

**SISTEM PENYEIMBANGAN BEBAN TRAFO DISTRIBUSI
AKIBAT ADANYA PENAMBAHAN BEBAN
YANG TIDAK MERATA
(App. PT. PLN (PERSERO) CABANG MEDAN RAYON MEDAN TIMUR)**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Ujian Sarjana**

Oleh :

**MUHAMMAD SOFYAN
N I M : 01 812 0022**



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2006**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 7/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
 2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
 3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
- Access From (repository.uma.ac.id)7/9/23

ABSTRACT

Total energy electric that had been used by customer of PLN is not longer constant from times, for the example in night load will increase sosial significant, not only that the demand of adding power by customer and request for new installation is also increase. This case need special treatment so the distribution of energy electric can walk well.

The adding of load which uncertain, influence distribution transformer that use supplied certain areas, where this distribution transformer work in three phase four wire system which is R, S, T and Neutral phase. For result the load on each phase not flat and this thing is one of the factors which make a damage in distribution transformer.

Means to balance the load in distribution transformer is pick more longer load in one phase to another where the load is more small.

DAFTAR ISI

RINGKASAN	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Metodologi Penelitian.....	4
1.6. Sistematika Pembahasan.....	4
BAB II PRINSIP DASAR TRANSFORMATOR	
2.1. Umum.....	6
2.2. Bagian-Bagian Transformator.....	8
2.2.1. Inti (<i>core</i>) Transformator.....	8
2.2.2. Kumbaran atau Belitan Transformator.....	10
2.3. Prinsip Kerja Transformator.....	12
2.4. Berbagai Keadaan Transformator.....	12

2.4.1. Keadaan Transformator Tanpa Beban	13
2.4.2. Keadaan Transformator Berbeban	20
2.4.3. Keadaan Transformator Hubung Singkat.....	23
2.5. Polaritas Transformator.....	27
2.6. Efisiensi Transformator.....	32
2.7. Efisiensi Sepanjang Hari	33

BAB III TRANSFORMATOR TIGA FASA DAN BERBAGAI HUBUNGANNYA

3.1. Umum.....	35
3.2. Berbagai Hubungan Transformator Tiga Fasa	38
3.2.1. Hubungan Wye-Wye (Y-Y)	39
3.2.2. Hubungan Wye-Delta (Y- Δ)	40
3.2.3. Hubungan Delta-Delta (Δ - Δ)	41
3.2.4. Hubungan Delta-Wye (Δ -Y)	42
3.3. Pelat Nama Transformator Daya.....	43

BAB IV PENYEIMBANGAN BEBAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI AKIBAT ADANYA PENAMBAHAN BEBAN YANG TIDAK MERATA

4.1. Sebab-Sebab Terjadinya Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi	48
4.2. Pengaruh Penambahan Beban Yang Tidak Merata di Setiap Fasa Pada Transformator Distribusi.....	48

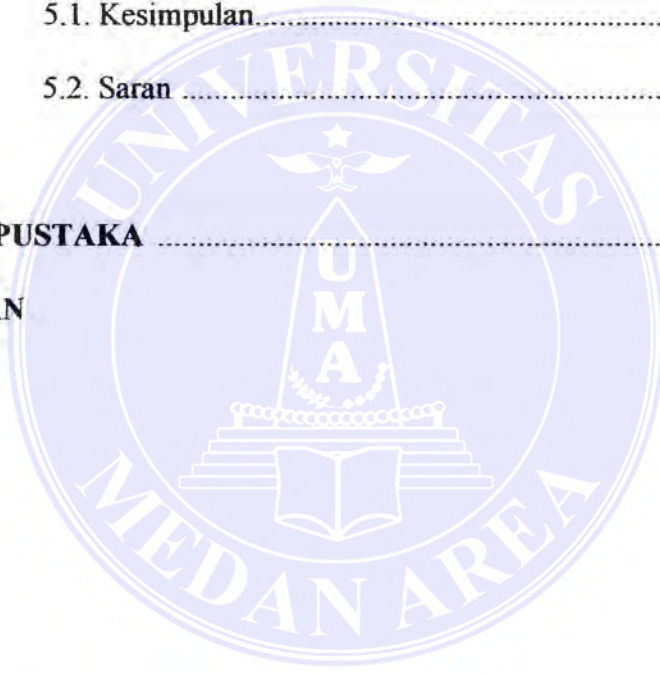
4.3. Usaha-Usaha Yang Dilakukan Untuk Menyeimbangkan Beban Transformator Distribusi	50
4.3.1. Pemindahan Beban Antar Fasa.....	50
4.3.2. Penambahan atau Pemindahan Jurusan Pada Trafo	51
4.3.3. Memperbesar Daya Transformator Distribusi	52

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.....	57
5.2. Saran	57

DAFTAR PUSTAKA	59
-----------------------------	----

LAMPIRAN



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan akan energi listrik dewasa ini semakin meningkat pesat sesuai dengan kemajuan zaman. Hal ini dapat kita lihat semakin besarnya permintaan akan energi listrik, baik permintaan oleh masyarakat perkotaan maupun masyarakat pedesaan yang mana listrik masuk desa bukan hal yang baru lagi.

Jumlah energi listrik yang dipakai oleh konsumen tidak senantiasa konstan, maksudnya energi listrik yang dipakai tidak selalu sama dari waktu ke waktu. Misalnya pada malam hari, pada saat inilah energi listrik paling banyak dipakai oleh konsumen baik untuk penerangan maupun untuk hiburan lainnya seperti TV, radio dan industri yang beroperasi pada malam hari. Sedangkan pada siang hari hanya dipakai untuk alat-alat rumah tangga dan industri yang beroperasi pada siang hari. Sehingga energi listrik yang dipakai relatif lebih sedikit dibandingkan pada malam hari. Dalam hal ini pihak PLN harus siap sedia untuk mengatasi penambahan beban yang tidak menentu tersebut. Maka diperlukan penanganan khusus agar pendistribusian energi listrik dapat berjalan baik.

Pertambahan beban yang tidak merata tersebut mempengaruhi transformator yang digunakan untuk mensuplai area tertentu. Transformator tiga fasa telah ditentukan berapa besar daya yang harus dipikul oleh transformator tersebut yang disesuaikan dengan kebutuhan konsumen dan pertambahan rata-rata beban dalam tiap tahun pada suatu area.

Transformator yang digunakan adalah transformator distribusi yang menggunakan minyak sebagai bahan isolasi sekaligus sebagai pendingin transformator tersebut. Transformator tiga fasa mempunyai fasa R,S dan T, jadi apabila terjadi penambahan beban pada konsumen maka sudah dipastikan salah satu fasanya tidak seimbang dengan fasa yang lain. Jika hal ini dibiarkan terus menerus akan terjadi gangguan pada transformator tersebut. Oleh karena itu usaha untuk menyeimbangkan beban agar pada transformator terjadi keseimbangan antar fasa dan mencegah kerusakan dini pada transformator distribusi tersebut.

Beban yang dimaksud dalam hal ini adalah beban pada konsumen dimana dalam hal ini dibahas pada studi beban. Studi beban merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya, dan faktor daya atau daya reaktif yang terdapat diberbagai titik pada suatu jaringan listrik dalam keadaan pengoperasian normal, baik yang sedang berjalan pada saat ini maupun yang akan datang sesuai dengan tingkat penambahan rata-rata beban pada daerah tersebut. Jadi dengan studi beban diharapkan penyeimbangan terhadap penambahan beban dapat diatasi dengan baik sehingga penyeimbangan antar fasa pada transformator juga dapat dilakukan dengan sebaik mungkin.

1.2. Rumusan Masalah

Beban pada setiap fasa transformator distribusi tiga fasa diharapkan adalah beban yang seimbang dan simetris. Yang menjadi masalah dalam hal ini adalah akibat penambahan beban yang tidak merata dari waktu ke waktu. Baik penambahan beban

pada malam hari yang biasa disebut dengan waktu beban puncak maupun permintaan penambahan daya oleh konsumen lama dan permintaan pemasangan baru.

Cara atau usaha yang dilakukan untuk masalah ini sehingga didapat penyeimbangan beban antar fasa pada transformator distribusi dilakukan dengan sebaik mungkin sehingga mencegah kerusakan yang fatal pada transformator tersebut.

1.3. Tujuan

Maksud pemilihan judul Tugas Akhir ini karena dalam praktiknya di lapangan masalah penyeimbangan beban ini merupakan suatu hal yang paling sering dijumpai. Umumnya penanganannya dilakukan oleh pihak PLN dimana diketahui PLN merupakan produsen atau penyuplai energi listrik terbesar di tanah air.

Melalui Tugas Akhir ini juga diharapkan agar memperoleh suatu usaha memperpanjang masa pakai dari sebuah transformator distribusi dan bagaimana usaha penanganan dalam menjaga kestabilan beban tiap fasa transformator distribusi tiga fasa akibat pertambahan beban yang tidak merata pada konsumen dengan tingkat ketelitian yang tinggi dan tidak memakan waktu.

1.4. Pembatasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan yang terlalu luas dan menyimpang maka sesuai dengan judul Tugas Akhir ini yaitu “ *Sistem Penyeimbangan Beban Transformator Distribusi Akibat Adanya Penambahan Beban Yang Tidak Merata*”, (APP.P.T. PLN (PERSERO) CAB. MEDAN RAYON MEDAN TIMUR) masalah yang dibahas adalah usaha penyeimbangan beban transformator distribusi baik dikarenakan oleh

penambahan beban pada saat beban puncak maupun penambahan daya dan permintaan pemasangan baru oleh konsumen. Dalam hal ini penyeimbangan yang dilakukan adalah penyeimbangan beban antar fasa transformator distribusi dengan jangka waktu pengukuran beban transformator selama tiga bulan sekali.

1.5. Metodologi Penelitian

Dalam penulisan Tugas Akhir ini Penulis melakukan beberapa hal untuk mendapatkan data yang diperlukan antara lain:

- a. Studi kepustakaan (menganalisa berdasarkan studi yang ada)
- b. Melakukan riset langsung ke lapangan.

1.6. Sistematika Pembahasan

Urutan langkah pembahasan yang terdiri atas bab-bab membentuk sistematika pembahasan, adapun beberapa bab tersebut adalah:

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisikan uraian tentang latar belakang pemilihan judul, rumusan masalah, tujuan, pembatasan masalah, dan sistematika pembahasan.

BAB II Landasan Teori

Bab ini berisikan tentang teori-teori dasar transformator yang perlu diketahui untuk mempermudah pemahaman.

