

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN
TERHADAP ARUS NETRAL DAN RUGI RUGI
DAYA (*LOSSES*) TRANSFORMATOR
DISTRIBUSI 3500KVA**

*Diajukan untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelara Sarjana Teknik Elektro Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

FHATUR ROHMAN

2007220029



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Fhatur Rohman

NPM : 2007220029

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Rugi-Rugi Daya (*Losses*) Transformator Distribusi 3500 kVA

Bidang Ilmu : Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 28 Oktober 2024

Mengetahui dan
Menyetujui:
Dosen Pembimbing



Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

Dosen Pembanding I



Partaonan Harahap, S.T., M.T

Dosen Pembanding II



Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T

Ketua Prodi Teknik Elektro



Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T

LEMBAR PERNYATAAN DAN PERSETUJUAN

Kami yang bertentangan di bawah ini menerangkan bahwa skripsi yang berjudul dibawah ini:

Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Rugi-Rugi Daya (Losses) Transformator Distribusi 3500 kVA

Ditulis oleh Mahasiswa/I yang bernama:

Fhatur Rohman (NPM: 2007220029)

Untuk kemudian disebut sebagai pihak ke-1

Adalah benar merupakan sebagian hasil dari penelitian dosen yang melibatkan mahasiswa pihak ke-1 dibawah ini:

Judul penelitian: Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Rugi-Rugi Daya (Losses) Transformator Distribusi 3500 kVA

Nama Dosen : Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.

Jenis Penelitian : Dikti, UMSU, Mandiri, Hibah lainnya. *(Coret yang tidak perlu)*

Nomor Kontrak :

Untuk kemudian disebut sebagai pihak ke-2

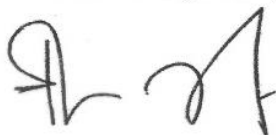
Untuk itu pihak ke-2 berhak mempublikasikan isi skripsi seluruhnya tanpa harus minta izin dari pihak ke-1 sedangkan pihak ke-1 wajib minta izin terlebih dahulu kepada pihak ke-2 bila ingin mempublikasikan isi skripsi ini.

Demikian surat pernyataan dan persetujuan ini dibuat dengan sebenarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun.

Medan, 28 Oktober 2024

Yang membuat pernyataan dan persetujuan

Pihak ke-2 (Dosen)



Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

Pihak ke-1 (Mahasiswa)



Fhatur Rohman

Diketahui oleh
Ketua Program Studi Teknik Elektro



Faisal Fatah Pasaribu, S.T., M.T.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Fhatur Rohman
NPM : 2007220029
Tempat/Tanggal Lahir : Medan, 30 Agustus 2002
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa Laporan Tugas Akhir Saya yang berjudul:

ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN TERHADAP ARUS NETRAL DAN RUGI-RUGI DAYA (LOSSES) TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 3500 KVA

Bukan merupakan plagiarisme, pencuri hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan Saya karena hubungan material maupun non material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir Saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, Saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/keserjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini Saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas Akademik di Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 28 Oktober 2024

Yang Menyatakan



FHATUR ROHMAN

2007220029

ABSTRAK

Ketidakseimbangan beban dalam sistem distribusi listrik merupakan salah satu aspek penting yang mempengaruhi kinerja transformator, terutama dalam konteks arus netral yang timbul serta rugi-rugi daya yang terjadi. Transformator distribusi memiliki peran penting dalam menyalurkan energi listrik dari jaringan utama ke konsumen akhir, dan efisiensinya sangat dipengaruhi oleh seberapa seimbang beban yang dialaminya. Jika beban tidak seimbang, maka arus netral akan meningkat, dan ini dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya pada transformator serta sistem distribusi secara keseluruhan. Oleh karena itu, memahami hubungan antara ketidakseimbangan beban, arus netral, dan rugi-rugi daya sangat penting untuk menjaga kinerja optimal transformator. Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dilakukan untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan rugi-rugi daya pada transformator distribusi. Hasil pengukuran beban selama beberapa bulan menunjukkan variasi yang signifikan. Beban tertinggi tercatat pada bulan Agustus dengan nilai 36,05%, di mana ketidakseimbangan beban mencapai 0,9967. Sementara itu, pada transformator distribus 3500 kVA rugi-rugi daya terkecil terjadi pada bulan Juni mencapai 0,000521 kW, pada bulan Juli 0,00063 kW, dan pada bulan Agustus sebesar 0,00062 kW . Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa dalam kondisi beban yang stabil, pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan rugi-rugi daya pada transformator distribusi cenderung minimal. Namun, meskipun nilai-nilai rugi-rugi daya relatif kecil, penting untuk tetap memantau keseimbangan beban secara berkala, terutama ketika terjadi peningkatan beban yang signifikan. Ketidakseimbangan yang tidak diatasi dalam jangka panjang dapat menyebabkan kerusakan lebih lanjut pada transformator dan meningkatkan biaya operasional sistem distribusi listrik.

Kata Kunci: Ketidakseimbangan Beban, Arus Netral, Rugi-Rugi Daya, Transformator Distribusi

ABSTRACT

Load imbalance in the electrical distribution system is one of the important aspects affecting transformer performance, especially in the context of neutral currents arising and power losses incurred. Distribution transformers have an important role in delivering electrical energy from the main network to the end consumer, and their efficiency is greatly affected by how balanced the load they experience is. If the load is unbalanced, then the neutral current will increase, and this can lead to increased power losses in the transformer as well as the distribution system as a whole. Therefore, understanding the relationship between load imbalance, neutral current, and power losses is critical to maintaining the optimal performance of the transformer. This research method using a quantitative approach was conducted to analyze the effect of load imbalance on neutral current and power loss in distribution transformers. The results of load measurements for several months show significant variations. The highest load was recorded in August with a value of 36.05%, where the load imbalance reached 0.9967. Meanwhile, at the 3500 kVA distribution transformer the smallest power losses occurred in June reaching 0.000521 kW, in July 0.00063 kW, and in August amounting to 0.00062 kW. From this study, it can be concluded that under stable load conditions, the effect of load imbalance on neutral currents and power losses in transformers of 3500 kVA.

Keywords: *Load Imbalance, Neutral Current, Power Loss, Distribution Transformer*

KATA PENGHANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala nikmat, rahmat, dan hidayah serta segala pertolongan dan kemudahan yang telah diberikan-Nya, sehingga peneliti dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar. Sholawat serta salam penulis sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW serta ucapan terimakasih kepada orang tua penulis sehingga dapat terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Rugi-Rugi Daya (*Losses*) Transformator Distribusi 3500kVA” disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Selesaiannya penyusunan Tugas Akhir ini juga tidak terlepas dari bimbingan, bantuan, arahan, motivasi, maupun fasilitas dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis sampaikan rasa hormat dan ucapan terima kasih setulusnya kepada:

1. Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dan studi di Fakultas Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Alm. Ibunda tercinta Erni Suryana, seseorang yang biasa saya sebut mamak. Alhamdulillah kini penulis sudah berada ditahap ini, menyelesaikan karya tulis sederhana ini sebagai perwujudan terakhir. Terimakasih sudah melahirkan, merawat dan membesarkan saya sampai sembilan belas tahun kita bersama dan atas doa-doa yang telah engkau panjatkan sampai saya bisa sekuat ini untuk tetap bertahan. Terimakasih sudah mengantarkan saya berada ditempat ini, walaupun pada akhirnya saya harus berjalan tertatih sendiri tanpa kau temani lagi.
3. Ayahanda tercinta Tahan Suherlan, seseorang yang darahnya mengalir dalam tubuh saya yang telah dengan sabar dan bangga membesarkan putri bungsunya serta telah melangkitkan doa- doa. Segala yang saya usahakan dan saya

perjuangkan semata untuk cinta pertama saya. Tidak henti saya bersyukur dan berterimakasih karnanya saya selalu bangkit dan tidak mengenal lelah. Terimakasih sudah merawat dan membesarkan saya dengan penuh cinta, selalu berjuang untuk hidup saya bekerja keras untuk keluarga hingga akhirnya saya bisa tumbuh dewasa dan berada di posisi saat ini.

4. Bapak Dr. Agussani, M.A.P, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., MT selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak Dr. Ade Faisal, M.sc, P.h.D., selaku Wakil Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T., MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara serta Dosen Penasihat Akademik yang telah banyak memberikan bimbingan dan arahan selama masa perkuliahan.
8. Ibu Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara serta Dosen Pembimbing Skripsi yang banyak meluangkan waktu dan pikirannya untuk memberikan bantuan dalam bentuk bimbingan arahan kepada penulis.
9. Bapak Partaonan Harahap, S.T., MT., selaku Dosen Pembanding I yang telah banyak memberikan motivasi dan masukan kepada penulis demi penyempurnaan penulisan tugas akhir ini.
10. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T., MT., selaku Dosen Pembanding II yang telah banyak memberikan motivasi dan masukan kepada penulis demi penyempurnaan penulisan tugas akhir ini.
11. Bapak/Ibu Staff Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah membantu penulis dalam administrasi selama masa perkuliahan.
12. Abangda Penulis Taufik Yuhelman, S.T serta Kakak Penulis Rara Maisura, A.Md., Nadya Suhayla, Tasya Salsabilla yang tidak pernah berhenti memberi

segala motivasi, doa yang terus di panjatkan, dan dukungan sehingga dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir ini dengan penuh semangat dan tekad yang sangat besar.

13. Abang dan Kakak ipar penulis, Syahrani Sembiring, Rapio Putra Gultom, Andhika Putra terimakasih banyak atas dukungannya secara moril maupun materil, terimakasih juga atas segala motivasi dan dukungannya yang diberikan kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan studinya sampai sarjana.
14. Kepada keponakan-keponakan tercinta Alisha Jihan Khaira, Athiyyah Dzahin Khanza, Nadhifa Almahyra, Rui Radhiyah br Gultom terimakasih atas kelucuan-kelucuan kalian yang membuat penulis semangat dan selalu membuat penulis senang, sehingga penulis semangat untuk mengerjakan tugas akhir ini sampai selesai.
15. Teman terbaik penulis, Firas Aufa, Ilham Nuari, Kevin Hilal Maulana, Nurul Ainun Rambe yang selalu memberikan semangat dalam proses penulisan Tugas Akhir ini.
16. Teman-teman seperjuangan stambuk 20 Jurusan Teknik Elektro yang tidak dapat disebut satu persatu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata, penulis mengharapkan skripsi ini dapat memberikan manfaat yang berguna bagi pengembangan ilmu Teknik Elektro di Indonesia, memberikan wawasan yang berguna untuk jurusan, fakultas, almamater dan bermnafaat bagi masyarakat.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Medan, 28 Oktober 2024

Penulis,

FHATUR ROHMAN
2007220029

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	ii
KATA PENGHANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Ruang Lingkup	2
1.4 Tujuan penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan	4
2.2 Landasan Teori	7
2.2.1 Transformator.....	7
2.2.2 Fungsi Transformator.....	8
2.2.3 Prinsip Kerja Transformator	8
2.2.4 Komponen Transformator.....	9
2.2.5 Jenis - jenis Transformator.....	13
2.2.6 Peralatan Bantu Transformator	20
2.2.7 Perawatan dan Pemantauan Transformator.....	22
2.2.8 Transformator 1 Phasa	23
2.2.9 Polaritas Trafo.....	24
2.2.10 Rangkaian Ekuivalen Transformator	25

2.2.11	Rugi-Rugi Transformator.....	26
2.2.12	Transformator 3 Phasa	30
2.2.13	Belitan Trafo	32
2.2.14	Transformator Tiga Fasa dengan Dua Kumparan.....	35
2.2.15	Transformator Pengukuran.....	36
2.2.16	Transformator Tegangan.....	37
2.2.17	Autotransformator	40
2.2.18	Batas Kesalahan Transformator Arus	42
2.2.19	Ketidakseimbangan Beban.....	44
2.2.20	Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang.....	50
2.2.21	Penyaluran dan Sudut Daya pada Keadaan Arus Seimbang.....	51
2.2.22	Segitiga Daya	54
2.2.23	Faktor Daya.....	55
2.2.24	Losses Pada Jaringan Distribusi.....	56
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		58
3.1	Tempat Penelitian.....	58
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	58
3.3	Jalannya Penelitian	59
3.4	Alur Penelitian.....	61
DAFTAR PUSTAKA		82

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Transformator.....	7
Gambar 2.2 Prinsip Kerja Transformator.....	9
Gambar 2.3 Kumparan Trafo	10
Gambar 2.4 Inti Besi Transformator	10
Gambar 2.5 Minyak dalam Tangki Trafo	11
Gambar 2.6 <i>Bushing</i> Trafo.....	12
Gambar 2.7 Tangki dan Konservator Transformator.....	13
Gambar 2.8 Lilitan Trafo Penaik Tegangan.....	14
Gambar 2.9 Lilitan Trafo Penurun Tegangan	14
Gambar 2.10 Trafo Pulsa	18
Gambar 2.11 Trafo Arus	19
Gambar 2.12 Trafo Tegangan	19
Gambar 2.13 Bagian Terpenting Transformator.....	23
Gambar 2.14 Polaritas Pengurangan (<i>subtractive</i>).....	25
Gambar 2. 15 Polaritas Penjumlahan (<i>additive</i>)	25
Gambar 2.16 Rangkaian Pengganti Transformator.....	26
Gambar 2.17 Rugi-rugi pada Trafo.....	27
Gambar 2.18 Rugi-rugi histerisis	27
Gambar 2.19 Karakteristik Rugi-rugi histerisis	28
Gambar 2.20 Rugi arus Eddy.....	29
Gambar 2.21 Inti besi utuh dan Inti besi berlapis	29
Gambar 2.22 Rugi Fluks Bocor	30
Gambar 2.23 Konstruksi Transformator Tiga Fasa Tipe Inti.....	31
Gambar 2.24 Transformator 3 Fasa Tipe Cangkang.....	31
Gambar 2.25 Trafo Hubungan Bintang Bintang (Y-Y) `.....	32
Gambar 2.26 Trafo Hubungan Delta Delta.....	33
Gambar 2.27 Trafo Hubungan Bintang Delta (Y- Δ).....	34
Gambar 2.28 Trafo Hubungan Delta Bintang (Δ -Y).....	34
Gambar 2.29 Trafo Hubungan Zig-Zag	35

Gambar 2.30 Trafo Hubungan open Delta/V-V	36
Gambar 2.31 Transformator Tegangan Magnetik.....	38
Gambar 2.32 Transformator Tegangan Kapasitip.....	39
Gambar 2.33 Rangkaian Sederhana Autotransformator dengan tap.....	40
Gambar 2.34 Rangkaian Ekuivalen Autotransformator.....	41
Gambar 2.35 Autotransformator Dengan Beberapa Titik Sadapan	41
Gambar 2.36 Titik Sadapan Autotrafo	42
Gambar 2.37 Vektor Diagram Arus Seimbang (a) dan Tak Seimbang (b).....	45
Gambar 2.38 Diagram Fasor Tegangan Saluran Daya Model Fasa Tunggal	52
Gambar 2.39 Segitiga Daya	55
Gambar 2.40 Arus Tertinggal Dari Tegangan Sebesar Sudut ϕ	56
Gambar 3.1 Spesifikasi Trafo Sesuai Dengan Nameplate	58
Gambar 3.2 Trafo 3500 kVA	59
Gambar 3.3 <i>Software</i> ABB	59
Gambar 3.4 <i>Flowchart</i> Peneliti	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Batas Kesalahan Dan Pergeseran Fasa Trafo Arus Untuk Pengukuran	43
Tabel 2.2 Batas Kesalahan Dan Pergeseran Fasa Untuk Aplikasi Khusus	44
Tabel 3.1 Spesifikasi Transformator Distribusi	58
Tabel 4.1 Hasil Pengumpulan Data Bulan Juni Pada Siang Dan Malam Hari	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.2 Hasil Pengumpulan Data Bulan Juli Pada Siang Dan Malam Hari	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.3 Hasil Pengumpulan Data Bulan Agustus Pada Siang Dan Malam Hari	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.4 Hasil Rata-rata Pengukuran Pada Bulan Juni	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.5 Hasil Rata-rata Pengukuran Pada Bulan Juli	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.6 Hasil Rata-Rata Pengukuran Bulan Agustus	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Beban Trafo Selama 3 Bulan	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.8 Hasil Analisa Rugi-Rugi Daya Trafo Selama 3 Bulan	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.9 Hasil Analisa Rugi-Rugi Daya Trafo Selama 3 Bulan	Error! Bookmark not defined.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan kebutuhan dasar yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari. Penggunaan listrik yang terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi dan pertumbuhan populasi menuntut adanya sistem distribusi listrik yang efisien dan andal. Transformator distribusi adalah komponen kunci dalam sistem distribusi listrik yang berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tingkat menengah ke tingkat yang sesuai untuk penggunaan konsumen akhir, baik di sektor rumah tangga, komersial, maupun industri.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Nugroho dkk, mengenai “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan *Losses* Pada Trafo Distribusi (Studi Kasus Pada PT. PLN (Persero) Rayon Katsura)” munculnya arus netral pada trafo merupakan akibat dari ketidakseimbangan pembebanan pada trafo distribusi. Arus netral yang mengalir pada netral trafo menyebabkan terjadinya rugi-rugi, yaitu rugi-rugi akibat adanya arus netral di penghantar netral trafo dan rugi-rugi akibat adanya arus grounding[1].

