

**PENGARUH SUHU TERHADAP USIA PAKAI TRANSFORMATOR
8 MVA DI MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk**



LAPORAN AKHIR

Dibuat untuk memenuhi syarat menyelesaikan pendidikan Diploma III
Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknik Listrik
Politeknik Negeri Sriwijaya

Oleh :

ROBBY SUGARA

0617 3031 0172

**POLITEKNIK NEGERI SRIWIJAYA
PALEMBANG
2020**

**PENGARUH SUHU TERHADAP USIA PAKAI TRANSFORMATOR
8 MVA DI MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk**



LAPORAN AKHIR

Dibuat untuk memenuhi syarat penyelesaian pendidikan Diploma III
Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknik Listrik
Politeknik Negeri Sriwijaya

Menyetujui :

Pembimbing I

Pembimbing II

Nurhaida, S.T.,M.T.
NIP.196404121989032002

Anton Firmansyah, S.T.,M.T.
NIP.197509242008121001

Mengetahui,

Ketua Jurusan
Teknik Elektro

Ketua Program Studi
Teknik Listrik

Ir.Iskandar Luthfi, M.T
NIP. 196705111992031003

Anton Firmansyah, S.T.,M.T.
NIP.197509242008121001

Motto :

- *Kejarlah duniamu seakan kau hidup selamanya, beribadalah kamu seakan kau meniggal esok hari.*
- *Allah tidak akan menguji hambanya diluar batas kemampuannya.*
- *Sayangi orng tuamu melebihi kau menyayangi dirimu sendiri.*

Kupersembahkan untuk :

- *Kedua orang tuaku tercinta.*
- *Saudara-saudaraku di Jurusan Teknik Elektro, Khususnya kelas 6 LA*
- *Almamater*

ABSTRAK

PENGARUH SUHU TERHADAP USIA PAKAI TRANSFORMATOR 8 MVA DI MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk

(2020 : xiii + 47 halaman + Gambar + Tabel + Lampiran)

ROBBY SUGARA

061730310172

**Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknik Listrik
Politeknik Negeri Sriwijaya**

Berdasarkan hasil pembahasan dan perhitungan secara manual, besar Laju Penuaan Thermal Relatif Transformator, Laju Umur Transformator, dan Sisa Umur Transformator yang diperoleh pada transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk diperoleh data . Perkiraan Laju Penuaan Thermal Relatif dengan standard IEC pada pembebanan 100% sebesar 1,44 pada pagi dan malam hari, dan pada pembebanan 80% sebesar 0,64 pada pagi dan 0,62 pada malam hari, Perkiraan Pengurangan Umur transformator terlama yaitu 1,48 pada pagi hari dan malam hari dengan pembebanan 100 %, Perkiraan sisa umur transformator pada saat dibebani 100% dengan standard IEC diperoleh sisa umur sebesar 13,5 tahun pada waktu pagi hari dan malam hari dan saat transformator dibebani 80 % dengan standard IEC diperoleh sisa umur sebesar 30 tahun pada pagi hari dan 31 tahun pada malam hari. sisa umur transformator, Pengurangan Umur transformator, Laju Penuaan Thermal Relatif dipengaruhi oleh Tingginya Suhu akibat Besarnya Pembebanan

Kata kunci : sisa umur transformator, Laju Penuaan Thermal Relatif, Pengurangan Umur transformator, Suhu, Pembebanan

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON AGE USING TRANSFORMERS 8 MVA IN MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk

(2020 : xiii + 47 pages + List of Figures + List Of Tables + Attachment)

Robby Sugara

061730310172

**Electrical Department Study Program Electrical Engineering
State Polytechnic of Sriwijaya**

Based on the results of manual discussion and calculation, the transformer relative thermal aging rate, transformer life rate, and remaining transformer life are obtained on the 8 MVA transformer at MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk obtained data. Estimated Relative Thermal Aging Rate with IEC standard at 100% loading of 1.44 in the morning and at night, and at 80% loading of 0.64 in the morning and 0.62 at night, the estimated lifespan of the longest transformer is 1.48 in the morning and at night with 100% loading, the estimated remaining life of the transformer when loaded with IEC standards is obtained by the remaining life of 13.5 years in the morning and at night and when the transformer is loaded 80% with IEC standards the remaining life is obtained of 30 years in the morning and 31 years at night. the remaining life of the transformer, the reduction of the life of the transformer, the relative thermal aging rate is affected by the high temperature due to the amount of loading.

Keywords: remaining life of the transformer, Relative Thermal Aging Rate,
Reduction of Transformer Life, Temperature, Loading

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayahnya serta kekuatan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan akhir yang berjudul “Perhitungan Efisiensi Transformator 80 MVA di PLTU Unit 1 PT. PLN (Persero) Pembangunan Sumbagsel Sektor Pembangunan Bukit Asam” ini sebagaimana mestinya dan tepat pada waktunya.

Laporan akhir ini dibuat untuk memenuhi sebagian dari syarat menyelesaikan pendidikan Diploma III Pada Jurusan Teknik Elektro Progran Studi Teknik listrik Politeknik Negeri Sriwijaya.

Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu baik moril maupun spiritual atas terwujudnya laporan akhir ini terutama kepada :

1. Bapak Dr. Ing. Ahmad Taqwa, M.T., selaku Direktur Politeknik Negeri Sriwijaya.
2. Bapak Ir.Iskandar Lutfi,M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya.
3. Bapak Herman Yani, S.T.,M. Eng., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya.
4. Bapak Anton Firmansyah, S.T.,M.T., selaku Koordinator Program Studi Teknik Listrik Politeknik Negeri Sriwijaya.
5. Ibu Nurhaida, S.T., M.T.,selaku dosen pembimbing kerja praktek yang telah membimbing dalam proses praktek dan penulisan laporan kerja praktek.
6. Bapak Romianton selaku Asman Watrik MSS PT BukitAsam, Tbk, yang membimbing selama kerja praktek.
7. Bapak M. Ali Akbar, selaku Supervisor MSS Watrik TAL PT Bukit Asam, Tbk.
8. Rekan-rekan Mahasiswa seperjuangan yang telah banyak membantu dalam penyusunan laporan akhir ini.

Penulis menyadari di dalam penyusunan Laporan Akhir ini masih banyak kekurangan baik dari segi penulisan maupun dari segi isinya. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran untuk kesempurnaan Laporan Akhir ini.

Akhirnya penulis berharap agar Laporan Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua khususnya bagi mahasiswa Program Studi Teknik Listrik Politeknik Negeri Sriwijaya.

Palembang, 2020

Penulis

DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
MOTTO	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan dan Manfaat	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi Penulisan.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pengertian Transformator.....	5
2.2 Bentuk dan Konstruksi Bagian-Bagian Transformator.....	5
2.3 Prinsip Kerja Transformator	6
2.3.1 Transformator Tanpa Beban.....	7
2.3.2 Transformator Berbeban.....	10
2.4 Komponen Utama Transformator	11
2.4.1 Inti Besi	11
2.4.2 Kumputan Transformator	11
2.4.3 Minyak Transformator	12

