

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN BEBAN PADA
PENGUNAAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI 3 PHASA
HUBUNGAN BINTANG-ZIGZAG DI PT. MORAWA ELECTRIC
TRANSBUANA**

*Diajukan untuk melengkapi tugas-tugas sebagai Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana
Teknik (S.T) pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Oleh :

ARIF ANDIRA SIAHAAN
1507220081



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
M E D A N
2019**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

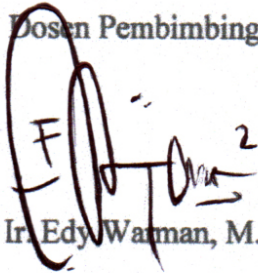
Nama : Arif Andira Siahaan
NPM : 1507220081
Program Studi : Teknik Elektro
Judul skripsi : Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada
Penggunaan Transformator Distribusi 3 Phasa Hubungan
Bintang-Zigzag Di PT. Morawa Electric Transbuana

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, 26 september 2019

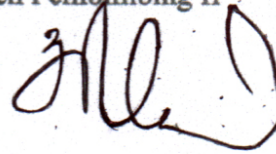
Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I



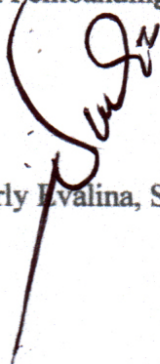
Ir. Edy Warman, M.T.

Dosen Pembimbing II



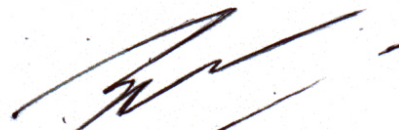
Ir. Zul Arsil Siregar

Dosen Pembanding/Penguji I



Noorly Ewalina, S.T., M.T

Dosen Pembanding / Penguji II



M. Safril, S.T., M.T



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Arif Andira Siahaan
Tempat /Tanggal Lahir : Rantauprapat /30 mei 1997
NPM : 150220081
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Penggunaan Transformator Distribusi 3 Fasa Hubungan Bintang-Zigzag Di PT. Morawa Electric Transbuana”

bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil 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/kesarjanaan 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, 15 Oktober 2019

Saya yang menyatakan,



Arif Andira Siahaan

ABSTRAK

Pada sistem distribusi, Ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi 3 phasa kerap kali terjadi. Ketidakseimbangan tersebut diakibatkan waktu pengoperasian beban-beban yang tidak bersamaan. Adanya ketidakseimbangan tersebut mengakibatkan mengalirnya arus di penghantar netral transformator. Arus yang mengalir pada penghantar netral tersebut menyebabkan losses (rugi-rugi). karena sulitnya menghindari gejala ketidakseimbangan tersebut kebanyakan pelanggan PLN khususnya industri yang menggunakan beban 3 phasa, memilih ukuran penghantar netral yang sama dengan penghantar fasanya atau menggunakan transformator dengan hubungan belitan tertentu. Salah satunya hubungan zigzag (interconnected star) guna mengurangi besar arus netral semakin membesar dan menjaga tegangan dalam kondisi stabil dari beban yang berubah-ubah. Pada tugas akhir ini penelitian dilakukan untuk meneliti pengaruh pembebanan yang tidak seimbang pada arus netral, tegangan, dan rugi-rugi daya sebuah trafo distribusi hubungan belitan bintang-zigzag. Setelah dianalisis, diperoleh bahwa pada pembebanan tertinggi pukul 10.20 wib ketidakseimbangan beban terjadi sebesar 9,5 %, Besar arus netral 7,5 A dan ketidakseimbangan tegangan 1%, tidak melebihi standar PLN. Arus netral tertinggi justru ada pada pukul 16.30 wib yaitu 6,5 A dengan kondisi pembebanan 26,41%. Sedangkan ketidakseimbangan tegangan hampir sama berada pada rentang 1% - 1,01%. Dan rugi-rugi daya terbesar ada pada pukul 11.50 wib sebesar 0,029 watt

Kata kunci : Ketidakseimbangan Beban, Belitan Zigzag, Arus Netral, Losses

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum wr.wb

Puji syukur kehadirat ALLAH SWT atas rahmat dan karunianya yang telah menjadikan kita sebagai manusia yang beriman dan insya ALLAH berguna bagi semesta alam. Shalawat dan salam kita sampaikan kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad SAW yang mana beliau adalah suri tauladan bagi kita semua dan telah membawa kita dari zaman kebodohan menuju zaman yang penuh dengan ilmu pengetahuan.

Tulisan ini dibuat sebagai tugas akhir untuk memenuhi syarat dalam meraih gelar sarjana pada Fakultas Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Adapun judul tugas akhir ini adalah “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Penggunaan Transformator Distribusi 3 Fasa Hubungan Bintang-Zigzag Di PT. Morawa Electric Transbuana.”

Selesaiannya penulisan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, oleh karena itu penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua tercinta, yang dengan cinta dan kasih sayang setulus jiwa mengasuh, mendidik dan membimbing dengan segenap ketulusan hati tanpa mengenal kata lelah sehingga penulis bisa seperti sekarang ini.
2. Bapak Munawar Alfansury siregar, S.T, M.T, Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T, M.T, Selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Bapak Ir. Edy Warman Siregar Selaku Dosen Pembimbing I yang membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.
5. Bapak Zul Arsil Selaku Pembimbing II yang membantu dan memberikan arahan dalam Penyelesaian Tugas Akhir Ini.
6. Dosen penguji I Ibuk Noorly Evalina, S.T, M.T, dan penguji II bapak M. Safril, S.T, M.T,

7. Seluruh Dosen di Fakultas Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Miashara Azh-Zukhruv yang saya sayangi yang ikut memberikan motivasi, menemani dalam semangat dan memberikan doa terbaik bagi penulis selama pengerjaan tugas akhir.
9. Bapak Sularto pekerja pabrik yang selalu siap membantu saya tanpa pamrih selama penelitian di pabrik
10. Teman-teman Seperjuangan Teknik Elektro A-1 Pagi 2015 yang sudah memberi dukungan, masukkan dan motivasi kepada penulis.

Penulis sangat menyadari bahwa penelitian ini belum sempurna adanya, sehingga kritik dan saran dari seluruh pembaca sangat penulis harapkan demi kesempurnannya laporan penelitian ini. Semoga Allah SWT, Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, melimpahkan rahmat-Nya kepada Bapak/Ibu serta rekan rekan, sebagai imbalan atas segala jasa yang telah diberikan kepada penulis.

Akhir kata penulis mengharapkan semoga tulisan ini dapat menambah dan memperkaya lembar khazanah pengetahuan bagi para pembaca sekalian dan khususnya bagi penulis sendiri. Sebelum dan sesudahnya penulis mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alakum wr.wb

Medan, 25 September 2019

Penulis

Arif Andira Siahaan
1507220081

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penulisan	2
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat penelitian	4
1.6. Metode Penulisan.....	4
1.7. Sistematika Penulisan	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Pustaka Relevan	7
2.2. Landasan Teori	8
2.3. konstruksi Transformator	9
2.4. Prinsip Kerja Transformator	11
2.5. Bagian-Bagian Transformator	13
2.5.1. kumparan transformator	13

2.5.2. Inti Besi	14
2.5.3. <i>Bushing</i>	15
2.5.4. Tangki.....	18
2.5.5 Minyak Transformator	20
2.5.6. <i>Tap Changer</i>	20
2.5.7. Sistem Pendingin Transformator.....	22
2.5.8. Isolasi Belitan Transformator.....	23
2.5.9. Peralatan Proteksi.....	23
2.6. Transformator 1 Phasa Dan 3 Phasa.....	26
2.7. Keadaan Transformator Tanpa Beban.....	28
2.8. Keadaan Transformator Berbeban.....	31
2.9. Transformator Distribusi	32
2.10. Daya Pada Saluran Distirbusi.....	33
2.11. Arus Beban Penuh	34
2.12. Efisiensi Transformator	34
2.13. Hubungan Transformator 3 Fasa.....	36
2.13.1. Hubungan Bintang (Y/Star)	37
2.13.2. Hubungan Segitiga (Δ /Delta)	38
2.13.3. Hubungan Zigzag (Z)	40
2.14. Transformator Hubungan Bintang Zigzag	42
2.15 Jenis-Jenis Hubungan Belitan Transformator Tiga Fasa	43
2.15.1 Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y)	44
2.15.2. Hubungan Bintang-Delta (Y- Δ)	45
2.15.3. Hubungan Delta-Bintang (Δ -Y)	45

2.15.4. Hubungan Delta-Delta (Δ - Δ)	46
2.16. Beban Seimbang dan Beban Tidak Seimbang	47
2.16.1. Beban Seimbang Terhubung Delta (Δ)	49
2.16.2. Beban Seimbang Terhubung Bintang (Y)	49
2.16.3. Beban Tidak Seimbang Terhubung Delta (Δ)	49
2.16.4. Beban Tidak Seimbang Terhubung Bintang (Y)	50
2.17. Arus Netral	51
2.18. Sistem Tenaga Listrik.....	53
2.18.1. sistem pembangkit	54
2.18.2. Jaingan Transmisi	55
2.18.3. Jaringan Distribusi	56

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat Penelitian.....	58
3.2. Data Transformator	58
3.3. Data Kabel Penghantar.....	58
3.4. Data Pembebanan	59
3.5. Flowchart Penelitian.....	60

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Ketidakseimbangan Pada Trafo Yzn5.....	62
4.2. Analisis Besar Pembebanan Terhadap Besar Arus Netral Yang Muncul	64
4.3. Analisi Ketidakseimbangan Tegangan	65

4.4. Analisis Besar Rugi-Rugi Daya	64
4.4.1 Besar Rugi-Rugi Daya Arus Netral.....	68
4.4.2 Besar Rugi-Rugi Daya Arus Grounding	64

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan.....	73
5.2. Saran.....	74

DAFTAR PUSTAKA	75
----------------------	----

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Macam-Macam Pendingin Pada Trafo.	22
Tabel 2.2 Standar Temperature Rise Pada Klas Isolasi	59
Tabel 3.1 Data Hasil Pengukuran	59
Tabel 4.1 Rata-rata Ketidakseimbangan Beban Dalam Jam Tertentu..	63
Tabel 4.2 Pembebanan Dan Arus Netral.....	65
Tabel 4.3 Keseimbangan Tegangan Dan Arus Netra.....	67
Tabel 4.4 Rugi-rugi Daya Yzn5	71
Tabel 4.5 Hasil Akumulasi Seluruh Data	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Teori dasar transformator	8
Gambar 2.2 Transformator Ideal.....	9
Gambar 2.3 Tipe Inti	10
Gambar 2.4 Tipe cangkang	11
Gambar 2.5 Skematik Diagram Transformator 1 Phasa	12
Gambar 2.6 Bagian – Bagian Utama Transformator	13
Gambar 2.7 Belitan Transformator	14
Gambar 2.8 Inti Besi	14
Gambar 2.9 <i>Bushing</i>	15
Gambar 2.10 Bagian-Bagian <i>Bushing</i> Konduktor, Keramik, Minyak Lapisan Kapasitansi, <i>Tap Bushin</i> , <i>Flange</i>	16
Gambar 2.11 Kertas Isolasi <i>Bushing</i>	17
Gambar 2.12 Konservator	18
Gambar 2.13 Silica Gel.....	18
<i>Gambar 2.14</i> Konstruksi Konservator Dengan <i>Rubber Bag</i> . <i>Connecting flange</i> <i>(1)</i> , <i>pipe connecting to breather (2)</i> , <i>straps (3)</i> , <i>aircell (4)</i> , <i>conservator (5)</i> , <i>oil level indicator (6)</i> , <i>float arm (7)</i> , <i>float (8)</i> .	19
Gambar 2.15 <i>Dehydrating Breather</i>	19
Gambar 2.16 Minyak Transformator	20
Gambar 2.17 <i>Diverter switch</i> dan <i>Selektor Switch</i>	21
Gambar 2.18 Kontak Switching Pada Diverter Dengan Media Pemadaman Minyak.....	22

Gambar 2.19 <i>Conventional Transformer</i>	25
Gambar 2.20 Konstruksi tipe inti 1 phasa dan 3 phasa	26
Gambar 2.21 Skematik Diagram dan Vektor Diagram Transformator Tanpa Beban	28
Gambar 2.22 Skematik Diagram Transformator Berbeban	31
Gambar 2.23 Trafo Distribusi	33
Gambar 2.24 Transformator Tiga Phasa Hubungan Bintang.....	37
Gambar 2.25 Transformator Tiga Phasa Hubungan Segitiga/Delta.....	39
Gambar 2.26 Belitan Sekunder Zig-Zag	41
Gambar 2.27 Diagram Fasor Hubungan Zigzag	42
Gambar 2.28 Diagram <i>One-Line</i> Bintang-Zigzag (Yzn5)	43
Gambar 2.29 Transformator Hubungan Y-Y	44
Gambar 2.30 Transformator Hubungan Y- Δ	45
Gambar 2.31 Transformator Hubungan Δ - Δ	46
Gambar 2.31b Transformator Hubungan Δ - Δ	46
Gambar 2.32 Vektor diagram seimbang dan Vektor diagram Tidak seimbang	47
Gambar 2.33 Beban Tidak Seimbang Terhubung Delta	50
Gambar 2.34 Beban Tidak Seimbang Terhubung Bintang Empat Kawat	51
Gambar 2.35 Skema Sistem Tenaga Listrik.....	54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik adalah energi yang paling dibutuhkan pada saat sekarang ini, tahun demi tahun kebutuhan akan energi listrik untuk rumah tangga bahkan industri terus meningkat, tiap tahun pembangunan industri, perumahan, fasilitas publik dan lain-lain terus bertambah demi kelangsungan dan mobilitas sebuah negara termasuk indonesia. Kualitas energi listrik masih menjadi sesuatu yang diupayakan untuk tersalur semaksimal mungkin. dalam pemakaian dan transformasi listrik ke dalam energi lain pun masih selalu menjadi perhatian kusus. Itu sebabnya dalam penyaluran energi listrik alat-alat kelistrikan selalu diperhatikan fungsi serta penggunaannya, salah satunya adalah transformator.

Transformator merupakan perangkat vital yang digunakan dalam sistem ketenagalistrikan yang berperan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan listrik. Pada aplikasinya, transformator menggunakan berbagai macam hubungan belitan yang bertujuan untuk meningkatkan performa fungsi transformator tersebut. Belitan transformator tersebut di kombinasikan guna menghasilkan pendistribusian maksimal energi listrik dan rugi-rugi seminimal mungkin karena beban-beban.

Adapun Beban dalam ketenagalistrikan terbagi menjadi dua keadaan yaitu keadaan beban seimbang dan tidak seimbang. Namun pada kenyataannya beban-beban dalam kelistrikan lebih sering ditemukan tidak seimbang Pada dasarnya

dilakukan pembagian beban yang merata, tetapi karena ketidaksamaan waktu penyalaan beban tersebut, maka menimbulkan ketidakseimbangan beban yang berdampak pada penyediaan tenaga listrik. Ketidakseimbangan beban antara fasa (fasa R, fasa S dan fasa T) menyebabkan arus mengalir di penghantar netral trafo (Julius Sentosa, dkk. 2006). Parahnya Beban tidak seimbang punya pengaruh kurang baik pada sebuah transformator jika terjadi terus menerus, salah satunya banyaknya daya dan energi yang terbuang percuma.

Transformator zigzag merupakan transformator dengan tujuan khusus. Salah satu aplikasinya adalah menyediakan titik netral untuk sistem listrik yang tidak memiliki titik netral. Pada transformator zigzag masing-masing elemen lilitan tiga fasa dibagi menjadi dua bagian dan masing-masing dihubungkan pada kaki yang berlainan dan memiliki ciri khusus, yaitu belitan primer memiliki tiga belitan, belitan sekunder memiliki enam belitan dan biasa digunakan untuk beban yang tidak seimbang (asimetris).

Pada aplikasinya, hubungan bintang-zigzag lebih banyak digunakan daripada hubungan delta-star. Hal tersebut dikarenakan hubungan bintang-zigzag salah satunya dapat mengatasi atau mengurangi masalah dari ketidakseimbangan beban yaitu mengalirnya arus netral.

Oleh karena hal diatas, penulis mencoba menganalisa pengaruh besar pembebanan yang dalam keadaan tidak seimbang terhadap penggunaan transformator 3 fasa pada hubungan belitan bintang-zigzag yang terdapat di PT. Morawa Electric Transbuana tersebut

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah tugas akhir ini adalah sebagai berikut

1. Seberapa besar rata-rata ketidakseimbangan beban pada trafo hubungan bintang-zigzag yang ada di PT.Morawa Electric Transbuana?
2. Bagaimana pengaruh besar pembebanan yang tidak seimbang terhadap arus netral dan ketidakseimbangan tegangan transformator bintang-zigzag di PT.Morawa Electric Transbuana tersebut?
3. Seberapa besarkah rugi-rugi dalam keadaan ketidaksetimbangan beban pada tiap pembebanan yang berbeda pada transformator di PT.Morawa Electric Transbuana?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut

1. Mengetahui besar rata-rata ketidakseimbangan beban di waktu yang berbeda pada trafo hubungan bintang-zigzag di PT.Morawa Electric Transbuana
2. Untuk mengetahui pengaruh besar pembebanan yang tidak seimbang terhadap besar arus netral dan ketidakseimbangan tegangan yang muncul di transformator bintang-zigzag di PT.Morawa Electric Transbuana tersebut?
3. Untuk mengetahui seberapa besar rugi-rugi daya yang terjadi akibat ketidaksetimbangan beban pada transformator di PT. Morawa Electric Transbuana tersebut

1.4 Batasan Masalah

Dalam tugas akhir ini terdapat batasan masalah yang dikaji yaitu;

1. Hanya membahas pengaruh ketidakseimbangan beban pada transformator distribusi 3 phasa hubungan bintang-zigzag pada jam yang telah ditentukan sebelumnya
2. Transformator yang dibahas hanya pada gardu distribusi PT. Morawa Electric Transbuana
3. Hanya membahas rugi-rugi akibat arus netral trafo
4. Tidak membahas kerugian dari segi biaya akibat ketidakseimbangan beban

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah

1. Hasil penelitian bisa memberikan pemahaman atau gambaran terhadap penyebab dan pengaruh ketidakseimbangan beban
2. Mengetahui kinerja transformator 3 phasa hubung bintang-zigzag saat ketidakseimbangan beban
3. Sebagai bahan referensi bagi para mahasiswa teknik elektro dalam penelitian ataupun kajian lain yang masih berhubungan

1.6 Metodologi Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur/Pustaka

Pada tahapan ini dilakukan pedalaman materi untuk menyelesaikan masalah yang dirumuskan, dilakukan studi literature dan jurnal yang mendukung penelitian agar dapat digunakan sebagai panduan informasi untuk

mendukung penyelesaian pengolahan data penelitian, informasi dan studi literatur juga sangat di perlukan untuk pelaksanaan penelitian.