BAB III Transformator Tiga Fasa dan Berbagai Hubungannya

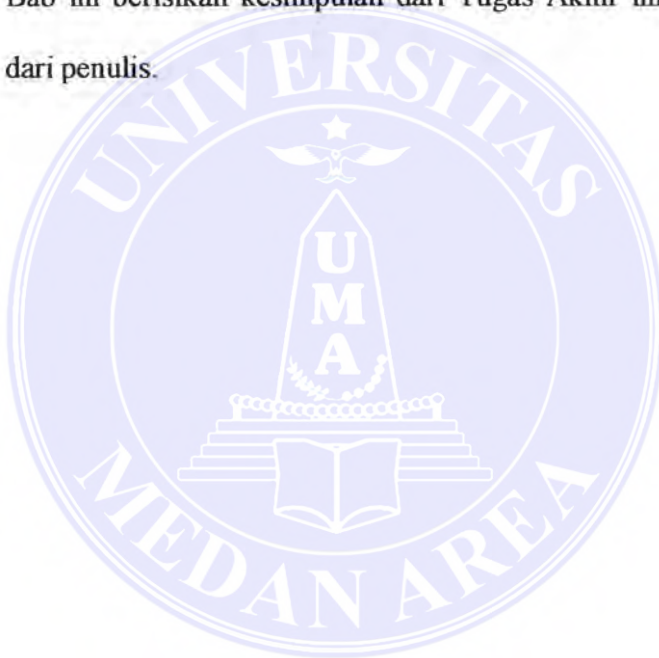
Bab ini menguraikan segala model hubungan transformator tiga fasa, kerugian dan keuntungan dari setiap hubungan.

BAB IV Penyeimbangan Beban Transformator Distribusi Akibat Adanya Penambahan Beban Yang Tidak Merata

Bab ini menjelaskan sebab-sebab terjadinya beban tidak seimbang, dampak yang ditimbulkan dan berbagai usaha untuk menyeimbangkannya.

BAB V Kesimpulan

Bab ini berisikan kesimpulan dari Tugas Akhir ini yang disertai saran dari penulis.



BAB II

PRINSIP DASAR TRANSFORMATOR

2.1. Umum

Transformator adalah suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berguna untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandengan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya.

Transformator merupakan suatu komponen yang sangat penting peranannya dalam sistem ketenagaan listrik. Keberadaan transformator merupakan suatu langkah maju dan penemuan besar bagi kemajuan dunia ketenagaan listrik.

Hal ini sangat terasa ketika Thomas A. Edison mengembangkan sistem distribusi daya listrik di kota New York Amerika Serikat pada bulan September 1882 dengan tegangan sistem 120 VDC. Dengan sistem yang ada tersebut menghasilkan kerugian yang besar karena arus listrik yang dialirkan sangat besar, sehingga penurunan tegangannya juga cukup besar. Untuk mengatasi hal tersebut pada waktu itu, pusat tenaga listrik diletakkan disetiap kota. Dan hal ini dirasakan sangat tidak efisien.

Bisa dibayangkan jika daya listrik yang diperlukan oleh suatu kota adalah sebesar 10 000 kVA, yang jaraknya kurang dari 10 km dari pembangkit tenaga

listrik. Dengan memperhitungkan : $S = V \cdot I$. Dimana I berbanding terbalik terhadap V, bila jaringan transmisi tersebut diberi tegangan rendah (misal 120 Volt), maka arus yang mengalir besar :

$$I = \frac{S}{V} = \frac{10.000 \times 10^3}{120} = 83,333 \text{ kA.}$$

Arus yang besar akan menimbulkan rugi yang besar yaitu : $P = I^2 R$. Selain itu arus yang besar akan memerlukan penampang kawat atau kabel yang besar yang tentunya sangat tidak ekonomis (biaya tinggi).

Dengan menggunakan transformator, dimana tegangan pembangkitan dinaikkan semaksimal mungkin, maka arus yang mengalir menjadi lebih kecil, yang menyebabkan rugi-rugi daya yang kecil dan penampang kawat yang digunakan hanya kecil saja, sehingga biaya yang dikeluarkan jauh lebih ekonomis, demikian juga dengan pusat pembangkit yang tidak perlu ditempatkan di beberapa tempat didekat kota.

$$I = \frac{S}{V} = \frac{10.000 \times 10^3}{500 \times 10^3} = 20 \text{ A}$$

Dapat dilihat bahwa perbedaan rugi-rugi yang ada jauh lebih kecil, bila tegangan jaringan dinaikkan sedemikian rupa dengan bantuan transformator.

Dalam bidang tenaga listrik, pemakaian transformator dikelompokkan menjadi ;

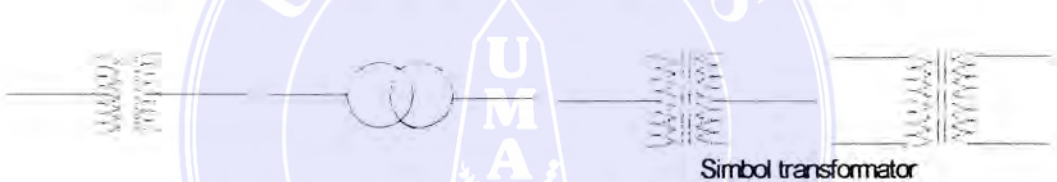
1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran yang terdiri dari transformator arus ($CT =$
Current Transformer) dan transformator tegangan ($PT =$ *Potential*

2.2. Bagian-Bagian Transformator

Konstruksi transformator daya biasanya terdiri atas bagian-bagian sebagai berikut:

1. Inti atau teras (*core*) yang dilaminasi
2. Dua buah kumparan, kumparan primer dan sekunder
3. Tangki
4. Sistem pendingin
5. Terminal
6. Bis kabel (*bushing*)

Berikut simbol dari sebuah transformator yang umum digunakan.



Gambar 2.1: Simbol transformator

2.2.1. Inti (*Core*) Transformator

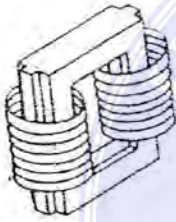
Pada umumnya inti transformator terdiri atas lapisan-lapisan plat besi. Tujuan inti transformator dibuat berlapis-lapis adalah untuk mengurangi arus atau yang lebih dikenal sebagai arus pusar (*eddy current*) dan arus histerisis. Apabila inti dibuat dari besi yang padu maka luas dari penampang tersebut akan membuat arus pusar akan semakin besar sehingga rugi-rugi yang ditimbulkan akan semakin besar pula. Meski rugi-rugi ini tidak dapat dihilangkan sama sekali tetapi paling tidak dapat diminimalis.

Tujuan utama menggunakan inti (*core*) pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis (*common magnetic circuit*) dan menambah jumlah fluksi.

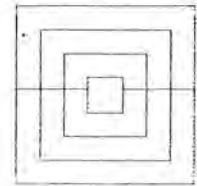
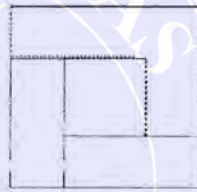
Berdasarkan letak kumparan terhadap inti, transformator terdiri dua macam konstruksi, yaitu :

1. Transformator Jenis Inti (*core type transformer*)

Dimana kumparan atau belitan transformator mengelilingi inti sedangkan konstruksi dari inti transformator jenis ini umumnya berbentuk huruf L dan U (lihat gambar 2.2).



a. Transformator jenis inti



b. Konstruksi lempengan logam inti transformator bentuk L dan U

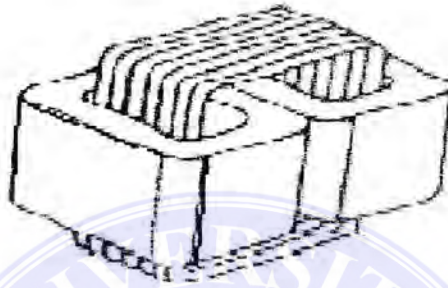
Gambar 2.2: Transformator jenis inti dan konstruksi lempengannya

Konstruksi (peletakan) kumparan pada praktiknya diatur dan saling berhimpit (*interleaving*) antara kumparan primer dan kumparan sekunder dengan maksud mengurangi kerugian magnetik (*magnetic leakage*) berupa reaktansi induktif.

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

2. Transformator Jenis Cangkang (*shell-type transformer*)

Pada transformator ini, kumparan atau belitan transformator dikelilingi oleh inti, sedangkan konstruksinya umumnya berbentuk huruf E, huruf L atau huruf F.



a. Transformator jenis cangkang



b. Konstruksi lempengan logam inti transformator bentuk E, I dan F

Gambar 2.3: Bentuk fisik dan konstruksi lempengan inti transformator jenis cangkang

2.2.2. Kumparan Atau Belitan Transformator

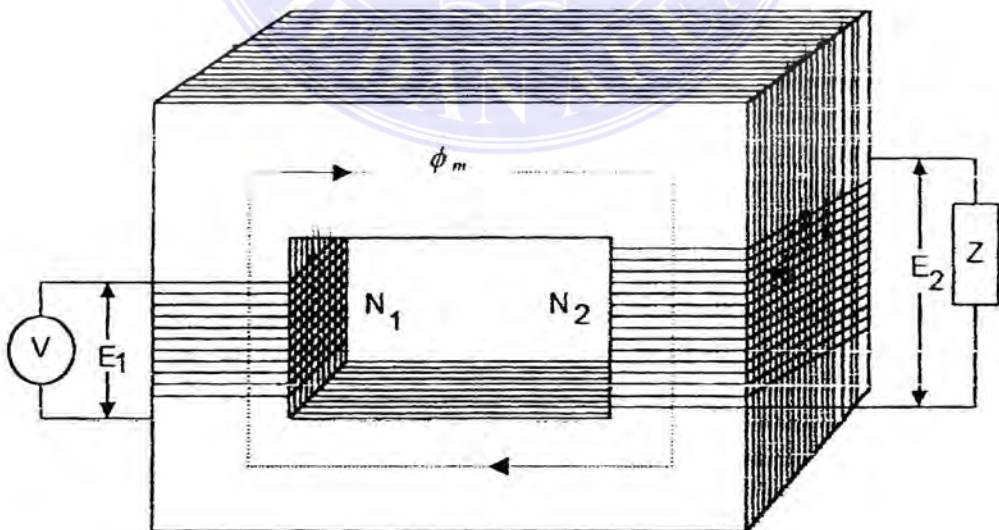
Kumparan pada transformator terbagi 2 yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan yang menjadi input disebut kumparan primer sedangkan kumparan yang menjadi output disebut kumparan sekunder. Apabila sebuah transformator belum dihubungkan ke sumber daya maka kita tidak dapat mengetahui mana kumparan primer dan mana kumparan sekunder sebab pada setiap ujung kumparan dapat disambungkan ke sumber daya.

Apabila jumlah belitan primer lebih banyak dari jumlah belitan sekunder ($N_1 > N_2$) maka transformator tersebut disebut transformator penurun tegangan (*Step Down Transformer*) dan apabila jumlah belitan sekunder lebih banyak dari jumlah belitan primer ($N_1 < N_2$) disebut transformator penaik tegangan (*step up transformer*).

Pada kumparan primer dan sekunder selalu dibalut oleh isolasi yang telah teruji agar tidak terjadi hubung singkat ke kumparan sebelahnya maupun ke inti transformator sehingga transformator beroperasi relatif aman apabila disentuh manusia.

Gambar berikut ini menunjukkan bagian-bagian utama dari transformator yaitu :

1. Inti transformator
2. Kumparan atau belitan primer yang dihubungkan ke sumber listrik
3. Kumparan atau belitan sekunder yang dihubungkan ke beban.



Gambar 2.4: Bagian-bagian utama dari sebuah transformator

2.3. Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah kumparan yang bersifat induktif, yang terpisah secara elektris namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi rendah. Apabila belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik akan muncul di dalam inti (*core*) yang dilaminasi, karena kumparan berbentuk rangkaian tertutup, maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks (Φ) 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 dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan secara magnetis.