2.4.4 Bushing.....	13
2.4.5 Tangki Konservator	13
2.4.6 Peralatan Bantu Pendinginan Transformator	14
2.4.7 Tap Changer	15
2.4.8 Alat Pernapasan (<i>Dehydrating Breather</i>).....	16
2.5 Menentukan Parameter Transformator	16
2.5.1 Pengukuran Beban Nol.....	16
2.5.2 Pengukuran Hubung Singkat.....	17
2.6 Rangkaian Pengganti Transformator	18
2.7 Daya Aktif, Daya Semu, dan Daya Reaktif	22
2.7.1 Daya Aktif	22
2.7.2 Daya Semu	22
2.7.3 Daya Reaktif.....	22
2.8 Rugi-rugi Transformator	22
2.8.1 Rugi Variabel	22
2.8.2 Rugi Tetap	24
2.9 Efisiensi Transformator.....	25
2.10 Faktor Umur Transformator	26
2.11 Faktor Beban	26
2.12 Faktor Zbase dan Zreal	26
2.13 Menghitung Perbandingan Rugi	26
2.14 Faktor Ultimate Top Oil.....	26
2.15 Kenaikan Top Oil Temperature	27
2.16 Kenaikan Hotspot Temperature	27
2.17 Hotspot Temperature dan Top Oil	28
2.18 Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif	28
2.19 Perhitungan Pengurangan Umur Transformator	28
2.20 Perhitungan Sisa Umur Transformator	29

BAB III METODELOGI PENELITIAN	30
3.1 Umum.....	30
3.2 Lokasi Penelitian.....	30
3.3 Data Nameplate Transformator.....	31
3.4 Data Operasi Transformator.....	32
3.5 Peralatan Bantu Perhitungan.....	33
3.6 Prosedur Penelitian.....	33
3.7 Flow Chart.....	34
BAB IV PEMBAHASAN	35
4.1 Menghitung Faktor Beban	35
4.2 Menghitung Zbase dan Zreal	36
4.3 Perhitungan Rugi – Rugi Tembaga.....	36
4.4 Menghitung Perbandingan Rugi	37
4.5 Menentukan Kenaikan Ultimate Top Oil.....	37
4.6 Menentukan Kenaikan Temperature Top Oil	38
4.7 Menentukan temperature hotspot.....	39
4.8 Menghitung selisih antara temperature hot spot dan top oil	39
4.9 Menghitung Temperatur Hotspot.....	40
4.10 Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif.....	41
4.11 Perhitungan Pengurangan Umur Transformator	41
4.12 Perhitungan Sisa Umur Transformator	42
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Kesimpulan	43
5.2 Saran.....	43
DAFTAR PUSTAKA	44
LAMPIRAN	45

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Konstruksi Transformator	6
Gambar 2.2 Diagram Dasar Transformator	6
Gambar 2.3 Transformator Tanpa Beban.....	7
Gambar 2.4 Hubungan antara $I_0\Phi$ dan E_1	8
Gambar 2.5 Transformator Berbeban	10
Gambar 2.6 Konstruksi Belitan Transformator.....	11
Gambar 2.7 Gambaran Fisik Belitan Transformator Tenaga.....	12
Gambar 2.8 Komponen-komponen Internal Transformator	12
Gambar 2.9 Busing Transformator	13
Gambar 2.10 Tangki Konvensator	13
Gambar 2.11 Pendingin Transformator	14
Gambar 2.12 Parameter Pengukuran Beban Nol	17
Gambar 2.13 Pengukuran Trafo Hubung Singkat.....	17
Gambar 2.14 Bagian I_m dan I_{h+e}	18
Gambar 2.15 Rangkaian R_0 dan X_0	19
Gambar 2.16 Rangkaian Pengganti Primer	19
Gambar 2.17 Rangkaian Pegganti Sekunder.....	20
Gambar 2.18 Rangkaian Pengganti Primer Dibawa ke Sekunder.....	21
Gambar 2.19 Rangkaian Pengganti Pendekatan Primer ke Sekunder.....	21
Gambar 2.20 Rugi-rugi Transformator	23
Gambar 2.21 Lingkaran Histerisis	24
Gambar 3.1 Gambar Transformator 8 MVA.....	30
Gambar 3.2 Gambar Nameplate Transformator.....	31
Gambar 3.3 Diagram Alir Pengaruh Suhu Terhadap Usia Pakai Trafo.....	34

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Klasifikasi Pendinginan Transformator	15
Tabel 3.1 Tabel Data Operasi Transformator.....	32
Tabel 4.1 Tabel Data pembebanan transformator 8MVA MSS TAL UPTE PT BUKIT ASAM Tbk pada tanggal 28 juni 2020	36
Tabel 4.2 Tabel Kenaikan Ultimate Top Oil.....	38
Tabel 4.3 Tabel Kenaikan Temperature Top Oil	38
Tabel 4.4 Tabel Temperatur hotspot	39
Tabel 4.5 Tabel Hasil Selisih antara temperature hot spot dan top oil.....	39
Tabel 4.6 Tabel Hasil perhitungan temperatur hotspot.....	40
Tabel 4.7 Tabel Hasil perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif dengan perbandingan pembebanan dengan Standart IEC	41
Tabel 4.8 Tabel Hasil perhitungan Pengurangan Umur Transformator (L) dengan perbandingan pembebanan dengan Standart IEC	42
Tabel 4.9 Tabel Hasil perhitungan Sisa Umur Transformator Daya (n) dengan perbandingan pembebanan dengan Standart IEC	42

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Lampiran Nameplate Transformator 8 MVA.....	46
Lampiran 2 Lampiran Data Operasi Transformator.....	47

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik merupakan energi yang sangat dibutuhkan dalam kehidupan bermasyarakat, kebutuhan akan energi listrik saat ini semakin lama semakin meningkat, sedangkan sumberdaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi ini semakin berkurang. Oleh sebab itu sangat diperlukan penghematan dan ketepatan dalam pemanfaatannya.

Untuk mengkonversikan energi listrik diperlukan peralatan listrik pendukung diantaranya adalah transformator (*Transformer*). Transformator adalah komponen yang sangat penting dalam sistem tenaga listrikan. Keberadaan transformator merupakan penemuan besar yang sangat penting dalam kemajuan ketenagalistrikan.

Menurut definisi dari IEC transformator adalah suatu peralatan listrik statis yang sederhana, efisien dan andal untuk mengubah tegangan dan arus bolak balik dari suatu tingkat ke tingkat yang lain. Pada umumnya transformator terdiri dari sebuah inti yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung pada rasio perubahan belitan pada kedua kumparan itu. Kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dililit di inti transformator

Menurut IEEE pelayanan hidup dari transformator mencapai 20,55 tahun, sedangkan menurut IEC tidak ditentukan secara spesifik tapi biasanya hingga 30 tahun. Kegagalan transformator dapat dikategorikan secara luas sebagai kegagalan listrik, mekanik, atau *thermal*. Penyebab kegagalan bisa menjadi eksternal atau internal. Selain kegagalan di tangki utama kegagalan juga bisa terjadi di *bushing*, pengubah tap, atau di aksesoris trafo

Transformator dirancang untuk membatasi suhu dengan berdasarkan pembebanan yang diinginkan, termasuk suhu belitan, suhu titik terpanas belitan, suhu *top oil*. Batas rata-rata kenaikan suhu standard belitan 65°C, *hotspot* 80°C dan *top oil* 65°C, sedangkan menurut publikasi IEC tahun 1968 suhu *hotspot*

dalam keadaan *overload* di suhu 140 °C

Trafo berumur pendek diakibatkan adanya kegagalan isolasi yang disebabkan oleh beberapa faktor seperti, pembebanan, suhu *hotspot*, suhu lingkungan sekitar (*ambient temperature*), dan suhu minyak atas pada transformator yang didapat oleh transformator tersebut. Oleh sebab itulah pada laporan akhir ini penulis mengambil judul ” PENGARUH SUHU TERHADAP USIA PAKAI TRANSFORMATOR 8 MVA DI MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk”

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada laporan akhir ini meliputi pembahasan sebagai berikut:

1. Bagaimana Cara Menentukan Laju Penuaan Thermal Relatif Transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk?
2. Bagaimana Cara Menentukan Laju Umur Transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk?
3. Bagaimana Cara Menentukan Sisa Umur Transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk?