2. Wawancara

Wawancara merupakan komunikasi verbal untuk mengumpulkan informasi dari seseorang. Dengan menggunakan tanya jawab secara langsung terhadap pejabat instansi terkait/ataupun karyawan untuk mendapatkan data penelitian yang diperlukan.

3. Riset

Riset/Pengambilan data dilakukan penulis guna untuk melengkapi berbagai macam data-data dari tulisan yang akan diselesaikan oleh penulis agar lebih akurat dan dapat dipertanggung jawabkan

4. Bimbingan

Bimbingan merupakan komunikasi antara penulis terhadap dosen pembimbing guna untuk memperbaiki tulisan penulis bila ada kekurangan maupun kesalahan dalam penulisan.

1.7 Sistematika Penulisan

Agar penulisan tugas akhir ini dapat dilaksanakan dengan mudah dan sistematis, maka pada penulisan tugas akhir ini disusun tahapan-tahapan sebagai berikut :

1. Pada BAB 1 menyampaikan tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan.

2. Pada BAB 2 landasan teori, berisi membahas tentang teori-teori yang berhubungan dengan analisis ini, yang diperoleh dari berbagai referensi yang dijadikan landasan untuk melakukan analisis ini.
3. Pada BAB 3 metodologi penelitian, berisi hasil pengukuran serta data-data pengukuran yang didapat dari pengujian.
4. Pada BAB 4 analisa dari hasil data-data pengukuran yang sudah dilakukan
5. Pada BAB 5 berisi kesimpulan dari penelitian

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

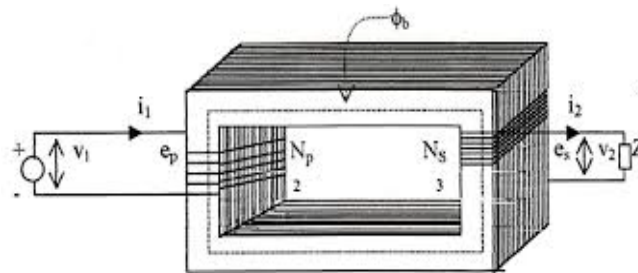
Ketidakseimbangan beban pada suatu sistem distribusi tenaga listrik selalu terjadi dan penyebab ketidakseimbangan tersebut adalah pada beban-beban satu fasa pada pelanggan jaringan tegangan rendah. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut muncullah arus di netral trafo. Arus yang mengalir di netral trafo ini menyebabkan terjadinya *losses* (rugi-rugi), yaitu *losses* akibat adanya arus netral pada penghantar netral trafo dan *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah. Setelah dianalisa, diperoleh bahwa bila terjadi ketidakseimbangan beban yang besar (28,67%), maka arus netral yang muncul juga besar (118,6A), dan *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah semakin besar pula (8.62%). (Sentosa, 2006).

Apabila ketidakseimbangan beban terjadi pada transformator secara terus menerus maka hal tersebut dapat menyebabkan penurunan performa transformator. Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian transformator 3 fasa Feedback 61-103 pada berbagai hubungan belitan yang dilakukan di Laboratorium Listrik Kapal dan Otomatisasi. Pengujian dilakukan dengan cara mengambil data yang diperlukan untuk perhitungan efisiensi, regulasi tegangan, dan ketidakseimbangan beban yang digunakan untuk mengetahui pengaruh beban tidak seimbang terhadap performa pada masing-masing belitan transformator. Dari hasil pengujian, efisiensi tertinggi sebesar 93,8 % pada hubungan belitan Y-Zigzag Y dan beban terhubung Δ . Regulasi tegangan terendah sebesar 0,9 % pada

hubungan belitan Y- Δ dan beban terhubung Y dan beban terhubung Δ . Ketidakseimbangan beban terendah sebesar 5,0 % pada hubungan belitan Δ - Δ dan beban terhubung Y. (Hanif, 2017).

2.2 Landasan Teori

Transformator merupakan sebuah perangkat listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui gandengan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis. (Wijaya, 2001).



Gambar 2.5 Skematik Diagram Transformator 1 Fasa
(Sumber: Teori Transformator Oleh Sumanto, 1991)

Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu Transformator pembangkit, Transformator distribusi dan Transformator gardu induk penyaluran.

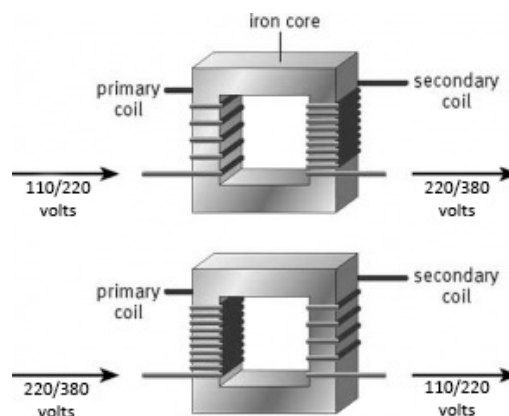
Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan. Secara umum transformator terdapat dua sisi kumparan, yaitu sisi primer (N_p) dan sisi sekunder (N_s), seperti terlihat gambar 2.1. Dimana jika tegangan pada primer lebih besar dari sisi sekunder maka disebut transformator

penurun tegangan. sebaliknya bila tegangan pada sisi sekunder lebih besar dari pada primer, maka dinamakan transformator penaik tegangan.

Transformator yang di pakai pada jaringan tenaga listrik merupakan transformator tenaga. Di samping itu ada jenis – jenis transformator lain yang banyak dipergunakan, dan yang pada umumnya merupakan transformator yang jauh lebih kecil. Misalnya transformator yang dipakai di rumah tangga untuk menyesuaikan tegangan dari lemari es dengan yang dari jaringan umum, atau transformator yang lebih kecil, yang dipakai pada lampu TL, atau lebih kecil lagi “ mini “ yang dipergunakan pada berbagai alat elektronik, seperti pesawat penerima radio, televisi, dan sebagainya

2.3 Konstruksi Transformator

Elemen-elemen sederhana dari transformator terdiri dari dua kumparan yang memilik induktansi bersama dan inti baja yang dilaminasi. Kedua kumparan diisolasi satu sama lain dan inti baja. Bagian lain yang diperlukan adalah beberapa wadah yang cocok untuk inti dan belitan yang dirancang. (Theraja, 1978)



Gambar 2.2 Transformator Ideal

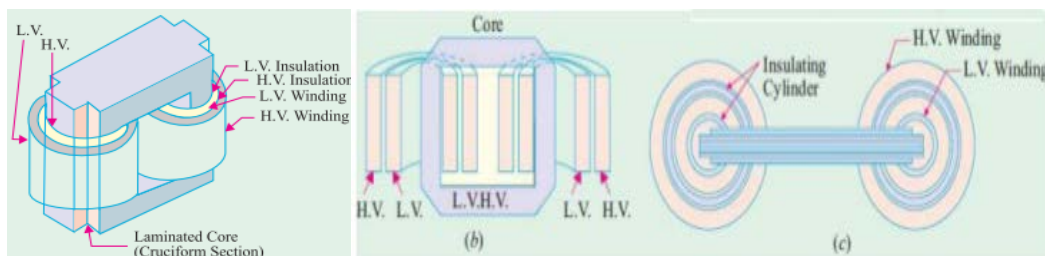
(Sumber: A Text-book of Electrical Technology oleh Theraja BL.,1978)

Dua kumparan pada trafo adalah kumparan primer dan sekunder yang saling menginduksi dan dibelitkan pada inti ferromagnetik. Konstruksi transformator daya biasanya terdiri dari inti yang dilaminasi, tangki, sistem pendingin, terminal dan *bushing*. Berdasarkan letak kumparan terhadap inti transformator, terdapat dua macam konstruksi yakni tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*). Kedua tipe ini menggunakan inti yang berlaminasi yang terisolasi satu sama lain dengan tujuan untuk mengurangi rugi - rugi dan arus eddy. umumnya transformator dapat dibedakan dua jenis menurut konstruksinya, yaitu:

1. Tipe Inti (*Core Type*)

Pada transformator tipe inti, kumparan atau lilitan mengelilingi inti dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf L atau huruf U. Konstruksi (peletakan) kumparan pada praktiknya diatur saling berhimpitan (*interleaving*) antara kumparan primer dan kumparan sekunder seperti gambar 2.3 di bawah.

Kumparan tegangan tinggi diletakkan di sebelah luar karena pertimbangan isolasi tegangan tinggi lebih kompleks mengatasinya dan lebih sering terkena gangguan dibandingkan dengan tegangan rendah, sehingga jika terjadi kerusakan lebih mudah membuka kumparan tersebut

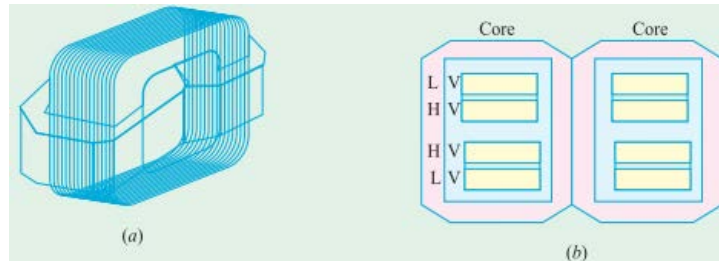


Gambar 2.3 Tipe Inti.

(Sumber: A Text-book of Electrical Technology oleh Theraja BL.,1978)

2. Tipe Cangkang (*Shell Type*)

Pada tipe cangkang, kumparan atau belitan transformator dikelilingi oleh inti dan konstruksi intinya berbentuk huruf E, huruf I, dan huruf F.



Gambar 2.4 Tipe cangkang.

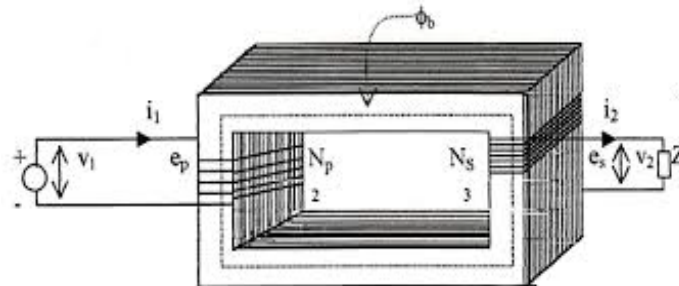
(Sumber: A Text-book of Electrical Technology oleh Theraja BL.,1978)

Dalam jenis cangkang (*shell type*) kumparan dililitkan sekitar kaki tengah dari inti berkaki tiga dengan laminasi silikon-steel. Umumnya digunakan untuk transformator yang bekerja pada frekuensi dibawah beberapa ratus Hz. Silikon steel memiliki sifat-sifat yang dikehendaki yaitu murah, rugi inti rendah dan permeabilitas tinggi pada rapat fluks tinggi.

2.4 Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti (*core*) yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup, maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer, maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, serta arus sekunder jika rangkaian sekunder

dihubungkan dengan beban, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetis). (Wijaya, 2001).



Gambar 2.5 Skematik Diagram Transformator 1 Phasa
(Sumber: Teori Transformator Oleh Sumanto, 1991)

Dimana jika dituliskan dalam persamaan matematikanya adalah

$$e_1 = \frac{d\Phi}{dt}(-N_1) \text{ dan } e_2 = \frac{d\Phi}{dt}(-N_2) \dots \dots \dots (2.1)$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{\frac{d\Phi}{dt}(-N_1)}{\frac{d\Phi}{dt}(-N_2)} \dots \dots \dots (2.2)$$

Menjadi : $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (2.3)$

Dimana:

e_1 = ggl induksi/tegangan sesaat pada kumparan primer (V).

e_2 = ggl induksi /tegangan sesaat pada kumparan sekunder (V).

E_1 = ggl induksi/tegangan efektif pada kumparan primer (V).

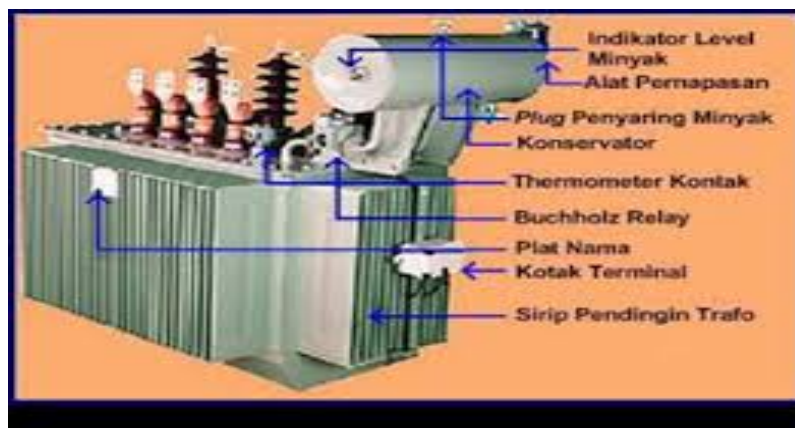
E_2 = ggl induksi/tegangan efektif pada kumparan sekunder (V).

N_1 = jumlah lilitan kumparan primer.

N_2 = jumlah lilitan kumparan sekunder.

2.5 Bagian – Bagian Transformator

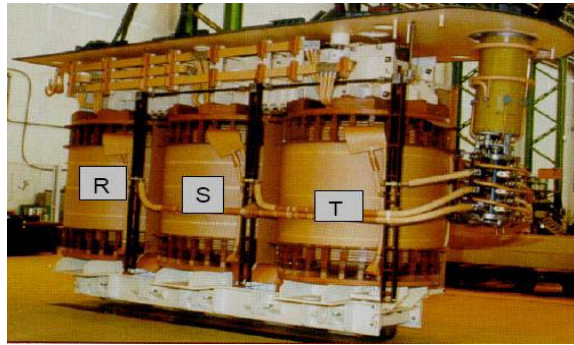
Transformator merupakan peralatan statis dimana rangkaian magnetik dan belitan yang terdiri dari 2 atau lebih belitan, secara induksi elektromagnetik, mentransformasikan daya (arus dan tegangan) sistem AC ke sistem arus dan tegangan lain pada frekuensi yang sama (IEC60076 -1 tahun 2011). Trafo menggunakan prinsip elektromagnetik yaitu hukum – hukum ampere dan induksi faraday, dimana perubahan arus atau medan listrik dapat membangkitkan medan magnet dan perubahan medan magnet / fluks medan magnet dapat membangkitkan tegangan induksi. Bagian – bagian utama pada transformator adalah sebagai berikut :



Gambar 2.6 Bagian – Bagian Utama Transformator

2.5.1 Kumparan Transformator

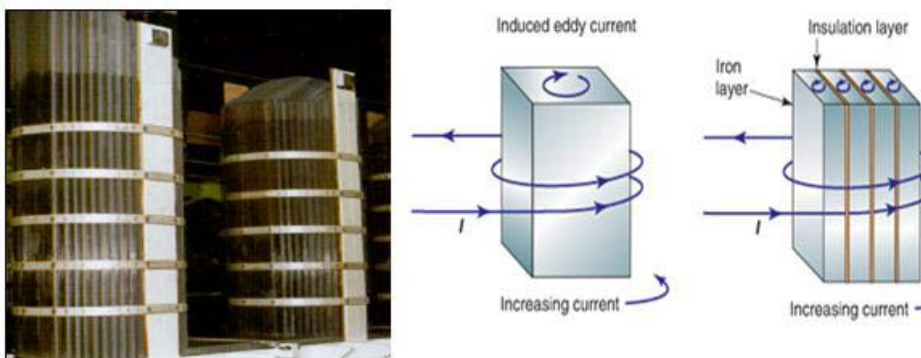
Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan fluks magnetik.



Gambar 2.7 Belitan Transformator

2.5.2 Inti Besi

Inti besi digunakan sebagai media mengalirnya fluks yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi dengan maksud untuk mengurangi *eddy current* yang merupakan arus sirkulasi pada inti besi hasil induksi medan magnet, dimana arus tersebut akan mengakibatkan rugi – rugi (*losses*).



Gambar 2.8 Inti Besi

2.5.3 Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar. *Bushing* terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor *bushing* dengan *body main tank* trafo.



Gambar 2.9 Bushing

Secara garis besar *bushing* dapat di bagi dalam empat bagian utama yaitu :

1. Isolasi

Berdasarkan media isolasi *bushing* terbagi menjadi 2 (IEC 60137 tahun 2008) yaitu :

a. *Bushing* Kondenser

Bushing kondenser umumnya dipakai pada tegangan rating *bushing* 72,5 kV ke atas. *Bushing* kondenser terdapat tiga jenis media isolasi (IEC 60137 tahun 2008) yaitu:

- *Resin Bonded Paper (RBP)*

Bushing tipe RBP adalah teknologi *bushing* kondenser yang pertama dan sudah mulai ditinggalkan.