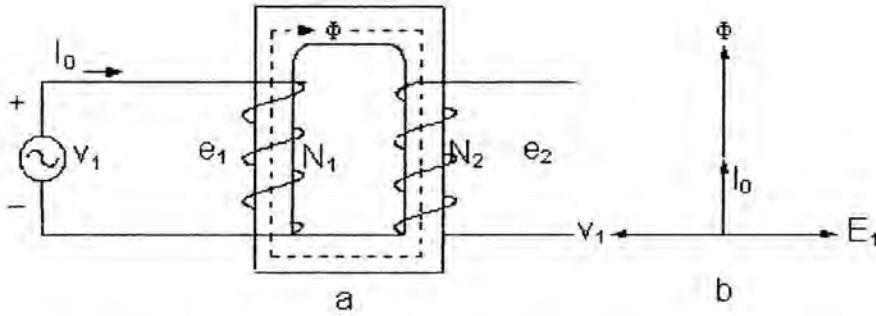
$$E = M \frac{dl}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana : E = gaya gerak listrik (GGL).....[Volt]
M = induksi bersama ...[Henry]

2.4. Berbagai Keadaan Transformator

Transformator mempunyai prinsip dan perhitungan yang berbeda dari setiap keadaan transformator tersebut. Hal ini dapat dilihat dari penjelasan berikut ini.

2.4.1. Keadaan Transformator Tanpa Beban



Gambar 2.5: Transformator tanpa beban

Bila belitan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber arus bolak-balik sinusoidal akan mengalir arus primer I_0 yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 (induktif). Arus prinsip I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan berbentuk sinusoidal.

$$\Phi = \Phi \text{ maks. Sin } \omega t \dots\dots\dots(2.2)$$

Fluks ini menginduksikan tegangan sesaat dalam kumparan primer yang disebut tegangan (GGL) induksi e_1 (Hukum Faraday).

$$e_1 = N_1 \frac{d\lambda_1}{dt} = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(Volt) \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana : e_1 = GGL induksi pada kumparan primer (Volt)

λ_1 = gandingan fluksi dalam kumparan primer

Φ = fluks (dianggap semua terkurung dalam inti)

N_1 = jumlah lilitan kumparan primer

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2) dan (2.3).

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\Phi \text{maks. sin } \omega t)}{dt} = -N_1 \cdot \omega \cdot \Phi \text{maks. cos } \omega t \dots\dots\dots(2.4)$$

(tertinggal 90^0 dan Φ)

Pada kondisi maksimum, $e_1 \text{ maks} = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi \text{ maks}$, dimana $\omega = 2\pi f$, sehingga harga efektifnya :

$$E_1 = \frac{e_1 \text{ maks}}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 \cdot 2\pi f \cdot \Phi \text{ maks}}{\sqrt{2}} = 4,44 N_1 \cdot f \cdot \Phi \text{ maks} \dots\dots\dots(2.5)$$

Jika tegangan bukan merupakan gelombang sinusoidal (*sinus wave*) maka persamaan (2.5) menjadi :

$$E_1 = 4 \cdot (\text{faktor bentuk}) \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi \text{ maks} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana faktor bentuk (*from faktor*) gelombang sinusoidal

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

Umumnya penurunan tegangan resistif (*resistive voltage drop*) dapat diabaikan, sehingga didapat :

$$\Phi \text{ maks} = \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1} \dots\dots\dots(2.7)$$

Pada rangkaian sekunder, fluks besama dapat menimbulkan :

$$e_2 = - N_2 \frac{d\phi}{dt} = - N_2 \cdot \omega \cdot \phi \text{ maks} \cdot \cos \omega t \dots\dots\dots(2.8)$$

Sehingga harga efektifnya :

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

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

$$E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot f \cdot \Phi \text{ maks} \dots\dots\dots(2.9)$$

Sehingga didapat : $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.10)$

Dengan mengabaikan rugi-rugi tahanan dan adanya fluks bocor, untuk transformator dianggap ideal berlaku.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = a \leftrightarrow V_1 = aV_2 \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana : a = perbandingan transformasi

E_1 = tegangan efektif induksi primer

E_2 = tegangan efektif induksi sekunder

V_1 = tegangan primer

V_2 = tegangan sekunder

e_1 = tegangan induksi primer

e_2 = tegangan induksi sekunder

N_1 = jumlah lilitan primer

N_2 = jumlah lilitan sekunder

Bila : $a < 1$, maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan (*step up transformer*)

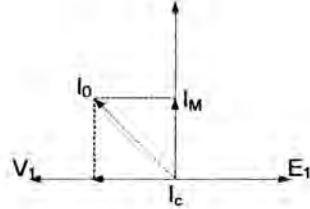
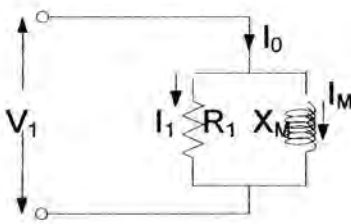
$a > 1$, maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan (*step down transformer*)

Dalam hal ini tegangan induksi E_1 mempunyai besaran yang sama dengan tegangan sumber V_1 tetapi berlawanan arah, arus beban nol I_0 disebut juga arus penguat dalam kenyataannya arus primer ini bukanlah merupakan arus induksi murni, akan tetapi terdiri dari komponen yaitu :

a. komponen arus penguat I_m (arus magnetisasi) yang menghasilkan

UNIVERSITAS MEDAN AREA
fluks (Φ) pada inti transformator.

b. Komponen arus inti besi I_c , menyatakan daya yang hilang akibat adanya rugi histerisis dan rugi arus pasir (*eddy current*) dimana I_c sefasa.



a. rangkaian ekivalen beban nol

b. vektor diagram beban nol

Gambar 2.6: Rangkaian ekivalen dan vektor diagram beban nol

Rugi tembaga (*Cu loss*) dapat diabaikan pada sisi primer (arusnya sangat kecil) dan pada sisi sekunder = 0, karena sisi sekunder terbuka dimana didapat daya yang hilang (rugi inti) sebesar :

$$P_0 = V_1 \cdot I_0 \cdot \cos \phi_0 \text{ (watt)} \dots\dots\dots(2.13)$$

- Dimana :
- P_0 = daya beban nol
 - I_0 = arus beban nol
 - V_1 = tegangan sisi primer
 - $\cos \Phi_0$ = faktor daya beban nol

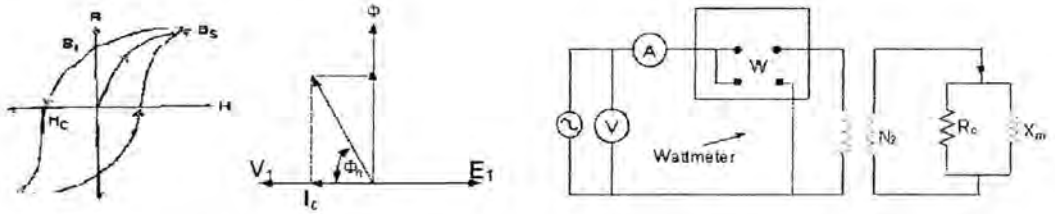
Dalam keadaan tanpa, bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber V_0 maka akan mengalir arus penguat I_0 dengan pengukuran daya masuk P_{beban} , arus penguat I_0 dan tegangan akan diperoleh :

$$Z_0 = \sqrt{R_c^2 + X_m^2} \text{ ohm} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana : X_m = reaktansi beban nol

R_c = resistansi beban nol

Z_0 = impedansi beban nol



Gambar 2.7: Kurva histerisis, diagram fasor dan rangkaian ekivalen pengukuran transformator beban nol

Ketika sebatang logam diletakkan pada medan magnet yang cukup besar, sehingga membuatnya menjadi magnet (*saturation magnetization*) maka besarnya kerapatan fluks penguatan (Br) meningkat (lihat pada garis panah yang naik) sampai pada nilai jumlah/saturasi (Bs) kemudian jika medan magnet tersebut dikurangi demi nilai saturasinya.

Kerapatan fluks turun (arah panah turun), tetapi tidak cukup cepat untuk kembali melewati jalur seperti ketika naik menjadi saturasi, sehingga terbentuk antara naik dan turun. Besarnya rugi histerisis ini dinyatakan sebagai :

$$P_h = f \cdot \oint b \cdot dH = 4fV Br \cdot Hc \left(\frac{W}{m^3} \right) \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana : Ph = Rugi-rugi histerisis [watt/m³]

Br = Kerapatan fluks [T]

Hc = Koersivitas [A/m]

V = Volume [m³]

F = Frekuensi [(Hz)]

Koersivitas adalah intensitas magnetik kebalikan yang diperlukan untuk mengurangi rapat fluksi sampai nol, sesudah bahan dimagnetisasi hingga jenuh.

Arus magnetisasi Im dan arus rugi inti Ic dapat ditentukan dengan

$$I_m = \sqrt{I_c^2 + I_w^2} \dots \dots \dots (2.16)$$

Massa–massa logam yang bergerak dalam medan magnet atau yang terletak dalam medan magnet yang berubah-ubah, mengakibatkan adanya sirkulasi arus induksi (arus pusar) ke seluruh volume logam itu, dimana garis aliran arus tersebut tegak lurus terhadap fluksi yang ada karena inti besi juga merupakan suatu pen~~tar~~tar, maka setiap irisan besi dianggap sebagai suatu lintasan/ rangkaian listrik tertutup, yang satu di dalam yang lain. Dengan kata lain arus pusar tersebut disebabkan konduksi elektron-elektron di dalam inti besi yang bereaksi untuk mengurangi perubahan yang terjadi berdasarkan Hukum Lenz.

Arus pusar akan menimbulkan rugi-rugi berupa panas, yang besarnya :

$$P_e = J^2 / \sigma = (\pi \cdot t \cdot f \cdot B_{maks})^2 \cdot \sigma / 6 \dots\dots\dots (2.17)$$

dimana : P_e = Rugi arus pusar [Watt/m³]

T = Konduktivitas penghantar [s/m]

J = Kerapatan arus pusar [Ampere /m²]

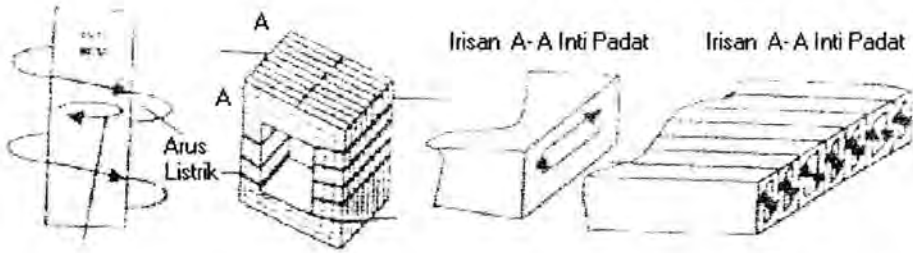
t = Ketebalan laminasi [m]

B_{maks} = Kerapatan fluks maksimum [T]

Pada bahan isolator tidak terdapat rugi arus pusar ini karena jika $\sigma = 0$ (isolator), maka $P_e = 0$ juga.

