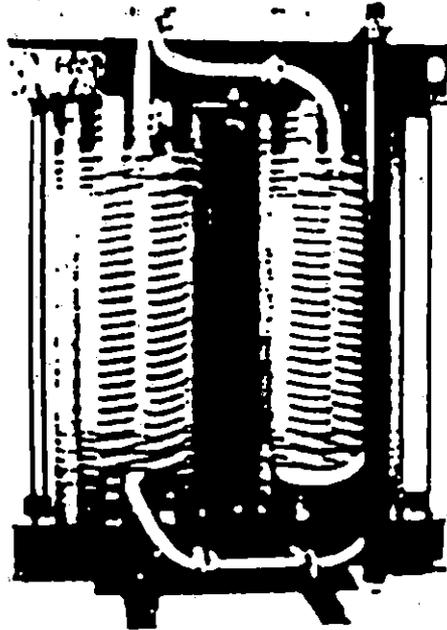


# TRANSFORMATOR 1 FASA



Disusun Oleh:

**Drs. A s w a r d i**  
**Drs. Azwir Sahibuddin**

Staf Pengajar Jurusan Pendidikan Teknik Elektro  
FPTK IKIP Padang

MILIK PERPUSTAKAAN IKIP PADANG	
DI TERIMA TEL	26-9-96
SUMBER/HARGA	HD
KOLEKSI	KRI
No INVENTARIS	717/HD/96 - t 0/21
KLASIFIKASI	621.314 ASW t. 0

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah swt. yang telah memberikan kekuatan kepada penulis sehingga penyusunan buku teks ini dapat diselesaikan.

Dalam buku ini penulis mengetengahkan pembahasan mengenai materi Mesin Listrik, khususnya Transformator. Titik berat pembahasan dalam buku ini terutama diarahkan pada pengertian, prinsip dasar dan konstruksi, analisis pengoperasian, serta pengujian-pengujian transformator 1 Fasa.

Materi buku ini diharapkan dapat melengkapi bahan bacaan (referensi) bagi mahasiswa yang mendalami bidang Elektroteknik, disamping buku-buku teks lainnya. Oleh karena pada umumnya buku teknik (terutama jurusan Teknik Elektro) didominasi oleh buku teks berbahasa asing.

Seperti kata pepatah 'Tidak Ada Gading yang Tak Retak', maka dengan kerendahan hati penulis mengharapkan saran dan bantuan pembaca untuk kelengkapan dan perbaikan isi/materi buku ini pada masa yang akan datang.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Drs. Ridwan, Msc.Ed (Dosen Jurusan Pendidikan Teknik Elektro FPTK IKIP Padang) yang telah meluangkan waktunya untuk mengoreksi materi dan isi buku teks ini. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu penyelesaian penulisan buku teks ini.

Padang, Juli 1996

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
KATA PENGANTAR .....	ii
DAFTAR ISI .....	iii
DAFTAR GAMBAR .....	v
BAB I PENDAHULUAN .....	1
A. Pengertian Umum .....	1
B. Medan Magnet .....	3
C. Tegangan Induksi .....	4
D. Dasar Rangkaian Magnet .....	5
BAB II PRINSIP KERJA DAN KONSTRUKSI.....	7
A. Prinsip Kerja Transformator .....	7
B. Transformator Ideal .....	9
C. Konstruksi Transformator .....	10
1. Konstruksi Bagian Dalam .....	11
2. Konstruksi Luar Transformator .....	13
3. Peralatan Bantu Transformator .....	17
BAB III ANALISIS OPERASI TRANSFORMATOR .....	23
A. Keadaan Beban Nol .....	23
B. Keadaan Berbeban .....	26
C. Keadaan Hubung singkat .....	27

D. Rangkaian Kesamaan Transformator .....	28
1. Faktor Reduksi .....	29
2. Rangkaian Kesamaan Beban Nol .....	31
3. Rangkaian Kesamaan berbeban .....	32
E. Penggunaan Transformator .....	36
F. Regulasi Tegangan .....	43
G. Rugi-rugi dan Efisiensi .....	45
1. Rugi Tembaga (Pcu) .....	46
2. Rugi Inti .....	47
3. Efisiensi .....	48
4. Efisiensi maksimum .....	49
 BAB IV KERJA PARALEL TRANSFORMATOR .....	 58
A. Pengertian .....	58
B. Kondisi Ideal Kerja Paralel Transformator ...	60
C. Perbandingan Tegangan Sama .....	61
D. Perbandingan Tegangan Tidak Sama .....	63
 BAB V PENGUJIAN TRANSFORMATOR .....	 70
A. Pengujian Polaritas .....	70
B. Pengujian Beban Nol (No Load Test) .....	72
C. Pengujian Hubung Singkat .....	75
D. Pengujian Berbeban .....	77
 DAFTAR KEPUSTAKAAN .....	 82

