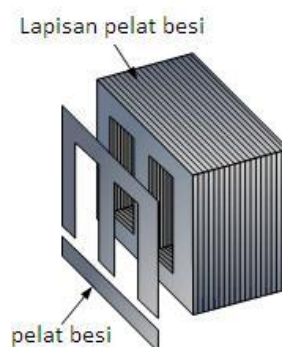
Masing-masing tipe transformator memiliki kekhususan dalam perencanaan dan pembuatan yang disesuaikan dengan pemakaiannya. Walaupun demikian semua tipe transformator mempunyai prinsip dasar yang sama.

Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada kedua kumparan. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dibelit seputar “kaki” inti transformator.

a. Bagian Utama Transformator

1. Inti Besi

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi yang di timbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Inti besi ini terbuat dari lempengan lempengan besi tipis terisolasi untuk mengurangi panas (sebagai iec rugi besi) yang di timbulkan oleh arus eddy (Eddy Current).



Gambar 2. 14 Inti Besi Transformator

2. Kumparan Trafo

Kumparan trafo adalah beberapa lilitan kawat berisolasi akan membentuk suatu kumparan. Kumparan itu diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat seperti karton, pertinax dan lain lain. Umumnya pada trafo terdapat kumparan primer dan kumparan sekunder.

- Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/arus bolak balik maka pada kumparan tersebut timbul fluks. Fluks ini akan menginduksi tegangan.
- Bila pada rangkaian sekunder di tutup (bila ada rangkaian beban) maka akan menghasilkan arus pada kumparan ini.



Gambar 2. 15 Kumparan Trafo

Jadi kumparan sebagai alat transformasi tegangan arus.

Selain kedua kumparan (primer dan sekunder) ada beberapa trafo yang dilengkapi dengan kumparan ketiga atau kumparan tersier (tertiary winding).

- Kumparan Tersier diperlukan untuk memperoleh tegangan tersier atau untuk kebutuhan lain. Untuk kedua keperluan tersebut, kumparan tersier selalu dihubungkan delta.
- Kumparan tersier sering dipergunakan juga untuk penyambungan peralatan bantu seperti kondensator synchrone, kapasitor shunt dan reactor shun.

3. Minyak Transformator

Minyak transformator merupakan cairan yang dihasilkan dari proses pemurnian minyak mentah. Selain itu minyak ini juga berasal dari bahan-bahan organik, misalnya minyak piranol dan silikon, beberapa minyak transformator yang sering dijumpai di lapangan adalah minyak transformator jenis Diala A, Diala B dan Mectrans. Minyak transformator disini berfungsi sebagai pengisolasi isolator) dan pendingin.



Gambar 2. 16 Minyak Transformator

- Minyak sebagai isolator berfungsi mengisolasi kumparan didalam transformator supaya tidak terjadi loncatan bunga api listrik akibat tegangan tinggi.
- Minyak sebagai pendingin berfungsi mengambil panas yang ditimbulkan saat transformator berbeban lalu melepaskannya dan melindungi komponen di dalamnya terhadap oksidasi dan korosi

4. Bushing

Hubungan antara transformator ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tanki transformator. Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubung oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan body main tank transformator.



Gambar 2. 17 Bushing

5. Tangki dan Konservator

Pada umumnya bagian-bagian transformator yang terendam minyak trafo ditempatkan di dalam tangki. Untuk menampung pemuaian minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator. Konservator merupakan tabung berisi minyak tranformator yang diletakkan pada bagian atas tangki. Fungsinya yaitu untuk menjaga ekspansi atau meluapnya minyak akibat pemanasan dan sebagai saluran pengisian minyak.



Gambar 2. 18 Tangki dan Konservator

b. Jenis Fasa Tegangan Transformator

Sebagaimana diketahui, bahwa fasa tegangan listrik yang umum digunakan adalah tegangan satu fasa dan tegangan tiga fasa.

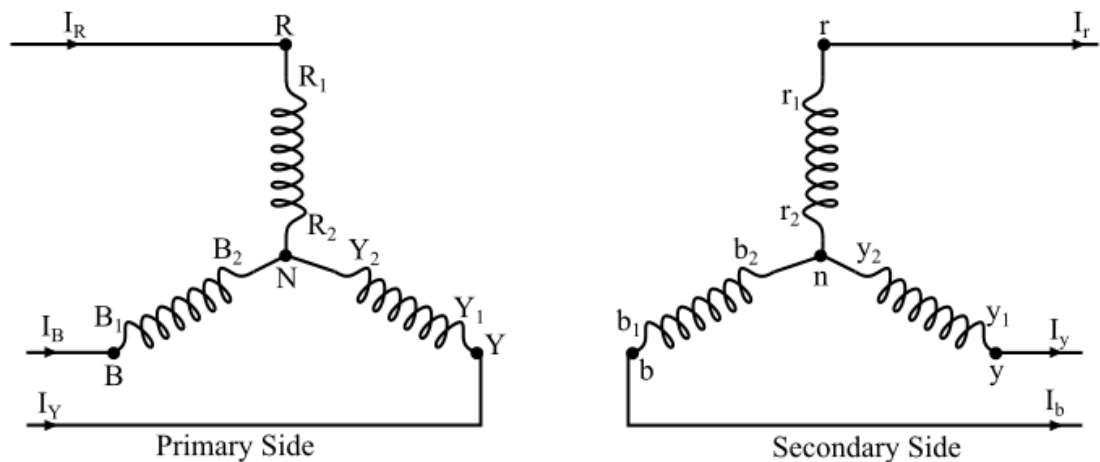
1. Berdasarkan ini dikenal 2 jenis transformator : Transformator satu fasa, bila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga listrik satu fasa.
2. Transformator tiga fasa, bila transformator digunakan untuk memindahkan tenaga listrik tiga fasa.