1.3 Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

Adapun tujuan penulisan laporan akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui Menentukan Laju Penuaan Thermal Relatif Transformator pada transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk.
2. Mengetahui Cara Menentukan Laju Umur Transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk.
3. Mengetahui Cara Menentukan Sisa Umur Transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk.

1.3.2 Manfaat

Adapun manfaat penulisan laporan akhir ini yaitu :

1. Dapat Memahami pada Menentukan Laju Penuaan Thermal Relatif Transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk pada saat pembebanan.
2. Dapat Memahami Cara Menentukan Laju Umur Transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk pada saat pembebanan.
3. Dapat Memahami Cara Menentukan Sisa Umur Transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk pada saat pembebanan.

1.4 Batasan Masalah

Dalam laporan akhir ini, penulis membatasi masalah hanya pada Pengaruh pembebanan terhadap usia pakai transformator 8 MVA MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk.

1.5 Metode Penulisan

Metode penulisan laporan akhir ini dilakukan dengan beberapa metode, antara lain:

1. Metode Literatur

Metode pengumpulan data ini dengan cara membaca buku- buku referensi, situs internet, dan jurnal- jurnal bidang kelistrikan yang berhubungan dengan masalah yang akan dibahas pada laporan akhir ini.

2. Metode Observasi

Metode ini dilaksanakan melalui tinjauan langsung ke lapangan untuk melihat secara langsung peralatan guna mengetahui data- data yang akurat pada suatu peralatan di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk.

3. Metode Wawancara

Metode ini dilaksanakan melalui tanya jawab secara langsung melalui narasumber baik pembimbing kerja praktek dan operator yang menguasai bidangnya masing- masing untuk mengumpulkan data- data yang diperlukan

untuk menyusun laporan kerja akhir ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan akhir ini dibagi menjadi lima bab yang saling berhubungan satu sama lain. Adapun sistematika penulisan laporan akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan tentang teori- teori pendukung yang melandasi pembahasan yang dibahas pada laporan ini.

BAB III METODELOGI PENELITIAN

Menjelaskan tentang kerangka dasar dari tahapan penyelesaian laporan akhir, dimana pada bab ini berisikan tentang nameplate transformator, data harian *logsheet* dan peralatan yang membantu pembuatan laporan.

BAB IV PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tentang pengolahan data yang didapat serta pengaruh pembebanan terhadap usia pakai transformator 8 MVA di MSS TAL UPTE PT. BUKIT ASAM Tbk

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini membahas kesimpulan dan saran- saran yang didapatkan dari hasil pengukuran dan hasil perhitungan yang telah dilakukan.

LAMPIRAN

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gendengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik.

Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gendengan impedansi (input Impedance) antara sumber dan beban, untuk menghambat arus searah (DC=Direct Current) dan melewatkan arus bolak-balik, dan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan AC.

Pengelompokkan transformator di dalam bidang Tenaga Listrik, adalah sebagai berikut:

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran: yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan. ¹

2.2 Bentuk dan Konstruksi Bagian – bagian Transformator

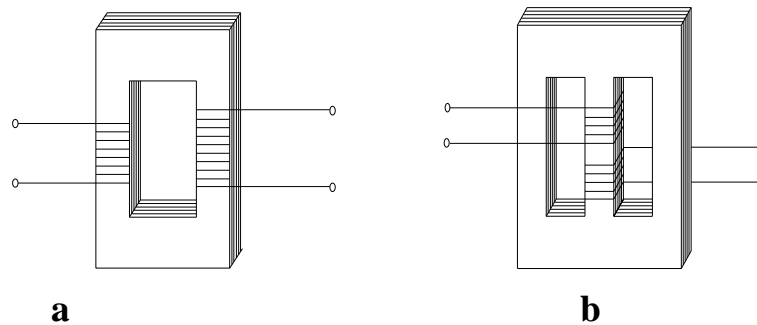
Pada prinsipnya konstruksi transformator dibedakan menjadi dua jenis yaitu sebagai berikut :

1. Konstruksi jenis inti (*core*), lilitan primer membelit salah satu kaki transformator dan lilitan sekunder membelit kaki transformator yang lain.
2. Konstruksi jenis cangkang (*shell*), lilitan primer dan lilitan sekunder membelit kaki yang sama (kaki tengah) pada transformator

Pada gambar 2.1 diperlihatkan konstruksi dari kedua inti, dimana kedua kumparan dililitkan saling tergabung secara magnetis, namun kumparan tersebut tidak tergabung secara elektrik.²

¹ Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI Yogyakarta, 1997, Hal 1

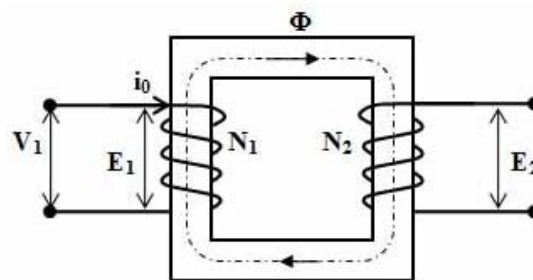
² Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI Yogyakarta, 1997, Hal 2



Gambar 2.1 Gambar Konstruksi Transformator

(a) Tipe Inti (*core type*)

(b) Tipe Cangkang (*shell type*)



Gambar 2.2 Gambar Diagram dasar transformator

2.3 Prinsip Kerja Transformator

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan (sumber) maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus I_1 menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya. Akibat adanya fluks magnet yang berubah-ubah, pada kumparan primer akan timbul GGL induksi e_p .

Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah:

$$e_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \text{ volt} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana e_p : GGL induksi pada kumparan primer

N_p : Jumlah lilitan kumparan primer

$d\Phi$: perubahan garis-garis gaya magnet dalam satuan weber

(1 weber = 10^8 maxwell)

dt : perubahan waktu dalam satuan detik.

Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi e_p juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (mutual fluks). Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi e_s pada kumparan sekunder.

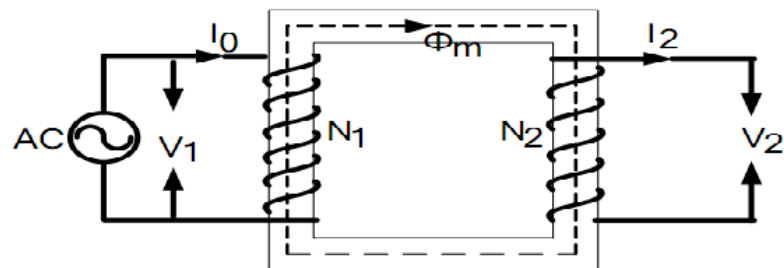
Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah :

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana N_s : Jumlah lilitan kumparan primer.³

2.3.1 Transformator Tanpa Beban

Transformator disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (Open Circuit) perhatikan gambar 2.1.



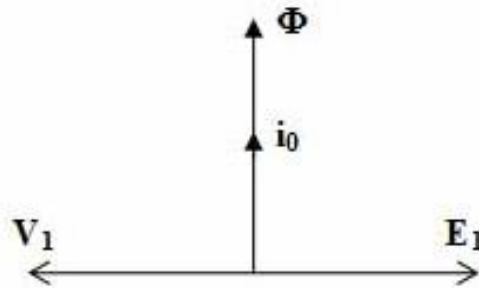
Gambar 2.3 Gambar Transformator Tanpa Beban

Dalam keadaan ini, arus i_0 yang mengalir pada kumparan primer adalah sangat kecil. Arus ini disebut arus primer tanpa beban atau arus penguat. Arus i_0 adalah terdiri dari arus pemagnet (i_M) dan arus tembaga (i_C).