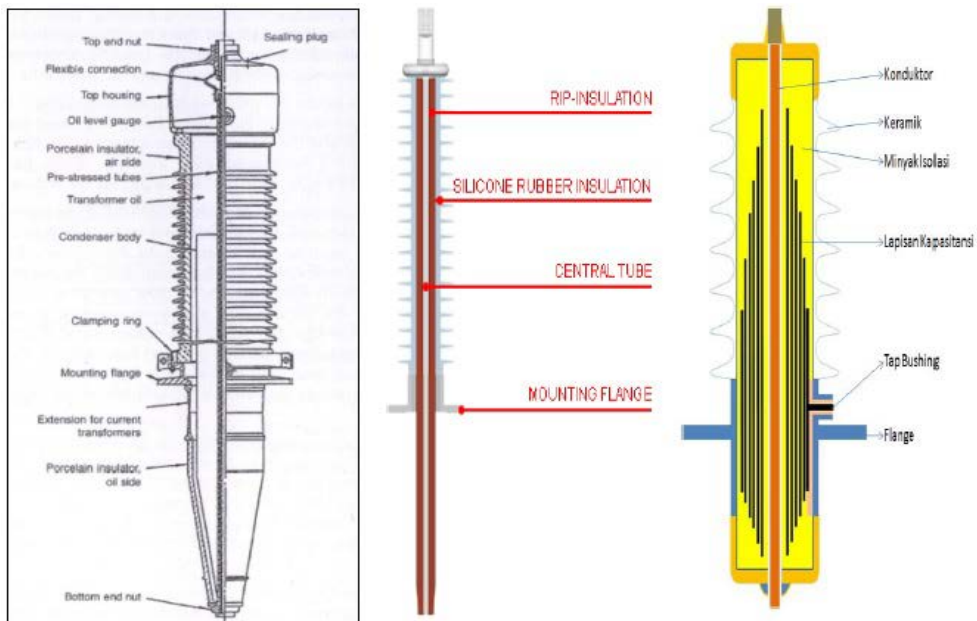
- *Oil Impregnated Paper (OIP)*

Pada tipe OIP isolasi yang digunakan adalah kertas dan minyak yang merendam kertas isolasi.

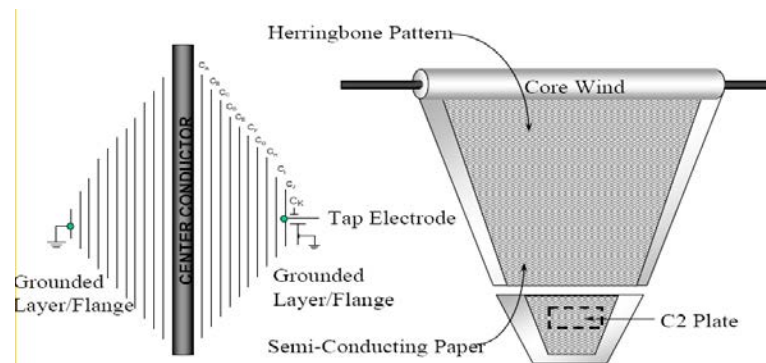
- *Resin Impregnated Paper (RIP)*

Pada tipe RIP isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.

Di dalam *bushing* kondenser terdapat banyak lapisan kapasitansi yang disusun secara seri sebagai pembagi tegangan. Pada *bushing* terdapat dua kapasitansi utama yang biasa disebut C1 dan C2. C1 adalah kapasitansi antara konduktor dengan tap *bushing*, dan C2 adalah kapasitansi dari tap *bushing* ke ground (*flange bushing*). Dalam kondisi operasi tap *bushing* dihubungkan ke ground, sehingga C2 tidak ada nilainya ketika *bushing* operasi.



Gambar 2.10 Bagian – Bagian *Bushing*. konduktor, keramik, minyak, lapisan kapasitansi, *tap bushing*, *flange*.



Gambar 2.11 Kertas Isolasi *Bushing*

b. *Bushing* Non-kondenser

Bushing non kondenser umumnya digunakan pada tegangan rating 72,5 kV ke bawah. Media isolasi utama *bushing* non-kondenser adalah isolasi padat seperti porcelain atau keramik.

2. Konduktor

Terdapat jenis – jenis konduktor pada *bushing* yaitu hollow conductor dimana terdapat besi pengikat atau penegang di tengah lubang konduktor utama, konduktor pejal dan flexible lead.

3. Klem Koneksi

Klem koneksi merupakan sarana pengikat antara stud *bushing* dengan konduktor penghantar di luar *bushing*.

4. Asesoris

Asesoris *bushing* terdiri dari indikasi minyak, *seal* atau *gasket* dan tap pengujian. *Seal* atau *gasket* pada *bushing* terletak di bagian bawah *mounting flange*.

2.5.4 Tangki

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada trafo, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat trafo mengalami kenaikan suhu.



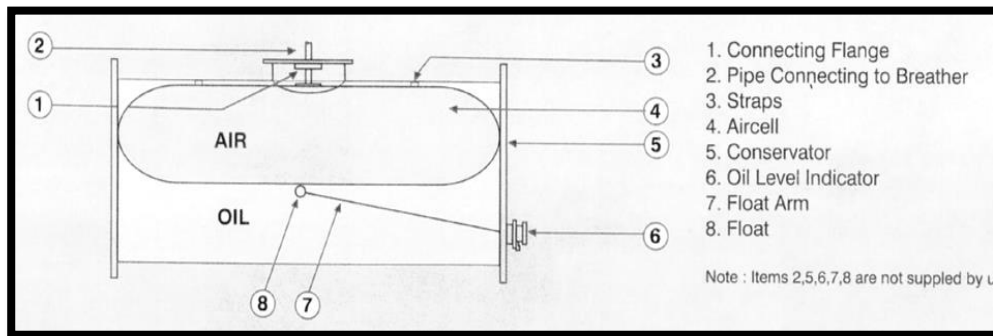
Gambar 2.12 Konservator

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara di dalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara di dalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi trafo tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar (untuk tipe konservator tanpa *rubber bag*), maka udara yang akan masuk ke dalam konservator akan difilter melalui silicagel sehingga kandungan uap air dapat diminimalkan.



Gambar 2.13 *Silica Gel*

Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan breather bag/ rubber bag, yaitu sejenis balon karet yang dipasang di dalam tangki konservator.



Gambar 2.14 Konstruksi Konservator Dengan *Rubber Bag*. *Connecting flange (1), pipe connecting to breather (2), straps (3), aircell (4), conservator (5), oil level indicator (6), float arm (7), float (8).*

Silicagel sendiri memiliki batasan kemampuan untuk menyerap kandungan uap air sehingga pada periode tertentu silicagel tersebut harus dipanaskan bahkan perlu dilakukan penggantian. *Dehydrating Breather* merupakan teknologi yang berfungsi untuk mempermudah pemeliharaan silicagel, dimana terdapat pemanasan otomatis ketika silicagel mencapai kejenuhan tertentu.



Gambar 2.15 *Dehydrating Breather*

2.5.5 Minyak Transformator

Minyak isolasi pada trafo berfungsi sebagai media isolasi, pendingin dan pelindung belitan dari oksidasi. Minyak isolasi trafo merupakan minyak mineral yang secara umum terbagi menjadi tiga jenis, yaitu parafinik, naphthanik dan aromatik. Antara ketiga jenis minyak dasar tersebut tidak boleh dilakukan pencampuran karena memiliki sifat fisik maupun kimia yang berbeda.



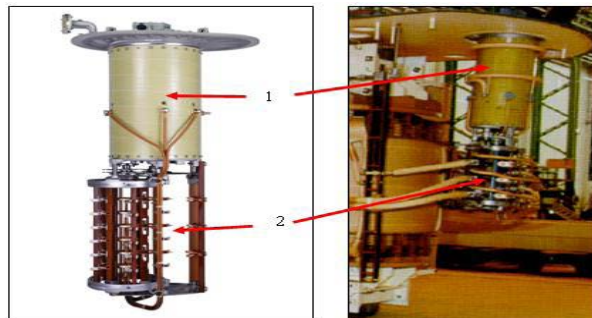
Gambar 2.16 Minyak Transformator

2.5.6 Tap Changer

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Trafo dituntut memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan sehingga dapat merubah ratio antara belitan primer dan sekunder dan dengan demikian tegangan *output* sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem berapapun tegangan *input* primernya. Penyesuaian ratio belitan ini disebut *Tap changer*. Proses perubahan ratio belitan ini dapat dilakukan pada saat trafo sedang berbeban (*On load tap changer*) atau saat trafo tidak berbeban (*Off Circuit tap changer/ De Energize Tap Changer*). Tap changer terdiri dari *Selector Switch*, *Diverter switch* dan Tahanan transisi

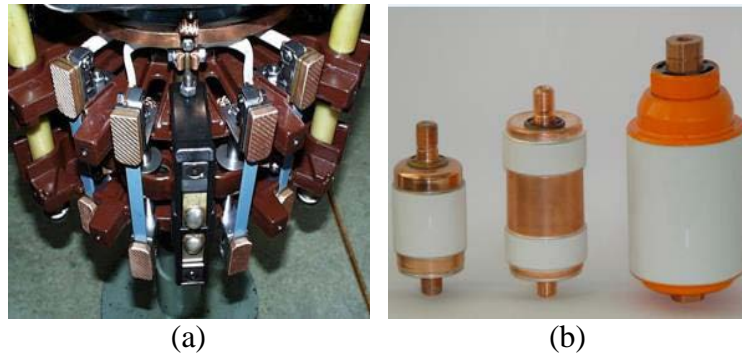
Dikarenakan aktifitas tap changer lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah. Selector switch merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal terminal untuk menentukan posisi tap atau ratio belitan primer. *Diverter switch* merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi.

Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.



Gambar 2.17 *Diverter switch* (1) *Selektor Switch* (2)

Media pendingin atau pemadam proses switching pada *diverter switch* yang dikenal sampai saat ini terdiri dari dua jenis, yaitu media minyak dan media vaccum. Jenis pemadaman dengan media minyak akan menghasilkan energi arcing yang membuat minyak terurai menjadi gas C_2H_2 dan karbon sehingga perlu dilakukan penggantian minyak pada periode tertentu. Sedangkan dengan metoda pemadam vaccum proses pemadaman arcing pada waktu switching akan dilokalisir dan tidak merusak minyak.



Gambar 2.18 Kontak Switching Pada Diverter Dengan Media Pemadaman Minyak (a) Kontak *Switching* Pada Diverter Dengan Media Pemadaman Vaccum (b).

2.5.7 Sistem Pendingin Transformator

Suhu pada trafo yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada trafo. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan.

Minyak isolasi trafo selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini dapat dibantu oleh adanya kipas dan pompa sirkulasi guna meningkatkan efisiensi pendinginan.

Tabel 2.1 Macam – macam Pendingin Pada Trafo

NO	Macam Sistem Pendingin	Media			
		Dalam Trafo		Luar Trafo	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1	AN			Udara	
2	AF				Udara
3	ONAN	Minyak		Udara	

4	ONAF	Minyak			Udara
5	OFAN		Minyak	Udara	
6	OFAF		Minyak		Udara
7	OFWF		Minyak		Air
8	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

2.5.8 Isolasi Belitan Transformator

Isolasi belitan merupakan tempat terlemah, jika dibandingkan dengan bagian- bagian lainnya. Bahan isolasi akan berubah sifat karena kenaikan temperatur. Maka dengan itu bahan-bahan isolasi yang dipergunakan untuk mengisolasi belitan memenuhi persyaratan:

- Kekuatan mekanis yang baik
- Kekuatan dielektrik yang tinggi
- Tidak larut dalam minyak transformator

Tabel 2.2 Standar Temperature Rise Pada Klas Isolasi

Klas Isolasi	Standar IEC (°C)
A	60
E	75
B	80
F	100
H	125

2.5.9 Peralatan Proteksi

Proteksi atau pengaman sebuah transformator terhadap akibat gangguan yang terjadi pada transformator itu sendiri atau pada bagian lain dari sistem tenaga listrik bersangkutan, secara umum dapat di golongan menjadi dua kelompok jenis pengaman, yaitu :

1. Pengaman obyek, yaitu proteksi transformator maupun sistem terhadap gangguan yang terjadi di dalam transformator itu sendiri, dan
2. Pengaman sistem, yaitu proteksi transformator terhadap gangguan yang terjadi dalam sistem listrik itu di luar transformator.

Gangguan – gangguan yang terjadi misalnya berupa :

1. Terjadinya arus lebih karena arus hubung singkat atau beban lebih,
2. Terjadinya hubungan tanah,
3. Terjadinya gangguan di dalam transformator,
4. Terjadinya gangguan disebabkan petir.

Sebuah transformator distribusi dengan daya yang relatif kecil biasanya mendapatkan pengaman yang sederhana terhadap arus lebih atau arus hubung singkat dengan sekring saja. Proteksi yang lebih lengkap akan menjadi terlampau mahal untuk daya terpasang yang tidak begitu besar ini. Sebaliknya transformator – transformator daya yang besar – besar pada umumnya dilengkapi dengan berbagai jenis pengaman untuk melindungi terhadap gangguan – gangguan yang dapat terjadi pada transformator itu sendiri maupun bagian lain dari sistem tenaga listrik.

1. Proteksi Transformator Distribusi

Berdasarkan peralatan proteksinya transformator distribusi yang terpasang di tiang dapat di kategorikan menjadi tiga :

- *Conventional Transformers*

Conventional transformers tidak memiliki peralatan proteksi terintegrasi terhadap petir, gangguan dan beban lebih sebagai bagian dari trafo itu. Oleh karena itu dibutuhkan *fuse cut out* untuk menghubungkan conventional

transformers dengan jaringan distribusi primer. *lightning arrester* juga perlu di tambahkan untuk trafo jenis ini.



Gambar 2.19 Conventional Transformers

- *Completely Self-Protecting (CSP) Transformers*

Completely self protecting (CSP) transformers memiliki peralatan proteksi terintegrasi terhadap petir, beban lebih, dan hubung singkat. *Lightning arrester* terpasang langsung pada tangki trafo sebagai proteksi terhadap petir. Untuk proteksi terhadap beban lebih, digunakan fuse yang dipasang di dalam tangki (*fuse* ini disebut dengan *weak link*). Proteksi trafo terhadap gangguan internal menggunakan hubungan proteksi internal yang terpasang antara belitan primer dengan *bushing* primer.

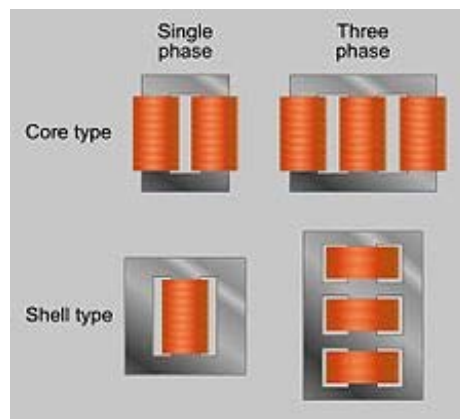
- *Completely Self-Protecting for Secondary Banking (CSPB) Transformers*

Completely self-protecting for secondary banking (CSPB) transformers mirip dengan *completely self protecting (CSP) transformers*, tetapi pada trafo jenis ini terdapat sebuah *circuit breaker* pada sisi sekunder, *circuit breaker* ini akan membuka sebelum *weak link (fuse)* melebur.

2.6 Transformator 1 Phasa dan 3 Phasa

Pada prinsipnya transformator tiga fasa sama dengan transformator satu fasa, perbedaannya sama seperti perbedaan sistem listrik satu fasa dengan listrik tiga fasa, yaitu mengenal sistem bintang (Y) dan segitiga (Δ), serta sistem zigzag. (Bayu, 2013).

Untuk menganalisa transformator daya tiga fasa dilakukan dengan menganggap transformator 3 fasa sebagai transformator 1 fasa, teknik perhitungannya pun sama, hanya untuk nilai akhir biasanya parameter tertentu (arus, tegangan, dan daya) transformator 3 fasa dikaitkan dengan nilai $\sqrt{3}$. (Bayu, 2013).



Gambar 2.20 konstruksi tipe inti 1 phasa dan 3 phasa

Besarnya ggl induksi baik primer maupun sekunder sama halnya dengan yang terjadi pada transformator satu phase, yang masing-masing besarnya adalah :

$$E_{A-B} = E_{\max 1} \cdot \sin \omega t$$

$$E_{B-C} = E_{\max 2} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$E_{C-A} = E_{\max 3} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Dimana :

E_{A-B} = besar ggl induksi pada kumparan I (volt)

E_{B-C} = besar ggl induksi pada kumparan II (volt)

E_{C-A} = besar ggl induksi pada kumparan III (volt)

E_{max} = besarnya tegangan maksimum (volt)

Transformator tiga fasa ini dikembangkan dengan alasan ekonomis, biaya lebih murah karena bahan yang digunakan lebih sedikit dibandingkan tiga buah transformator satu fasa dengan jumlah daya yang sama dengan satu buah transformator daya tiga fasa, lebih ringan dan lebih kecil sehingga mempermudah pengangkutan (menekan biaya pengiriman), serta untuk menangani operasinya hanya satu buah transformator yang perlu mendapat perhatian (meringankan pekerjaan perawatan). (Wijaya, 2001).