Tanamal dkk, pada penelitiannya besarnya daya yang diminta untuk kebutuhan energi listrik berbeda-beda, yang menyebabkan terjadinya pembagian beban tidak merata. Hal ini menyebabkan distribusi beban masing-masing fasa harus dijaga agar seimbang. Namun, pembebanan masing-masing fasa tidaklah selalu seimbang. Salah satu penyebabnya adalah banyaknya beban satu fasa yang beroperasi tidak merata[2].

Penelitian ini akan menggunakan metode kuantitatif untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan rugi-rugi daya transformator distribusi. Data sekunder akan dikumpulkan dari laporan operasional operator. Analisis statistik akan dilakukan untuk mengukur dampak ketidakseimbangan tersebut pada arus netral dan rugi-rugi daya. Data yang diperoleh akan dianalisis secara manual untuk menemukan hubungan kuantitatif antara

variabel-variabel tersebut. Metode ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan antara ketidakseimbangan beban dan performa transformator distribusi.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk merumuskan strategi pengelolaan beban yang lebih baik, seperti penyeimbangan beban secara aktif menggunakan peralatan elektronik atau perbaikan desain jaringan distribusi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap transformator distribusi, tetapi juga menawarkan solusi praktis untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi listrik. Oleh karena itu, judul penelitian ini adalah "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi Daya (*Losses*) Transformator Distribusi 3500kVA”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas tersebut, maka permasalahan pada penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana persentase ketidakseimbangan beban terhadap arus netral transformator distribusi 3500 kVA.
2. Bagaimana losses yang ditimbulkan karena ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi 3500 kVA.

1.3 Ruang Lingkup

Adapun hal-hal yang dibatasi (ruang lingkup) dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Penulis hanya melakukan pengukuran pembebanan trafo distribusi 3500 kVA.
2. Penulis menganalisa ketidakseimbangan beban pada trafo distribusi 3500 kVA.
3. Penulis hanya menganalisa *losses* arus netral pada penghantar netral trafo distribusi 3500 kVA.
4. Penulis tidak membahas jenis-jenis pembebanan.

1.4 Tujuan penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan tersebut, maka tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menganalisa persentase ketidakseimbangan beban terhadap arus netral pada trafo.
2. Untuk menganalisa besarnya losses yang ditimbulkan karena ketidakseimbangan beban pada trafo.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian sebagai berikut:

1. Memberikan informasi pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral.
2. Memberikan informasi *losses* yang ditimbulkan karena ketidakseimbangan beban.
3. Menambah wawasan dalam pengetahuan transformator.
4. Sebagai bahan acuan untuk mahasiswa Fakultas Teknik lainnya dalam mengetahui ketidakseimbangan dan *losses* pada trafo distribusi lainnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Kebutuhan energi listrik dari tahun ke tahun terus bertambah. Besarnya daya yang diminta pun berbeda- beda, yang menyebabkan terjadinya pembagian beban tidak merata. Hal ini menyebabkan distribusi beban masing-masing fasa harus dijaga agar seimbang. Namun, pembebanan masing-masing fasa tidaklah selalu seimbang. Salah satu penyebabnya adalah banyaknya beban satu fasa yang beroperasi tidak merata. Zainal Syahroni, dkk dalam penelitiannya yang dilakukan pada tahun 2019 didapatkan hasil ketidakseimbangan beban yang besar selisih arus antar fasa pada BUS 1 atau transformator BE 1438, fasa R ke S sebesar 38,4 A, S ke T sebesar 24,4 A dan R ke T sebesar 14,6 A, kemudian setelah dilakukan perhitungan, presentase Ketidakseimbangan beban terbesar dengan kode BE 1192 ketidakseimbangan beban mencapai 25.6 %, dan rugi-rugi daya sebesar 1.027 KW dengan presentase rugi-rugi sebesar 9.14%[3].

Pertumbuhan properti di Indonesia meningkat secara signifikan. Seiring dengan laju pertumbuhan pembangunan properti khususnya bangunan bertingkat maka dituntut adanya sarana dan prasarana yang mendukungnya seperti tersedianya tenaga listrik. Pada tahun 2020 Ruliyanto, dkk dalam penelitian menjelaskan setelah dianalisis, terjadi ketidakseimbangan beban pada Trafo 1 sebesar 5.23%, akan berakibat muncul arus netral IN sebesar 300 ampere, dan losses akibat arus netral IG yang mengalir ke tanah sebesar 0.15%. Kapasitas daya yang terpakai saat ini sebesar 84.65%[4]. Kemudian Ade Manu Gah pada penelitiannya tahun yang sama ketidakseimbangan beban tertinggi terdapat pada gardu KS 097 di pengukuran hari ke-6 dengan presentase 114 % pada kondisi siang hari. Gardu KS 031 memiliki ketidakseimbangan yang cukup baik (<20%) baik pada kondisi siang dan malam hari[5].

Penelitian yang dilakukan oleh Hendri Elnizar, dkk pada tahun 2021 yang bertujuan untuk mengetahui besarnya rugi rugi pada transformator setiap hari dalam

waktu satu bulan, serta menghitung persentase kenaikan losses terhadap perubahan arus beban normal ke arus beban puncak menunjukkan losses tertinggi pada trafo pada tanggal 11 Juli 2019, sebesar 16.245.884 kw. kemudian besar perubahan kenaikan arus normal ke beban puncak pada trafo 1, menyebabkan losses naik sebesar 3,66% dan besar perubahan kenaikan arus dari arus beban normal ke arus beban puncak pada trafo 2 menyebabkan losses naik sebesar 2,38%[6]. Kemudian I Gede Budiayasa, dkk dalam penelitiannya hasil pengukuran ketidakseimbangan beban saat siang hari sebesar 29,9 % dan 26,6 % serta ketidakseimbangan beban saat malam hari sebesar 62,6 % dan 31% seperti tabel 4.5 terlihat bahwa semakin besar arus netral IN yang mengalir di pengantar netral transformator maka semakin besar juga losses pada pengantar netral (PN)[7]. Pada tahun yang sama Julfikar Rumakat, dkk dalam publikasinya Ketidakseimbangan beban pada Gardu BGLLTR1033 Lateri 1 pada jam 18:15:34 waktu beban puncak sebesar 7,03% jika bersandar pada acuan/standar ketidakseimbangan yang dianjurkan PLN (SK ED PLN No.0017.E/DIR/2014) maka gardu ini berada pada kondisi baik yaitu <10%. Arus Netral yang didapat sebesar 23,105 A, Arus netral ini akan berpengaruh pada besarnya Rugi-Rugi Transformator maka dari nilai arus netral ini bisa diketahui nilai dari rugi- rugi pada transformator sebesar 396,110 Watt[8]. Faisal Irsan, dkk dalam penelitiannya pada tahun yang sama menunjukkan persentase ketidakseimbangan beban pada Trafo 200 KVA saat pengukuran siang hari sebesar 10%, sedangkan pada malam hari 12,67%. Adapun besarnya losses ketidakseimbangan pada trafo 200 KVA yang diakibatkan adanya arus netral dengan perhitungan data disiang hari yaitu 8,38 KW, malam harinya 10,38 KW. Sedangkan besarnya losses ketidakseimbangan pada trafo 200 KVA yang diakibatkan adanya arus netral yang mengalir ketanah dari data siang hari yaitu 15,32 KW, malam harinya 13,45 KW [9].

Meijar Dwi Putra, dkk dalam penelitiannya pada tahun 2022 diperoleh bahwa persentase ketidakseimbangan beban (UL) terbesar terjadi pada pukul 14:00 WIB untuk jurusan B pada pengukuran hari pertama yaitu sebesar 37,53% dengan nilai arus netral (IN) sebesar $47,87 < 153,11^\circ$ A dan persentase ketidakseimbangan beban (UL) terkecil terjadi pada pukul 14:00 WIB untuk jurusan A pada pengukuran hari

pertama yaitu sebesar 16,82% dengan nilai arus netral (IN) sebesar $16,46 < - 57,28$ °[10]. Kemudian Widiarto Hendro, dkk dalam publikasinya mendapatkan hasil pengukuran dan pengolahan data maka dilakukan analisis data dengan hasil analisis bahwa persentase ketidakseimbangan beban transformator A pada pengukuran tanggal 05 juli 2021 sampai dengan 11 juli 2021 sebesar 25.17 %, berada pada kriteria kurang. Transformator B pada pengukuran tanggal 28 juni 2021 sampai dengan 04 juli 2021 sebesar 25.73%, berada pada kriteria buruk. Transformator B pada pengukuran tanggal 04 september 2021 sampai dengan 10 juli 2021 sebesar 40.87 %, berada pada kriteria buruk[11].

Timoti Umpel, dkk dalam penelitiannya pada tahun 2023 menjelaskan bahwa ketidakseimbangan beban lebih besar pada malam hari, dengan presentase pembebanan 97,23%[12]. Pada tahun yang sama Ni Made dkk, dalam penelitiannya menunjukkan, setelah dilakukan perhitungan dan dianalisis dapat disimpulkan bahwa perhitungan rugi daya akibat arus netral.. Tarif WDP dan LWBP tertinggi adalah Penyulang Lumumba pada pukul 19:20 dengan WDP = Rp 6256.28 dan LWBP = Rp 6280.36. Nilai efisiensi terendah pada Penyulang Lumumba pada pukul 19:41 sebesar 80.9 %[13]. Viky Wijayanto dkk, dalam publikasinya didapatkan hasil yang menunjukan nilai rata-rata arus pembebanan dan ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi di Gardu Induk Buduran yaitu arus rata-rata pembebanan nya sebesar (14,4 A), Ketidakseimbangan Beban Sebesar (28,3 A), Losses Arus Netral sebesar (2,34 W). Dan Losses Tembaga sebesar (0,510945 kW)[14]. Kemudian Suriadi, dkk dalam publikasinya Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidakseimbangan beban pada penyulang Pasar Aceh menyebabkan rugi-rugi daya. Trafo Samping Pasar Aceh memiliki rugi-rugi daya sebesar 0,77% dengan ketidakseimbangan 16,33%, Trafo kedua di wilayah BNI 46 memiliki rugi-rugi daya sebesar 0,98% dengan ketidakseimbangan 30,33%, dan Trafo di wilayah BLKG KOTTY memiliki rugi-rugi daya sebesar 1,17% dengan ketidakseimbangan 50,33%. Temuan ini menegaskan bahwa semakin besar ketidakseimbangan beban, semakin tinggi pula rugi-rugi daya yang terjadi dalam jaringan distribusi tenaga listrik[15].

2.2 Landasan Teori

Landasan teori ini membentuk dasar pemahaman yang diperlukan untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Rugi-Rugi Daya (Losses) Transformator Distribusi 3500kVA.

2.2.1 Transformator

Transformator memiliki peran yang sangat penting dalam rangkaian listrik karena manfaatnya dalam mentransfer energi listrik. Transformator adalah komponen elektronik yang digunakan untuk mentransfer daya listrik antara dua atau lebih rangkaian listrik melalui induksi elektromagnetik.

Transfer daya listrik terjadi antara dua rangkaian listrik ketika kebutuhan listrik di antara keduanya berbeda. Perbedaan ini biasanya disebabkan oleh variasi tegangan arus listrik dalam suatu rangkaian. Oleh karena itu, transfer diperlukan untuk menyesuaikan impedansi antara sirkuit yang tidak sinkron dalam rangkaian listrik. Akhirnya, transfer daya listrik ini membantu menstabilkan tegangan listrik di antara dua atau lebih rangkaian. Oleh sebab itu, keberadaan transformator sangat penting untuk transfer daya listrik dalam rangkaian listrik[16],



Gambar 2.1 Transformator

2.2.2 Fungsi Transformator

Sebagai salah satu komponen elektronik yang cukup penting, transformator memiliki fungsi yang sangat penting. Salah satunya adalah memindahkan tenaga listrik antara dua buah rangkaian listrik. Biasanya pemindahan ini terjadi dalam sebuah frekuensi yang sama. Sehingga selain memindahkan tenaga listrik, transformator juga memiliki beberapa fungsi lainnya sebagai berikut:

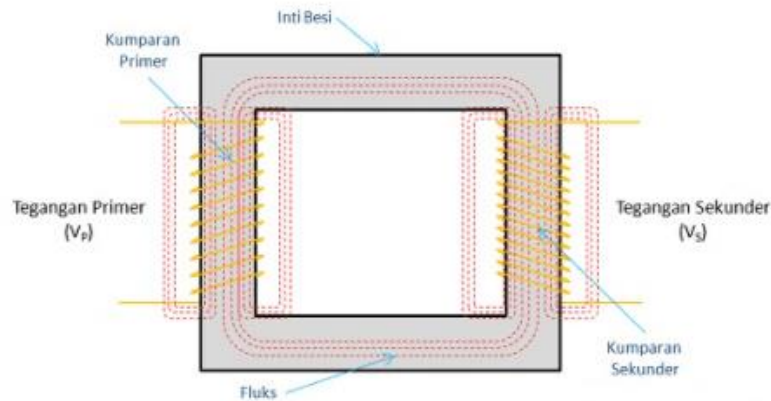
1. Transformator selain memiliki fungsi besar sebagai salah satu komponen elektronik, juga berfungsi dalam sebuah sistem komunikasi. Transformator seringkali digunakan untuk menentukan frekuensi radio dan juga video.
2. Selain digunakan untuk menentukan frekuensi radio, transformator juga seringkali digunakan untuk menaikkan tegangan listrik. Beberapa barang elektronik yang memanfaatkan transformator untuk menaikkan tegangan listrik adalah komputer, lemari es hingga televisi. Biasanya fungsi transformator ini lebih banyak dimiliki oleh transformator step-up. Jumlah lilitan sekundernya lebih banyak karena fungsinya untuk menaikkan tegangan.
3. Transformator juga banyak dimanfaatkan untuk menurunkan tegangan listrik. Biasanya transformator untuk menurunkan tegangan ini seringkali disebut transformator step-down. Jumlah lilitannya sekundernya lebih sedikit sementara lilitan primernya lebih banyak. Biasanya transformer step down seringkali digunakan saat Anda mengisi baterai ponsel atau saat Anda mengisi baterai.

2.2.3 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan Induksi elektromagnetik. Saat lilitan primer terhubung dengan arus AC biasanya akan menghasilkan perubahan arus listrik. Perubahan arus listrik yang terjadi akan berpengaruh pada medan magnet yang ada dan membuat inti besi semakin kuat. Nantinya inti besi ini akan mengantarkan perubahan pada lilitan sekunder. Kondisi ini menyebabkan adanya GGL induksi yang terjadi pada lilitan sekunder.

Proses ini seringkali disebut juga sebagai induksi bolak-balik dan cara kerjanya sama dengan induksi elektromagnetik. Di mana keduanya baik induksi bolak-balik

atau induksi magnetik juga memiliki penghubung magnetik antara lilitan primer dan sekunder.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Transformator

Menurut hukum Faraday, ketika arus induksi dilingkari oleh kurva tertutup, gaya listrik yang mengalir melaluinya akan persis sebanding dengan perubahan satuan waktu. Menurut hukum Lorenz, inti besi akan menjadi magnet akibat arus AC terperangkap di sekitarnya. Secara alami, jika magnet penuh dengan belitan, tegangan di ujung belitan akan berbeda. Transformer juga tunduk pada dua prinsip fisika terkenal ini, yang diperlukan untuk operasi yang tepat.

2.2.4 Komponen Transformator

Komponen transformator terdiri dari dua bagian, yaitu peralatan utama dan peralatan bantu. Peralatan utama transformator terdiri dari:

1. Kumparan Trafo

Kumparan trafo terdiri dari beberapa lilitan kawat tembaga yang dilapisi dengan bahan isolasi (karton, pertinax, dll) untuk mengisolasi baik terhadap inti besi maupun kumparan lain. Untuk trafo dengan daya besar lilitan dimasukkan dalam minyak trafo sebagai media pendingin. Banyaknya lilitan akan menentukan besar tegangan dan arus yang ada pada sisi sekunder. Kadang kala transformator memiliki kumparan tertier. Kumparan tertier diperlukan untuk memperoleh tegangan tertier atau untuk kebutuhan lain. Untuk kedua keperluan tersebut,

kumparan tertier selalu dihubungkan delta. Kumparan tertier sering juga untuk dipergunakan penyambungan peralatan bantu seperti *kondensator synchrone*, *kapasitor shunt*, dan *reactor shunt*.



Gambar 2.3 Kumparan Trafo

2. Inti Besi

Dibangun dari pelat feromagnetik tipis, berfungsi untuk memfasilitasi rute fluks yang dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir melalui koil. Selain itu, inti besi ini diisolasi untuk mengurangi panas yang dihasilkan arus eddy "*Eddy Current*" (sebagai rugi-rugi besi).