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Medan Magnit pada Sebatang Pengantar Berarus .....	3
2. Dasar Rangkaian Magnit .....	5
3. Skema Rangkaian Dasar Transformator .....	7
4. Konstruksi Inti Tipe Shell .....	11
5. Konstruksi Inti Tipe Core .....	12
6. Bentuk Kumbaran Transformator .....	13
7. Konstruksi Dasar Tangki Transformator .....	14
8. Pendinginan Transformator dengan Minyak .....	18
9. Pendinginan Transformator dengan Minyak dan Air ..	19
10. Pendinginan Transformator dengan Udara .....	20
11. Diagram Transformator Elementer .....	24
12. Diagram Transformator Beban Nol .....	25
13. Transformator dalam Keadaan Berbeban .....	26
14. Transformator dalam Keadaan Hubung Singkat .....	28
15. Diagram Transformator Berbeban .....	29
16. Representasi Rangkaian Kesamaan Transformator dengan Referensi Sisi Primer .....	31
17. Kondisi Beban Nol Transformator .....	32
18. Kondisi Transformator Berbeban .....	33
19. Diagram Transformator dengan Rangkaian Sekunder Dinyatakan dalam Besaran Primer .....	34
20. Penyederhanaan Rangkaian Transformator .....	36
21. Autotransformator .....	38
22. Transformator Arus .....	40

23. Transformator Tegangan .....	41
24. Transformator Las dengan Pengaturan Reaktansi Melalui Tap .....	42
25. Jenis Pembebanan Transformator .....	44
26. Blok Diagram Aliran Daya Elektrik Transformator ..	45
27. Rangkaian untuk Penyelesaian Soal no. 4 .....	56
28. Dasar Kerja Paralel Transformator .....	58
29. Kerja Paralel Ideal Transformator .....	60
30. Transformator dengan Perbandingan Tegangan yang Sama .....	62
31. Transformator dengan Perbandingan Tegangan Tidak Sama .....	64
32. Rangkaian Pengujian Polaritas Transformator .....	71
33. Polaritas Penjumlahan .....	71
34. Polaritas Pengurangan .....	72
35. Sirkuit Pengujian Beban Nol Transformator .....	73
36. Rangkaian Pengujian Transformator Hubung Singkat .	76
37. Rangkaian Pengujian Transformator Berbeban .....	77

## BAB I PENDAHULUAN

### A. Pengertian Umum

BL. Theraja (1982,hal 753) mengemukakan: a transformer is a static (or stationary) piece of apparatus by means of which electric power in one circuit is transformed into electric power of the same frequency in another circuit.

Definisi di atas mengandung pengertian bahwa transformator adalah suatu alat elektrik yang statis dimana energi listrik ditransformasikan dari suatu rangkaian ke rangkaian lain dengan frekuensi yang sama. Peralatan ini mampu menaikkan atau menurunkan tegangan yang berbanding terbalik dengan besarnya arus yang ditransformasikan.

Transformator digunakan secara luas sebagai suatu alat untuk mengubah besarnya tegangan sistem dan arus dalam rangkaian listrik arus bolak balik, tanpa mengalami rugi-rugi yang cukup berarti dalam proses transformasi.

Perkembangan transformator pertama kali dimulai pada tahun 1881 yaitu sejak digunakannya transformator di industri yang telah memanfaatkan tenaga elektrik sebagai sumber tenaga yang menggerakkan mesin-mesin. Selanjutnya tahun 1883 sampai tahun 1900 transformator mulai diakui kepentingannya untuk menunjang sistem saluran transmisi tenaga listrik antar negara bagian di Amerika Serikat. Sistem jala-jala listrik kemudian dikembangkan dalam bentuk tegangan tinggi, bahkan sampai dengan sistem tegangan yang ultra tinggi. Pengembangan transformator terus dilakukan dari tahun 1925 sampai sekarang, terbukti dengan telah dihasilkannya transformator yang mempunyai kapasitas yang besar dengan konstruksi yang relatif cukup kecil.