Arus pusar tersebut dibuat hampir tidak ada lagi dengan memakai inti yang berlapis. Daya hambat listrik antara permukaan lapisan dengan efektif membuat arus pusar itu “terkurung” dalam tiap lapisan. Tempuhannya menjadi bertambah panjang, sehingga daya hambatnya bertambah. Oleh sebab itu, walaupun GGL induksi tidak berubah, arus tersebut dan efek panasnya menjadi kecil. Pada transformator kecil, dimana rugi-rugi arus pusar tersebut harus dibuat seminimum

mungkin, intinya sering dibuat dari serbuk besi yang dipadatkan dengan tekanan tinggi.



Gambar 2.8: Mengurangi arus pusar dengan memakai inti yang berlapis

Rugi-rugi inti atau rugi-rugi besi (*iron losses*) secara kualitatif adalah :

$$P_i = P_h + P_e \dots \text{watt} \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana : P_i = rugi-rugi besi/inti (watt)

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \dots \text{(watt/lb)} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot B_{maks}^2 \dots \text{(watt/lb)} \dots \dots \dots (2.20)$$

Dimana : P_h = rugi-rugi histerisis... (watt)

P_e = rugi-rugi arus pusar (*eddy current*)... watt

t = ketebalan laminasi (mm)

K_h = konstanta histerisis

K_e = konstanta arus pusar

x = konstanta histerisis tambahan

K_h , K_e dan x adalah faktor-faktor yang tergantung dari mutu yang digunakan pada inti transformator. Pada turunan rugi histeris yang ditemukan oleh Dr. Steinmetz x adalah sama dengan 1,6 , untuk logam-logam modern x dapat menjadi 3,0.

$$\text{Jika } \Phi = B \cdot A \dots \dots \dots \text{(weber)} \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana Φ = fluks magnet (weber)

A = luas kumparan (m²)

B = bidang yang tegak lurus terhadap bidang kumparan

Dan dari persamaan (2.5) : $E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi_{maks}$, maka

$$B_{maks} = \frac{E}{4,44 N \cdot A \cdot f} \text{ karena } \frac{1}{4,44 N \cdot A}$$

Untuk transformator yang sama adalah tetap maka dianggap sebagai konstanta = K, sehingga :

$$B_{maks} = K \frac{E}{f} \text{ dan jika disubstitusikan ke persamaan (2.19) dan (2.20).}$$

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^x \text{ (dengan } x = 1,6), \text{ maka}$$

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1,6} = K_h \left[K \cdot \frac{E}{f} \right]^{1,6} \cdot f = K_1 \frac{E^{1,6}}{f^{1,6}} \cdot f = K_1 \frac{E^{1,6}}{f^{0,6}} \dots \dots \dots (2.22)$$

Dimana : $K_1 = K_h \cdot K_1$

$$P_t = K_e \cdot f^2 \cdot I^2 \cdot B_{maks}^2 = K_e \cdot f^2 \cdot I^2 \left[K \cdot \frac{E}{f} \right]^2 = K_2 \cdot f^2 \frac{E^2}{f^2} = K_2 \cdot E^2 \dots \dots \dots (2.23)$$

$$\text{Jadi } P_i = K_1 \frac{E^{1,6}}{f^{0,6}} + K_2 \cdot E^2 \dots \dots \dots (2.24)$$

2.4.2.Keadaan Transformator Berbeban

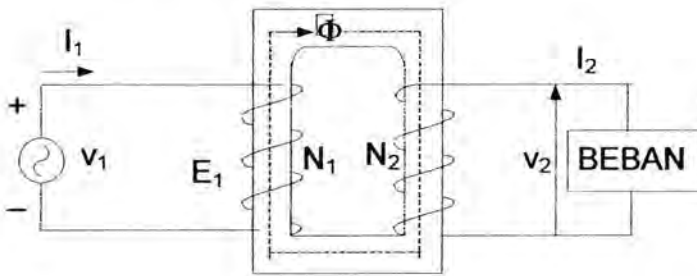
Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z₁, maka I₂ akan mengalir pada kumparan sekunder, dimana :

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_1} \dots (Ampere) \dots \dots \dots (2.25)$$

dimana : I₂ = arus yang mengalir pada kumparan sekunder (A)

V₂ = tegangan pada kumparan sekunder (V)

$Z_1 = \text{impedansi beban } (\Omega)$



Gambar 2.9: Keadaan transformator berbeban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (GGM) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_m . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer arus mengalir arus I_2' yang menentang fluks yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I_2' \dots\dots\dots(2.26)$$

Bila rugi-rugi inti (I_c) diabaikan maka $I_0 = I_m$ sehingga

$$I_1 = I_m + I_2' \dots\dots\dots(2.27)$$

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

$$N_1 I_m = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$N_1 I_m = N_1 (I_m + I_2') - N_2 I_2$$

hingga $N_1 I_2' = N_2 I_2 \dots\dots\dots(2.28)$

karena nilai I_m dianggap kecil, maka $I_2' = I_1$

Jadi, $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$ atau $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots(2.29)$

Dengan menganggap transformator ideal, bila tegangan V_1 yang berubah terhadap waktu diberikan pada terminal primer, suatu fluks ini harus ditimbulkan sedemikian, sehingga tegangan gerak listrik balik E , sama dengan tegangan yang diberikan, bila tahanan kumparan dapat dialirkan ($I_2 = E_2$).

Dari persamaan (2.11) dan persamaan (2.29) didapat hubungan :

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \dots \dots \dots (2.30)$$

Yaitu dengan masuk sama dengan daya keluar, suatu syarat yang perlu karena semua penyebab kerugian daya yang aktif dan daya reaktif dalam transformator telah diabaikan.

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \text{ dan } V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \text{ dan } I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2$

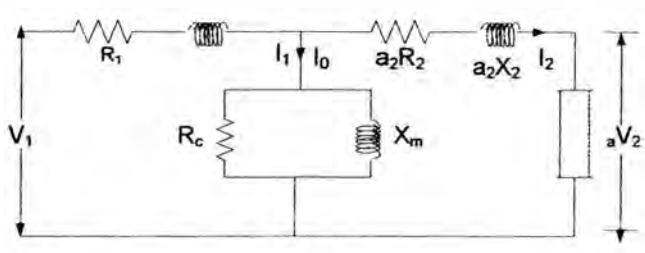
Dari persamaan-persamaan tersebut didapat :

$$\frac{V_1 \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2}{V_1 \left[\frac{N_2}{N_1} \right]} = \frac{V_2}{I_2} \cdot a^2 \cdot Z_1 \cdot \frac{V_1}{I_1} \dots \dots \dots (2.31)$$

$Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$

dimana Z_1 adalah impedansi kompleks beban dapat digantikan dengan impedansi Z_1 , yang ekivalen dalam rangkaian primer yaitu :

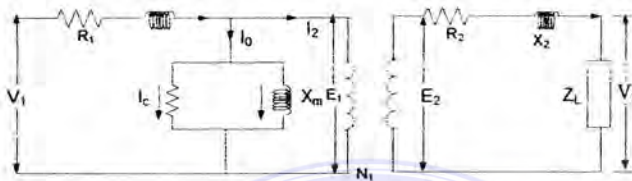
$$Z_1 = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 Z_2 = a^2 \cdot Z_2 \dots \dots \dots (2.32)$$



UNIVERSITAS MEDAN AREA Rangkaian ekivalen transformator berbeban

Rangkaian ekivalen dipakai untuk menganalisis kerja suatu kerja transformator, adanya fluks bocor Φ_1 dan Φ_2 ditunjukkan sebagai reaktansi X_1 dan X_2 sedang rugi-rugi tahanan ditunjukkan R_1 dan R_2 .

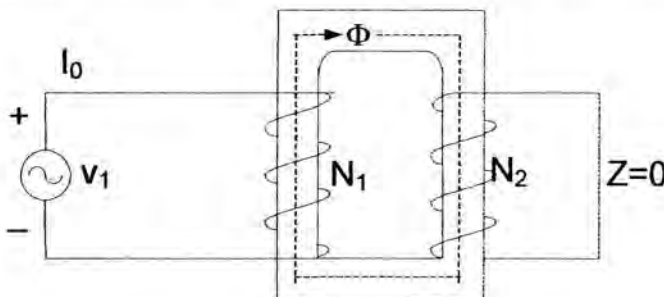
Atau untuk mempermudah untuk menganalisis dan dapat diubah menjadi seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.11: Rangkaian transformator berbeban dengan sisi primer sebagai referensi.

2.4.3.Keadaan Transformator Hubung Singkat

Transformator yang terhubung singkat (*short circuit*) adalah bila kumparan primer transformator tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal dan pada kedua terminal sekunder terhubung satu sama lain. Rangkaian transformator terhubung singkat dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 2.12: Transformator terhubung singkat

Hubung singkat berarti impedansi beban Z_L diperkecil hingga menjadi nol,

sehingga harga impedansi $Z_{ek} = R_{ek} + jX_{ek}$ yang membatasi arus karena harga R_{ek} Document Accepted 7/9/23

dan X_{ek} ini relatif kecil, harus dijaga agar tegangan yang masuk (V_{hs}) cukup kecil sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi arus nominal. Harga I_0 akan relatif kecil bila dibandingkan dengan arus nominalnya, sehingga pada pengukuran ini dapat diabaikan.

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

$$R_{ek} = \frac{P_{hs}}{(I_{hs})^2} \text{ ohm}$$

$$Z_{ek} = \frac{V_{hs}}{I_{hs}} = R_{ek} + j.X_{ek} \dots \text{ohm}$$

$$Z_{ek} = \sqrt{R_{ek}^2 + X_{ek}^2} \dots \text{ohm}$$

$$X_{ek} = \sqrt{Z_{ek}^2 - R_{ek}^2} \dots \text{ohm}$$

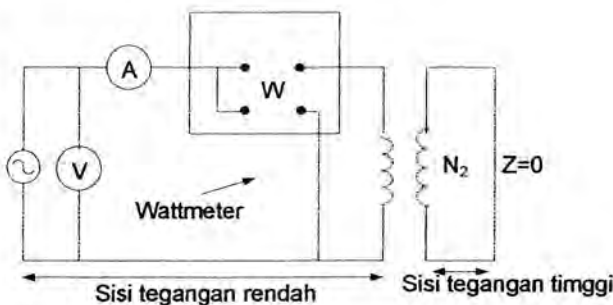
$$P_{hs} = I_1^2 \cdot R_{ek} \dots \text{watt}$$

$$P_{hs} = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_{hs} \dots \text{watt} \dots \dots \dots (2.33)$$

dimana : P_{hs} = daya hubung singkat (watt)

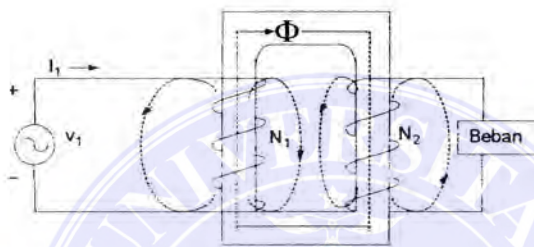
Z_{ek} = impedansi ekivalen (ohm)

R_{ek} = resistansi ekivalen (ohm)



Gambar 2.13: Rangkaian ekivalen pengukuran transformator hubung singkat

Tahanan, reaktansi, dan impedansi ekivalen (R_{ek} , X_{ek} dan Z_{ek}) dapat pula dinyatakan dalam dua referensi yaitu primer (R_{01} , X_{01} dan Z_{01}) atau sekunder (R_{02} , X_{02} dan Z_{02}). X_{ek} pada transformator bersifat induktif (X_l). Di dalam transformator ideal diasumsikan bahwa seluruh fluks yang melingkupi kumparan primer juga melingkupi kumparan sekunder, namun pada kenyataan hal tersebut tidaklah memungkinkan.