c. Hubungan Lilitan Transformator Tiga Fasa

Kumparan primer ataupun sekunder dari transformator tiga fasa bisa dihubungkan5 :

1. Hubungan Bintang atau Y

Hubungan bintang ialah hubungan transformator tiga fasa, dimana ujung – ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujung – ujung lilitan merupakan titik netral.

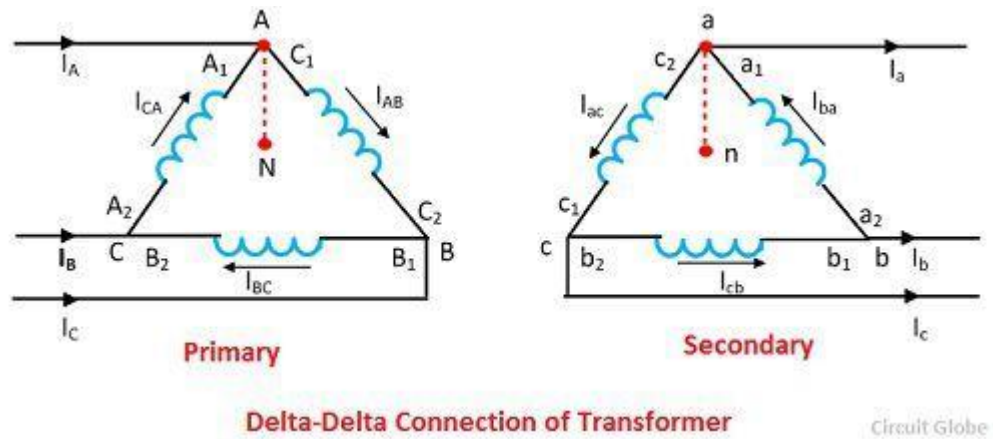


Gambar 2. 19 Hubungan Bintang

2. Hubungan Segitiga atau Δ

Hubungan segitiga adalah suatu hubungan transformator tiga fasa, dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama.

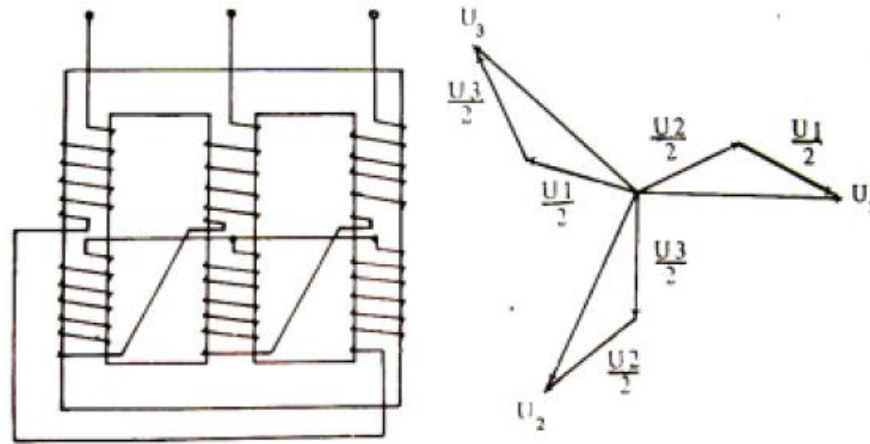
Tegangan trafo 3 (tiga) fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta, yaitu VAB, VBC, dan VCA, masing-masing berbeda fasa 120° .



Gambar 2. 20 Hubungan Segitiga

3. Hubungan Zig – Zag atau Z

Supaya dapat bekerja dengan baik, maka salah satu syarat yang diperlukan adalah setiap fasa hendaknya bebannya sama, akan tetapi hal ini seringkali sukar dipenuhi. Untuk itu lilitan sekunder dibuat dalam hubungan *interconnected star* (zig – zag).



Gambar 2. 21 Hubungan Zig – Zag

d. Jenis – Jenis Transformator

1. Step-Up

Transformator step-up adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh.