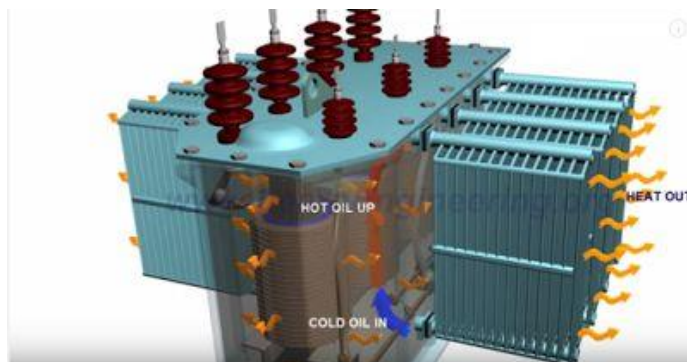
Gambar 2.4 Inti Besi Transformator

3. Minyak Trafo

Salah satu bahan isolasi cair yang digunakan dalam transformator untuk pendinginan dan isolasi adalah minyak transformator. Bahan tertentu yang digunakan untuk isolasi minyak harus mampu menahan tegangan tinggi saat berfungsi sebagai refrigeran. Agar minyak transformator melindungi transformator dari gangguan, ia juga harus dapat menurunkan jumlah panas yang dihasilkannya. Minyak transformator mempunyai unsur atau senyawa hidrokarbon yang terkandung dalam minyak transformator ini adalah:

- 1) Senyawa hidrokarbon parafinik.
- 2) Senyawa hidrokarbon naftenik.
- 3) Senyawa hidrokarbon aromatik.

Selain ketiga senyawa di atas minyak transformator masih mengandung senyawa yang disebut zat aditif meskipun kandungannya sangat kecil. Kenaikan suhu pada transformator akan menyebabkan terjadinya proses hidrokarbon pada minyak, nilai tegangan tembus dan kerapatan arus konduksi merupakan beberapa indikator atau variabel yang digunakan untuk mengetahui apakah suatu minyak transformator memiliki ketahanan listrik yang memahami persyaratan yang berlaku.



Gambar 2.5 Minyak dalam Tangki Trafo

Pada power transformator, terutama yang berkapasitas besar, kumparan-kumparan dan inti besi transformator direndam dalam minyak trafo. Syarat suatu cairan bisa dijadikan minyak trafo adalah sebagai berikut:

- 1) Ketahanan isolasi harus tinggi ($>10\text{kV/mm}$).

- 2) Berat jenis harus kecil sehingga partikel-partikel *inert* di dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- 3) Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersikulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
- 4) Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan.
- 5) Tidak merusak bahan isolasi padat.
- 6) Sifat kimia yang stabil.

4. *Bushing*

Bushing trafo adalah komponen isolator listrik yang digunakan pada transformator untuk memungkinkan konduksi arus listrik masuk dan keluar dari tangki transformator tanpa menyebabkan kebocoran arus atau gangguan isolasi. Fungsi utamanya adalah menyediakan isolasi antara konduktor listrik yang membawa arus tinggi dan tangki transformator yang di-ground-kan, memastikan koneksi listrik yang aman dan efektif dari kumparan transformator ke sistem eksternal, serta menahan tegangan tinggi untuk mencegah pelepasan listrik atau *flashover*. Dengan demikian, *bushing* memastikan operasi transformator yang aman dan andal dalam berbagai aplikasi tegangan menengah hingga tinggi.



Gambar 2.6 *Bushing* Trafo

5. Tangki dan Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo ditempatkan di dalam tangki baja. Tangki trafo-trafo distribusi umumnya dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin (*cooling fin*) yang berfungsi memperluas permukaan dinding tangki sehingga penyaluran panas minyak pada saat konveksi menjadi semakin baik dan efektif untuk menampung pemuaiannya minyak trafo, tangki dilengkapi dengan konservator.



Gambar 2.7 Tangki dan Konservator Transformator

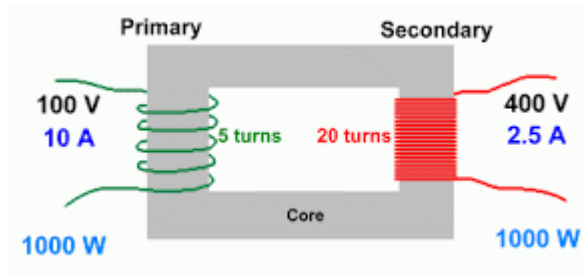
2.2.5 Jenis - jenis Transformator

Transformator dibedakan berdasarkan berbagai kriteria seperti fungsinya, konstruksinya, dan aplikasi spesifiknya dan lainnya.

1. *Transformator Step-up* (Penaik Tegangan)

Transformator step-up adalah perangkat listrik yang dirancang untuk meningkatkan tegangan listrik dari level yang lebih rendah ke level yang lebih tinggi sambil menurunkan arus, sesuai dengan hukum konservasi energi. Alat ini terdiri dari dua kumparan kawat tembaga, yaitu kumparan primer dengan jumlah lilitan yang lebih sedikit dan kumparan sekunder dengan jumlah lilitan yang lebih banyak, yang dililitkan pada inti besi yang sama. Ketika arus bolak-balik (AC) mengalir melalui kumparan primer, medan magnet yang berubah-ubah dihasilkan di sekitar inti besi. Medan magnet ini kemudian memicu arus induksi di kumparan sekunder, menghasilkan tegangan yang lebih tinggi. Transformator

step-up banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti distribusi daya listrik untuk mentransmisikan listrik jarak jauh dengan efisiensi tinggi dan peralatan elektronik yang memerlukan tegangan kerja lebih tinggi dari sumber daya aslinya.

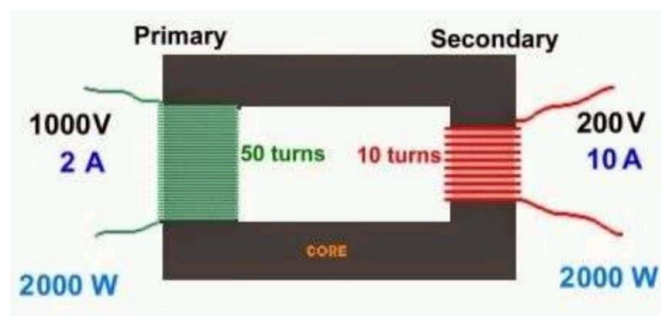


Gambar 2.8 Lilitan Trafo Penaik Tegangan

Pada trafo *step-up*, lilitan primer (NP) dibuat lebih sedikit dibandingkan dengan lilitan sekunder (NS) ($N_P < N_S$) agar dapat terjadi kenaikan tegangan. Tegangan primer selalu lebih kecil dari tegangan sekunder, ($V_p < V_s$) dan kuat arus primer selalu lebih besar dari kuat arus sekunder ($I_p > I_s$).

2. Transformator 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 2.9 Lilitan Trafo Penurun Tegangan

Transformator step-down adalah jenis transformator yang berfungsi untuk menurunkan tegangan induksi. Sesuai tujuannya, jumlah lilitan kumparan

sekunder pada transformator ini dibuat lebih sedikit daripada jumlah lilitan pada kumparan primer. Transformator ini banyak digunakan pada radio, tape recorder, dan komputer. Secara bersamaan, kedua transformator ini digunakan pada penyaluran listrik dari pembangkit listrik menuju pelanggan. Pembangkit listrik yang biasanya terletak cukup jauh dari tempat pelanggan, dapat kehilangan energi yang cukup banyak pada proses penyalurannya. Faktor utama penyebabnya adalah tegangan dan arus yang dihasilkan generator relatif kecil. Untuk itu, dalam jarak yang cukup dekat dari sumber pembangkit listrik, digunakan transformator step-up sehingga tegangan akan membesar dan energi yang hilang selama penyaluran listrik akan lebih kecil. Sebelum sampai ke pelanggan, tegangan tinggi yang berbahaya ini kemudian diturunkan lagi menggunakan transformator step-down yang biasa tersimpan pada tiang listrik di dekat rumah pelanggan. Selain dapat meminimalisasi kehilangan energi, pemanfaatan transformator ini pun berfungsi untuk menjaga keamanan dan keselamatan pelanggan dari bahaya tegangan tinggi.

3. Autotransformator

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

4. 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 untu

mengompensasi kerugian. Transformator seperti ini berfungsi sebagai isolasi antara dua kalang. Untuk penerapan audio, transformator jenis ini telah banyak digantikan oleh kopling kapasitor.

5. Transformator Distribusi

Transformator distribusi adalah jenis transformator yang digunakan dalam jaringan distribusi listrik untuk menurunkan tegangan dari tingkat menengah, biasanya antara 11 kV dan 33 kV, ke tingkat tegangan yang lebih rendah yang aman dan sesuai untuk digunakan oleh konsumen akhir, seperti 220 V atau 440 V. Perangkat ini biasanya dipasang pada tiang listrik, di gardu distribusi, atau di sekitar area pemukiman dan industri. Fungsi utamanya adalah memastikan bahwa listrik yang ditransmisikan dari gardu induk dapat didistribusikan dengan aman dan efisien ke rumah, bangunan komersial, dan fasilitas industri. Transformator distribusi dirancang untuk beroperasi secara terus-menerus dengan efisiensi tinggi dan memiliki kemampuan menangani beban puncak serta kondisi lingkungan yang bervariasi.

6. Transformator Instrumentasi

Transformator instrumentasi adalah jenis transformator khusus yang digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk tujuan pengukuran dan proteksi. Terdapat dua tipe utama: *Current Transformer* (CT) dan *Voltage Transformer* (VT) atau *Potential Transformer* (PT). *Current Transformer* (CT) berfungsi untuk mengukur arus listrik dengan mengubah arus yang besar menjadi arus yang lebih kecil dan aman untuk perangkat pengukuran dan proteksi, seperti relai dan meteran. *Voltage Transformer* (VT) mengurangi tegangan tinggi menjadi tegangan rendah yang dapat diukur dengan aman oleh peralatan pengukuran standar. Transformator instrumentasi memungkinkan pemantauan yang akurat dan aman terhadap parameter listrik dalam sistem tenaga, memastikan operasi yang efisien dan respons yang tepat terhadap kondisi abnormal, seperti gangguan atau *overloading*. Mereka adalah komponen krusial dalam jaringan listrik, memberikan data yang diperlukan untuk pengendalian dan perlindungan sistem listrik.

7. Transformator Daya

Transformator daya adalah jenis transformator berukuran besar yang digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk mengubah tegangan pada tingkat yang sangat tinggi antara pembangkit listrik dan jaringan transmisi atau antara jaringan transmisi dan distribusi. Mereka biasanya beroperasi pada tegangan di atas 33 kV dan memiliki kapasitas daya yang sangat besar, sering kali dalam kisaran ratusan hingga ribuan MVA (Mega Volt Ampere). Fungsi utama transformator daya adalah untuk meningkatkan tegangan listrik (*step-up*) di pembangkit listrik untuk transmisi jarak jauh atau menurunkan tegangan (*step-down*) di gardu induk untuk distribusi regional. Dengan meningkatkan tegangan, mereka mengurangi rugi-rugi daya selama transmisi, dan dengan menurunkan tegangan, mereka memastikan keamanan dan efisiensi distribusi listrik ke konsumen akhir. Transformator daya dirancang untuk efisiensi tinggi, keandalan jangka panjang, dan kemampuan menangani beban puncak, serta dilengkapi dengan sistem pendingin, biasanya berupa minyak transformator, untuk menjaga suhu operasional dalam batas yang aman.

8. Transformator Pulsa

Transformator pulsa merupakan komponen kritis dalam dunia elektronik modern yang memfasilitasi transfer energi listrik dalam bentuk sinyal berfrekuensi tinggi dengan respon cepat. Desainnya menggunakan inti magnetik khusus, seringkali terbuat dari bahan ferit, yang mampu menangani frekuensi tinggi dan mengurangi kerugian daya seperti histeresis dan arus eddy. Kumputan primer dan sekunder pada transformator ini dirancang dengan jumlah lilitan yang tepat, dengan isolasi galvanik yang kuat untuk melindungi perangkat dan pengguna dari tegangan tinggi. Aplikasi transformator pulsa sangat beragam, mulai dari komunikasi data berkecepatan tinggi hingga sistem pengapian mesin dalam kendaraan bermotor. Dalam komunikasi data, transformator pulsa digunakan untuk mentransfer sinyal digital tanpa distorsi, sedangkan dalam sistem pengapian, transformator ini membantu dalam menghasilkan loncatan tegangan tinggi yang diperlukan untuk menciptakan percikan api yang kuat. Selain itu,

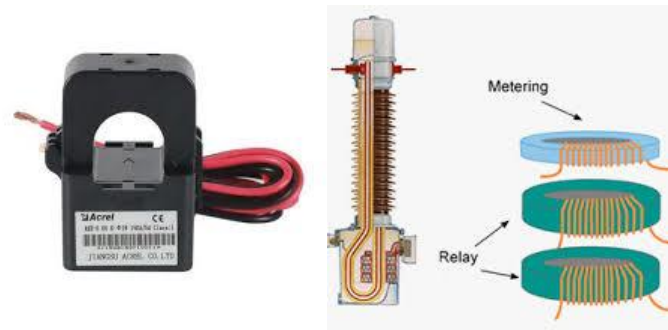
dalam aplikasi pemrosesan sinyal seperti pada osiloskop, transformator pulsa memainkan peran penting dalam memindahkan dan mengisolasi sinyal dengan akurasi tinggi. Dengan desain yang dioptimalkan untuk transfer energi pada frekuensi tinggi dan respons yang cepat, transformator pulsa memberikan kontribusi besar dalam kemajuan teknologi modern dengan efisiensi tinggi dan performa yang handal.



Gambar 2.10 Trafo Pulsa

9. Transformator Arus

Current transformer sebenarnya adalah suatu toroida. Lilitan primer dari suatu current transformer biasanya berupa suatu bushing stem atau satu kabel yang berasal dari suatu alat objek yang hendak diindra oleh current transformer, lalu sisi lilitan sekunder diumpankan pada satu amperemeter atau digunakan untuk keperluan proteksi. *Current transformer* (CT) atau disebut dengan trafo arus adalah komponen instrumentasi dalam peralatan listrik. Komponen instrumen ini mampu mentransformasikan arus yang besar menjadi arus kecil yang mana arus yang kecil ini digunakan untuk keperluan proteksi dan metering pengukuran rangkaian peralatan-peralatan listrik yang saling terhubung. Atau dengan tujuan lain dapat dikatakan trafo arus digunakan untuk isolasi antara sisi tegangan yang diukur/sekunder dengan peralatan pengukuran yang digunakan.



Gambar 2.11 Trafo Arus

10. Transformator Tegangan

Trafo tegangan adalah trafo satu fasa step-down yang mentransformasi tegangan tinggi atau tegangan menengah ke suatu tegangan rendah yang layak untuk perlengkapan indikator, alat ukur, relay, dan alat sinkronisasi. Hal ini dilakukan atas pertimbangan harga dan bahaya yang dapat ditimbulkan tegangan tinggi. Tegangan perlengkapan seperti indikator, meter, dan relay dirancang sama dengan tegangan terminal sekunder trafo tegangan.



Gambar 2.12 Trafo Tegangan

Prinsip kerja trafo jenis ini sama dengan trafo daya, meskipun demikian rancangannya berbeda dalam beberapa hal, yaitu:

1. Kapasitasnya kecil (10 s/d 150 VA), karena digunakan untuk daya yang kecil.

2. Galat faktor transformasi dan sudut fasa tegangan primer dan sekunder lebih kecil untuk mengurangi kesalahan pengukuran.
3. Salah satu terminal pada sisi tegangan tinggi dibumikan/ditanahkan.
4. Tegangan pengenal sekunder biasanya 100 atau $100\sqrt{3}$.

2.2.6 Peralatan Bantu Transformator

Adapun peralatan bantu transformator terdiri dari:

1. Peralatan Pendingin; pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi di dalam trafo maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut trafo perlu dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar trafo. Media yang digunakan pada sistem pendingin dapat berupa: udara/gas, minyak dan air.
2. Peralatan Pendingin; pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi di dalam trafo maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut trafo perlu dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar trafo. Media yang digunakan pada sistem pendingin dapat berupa: udara/gas, minyak dan air.
3. Peralatan Proteksi; peralatan yang mengamankan trafo terhadap bahaya fisis, listrik maupun kimiawi. Yang termasuk peralatan proteksi transformator antara lain sebagai berikut:
 - a. Rele Bucholz, yaitu peralatan rele yang dapat mendeteksi dan mengamankan terhadap gangguan di dalam trafo yang menimbulkan gas. Di dalam transformator, gas mungkin dapat timbul akibat hubung singkat antarlilitan (dalam fasa/ antarfasa), hubung singkat antarfasa ke tanah, busur listrik antarlaminasi atau busur listrik yang ditimbulkan karena terjadinya kontak yang kurang baik.

- b. Rele tekanan lebih; peralatan rele yang dapat mendeteksi gangguan pada transformator bila terjadi kenaikan tekanan gas secara tiba-tiba dan langsung mentripkan CB pada sisi upstream-nya.
- c. Rele diferensial; rele yang dapat mendeteksi terhadap gangguan transformator apabila terjadi flash over antara kumparan dengan kumparan, kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun antarkumparan.
- d. Rele beban lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan trafo terhadap beban yang berlebihan dengan menggunakan sirkit simulator yang dapat mendeteksi lilitan trafo yang kemudian apabila terjadi gangguan akan membunyikan alarm pada tahap pertama dan kemudian akan menjatuhkan PMT.
- e. Rele arus lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan hubungan singkat antarfasa di dalam maupun di luar daerah pengaman trafo, juga diharapkan rele ini mempunyai sifat komplementer dengan rele beban lebih. rele ini juga berfungsi sebagai cadangan bagi pengaman instalasi lainnya. Arus berlebih dapat terjadi karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.
- f. Rele fluks lebih; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dengan mendeteksi besaran fluksi atau perbandingan tegangan dan frekuensi.
- g. Rele tangki tanah; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.
- h. Rele gangguan tanah terbatas; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator terhadap gangguan tanah di dalam daerah pengaman transformator khususnya untuk gangguan di dekat titik netral yang tidak dapat dirasakan oleh rele diferensial.