Arus i_M inilah yang menimbulkan flux magnet bersama yang dapat mengakibatkan timbulnya rugi histerisis dan rugi *eddy current* (arus pusar). Rugi histerisis dan rugi eddy current inilah yang menimbulkan rugi inti sedangkan adanya arus tembaga akan menimbulkan rugi tembaga. Secara vektoris hubungan

³ Sumanto, Teori Transformator, Penerbit ANDI OFFSET Yogyakarta, Cetakan Pertama, 1991, Hal 2

antara arus penguat, flux magnet bersama dan gaya gerak listrik primer ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.4 Hubungan antara $I_0\Phi$ dan E_1

Adanya arus $i_0 = I_M \cdot \sin \omega t$ yang mengalir melalui kumparan primer, pada kumparan primer timbul flux magnet yang sephase dengan i_0 dan secara matematis dituliskan :

$$\Phi = \Phi_M \cdot \sin \omega t \dots\dots\dots(2.3)$$

Menurut Faraday, suatu kumparan (X_M) yang mendapat pengaruh flux magnet yang berubah-ubah, maka di ujung-ujung kumparan tersebut akan timbul gaya gerak listrik (e) yang menentang terhadap tegangan sumber, yaitu sebesar :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan adanya arus i_0 yang mengalir melalui kumparan primer, pada kumparan primer akan timbul gaya gerak listrik sebesar :

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi_M \cdot \sin \omega t}{dt} \\ &= -N_1 \cdot \Phi_M \cdot \omega \frac{d \cdot \sin \omega t}{d \omega t} \\ &= -E_M \cdot \cos \omega t \end{aligned}$$

$$= -E_M \cdot \sin(90^\circ + \omega t) \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana : e_1 = GGL primer

$$E_1 = E_{M1} = N_1 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Phi_M$$

= GGL Primer maksimum

Besar tegangan efektif dari gaya gerak listrik Primer adalah :

$$(E_{eff})_1 = \frac{N_1 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_M}{\sqrt{2}}$$

$$= 4,44 \cdot N_1 \cdot f \cdot \Phi_M \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

E_{eff} = satuan dalam volt

f = satuan dalam Hertz atau Cps

Φ_M = satuan dalam Weber

Pada rangkaian sekunder, fluks (Φ) bersama tadi juga menimbulkan :

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \text{ atau}$$

$$e_2 = -E_M \cdot \sin(90^\circ + \omega t) \dots \dots \dots (2.7)$$

Harga efektifnya :

$$(E_{eff})_2 = \frac{N_2 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_M}{\sqrt{2}}$$

$$= 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi_M \dots \dots \dots (2.8)$$

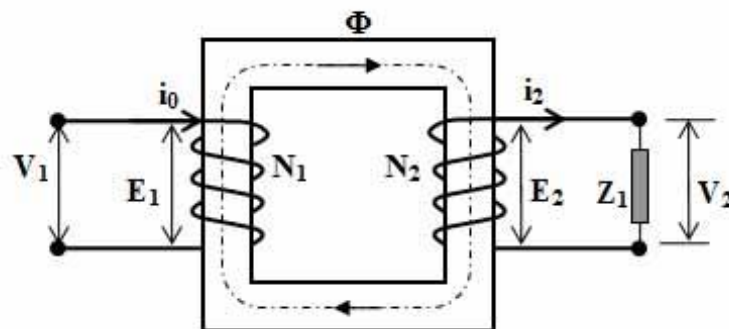
Dengan demikian perbandingan transformasi antara kumparan primer dan sekunder adalah :

$$a = \frac{(E_{eff})_1}{(E_{eff})_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots \dots \dots (2.9)$$

Harga $a > 1$ disebut trafo step down, dan $a < 1$ disebut trafo step up.⁴

2.3.2 Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2=V_2/Z_L$ dengan $\theta_2=$ faktor kerja beban.



Gambar 2.5 Gambar Transformator Berbeban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) N_2I_2 yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnitan 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 yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I'_2 \dots \dots \dots (2.10)$$

Bila rugi besi diabaikan I_c diabaikan maka $I_0=I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2 \dots \dots \dots (2.11)$$

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

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I'_2) - N_2 I_2 \dots \dots \dots (2.12)$$

Hingga $N_1 I'_2 = N_2 I_2$

Karena nilai I_M dianggap kecil maka $I'_2 = I_1$ ⁵

⁴ Rijono, Yon, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ANDI Yogyakarta, 1997, Hal 6-13
⁵ Zuhail, Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya, Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama, 1995, Hal 46-47

Jadi, $N_1 I_1 = N_2 I_2$ atau $I_1 / I_2 = N_2 / N_1$(2.13)

2.4 Komponen Utama Transformator

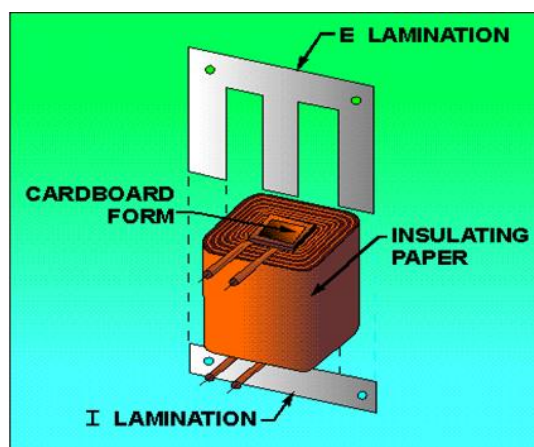
Komponen utama transformator tenaga terdiri dari bagian-bagian diantaranya: inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, tangki konservator, peralatana Bantu pendinginan transformator, tap changer dan alat pernapasan (*dehydrating breather*).

2.4.1 Inti Besi

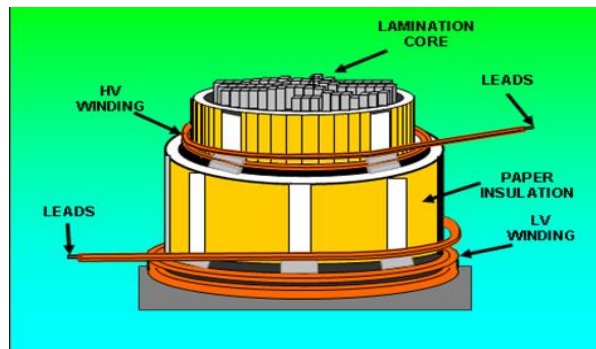
Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi,magnetik yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.

2.4.2 Kumparan Transformator

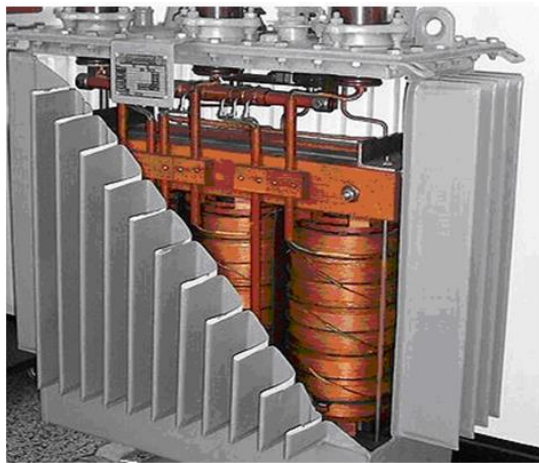
Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan atau gulungan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.6 Gambar Konstruksi belitan transformator



Gambar 2.7 Gambar fisik belitan transformator tenaga



Gambar 2.8 Gambar Komponen-komponen internal transformator

2.4.3 Minyak Transformator

Minyak Transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai bagian dari bahan isolasi, minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin minyak transformator harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan.

2.4.4 Bushing

Bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator merupakan alat penghubung antara kumpulan transformator dengan jaringan luar. Bushing sekaligus berfungsi sebagai penyekat/isolator antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.