Transformator distribusi 3 fasa dapat juga dibangun di antara 3 pilihan, yaitu :

- a) 3 x 1 fasa, dimana terdiri dari 3 transformator 1 fasa identik
- b) 1 x 3 fasa, terdiri dari satu transformator konstruksi 3 fasa
- c) 2 x 1 fasa, terdiri dari konstruksi 2 transformator satu fasa yang identik

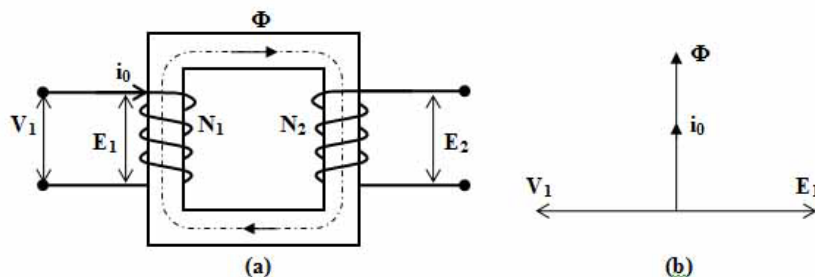
Transformator 3 x 1 fasa mempunyai ciri-ciri sebagai berikut :

- a. Kumparan primer dan sekunder dapat dibuat beberapa vektor grup dan angka lonceng sesuai dengan yang diinginkan.
- b. Ketiga transformator tersebut dapat juga dioperasikan ke beban menjadi satu fasa, yaitu dihubungkan paralel (karena ketiga transformator tersebut identik)

- c. Dengan daya yang sama untuk ketiga fasa, maka fasa untuk 3 x 1 fasa dibanding dengan 1 x 3 fasa lebih berat dan lebih mahal.
- d. Tegangan-tegangan untuk ketiga fasanya, primer dan sekunder benar-benar seimbang. Sedangkan transformator 1 x 3 fasa mempunyai ciri-ciri yaitu :
- Konstruksinya sudah di rancang permanen dari pabrik pembuatnya
 - Dapat digunakan untuk mensuplai beban satu fasa, maka tiap fasa maksimal beban yang dapat ditanggungnya hanya sepertiga dari daya tiga fasa.
 - Transformator ini lebih ringan, sehingga lebih murah karena bahan materialnya lebih kecil.
 - Keseimbangan tegangan antara ketiga fasanya, primer dan sekunder tidak terlalu simetris.

2.7 Keadaan Transformator Tanpa Beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan sesaat V_1 yang sinusoidal dan kumparan sekundernya merupakan rangkaian yang tidakdibebani (*no load*), maka akan mengalirlah arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan dengan menganggap kumparan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 (induktif). (Wijaya, 2001).



Gambar 2.21 Skematik Diagram dan Vektor Diagram Transformator Tanpa Beban

(Sumber: Dasar-Dasar Mesin Listrik oleh Wijaya, Mohctar 2001)

Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal dalam rangkaian.

$$\Phi = \Phi_{\text{maks.}} \sin \omega t \dots\dots\dots (2.4)$$

Fluks ini menginduksikan tegangan sesaat dalam kumparan primer yang sama dengan (berdasarkan hukum Faraday):

$$e_1 = - \frac{d\lambda_1}{dt} = - N_1 \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

λ_1 = gandingan fluks dalam kumparan primer

Φ = fluks (dianggap semua terkurung di dalam inti)

N_1 = jumlah lilitan dalam kumparan primer

Dengan menstubsikan persamaan 2.4 dan 2.5:

$$e_1 = - \frac{d(\Phi_{\text{maks}} \sin \omega t)}{dt}$$

$$e_1 = - N_1 \omega \Phi_{\text{maks}} \cos \omega t \text{ (volt) (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \Phi) \dots\dots\dots (2.6)$$

Pada kondisi maksimum $e_{1\text{maks}} = N_1 \omega \cdot \Phi_{\text{maks}}$, dimana $\omega = 2\pi f$, sehingga harga efektifnya :

$$e_1 = \frac{N_1 \omega \Phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}}$$

$$e_1 = \frac{N_1 2\pi f \Phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}}$$

$$e_1 = \frac{N_1 2 \times 3,14 f \Phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Jika tegangannya bukan merupakan gelombang sinusoidal (*sinus wave*) maka persamaan 2.7 menjadi :

$$E_1 = 4(\text{faktor bentuk}) \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_{\text{maks}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana faktor bentuk (*form factor*) gelombang sinusoidal :

$$= \frac{\text{nilai efektif (rms value)}}{\text{nilai rata – rata (average value)}} = 1,11$$

Umumnya penurunan tegangan resistif (*resistif voltage drop*) dapat diabaikan, sehingga dapat ditulis persamaan berikut :

$$\Phi_{\text{maks}} = \frac{V_1}{4,44.f.N_1} \dots\dots\dots(2.9)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks bersama tadi menimbulkan:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$e_2 = N_2\omega \Phi_{\text{maks}} \cos \omega t \dots\dots\dots (2.11)$$

Harga efektifnya,

$$E_2 = \frac{e_2 \text{ maks}}{\sqrt{2}}$$

$$E_2 = \frac{N_2 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}}$$

$$E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi_{\text{maks}} \dots\dots\dots (2. 12)$$

Sehingga didapat :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$$

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \dots\dots\dots (2. 13)$$

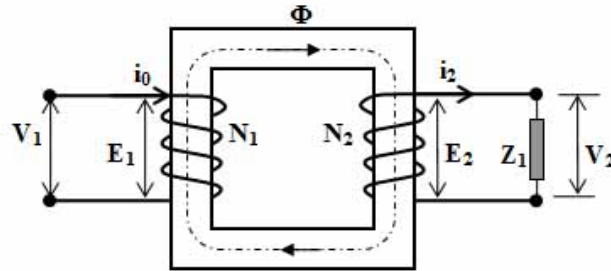
Dimana k = perbandingan transformasi.

Apabila : $k < 1$, maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan (*step up transformator*) dan atau $k > 1$, maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan (*step down transformator*)

2.8 Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_1 , maka I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana :

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_1} \dots\dots\dots (2. 14)$$



Gambar 2.22 Skematik Diagram Transformator Berbeban
(Sumber: Dasar-Dasar Mesin Listrik oleh Wijaya, Mohctar 2001)

Arus beban I_2 akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) N_2I_2 yang cenderung menentang fluks bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_m . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I_2' , yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus mengalir pada kumparan primer menjadi: (Wijaya, 2001).

$$I_1 = I_0 + I_2' \dots\dots\dots (2. 15)$$

Bila komponen arus rugi inti (I_C) diabaikan, maka $I_0 = I_m$, sehingga :

$$I_1 = I_m + I_2' \dots\dots\dots (2. 16)$$

Untuk menjaga fluks tetap tidak berubah, sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_m saja, berlaku hubungan :

$$N_1I_m = N_1I_1 - N_2I_2 \dots\dots\dots (2. 17)$$

$$N_1 I_m = N_1 (I_m + I_2') - N_2 I_2 \dots \dots \dots (2.18)$$

$$N_1 I_2' = N_2 I_2 \dots \dots \dots (2.19)$$

Karena nilai I_m dianggap kecil, maka $I_2' = I_1$. Jadi,

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \dots \dots \dots (2.20)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots \dots \dots (2.21)$$

2.9 Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan jenis trafo yang digunakan untuk menurunkan tegangan listrik dari jaringan distribusi tegangan tinggi menjadi tegangan terpakai pada jaringan distribusi tegangan rendah (*step down transformer*); misalkan tegangan 20 KV menjadi tegangan 380 volt atau 220 volt.

Trafo distribusi yang umum digunakan adalah trafo *step down* 20/0,4 kV, tegangan fasa-fasa sistem JTR adalah 380 Volt, karena terjadi *drop* tegangan maka tegangan rak TR dibuat diatas 380 Volt agar tegangan pada ujung beban menjadi 380 Volt. (Kawihing, dkk. 2013)



Gambar 2.23 Trafo Distribusi 200 KVA
(Sumber: Julius Sentosa, dkk. 2006)

Transformator yang digunakan untuk menaikkan tegangan listrik (*step up transformer*), hanya digunakan pada pusat pembangkit tenaga listrik agar tegangan yang didistribusikan pada suatu jaringan panjang (*long line*) tidak mengalami penurunan tegangan (*voltage drop*) yang berarti; yaitu tidak melebihi ketentuan *voltage drop* yang diperkenankan 5% dari tegangan semula. Arifin (dalam Siswanto, 2009).

2.10 Daya Pada Saluran Distribusi

Daya (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 :

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

Dimana :

P = daya pada ujung (Watt)

V = tegangan pada ujung (V)

$\cos \Phi$ = faktor daya (A)

Bila faktor daya di ketiga fasa dianggap sama walaupun besarnya arus berbeda, besarnya daya yang disalurkan dapat dinyatakan sebagai :

$$P = (a + b + c) \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos \Phi \dots\dots\dots (2.23)$$

Jika Persamaan $P = (a + b + c) \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos \Phi$ dan persamaan $P = 3 \cdot [V] \cdot [I] \cdot \cos \Phi$ menyatakan daya yang besarnya sama, maka dari kedua persamaan itu dapat diperoleh persyaratan untuk koefisien a, b, dan c yaitu :

$$a + b + c = 3 \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana pada keadaan seimbang, nilai $a = b = c = 1$. (Dahlan, 2009)

2.11 Arus Beban Penuh

Daya kerja pada transformator menandakan kapasitas transformator tersebut. Karena sudah diketahui rating tegangan pada sisi primer dan sekunder, maka dapat dihitung arus beban penuh pada sisi primer dan sekunder.

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots(2.25)$$

Dimana:

S : daya (kVA)

V : tegangan (kV)

I : arus jala-jala (A)

I_{FL} : arus beban penuh (A)

2.12 Efisiensi Transformator

Seperti mesin listrik pada umumnya dimana efisiensi transformator pada beban dan faktor daya tertentu didefinisikan sebagai *output* dibagi dengan *input*, keduanya diukur dalam satuan yang sama. (Baik watt atau kilowatt) (Theraja BL,1978).

$$\eta (\%) = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.27)$$

Dimana:

$$P_{In} = P_{Out} + \Sigma P_{rugi} \dots\dots\dots(2.28)$$

Tetapi transformator akan menjadi peralatan dengan efisiensi yang tinggi dan memiliki kerugian yang sedikit sehingga tidak praktis jika mengukur efisiensi

transformator hanya memasukkan input dan output saja. Oleh karena itu perlu menentukan kerugian dalam menghitung efisiensi pada transformator.

$$\eta (\%) = \frac{P_{in}}{P_{out} + \Sigma P_{Rugi}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.29)$$

$$\Sigma P_{Rugi} = P_i + P_t \dots\dots\dots(2.30)$$

Dimana:

P_i = Rugi besi (Watt)

P_t = Rugi tembaga (Watt)

$$P_t = I_1^2 \cdot R_{01} = I_2^2 \cdot R_{02} = I_1^2 \cdot R_1 = I_2^2 \cdot R_2 \dots\dots\dots (2.31)$$

$$\eta (\%) = \frac{V_2 I_2 \cos \theta}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_i + I_2^2 R_{02}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.32)$$

P_i adalah rugi tetap, tidak dipengaruhi besarnya beban.

P_t adalah rugi tidak tetap, dipengaruhi oleh besarnya beban.

P_t sebanding dengan kuadrat arus beban atau kuadrat daya semunya.

Dari persamaan (2.27) sampai dengan (2.32), dapat dilihat bahwa efisiensi akan bervariasi terhadap faktor daya, secara lebih jelas persamaan tersebut dapat ditulis kembali sebagai:

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out} + \Sigma P_{Rugi}} = 1 - \frac{V_2 I_2 \cos \theta}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_i + I_2^2 R_{02}}$$

Bila $\frac{\Sigma P_{Rugi}}{V_2 I_2} = x$, maka:

$$\eta = 1 - \frac{\frac{\Sigma P_{Rugi}}{V_2 I_2}}{\cos \theta_2 + \frac{\Sigma P_{Rugi}}{V_2 I_2}} = \frac{x}{\cos \theta_2 + x}$$

$$\eta = 1 - \frac{\frac{x}{\cos \theta_2}}{1 + \frac{x}{\cos \theta_2}} \dots\dots\dots(2.33)$$

Efisiensi akan maksimum apabila $\frac{\frac{x}{\cos \theta_2}}{1 + \frac{x}{\cos \theta_2}} = 0$, atau $\frac{d1/\eta}{d1} = 0$

Dari persamaan (2.32):

$$\frac{1}{\eta} = \frac{V_2 I_2 \cos \theta + P_1 + I_2^2 R_{02}}{V_2 I_2 \cos \theta_2} = 1 + \frac{P_1 + I_2^2 R_{02}}{V_2 I_2 \cos \theta_2}$$

$$\frac{1}{\eta} = \frac{V_2 I_2 \cos \theta + P_1 + I_2^2 R_{02}}{V_2 I_2 \cos \theta_2} = 1 + \frac{P_1 + I_2^2 R_{02}}{V_2 I_2 \cos \theta_2}$$

$$\frac{d(1/\eta)}{dI_2} = \frac{R_{02}}{V_2 \cos \theta_2} - \frac{P_1}{V_2 I_2^2 \cos \theta_2}$$

$$P_1 = I_2^2 \cdot R_{02} \dots\dots\dots(2.34)$$

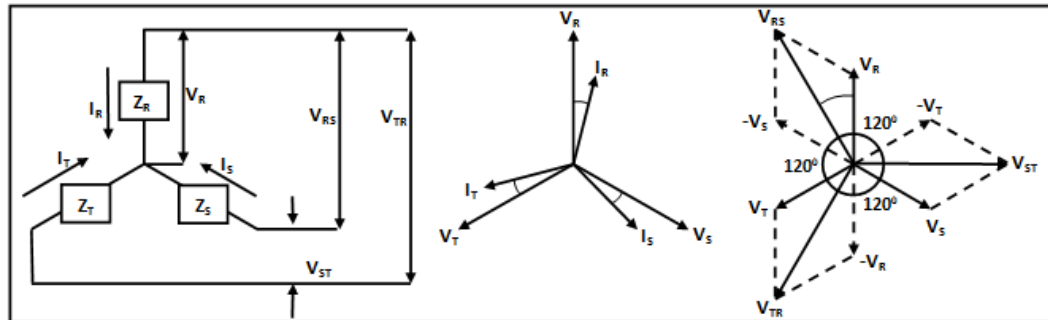
Syarat transformator mencapai efisiensi maksimumnya, apabila rugi besi sama dengan rugi tembaga. Dapat dicatat di sini bahwa efisiensi didasarkan pada daya output dalam watt dan tidak dalam satuan volt-ampere, meskipun kerugian sebanding dengan VA. Oleh karena itu, pada setiap beban volt-ampere, efisiensi tergantung pada faktor daya, menjadi maksimum pada faktor daya persatuan. Efisiensi dapat dihitung dengan menentukan kerugian inti dari tanpa beban atau tes sirkuit terbuka dan kerugian Cu dari tes arus pendek.

2.13 Hubungan Transformator 3 Fasa

Secara umum ada 2 macam jenis hubungan pada transformator tiga fasa yaitu bintang (*Star/Y*) dan Delta (Δ), namun dalam pelaksanaannya, tiga buah lilitan fasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam-macam hubungan seperti bintang dan delta, dengan kombinasi Y-Y, Y- Δ , Δ -Y, Δ - Δ , bahkan untuk kasus tertentu lilitan sekunder dapat dihubungkan secara berliku-liku (*zig-zag*), sehingga didapatkan kombinasi Δ -Z dan Y-Z. (wijaya, 2001). Umumnya simbol-simbol diatas digunakan dengan huruf-huruf capital (besar) D, Y dan kumparan primer dan dengan huruf kecil d,y dan z untuk kumparan sekunder.

2.13.1 Hubungan Bintang (Y/Star)

Hubungan bintang ialah hubungan transformator tiga fasa, dimana ujung awal atau akhir lilitan disatukan. Titik dimana tempat penyatuan dari ujung-ujung lilitan merupakan titik netral. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan bintang yaitu; IA, IB, IC masing-masing berbeda 120°.



Gambar 2.24 Transformator tiga fasa hubungan bintang

Dari gambar 2.11 diperoleh bahwa :

$$V_{RS} = V_R + (-V_S) = V_R - V_S$$

Jika $V_R = V_S = V_T = V_{Fasa} = V_{ph}$ maka :

$$V_{RS} = 2 \times V_{ph} \times \cos(60^\circ/2) = \sqrt{3}V_{ph}$$

Dengan cara yang sama di dapat :

$$V_{ST} = V_S - V_T = \sqrt{3}V_{ph}$$

$$V_{TR} = V_T - V_R = \sqrt{3}V_{ph}$$

Karena $V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_{jala-jala} = VL$, maka:

$$VL = \sqrt{3}V_{ph} \dots\dots\dots (2.35)$$

Arus jala-jala (line current):

$$R = I_R$$

$$S = I_S$$

$$T = I_T$$

Arus fasa (phase current):

$$RN = I_R$$

$$SN = I_S$$

$$TN = I_T$$

Didapat: $I_L = I_{ph} \dots\dots\dots (2.36)$

Total daya aktif 3 fasa = 3 x daya aktif per fasa, atau:

$$P_{3\phi} = 3 \times P_{1\phi} = 3 \times V_{ph} \times I_{ph} \times \cos \varphi \dots\dots\dots(2.37)$$

Dari persamaan (2.43) dan (2.44), maka:

$$P_{3\phi} = 3 \times \frac{V_L}{\sqrt{3}} \times I_L \times \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \dots\dots\dots(2.38)$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots(2.39)$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \dots\dots\dots(2.40)$$

Dimana :

V_L = tegangan line to line (V)

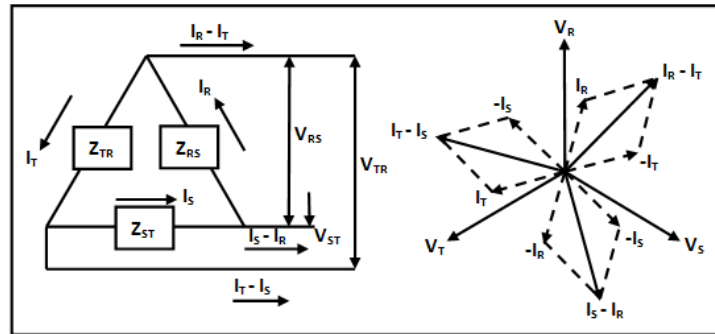
V_{ph} = tegangan phasa (V)

I_L = arus line (A)

I_{ph} = arus phasa (A)

2.13.2 Hubungan Segitiga/ Delta (Δ)

Hubungan segitiga adalah suatu hubungan transformator tiga fasa, dimana cara penyambungannya ialah ujung akhir lilitan fasa pertama disambung dengan ujung mula lilitan fasa kedua, akhir fasa kedua dengan ujung mula fasa ketiga dan akhir fasa ketiga dengan ujung mula fasa pertama. Tegangan transformator tiga phasa dengan kumparan yang dihubungkan segitiga yaitu; V_A , V_B , V_C masing-masing berbeda 120° .