- i. Rele termis; rele ini berfungsi untuk mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan oleh arus lebih. Besaran yang diukur di dalam rele ini adalah kenaikan temperatur.
- 4. Peralatan Pernapasan (*Dehydrating Breather*); ventilasi udara yang berupa saringan silika gel yang akan menyerap uap air. Karena pengaruh naik turunnya beban trafo maupun suhu udara luar maka suhu minyak pun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari dalam tangki, sebaliknya bila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk ke dalam tangki. Kedua proses di atas disebut pernapasan trafo. Permukaan minyak trafo akan selalu bersinggungan dengan udara luar yang menurunkan nilai tegangan tembus minyak trafo maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi tabung berisi kristal zat higroskopis.
- 5. Indikator, untuk mengawasi selama transformator beroperasi maka perlu adanya indikator pada transformator yang antara lain sebagai berikut:
 - a. Indikator suhu minyak.
 - b. Indikator permukaan minyak.
 - c. Indikator pendingin.
 - d. indikator kedudukan tap.

2.2.7 Perawatan dan Pemantauan Transformator

Dengan melakukan perawatan secara berkala dan pemantauan kondisi transformator pada saat beroperasi akan banyak keuntungan yang didapat, antara lain:

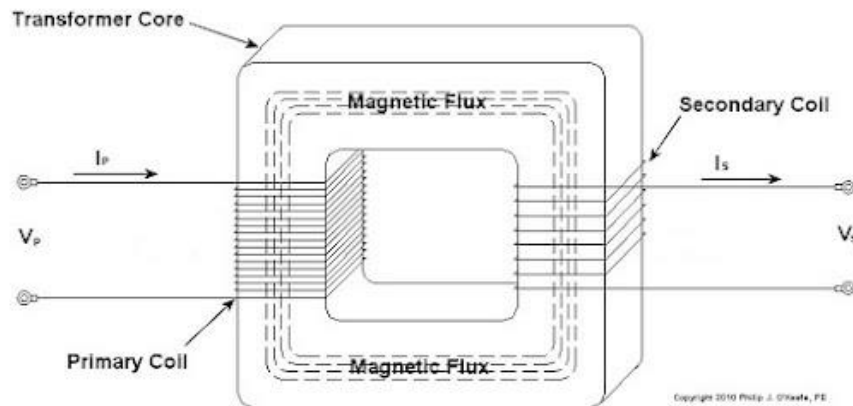
1. Meningkatkan keandalan dari transformator tersebut.
2. Memperpanjang masa pakai.
3. Jika masa pakai lebih panjang maka secara otomatis akan dapat menghemat biaya pengganti unit transformator.

Adapun langkah-langkah perawatan dari transformator, antara lain adalah:

1. Pemeriksaan berkala kualitas minyak isolasi.
2. Pemeriksaan/pengamatan berkala secara langsung (*Visual Inspection*).
3. Pemeriksaan-pemeriksaan secara teliti (*overhauls*).

2.2.8 Transformator 1 Phasa

Transformator adalah suatu alat untuk memindahkan daya listrik dari suatu rangkaian ke rangkaian yang lainnya secara induksi elektromagnetik. Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama.



Gambar 2.13 Bagian Terpenting Transformator

Prinsip kerja transformator terdapat dua macam keadaan, yaitu:

1. Transformator Tanpa Beban

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan sumber (yang sinusoid) maka akan mengalir arus bolak-balik (I_o) pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan punya inti, arus (I_o) menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya. Akibat adanya fluks magnet yang juga berubah-ubah, pada kumparan akan timbul gaya gerak listrik (GGL) induksi. Besarnya GGL induksi yang dibangkitkan sesuai dengan hukum Faraday.

2. Arus Penguat

Arus primer I_0 yang mengalir pada saat kumparan sekunder yang tidak dibebani disebut arus penguat. Dalam kenyataannya arus primer I_0 bukanlah merupakan arus induktif murni sehingga ia terdiri atas dua komponen.

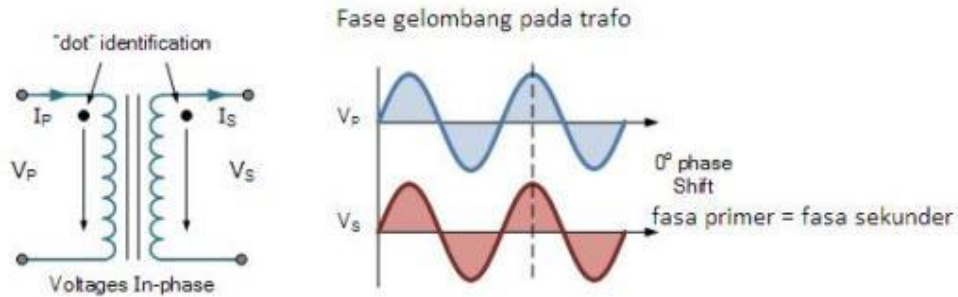
- Komponen arus pemagnetan I_M , yang menghasilkan fluks (ϕ). Karena sifat besi yang non linear (ingat kurva B-H) maka arus pemagnetan I_M dan juga fluks (ϕ) dalam kenyataannya tidak berbentuk sinusoidal.
- Komponen arus rugi tembaga I_c , menyatakan daya yang hilang akibat adanya rugi histerisis dan arus 'Eddy'. I_c sefasa dengan V dengan demikian hasil perkalian ($I_c \times V$) merupakan daya (watt) yang hilang.

2.2.9 Polaritas Trafo

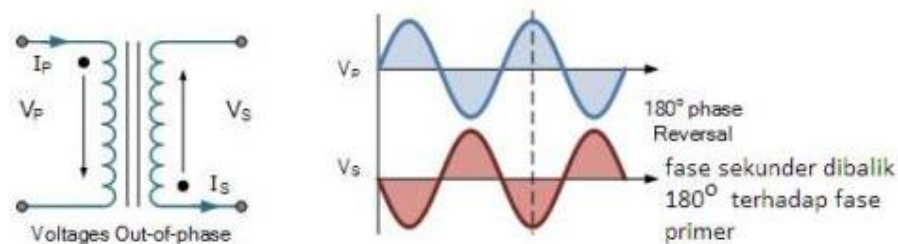
Masing-masing ujung primer dari suatu transformator satu fasa polaritasnya selalu bergantian pada waktu bekerja karena merupakan tegangan AC. Hal ini sama juga terjadi pada kumparan sekunder. Polaritas perlu diketahui untuk membuat sambungan-sambungan pada transformator. Polaritas dari suatu transformator ditentukan oleh arah lilitannya. Untuk menentukan polaritas transformator (arah lilitan) bisa kita peroleh dari tes polaritas.

Fungsi dari polaritas transformator sendiri adalah sebagai penentuan kutub-kutub positif atau negatif pada transformator, untuk menentukan kumparan-kumparan primer atau sekunder dan untuk menghubungkan transformator biasa menjadi autotransformator. Selain itu, polaritas trafo juga sangat penting untuk diketahui jika kita akan memaralelkan trafo (untuk meningkatkan daya trafo) ataupun menyerikan trafo (untuk meningkatkan tegangan trafo).

Menurut *American Standards Association (ASA)*, pada bagian tegangan tinggi diberi tanda H1, H2, H3 dan seterusnya. Sedangkan pada kumparan tegangan rendah diberi nama X1, X2, X3 dan seterusnya. Untuk polaritas pengukuran, letak X1 berdekatan dengan H1 dan untuk polaritas penjumlahan, letak X1 berseberangan dengan H1.



Gambar 2.14 Polaritas Pengurangan (*subtractive*)

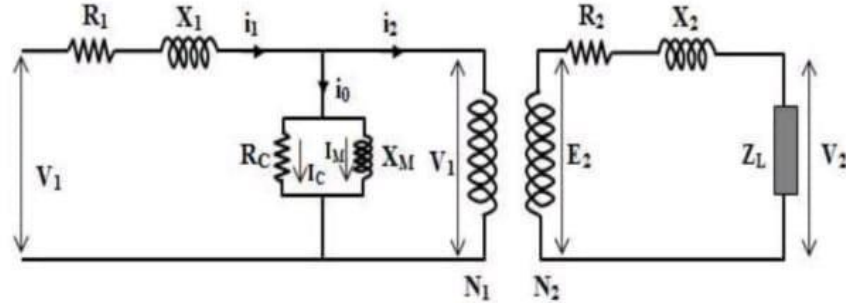


Gambar 2. 15 Polaritas Penjumlahan (*additive*)

2.2.10 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Transformator terdiri atas sisi primer dan sisi sekunder. Keduanya terhubung dengan inti besi. Dalam kondisi ideal, tanpa rugi-rugi, perbandingan lilitan antara keduanya merupakan perbandingan tegangan antara kedua sisinya.

Namun pada kenyataannya, daya masukan tidak pernah sama dengan daya keluaran. Terdapat rugi-rugi yang terjadi di inti besi dan lilitan. Rugi-rugi tersebut terjadi akibat histerisis, arus Eddy, resistansi belitan dan fluks bocor. Untuk mempermudah analisis dalam pengujian, rangkaian primer dan sekunder dibuat menjadi sebuah rangkaian yang disebut rangkaian ekuivalen. Pada rangkaian ini rugi tembaga pada sisi sekunder diubah menjadi nilai ekuivalennya dan dapat dilihat dari arah sisi primer ataupun dari arah sisi sekunder.

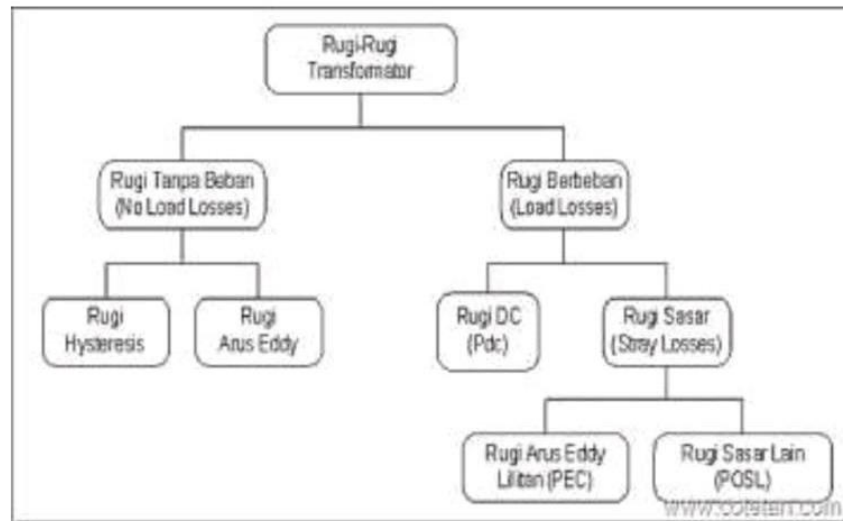


Gambar 2.16 Rangkaian Pengganti Transformator

2.2.11 Rugi-Rugi Transformator

Pada transformator tidak terdapat bagian-bagian yang bergerak atau berputar dari suatu transformator maka transformator tidak memiliki rugi-rugi gesekan. Oleh karenanya sebagian besar transformator memiliki efisiensi 90%. Meskipun demikian, terdapat juga rugi-rugi yang muncul pada transformator yang secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok rugi-rugi utama rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi besi. Rugi-rugi tembaga terjadi karena resistansi dalam belitan, rugi-rugi ini akan berbanding lurus dengan besarnya beban sehingga meningkatkan arus beban akan meningkatkan rugi-rugi tembaga. Rugi-rugi besari terdiri dari dua yaitu rugi-rugi histerisis dan rugi-rugi arus Eddy (*Eddy Current*).

Rugi pada trafo timbul dari 2 sisi primer dan sisi sekunder. Beberapa komponen penyebab rugi-rugi pada trafo yaitu rugi besi (hysterisis dan Eddy Current), flux bocor dan rugi tembaga. Besarnya rugi-rugi histerisis bergantung pada jenis besi yang digunakan untuk inti transformator. Dengan demikian, dalam praktiknya pemilihan bahan inti harus dipertimbangkan dengan baik untuk menghindari rugi-rugi histerisis yang terlalu besar. Seperti telah disebutkan sebelumnya, transformator hanya bekerja untuk suplai tegangan bolak-balik. Jadi, arus yang digunakan untuk membangkitkan fluks inti akan berubah terus menerus dari nilai positif ke nilai negatif.

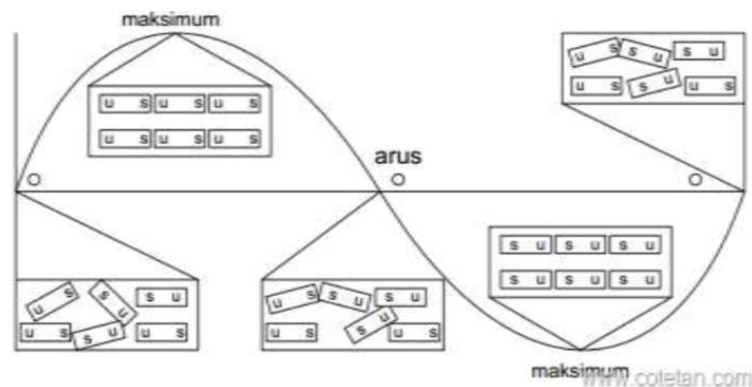


Gambar 2.17 Rugi-rugi pada Trafo

2. Rugi Histeresis

Setiap saat terjadinya pembalikan arus akan terjadi pula pembalikan fluks magnetik. Akibat dari terjadinya fluks yang dibangkitkan kemudian runtuh secara berulang-ulang didalam inti transformator inilah yang akan menimbulkan rugi-rugi histerisis.

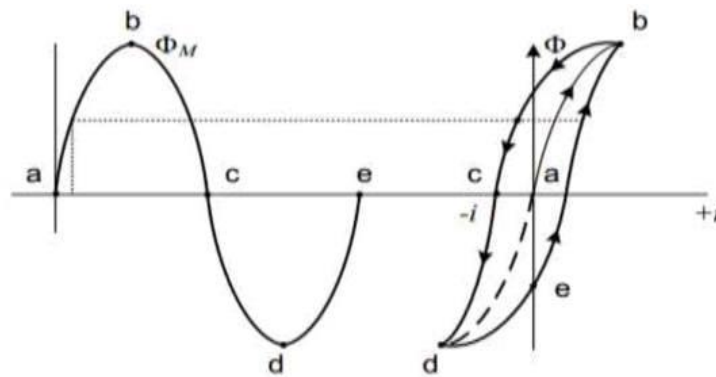
Rugi Hysteresis



Gambar 2.18 Rugi-rugi histerisis

Gambar di atas memperlihatkan inti besi saat mulai menjadi magnet, molekul-molekul digerakkan ke arah medan magnet. Akan tetapi pada saat medan magnet turun menjadi nol, molekul-molekul tersebut tidak kembali pada posisi acak semula mereka. Akibatnya meskipun gaya pemagnetan telah turun

menjadi nol, inti besi tersebut masih menjadi magnet. Medan magnet tersebut harus memutar arah dan menggunakan suatu gaya pemagnetan pada arah yang berlawanan sebelum inti besi tersebut kembali pada keadaan tanpa pengaruh pemagnetan. Molekul-molekul tersebut kemudian akan berbalik dan magnet menyesuaikan pada arah medan magnet yang baru. Gaya magnet yang tertinggal pada molekul-molekul tersebut dinamakan histerisis. Energi harus disuplai untuk memutar arah sehingga mengakibatkan molekul-molekul tersebut bergabung dengan medan magnet, hal ini dinamakan rugi-rugo histerisis inti besi. Semakin banyak tenaga yang dibutuhkan, kerugian histerisis juga akan semakin besar.



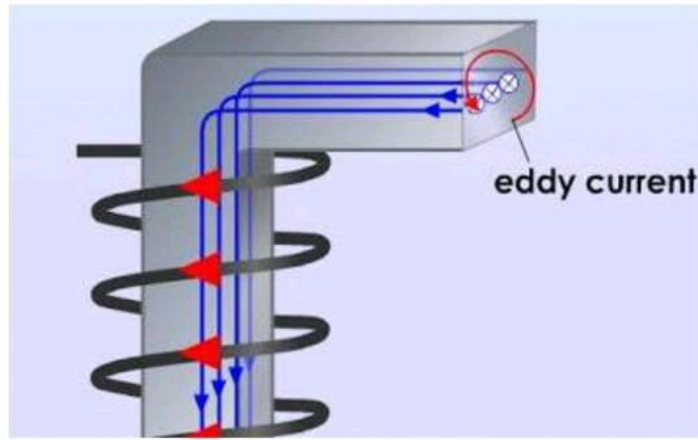
Gambar 2.19 Karakteristik Rugi-rugi histerisis

Dari gambar di atas, diasumsikan titik a sebagai fluks di inti dan dimulai dari nol. Ketika arus naik maka fluks menjadi ab. Ketika arus turun kembali maka fluks akan berubah mengikuti arus dengan arah yang berbeda dari sebelumnya. Maka fluks menjadi bcd, ketika arus naik kembali fluks menjadi deb. Perhatikan dari gambar di bawah bahwa arah fluks tidak selalu bergantung pada arus yang mengalir dari lilitan ke inti, tetapi juga dipengaruhi oleh keadaan sebelumnya dari fluks di inti besi. Keadaan fluks terdahulu dan gagalnya fluks untuk kembali ke keadaan semula disebut histerisis.