Gambar 2.9 Gambar Bushing Transformator

2.4.5 Tangki Konservator

Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Diantara tangki dan trafo dipasangkan relai bucholz yang akan meyerap gas produksi akibat kerusakan minyak. Untuk menjaga agar minyak tidak terkontaminasi dengan air, ujung masuk saluran udara melalui saluran pelepasan/venting dilengkapi media penyerap uap air pada udara, sering disebut dengan silica gel dan dia tidak keluar mencemari udara disekitarnya.



Gambar 2.10 Gambar Tangki Konvensator

2.4.6 Peralatan Bantu Pendinginan Transformator

Peralatan bantu pendinginan transformator berfungsi untuk menjaga agar transformator bekerja pada suhu rendah. Pada inti besi dan kumparan – kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi tembaga. Maka panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, ini akan merusak isolasi, maka untuk mengurangi kenaikan suhu yang berlebihan tersebut transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.

Secara alamiah media pendingin (minyak isolasi) mengalir karena perbedaan suhu tangki minyak dan sirip-sirip transformator (Radiator). Untuk mempercepat pendinginan transformator dilengkapi dengan kipas yang dipasang di radiator transformator dan pompa minyak agar sirkulasi minyak lebih cepat dan pendinginan lebih optimal.⁶



Gambar 2.11 Gambar Pendingin Transformator

⁶ M. Solikhudin. 2010. Studi Gangguan. Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta, 2010 Hal 4-6

Tabel 2.1 Tabel Klasifikasi Pendinginan Transformator

CARA PENDINGINAN	JENIS	SINGKATAN
Pendinginan Alam	Air Natural Colling (Pendinginan dengan udara biasa) Oil-immersed Natural Colling (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak) Oil natural Air natural (pendinginan dengan udara dan minyak) Oil-immersed forced-oil circulation (pendinginan dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan)	AN ON ONAN OFN
Pendinginan Buatan (Udara)	Oil-immersed Forced-Oil Corculation with Air-Blast Colling (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dengan semburan udara) Oil-immersed Air-blast Colling/Oil Naturan Air Force (Pendinginan dengan direndam kedalam minyak dan dihembuskan udara) Air-blast Colling (Pendinginan dengan udara yang dihembuskan)	OFB OB/ONAF AB
Pendinginan buatan (Air)	Oil-immersed Water Colling (Pendingin dengan direndam minyak dan juga dibantu dengan air) Oil-immersed Forced-oil Circulation with Water Colling (Pendingin dengan direndam kedalam minyak yang dialirkan dan juga dibantu dengan pendinginan air)	OFW

2.4.7 Tap Changer

Tap changer berfungsi untuk menjaga tegangan keluaran yang diinginkan dengan input tegangan yang berubah-ubah. Kualitas operasi tenaga listrik jika tegangan nominalnya sesuai ketentuan, tapi pada saat operasi dapat saja terjadi penurunan tegangan sehingga kualitasnya menurun, untuk itu perlu alat pengatur tegangan agar tegangan selalu pada kondisi terbaik, konstan dan berkelanjutan.

Ditinjau dari cara pengoperasiannya, tap changer terdiri dari dua tipe yaitu on- load yang bekerja secara otomatis jika merasakan tegangan

kurang/lebih dan off-load yang dapat dipindah tap hanya jika trafo tidak berbeban/bertegangan.

2.4.8 Alat Pernapasan (*Dehydrating Breather*)

Alat pernapasan (*Dehydrating Breather*) Sebagai tempat penampungan pemuaiian minyak isolasi akibat panas yang timbul, maka minyak ditampung pada tangki yang sering disebut sebagai konservator. Pada konservator ini permukaan minyak diusahakan tidak boleh bersinggungan dengan udara, karena kelembaban udara yang mengandung uap air akan mengkontaminasi minyak walaupun proses pengkontaminasinya berlangsung cukup lama. Untuk mengatasi hal tersebut, udara yang masuk kedalam tangki konservator pada saat minyak menjadi dingin memerlukan suatu media penghisap kelembaban, yang digunakan biasanya adalah silica gel. Kebalikan jika trafo panas maka pada saat menyusut maka akan menghisap udara dari luar masuk kedalam tangki dan untuk menghindari terkontaminasi oleh kelembaban udara maka diperlukan suatu media penghisap kelembaban yang digunakan biasanya adalah silica gell, yang secara khusus dirancang untuk maksud tersebut diatas.⁷

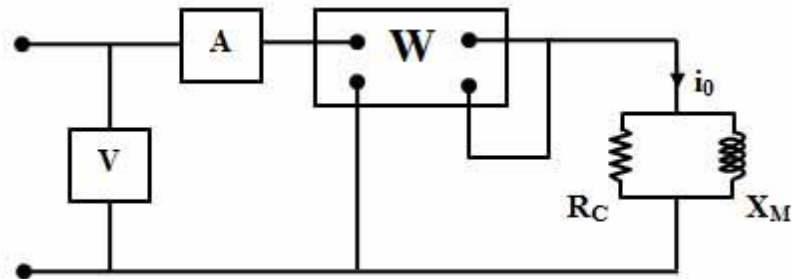
2.5 Menentukan Parameter Transformator

Parameter transformator yang terdapat pada model rangkaian (rangkaiian ekivalen) R_c , X_M , R_{ek} , dan X_{ek} , dapat ditentukan besarnya dengan dua macam pengukuran (test) yaitu pengukuran beban nol dan pengukuran hubungan singkat.

2.5.1 Pengukuran Beban Nol

Dalam keadaan tanpa beban bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 , seperti telah diterangkan terdahulu maka hanya I_0 yang mengalir.

⁷ M. Solikhudin. 2010. Studi Gangguan. Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta, 2010 Hal 7



Gambar 2.12 Gambar Parameter pengukuran beban nol

Dari pengukuran daya yang masuk (P_1), arus I_0 dan tegangan V_1 akan diperoleh harga :

$$R_c = V_1^2/P_1$$

$$Z_0 = V_1/I_0 = (jX_M R_c) / (R_c + jX_M) \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana :

Z_0 = impedansi inti

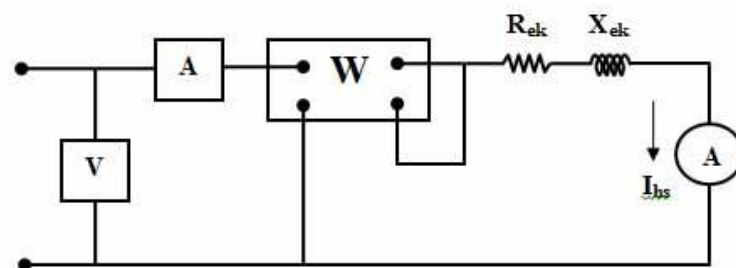
X_M = reaktansi pemagnet

I_0 = Arus tanpa beban,

R_c = hambatan inti

2.5.2 Pengukuran Hubungan Singkat

Hubungan singkat berarti impedansi beban Z_L diperkecil menjadi nol, sehingga hanya impedansi $Z_{ek} = R_{ek} + jX_{ek}$ yang membatasi arus. Karena harga R_{ek} dan X_{ek} ini relative kecil, harus dijaga agar tegangan yang masuk (V_{hs}) cukup kecil sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi arus nominal. Harga I_0 akan relative kecil bila dibandingkan dengan arus nominal, sehingga pada pengukuran ini dapat diabaikan.