Cukup beralasan bahwa penggunaan transformator dalam suatu sistem tenaga elektrik akan merupakan hal yang mutlak harus ada. Baik untuk masa sekarang maupun untuk masa-masa yang akan datang. Ini terbukti dengan semakin banyaknya digunakan pada pengembangan sistem distribusi dan transmisi tenaga listrik sebagai suatu peralatan atau komponen utama dari suatu gardu induk, gardu hubung dan gardu distribusi, ataupun pada teknik arus lemah (baca: elektronika).

Sebuah transformator yang sederhana terdiri dari sebuah rangkaian magnet dengan dua buah kumparan penghantar yang digulung sedemikian rupa pada suatu teras magnet. Kedua kumparan tersebut adalah kumparan yang dihubungkan dengan sumber tegangan (selanjutnya dalam pembahasan ini disebut kumparan primer) dan kumparan yang dihubungkan dengan beban (yang selanjutnya disebut dengan kumparan sekunder). Kumparan primer dapat berupa kumparan sisi tegangan tinggi ataupun kumparan sisi tegangan rendah, tergantung dari cara penggunaan dari transformator itu sendiri. Dalam hal ini terdapat dua kemungkinan penggunaan transformator, yaitu apakah sebagai penaik tegangan (Step-up) atau sebagai penurun tegangan (Step-down). Jika transformator digunakan untuk penaik tegangan, maka sisi primer adalah kumparan tegangan rendah dan sisi sekunder adalah kumparan tegangan tinggi. Sebaliknya jika transformator dipergunakan sebagai penurun tegangan, maka sisi primer adalah kumparan sisi tegangan tinggi dan sisi sekunder adalah kumparan sisi tegangan rendah.

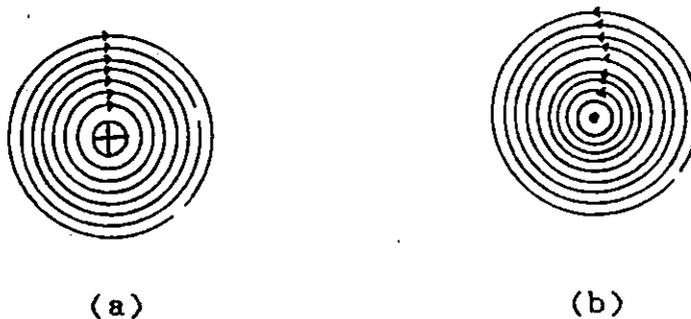
Untuk dapat melakukan transformasi tenaga elektrik tersebut, pada suatu transformator minimal diperlukan dua rangkaian (baca: sirkuit), yaitu rangkaian yang dihubungkan pada sumber listrik yang selanjutnya disebut dengan rangkaian primer dan rangkaian yang dihubungkan pada beban yang selanjutnya disebut sisi sekunder. Dan antara kedua sisi rangkaian transformator secara fisik memang tidak ada hubungan langsung, namun secara elektris diperlukan hubungan timbal balik melalui induksi bersama (mutual induction).

## B. Medan Magnit

Hasil percobaan Oersted menunjukkan bahwa bila sebatang pengantar dialiri arus listrik, maka disekitar pengantar akan timbul medan magnit. Arah medan magnit yang terbentuk dapat ditentukan dengan kaedah tangan kanan Flemming.

Kaedah tangan kanan Flemming, mengandung pengertian bahwa: *Jika sebatang pengantar berarus dipegang sedemikian rupa, maka empuk jari menunjukkan arah arus listrik yang mengalir, dan jari-jari yang lain akan menunjukkan arah dari medan magnit yang terbentuk.*

Dengan menggunakan aturan tangan kanan Flemming tersebut, maka untuk dua pengantar seperti gambar berikut ini dapat dengan mudah ditentukan arah medan magnit yang terbentuk.



Gambar 1. Medan Magnit pada Sebatang Pengantar Berarus  
(a). Arah arus positif  
(b). Arah arus negatif

Arah arus yang mengalir dapat ditentukan dengan suatu kesepakatan, misalnya arah arus yang menjauhi dapat ditetapkan sebagai arah positif. Sedangkan arah arus yang menuju ditetapkan sebagai arah negatif, seperti ditunjukkan pada gambar 1 di atas.