Gambar 2.14: Fluks yang dibangkitkan pada transformator yang sedang melayani beban

Dimana :

$$\phi_1 = \phi_m + \phi_{l1}$$

$$\phi_2 = \phi_m + \phi_{l2} \dots\dots\dots (2.34)$$

ϕ_1 = fluks primer total

ϕ_2 = fluks sekunder total

ϕ_m = fluks bersama

ϕ_{l1} = fluks bocor di sisi primer

ϕ_{l2} = fluks bocor di sisi sekunder

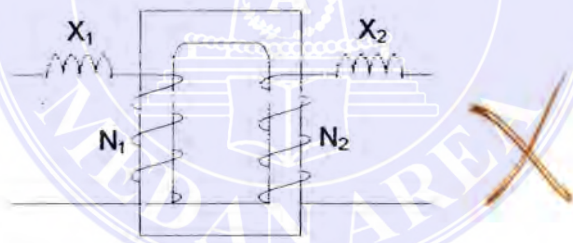
Dari gambar (2.14) dapat dilihat bahwa transfer energi (secara magnetis) dari sisi primer ke sisi sekunder tidak pernah mencapai efisiensi 100% karena adanya rugi-rugi magnetis (*magnetic-leakage*) hubungan antara GGL induksi

kumparan (dari pers.(2.34)) dengan arus yang mengalir dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$X_1 = \frac{E_1}{I_1} \text{ (ohm)} \dots\dots\dots(2.35)$$

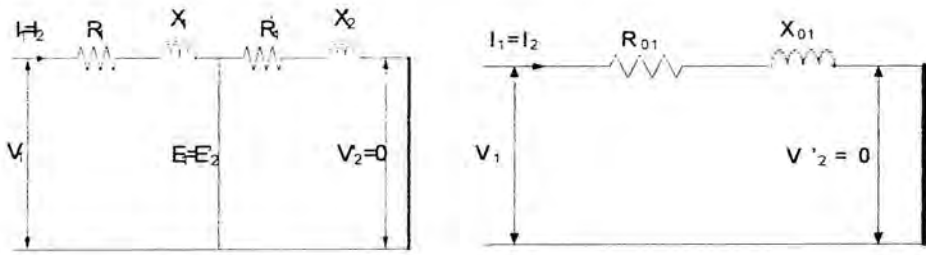
$$X_2 = \frac{E_2}{I_2} \text{ (ohm)} \dots\dots\dots(2.36)$$

- dimana :
- E_1 = tegangan induksi pada kumparan primer (volt)
 - E_2 = tegangan induksi pada kumparan sekunder (ohm)
 - X_1 = reaktansi induksi kumparan primer (ohm)
 - X_2 = reaktansi induksi kumparan sekunder (ohm)
 - I_1 = arus sisi primer
 - I_2 = arus sisi sekunder



Gambar 2.15: Rangkaian ekivalen transformator hubung singkat

Dari persamaan (2.33) diatas, serta persamaan (2.22) dan (2.23) terlihat bahwa rugi-rugi inti transformator pada keadaan hubung singkat dan beban nol tidak dipengaruhi oleh faktor daya, melainkan dipengaruhi oleh arus, tegangan dan frekuensi, hal inilah membuat rating transformator daya dalam besaran kVA atau VA, bukan dalam kW.



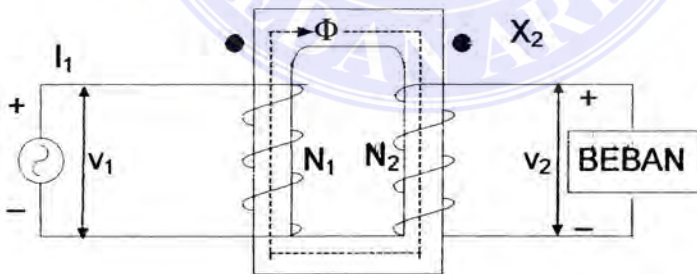
Gambar 2.16: Rangkaian ekivalen transformator terhubung singkat dengan primer sebagai referensi



2.5. Polaritas Transformator

Untuk menerangkan tentang polaritas transformator umumnya digunakan tanda titik (*dot*) untuk memudahkan, tanpa harus menggambarkan arah lilitan kumparannya secara lengkap. Polaritas yang dimaksud disini adalah polaritas sesaat, polaritas ini ditentukan oleh arus lilitan kumparannya.

Disamping itu polaritas transformator menunjukkan bahwa terminal-terminal yang diberi tanda titik mempunyai polaritas yang sama pada saat yang sama.



Gambar 2.17: Polaritas transformator

Batasan fisika tentang tanda titik tersebut adalah bahwa arus mengalir menuju titik (*dot*) kumparan akan menghasilkan gaya gerak magnet (GGM) positif. Dari gambar di atas didapat :

$$F_1 = N_1 \cdot i_1 \dots\dots\dots (2.37)$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

$$F_2 = -N_2 \cdot i_2 \dots\dots\dots (2.38)$$

Dimana :

F_1 = GGM pada sisi primer

i_1 = arus sesaat pada kumparan primer

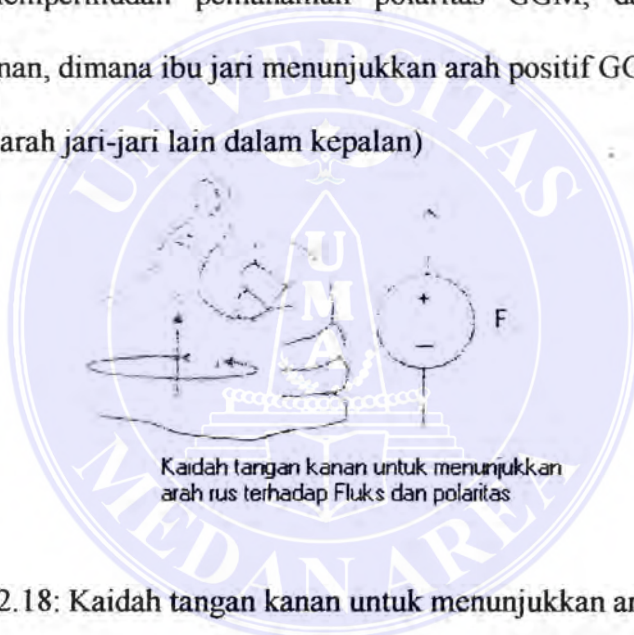
F_2 = GGM pada sisi sekunder

i_2 = arus sesaat pada kumparan sekunder

N_1 = banyaknya lilitan kumparan primer

N_2 = banyaknya lilitan kumparan sekunder

Untuk mempermudah pemahaman polaritas GGM, dapat digunakan kaidah tangan kanan, dimana ibu jari menunjukkan arah positif GGM (F) terhadap arah arus (sesuai arah jari-jari lain dalam kepalan)



Kaidah tangan kanan untuk menunjukkan arah arus terhadap fluks dan polaritas

Gambar 2.18: Kaidah tangan kanan untuk menunjukkan arah arus terhadap fluks dan polaritas +

Dari persamaan (2.37) dan (2.38) didapat GGM total di dalam inti transformator adalah

$$F_c = N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 \dots\dots\dots(2.39)$$

$$F = \phi \cdot R \dots\dots\dots(2.40)$$

dimana: ϕ = fluks

R = reluktansi

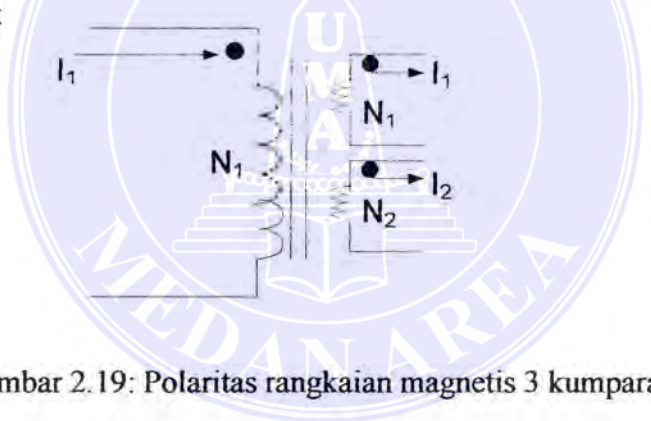
Reluktansi (R) adalah besarnya resistansi dalam besaran magnet yang analog dengan resistansi (R) dalam besaran listrik, sedangkan fluks (ϕ) analog dengan arus (I) dalam besaran listrik. Bandingkan persamaan (2.40) diatas dengan Hukum Ohm.

Karena reluktansi pada inti transformator yang ideal sebelum mencapai titik jenuh (*unsaturated*) sangat kecil (mendekati nol), maka persamaan (2.39) dapat ditulis kembali :

$$F_c = N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2 \approx 0 \dots\dots\dots(2.41)$$

$$\text{atau } N_1 \cdot i_1 \approx N_2 \cdot i_2 \dots\dots\dots(2.42)$$

Untuk suatu rangkaian yang terkopel secara magnetis yang terdiri dari 3 buah kumparan :



Gambar 2.19: Polaritas rangkaian magnetis 3 kumparan

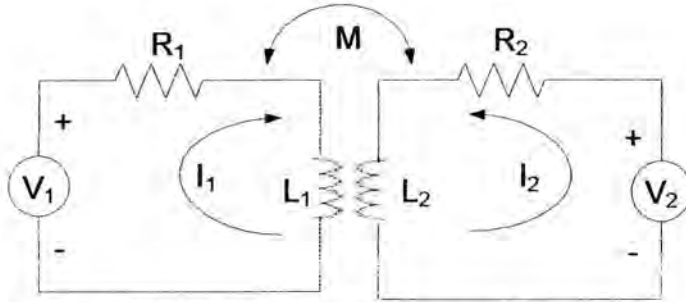
Berdasarkan arah GGM-nya dan gambar (2.19) diatas didapat persamaan :

$$N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 - N_3 \cdot I_3 = 0 \dots\dots\dots(2.43)$$

Atau dalam rangkaian listrik, aturan titik dapat dijelaskan sebagai berikut :

- a. Jika diasumsikan arah kedua arus (I_1 dan I_2) masuk atau keluar terminal bertitik, maka tanda M (induktansi bersama) akan sama dengan tanda L (induktansi diri).

- b. Jika salah satu arus masuk ke terminal bertitik, dan yang lainnya meninggalkan terminal bertitik, maka tanda M akan berlawanan dengan tanda L.