Gambar 2.25 Transformator tiga fasa hubungan segitiga/delta.
 (Sumber : Dasar-Dasar Mesin Listrik oleh Mochtar Wijaya, 2001)

Dari gambar 2.12 diperoleh bahwa :

$$I_R = I_S = I_T = I_{ph} ; \quad I_S - I_R = 2 \times I_{ph} \times \cos (60^\circ/2) = \sqrt{3} \cdot I_{ph}$$

$$I_R - I_T = \sqrt{3} \cdot I_{ph}$$

$$I_T - I_S = \sqrt{3}I_{ph}, \text{ karena:}$$

$$I_S - I_R = I_R - I_T = I_T - I_S = I_L, \text{ maka: } I_L = \sqrt{3}I_{ph} \dots\dots\dots (2.41)$$

$$V_{RS} = V_{ST} = V_{TR} = V_L$$

$$V_L = V_{ph} \dots\dots\dots (2.42)$$

$$P_{3\phi} = 3 \times V_{ph} \times I_{ph} \times \cos \phi$$

Dari persamaan (2.44) dan (2.45), maka:

$$P_{3\phi} = 3 \times \frac{I_L}{\sqrt{3}} \times V_L \times \cos \phi = P_{3\phi} = \sqrt{3} \times I_L \cdot V_L \cdot \cos \phi \dots\dots\dots (2.43)$$

Dimana :

V_L = tegangan line to line (V)

V_{ph} = tegangan fasa (V)

I_L = arus line (A)

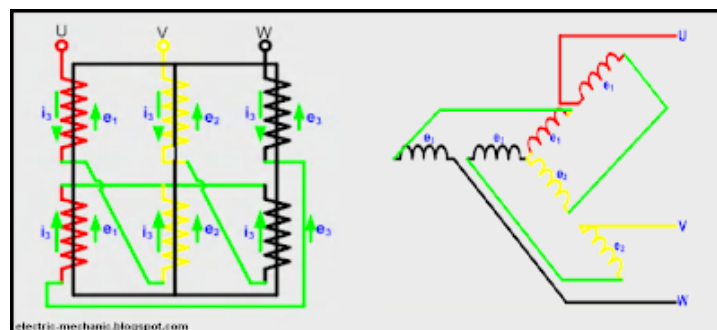
I_{ph} = arus fasa (A)

2.13.3 Hubungan Zigzag (Z)

Hubungan zig-zag merupakan sambungan bintang “istimewa”, hubungan ini untuk mengantisipasi kejadian yang mungkin terjadi apabila dihubungkan secara bintang dengan beban setiap fasanya tidak seimbang.(wijaya, 2001).

Transformator zigzag atau *interconnected star* merupakan transformator dengan tujuan khusus. Salah satu aplikasinya adalah menyediakan titik netral untuk sistem listrik yang tidak memiliki titik netral. Pada transformator zig-zag masing-masing elemen lilitan tiga fasa dibagi menjadi dua bagian dan masing-masing dihubungkan pada kaki yang berlainan dan memiliki ciri khusus, yaitu belitan primer memiliki tiga belitan, belitan sekunder memiliki enam belitan dan biasa digunakan untuk beban yang tidak seimbang (asimetris) - artinya beban antar fasa yang tidak sama.

Sistem transformator hubungan zigzag ini biasa digunakan dalam distribusi tenaga listrik dapat digunakan sistem bintang. Supaya dapat bekerja dengan baik maka salah satu syarat yang diperlukan adalah setiap fasa hendaknya bebannya sama, akan tetapi hal ini seringkali sukar untuk dipenuhi. Untuk itu lilitan sekunder dibuat dalam hubungan *interconnected star* (zig-zag).



Gambar 2.26 Belitan Sekunder Hubungan Zig-Zag.

Ujung-ujung dari kumparan sekunder disambungkan sedemikian rupa, supaya arah aliran arus didalam tiap-tiap kumparan menjadi bertentangan. Karena e1 tersambung secara berlawanan dengan gulungan e2, sehingga jumlah vektor dari kedua tegangan itu menjadi :

$$\begin{aligned}
 e_{Z1} &= e_1 - e_2 \\
 e_{Z2} &= e_2 - e_3 \\
 e_{Z3} &= e_3 - e_1 \\
 e_{Z1} + e_{Z2} + e_{Z3} &= 0 = 3 e_b \dots\dots\dots (2.44)
 \end{aligned}$$

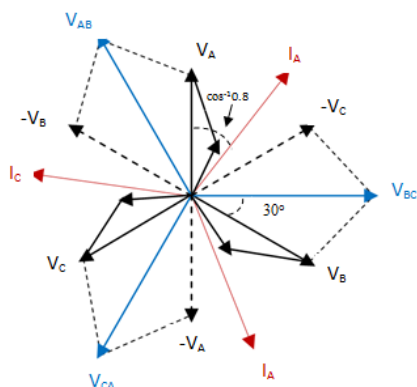
Tegangan Titik Bintang

$$\begin{aligned}
 e_b &= 0 \\
 e_1 &= e/2 \dots\dots\dots (2.45)
 \end{aligned}$$

nilai tegangan fasanya adalah tegangan *line to netral* $\times \sqrt{3}$ (2.46)

Koneksi Zigzag digunakan dalam sistem tenaga untuk menghilangkan arus harmonik, karena koneksi yang berlawanan dari gulungan gulungan. Transformator Zigzag tidak hanya membantu dalam perlindungan, tetapi juga mengurangi tegangan-tegangan dalam kondisi kesalahan simetris.

Dalam pengoperasian sistem yang normal, fluks magnet kedua kumparan gulungan akan saling membatalkan. jadi, hanya arus kecil yang akan ditarik dalam netral dari transformator zigzag. (Kassim, 2015).



Gambar 2.27 Diagram Fasor Hubungan Zigzag

dimana:

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

$$V_{BC} = V_B - V_C$$

$$V_{CA} = V_C - V_A$$

$$V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} = \text{Tegangan phasa}$$

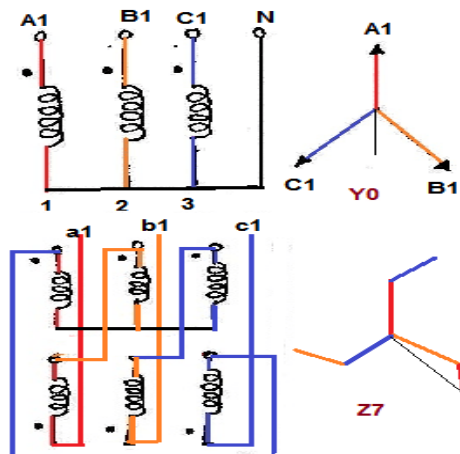
$$= \text{Tegangan phasa-netral} \times \sqrt{3}$$

$$I_A, I_B, I_C = \text{Arus line}$$

$$= \text{Arus phasa. (Austen, 1977)}$$

2.14 Transformator Hubungan Bintang-Zigzag

Hubungan bintang-zigzag merupakan kombinasi antara hubungan bintang dan zigzag atau *interconnection star*, 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.



Gambar 2.28 Diagram *One-Line* Bintang-Zigzag (Yzn5)

Karena tegangan pada peralatan yang digunakan pemakai akan berbeda-beda. Untuk menghindari terjadinya tegangan titik bintang, diantaranya adalah

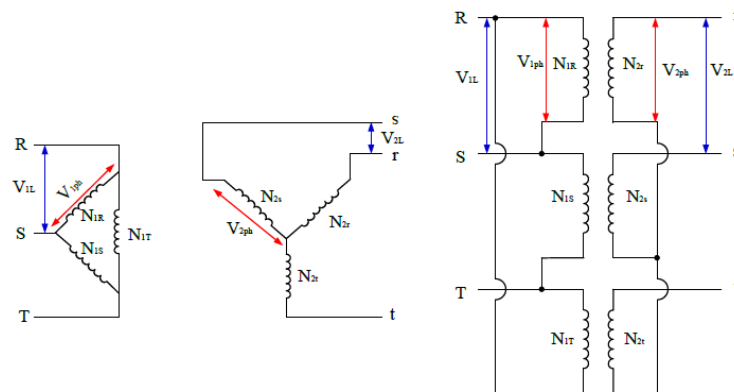
dengan menghubungkan sisi sekunder dalam hubungan Zigzag. Dalam hubungan Zigzag sisi sekunder terdiri atas enam kumparan yang dihubungkan secara khusus.

2.15 Jenis-Jenis Hubungan Belitan Transformator Tiga Fasa

Di dalam pelaksanaannya, tiga buah belitan fasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam-macam hubungan, seperti hubungan bintang (Y) dan delta (Δ), dengan kombinasi hubungan bintang-bintang (Y-Y), hubungan bintang-delta (Y- Δ), hubungan delta-bintang (Δ -Y) dan hubungan delta-delta (Δ - Δ), bahkan untuk kasus-kasus tertentu belitan sekunder dapat dihubungkan secara berliku (zig-zag) sehingga diperoleh kombinasi Δ -Z dan Y-Z.

2.15.1 Hubungan Bintang-Bintang (Y-Y)

Hubungan Y-Y pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.29 Transformator hubungan Y-Y

Pada hubungan Y-Y, tegangan primer pada masing-masing fasa adalah :

$$V_{1ph} = \frac{V_{1L}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.47)$$

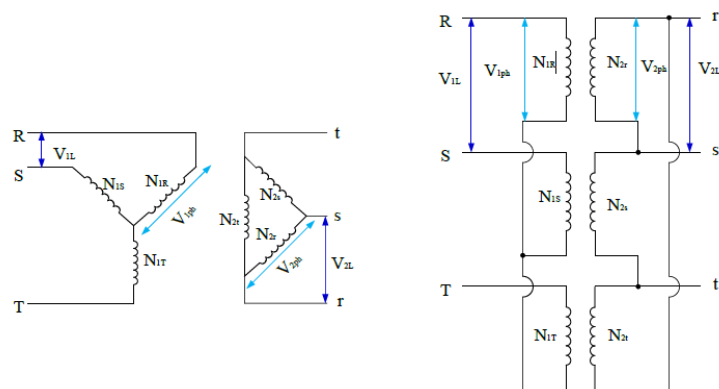
Tegangan fase primer sebanding dengan tegangan fase sekunder dan perbandingan belitan transformator. Maka diperoleh perbandingan tegangan pada transformator adalah :

$$\frac{V_{1L}^1}{V_{2L}^2} = \frac{\sqrt{3V_{1ph}^1}}{\sqrt{3V_{2ph}^2}} = k \dots\dots\dots(2.48)$$

Dengan : $k = \frac{V_{1ph}}{V_{2ph}}$

2.15.2 Hubungan Bintang-Delta (Y-Δ)

Hubungan (Y-Δ) pada transformator tiga fasa dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.30 Transformator hubungan Y-Δ

Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sebanding dengan tegangan fase primer $V_{1L} = \sqrt{3}V_{1ph}$ dan tegangan kawat ke kawat sekunder sama dengan tegangan fase $V_{2L} = V_{2ph}$. Sehingga diperoleh perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah sebagai berikut :

$$\frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{\sqrt{3}V_{1ph}}{V_{2ph}} = \sqrt{3}k \dots\dots\dots(2.49)$$

Dengan : $k = \frac{V_{1ph}}{V_{2ph}}$.

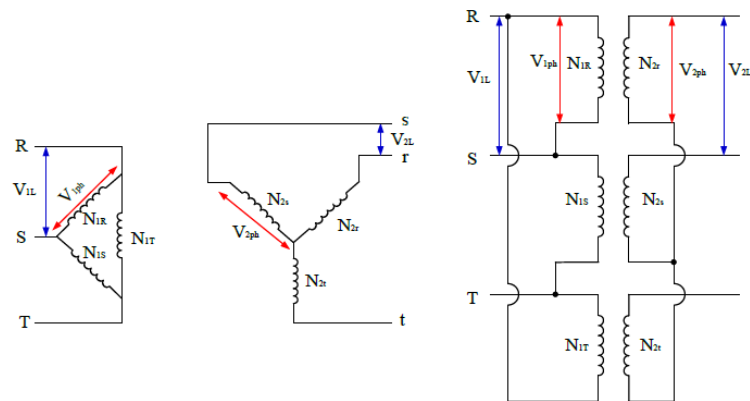
2.15.3 Hubungan Delta-Bintang (Δ -Y)

Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat primer sama dengan tegangan phasa primer $V_{1L} = V_{1ph}$ dan tegangan sisi sekunder $V_{2L} = \sqrt{3}V_{2ph}$. Maka perbandingan tegangan pada hubungan ini adalah :

$$\frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{V_{1ph}}{\sqrt{3}V_{2ph}} = \frac{k}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.50)$$

Dengan : $k = \frac{V_{1ph}}{V_{2ph}}$

Hubungan Δ -Y pada transformator tiga phasa dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



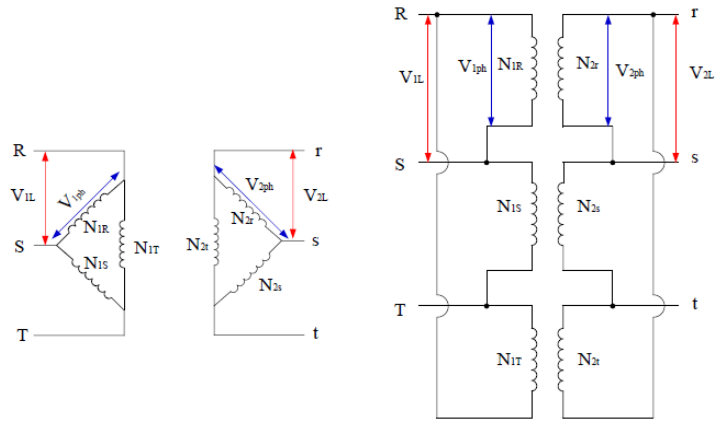
Gambar 2.31 Transformator hubungan Δ -Y

2.15.4 Hubungan Delta-Delta (Δ - Δ)

Hubungan delta-delta Δ - Δ pada transformator tiga phasa dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

Pada hubungan ini tegangan kawat ke kawat dan tegangan phasa sama untuk primer dan sekunder transformator $V_{1L} = V_{1ph}$ dan $V_{2L} = V_{2ph}$. Maka hubungan tegangan primer dan sekunder transformator adalah sebagai berikut :

$$\frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{V_{1ph}}{V_{2ph}} = k \dots\dots\dots (2.51)$$



Gambar 2.31b Transformator hubungan Δ-Δ

2.16 Beban Seimbang dan Beban Tidak Seimbang

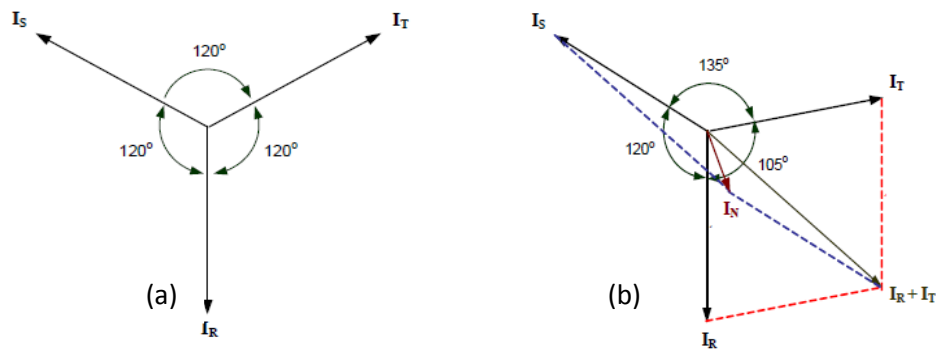
Julius Sentosa (dkk. 2006) menjelaskan yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

- a. Ketiga vektor/tegangan sama besar
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain

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

Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 macam, yaitu:

- a. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain
- b. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain
- c. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain



Gambar 2.32 (a) Vektor diagram seimbang, (b) Vektor diagram Tidak seimbang
(Sumber: Julius Sentosa, dkk. 2006)

Menentukan besaran ketidakseimbangan beban pada tiap fasa (analisa pembebanan) :

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (2.52)$$

Selanjutnya di cari koefisien a, b, dan c sebagai berikut :

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.53)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.54)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.55)$$

Rata-rata ketidakseimbangan beban (KB) sebagai berikut :

$$\frac{\{|a-1|+|b-1|+|c-1|\}}{3} \times 100\% \dots\dots\dots (2.56)$$

Adapun dalam keadaan beban tidak seimbang, tegangan pada tiap fasa juga berubah-ubah, Ketidakseimbangan tegangan ada beberapa sebab yaitu dalam sistem Transmisi transformator dan jalur distribusi dan penurunan tegangan pada impedansi sistem yang disebabkan oleh ketidakseimbangan arus. Sumber utama ketidakseimbangan saat ini adalah ketidakseimbangan beban (Albadi, 2015). Batasan ketidakseimbangan tegangan rata-rata standar PLN sama dengan standar

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) yaitu maksimum 2 %.