Gambar 2. 22 Skema Transformator Step-Up

2. Step-Down

Transformator step-down memiliki lilitan sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator jenis ini sangat mudah ditemui, terutama dalam adaptor AC-DC.



Gambar 2. 23 Skema Transformator Step-Down

3. Auto Transformer

Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan sekunder bisa dibuat dengan kawat yang lebih tipis dibandingkan transformator biasa. Keuntungan dari autotransformator adalah ukuran fisiknya yang kecil dan kerugian yang lebih rendah daripada jenis dua lilitan. Tetapi transformator jenis ini tidak dapat memberikan isolasi secara listrik antara lilitan primer dengan lilitan sekunder.

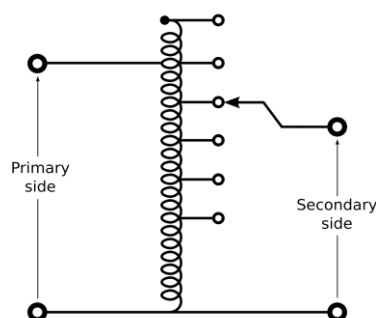


Gambar 2. 24 Skema Auto Transformator

Selain itu, auto transformator tidak dapat digunakan sebagai penaik tegangan lebih dari beberapa kali lipat (biasanya tidak lebih dari 1,5 kali).

4. Auto Transformator Variabel

Auto transformator variabel sebenarnya adalah autotransformator biasa yang sadapan tengahnya bisa diubah-ubah, memberikan perbandingan lilitan primer sekunder yang berubah-ubah.



Gambar 2. 25 Skema Autotransformator Variabel

5. Transformator isolasi

Transformator isolasi memiliki lilitan sekunder yang berjumlah sama dengan lilitan primer, sehingga tegangan sekunder sama dengan tegangan primer. Tetapi pada beberapa desain, gulungan sekunder dibuat sedikit lebih banyak untuk mengkompensasi kerugian. Transformator seperti ini berfungsi sebagai isolasi antara dua kalang. Untuk penerapan audio, transformator jenis ini telah banyak digantikan oleh kopling kapasitor.

6. Transformator pulsa

Transformator pulsa adalah transformator yang didesain khusus untuk memberikan keluaran gelombang pulsa. Transformator jenis ini menggunakan material inti yang cepat jenuh sehingga setelah arus primer mencapai titik tertentu, fluks magnet berhenti berubah. Karena GGL induksi pada lilitan sekunder hanya terbentuk jika terjadi perubahan fluks magnet, transformator hanya memberikan keluaran saat inti tidak jenuh, yaitu saat arus pada lilitan primer berbalik arah.

2.2.5 Standar Tegangan dan Kualitas Daya

Permen ESDM No. 27 Tahun 2017 menjelaskan bahwa batas deviasi tegangan untuk pelanggan tegangan rendah adalah $\pm 5\%$ dari tegangan nominal, dan faktor daya minimum yang diperbolehkan adalah 0,85 [2]. Kualitas daya menjadi indikator penting untuk memastikan peralatan pelanggan bekerja optimal dan efisiensi sistem tetap terjaga.

Menurut standar IEC, kualitas daya yang buruk dapat menyebabkan kenaikan arus pada jaringan yang berdampak pada rugi-rugi teknis (losses) serta menurunkan umur peralatan distribusi [3]. Oleh karena itu, PLN menetapkan pedoman teknis untuk meminimalkan deviasi tegangan dan menjaga faktor daya pelanggan. Dengan demikian, pemenuhan batas deviasi tegangan dan faktor daya sesuai ketentuan Permen ESDM No. 27 Tahun 2017 merupakan bagian penting dalam upaya menjaga kualitas, efisiensi, dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

2.2.6 Analisis Kelayakan Teknis

Analisis kelayakan teknis bertujuan untuk memastikan bahwa jaringan distribusi mampu menyalurkan energi listrik secara efisien dan sesuai standar. Tahapan ini

mencakup perhitungan beban, evaluasi kapasitas hantar arus konduktor (KHA), serta pemeriksaan kapasitas transformator [1].

Menurut SPLN, edaran direksi dan kapasitas trafo sebaiknya tidak melebihi 80% pembebanan maksimum [3].

2.2.7 Analisis Kelayakan Ekonomis

Analisis kelayakan ekonomis dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan finansial dari proyek pembangunan jaringan distribusi. Parameter yang umum digunakan adalah Payback Period (PP) [2].

Menurut literatur ekonomi ketenagalistrikan, suatu proyek dinyatakan layak jika PP berada dalam rentang waktu investasi yang dianggap efisien. Analisis ini penting untuk memastikan bahwa investasi PLN dalam jaringan distribusi memberikan manfaat finansial yang sebanding dengan biaya yang dikeluarkan [5].