Gambar 2.13 Gambar Pengukuran Trafo Hubung Singkat

Dengan mengukur tegangan V_{hs} , arus H_{hs} , dan daya P_{hs} , akan dapat dihitung parameter:

$$R_{ek} = P_{hs}/(H_{hs})^2$$

$$Z_{ek} = V_{hs}/H_{hs} = R_{ek} + jX_{ek}$$

$$X_{ek} = \sqrt{(Z_{ek}^2 - R_{ek}^2)} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

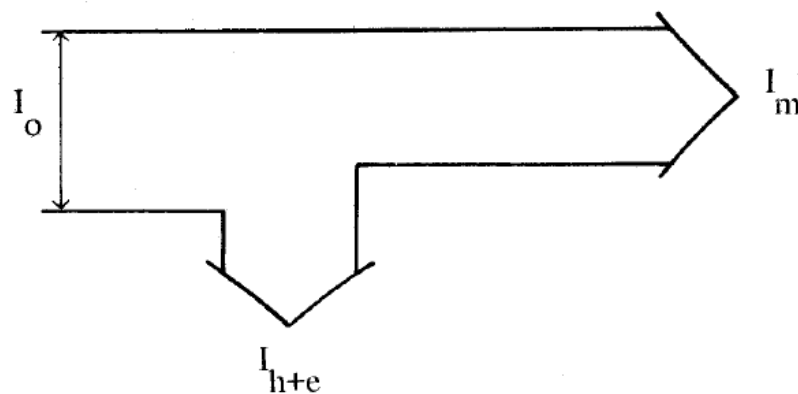
R_{ek} = hambatan ekivalen

Z_{ek} = impedansi ekivalen

X_{ek} = reaktansi ekivalen.⁸

2.6 Rangkaian Pengganti Transformator

Pada tes hubungan terbuka, telah dijelaskan bahwa dengan adanya tegangan primer U_1 , maka akan terjadi I_0 yang dapat diuraikan menjadi I_m dan I_{h+e}



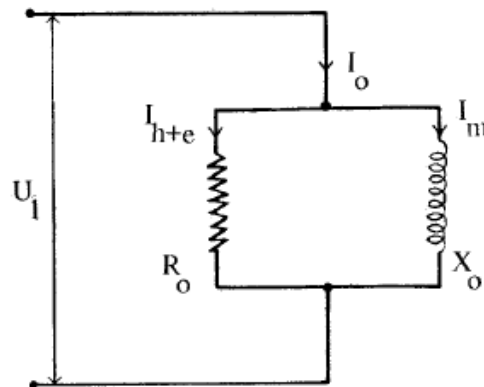
Gambar 2.14 Gambar Bagian I_m dan I_{h+e}

I_m : harga arus yang efektif dalam pembentukan magnet.

I_{h+e} : harga arus yang membentuk rugi-rugi besi dalam pembentukan magnet.

⁸ Zuhail, Dasar Teknik Tenaga Listrik, Penerbit ITB, 1991, Hal 26-27

Dari gambar 2.6 di atas, I_m dan I_{h+e} dapat digambarkan sebagai berikut :

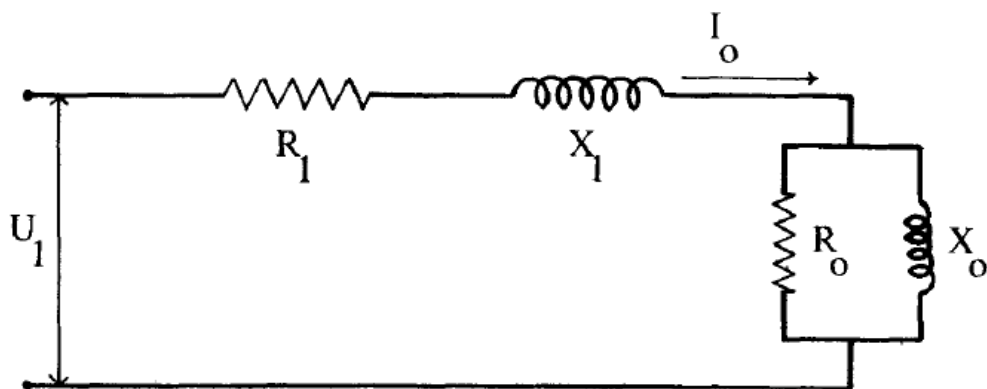


Gambar 2.15 Gambar Rangkaian R_0 dan X_0

Pada transformator tidak berbeban pada kumparan primer akan mengalir arus sebesar I_0 .

$$U_1 = I_0 (R_0 + jX_0) + I_0 (R_1 + jX_1) \dots\dots\dots(2.16)$$

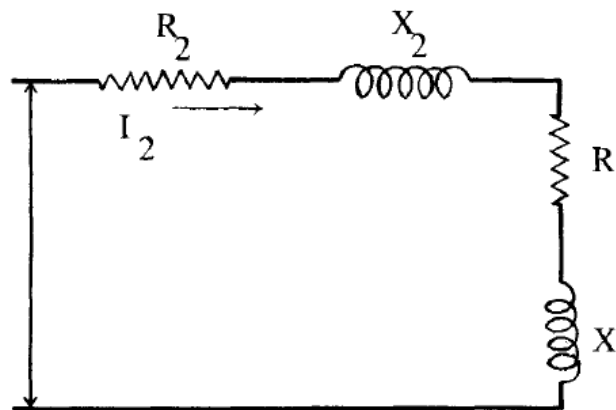
Rangkaian primer dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.16 Gambar Rangkaian Pengganti Primer

Jika kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z , dengan $Z = (R + jX)$, maka pada kumparan sekunder mengalir arus I_2 yang sumbernya adalah E_s

$$E_s = I_2 [(R_2 + R) + j(X_2 + X)] \dots\dots\dots(2.17)$$



Gambar 2.17 Gambar Rangkaian Pengganti Sekunder

Rangkaian ekivalen sekunder di atas dapat disambungkan dengan rangkaian primer bila harga $E_s = E_p$

Untuk menjadikan $E_s = E_p$, maka harga E_s dikalikan a atau E_p dibagi dengan a tergantung dari harga tersebut dibawa ke primer atau ke sekunder.

Apabila harga-harga GGL induksi dibawa ke sekunder E_p' menjadi E_p/a . Akibatnya seluruh harga kumparan primer berubah, dan berlaku rumus-rumus :

$$E_p' = E_s = E_p/a \dots\dots\dots(2.18)$$

$$I_1' = a \cdot I_1 \dots\dots\dots(2.19)$$

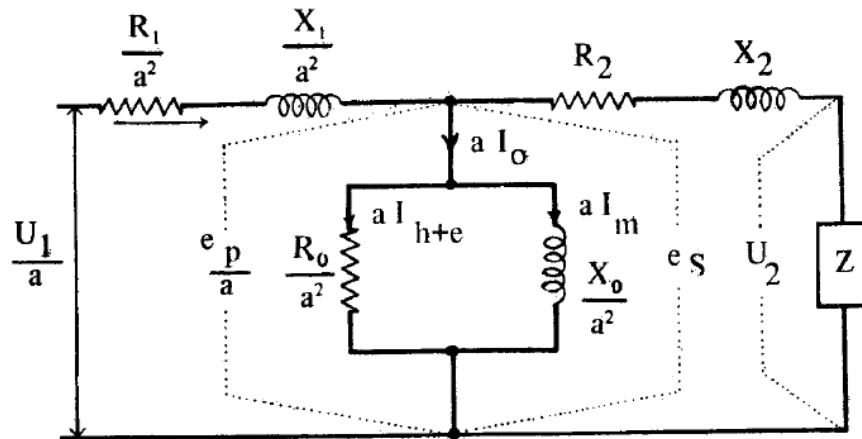
$$U_1' = U_1/a \dots\dots\dots(2.20)$$

$$R_1' = R_1/a \dots\dots\dots(2.21)$$

$$X_1' = X_1/a \dots\dots\dots(2.22)$$

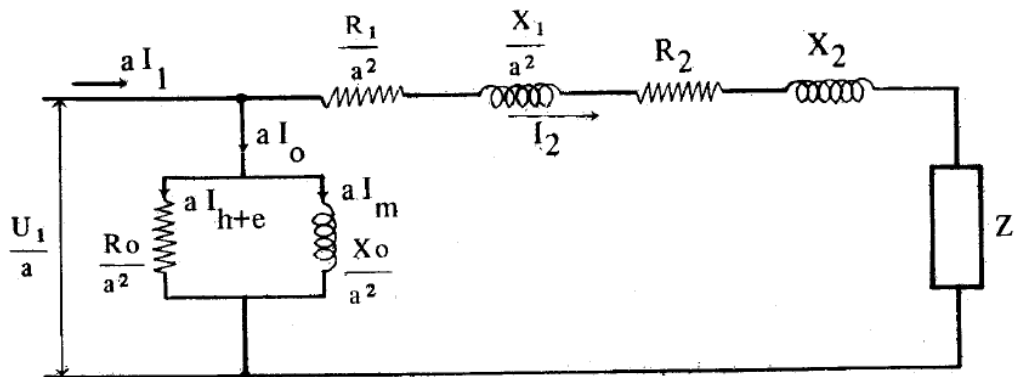
$$R_0' = R_0/a^2 \dots\dots\dots(2.23)$$