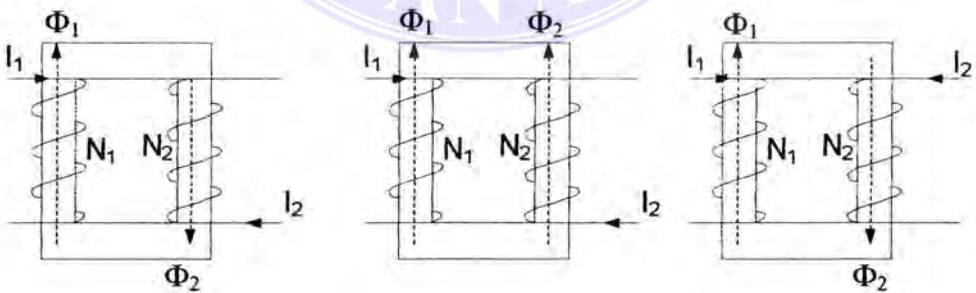
Gambar 2.20: Rangkaian terkopel secara magnetis

Dengan aturan titik, dari gambar (2.20) diatas dapat diturunkan persamaan:

$$R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} \pm M \frac{dI_2}{dt} = V_1 \dots\dots\dots(2.44)$$

$$R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} \pm M \frac{dI_1}{dt} = V_2 \dots\dots\dots(2.45)$$

Secara singkat aturan titik diatas dapat dipersingkat menjadi : “ bila arah fluks yang dibangkitkan I₁ dan I₂ saling memperkuat, maka tanda M (induktansi bersama) bertanda positif”.



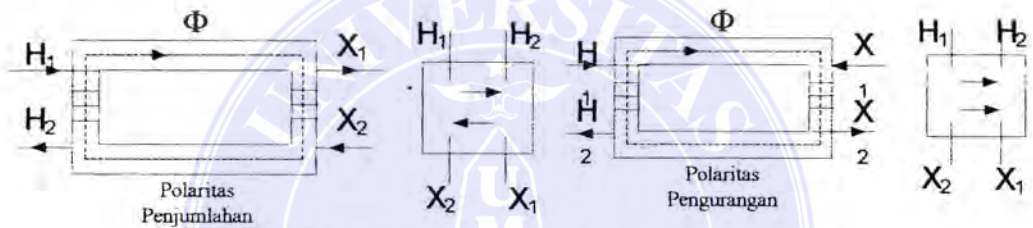
Gambar 2.21: Interaksi fluks pada inti transformator

Polaritas transformator perlu diketahui, terutama untuk membuat sambungan-sambungan atau untuk kerja paralel. Adapun macam-macam polaritas

ini ada dua macam yaitu -
UNIVERSITAS MEDAN AREA

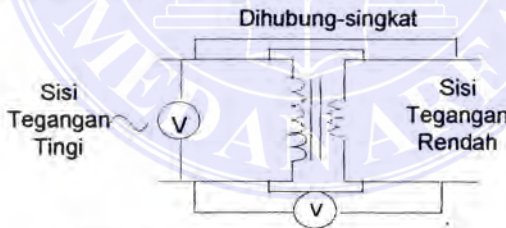
1. Polaritas penjumlahan (*additive polarity*)
2. Polaritas pengurangan (*subtractive polarity*)

Menurut ASA (*the American Standards Association*), pada sisi tegangan tinggi transformator, terminalnya diberi tanda H_1, H_2, H_3 dan seterusnya. Sedangkan pada sisi tegangan rendahnya diberi tanda X_1, X_2, X_3 dan seterusnya. Disamping itu seringkali polaritas transformator disimbolkan sebagai titik (*dot*) yang menunjukkan bahwa terminal-terminal yang diberi tanda titik mempunyai polaritas yang sama pada saat yang sama.



Gambar 2.22: Polaritas transformator menurut ASA

Untuk menentukan polaritas transformator dapat dilakukan uji polaritas



Gambar 2.23: Uji polaritas transformator

Hasil yang didapat hanya ada dua kemungkinan sesuai dengan ,macam polaritas transformator, yaitu :

- a. Apabila voltmeter $V' > V$ (GGL induksi saling menjumlahkan), maka disebut polaritas penjumlahan.
- b. Apabila voltmeter $V' < V$ (GGL induksi saling mengurangi) maka disebut polaritas pengurangan.

2.6. Efisiensi Transformator

Secara umum besarnya efisiensi (daya guna) didefinisikan sebagai perbandingan antara daya terpakai dan daya yang masuk, biasanya dalam satuan persentase (%).

Atau efisiensi transformator (η) sama dengan :

$$\eta (\%) = \frac{P_{out}}{V_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.46)$$

dimana : $P_{in} = P_{out} + \sum P_{rugi} \dots\dots\dots(2.47)$

$$\eta (\%) = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{rugi}} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.48)$$

$$\sum P_{rugi} = P_i + P_t \dots\dots\dots(2.49)$$

P_t = rugi tembaga (watt) :

$$P_t = I_1^2 \cdot R_{01} = I_2^2 \cdot R_{02} = I_1^2 \cdot R_2 + I_2^2 \cdot R_2 \dots\dots\dots(2.50)$$

$$\eta(\%) = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \theta_2}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \theta_2 + P_i + I_2 \cdot R_2} \times 100\% \dots\dots\dots(2.51)$$

P_i adalah rugi tetap (*fixed losses*), tidak dipengaruhi oleh besarnya beban.

P_t adalah rugi tidak tetap (*variable losses*), dipengaruhi oleh besarnya beban.

P_t sebanding dengan kuadrat arus beban atau kuadrat daya semuanya

Dari persamaan (2.46) sampai (2.51) diatas dapat dilihat bahwa efisiensi akan bervariasi terhadap faktor daya, secara lebih jelas persamaan tersebut dapat ditulis kembali sebagai :

$$\eta (\%) = \frac{P_{in} - \sum P_{rugi}}{P_{in}} = 1 - \frac{\sum P_{rugi}}{V_2 \cdot I_2 \cos \theta_2 + \sum P_{rugi}}$$

Bila $\sum P_{rugi} = V_2 \cdot I_2 \cos \theta_2$ maka :
 UNIVERSITAS MEDAN AREA

$$\eta = 1 - \frac{(\sum P_{rugi} / V_2 \cdot I_2)}{\cos \theta_2 + (SP_{rugi} / V_2 \cdot I_2)} = 1 - \frac{x}{\cos \theta_2 + x} \text{ atau}$$

$$\eta = 1 - \frac{(x / \cos \theta_2)}{1 + (x / \cos \theta_2)} \dots \dots \dots (2.52)$$

η akan maksimum apabila $[(x/\cos\theta_2) / \{1 + (x/\cos\theta_2)\}] = 0$ atau $\frac{dl/\eta}{dl} = 0$

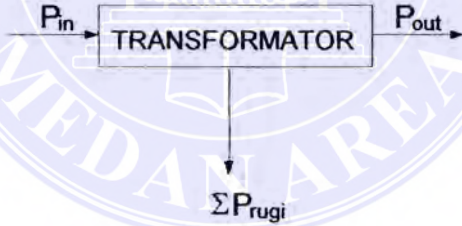
Dari persamaan (2.51):

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

$$= 1 + \frac{P_i}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \theta_2} + \frac{I_2 R_{02}}{V_2 \cdot \cos \theta_2} \frac{dl/\eta}{dl} = \frac{R_{02}}{V_2 \cos \theta_2} - \frac{P_i}{V_2 \cdot I_2^2 \cdot \cos \theta_2} = 0$$

$$P_i = I_2^2 \cdot R_{02} \dots \dots \dots (2.53)$$

Syarat transformator mencapai efisiensi maksimumnya, apabila rugi besi sama dengan rugi tembaga.



Gambar 2.24: Diagram balok aliran daya transformator

2.7. Efisiensi Sepanjang Hari

Efisiensi sepanjang hari (*all day efficiency*) pada prinsipnya sama dengan efisiensi ekonomis transformator. Perbedaannya hanya dengan memperhitungkan faktor waktu dalam 24 jam.

$$\eta_{a.d.} = \frac{W_{out} (kWh)}{W_{in} (kWh)} \times 100\% \dots \dots \dots (2.54)$$

$W_{in} = P_{in} \times t$ = energi listrik masukan

t = waktu dalam jam hours



BAB III

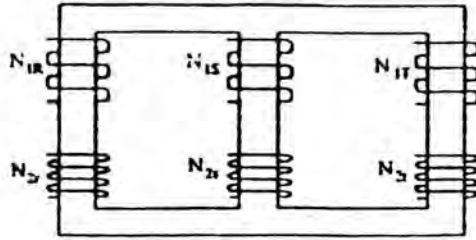
TRANSFORMATOR TIGA FASA DAN BERBAGAI HUBUNGANNYA

3.1. Umum

Pada prinsipnya transformator tiga fasa sama dengan transformator satu fasa perbedaannya adalah seperti perbedaan sistem listrik satu fasa dengan sistem listrik tiga fasa, yaitu mengenal sistem bintang (Y) dan segitiga (Δ), serta sistem zig-zag dan juga sistem bilangan jam yang sangat menentukan untuk kerja paralel transformator tiga fasa.

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

Transformator tiga fasa ini dikembangkan dengan alasan ekonomis, biaya lebih murah karena bahan yang digunakan jauh 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 serta untuk menangani operasinya hanya satu buah transformator yang perlu mendapat perhatian. Konstruksi transformator tiga fasa dengan inti tunggal ditunjukkan pada gambar 3.1. berikut.



Gambar 3.1: Konstruksi transformator tiga fasa dengan inti tunggal

Dalam penganalisaan transformator tiga fasa selalu memperhatikan hubungan-hubungan yang dibuat pada belitan primer dan sekunder (wye atau delta) dan hubungan yang berlaku pada sistem tiga fasa adalah:

a. Hubungan wye

Bila arus hubungan bintang (wye) adalah I_A, I_B, I_C , masing-masing berbeda fasa 120° .

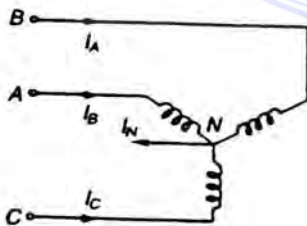
Untuk beban yang seimbang:

$$I_N = I_A + I_B + I_C$$

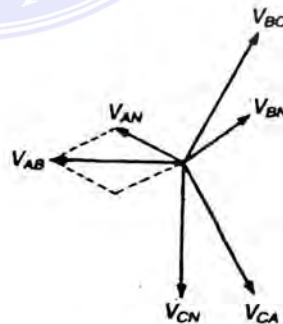
$$V_{AB} = V_{AN} + V_{BN}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$



(a)



(b)

Gambar 3.2: Rangkaian ekuivalen dan diagram vektor hubungan wye

Maka berlaku:

$$V_L = \sqrt{3} V_p$$

$$I_L = I_p$$

$$P_{3\phi} = 3 \times P_{1\phi} = \sqrt{3} V_p I_p \cos \phi \dots\dots\dots(3.1)$$

b. Hubungan delta

Bila tegangan hubungan delta adalah V_{AB} , V_{BC} , dan V_{CA} , masing-masing berbeda fasa 120° .