3. Rugi Arus Eddy

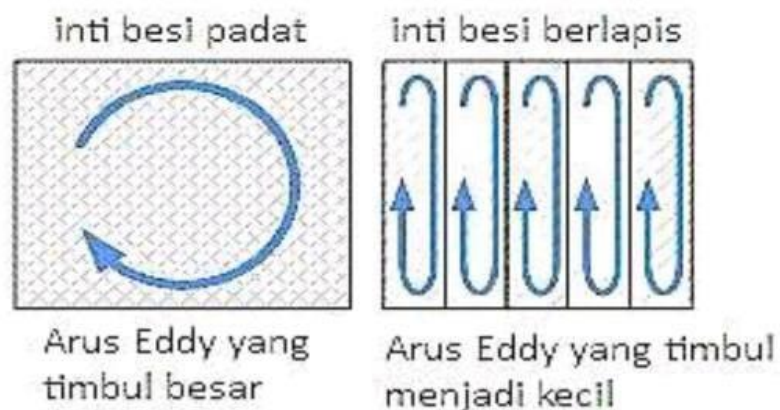
Rugi arus Eddy adalah rugi yang disebabkan oleh arus pusar pada inti besi. Inti besi transformator merupakan suatu penghantar maka medan magnet pada

inti besi tersebut akan menginduksikan tegangan pada inti. Tegangan inilah yang kemudian menimbulkan arus kecil pada inti besi.



Gambar 2.20 Rugi arus Eddy

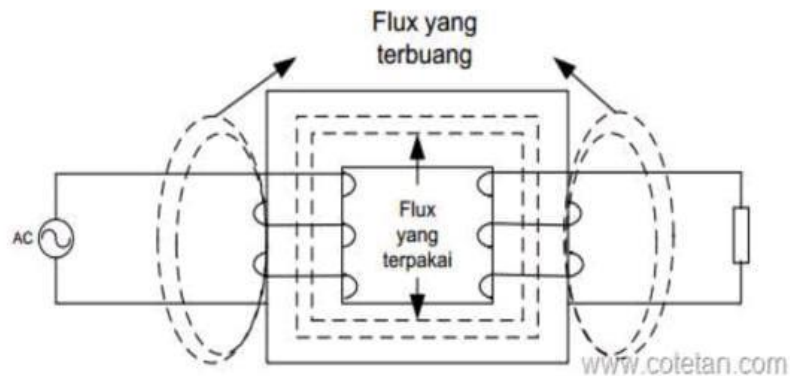
Eddy Current dapat menyebabkan kerugian daya pada sebuah trafo karena pada saat terjadi induksi arus listrik pada inti besi maka sejumlah energi listrik akan diubah menjadi panas. Ini merupakan kerugian. Untuk mengurangi arus Eddy maka inti besi trafo dibuat berlapis-lapis, tujuannya untuk memecah induksi arus Eddy yang terbentuk di dalam inti besi. Perbedaan induksi arus Eddy di dalam inti besi tunggal dengan inti besi berlapis dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 2.21 Inti besi utuh dan Inti besi berlapis

4. Rugi Fluks Bocor

Rugi ini dihasilkan dari medan magnet yang dikarenakan tidak semua garis-garis fluks yang ditimbulkan oleh lilitan primer dan sekunder mengalir melalui inti besi. Beberapa garis fluks mengalir keluar dari lilitan masuk ke udara dan tidak bertaut dengan lilitan primer dan lilitan sekunder.



Gambar 2.22 Rugi Fluks Bocor

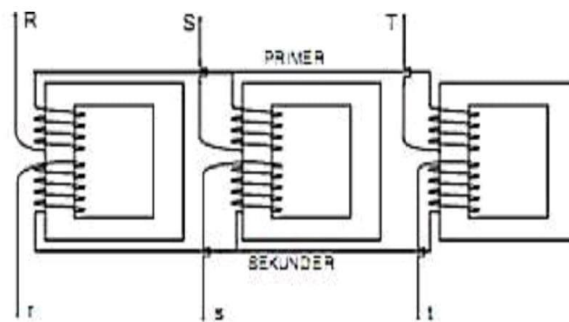
2.2.12 Transformator 3 Phasa

Trafo 3 phasa dari segi konstruksi sama dengan trafo satu fase yaitu terdiri dari jenis inti dan cangkang. Trafo 3 fase digunakan karena pertimbangan ekonomis di mana penggunaan inti besi jauh sedikit dibandingkan penggunaan 3 buah trafo 1 fase menjadi 1 trafo 3 fase. Untuk trafo 3 fase yang tersusun dari 3 trafo 1 fase, ketiga trafo tersebut harus identik karena akan berakibat fatal. Apalagi kalau kapasitas trafo tersebut cukup besar.

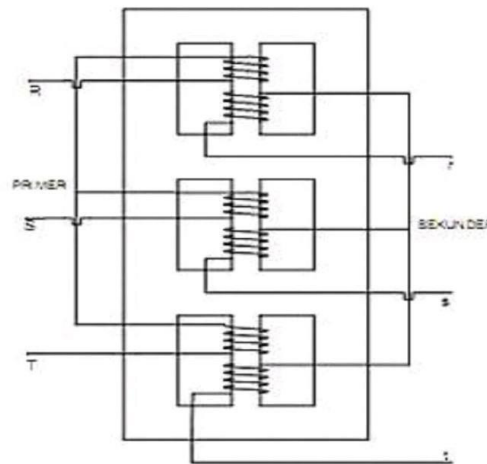
Pada pembangkitan tenaga listrik dan distribusinya sampai ke konsumen dilakukan dalam sistem 3 fase. Dengan demikian dibutuhkan trafo 3 fase pada pembangkitan untuk menaikkan tegangan dari tegangan pembangkitan menjadi tegangan transmisi. Pada sistem distribusi juga digunakan untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan sub-transmisi ataupun ke tegangan distribusi. Dalam bidang kelistrikan, trafo 3 fase digunakan untuk tegangan sistem di bawah 230 kV. Sedangkan untuk tegangan di atas 230 kV dapat menggunakan 1 trafo 3 fase

yang tersusun dari 3 buah trafo 1 fase karena masalah pengangkutan dari pabrik ke lokasi pemasangan.

Antara sisi primer dan sisi sekunder trafo 3 fase dapat dihubungkan menurut 3 cara yaitu hubungan delta, hubungan bintang dan hubungan zig-zag. Dalam operasionalnya yang banyak digunakan adalah hubungan delta dan bintang. Untuk sisi tegangan tinggi, biasanya ujung lilitan awal diberi simbol A, B, C, sedangkan ujung akhir diberi simbol X, Y, Z. sedangkan untuk sisi tegangan rendah, ujung awal lilitan diberi simbol a, b, c dan ujung akhirnya diberi simbol x, y, z[16].



Gambar 2.23 Konstruksi Transformator Tiga Fasa Tipe Inti



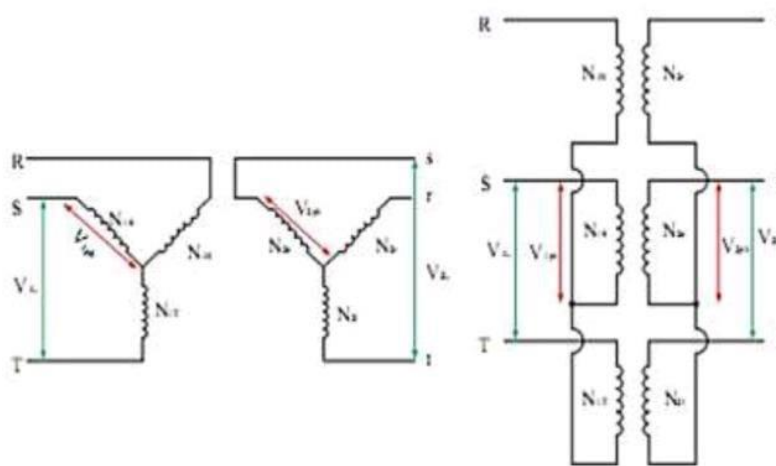
Gambar 2.24 Transformator 3 Fasa Tipe Cangkang

2.2.13 Belitan Trafo

Pada prinsipnya metode atau cara merangkai belitan kumparan disisi primer dan sekunder Transformator, umumnya dikenal 3 cara untuk merangkainya, yaitu hubungan bintang, hubungan delta, dan hubungan zig-zag.

1. Trafo 3 Fasa Hubung Bintang-Bintang (Y-Y)

Pada jenis ini ujung pada masing-masing terminal dihubungkan secara bintang. Titik netral dijadikan menjadi satu. Hubungan dari tipe ini lebih ekonomis untuk arus nominal yang kecil pada transformator tegangan tinggi.



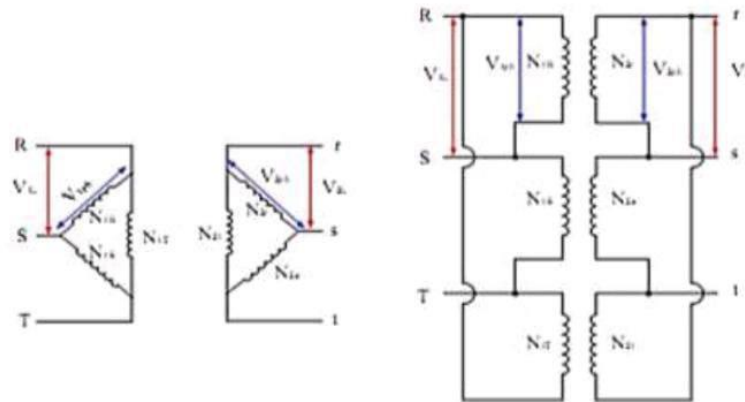
Gambar 2.25 Trafo Hubungan Bintang Bintang (Y-Y)

Pada hubungan bintang-bintang, rasio tegangan fasa-fasa (L-L) pada primer dan sekunder adalah sama dengan rasio setiap trafo. Sehingga, terjadi pergeseran fasa sebesar 30° antara tegangan fasa-netral (L-N) dan tegangan fasa-fasa (L-L) pada sisi primer dan sekundernya. Hubungan bintang-bintang ini akan sangat baik hanya jika pada kondisi beban seimbang. Karena, pada kondisi beban seimbang menyebabkan arus netral (I_N) akan sama dengan nol. Dan apabila terjadi kondisi tidak seimbang maka akan ada arus netral yang kemudian dapat menyebabkan timbulnya rugi-rugi.

2. Trafo Hubung Delta-Delta (Δ - Δ)

Pada jenis ini ujung fasa dihubungkan dengan ujung netral kumparan lain yang secara keseluruhan akan terbentuk hubungan delta/delta. Hubungan ini

umumnya digunakan pada sistem yang menyalurkan arus besar pada tegangan rendah dan paling utama saat keberlangsungan dari pelayanan harus dipelihara meskipun salah satu fasa mengalami kegagalan.

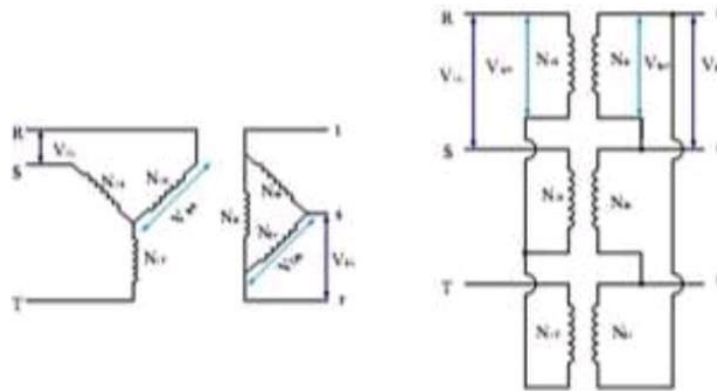


Gambar 2.26 Trafo Hubungan Delta Delta

Pada transformator hubungan Δ - Δ , tegangan kawat ke kawat dan tegangan fasa sama untuk sisi primer dan sekunder transformator ($V_{RS}=V_{ST}=V_{TR}=V_{LN}$).

3. Trafo Hubung Bintang Delta (Y- Δ)

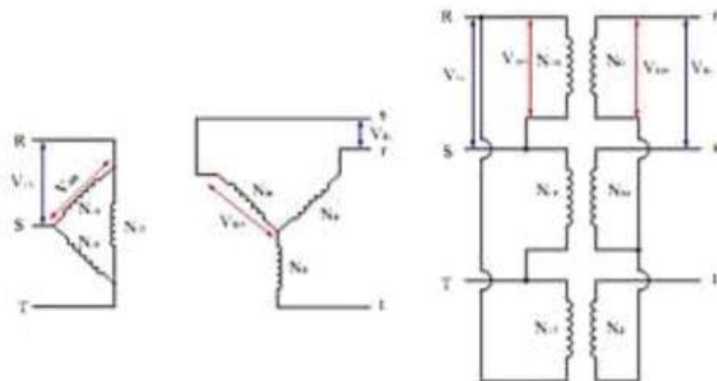
Pada hubung ini, kumparan fasasisi primer dirangkai secara bintang (wye) dan sisi sekundernya dirangkai delta. Umumnya digunakan pada trafo untuk jaringan transmisi di mana tegangan nantinya akan diturunkan (*step-down*). Perbandingan tegangan jala-jala $1/\sqrt{3}$ kali perbandingan lilitan transformator. Tegangan sekunder tertinggal 300 dari tegangan primer. Tegangan kawat ke kawat primer sebanding dengan tegangan fasa primer, dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fasa.



Gambar 2.27 Trafo Hubungan Bintang Delta (Y- Δ)

4. Trafo Hubungan Delta Bintang (Δ -Y)

Pada hubung ini, sisi primer trafo dirangkai secara delta sedangkan pada sisi sekundernya merupakan rangkaian bintang sehingga pada sisi sekundernya terdapat titik netral. Biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan (*step-up*) pada awal sistem transmisi tegangan tinggi. Dalam hubungan ini perbandingan tegangan 3 kali perbandingan lilitan transformator dan tegangan sekunder mendahului sebesar 30° dari tegangan primernya.

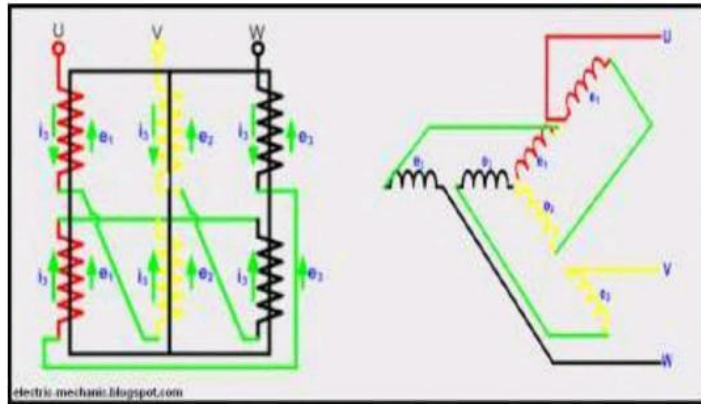


Gambar 2.28 Trafo Hubungan Delta Bintang (Δ -Y)

5. Hubungan Zig-zag

Kebanyakan transformator distribusi selalu dihubungkan bintang, salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh transformator tersebut adalah ketiga fasanya harus diusahakan seimbang. Apabila beban tidak seimbang akan

menyebabkan timbulnya tegangan titik bintang yang tidak diinginkan, karena tegangan pada peralatan yang digunakan pemakai akan berbeda-beda. Untuk menghindari terjadinya tegangan titik bintang, diantaranya adalah dengan menghubungkan sisi sekunder dalam hubungan zig-zag. Dalam hubungan zig-zag sisi sekunder terdiri atas enam kumparan yang dihubungkan secara khusus (lihat gambar).