$$X_0' = X_0/a^2 \dots\dots\dots(2.24)$$



Gambar 2.18 Gambar Rangkaian pengganti primer dibawa ke sekunder

Oleh karena besarnya arus tanpa beban sedikit sekali pengaruhnya terhadap drop tegangan maka digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.19 Gambar Rangkaian pengganti pendekatan primer ke sekunder

Apabila harga sekunder dipindahkan ke primer, berlaku rumus-rumus

$$E'_s = aE_s \dots \dots \dots (2.25)$$

$$I'_1 = I_2/a \dots \dots \dots (2.26)$$

$$U'_2 = aU_2 \dots \dots \dots (2.27)$$

$$R'_2 = a^2R_2 \dots \dots \dots (2.28)$$

$$X'_2 = a^2X_2 \dots \dots \dots (2.29)$$

$$Z' = a^2Z \dots \dots \dots (2.30)$$

Dari data-data pemindahan diatas, kita bisa menggambarkan rangkaian pengganti dan rangkaian pendekatan sekunder dibawa ke primer.⁹

2.7 Daya Aktif, Daya Semu, dan Daya Reaktif

2.7.1 Daya Aktif

Daya aktif atau daya nyata dirumuskan dengan $VI \cos \theta$ dengan simbol P dalam satuan watt (W), kilo watt (KW), mega watt (MW). Jadi,

$$P = \sqrt{3} \cdot VI \cos \theta \dots \dots \dots (2.31)$$

$$P_1 = P_2 \rightarrow V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2 \dots \dots \dots (2.32)$$

2.7.2 Daya Semu

Perkalian tegangan V dengan arus I dalam kedua besaran ini dalam bentuk bilangan kompleks adalah VI^* yang dinamakan daya semu dengan simbol S dalam satuan volt ampere (VA), kilo volt ampere (KVA), mega volt ampere (MVA). Arus I^* adalah arus konjugate dari I . Jadi,

$$S = \sqrt{3} \cdot VI \dots \dots \dots (2.33)$$

2.7.3 Daya Reaktif

Daya reaktif atau daya khayal dirumuskan dengan $S \sin \theta$ atau $VI \sin \theta$ dengan simbol Q , dalam satuan volt ampere reaktif (VAR), kilo volt ampere reaktif (KVAR), mega volt ampere reaktif (MVAR). Jadi,

$$Q = \sqrt{3} \cdot S \sin \theta = \sqrt{3} \cdot VI \sin \theta \dots \dots \dots (2.34)^{10}$$

2.8 Rugi-rugi Transformator

Rugi – rugi transformator terbagi menjadi dua antara lain sebagai berikut:

2.8.1 Rugi Variabel

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga $P_{CU} = I^2R$. Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak tetap tergantung pada beban.

⁹Sumanto, Teori Transformator, Penerbit ANDI OFFSET Yogyakarta, Cetakan Pertama, 1991, Hal 9-12

¹⁰ Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, Rangkaian Listrik, Penerbit ANDI YOGYAKARTA, 2013, Hal 74

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 \dots \dots \dots (2.35)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.36)$$

Dengan demikian rugi tembaga total :

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2} \\ = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.37)$$

Karena $I_2 = a I_1$, maka persamaan dapat juga ditulis dengan

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + (a I_1)^2 R_2 \\ = I_1^2 (R_1 + a^2 R_2) \\ = I_1^2 R_{ek1}$$

atau dapat ditulis

$$P_{cu} = I_2^2 R_{ek2} \dots \dots \dots (2.38)$$

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah :

$$P_{rugi\ total} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \dots \dots \dots (2.39)$$

Besarnya rugi-rugi tembaga pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan persamaan :

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \times P_{t1} \dots \dots \dots (2.40)$$

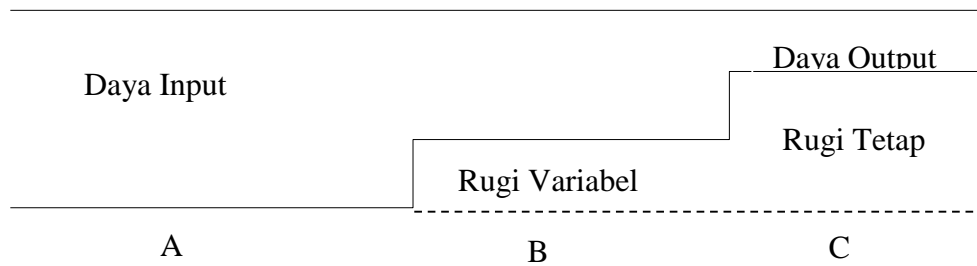
Keterangan :

P_{t2} = Rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan tertentu.

P_{t1} = Rugi-rugi tembaga beban penuh.

S_2 = Beban yang dioperasikan

S_1 = Nilai pengenalan



Gambar 2.20 Gambar Rugi-rugi Transformator

$$\eta_{listrik} = \frac{C}{B} \times 100\% \dots\dots\dots(2.41)$$

$$\eta_{mekanik} = \frac{B}{A} \times 100\% \dots\dots\dots(2.42)$$

$$\eta_{Trafo} = \eta_{listrik} \times \eta_{mekanik} = \frac{C}{B} \times \frac{B}{A} = \frac{C}{A} = \frac{P_o}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.43)$$

2.8.2 Rugi Tetap

Rugi tetap terdiri atas :

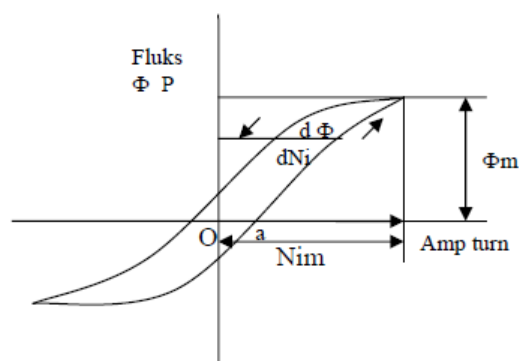
a. Rugi histerisis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \text{ watt} \dots\dots\dots(2.44)$$

Dimana :

K_h = konstanta

B_{maks} = fluks maksimum (weber)



Gambar 2.21 Gambar Lingkaran Histerisis

b. Rugi ‘Arus Eddy’, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada besi inti.¹¹

$$P_e = K_e^2 \cdot f^2 \cdot B_{\text{mals}} \dots \dots \dots (2.45)$$

$$\text{Jadi, rugi besi (rugi inti) } P_i = P_h + P_e \dots \dots \dots (2.46)$$

2.9 Efisiensi Transformator

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara keluaran daya yang berguna dan masuk daya total. Karena masukan ke transformator sama dengan keluaran daya yang berguna ditambah kerugiannya, maka persamaan efisiensi dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut :

$$\text{Daya keluaran} = \text{daya input} - \text{kerugian}$$

$$\text{Persen efisiensi} = \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}} \times 100\%$$

$$= \frac{\text{daya masukan} - \text{kerugian}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.47)$$