Sesuai dengan aturan tangan kanan Flemming yang dikemukakan di atas, ternyata bahwa arah medan magnit yang terbentuk pada pengantar positif adalah searah jarum jam. Identik dengan cara tersebut, pada pengantar negatif akan

dibangkitkan medan magnet dengan arah berlawanan jarum jam. Densitas fluksi magnet pada setiap titik dari garis gaya berubah besarnya. Densitas fluksi magnet terbesar akan berada pada titik yang paling dekat dengan pengantar.

Untuk mengetahui banyaknya garis gaya magnet yang terbentuk, maka perlu diperhitungkan luas daerah yang ditembus oleh garis gaya magnet. Seperti pada gambar 1 bahwa rapat fluksi akan berkurang besarnya jika suatu titik dalam medan magnet bergerak dalam arah radial menjauhi pengantar.

### C. Tegangan Induksi

Efek yang sangat penting dari medan magnet terhadap suatu pengantar adalah timbulnya tegangan induksi (Gaya gerak listrik). Tegangan induksi akan terbentuk pada suatu pengantar yang berada/ atau dilingkupi oleh medan magnet hanya dan jika terjadi perubahan gerakan sebagai fungsi waktu ( $t$ ). Prinsip ini dikemukakan oleh Faraday, yang mengandung pengertian bahwa: Apabila sebatang pengantar digerakkan dalam medan magnet serba sama dengan kecepatan tertentu, maka pada batang pengantar akan diinduksikan tegangan induksi listrik ( $E$ ). Dalam bentuk persamaan dinyatakan sebagai:

$$e(t) = - d\phi/dt \quad \text{volt} \quad (1)$$

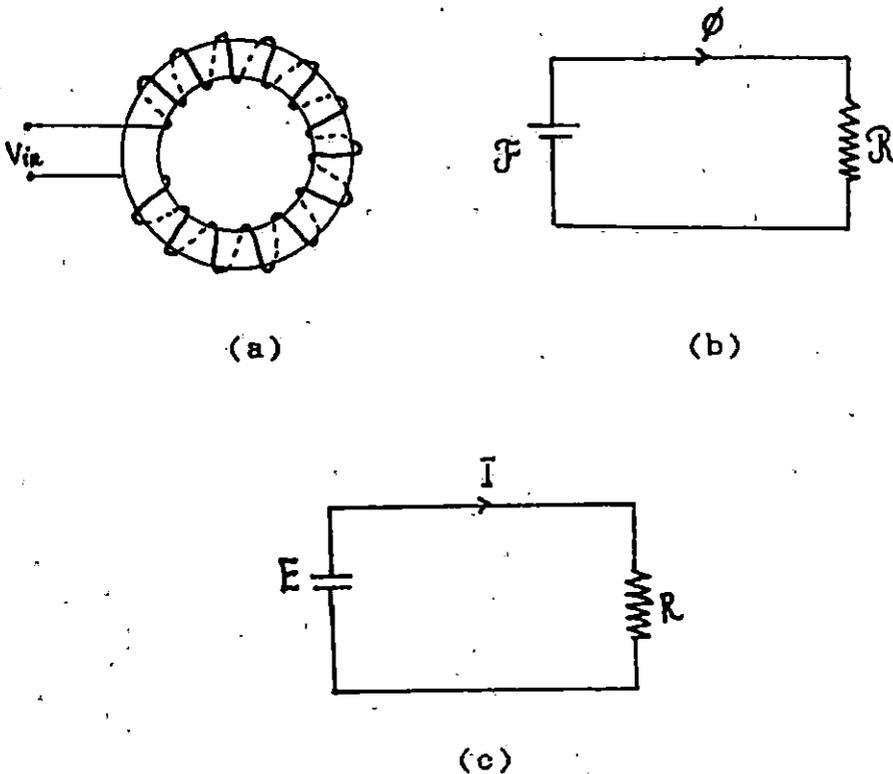
Persamaan (1) di atas adalah untuk 1 batang pengantar. Sedangkan untuk  $N$  jumlah pengantar, besarnya tegangan induksi yang timbul adalah:

$$e(t) = - N d\phi/dt \quad \text{volt} \quad (2)$$

Arah negatif (-) pada persamaan (1) dan (2) di atas sesuai dengan kaedah hukum Lenz. Hukum Lenz mengandung pengertian bahwa tegangan induksi yang timbul akan menentang/ berlawanan arah dengan penyebabnya, dalam hal ini adalah fluksi magnet.