Gambar 2.29 Trafo Hubungan Zig-Zag

Ujung-ujung dari kumparan sekunder disambungkan sedemikian rupa, supaya arah aliran di dalam tiap-tiap kumparan menjadi bertentangan. Karena el tersambung secara berlawanan dengan gulungan e2 sehingga jumlah vektor dari kedua tegangan itu menjadi:

$$\begin{aligned} e_{Z1} &= e_1 - e_2 \\ e_{Z2} &= e_2 - e_3 \\ e_{Z3} &= e_3 - e_1 \\ e_{Z1} + e_{Z2} + e_{Z3} &= 0 = 3 e_b \end{aligned}$$

2.2.14 Transformator Tiga Fasa dengan Dua Kumparan

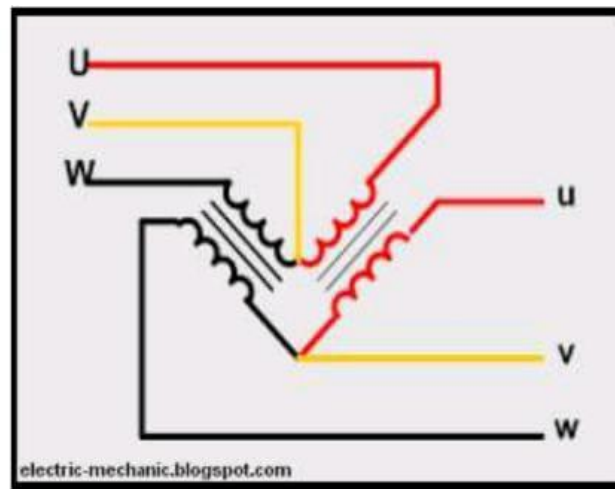
Selain hubungan transformator seperti telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, ada transformator tiga fasa dengan dua kumparan. Tiga jenis hubungan yang umum digunakan adalah:

- V-V atau “Open Δ ”
- “Open Y-Open Δ ”

- Hubungan T – T

1. Transformator Tiga Fasa dengan Dua Kumparan

Ini dimungkinkan untuk mentransformasi sistem tegangan 3 fasa hanya menggunakan 2 buah trafo yang terhubung secara open delta. Hubungan open delta identik dengan hubungan delta-delta tetapi salah satu trafo tidak dipasang. Hubungan ini jarang digunakan karena load capacity-nya hanya 86.6% dari kapasitas terpasangnya. Sebagai contoh: Jika dua buah trafo 50 kVA dihubungkan secara open delta maka kapasitas terpasang yang seharusnya adalah $2 \times 50 = 100$ kVA. Namun, kenyataannya hanya dapat menghasilkan 86.6 kVA, sebelum akhirnya trafo mengalami overheat. Dan hubungan open delta ini umumnya digunakan dalam situasi yang darurat[16].



Gambar 2.30 Trafo Hubungan open Delta/V-V

2.2.15 Transformator Pengukuran

Transformator pengukuran adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi mentransformasikan energi listrik yang digunakan untuk keperluan pengukuran tegangan dan arus listrik agar berada dalam jangkauan alat ukur sehingga pengukuran arus dan tegangan listrik dapat terbaca oleh suatu alat ukur. Arus dan tegangan pada peralatan daya yang harus dilindungi dirubah ke tingkat yang lebih rendah untuk

pengoperasian peralatan seperti relai. Tingkat-tingkat yang lebih rendah ini diperlukan karena dua alasan, yaitu:

- Tingkat masukan yang lebih rendah ke relai-relai menjadikan komponen-komponen yang digunakan untuk konstruksi relai-relai tersebut secara fisik menjadi cukup kecil, karena itu dilihat dari segi ekonomi biayanya akan lebih murah.
- Dan bagi manusia (pekerja) yang bekerja dengan relai-relai tersebut dapat bekerja dalam kondisi aman.

Transformator ini banyak digunakan dalam sistem daya karena mempunyai keuntungan, antara lain:

- Memberikan isolasi elektrik bagi sistem daya
- Tahan terhadap beban untuk berbagai tingkatan
- Tingkat keandalan yang tinggi
- Secara fisik lebih sederhana bentuknya, dan
- Secara ekonomi lebih murah

Transformator pengukuran terdiri dari

1. Transformator tegangan (*Voltage Transformer*, VT atau *Potential Transformer*, PT)
2. Transformator arus (*Current Transformer*, CT)

Beban pada transformator ukur (CT dan PT) dikenal sebagai muatan (burden) dari transformator tersebut. Istilah muatan biasanya melukiskan impedansi yang dihubungkan pada kumparan sekunder transformator itu, tetapi dapat juga menetapkan volt ampere yang diberikan kepada beban[16].

2.2.16 Transformator Tegangan

Trafo tegangan digunakan untuk menurunkan tegangan sistem dengan perbandingan transformasi tertentu. Transformator Tegangan/ Potensial (PT) adalah trafo instrumen yang berfungsi untuk mengubah tegangan tinggi menjadi tegangan rendah sehingga dapat diukur dengan voltmeter.

Prinsip kerja trafo tegangan, kumparan primernya dihubungkan paralel dengan jaringan yang akan diukur tegangannya. Voltmeter atau kumparan tegangan wattmeter langsung dihubungkan pada sekundernya. Jadi rangkaian sekunder hampir pada kondisi *open circuit*. Besar arus primernya tergantung pada beban di sisi sekunder. Rancangan trafo tegangan ini sama dengan trafo daya *step-down* tetapi dengan beban yang sangat ringan.

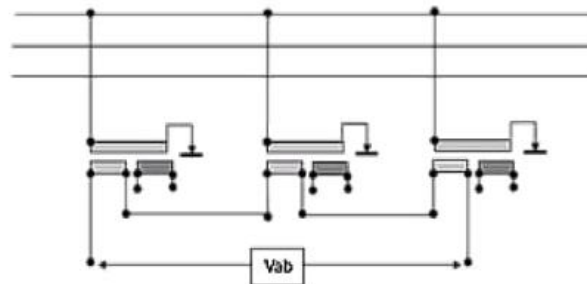
Prinsip kerja trafo jenis ini sama dengan trafo daya, meskipun demikian rancangannya berbeda dalam beberapa hal, yaitu:

- Kapasitas kecil (10 s/d 150 VA), karena digunakan untuk daya yang kecil.
- Galat faktor transformasi dan sudut fasa tegangan primer dan sekunder lebih kecil untuk mengurangi kesalahan pengukuran.
- Salah satu terminal pada sisi tegangan tinggi dibumikan/ditanahkan.
- Tegangan pengenal sekunder biasanya 100 atau $100\sqrt{3}$ V.

Ada dua macam trafo tegangan yaitu:

1. Transformator Tegangan Magnetik

Transformator ini pada umumnya berkapasitas kecil yaitu antara 10-150 VA > faktor ratio dan sudut fasa trafo tegangan sisi primer dan tegangan sekunder dirancang sedemikian rupa supaya faktor kesalahan menjadi kecil. Salah satu ujung kumparan tegangan tinggi selalu ditanahkan. Trafo tegangan kutub tunggal yang dipasang pada jaringan tiga fasa di samping belitan pengukuran, biasanya dilengkapi lagi dengan belitan tambahan yang digunakan untuk mendeteksi arus gangguan tanah. Belitan tambahan dari ketiga trafo tegangan dihubungkan secara seri.

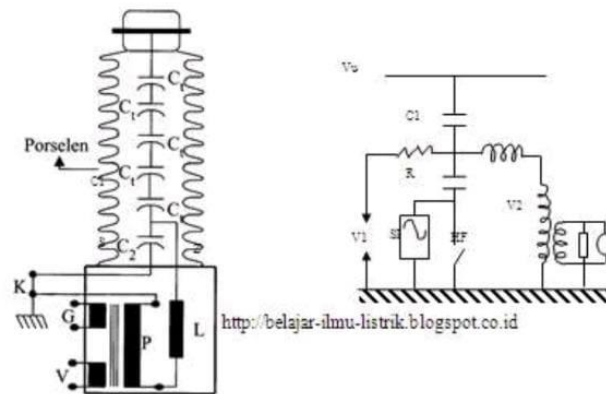


Gambar 2.31 Transformator Tegangan Magnetik

2. Trafo Tegangan Kapasitip

Trafo pembagi tegangan kapasitip dipakai untuk keperluan pengukuran tegangan tinggi, sebagai pembawa sinyal komunikasi dan kendali jarak jauh. Pada tegangan pengenalan yang lebih besar dari 110 kV, karena alasan ekonomis maka trafo tegangan menggunakan pembagi tegangan dengan menggunakan kapasitor sebagai pengganti trafo tegangan induktif.

Pembagi tegangan kapasitip dapat digambarkan seperti gambar dibawah ini.



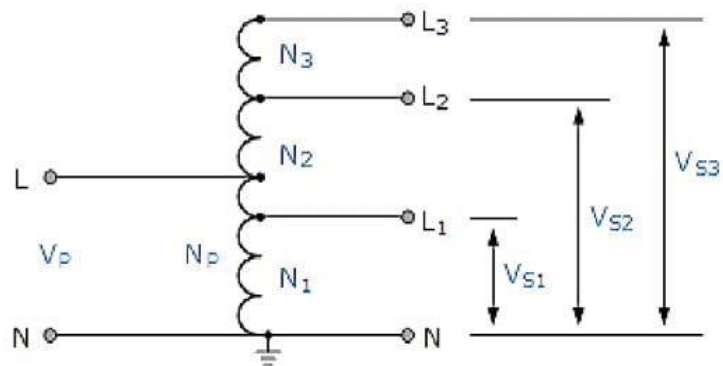
Gambar 2.32 Transformator Tegangan Kapasitip

Oleh pembagi kapasitor, tegangan pada C_2 atau tegangan primer trafo penengah V_1 diperoleh dalam orde puluhan kV, umumnya 5, 10, 15 dan 20 kV. Kemudian oleh trafo magnetik tegangan primer diturunkan menjadi tegangan sekunder standar 100 atau $100\sqrt{3}$ Volt. Jika terjadi tegangan lebih pada jaringan transmisi, tegangan pada kapasitor C_2 akan naik dan dapat menimbulkan kerusakan pada kapasitor tersebut. Untuk mencegah kerusakan tersebut dipasang sela pelindung (SP). Sela pelindung ini dihubungkan seri dengan resistor R untuk membatasi arus saat sela pelindung bekerja untuk mencecah efek feroresonansi. Rancangan trafo tegangan kapasitor adalah gulungan kertas yang dibatasi oleh lembaran aluminium yang merupakan bentuk kapasitor (dua plat paralel) sehingga bentuknya ramping dan dapat dimasukkan kedalam tabung porselin. Belitan resonansi dan belitan trafo magnetik intermediasi ditempatkan di dalam bejana logam. Terminal K dapat dikebunikan langsung atau dihubungkan dengan alat komunikasi yang

sinyalnya menumpang pada jaringan sistem. Agar efektif sebagai kopling kapasitor maka besarnya kapasitansi C1 dan C2 secara perhitungan harus memiliki nilai minimum 4400 pF[16].

2.2.17 Autotransformator

Autotransformator adalah transformator yang hanya memiliki satu kumparan, di mana kumparan tersebut digunakan sebagai kumparan primer dan sekaligus kumparan sekunder. Autotransformator dipakai untuk menaikkan tegangan ataupun menurunkan tegangan. Umumnya Autotransformator memiliki rasio mendekati satu (*unity*).

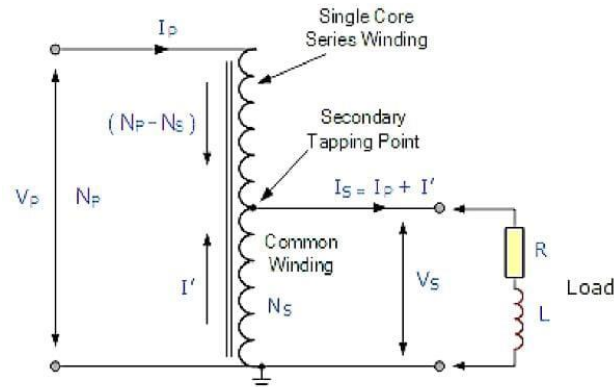


Gambar 2.33 Rangkaian Sederhana Autotransformator dengan tap

Lilitan tunggal ini "disadap" pada beberapa titik sepanjang lilitan untuk memberikan persentase pasokan tegangan utama melintasi beban sekundernya. Autotransformer juga memiliki inti magnetik namun hanya memiliki satu belitan, yang umum terjadi pada sirkit primer dan sekunder.

Oleh karena itu dalam autotransformer, gulungan primer dan sekunder dihubungkan secara elektrik dan magnetis. Keuntungan utama dari jenis desain transformator ini adalah dapat dibuat jauh lebih murah untuk rating VA yang sama, namun kerugian terbesar dari sebuah autotransformer adalah belitan primer/sekunder tidak terisolasi daripada belitan ganda transformator konvensional.

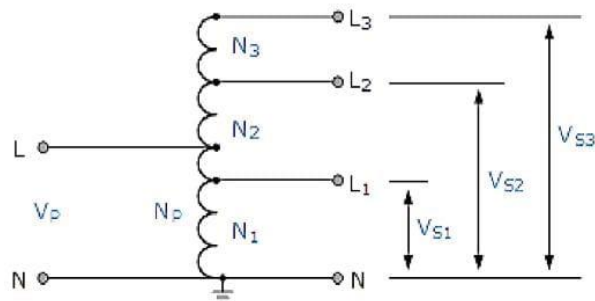
Bagian belitan yang ditunjuk sebagai bagian utama dari lilitan dihubungkan ke sumber listrik AC dengan bagian sekunder dari gulungan primer ini. Sebuah autotransformer juga dapat digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan dengan membalikkan koneksi. Jika primer adalah total belitan dan terhubung ke suplai, dan sirkuit sekunder terhubung hanya pada sebagian belitan maka tegangan sekunder "step-down" seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.34 Rangkaian Ekuivalen Autotransformator

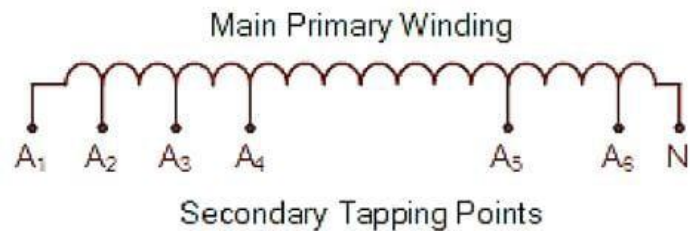
Ketika arus primer I_p mengalir melalui gulungan tunggal ke arah panah seperti yang ditunjukkan, arus sekunder I_s mengalir berlawanan arah. Oleh karena itu, pada bagian belitan yang menghasilkan tegangan sekunder V_s arus yang mengalir keluar dari belitan adalah selisih antara I_p dan I_s .

Autotransformer juga dapat dibangun dengan lebih dari satu titik penyadapan tunggal. Auto-transformer dapat digunakan untuk memberikan titik tegangan yang berbeda sepanjang lilitannya atau meningkatkan voltase suplai sehubungan dengan tegangan suplai V_p seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.35 Autotransformator Dengan Beberapa Titik Sadapan

Metode standar untuk menandai lilitan autotransformer adalah diberi label dengan huruf kapital (huruf besar). Jadi misalnya, A, B, Z dan seterusnya, untuk mengidentifikasi pasokan akhir. Umumnya koneksi netral umum ditandai sebagai N atau n. Untuk penyadapan sekunder, angka terakhir digunakan untuk semua titik penyadapan sepanjang lilitan primer auto-transformer. Angka-angka ini umumnya dimulai di nomor 1 dan berlanjut dalam urutan menaik untuk semua titik penyadapan seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.36 Titik Sadapan Autotrafo

Sebuah autotransformer digunakan terutama untuk penyesuaian perubahan nilai tegangan atau menjaga agar tetap konstan. Jika penyesuaian tegangan dengan jumlah kecil, baik naik atau turun, ketika rasio transformasinya kecil. V_p dan V_s hampir sama. Arus I_p dan I_s juga hampir sama.

Oleh karena itu, bagian belitan yang membawa selisih antara dua arus dapat dibuat dari ukuran konduktor yang jauh lebih kecil, ini akan lebih hemat dalam hal biaya dibanding dengan transformator konvensional dengan dua belitan. Namun, induktansi kebocoran dan ukuran fisik (karena tidak ada gulungan kedua) dari sebuah autotransformer memberikan rating nilai VA atau KVA lebih kecil dari transformator dua belitan[16].

2.2.18 Batas Kesalahan Transformator Arus

Sebagaimana diketahui hasil transformasi dari arus yang mengalir di sisi primer tidak seluruhnya tertransformasi dengan baik di sisi sekunder. Dibutuhkan arus eksitasi untuk bisa mentransformasikan arus primer menjadi arus sekunder. Arus eksitasi tersebut akan menimbulkan penyimpangan hasil pengukuran. Penyimpangan tersebut biasa dikenal dengan istilah kesalahan transformasi atau kesalahan

perbandingan (*ratio error*) dan juga pergeseran sudut atau fasa yang dikenal dengan istilah *phase displacement error*.

Terdapat beberapa standar internasional yang mendefinisikan batasan-batasan maksimal dari kesalahan transformasi yang harus dipenuhi oleh trafo arus. Pada standar internasional yang paling banyak digunakan di Indonesia, yaitu standar IEC60044-2. Standar ini banyak digunakan oleh trafo arus yang digunakan oleh PT PLN. Standard terbaru dari IEC60044-2 adalah IEC61869-2. Batas kesalahan trafo arus untuk pengukuran.

Standar IEC61869-2 yang mengatur tentang batasan kesalahan sebuah trafo arus ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 Batas Kesalahan Dan Pergeseran Fasa Trafo Arus Untuk Pengukuran

Accuracy Class	\pm Percentage Current (Ratio) Error at Percentage of Rated Current				\pm Phase Displacement at Percentage of Rated Current							
					Minutes				Centiradians			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15	0.15
0.2	0.75	0.35	0.2	0.2	30	15	10	10	0.9	0.45	0.3	0.3
0.5	1.5	0.75	0.5	0.5	90	45	30	30	2.7	1.35	0.9	0.9
1.0	3.0	1.5	1.0	1.0	180	90	60	60	5.4	2.7	1.8	1.8

Penjelasan tabel di atas adalah sebagai berikut:

- Kelas 0.1 \rightarrow biasa digunakan untuk keperluan laboratoris atau penelitian yang membutuhkan tingkat ketelitian yang tinggi.
- Kelas 0.2 dan 0.5 \rightarrow biasa digunakan untuk keperluan meter pelanggan atau *billing*.
- Kelas 1 dan 3 \rightarrow biasa digunakan untuk keperluan industri.