Dari persamaan di atas, jelaslah bahwa efisiensi transformator dapat ditentukan untuk estiap beban dengan pengukuran langsung daya masukannya dan daya keluarannya.¹²

¹¹ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, Penerbit ITB, 1991, Hal 34

¹² Lister, Eugene C. , Mesin dan Rangkaian Listrik, Penerbit Erlangga, 1993, Hal 176-177

2.10 Faktor Umur Transformator

Berikut faktor yang mempengaruhi umur transformator adalah :¹³

2.11 Faktor Beban

Menentukan faktor pembebanan dengan cara sebagai berikut :

$$K = \frac{Pr}{Pp} \dots\dots\dots(2.47)$$

Keterangan : Pp = Puncak beban
Pr = Beban Rata-rata
K = Faktor Beban

2.12 Faktor *Zbase* dan *Zreal*

Karena nilai resistansi transformator masih dinyatakan dalam satuan persen, untuk mencari rugi- rugi tembaga maka dicari nilai resistansi sesungguhnya, dengan nilai resistansi transformator ditentukan dengan % dari tegangan primer dan tegangan sekunder. Berdasarkan penentuan nilai resistansi sebagai berikut :

$$Z_{\text{dasar}} = \frac{(kv)^2}{MVA} \dots\dots\dots(2.48)$$

$$Z_{\text{sesungguhnya}} = Z_{\text{pu}} \times Z_{\text{dasar}} \dots\dots\dots (2.49)$$

2.13 Menghitung Perbandingan Rugi

Untuk Menghitung Perbandingan Rugi diperlukan Rumus sebagai berikut, dan untuk Rugi Beban Nol (No Load Losses) terdapat di Nameplate Trafo.

$$d = \frac{\text{Rugi tembaga daya pengenalan}}{\text{Rugi beban nol}} \dots\dots\dots(2.50)$$

2.14 Faktor *Ultimate Top Oil*

Untuk menentukan Faktor Ultimate Top Oil dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut :¹⁴

$$\Delta\theta_{ou} = \Delta\theta_{oi} \left[\frac{1+dK^2}{1+d} \right] \dots\dots\dots(2.51)$$

Keterangan $\Delta\theta_{ou}$ = *Ultimate top oil*

$\Delta\theta_{oi}$ = ON = °C & OF = °C

¹³ Pujiono, P., Pambudi, P., & Mujiman, M. 2019. ANALISIS PEMBEBANAN TERHADAP USIA PAKAI TRANSFORMATOR TENAGA DI GARDU INDUK 150 KV. *jurnal elektrikal*, 3(1), 11-20. Retrieved from <https://ejournal.akprind.ac.id/index.php/elektrikal/article/view/2477>

¹⁴ IEEE Std C57.91-2011 IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators Hal 15

- K = ONAF & ONAN
- = OFAF & OFWF
- d = Perbandingan rugi transformator

2.15 Kenaikan Top Oil Temperature

Suhu minyak bagian atas (*top oil temperature*) adalah suhu yang ada pada bagian atas kumparan. Suhu minyak bagian atas pada keadaan beban penuh harus ditentukan oleh pabrik. Jika kekurangan data nilai suhu minyak bagian atas maka nilainya harus diasumsikan, pada keadaan beban penuh, suhu *hotspot* tertinggi untuk *gradient* suhu minyak bagian atas adalah 110°C, dimana ini adalah suhu minyak maksimum yang diizinkan untuk perkiraan masa operasional normal. Persamaan untuk suhu minyak bagian atas (*top oil temperature*) adalah :¹⁵

$$\Delta\theta_{on} = \Delta\theta_{(n-1)} + (\Delta\theta_{ou} - \Delta\theta_{(n-1)}) (1 + e^{-\frac{t}{\tau}}) \dots\dots\dots(2.52)$$

- Keterangan $\Delta\theta_{on}$ = Temperatur *top oil* °C
- $\Delta\theta_{(n-1)}$ = Temperatur kenaikan awal minyak °C
- t = Waktu dalam jam
- τ = Waktu minyak dalam jam

2.16 Kenaikan Hotspot Temperature

Hotspot temperature dengan sirkulasi minyak alami. Persamaan untuk temperature hotspot dengan sirkulasi alami sebagai berikut :¹⁶

$$\Delta\theta_{cr(alami)} = \Delta\theta_{br} + 1,1 \Delta\theta_{wo} \dots\dots\dots(2.53)$$

Temperatur *hotspot* dengan sirkulasi minyak paksaan bisa diketahui standart IEC 76 kenaikan temperatur *hotspot* sirkulasi minyak paksaan $\Delta\theta_b$ berkurang menjadi °C.

¹⁵ INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09
¹⁶ INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09 Hal 33

$$\Delta\theta_{cr}(\text{paksaan}) = \Delta\theta_b + (\theta_{cr}(\text{alami}) - \theta_b) \dots\dots\dots (2.54)$$

Suhu sekitar sangat berpengaruh untuk menentukan nilai dari temperatur *hotspot*. Penulis mengasumsikan suhu sekitar standard IEC °C, standard IEEE °C dan suhu sebenarnya di indonesia memiliki suhu rata-rata siang hari °C dan malam hari °C.

$$\theta_{hn} = \theta_a + \Delta\theta_{on} + \Delta\theta_{td} \dots\dots\dots (2.55)$$

Keterangan : θ_{hn} = temperatur *hotspot*

θ_a = suhu sekitar

$\Delta\theta_{on}$ = temperatur *top oil*

$\Delta\theta_{td}$ = Selisih antara temperature *hot spot* dan *top oil*

2.17 Hotspot Temperature dan Top Oil

Untuk menentukan *Hotspot Temperature* dan *Top Oil* dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut:¹⁷

$$\Delta\theta_{td} = (\Delta\theta_{cr} - \Delta\theta_b) K^{2y} \dots\dots\dots (2.56)$$

Keterangan : $\Delta\theta_{td}$ = Selisih antara temperature *hot spot* dan *top oil*

$\Delta\theta_{cr}$ = Temperatur *hotspot* dengan sirkulasi minyak paksaan

$\Delta\theta_b$ = Standart IEC 76 (°C) kenaikan temperatur *top oil*

K = Faktor beban

y = kontanta (ONAN dan ONAF)
(OFAF dan OFWF)

2.18 Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif

Perhitungan Laju Penuaan Thermal Relatif dapat menggunakan rumus sebagai berikut¹⁸

$$V = 2^{(\theta_c - \theta_{cr})/6}$$

Dimana

V = laju penuaan thermal relatif

θ_{cr} = standard IEC (98° C)

2.19 Perhitungan Pengurangan Umur Transformator

Perhitungan Pengurangan Umur Transformator dapat menggunakan rumus sebagai berikut

$$L = \frac{h}{3T} \{V + \sum 4V + \sum 2V + V\}$$

¹⁷ INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09 Hal 35

¹⁸ INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09 Hal 40

2.20 Perhitungan Sisa Umur Transformator

Perhitungan Sisa Umur Transformator Daya dapat menggunakan rumus sebagai berikut¹⁹

$$n = \frac{\text{umur dasar (tahun)} - \text{lama transformator sudah dipakai (tahun)}}{\text{susut umur transformator (p. u)}}$$

¹⁹ INTERNATIONAL STANDARD IEC 60354 Loading guide for oil-immersed power transformers Second edition 1991-09 Hal 41