#### D. Dasar Rangkaian Magnet

Rangkaian magnet dapat dijelaskan dengan pertolongan sebuah kumparan yang dililitkan pada inti yang berbentuk lingkaran (troida) seperti pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Dasar Rangkaian Magnet

(a). Kumparan troida

(b). Rangkaian Magnet pada Troida

(c). Analogi Rangkaian listriknya

Bila kumparan troida dengan jumlah lilitan  $N$  dan luas penampang  $A$  dialiri arus listrik sebesar  $i$  akan dibangkitkan  $Mmf$  sebesar  $N \cdot i$ . Besarnya  $Mmf$  yang timbul akan ditentukan oleh kuat medan listrik ( $H$ ) dan panjang lintasan medan magnet dalam troida ( $l$ ). Dalam bentuk persamaan dinyatakan dengan:

$$N \cdot i = \int H \cdot dl \quad (3)$$

Persamaan (3) di atas menunjukkan bahwa besarnya  $Mmf$  ditentukan oleh intensitas medan listrik  $H$  sepanjang lin-

tasannya ( $dI$ ). Intensitas medan magnet  $H$  akan menentukan besarnya densitas fluksi magnet ( $B$ ) sepanjang lintasan fluksi pada troida.

Besarnya densitas fluksi magnet dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} B &= \mu \cdot H \\ &= \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \end{aligned} \quad (4)$$

Persamaan densitas fluksi magnet pada persamaan (4) berlaku untuk inti dengan permeabilitas relatif sebesar  $\mu_r$ . Sedangkan untuk ruang hampa, densitas fluksi magnet ditentukan dengan persamaan:

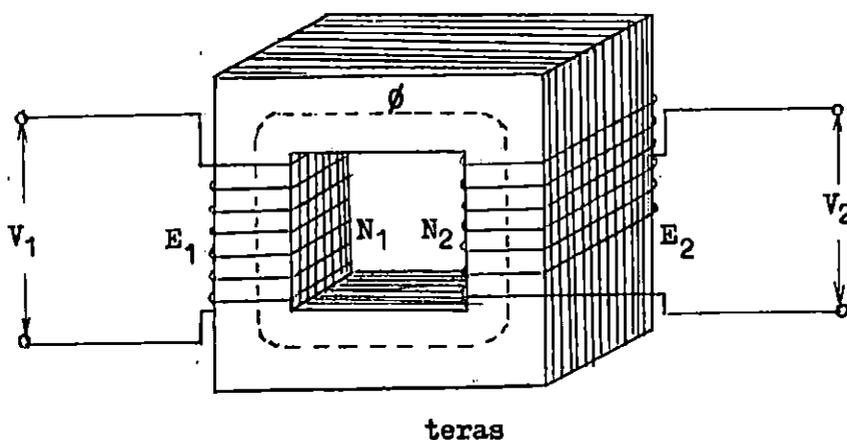
$$B = \mu_0 \cdot H \quad (5)$$

Nilai densitas fluksi magnet pada persamaan (5) di atas dinyatakan dengan ( $Wb/m^2$ ) atau Tesla. Sedangkan  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang hampa sebesar  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m. Tinjauan lebih jauh terhadap gambar 2(b) dan gambar 2(c) menunjukkan bahwa rangkaian magnet sebenarnya identik dengan rangkaian listrik. Terlihat pada gambar 2(b) sebagai sumber adalah  $Mmf$  ( $N \cdot i$ ) dengan reluktansi/ tahanan magnet sepanjang lintasan troida ( $\mathcal{R}$ ), serta fluksi yang mengalir sebesar ( $\Phi$ ). Hal serupa juga terjadi pada rangkaian listrik seperti pada gambar 2(c).

## BAB II PRINSIP KERJA DAN KONSTRUKSI

### A. Prinsip Kerja Transformator

Dasar dari prinsip kerja transformator adalah adanya hubungan induksi timbal balik antara 2 buah sirkuit melalui jaringan fluksi magnet bersama. Realisasi dari pernyataan di atas menghasilkan bentuk gambar nyata dari suatu transformator seperti diperlihatkan pada gambar 3 di bawah ini. Suatu transformator minimal terdiri dari dua kumparan induktif yang terpisah secara fisik, namun tidak secara elektris. Jika salah satu kumparan dihubungkan dengan sumber listrik sinusioda, suatu fluksi yang juga sinusioda akan dibangkitkan pada inti transformator dan mengalir sepanjang permukaannya. Fluksi bersama ini secara bersama pula akan dilingkupi oleh kumparan primer dan kumparan sekunder yang selanjutnya akan menghasilkan tegangan induksi (yang juga sinusioda) pada setiap kumparan. Ini sesuai dengan kaedah hukum Faraday mengenai tegangan induksi elektromagnetik, yaitu  $e(t) = M \cdot dI/dt$ .