Untuk formula ketidakseimbangan IEEE sendiri

- SPLN D5.004-1: 2012(2.56a)

$$KS \text{ tegangan (\%)} = \frac{V -}{V +} \times 100\% = \frac{\text{Tegangan urutan negatif}}{\text{Tegangan urutan positif}} \times 100$$

- Standar IEEE 112 (1991) (2.56b)

$$KS \text{ tegangan (\%)} = \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \times 100$$

- Standar IEEE (1996)).....(2.56c)

$$KS \text{ tegangan (\%)} = \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \times 100$$

Adapun standar dari NEMA (*National Equipment Manufacturer's Association of USA*) (1993), memiliki rumus yang sama, hanya saja batas yang ditetapkan sebesar 2% - 20%

$$KS \text{ tegangan (\%)} = \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \times 100$$

2.16.1 Beban Seimbang Terhubung Delta (Δ)

Pada sistem delta, bila tiga buah beban dengan impedansi yang sama disambungkan pada sumber tiga fasa, maka arus didalam ketiga impedansi akan sama besar tetapi terpisah dengan sudut 120° , dan dikenal dengan arus fasa atau arus beban. Untuk keadaan yang demikian, maka dalam rangkaian akan berlaku :

$$V_{\text{delta}} = V_{\text{line}} \dots\dots\dots(2.57)$$

$$I_{\text{delta}} = \frac{I_{\text{line}}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.58)$$

$$Z_{\text{delta}} = \frac{V_{\text{delta}}}{I_{\text{delta}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{\text{line}}}{I_{\text{line}}} \dots\dots\dots(2.59)$$

$$S_{\text{delta}} = 3 \times V_{\text{delta}} \times I_{\text{delta}}$$

$$\begin{aligned}
&= \sqrt{3} \cdot V_{\text{delta}} \times I_{\text{line}} \\
&= 3 \times \frac{V_{\text{line}}^2}{Z_{\text{delta}}} \\
&= I_{\text{line}}^2 \times Z_{\text{delta}} \dots\dots\dots(2.70)
\end{aligned}$$

$$P = S \cos \varphi \dots\dots\dots(2.71)$$

$$Q = S \sin \varphi \dots\dots\dots(2.72)$$

2.16.2 Beban Seimbang Terhubung Bintang (Y/Wye)

Untuk sumber beban yang tersambung bintang atau Y, hubungan antara besaran listriknya adalah sebagai berikut :

$$V_{\text{bintang}} = \frac{V_{\text{line}}}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(2.73)$$

$$I_{\text{bintang}} = I_{\text{line}} \dots\dots\dots(2.74)$$

$$Z_{\text{bintang}} = \frac{V_{\text{bintang}}}{I_{\text{bintang}}} = \frac{V_{\text{line}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{line}}} \dots\dots\dots(2.75)$$

$$\begin{aligned}
S_{\text{bintang}} &= 3 \times V_{\text{bintang}} \times I_{\text{bintang}} \\
&= \sqrt{3} \cdot V_{\text{line}} \times I_{\text{line}} \\
&= \frac{V_{\text{line}}^2}{Z_{\text{bintang}}} \\
&= 3 \times I_{\text{line}}^2 \times Z_{\text{bintang}} \dots\dots\dots(2.76)
\end{aligned}$$

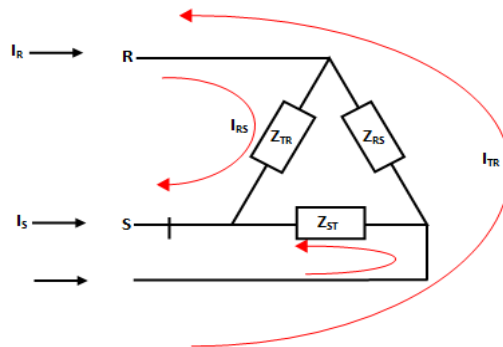
$$P = S \cos \varphi \dots\dots\dots(2.77)$$

$$Q = S \sin \varphi \dots\dots\dots(2.78)$$

2.16.3 Beban Tidak Seimbang Terhubung Segitiga/Delta (Δ)

Penyelesaian beban tidak seimbang tidaklah dapat disamakan dengan beban yang seimbang sebagaimana dijelaskan diatas. Penyelesaiannya akan menyangkut perhitungan arus-arus phasa dan selanjutnya dengan hokum arus kirchoff akan

didapatkan arus-arus saluran pada masing-masing fasa.



Gambar 2.33 Beban Tidak Seimbang Terhubung Delta

$$I_{RS} = \frac{V_{RS}}{Z_{RS}} \dots\dots\dots(2.79)$$

$$I_{TR} = \frac{V_{TR}}{Z_{TR}} \dots\dots\dots (2.80)$$

$$I_{ST} = \frac{V_{ST}}{Z_{ST}} \dots\dots\dots(2.81)$$

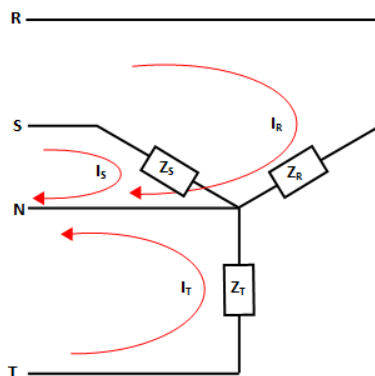
$$I_R = I_{RS} - I_{TR} \dots\dots\dots(2.82)$$

$$I_S = I_{ST} - I_{RS} \dots\dots\dots(2.83)$$

$$I_T = I_{TR} - I_{ST} \dots\dots\dots(2.84)$$

2.16.3 Beban Tidak Seimbang Terhubung Bintang (Y/Wye)

Pada sistem ini masing-masing fasa akan mengalirkan arus yang tidak seimbang menuju netral (pada sistem empat kawat). Sehingga arus netral merupakan penjumlahan secara vektor arus yang mengalir masing-masing fasa.



Gambar 2.34 Beban Tidak Seimbang Terhubung Bintang Empat Kawat

$$I_R = \frac{V_{RN}}{Z_N} \dots\dots\dots(2.85)$$

$$I_S = \frac{V_{SN}}{Z_S} \dots\dots\dots(2.86)$$

$$I_T = \frac{V_{TN}}{Z_T} \dots\dots\dots(2.87)$$

$$I_N = I_R + I_S + I_T \dots\dots\dots(2.88)$$

2.17 Arus Netral

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalirlah arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan *losses* (rugi-rugi). (Dahlan, 2013). Arus netral ini muncul jika:

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

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

$$I_N = \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 - I_R I_S - I_R I_T - I_S I_T}$$

Arus yang mengalir di sepanjang kawat netral, akan menyebabkan rugi daya di sepanjang kawat netral sebesar:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots (2.89)$$

Dimana:

$P_N = \text{Losses}$ yang timbul pada penghantar netral (Watt)

$I_N =$ Arus yang mengalir melalui kawat netral (A)

$R_N =$ Tahanan pada kawat netral (Ω)

Sedangkan *losses* yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (*ground*) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \dots \dots \dots (2.90)$$

dimana :

P_G : *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

I_G : arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_G : tahanan pembumian netral trafo (Ω)

Salah satu penyebab adanya arus netral adalah harmonik triplen atau dikenal juga dengan arus *zero sequence*: harmonik ke-3, 9, 15, dan seterusnya. Tidak seperti arus fundamental 50 Hz yang akan saling meniadakan antara 3 fasa, arus *zero sequence* selalu pada fase yang sama dengan *arus zero sequence* pada 2 fasa lainnya.

Arus netral ini sangat berpengaruh pada sistem jika arus netralnya berlebihan, dalam hal ini dapat mengakibatkan antara lain :

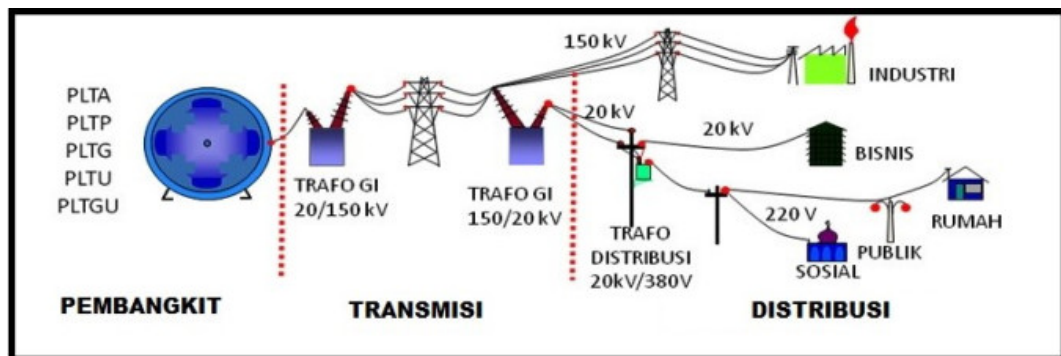
1. Terjadinya kegagalan pengawatan pada kawat netral
2. Timbulnya panas yang berlebihan pada transformator
3. menurunnya kualitas daya.

Jadi fenomena arus netral ini harus dilihat secara seksama karena dapat mengakibatkan kerugian yang sangat besar. Sekaligus penanggulangannya

yaitu dengan meminimalisir arus netral di gardu-gardu distribusi agar dapat mengurangi kerugian yang lebih lanjut.

2.18 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang menjelaskan suatu proses listrik dari pembangkitan hingga menuju beban yang saling berhubungan untuk melayani kebutuhan tenaga listrik bagi pelanggan sesuai kebutuhan. Sehingga didalam sistem tenaga listrik terdiri dari 3 komponen utama yaitu Pembangkit, Transmisi dan Distribusi & beban. Skema dari sistem tenaga listrik dapat ditunjukkan pada Gambar dibawah.



Gambar 2.35 Skema Sistem Tenaga Listrik

Pada Gambar 1 merupakan contoh skema karena jika ditinjau dari level tegangan pada sisi transmisi tidak harus 150 kV, bisa 70 kV, 275 kV hingga 500 kV untuk di Indonesia. Sistem tenaga listrik tersebut dilengkapi pula dengan gardu-gardu induk dan perangkat perlengkapan lainnya (instrumen ukur dan proteksi/pengaman), yang pada kenyataannya merupakan suatu sistem dan jaringan yang sangat kompleks. Pada Gambar 1 dapat dijelaskan bahwa sistem

tenaga listrik diawali dengan pembangkitan, transmisi, distribusi hingga menuju beban. Fungsi dari 3 hal tersebut sebagai berikut.

2.18.1 Sistem Pembangkit

Sistem pembangkit ini adalah sistem dimana energi listrik di “proses” dan di “hasil” kan, yang terdiri atas penggerak mula (prime mover), yang berupa perangkat mekanis untuk memutar kumparan generator dan generator itu sendiri . sistem pembangkit ini terdiri atas bermacam-macam jenis dilihat dari beragam sudut pandang, misalnya dari segi ekonomisan, kontinuitas dan lain sebagainya. (Wijaya, 2001).

Pembangkit merupakan suatu proses konversi energi lain menjadi energi listrik. Pada dasarnya listrik dibangkitkan oleh Generator yang digerakkan oleh beberapa jenis energi penggerak salah satunya adalah air, batu bara, panas bumi, angin dan lain sebagainya.

Pada sistem pembangkitan, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi generator pembangkit yang digunakan, biasanya berkisar antara 11 s/d 24 kV. Untuk pembangkit yang berkapasitas lebih besar biasanya menggunakan level tegangan yang lebih tinggi. Tenaga listrik yang dihasilkan di pembangkit, tegangannya akan dinaikkan oleh trafo step-up untuk dikirimkan ke sistem interkoneksi transmisi.

2.18.2 Jaringan Transmisi

Saluran Transmisi adalah sistem penyaluran tenaga listrik yang beroperasi pada Tegangan Tinggi (TT) dan Tegangan Ekstra Tinggi (TET). Kemampuan sistem transmisi dengan tegangan lebih akan menjadi jelas jika dilihat pada

kemampuan transmisi dari suatu saluran transmisi, kemampuan ini biasanya dinyatakan dalam satuan MVA (Mega Volt Ampere). Transmisi dapat menyalurkan tenaga listrik dari GI Pembangkitan ke GI Tegangan Tinggi dan dari GI Tegangan Tinggi ke GI Distribusi

Pada umumnya sistem pembangkitan jauh dari tempat-tempat dimana energi listrik tersebut digunakan. Karenanya energi listrik yang dibangkitkan itu harus disalurkan melalui saluran transmisi. Karena tegangan generator umumnya rendah, antara 6 kV sampai dengan 24 kV, maka tegangan tersebut harus dinaikkan oleh transformator daya yang ada (step up transformer) dengan pertimbangan ekonomis. (Wijaya, 2001).

Secara ringkas fungsi dari transmisi adalah menyalurkan tenaga listrik. Pada transmisi diperlukan efisiensi yang tinggi agar daya yang disalurkan tidak banyak hilang maka dipilih level tegangan yang lebih tinggi untuk disalurkan dikarenakan untuk mengurangi rugi-rugi daya dan turun tegangan kecil pada saat penyaluran. Pada umumnya, level tegangan pada transmisi ≥ 70 kV.

2.18.3 Jaringan Distribusi

Setelah proses penyaluran, maka tegangan kembali diturunkan di Gardu Induk sesuai kebutuhan untuk didistribusikan ke beban. Sehingga jaringan distribusi dalam operasinya tidak bisa dipisahkan dari GI sisi distribusi yang berada di ujung transmisi yang berfungsi mengatur level tegangan transmisi sesuai dengan level tegangan distribusi untuk disalurkan ke beban. Beban adalah peralatan listrik di lokasi konsumen yang memanfaatkan energi listrik dari sistem tersebut.

Pada dasarnya jaringan distribusi mirip dengan jaringan transmisi, yaitu jaringan sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik melalui konduktor-konduktor (kawat), yang membedakan hanyalah bahwa jaringan distribusi adalah jaringan transmisi listrik yang lebih kehilir (konsumen), dimana tegangannya telah diturunkan oleh transformator penurun tegangan hingga mencapai tegangan menengah, pada jaringan transmisi tegangan cenderung sangat tinggi sekali sampai batas-batas ekstrim (extra high voltage). (Wijaya, 2001).

Beban dari konsumen terbagi atas beberapa klasifikasi tegangan mulai konsumen tegangan rendah (KTR), konsumen tegangan menengah (KTM) dan konsumen tegangan tinggi (KTT). Proses dimulai dari tegangan keluaran dari GI sisi distribusi sebesar 20 kV yang kemudian menuju beban konsumen 20 kV atau diturunkan oleh trafo pada tiang distribusi untuk konsumen 380V/220V. Namun untuk KTT, tegangan dari transmisi langsung disalurkan melalui bay penghantar pada Gardu Induk apabila tegangan sudah sesuai dengan beban KTT. Jaringan distribusi di bagi dalam dua yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder

Jaringan Distribusi Primer atau Sistem Distribusi Primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat kehandalan yang diinginkan dan kondisi serta kondisi serta situasi lingkungan. Sistem distribusi primer dibatasi dari sisi sekunder trafo step down TT/TM di gardu induk sampai ke sisi primer trafo distribusi (trafo step down TM/TR).

Jaringan Distribusi Sekunder atau Sistem Distribusi Sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke instalasi pengguna tenaga listrik. Sistem ini biasanya disebut tegangan rendah yang langsung dihubungkan kepada konsumen/pemakai tenaga listrik. Sistem distribusi sekunder dibatasi dari sisi sekunder trafo distribusi (trafo stepdown TM/TR) sampai titik Sambungan Luar Pelayanan (SLP) atau konsumen. Saluran distribusi ini menggunakan tegangan rendah yaitu 220/380 volt.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat penelitian

Penelitian dilakukan di PT. MORAWA ELECTRIC TRANSBUANA, Jl. Raya Medan – Tg. Morawa Km 20,5 Sumatera - Indonesia, mulai dari tanggal 20 agustus 2019 sampai dengan 23 agustus 2019.

3.2 Data Transformator

Buatan pabrik	: PT. Morawa Electric Transbuana
Tipe	: outdoor
Daya	: 160 KVA
Tegangan kerja	: 21/20,5/20/18,5/19kV/-231/400 V
Arus	: 1,44 – 230,94 A
Hubungan	: Yzn5
Impedansi	: 4%
Trafo	: 3 phase

3.3 Data Kabel Penghantar

Jenis penghantar aluminium

Ukuran kawat penghantar primer $1,3 \text{ mm}^2$, dengan $R = 0,021526 \text{ m}/\Omega$

Ukuran kawat penghantar sekunder $5 \times 12 \text{ mm}^2$ dengan $R = 0,0004604 \text{ m}/\Omega$

3.4 Data Pembebanan

Pengambilan data dilakukan dengan melakukan pengukuran langsung di PT. MORAWA ELECTRIC TRANSBUANA. Data diperoleh dengan mengikuti

prosedur yang ada pada instansi tersebut yaitu dengan cara terlebih dahulu mengirimkan surat izin pengambilan data dari pihak Universitas ke PT. MORAWA ELECTRIC TRANSBUANA. Setelah surat balasan diperoleh, dilakukanlah pengambilan data sesuai kebutuhan.