Untuk keperluan yang lebih umum dan tidak diperlukan tingkat ketelitian yang tinggi serta tidak diperhatikannya faktor pergeseran sudut atau *phase displacement error* maka disediakan kelas akurasi sesuai tabel dibawah ini.

Tabel 2.2 Batas Kesalahan Dan Pergeseran Fasa Untuk Aplikasi Khusus

<i>Accuracy Class</i>	\pm <i>Percentage Current (Ratio) Error at Percentage of Rated Current</i>	
		50
3	3	3
5	5	5

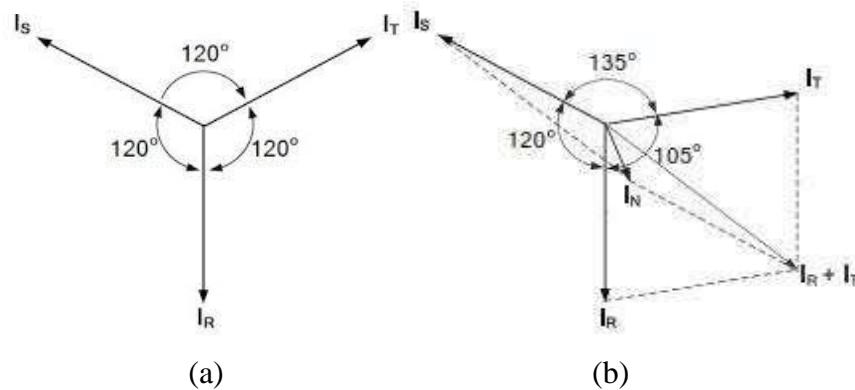
Catatan:

- Tabel di atas berlaku untuk jangkauan beban dari 25% beban pengenal (*rated burden*) hingga 100% beban pengenal (*rated burden*).
- Kelas metering biasanya diikuti juga dengan parameter FS (Safety Factor). Parameter ini erat kaitannya dengan fungsi trafo pengukuran untuk mampu melindungi peralatan ukur yang terhubung dengannya pada saat terjadi arus lebih[16].

2.2.19 Ketidakseimbangan Beban

Ketidakseimbangan beban adalah kondisi di mana arus listrik yang mengalir melalui fase-fase dalam sistem tiga phasa tidak sama besar. Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan berbagai masalah dalam sistem tenaga listrik, termasuk penurunan efisiensi, peningkatan rugi-rugi daya, dan potensi kerusakan pada peralatan listrik. Ada tiga kemungkinan keadaan beban tidak seimbang, yaitu:

1. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
2. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2.37 Vektor Diagram Arus Seimbang (a) dan Tak Seimbang (b)

Gambar (a) 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 (I_N). Sedangkan pada Gambar (b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya[12].

1. Perhitungan Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo

Berdasarkan ketidakseimbangan beban dapat diketahui berdasarkan koefisien a, b, dan c seperti dibawah ini. Arus fasa dalam keadaan seimbang memiliki besaran sama dengan arus rata-rata[1].

$$I_R = a.I \text{ maka } a = I_R/I$$

$$I_S = b.I \text{ maka } b = I_S/I$$

$$I_T = c.I \text{ maka } c = I_T/I$$

Pada saat kondisi berimbang, jumlah koefisien a, b, dan c adalah 1. Sehingga, rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah:

$$U_L = \frac{(a-1) + (b-1) + (c-1)}{3} \times 100\% \dots\dots\dots(2.1)$$

2. Rugi-Rugi Daya

Rugi daya atau susut daya listrik merupakan daya yang hilang dalam penyaluran daya listrik dari sumber daya listrik utama ke suatu beban. Rugi daya atau susut daya listrik merupakan daya yang hilang dalam penyaluran daya listrik dari sumber daya listrik utama ke suatu beban, Dalam proses transmisi dan distribusi tenaga listrik seringkali dialami rugirugi daya yang cukup besar yang diakibatkan oleh rugi-rugi pada saluran dan juga rugi-rugi pada trafo yang digunakan. Kedua jenis rugi-rugi daya tersebut memberikan pengaruh yang besar terhadap kualitas daya dan tegangan yang dikirimkan ke sisi pelanggan[6]. Besar rugi-rugi daya pada jaringan distribusi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Delta P = I^2 \cdot R \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

ΔP = Rugi daya pada jaringan (Watt)

I = Arus beban pada jaringan (Amper)

R = Tahanan murni (Ohm)

Untuk rugi-rugi daya pada jaringan tiga fasa dinyatakan oleh persamaan.

$$\Delta P = \sqrt{3} \cdot I^2 \cdot R \text{ (Watt)} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan mengabaikan arus kapasitif pada saluran, maka arus disepanjang kawat dapat dianggap sama dan besarnya adalah sama dengan arus pada ujung terima.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V} \cos \phi \text{ (Ampere)} \dots\dots\dots(2.4)$$

Besarnya daya pada saluran tiga fasa adalah:

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi \text{ (Watt)} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

P = daya beban pada ujung penerima saluran (watt)

V = tegangan phasa (Volt)

$\cos \phi$ = faktor daya beban.

3. Perhitungan *Losses* Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Persamaan dapat digunakan untuk mencari rugi-rugi daya yang hilang akibat adanya arus netral pada penghantar transformator[6]. Secara matematis dinyatakan dengan rumus:

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana:

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)

Rugi-rugi daya selanjutnya adalah rugi-rugi yang disebabkan karena pada netral transformator terdapat aliran arus netral yang mengalir ke tanah. Secara matematis dinyatakan dengan rumus:

$$P_G = I_G^2 \times R_G \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana:

P_G = *Losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

I_G = Arus netral yang mengalir ke tanah (Ampere)

R_G = Tahanan Pembumian netral trafo (Ω)

4. Perhitungan Arus Beban Pada Transformator

Daya kerja pada transformator menandakan kapasitas transformator tersebut[10]. Karena sudah diketahui rating tegangan pada sisi primer dan sekunder, maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana:

S = Daya pada transformator (kVA)

V_{LL} = Tegangan line to line sisi sekunder (V)

I = Arus jala-jala pada transformator (I)

Menghitung arus beban penuh arus rata-rata dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{LL}} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

$I_{FL} = I_{beban\ penuh}$ (A)

I_R = Arus Fasa R

I_S = Arus Fasa S

I_T = Arus Fasa T

$$I_{rata-rata} = \frac{I_r + I_s + I_t}{3} \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

$I_{rata-rata}$ = Arus rata-rata (A)

I_R = Arus Fasa R

I_S = Arus Fasa S

I_T = Arus Fasa T

Sedangkan untuk mencari presentase pembebanan pada transformator distribusi dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$\frac{I_{\text{rata-rata}}}{I_{\text{beban penuh}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.11)$$

5. Perhitungan Arus Beban Penuh

Bila ditinjau dari tegangan tinggi, daya transformator dapat dituliskan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{3} V \cdot I \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

S = Daya trafo (kVA)

V = Tegangan sisi primer (kV0

I = Arus jala-jala (A) [7]

Jadi untuk menghitung arus beban penuh (full load) dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana:

I_{FL} = Arus beban penuh

S = Daya trafo (kVA)

V = Tegangan sisi primer (A) [12]

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:

- Kondisi beban tidak seimbang
- 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[17].

2.2.20 Arus Netral Karena Beban Tidak Seimbang

Untuk arus tiga fasa dari suatu sistem yang tidak seimbang dapat juga diselesaikan dengan menggunakan metode komponen simetris[18]. Dengan menggunakan notasi-notasi yang sama seperti pada tegangan akan didapatkan persamaan-persamaan untuk arus-arus fasanya sebagai berikut:

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

$$I_b = a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

$$I_c = a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

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

$$I_1 = 1/3(I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

$$I_2 = 1/3(I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

$$I_0 = 1/3(I_a + I_b + I_c) \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

Disini 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:

$$I_N = I_a + I_b + I_c \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (2.19) ke (2.20) maka diperoleh:

$$I_N = 3 I_0 \dots\dots\dots(2.21)$$

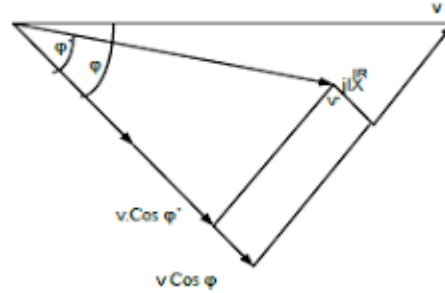
Dalam sistem tiga fasa empat kawat ini jumlah arus dalam saluran sama dengan arus netral yang kembali lewat kawat netral. Jika harus fasa yang tidak seimbang maka arus netralnya tidak bernilai nol atau di aliri arus listrik. Dan begitu sebaliknya jika arus-arus fasanya seimbang, maka akan ada arus yang mengalir di kawat netral sistem (arus netral akan mempunyai nilai dalam arti tidak nol)[19].

2.2.21 Penyaluran dan Sudut Daya pada Keadaan Arus Seimbang

Misalkan daya sebesar P disalurkan melalui suatu saluran dengan penghantar netral. Apabila pada penyaluran daya ini arus-arus fasa dalam keadaan seimbang, maka besarnya daya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P = 3[V] [I] \cos \phi \dots\dots\dots(2.22)$$

Daya yang sampai ujung diterima akan lebih kecil dari P karena terjadinya penyusutan dalam saluran. Penyusutan daya ini dapat diterangkan dengan menggunakan diagram fasor tegangan saluran model fasa tunggal seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.38 Diagram Fasor Tegangan Saluran Daya Model Fasa Tunggal

Model ini dibuat dengan asumsi arus pemusatan kapasitif pada saluran cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Dengan demikian besarnya arus ujung kirim sama dengan arus di ujung terima. Apabila tegangan dan faktor-faktor daya pada ujung terima berturut-turut adalah V' dan ϕ' , maka besarnya daya pada ujung diterima adalah:

$$P' = 3[V'] [I] \cos \phi' \dots\dots\dots(2.23)$$

Selisi antara P pada persamaan (2.22) dan P' pada Persamaan (2.23) memberikan susut daya saluran, yaitu:

$$Pl = P - P' \dots\dots\dots(2.24)$$

$$= 3[V] [I] \cos \phi - 3[V'] [I] \cos \phi' \dots\dots\dots(2.25)$$

$$= 3[I] \{ [V] \cos \phi - 3[V'] \cos \phi' \} \dots\dots\dots(2.26)$$

Sementara itu dari Gambar 2.16 memperlihatkan bahwa:

$$\{ [V] \cos \phi - [V'] \cos \phi' \} = [I] R \dots\dots\dots(2.27)$$

Dengan R adalah tahanan kawat penghantar tiap fasa, oleh karena itu persamaan (2.27) berubah menjadi:

$$P = 3 [I^2] R \quad \dots\dots\dots(2.28)$$

Penyaluran dan Susut Daya pada Keadaan Arus Tidak Seimbang

Jika I adalah besaran arus fasa dalam penyaluran daya sebesar P pada keadaan seimbang, maka pada penyaluran daya yang sama tetapi tidak seimbang besarnya arus-arus fasa dapat dinyatakan dengan koefisien a , b , dan c adalah sebagai berikut:

$$[I_R] = a[I] \quad \dots\dots\dots(2.29)$$

$$[I_S] = b[I] \quad \dots\dots\dots(2.30)$$

$$[I_T] = c[I] \quad \dots\dots\dots(2.31)$$

Dengan I_R , I_S , dan I_T berturut adalah arus fasa R, S, dan T. telah disebutkan di atas bahwa faktor daya ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda-beda. Dengan anggapan seperti ini besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai:

$$P = (a + b + c) [V] [I] \cos \phi \quad \dots\dots\dots(2.32)$$

Apabila persamaan (2.31) dan persamaan (2.32) menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan tersebut dapat diperoleh persyaratan koefisien a , b dan c adalah:

$$a+b+c=3 \quad \dots\dots\dots(2.33)$$

Dengan anggapan yang sama, arus yang mengalir di penghantar netral dapat dinyatakan sebagai:

$$I_N = I_R + I_S + I_T \quad \dots\dots\dots(2.34)$$

$$[I] \{a+b \cos(-120) + j.b. \sin(-120) + c. \cos(-120) + j.c. \sin(120)\} \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

$$= [I] \left\{ a - \frac{b-c}{2} + j \cdot \frac{(c-b)\sqrt{3}}{2} \right\} \dots\dots\dots(2.36)$$

Susut daya saluran adalah jumlah susut pada penghantar fasa dan penghantar netral adalah:

$$P I' = \{ [I_R^2] + [I_S^2] + [I_T^2] \cdot R + [I_N^2] \cdot R_N \} \dots\dots\dots(2.37)$$

$$= (a^2 + b^2 + c^2) [I]^2 R + (a^2 + b^2 + c^2 - ab - ac - bc) [I_N]^2 \cdot R_N \dots\dots\dots(2.38)$$

Dengan R_N adalah tahanan penghantar netral.

Apabila persamaan (2.37) disubstitusikan ke persamaan (2.38) maka akan diperoleh:

$$P I' = [9 - 2(ab + ac + bc) [I]^2 R + (9 - 3(ab + ac + bc)) [I_N]^2 \cdot R_N] \dots\dots\dots(2.39)$$

Persamaan (2.39) ini adalah persamaan susut daya saluran untuk saluran dengan penghantar netral. Apabila tidak ada penghantar netral maka kedua ruas kanan akan hilang sehingga susut daya akan menjadi:

$$P I' = \{ 9 - 2(ab + ac + bc) [I]^2 R \} \dots\dots\dots(2.40)$$

2.2.22 Segitiga Daya

Segitiga daya adalah gambaran dari daya semu, daya reaktif dan daya aktif. Dimana segitiga daya bersifat induktif dengan sudut antara daya semu dan daya aktif adalah ϕ [20].

1. Daya kompleks

Perkalian tegangan V dengan arus I dalam kedua besaran ini dalam bentuk bilangan kompleks adalah $V \cdot I$ yang dinamakan daya kompleks dengan simbol S , dalam satuan *Volt Ampere (VA)*, *Kilo Volt Ampere (KVA)*, *Mega Volt Ampere (MVA)*.

2. Daya Aktif

Daya aktif atau daya nyata dirumuskan dengan $S \cos \phi$ atau $V.I \cos \phi$ dengan simbol P , dalam satuan *Watt (W)*, *Kilo Watt (KW)*, *Mega Watt (MW)*.

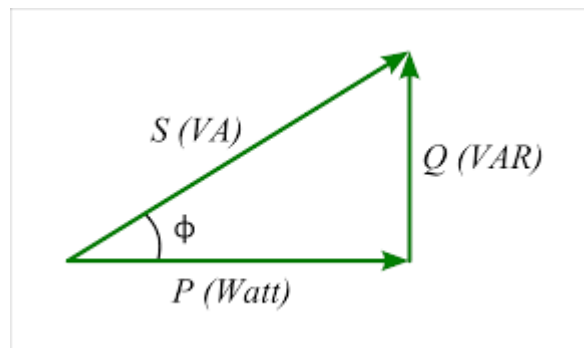
3. Daya Reaktif

Daya reaktif atau daya khayal dirumuskan dengan $S \sin \phi$ atau $V.I \sin \phi$ dengan simbol Q , dalam satuan *Volt Ampere Reaktif (VAR)*, *Kilo Volt Ampere Reaktif (KVAR)*, *Mega Volt Ampere Reaktif (MVAR)*. [20].

2.2.23 Faktor Daya

Pengertian faktor daya ($\cos \phi$) adalah perbandingan antara daya aktif (P) dan daya semu (S). dari pengertian tersebut, faktor daya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Faktor daya} &= (\text{Daya Aktif} / \text{Daya Semu}) \\
 &= (P / S) \\
 &= (V.I. \cos \phi / V.I) \\
 &= \cos \phi \dots\dots\dots(2.40)
 \end{aligned}$$



Gambar 2.39 Segitiga Daya

$$\text{Daya Semu} = V.I \text{ (VA)}$$

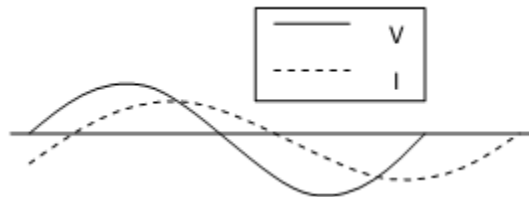
$$\text{Daya Aktif} = V.I \cos \phi \text{ (Watt)}$$

$$\text{Daya Reaktif} = V.I \sin \phi \text{ (Var)}$$

1. Faktor Daya Terbelakang (*Lagging*)

Faktor daya terbelakang (*lagging*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi sebagai berikut:

- Beban/ peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif.
- Arus (I) terbelakang dari tegangan (V), V mendahului I dengan sudut ϕ [20].