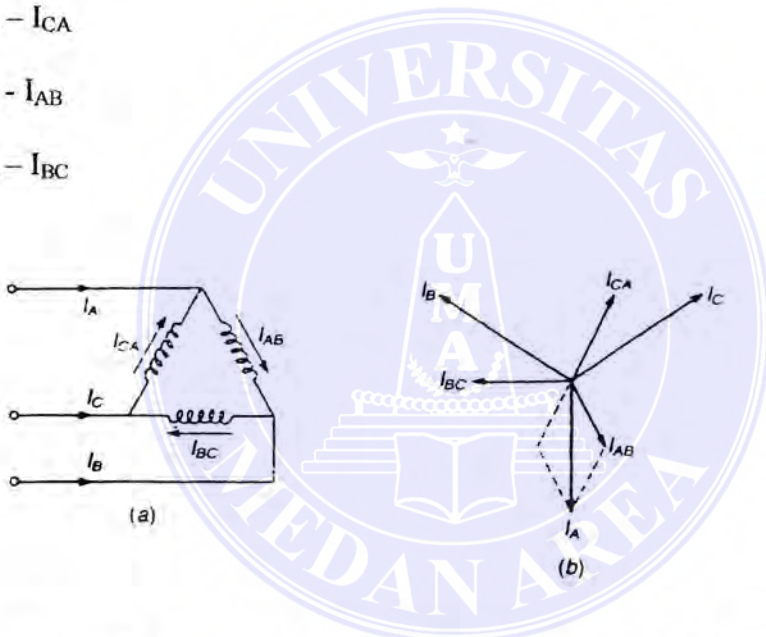
$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0$$

Untuk beban yang seimbang:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$



Gambar 3.3: Rangkaian ekivalen dan diagram vektor hubungan delta

Maka berlaku:

$$V_L = V_p$$

$$I_L = \sqrt{3} I_p$$

$$P_{3\phi} = 3 \times P_{1\phi} = \sqrt{3} V_p I_p \cos \phi \dots\dots\dots(3.2)$$

dimana: V_L = tegangan line-line

V_p = tegangan fasa (line-netral)

3.2. Berbagai Hubungan Transformator Tiga Fasa

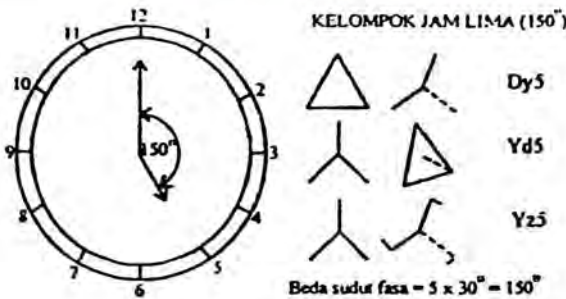
Di dalam pelaksanaannya, tiga buah lilitan fasa pada sisi primer dan sisi sekunder dapat dihubungkan dalam bermacam-macam hubungan, yaitu:

1. Hubungan bintang-bintang (wye – wye)
2. Hubungan bintang-delta (wye – delta)
3. Hubungan delta – delta
4. Hubungan delta-bintang (delta – wye)

Bahkan untuk kasus tertentu lilitan sekunder dapat dihubungkan secara berliku-liku (zig-zag), sehingga didapat kombinasi Δ -Z dan Y-Z.

Umumnya simbol-simbol yang digunakan dalam hal ini adalah huruf-huruf kapital untuk kumparan primer dan huruf-huruf kecil untuk kumparan sekunder.

Selain berbagai hubungan di atas, hubungan tersebut masih dibagi lagi menjadi beberapa jenis, sesuai dengan besarnya pergeseran fasa yang dikenal sebagai bilangan jam. Adapun pembagian grup/kelompoknya adalah berdasarkan penunjukkan jarum jam dari vektornya.



Gambar 3.4: Bilangan jam

Sistem bilangan jam yang terkenal diantaranya adalah jam 0 (nol), jam 5

(lima), jam 6 (enam) dan jam 11 (sebelas).

3.2.1. Hubungan wye – wye (Y-Y)

Jika tegangan tiga fasa dipasok ke transformator Y-Y, maka tegangan tiap fasanya akan saling berbeda 120° . Namun komponen harmonisa ketiga dari tiap ketiga fasa tersebut akan berkedudukan sefasa satu sama lain, karena ada 3 siklus pada komponen harmonisa ketiga untuk tiap siklus frekuensi dasar (50 atau 60 Hz). Komponen harmonisa ketiga ini selalu ada pada transformator karena inti transformator yang bersifat tidak linear.

Hubungan Y-Y mempunyai 2 masalah serius yaitu:

1. Jika beban pada rangkaian transformator tidak seimbang, maka tegangan- tegangan pada fasa-fasa transformator menjadi sangat tidak seimbang.
2. Ada masalah serius dengan tegangan harmonisa ketiga.

Untuk mengatasi kedua masalah di atas dapat dilakukan penyelesaian dengan cara sebagai berikut:

1. Dengan pentanahan netral transformator (*solidly ground*), khususnya netral sisi primer transformator. Hubungan ini membuat komponen harmonisa ketiga mengalirkan arus pada kawat netral, sehingga tidak menyebabkan beda potensial yang besar. Kawat netral ini juga menjadi jalan balik arus tidak seimbang pada beban.
2. Menambah kumparan ketiga/tersier yang dihubungkan secara segitiga.

Jika kumparan tersebut ditambahkan pada transformator, maka komponen harmonisa ketiga pada kumparan segitiga akan bertambah, yang menyebabkan aliran arus pada kumparan tersebut. Hal ini akan menindas komponen harmonisa ketiga, sama seperti dengan cara pentanahan pada

kawat netral transformator.

UNIVERSITAS MEDAN AREA

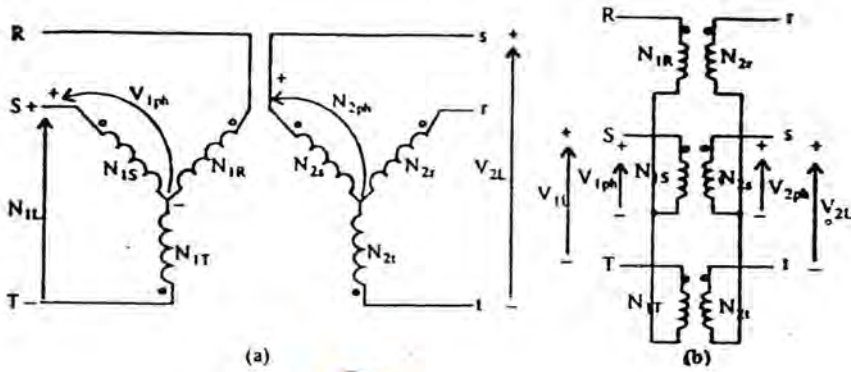
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 7/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area
Access From (repository.uma.ac.id)7/9/23



Gambar 3.5: Rangkaian ekivalen transformator tiga fasa hubungan Y-Y

Biasanya kumparan segitiga ini cukup besar, memiliki kapasitas 1/3 dari daya nominal kedua kumparan utama, karena harus mampu menangani arus sirkulasi yang muncul. Karenanya dengan kelemahan demikian, transformator hubungan Y-Y jarang digunakan.

Adapun perbandingan tegangan transformator hubungan ini:

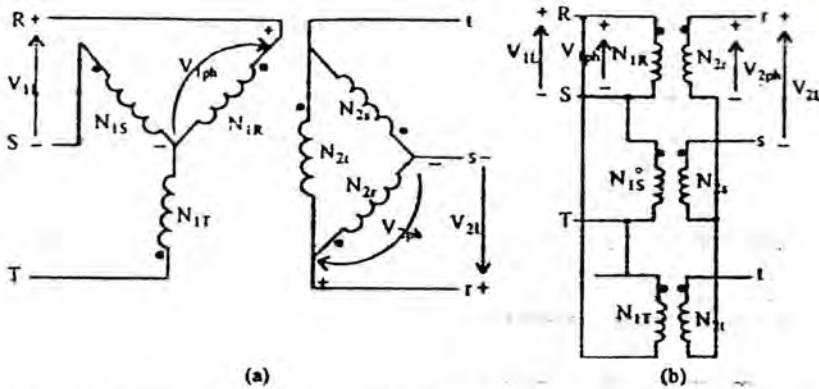
$$\frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{1ph}}{\sqrt{3} \cdot V_{2ph}} \dots \dots \dots (3.3)$$

3.2.2. Hubungan Wye – Delta (Y-Δ)

Transformator hubungan ini tidak memiliki masalah dengan komponen harmonisa ketiga, karena telah dieliminasi dalam arus sirkulasi di sisi segitiga. Hubungan ini juga lebih stabil terhadap beban yang tidak seimbang, karena kumparan segitiga secara terpisah mendistribusikan kembali ketidakseimbangan yang terjadi.

Yang menjadi masalah adalah adanya beda fasa antara sisi primer dan sekunder sebesar 30° atau kelipatannya, yang jika hendak dihubungkan secara

paralel, sisi sekunder transformator yang akan diparalelkan harus memiliki beda fasa yang sama.



Gambar 3.6: Rangkaian ekivalen transformator tiga fasa hubungan wye-delta

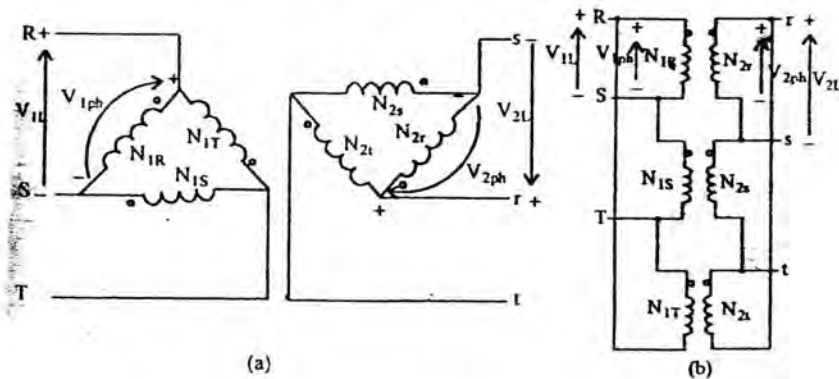
Perbandingan tegangan transformator untuk hubungan ini:

$$\frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{1ph}}{V_{2ph}} \dots \dots \dots (3.4)$$

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

3.2.3. Hubungan Delta – Delta

Pada transformator hubungan ini tidak ada beda sudut fasa antar fasanya dan tidak mempunyai masalah dengan beban tidak seimbang maupun harmonisa.



Gambar 3.7: Rangkaian ekivalen transformator tiga fasa hubungan delta-delta

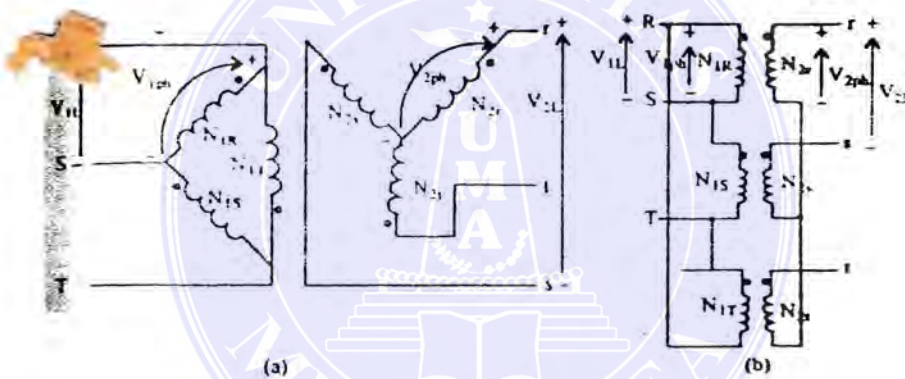
$$\frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{V_{1ph}}{V_{2ph}} = k \dots\dots\dots(3.5)$$

3.2.4. Hubungan Delta – Wye (Δ-Y)

Transformator yang memiliki hubungan ini memiliki keuntungan sama seperti pada hubungan Y-Δ.