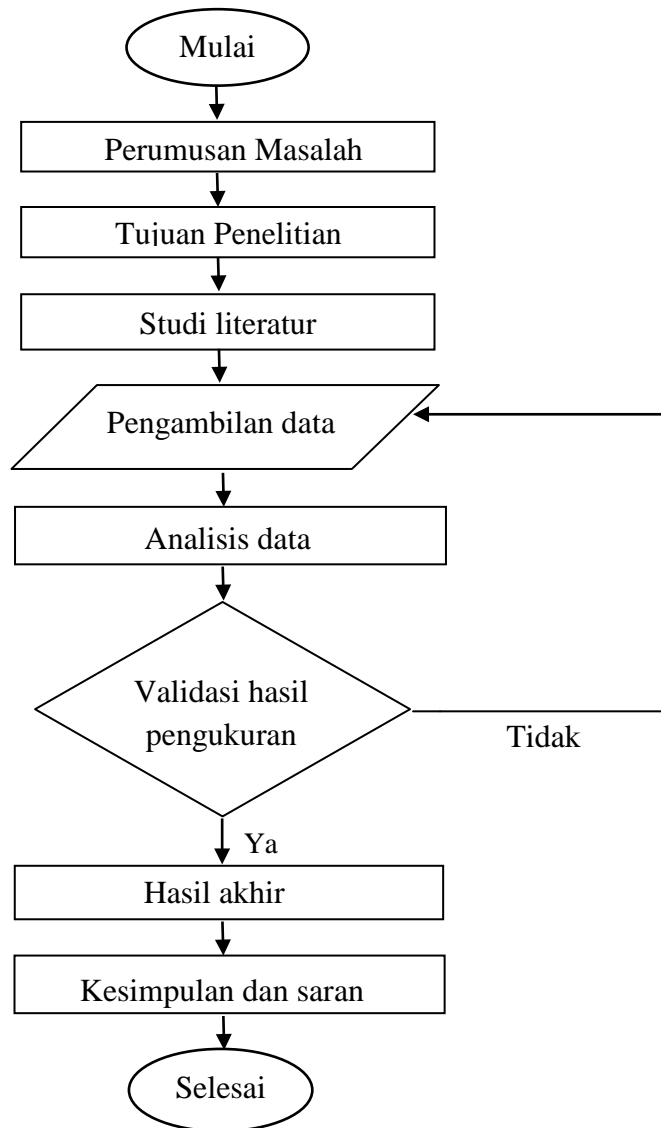
Tabel 3.1 Data Hasil Pengukuran

Data pengukuran trafo yzn5									
Pukul (WIB)	Tegangan L-N (V)			Arus (A)					cosphi
	R	S	T	I _R	I _S	I _T	I _N	I _G	
8.40	228	229	230	108,2	127,6	132,3	6,3	4,3	0,85
10.20	225	226	227	163	125	140	7,5	4,6	0,85
11.50	229	230	231	63	64,5	71,7	8	3,6	0,85
13.20	224	228	226	33,4	27,2	33,8	4,8	3,3	0,85
14.20	253	254	255	118	97,8	98,2	5,4	5,2	0,85
16.30	228	228	229	58,7	61,5	62,8	6,5	5,8	0,85
19.00	228	228	230	40,8	41,8	42,2	5,7	2,4	0,85

Hambatan Grounding (R_G) = 1,5 Ohm

Pengukuran dilakukan rentang satu jam setengah, untuk mendapatkan pembebanan yang bervariasi. namun Untuk pengukuran terakhir dilakukan pada saat jam 19.00. karena hal tentang pergantian shift kerja dan melaksanakan ibadah Sehingga penulis tidak bisa melakukan pengukuran tepat pada jam 18.00 wib

3.5 Flowchart Penelitian



BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Ketidakseimbangan Pada Trafo Yzn5.

Dengan menemukan koefisien berdasarkan persamaan 2.53, maka dapat ditentukan masing-masing persentase ketidakseimbangan (KS) dengan menggunakan persamaan 2.52.

- Pukul 8.40 wib

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{108,2 + 127,6 + 132,3}{3} = 122,7 \text{ A}$$

$$I_R = a \cdot I \text{ maka; } a = \frac{I_R}{I} = \frac{108,2}{122,7} = 0,88$$

$$I_S = b \cdot I \text{ maka; } b = \frac{I_S}{I} = \frac{127,6}{122,7} = 1,04$$

$$I_T = c \cdot I \text{ maka; } c = \frac{I_T}{I} = \frac{132,3}{122,7} = 1,08$$

$$KS = \frac{\{|a - 1|\} + \{|b - 1|\} + \{|c - 1|\}}{3} \times 100\%$$

$$KS = \frac{\{|0,88 - 1|\} + \{|1,04 - 1|\} + \{|1,08 - 1|\}}{3} \times 100\% = 7,88\%$$

- Pukul 10.20 Wib

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{163 + 125 + 140}{3} = 142,67 \text{ A}$$

$$I_R = a \cdot I \text{ maka; } a = \frac{I_R}{I} = \frac{163}{142,67} = 1,14$$

$$I_S = b \cdot I \text{ maka; } b = \frac{I_S}{I} = \frac{125}{142,67} = 0,88$$

$$I_T = c \cdot I \text{ maka; } c = \frac{I_T}{I} = \frac{140}{142,67} = 0,98$$

$$KS = \frac{\{|1,14 - 1|\} + \{|0,88 - 1|\} + \{|0,98 - 1|\}}{3} \times 100\% = 9,5\%$$

- Pukul 11.50 wib

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{63 + 64,5 + 71,7}{3} = 64,4 \text{ A}$$

$$I_R = a. I \text{ maka; } a = \frac{I_R}{I} = \frac{63}{66,40} = 0,95$$

$$I_S = b. I \text{ maka; } b = \frac{I_S}{I} = \frac{64,5}{66,40} = 0,97$$

$$I_T = c. I \text{ maka; } c = \frac{I_T}{I} = \frac{71,7}{66,40} = 1,08$$

$$KS = \frac{\{0,95 - 1\} + \{0,97 - 1\} + \{1,08 - 1\}}{3} \times 100\% = 5,32\%$$

- Pukul 13.20 Wib

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{33,4 + 27,2 + 33,8}{3} = 31,47 \text{ A}$$

$$I_R = a. I \text{ maka; } a = \frac{I_R}{I} = \frac{33,4}{31,47} = 1,06$$

$$I_S = b. I \text{ maka; } b = \frac{I_S}{I} = \frac{27,2}{31,47} = 0,86$$

$$I_T = c. I \text{ maka; } c = \frac{I_T}{I} = \frac{33,8}{31,47} = 1,07$$

$$KS = \frac{\{1,06 - 1\} + \{0,86 - 1\} + \{1,07 - 1\}}{3} \times 100\% = 9,04\%$$

- Pukul 14.20 Wib

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{118 + 97,8 + 98,2}{3} = 104,67 \text{ A}$$

$$I_R = a. I \text{ maka; } a = \frac{I_R}{I} = \frac{118}{104,67} = 1,13$$

$$I_S = b. I \text{ maka; } b = \frac{I_S}{I} = \frac{97,8}{104,67} = 0,93$$

$$I_T = c. I \text{ maka; } c = \frac{I_T}{I} = \frac{98,2}{104,67} = 0,94$$

$$KS = \frac{\{1,13 - 1\} + \{0,93 - 1\} + \{0,94 - 1\}}{3} \times 100\% = 8,49\%$$

- Pukul 16.30 Wib

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{58,7 + 61,5 + 62,8}{3} = 61 \text{ A}$$

$$I_R = a. I \text{ maka; } a = \frac{I_R}{I} = \frac{163}{61} = 0,96$$

$$I_S = b. I \text{ maka; } b = \frac{I_S}{I} = \frac{125}{617} = 1,01$$

$$I_T = c. I \text{ maka; } c = \frac{I_T}{I} = \frac{140}{617} = 1,03$$

$$KS = \frac{\{|0,96 - 1|\} + \{|1,01 - 1|\} + \{|1,03 - 1|\}}{3} \times 100\% = 2,51\%$$

- Pukul 19.00 Wib

$$I_{rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = \frac{40,8 + 41,8 + 42,2}{3} = 41,60 \text{ A}$$

$$I_R = a. I \text{ maka; } a = \frac{I_R}{I} = \frac{40,8}{41,60} = 0,98$$

$$I_S = b. I \text{ maka; } b = \frac{I_S}{I} = \frac{41,8}{41,60} = 1,00$$

$$I_T = c. I \text{ maka; } c = \frac{I_T}{I} = \frac{42,2}{41,60} = 1,01$$

$$KS = \frac{\{|0,98 - 1|\} + \{|1,00 - 1|\} + \{|1,01 - 1|\}}{3} \times 100\% = 1,28\%$$

Dari analisis yang dilakukan didapatkan hasil seperti yang terlihat dalam tabel berikut ini:

Tabel 4.1 Rata-rata Ketidakseimbangan Beban Dalam Jam Tertentu

	Waktu						
	8.40 wib	10.20 wib	11.50 wib	13.20 wib	14.20 wib	16.30 wib	19.00 wib
KS	7.88%	9,5 %	5,32%	9,04%	8,49 %	2,51 %	1,28 %

4.2 Analisis Besar Pembebanan Terhadap Besar Arus Netral Yang Muncul

Transformator Yzn5 memiliki daya (S) 160 KVA, Tegangan masuk (V_{in}) 20 KV, dan tegangan phasa sekunder (V_{pp}) maksimum 400 V.

Untuk mendapatkan persentase pembebanan, pengukuran arus dilakukan setiap satu setengah jam sekali. Ketika data arus didapat persentase pembebanan trafo yzn5 dihitung dengan persamaan rata-rata 2.52.

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$
$$= \frac{160.000}{\sqrt{3} \times 400} = 231 \text{ A}$$

Arus penuh trafo Yzn5 adalah 231 Ampere

- Pukul 8.40 Wib,

$$Pembelian (%) = \frac{I_{rata}}{I_{FL}} \times 100\% = \frac{122,7}{231} \times 100\% = 53,13\%$$

Maka pembebanan pada jam tersebut adalah 53,13 %

- Pukul 10.20 Wib,

$$Pembelian (%) = \frac{I_{rata}}{I_{FL}} \times 100\% = \frac{142,67}{231} \times 100\% = 61,78\%$$

- Pukul 11.50 Wib,

$$Pembelian (%) = \frac{I_{rata}}{I_{FL}} \times 100\% = \frac{122,7}{231} \times 100\% = 28,75\%$$

- Pukul 13.20 Wib,

$$Pembelian (%) = \frac{I_{rata}}{I_{FL}} \times 100\% = \frac{31,47}{231} \times 100\% = 13,63\%$$

- Pukul 14.50 Wib,

$$\text{Pembebanan (\%)} = \frac{I_{\text{rata}}}{I_{\text{FL}}} \times 100\% = \frac{104,67}{231} \times 100\% = 45,32\%$$

- Pukul 16.30 Wib,

$$\text{Pembebanan (\%)} = \frac{I_{\text{rata}}}{I_{\text{FL}}} \times 100\% = \frac{142,67}{231} \times 100\% = 61,78\%$$

- Pukul 19.00 Wib,

$$\text{Pembebanan (\%)} = \frac{I_{\text{rata}}}{I_{\text{FL}}} \times 100\% = \frac{41,6}{231} \times 100\% = 18,01\%$$

Tabel 4.2 Pembebanan Dan Arus Netral

	waktu						
	8.40 wib	10.20 wib	11.50 wib	13.20 wib	14.20 wib	16.30 wib	19.00 wib
pembebanan	53,13%	61,78%	28,75%	13,63%	45,32%	61,78%	18,01%
I_N (A)	6,3	7,5	8	4,8	5,4	6,5	3,8

4.3 Analisis Ketidakseimbangan Tegangan

Analisis ketidakseimbang tegangan yzn5, Berdasarkan standar IEEE tahun 1966. standar untuk ketidakseimbangan tegangan sebesar 2%. ketidakseimbangan tegangan yzn5 bisa dihitung dengan mengetahui rumus tegangan phasa Yzn5. yaitu Berdasarkan persamaan 2.56c

- Pukul 8.40

$$V_{RS} = \sqrt{3} \times V_{RN} = \sqrt{3} \times 228 = 394,91$$

$$V_{ST} = \sqrt{3} \times V_{SN} = \sqrt{3} \times 229 = 396,64$$

$$V_{TR} = \sqrt{3} \times V_{TN} = \sqrt{3} \times 230 = 398,37$$

Lalu persentase ketidakseimbangan tegangan bisa dihitung dengan pers

$$\begin{aligned} \text{KS tegangan (\%)} &= \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \\ &= \frac{398,37}{397} = 1\% \end{aligned}$$

- Pukul 10.20

$$V_{RS} = \sqrt{3} \times V_{RN} = \sqrt{3} \times 225 = 389,71$$

$$V_{ST} = \sqrt{3} \times V_{SN} = \sqrt{3} \times 226 = 391,44$$

$$V_{TR} = \sqrt{3} \times V_{TN} = \sqrt{3} \times 227 = 393,18$$

$$\begin{aligned} \text{KS tegangan (\%)} &= \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \\ &= \frac{393,18}{391} = 1\% \end{aligned}$$

- Pukul 11.50

$$V_{RS} = \sqrt{3} \times V_{RN} = \sqrt{3} \times 229 = 396,64$$

$$V_{ST} = \sqrt{3} \times V_{SN} = \sqrt{3} \times 230 = 398,37$$

$$V_{TR} = \sqrt{3} \times V_{TN} = \sqrt{3} \times 231 = 400,1$$

$$\begin{aligned} \text{KS tegangan (\%)} &= \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \\ &= \frac{400,1}{398} = 1\% \end{aligned}$$

- Pukul 13.20

$$V_{RS} = \sqrt{3} \times V_{RN} = \sqrt{3} \times 224 = 387,98$$

$$V_{ST} = \sqrt{3} \times V_{SN} = \sqrt{3} \times 228 = 394,91$$

$$V_{TR} = \sqrt{3} \times V_{TN} = \sqrt{3} \times 226 = 391,44$$

$$\begin{aligned} \text{KS tegangan (\%)} &= \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \\ &= \frac{394,91}{391} = 1,01\% \end{aligned}$$

- Pukul 14.20

$$V_{RS} = \sqrt{3} \times V_{RN} = \sqrt{3} \times 253 = 438,21$$

$$V_{ST} = \sqrt{3} \times V_{SN} = \sqrt{3} \times 254 = 439,91$$

$$V_{TR} = \sqrt{3} \times V_{TN} = \sqrt{3} \times 255 = 441,67$$

$$\begin{aligned} \text{KS tegangan (\%)} &= \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \\ &= \frac{441,67}{440} = 1\% \end{aligned}$$

- Pukul 16.30

$$V_{RS} = \sqrt{3} \times V_{RN} = \sqrt{3} \times 228 = 394,91$$

$$V_{ST} = \sqrt{3} \times V_{SN} = \sqrt{3} \times 228 = 394,91$$

$$V_{TR} = \sqrt{3} \times V_{TN} = \sqrt{3} \times 229 = 396,64$$

$$\begin{aligned} \text{KS tegangan (\%)} &= \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \\ &= \frac{396,48}{395} = 1\% \end{aligned}$$

- Pukul 19.00

$$V_{RS} = \sqrt{3} \times V_{RN} = \sqrt{3} \times 228 = 394,91$$

$$V_{ST} = \sqrt{3} \times V_{SN} = \sqrt{3} \times 228 = 394,91$$

$$V_{TR} = \sqrt{3} \times V_{TN} = \sqrt{3} \times 230 = 398,37$$

$$\begin{aligned} \text{KS tegangan (\%)} &= \frac{\text{deviasi maksimum rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})}{\text{rata - rata } (V_{RS}, V_{ST}, V_{TR})} \\ &= \frac{398,06}{396} = 1,01\% \end{aligned}$$

Tabel 4.3 Ketidakeimbangan Tegangan dan Arus Netral

	Waktu						
	8.40 wib	10.20 wib	11.50 wib	13.20 wib	14.20 wib	16.30 wib	19.00 wib
pembebanan	53,13%	61,78%	28,75%	13,63%	45,32%	61,78%	18,01%
KSV	1%	1%	1%	1,01%	1%	1%	1%

Dari tabel bisa kita lihat bahwa pengaruh besar pembebanan tidak seimbang terhadap ketidakseimbangan tegangan pada trafo Yzn5 hanya sampai pada range 1-1,01 %. Dan arus tidak memperlihatkan perubahan saat pembebanan mulai berubah.