Gambar 3. Skema Rangkaian Dasar Transformator  
(BL. Theraja, hal. 753)

Jika kumparan kedua (sekunder) dihubungkan pada suatu beban elektrik sebesar  $Z_1$  akan menyebabkan adanya arus mengalir pada sisi sekunder. Pada saat tersebut telah terjadi transformasi daya listrik dari sisi primer ke sisi sekunder.

Seperti pada gambar 3, kumparan primer mempunyai belitan  $N_1$  dan kumparan sekunder dengan belitan  $N_2$ . Tegangan sumber  $V_1$  yang dihubungkan pada kumparan primer akan menghasilkan arus beban nol sebesar  $I_0$  Amper.

Dengan menganggap bahwa tidak ada 'jatuh tegangan ohmik' pada resistansi primer, maka arus primer beban nol  $I_0$  akan menyebabkan timbulnya fluksi magnet  $\hat{\phi}$  pada inti yang berbentuk sinusioda.

Sesuai dengan sifat ggl pembangkit yang berbentuk priodik, maka ggl lawan yang dihasilkan juga akan berubah secara priodik. Terhadap fluksi yang dihasilkan juga akan menyebabkan bahwa fluksi yang dihasilkan akan berubah-ubah secara priodik. Bentuk matematis dari fluksi yang ditimbulkan pada inti transformator adalah:

$$\hat{\phi} = \hat{\phi}_m \cdot \cos \omega t$$

$$\hat{\phi} = \hat{\phi}_m \cdot \cos 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \quad (6)$$

Fluksi ( $\hat{\phi}_m$ ) di atas adalah fluksi maksimum yang dihasilkan pada inti (dalam Weber). Sedangkan ggl sesaat yang diinduksikan pada kumparan primer  $N_1$  adalah:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= - N_1 \cdot d\hat{\phi}/dt \\ &= - N_1 \cdot \frac{d\hat{\phi}_m \cos \omega t}{dt} \\ &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \hat{\phi}_m \sin \omega t \quad (7) \end{aligned}$$

Persamaan (7) di atas menunjukkan bahwa fluksi yang sinusioda juga akan menghasilkan ggl induksi yang sinusioda pula, namun dengan perbedaan sudut (tertinggal) sebesar  $90^\circ$ . Harga ggl induksi maksimum dari persamaan (7) di atas adalah.

$$E_{1\max} = 2.\pi.f.N_1.\hat{\Phi}_m \quad (8)$$

Nilai efektif dari tegangan induksi  $E_1$  pada persamaan (8) di atas adalah.

$$E_1 = 4,44.f.N_1.\hat{\Phi}_m \quad (9)$$

Identik dengan cara di atas untuk sisi tegangan rendah diperoleh harga tegangan induksi  $e_2(t)$  sebagai.

$$\begin{aligned} e_2(t) &= -N_2.d\Phi/dt \\ &= -N_2.\frac{d\hat{\Phi}_m\cos\omega t}{dt} \\ &= 2.\pi.f.N_2.\hat{\Phi}_m\sin\omega t \end{aligned} \quad (10)$$

Nilai efektif dari tegangan induksi  $E_2$  pada persamaan (10) di atas adalah.

$$E_2 = 4,44.f.N_2.\hat{\Phi}_m \quad (11)$$

Persamaan (9) dan persamaan (11) di atas menunjukkan bahwa jika nilai fluksi  $\hat{\Phi}_m$  dianggap tetap, maka besarnya ggl induksi baik pada sisi tegangan tinggi ataupun pada sisi tegangan rendah sangat ditentukan oleh jumlah belitan primer  $N_1$  dan belitan sekunder  $N_2$ .