Perbandingan tegangan transformator untuk hubungan ini:

$$\frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{V_{1ph}}{\sqrt{3} \cdot V_{2ph}} \text{ atau } \frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{k}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(3.6)$$



Gambar 3.8: Rangkaian ekivalen transformator tiga fasa hubungan delta-wye

3.3. Pelat Nama Transformator Daya

Pada umumnya peralatan teknik memiliki pelat nama (*name plate*) untuk menunjukkan identifikasi barang dan spesifikasi dari alat tersebut, demikian halnya dengan transformator. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan pilihan tentang spesifikasi transformator daya maupun untuk pengoperasian dan cara menghubungkan (*connection*) pada jaringan tenaga listrik, yang didasarkan pada spesifikasi yang tertera di pelat namanya.

UNIVERSITAS MEDAN AREA

Hal-hal yang tertera pada pelat nama transformator daya umumnya adalah:

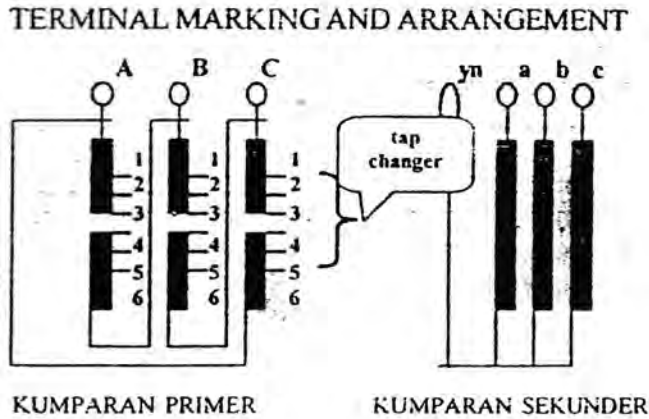
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

1. Merek dagang transformator (misalnya General Electric, Meidensha, ABB, Morawa, Unindo, Sintra dan lain-lain).
2. Sistem fasa listrik (satu atau tiga fasa).
3. Daya transformator umumnya dalam VA/kVA.
4. Frekuensi yang dapat diaplikasikan pada transformator (umumnya 50 atau 60 Hz).
5. Nomor identifikasi transformator atau kode produksi.
6. Tanggal pembuatan (*manufacturing date*).
7. Standar teknis (*technical standard*) yaitu menyatakan bahwa spesifikasi teknis mengacu pada badan dasar teknis tertentu, misalnya IEC, NEMA, JIS, DIN, dan sebagainya. Hal ini akan memudahkan kita mengetahui pasti spesifikasi teknis peralatan tersebut, karena mengacu pada suatu standar yang baku.
8. Rating tegangan, beserta langkah pengubah sadap (*tap changer*) tegangannya.

Tabel 3.1: Contoh hubungan sadap (tap) pada transformator

WINDING	TAP NO.	VOLTS	AMPERES	CONNECTION
	1	21,000	82.5	3 – 4
	2	20,500	84.5	3 – 5
ABC	3	20,000	86.6	2 – 5
	4	19,500	88.8	2 – 6
	5	19,000	91.2	1 – 6
yn.abc	-	380Y/220	4,560	-



Gambar 3.9: Hubungan sadap (tap) pada transformator daya

9. Impedansi per unit (Z_{pu}) adalah sistem besaran per unit mempunyai keunggulan dimana dengan besaran per unit ini dapat menggambarkan besarnya parameter transformator tersebut terhadap besarnya kapasitas transformator secara keseluruhan tanpa memandang pada sistem tegangan berapa transformator tersebut dipasang. Sistem ini juga lebih menguntungkan dari pada sistem persentase, dimana untuk penerapan sistem persentase masih harus melibatkan bilangan 100 sebagai satuan.

$$\text{Harga p.u.} = \text{harga sebenarnya} : \text{harga dasar} \dots \dots \dots (3.7)$$

Biasanya dipakai nilai daya semu (VA) total dan tegangan salah satu sisi transformator sebagai harga dasar untuk menentukan nilai arus dasar.

10. Sistem pendingin (*cooling system*).

Sistem pendingin pada transformator merupakan sesuatu yang sangat penting, yang berfungsi untuk menjaga agar kondisi transformator tidak terlalu panas ketika memikul beban. Jika sistem pendinginannya cukup

baik maka usia (*life time*) transformator diusahakan semaksimal mungkin.

Namun jika sistem pendinginan mengalami gangguan, maka kumparan transformator menjadi panas, sehingga isolasi transformator dapat rusak dan menyebabkan transformator terbakar (*short circuit*).

Adapun sistem pendingin transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Tabel 3.2: Jenis-jenis pendinginan transformator

CARA PENDINGINAN	JENIS	SINGKATAN
Pendinginan Alam	Air Natural Cooling. (pendinginan dengan udara biasa)	ON
	Oil-immersed Natural Cooling. (pendinginan dengan direndam ke dalam minyak)	ON
	Oil Natural Air Natural. (pendinginan dengan air dan minyak)	ONAN
	Oil-immersed Forced-oil Circulation. (pendinginan dengan direndam ke dalam minyak yang dialirkan)	OFN
Pendinginan Buatan (udara)	Oil-immersed Forced-oil Circulation. With Air-blast Cooling. (pendinginan dengan direndam ke dalam minyak yang dialirkan dengan hembusan udara)	OFB
	Oil-immersed Air-blast Cooling/Oil Natural Air Force. (pendinginan dengan direndam ke dalam minyak dan dihembuskan udara)	OB/ONAF
	Air-blast Cooling. (pendinginan dengan udara yang dihembuskan)	AB
Pendinginan Udara	Oil-immersed Water Cooling. (pendinginan dengan direndam minyak)	OW

	dan juga dibantu dengan air) Oil-immersed Forced-oil Circulation with water cooling. (pendinginan dengan direndam ke dalam minyak yang dialirkan dan juga dibantu dengan pendinginan air)	OFW
--	--	-----

Selain berbagai jenis pendinginan di atas juga dikembangkan berbagai jenis pendinginan yang dianggap lebih baik, dapat juga dibuat jenis pendinginan yang merupakan gabungan jenis pendinginan yang ada.

11. Polaritas atau vektor tegangannya.

12. Kelas isolasi (*insulation class*).

Menjelaskan tingkat ketahanan isolasi terhadap gangguan yang mungkin terjadi, biasanya kelas isolasi ini juga mengacu pada beberapa standar teknis internasional yang diakui.

Berikut ini adalah kelas-kelas isolasi transformator menurut standar Jerman, VDE 0532:

Tabel 3.3: Kelas isolasi transformator menurut VDE 0532

Kelas	Bahan isolasi	Pengolahan	Suhu tetap tertinggi di tempat terpanas
A	Bahan-bahan organis, seperti sutera dan kertas	Diolah dengan bahan pengikat organis	105°C
Ao	Idem	Direndam dalam minyak	115°C
E	Kertas lak, kertas tebal dan sebagainya	Tidak direndam	120°C
E	Kertas	Direndam/diolah dengan	120°C

		lak-damar buatan	
B	Bahan-bahan anorganis, asbes, gelas dan bahan-bahan mineral serupa	Direndam/diolah dengan lak-damar	130°C
F	Bahan-bahan anorganis, seperti asbes, gelas dan bahan-bahan mineral serupa	Direndam/diolah dengan silikon-silikon yang diolah dengan bahan-bahan organik	155°C
H	Bahan-bahan anorganis, seperti asbes, gelas dan bahan-bahan mineral serupa	Direndam/diolah dengan silikon-silikon murni	180°C
C	Porselin, bahan-bahan gelas, kwartz dan bahan-bahan serupa tahan api	Tidak direndam atau diolah	Hanya dibatasi oleh tahanan isolasi listrik

Disamping standar tersebut juga merekomendasikan batas suhu tertinggi yang boleh diaplikasikan untuk transformator.

Tabel 3.4: Batas suhu maksimum kelas isolasi transformator

Bagian transformator	Kelas isolasi					
Kumparan (°C)	A	Ao	E	B	F	H
	60	76	75	85	110	135
Minyak pada lapisan atas (°C)	70					

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pembahasan dan pengamatan di lapangan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa penyeimbangan beban transformator distribusi merupakan suatu hal yang sangat penting untuk menghindari kerusakan dini pada transformator distribusi dan untuk kontinuitas pelayanan kepada konsumen.

Penyeimbangan beban transformator distribusi jika terjadi penambahan beban yang tidak merata dapat dilakukan dengan usaha-usaha sebagai berikut:

1. Pemindahan beban antar fasa
2. Penambahan atau pemindahan jurusan terpasang
3. Memperbesar daya transformator distribusi yaitu dengan cara memparalelkan transformator

5.2. Saran

Dari hasil pembahasan dan pengamatan selama di lapangan, saran penulis adalah:

1. Untuk PLN di lapangan supaya memperhatikan sudah berapa banyak beban setiap fasa, pasanglah beban pada fasa yang relatif lebih sedikit bebannya.
2. Untuk para konsumen, bila memungkinkan penggunaanlah energi listrik di luar waktu beban puncak lebih banyak, guna menekan tingginya daya pada

saat beban puncak.

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 7/9/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

3. Sebaiknya setiap permintaan pemasangan baru dilihat dulu apakah transformator distribusi masih mampu atau tidak.



DAFTAR PUSTAKA

1. Chapman, Stephen J., **Electric Machinery Fundamentals**, second edition, McGraw Hill International Edition, Singapore, 1991
2. Edminister, Joseph A., **Rangkaian Listrik**, alih bahasa oleh Pakpahan Sahat, edisi kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1988
3. Hughes, E., **Electrical Technology**, The English Language Book Society and Longman Group Limited, 1977
4. Kadir, Abdul, **Transformator**, cetakan kedua, Penerbit Pradnya Paramitha, Jakarta, 1981
5. Marappung, Muslimin, **Teknik Tenaga Listrik (Teori Soal dan Penyelesaian)**, cetakan ketiga, Penerbit Armico, Bandung, 1988
6. Stevenson JR., William D., **Analisa Sistem Tenaga**, edisi keempat, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1993
7. Theraja, B.L., **A Text-Book Of Electrical Technology**, S. Chad & Company (Pvt) LTD Ram Nagar, New Delhi, 1988
8. Wijaya, Mochtar, **Dasar-Dasar Mesin Listrik**, edisi pertama, Penerbit Djambatan, Jakarta, 2001
9. Zuhail, **Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya**, Penerbit PT. Gramedia, Jakarta, 1988