4.4 Analisis Besar Rugi-Rugi Daya

4.4.1 Rugi-Rugi Daya Arus Netral

Dengan data pada tabel 1, Analisi rugi-rugi arus netral dapat dihitung dengan persamaan 2.89.

$$P = S \cdot \cos\varphi \text{ (}\cos\varphi \text{ yang dipakai adalah 0,85)}$$

$$= 160.000 \times 0,85 = 136 \text{ KW}$$

- Pukul 8.40 wib

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$= 6,3^2 \cdot 0,0004604 \text{ m}/\Omega = 0,018 \text{ Watt}$$

$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100\%$$

$$= \frac{0,018}{136.000} \times 100\% = 0,00001 \%$$

- Pukul 10.20 wib

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$= 7,5^2 \cdot 0,0004604 \text{ m}/\Omega = 0,026 \text{ Watt}$$

$$\%P_N = \frac{P_N}{P} \times 100\%$$

$$= \frac{0,026}{136.000} \times 100\% = 0,00002 \%$$

- Pukul 11.50 wib

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N$$

$$= 8^2 \cdot 0,0004604 \text{ m}/\Omega = 0,029 \text{ Watt}$$

$$\begin{aligned} \%P_N &= \frac{P_N}{P} \times 100\% \\ &= \frac{0,029}{136.000} \times 100\% = 0,00001\% \end{aligned}$$

- Pukul 13.20 wib

$$\begin{aligned} P_N &= I_N^2 \cdot R_N \\ &= 4,8^2 \cdot 0,0004604 \text{ m}/\Omega = 0,011 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%P_N &= \frac{P_N}{P} \times 100\% \\ &= \frac{0,011}{136.000} \times 100\% = 0,00001\% \end{aligned}$$

- Pukul 14.20 wib

$$\begin{aligned} P_N &= I_N^2 \cdot R_N \\ &= 5,4^2 \cdot 0,0004604 \text{ m}/\Omega = 0,013 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%P_N &= \frac{P_N}{P} \times 100\% \\ &= \frac{0,013}{136.000} \times 100\% = 0,00001\% \end{aligned}$$

- Pukul 16.30 wib

$$\begin{aligned} P_N &= I_N^2 \cdot R_N \\ &= 6,5^2 \cdot 0,0004604 \text{ m}/\Omega = 0,019 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%P_N &= \frac{P_N}{P} \times 100\% \\ &= \frac{0,019}{136.000} \times 100\% = 0,00001\% \end{aligned}$$

- Pukul 19.00 wib

$$\begin{aligned} P_N &= I_N^2 \cdot R_N \\ &= 3,8^2 \cdot 0,0004604 \text{ m}/\Omega = 0,007 \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%P_N &= \frac{P_N}{P} \times 100\% \\ &= \frac{0,007}{136.000} \times 100\% = 0,000005\% \end{aligned}$$

4.4.2 Analisa Rugi Rugi Arus Ground

Dengan data pada tabel 1, Analisa rugi-rugi arus netral dapat dihitung dengan persamaan 2.90.

- Pukul 8.40 wib

$$\begin{aligned}P_G &= I_G^2 \cdot R_G \\ &= 4,3^2 \cdot 1,5 = 27,73 \text{ Watt} \\ \%P_G &= \frac{P_G}{P} \times 100\% \\ &= \frac{27,73}{136.000} \times 100\% = 0,02 \%\end{aligned}$$

- Pukul 10.20 wib

$$\begin{aligned}P_G &= I_G^2 \cdot R_G \\ &= 4,6^2 \cdot 1,5 = 31,74 \text{ Watt} \\ \%P_G &= \frac{P_G}{P} \times 100\% \\ &= \frac{31,74}{136.000} \times 100\% = 0,02 \%\end{aligned}$$

- Pukul 11.50 wib

$$\begin{aligned}P_G &= I_G^2 \cdot R_G \\ &= 3,6^2 \cdot 1,5 = 19,44 \text{ Watt} \\ \%P_G &= \frac{P_G}{P} \times 100\% \\ &= \frac{19,44}{136.000} \times 100\% = 0,01\%\end{aligned}$$

- Pukul 13.20 wib

$$\begin{aligned}P_G &= I_G^2 \cdot R_G \\ &= 3,3^2 \cdot 1,5 = 16,33 \text{ Watt} \\ \%P_G &= \frac{P_G}{P} \times 100\% \\ &= \frac{16,33}{136.000} \times 100\% = 0,01\%\end{aligned}$$

- Pukul 14.20 wib

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G$$

$$= 5,2^2 \cdot 1,5 = 40,56 \text{ Watt}$$

$$\%P_G = \frac{P_G}{P} \times 100\%$$

$$= \frac{40,56}{136.000} \times 100\% = 0,03\%$$

- Pukul 16.30 wib

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G$$

$$= 5,8^2 \cdot 1,5 = 50,46 \text{ Watt}$$

$$\%P_G = \frac{P_G}{P} \times 100\%$$

$$= \frac{50,46}{136.000} \times 100\% = 0,03\%$$

- Pukul 19.00 wib

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G$$

$$= 2,4^2 \cdot 1,5 = 8,64 \text{ Watt}$$

$$\%P_G = \frac{P_G}{P} \times 100\%$$

$$= \frac{8,64}{136.000} \times 100\% = 0,01\%$$

Tabel 4.4 Rugi-rugi Daya Yzn5

Hasil	waktu						
	8.40 wib	10.20 wib	11.50 wib	13.20 wib	14.20 wib	16.30 wib	19.00 wib
P_N (Watt)	0,018	0,026	0,029	0,011	0,013	0,019	0,007
P_G (Watt)	27,73	31,74	19,44	16,335	40,56	50,46	8,64
I_N (A)	6,3	7,5	8	4,8	5,4	6,5	3,8
I_G (A)	4,3	4,6	3,6	3,3	5,2	5,8	2,4

Setelah dilakukan perhitungan dan analisis data sedemikian rupa, seluruh hasil dirangkum dalam tabel dibawah berikut

Tabel 4.5 Hasil Akumulasi Seluruh Data

Hasil	waktu						
	8.40 wib	10.20 wib	11.50 wib	13.20 wib	14.20 wib	16.30 wib	19.00 wib
pembebanan	53,13%	61,78%	28,75%	13,63%	45,32%	61,78%	18,01%
KSB	7.88%	9,5 %	5,32%	9,04%	8,49 %	2,51 %	1,28 %
KSV	1%	1%	1%	1,01%	1%	1%	1%
P_N (Watt)	0,018	0,026	0,029	0,011	0,013	0,019	0,007
P_G (Watt)	27,73	31,74	19,44	16,335	40,56	50,46	8,64
I_N (A)	6,3	7,5	8	4,8	5,4	6,5	3,8
I_G (A)	4,3	4,6	3,6	3,3	5,2	5,8	2,4

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan pada BAB IV (empat) maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Trafo Yzn5 mengalami Ketidakseimbangan beban Terlihat dalam tabel 3.1 dari besar arus di tiap fasa berbeda. berdasarkan kalkulasi data diperoleh bahwa besar Ketidakseimbangan paling besar terjadi pada pukul 10.20 wib dengan persentase sebesar 2,51%. Sedangkan terkecil pukul 19.00 dengan persentase 1,28%
2. Hasil perhitungan pembebanan (tabel 4.2) memperlihatkan bahwa pengaruh pembebanan yang berubah pada trafo Yzn5 tidak membuat arus netral ikut membesar mengikuti besar pembebanan. arus netral tertinggi terjadi pada pukul 11.50 yaitu 8 A saat pembebanan 28,75 %
3. Pengaruh ketidakseimbangan terhadap tegangan juga terlihat. Berdasarkan perhitungan, trafo Yzn5 mampu menjaga ketidakseimbangan diangka kurang dari 2% (standar IEEE dan PLN). Ini berarti trafo tersebut memenuhi standar sebagai penyeimbang tegangan
4. Semakin besar arus netral yang mengalir di penghantar netral trafo (I_N) maka semakin besar rugi-rugi pada penghantar netral trafo (P_N). demikian pula semakin besar arus netral yang mengalir tanah (I_G) maka semakin besar rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah (P_G).

5. Rugi-rugi arus netral tertinggi yaitu pukul 11.50 sebesar 0,029 watt dan rugi-rugi yang ada pada kabel ground tertinggi pukul 16.30 sebesar 50,46 watt.
6. Berdasarkan penelitian. Trafo Yzn5 juga menggunakan aluminium dengan resistansi rendah pada fasa primer dan sekundernya, sehingga dalam teorinya ikut berkontribusi menjaga rugi-rugi daya pada penghantar fasa tidak terlampau besar

5.2 Saran

1. Sebaiknya penggunaan beban-beban tertentu di pabrik lebih diperhatikan, agar suatu saat ketika menambah peralatan atau mengoperasikan peralatan, transformator tidak mengalami panas berlebih saat ketidakseimbangan beban
2. Sebaiknya transformator dioperasikan dengan beban yang sesuai standar dan tidak mengoperasikan transformator dalam beban tinggi dalam waktu yang lama, untuk menjaga kondisi transformator tetap dalam kondisi yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aprilian P. Kawihing, dkk. 2013, “*Pemerataan Beban Transformator Pada Saluran Distribusi Sekunder.*”, e-journal Teknik Elektro dan Komputer (2013)
- Austen, Stigant and A.C. Franklin. 1977. “*The Jsp Transformer Book: A Practical Technology Of The Power Transformer.*” London, Penerbit Butterworth-heinemann
- Chang, jinn. 2005. “*Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-Phase Four-Wire Distribution Power System.*” jurnal IEEE; Transactions On Power Delivery vol. 20, no. 2
- Hanif, Muhammad. 2017. “*Analisa Pengaruh Beban Tidak Seimbang Terhadap Performa Transformator 3 Fasa Feedback 61-103 Pada Berbagai Hubungan Belitan Skala Laboratorium Listrik Kapal Dan Otomatisasi.*” Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- M. Tavakoli Bina A. Kashefi. 2007. “*Three-Phase Unbalance Of Distribution Systems: Complementary Analysis And Experimental Case Study*”. Faculty of Electrical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Seid Khandan, Iran.
- Moh. Dahlan. 2009. “*Akibat Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Pada Transformator Distribusi.*”
- Rasheed, H Kassim. 2015. “*Zig-Zag Grounding Transformer Modeling For Zero-Sequnce Impedance Calculation Using Finite Element Method.*” Electrical Engineering Department, Al-Mustansiriya University
- Sentosa, dkk. 2006. “*Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi.*” PT. PLN (persero), Surabaya
- Suswanto, Daman. 2009. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik.*
- Theraja, B.L., dan Theraja, A.K. 2007, “*a Textbook of Electrical Technology: AC & DC Macines.*” volume 2, New Delhi, penerbit S. Chand & Company Ltd
- Warsito, Djoko. 1986. “*Seri Teori Mesin Listrik Arus Bolak Balik, Teori Transformator (Trafo).*” jilid 1, penerbit cv Baru Jakarta
- Wijaya, Mochtar. 2001. “*Dasar- Dasar Mesin Listrik.*” Jakarta: Djambatan.

M. H. Albadi dkk. 2015. “ Unbalance in Power Systems, Case Study”.
Department of Electrical and Computer Engineering; Sultan Qaboos
University,



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

Jalan Kapten Muchtar Basri No.3 Medan, Sumatera Utara, 20238, Indonesia

Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir (Skripsi)

Nama : ARIF ANDIRA SIAHAAN
NPM : 1507220081
Judul Tugas Akhir : ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN
BEBAN PADA PENGGUNAAN TRANSFORMATOR
DISTRIBUSI 3 PHASA HUBUNGAN BINTANG-
ZIGZAG DI PT.MORAWA ELECTRIC
TRANSBUANA

No	Keterangan	Tanggal	Paraf
1	Diskusi tentang out line final skripsi	8/8-19	[Signature]
2	- " Tembang Bab I & II	16/8.	[Signature]
3	- " perbaikan Bab II	18/8.	[Signature]
4	- " Tembang Bab III & IV/perbaikan	22/8	[Signature]
5	- " perbaikan Bab III & IV	30/8	[Signature]
6	- " Bab V	9/9	[Signature]
7	- " Bab I & Bab V	10/9.	[Signature]
8	Final Seminar.	14/9.	[Signature]

Pembimbing I

[Signature]
Ir. Eddy Warman M.T



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

Jalan Kapten Muchtar Basri No.3 Medan, Sumatera Utara, 20238, Indonesia

Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir (Skripsi)

Nama : ARIF ANDIRA SIAHAAN
NPM : 1507220081
Judul Tugas Akhir : ANALISIS PENGARUH KETIDAKSEIMBANGAN
BEBAN PADA PENGGUNAAN TRANSFORMATOR
DISTRIBUSI 3 PHASA HUBUNGAN BINTANG-
ZIGZAG DI PT.MORAWA ELECTRIC
TRANSBUANA

No	Keterangan	Tanggal	Paraf
1	Pemeriksaan bab I	10/8-19	JI
2	Pemeriksaan bab II - perbaikan torsi & vektor - pers. arus	15/8-19	JI
3	Pemeriksaan bab III	20/8-19	JI
4	Pemeriksaan bab IV	8/9-19	JI
5	hanyutkan ke pembimbing satu (1)		JI

Pembimbing II

Ir. Zularsil Siregar

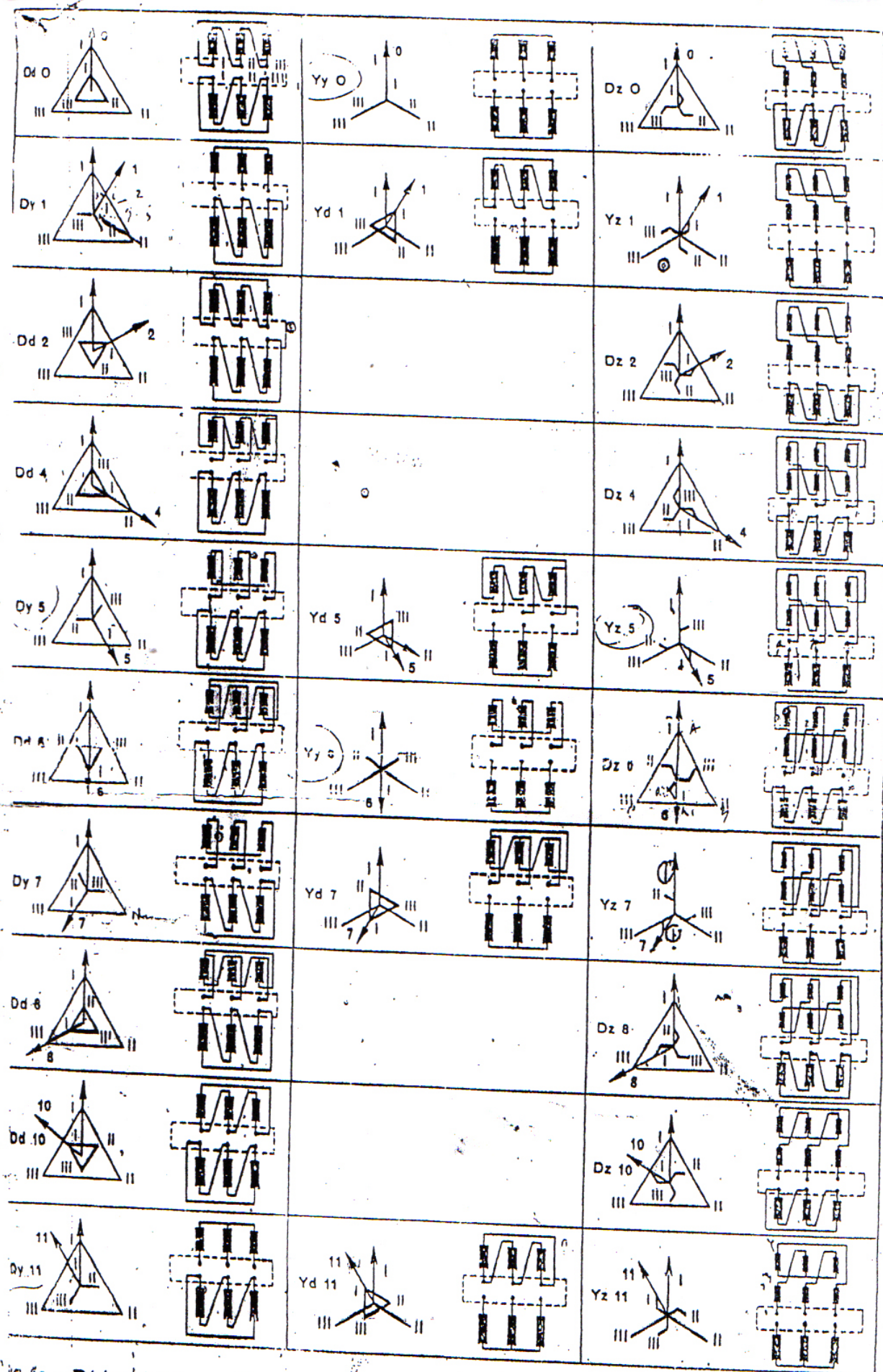


Fig. 5a. — Désignation des couplages de transformateurs triphasés à enroulements séparés par symboles de couplage.
 Designation of connections of separate winding three-phase transformers by connection symbols.



PT. MORAWA ELECTRIC TRANSBUANA
INDUSTRI TRANSFORMATOR DISTRIBUSI

Nomor : 025/2019
Lamp : 1 lembar
Hal : Pengambilan Data
Kepada :
Yth. Dekan Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumut
di Medan

Medan, 16 Agustus 2019

Dengan Hormat,

Sehubungan surat Bapak tgl 8 Agustus No : 972/ II . 3 - AU/UMSU-07/F/2019
Mengenai pengambilan data di pabrik kami atas nama :

Nama : Arif Andira Siahaan
NPM : 1507220081
Semester : VIII (Delapan)
Jurusan : Teknik Electro

Yang bersangkutan telah kami layani dan memberikan data-data yang di perlukan
Demikianlah Surat ini diperbuat agar dapat di maklumi

PT.Morawa Electric Transbuana


Ir. Herbert S.L. Tobing
Kepala Pabrik

Office : Jl. PERNIAGAAN BARU NO. 48 D - 50 D.MEDAN 20111 TELP : (061) 4515362 - 4517435 - 4536457 FAX. (061) 4515423

Factory : Jl. RAYA MEDAN TANGJUNG MORAWA KM. 20,5 SUMUT - INDONESIA TELP : (061) 7940286 - 7940335 FAX (061) 7940287

Respresentation : Jl. AGUNG PERMAI X NO. 25 BLOK C - 12 SUNTER AGUNG PODOMORO - JAKARTA 14350 TELP : (021) 64712244 FAX.(021) 6405117.