## B. Transformator Ideal

Suatu transformator dapat dikatakan ideal dengan asumsi bahwa tidak ada kerugian daya yang terjadi, baik pada sisi tegangan tinggi, maupun pada sisi tegangan rendah. Dengan kata lain bahwa besarnya daya masukan ( $P_{in}$ ) tepat sama besar dengan daya keluaran ( $P_{out}$ ). Praktisnya keadaan memang tidak akan pernah tercapai. Namun untuk memudahkan analisis, kadang asumsi ini diperlukan.

Dengan prinsip tersebut dapat dilakukan perbandingan besaran primer dan besaran sekunder, yaitu persamaan (9) dan persamaan (11) seperti di bawah ini.

$$\frac{E_{1m}}{E_{2m}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \Phi_m}{4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \Phi_m} = a \quad (12)$$

Nilai perbandingan persamaan tegangan induksi pada sisi tegangan tinggi dan persamaan tegangan rendah di atas merupakan nilai perbandingan transformasi ( $a$ ) dari suatu transformator.

Selanjutnya jika besarnya daya kVA masukan ( $P_{in}$ ) dan daya keluaran ( $P_{out}$ ) diasumsikan sama besar, maka:

$$V_1 \cdot I_1 = I_2 \cdot V_2$$

dan,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (13)$$

Berdasarkan nilai perbandingan transformasi yang diperoleh dari persamaan (12) dan (13) di atas dapat ditentukan jenis transformator yang digunakan, sebagai berikut:

1.  $a < 1$  --> Transformator penaik tegangan
2.  $a = 1$  --> Transformator ideal
3.  $a > 1$  --> Transformator penurun tegangan.

Khusus untuk harga perbandingan transformasi ( $a=1$ ) sangat jarang dijumpai dilapangan. Penggunaan transformator dengan harga perbandingan transformasi  $a=1$  hanya digunakan pada transformator isolasi, dimana besarnya tegangan masukan (input) transformator persis sama dengan tegangan keluaran (output).

### C. Konstruksi Transformator

Seperti dijelaskan pada bagian terdahulu bahwa secara fisik suatu transformator hanya terdiri dari belitan/kumparan dan teras magnetik atau inti. Namun dalam pembahasan ini akan diuraikan konstruksi transformator dengan lebih lengkap. Sebagai dasar dalam pembahasan ini akan dikemukakan konstruksi dari suatu transformator tenaga. Hal ini disebabkan karena penggunaan lebih umum dari transformator dalam sistem tenaga elektrik adalah untuk kapasitas yang relatif besar.

Pada dasarnya konstruksi dari suatu transformator di-  
klasifikasi menjadi konstruksi bagian dalam dan konstruksi  
bagian luar.

#### 1. Konstruksi Bagian Dalam

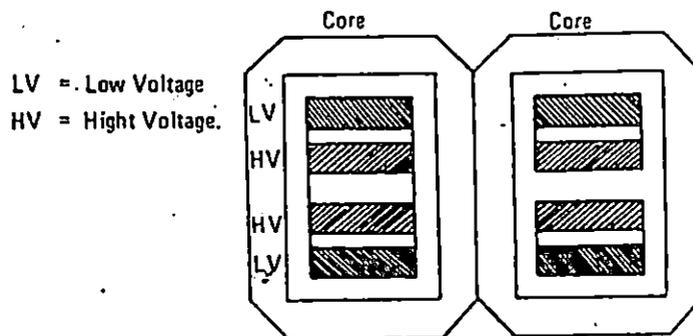
Konstruksi bagian dalam suatu transformator tenaga  
pada umumnya terdiri dari:

##### a. Inti besi

Inti besi (teras) suatu transformator merupakan  
rangkainan magnet yang diakibatkan oleh kumparan-  
kumparan. Inti besi berguna untuk mempermudah jalan-  
nya fluksi yang ditimbulkan arus listrik melalui  
kumparan.

Suatu inti besi transformator biasanya terbuat  
dari lapisan plat khusus dengan tebal berkisar antara  
0,35-0,5 mm. Pada setiap lapisan diberi isolasi se-  
bagai pembatas yang berfungsi untuk mengurangi panas  
yang ditimbulkan arus pusar (Eddy Current). Sebagai  
isolasi setiap lapisan biasanya diberi minyak varnish  
yang tipis atau kertas tipis.

Bentuk inti transformator yang umum digunakan  
adalah bentuk tipe 'core' dan tipe 'shell'. Konstruk-  
si inti dengan tipe Shell seperti pada gambar 4 biasa  
digunakan pada transformator tenaga dengan kapasitas  
yang relatif kecil.