Gambar 2.40 Arus Tertinggal Dari Tegangan Sebesar Sudut ϕ

2.2.24 Losses Pada Jaringan Distribusi

Yang dimaksud losses adalah perbedaan antara energi listrik yang disalurkan (P_s) dengan energi listrik yang terpakai (P_p).

$$\text{Losses} = (P_s - P_p) / P_s \dots\dots\dots(2.41)$$

Dimana:

P_s = Energi yang disalurkan (watt)

P_p = Energi yang dipakai (watt)

1. Losses Pada Penghantar Fasa

Jika suatu arus mengalir pada suatu penghantar, maka pada penghantar tersebut akan terjadi rugi-rugi energi menjadi panas karena pada penghantar terdapat resistansi. Rugi-rugi dengan beban terpusat di ujung dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta V = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X \sin \varphi) l \quad \dots\dots\dots(2.42)$$

$$\Delta P = 3 I^2 R l \quad \dots\dots\dots(2.43)$$

Dimana:

I = Arus per phasa (Ampere)

R = Tahanan Pada Penghantar

(*Ohm / km*) X = Reaktansi pada penghantar (*Ohm / km*)

$\cos \varphi$ = Faktor daya beban

l = Panjang Penghantar

2. Losses Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral

Akibat pembebanan tiap phasa 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[9]. Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya sepanjang kawat netral sebesar:

$$P_N = I_N^2 \times R_N \quad \dots\dots\dots(2.44)$$

Dimana:

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

I_N = Arus yang mengalir melalui kawat penghantar (Ampere)

R_N = Tahanan pada kawat netral (*Ohm*)

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat Penelitian

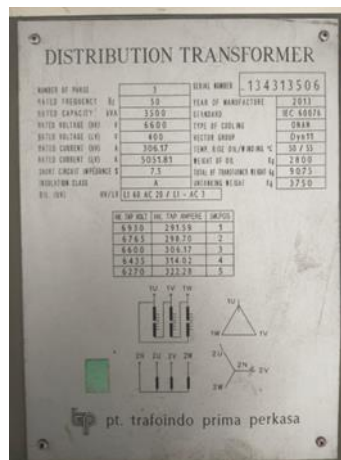
Penelitian ini dilaksanakan di PLTU PT. Muia Jaya Elektrik, Jalan Jati, Sei Mencirim, Deli Serdang, Sumatera Utara.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan transformator distribusi dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi Transformator Distribusi

Spesifikasi Transformator	
Buatan Pabrik	PT. Trafindo Prima Perkasa
Trafo	1 x 3 Phasa
Daya	3500kVA
Tegangan Kerja	6,6kV/0,4kV
Arus	306,17A
Frekuensi	50Hz



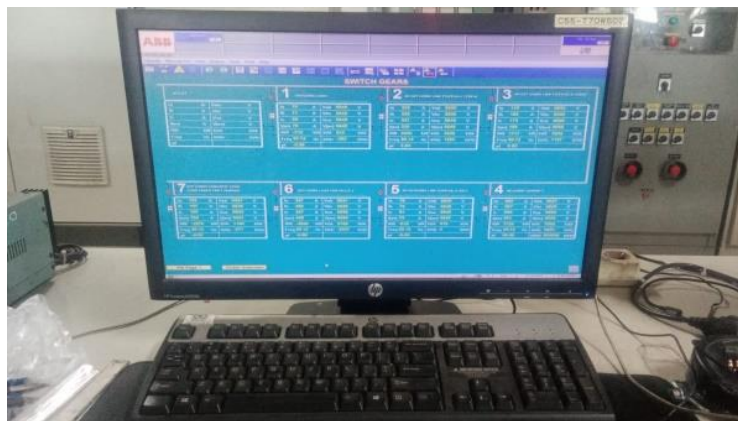
Gambar 3.1 Spesifikasi Trafo Sesuai Dengan Nameplate



Gambar 3.2 Trafo 3500 kVA

3.3 Jalannya Penelitian

Penelitian ini akan menggunakan metode kuantitatif untuk menganalisis pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap arus netral dan rugi-rugi daya transformator distribusi. Metode pengumpulan data menggunakan metode penelitian sekunder, dimana data diperoleh dari catatan operasional operator. Data yang dikumpulkan mencakup arus masing masing fasa di trafo distribusi 3500 kVA yang diukur melalui *software* ABB (*Asea Brown Boveri*) sehingga tidak ada kebutuhan untuk melakukan pengukuran manual dengan alat ukur tambahan.

Gambar 3.3 *Software* ABB

Pengumpulan data dilakukan selama satu bulan antara Juni 2024 sampai Agustus 2024, pengambilan data dilakukan pada siang hari dan malam hari dengan rentang waktu antara jam 14:00 WIB dan 20:00 WIB. Dan setelah data yang diperlukan terkumpul maka data dianalisa dengan menggunakan persamaan yang ada kemudian diselesaikan ke dalam bentuk matematis dengan rumus sebagai berikut:

2. Analisa Beban Puncak

Dengan rumus:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3}.V} \dots\dots\dots (3.1)$$

Jika arus beban puncak telah didapatkan, maka menghitung arus rata-rata pada siang dan malam hari dengan rumus:

$$I_{rata-rata} = \frac{I_r+I_s+I_t}{3} \dots\dots\dots (3.2)$$

Kemudian jika rata-rata didapatkan lalu menghitung presentase pembeban pada siang dan malam hari dengan rumus:

$$\frac{I_{rata-rata}}{I_{beban penuh}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.3)$$

3. Analisa Ketidakseimbangan Beban

Menghitung ketidakseimbangan beban pada siang dan malam hari dengan rumus:

$$A = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (3.4)$$

Jika ketidakseimbangan beban didapatkan, maka menghitung rata-rata ketidakseimbangan beban pada siang dan malam hari dengan rumus:

$$\frac{a+b+c}{3} \dots\dots\dots (3.5)$$

Kemudian jika rata-rata ketidakseimbangan beban didapatkan, selanjutnya menghitung presentase ketidakseimbangan beban pada siang dan malam hari dengan menggunakan rumus:

$$U_L = \frac{I_{\text{maksimum}} - I_{\text{rata-rata}}}{I_{\text{rata-rata}}} \times 100\% \dots\dots\dots (3.6)$$

4. Analisa Rugi-Rugi Daya

Mencari rugi-rugi daya pada siang dan malam hari dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \times R_N \dots\dots\dots (3.7)$$

Setelah rugi-rugi daya didapatkan, lalu mencari daya aktif trafo (p) dengan rumus:

$$P = S \cdot \cos \phi \dots\dots\dots (3.8)$$

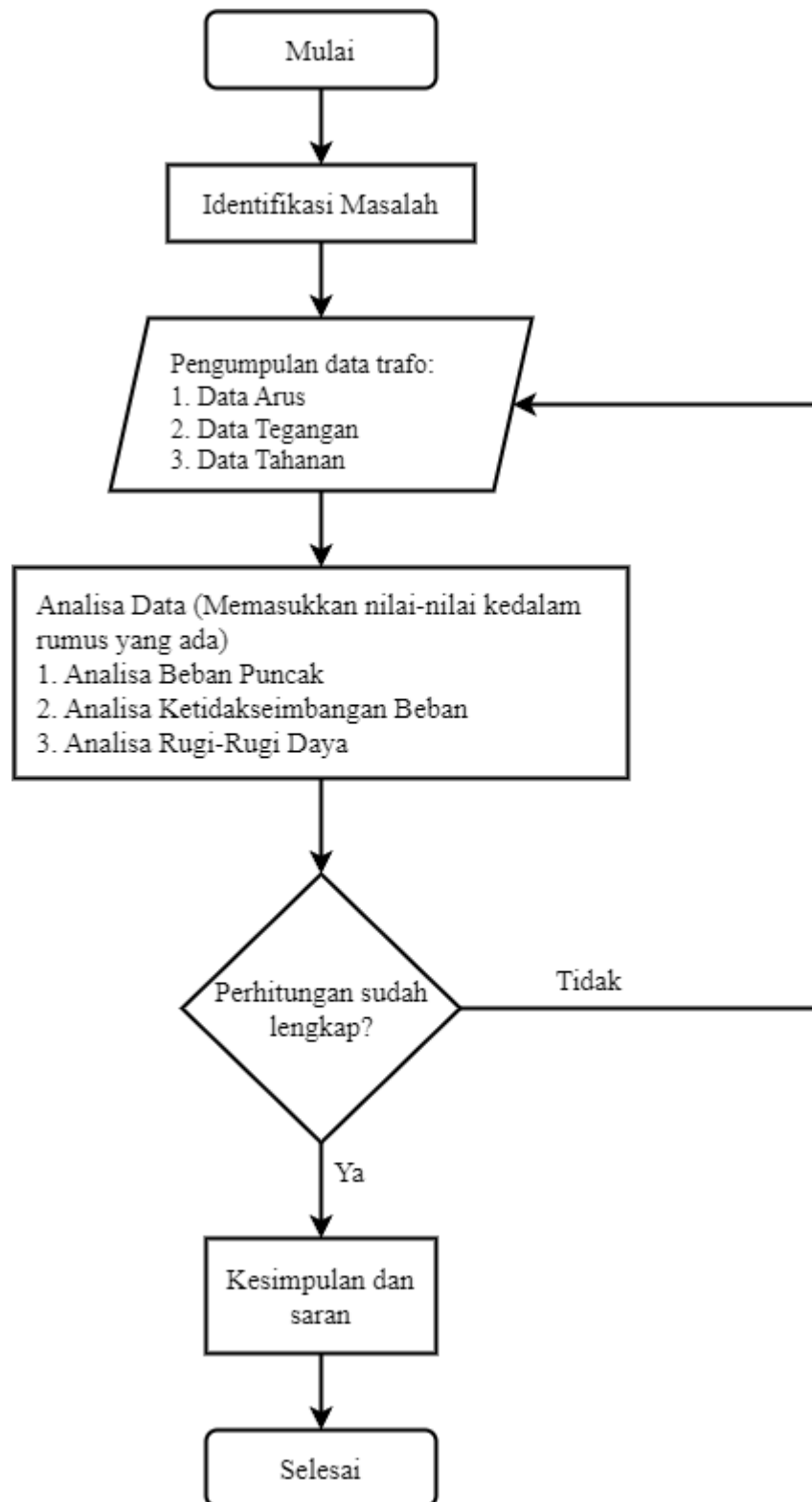
Lalu mencari presentase losses akibat adanya arus netral dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\%P_n = \frac{P_n}{P} \dots\dots\dots (3.9)$$

Hasil dari perhitungan arus beban puncak, ketidakseimbangan beban, dan rugi-rugi daya ditampilkan dalam bentuk tabel dengan perbandingan antara siang hari dan malam hari.

3.4 Alur Penelitian

Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Rugi-Rugi Daya (Losses) Transformator Distribusi 3500 kVA terdiri dari beberapa proses yang dapat dilihat pada Gambar 3.4

Gambar 3.4 *Flowchart* Penelitian

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Nugroho, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Trafo Distribusi (Studi Kasus Pada PT.PLN (Persero) Rayon Kartasura),” *Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Trafo Distribusi (Studi Kasus Pada PT. PLN Rayon Kartasura)*, 2019.
- [2] H. Tanamal, A. Herawati, N. Daratha, and I. N. Anggraini, “Analisis Pengaruh Beban Tak Seimbang Terhadap Arus Netral Pada Trafo IV GI Sukamerindu Bengkulu,” *J. Amplif. J. Ilm. Bid. Tek. Elektro Dan Komput.*, vol. 9, no. 2, pp. 7–13, 2019, doi: 10.33369/jamplifier.v9i2.15377.
- [3] Z. Sya’roni and T. Rijanto, “Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi 20 kV Dan Solusinya Pada Jaringan Tegangan Rendah,” *Tek. Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 173–180, 2019.
- [4] R. Ruliyanto, “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Arus Ground pada Trafo 1 dan Trafo 2 pada Beban Puncak Sesaat,” *J. Ilm. Giga*, vol. 23, no. 1, p. 27, 2020, doi: 10.47313/jig.v23i1.867.
- [5] A. M. Gah, A. Tino, and F. Donis, “Studi Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Rugi-Rugi Pada Trafo Distribusi Di PT. PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Kupang,” vol. 6, no. 1, pp. 22–29, 2020.
- [6] H. Elnizar, H. Gusmedi, and O. Zebua, “Analisis Rugi-Rugi (Losses) Transformator Daya 150/20 KV di PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sutami ULTG Tarahan,” *Electrician*, vol. 15, no. 2, pp. 116–126, 2021, doi: 10.23960/elc.v15n2.2197.
- [7] I. G. Budiayasa, I. W. Artha Wijaya, and T. G. Indra Partha, “Rugi – Rugi Daya Akibat Pengaruh Ketidak Seimbangan Beban Terhadap Arus Netral Pada Efektifitas Penggunaan Daya Terpasang,” *J. SPEKTRUM*, vol. 8, no. 1, p. 260, 2021, doi: 10.24843/spektrum.2021.v08.i01.p29.
- [8] J. Rumakat and D. Fauziah, “Analisis Beban Tidak Seimbang Terhadap Arus

Netral dan Rugi-Rugi pada Penghantar Netral Transformator di Rayon Baguala Ambon,” *Tek. Elektro*, pp. 334–345, 2021.

- [9] F. Irsan and Elvy Sahnur Nasution, “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi 200 KVA,” *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 59–63, 2021, doi: 10.9744/jte.7.2.68-73.
- [10] M. D. Putra, A. A. Purba, and Suprianto, “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Nental Pada Gardu MK64 PT PLN ULP Medan Kota,” pp. 898–907, 2022.
- [11] H. Widiarto and A. Samanhuji, “Analisa Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Pada Gardu !A Politeknik Penerbangan Indonesia Curuf,” vol. 2, no. 2, 2022.
- [12] T. Umpel, G. M. C. Mangindaan, and M. Tuegeh, “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Arus Netral Dan Rugi-Rugi Daya (Losses) Transformator Daya PLTU Amurang PT PJB Services,” 2023, [Online]. Available: www.feriadianto.my.id
- [13] N. Made Omiku Radha Saraswati *et al.*, “SNESTIK Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika Analisa Rugi-Rugi Daya Pada Penghantar Netral Akibat Sistem Tidak Seimbang dan Efisiensi Transformator Distribusi Rayon Ngagel,” *SNESTIK Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika*, pp. 121–128, 2023, [Online]. Available: <https://ejurnal.itats.ac.id/snestikdanhttps://snestik.itats.ac.id>
- [14] V. Wijayanto, P. Slamet, and R. S. Widagdo, “Analisis Ketidakseimbangan Beban Pada Tranformator Distribusi Di Gardu Induk Budurn,” *J. Tek. Inform. dan Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 127–135, 2023, doi: 10.55542/jurtie.v5i2.725.
- [15] I. Devi, A. Syuhada, and K. Umurani, “Analisis ketidakstabilan beban arus netral dan rugi-rugi daya pada trafo distribusi penyulang Pas 21 PT . PLN UPB Banda Aceh,” vol. 2, no. 2, pp. 69–83, 2023.
- [16] I. A. Djufri, *Transformator*. Ternate: CV BUDI UTAMA, 2022.
- [17] R. Syahputra Srg, R. Harahap, P. Arus, and R. Syahputra Siregar, “Perhitungan

- Arus Netral, Rugi-Rugi, dan Efisiensi Transformator Distribusi 3 Fasa 20 KV/400V Di PT. PLN (Persero) Rayon Medan Timur Akibat Ketidakseimbangan Beban,” *J. Electr. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 79–85, 2017.
- [18] H. L. Latupeirissa, “Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Daya Pada Trafo Distribusi Gardu KP-01 Desa Hative Kecil,” *J. Simetrik*, vol. 7, no. 2, p. 2017, 2017.
- [19] D. Metode, P. Program, M. Di, and P. T. Pln, “Analisa pengaruh ketidakseimbangan beban terhadap rugi daya dan efisiensi pada transformator distribusi dengan metode perhitungan program matlab di pt. pln (persero) area kabupaten ngawi,” 2022.
- [20] S. S. Satu, N. Nim, Y. Eryuhanggoro, P. Studi, and T. Elektro, “Tugas Akhir Perancangan Perbaikan Faktor Daya Pada Beban 18,956 kW/6,600 V,” 2013.

BIODATA PENULIS LAPORAN AKHIR

1. Identitas Diri

Nama Lengkap : Fhatur Rohman
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Tempat dan Tanggal Lahir : Medan, 30 Agustus 2002
Jurusan / Program Studi : Teknik / Teknik Elektro
NIM : 2007220029
Alamat Rumah : Jl. Jati Sei Mencirim Deli Serdang
No Telepon / HP : 0895-6018-07085
Alamat E-mail : fhaturrohman3002@gmail.com
Judul Laporan Akhir : Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Rugi-Rugi Daya (Losses) Transformator Distribusi 3500 kVA
Nama Dosen Pembimbing : Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd.



2. Riwayat Pendidikan

No	Jenjang Pendidikan	Nama Sekolah	Tempat	Tahun Ijazah
1	SD Sederajat	SDN 067245	Medan	2014
2	SMP Sederajat	SMP Negeri 10 Medan	Medan	2017
3	SMA Sederajat	SMK Negeri 2 Medan	Medan	2020

Medan, 28 Oktober 2024

Fhatur Rohman