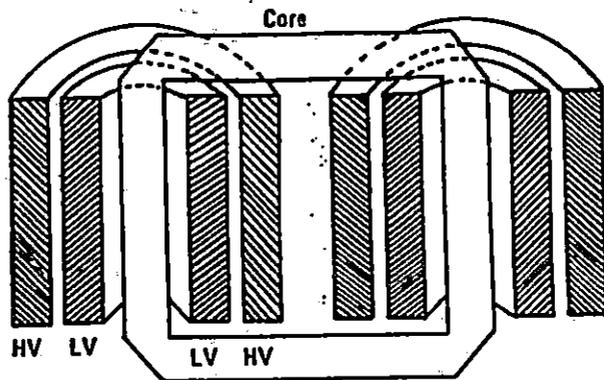


Gambar 4. Konstruksi Inti Tipe Shell

(R. Panjaitan, 1989 hal 17)

Pada tipe shell, belitan primer dan sekunder terletak pada satu kaki. Keuntungan penggunaan tipe ini adalah mudah pembuatannya dan besarnya fluksi bocor akan menjadi berkurang. Sedangkan kelemahannya adalah pemakaian inti kurang ekonomis, karena memerlukan inti yang relatif besar.

Sedangkan konstruksi inti dengan tipe Core seperti pada gambar 5 umumnya digunakan pada transformator tenaga dengan kapasitas yang relatif lebih besar.



Gambar 5. Konstruksi Inti Tipe Core

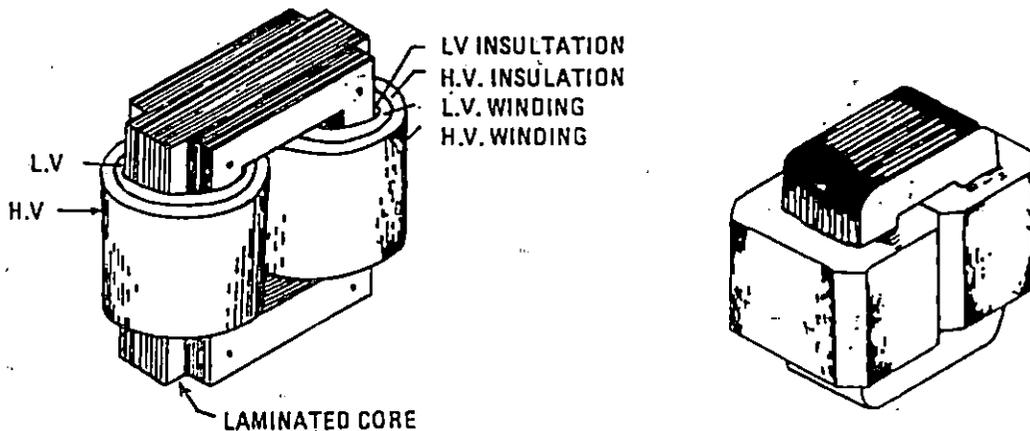
(R. Panjaitan, 1989 hal 17)

Khusus untuk tipe core, belitan sisi tegangan tinggi dan belitan sisi tegangan rendah dililitkan pada kaki inti yang berbeda. Keuntungannya dari penggunaan inti dengan tipe ini adalah ekonomis dalam pemakaian inti dan ventilasi yang cukup baik. Sedangkan kelemahannya adalah fluksi bocor ke udara menjadi cukup besar dibanding dengan tipe shell. Biasanya untuk transformator dengan kapasitas cukup besar, lempengan inti disusun sedemikian rupa diperoleh celah udara yang cukup besar, yang sekaligus berfungsi sebagai ventilasi.

## b. Kumbaran

Kumbaran transformator, yakni lilitan konduktor yang dihubungkan dengan tegangan arus bolak balik maupun yang dihubungkan dengan beban yang nantinya menyebabkan timbulnya fluksi pada disekitar kumbaran itu. Kumbaran tersebut diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumbaran lain dengan isolasi padat seperti karton, partinax dan lain-lainnya. Kumbaran transformator biasanya dibuat dari kawat tembaga yang berbentuk pelat (segi empat) atau bulat. Untuk transformator yang berkapasitas besar, kawat tembaga yang dipergunakan kawat yang berbentuk plat. Penggunaan kawat yang berbentuk plat juga bertujuan untuk menghindari efek bising (noise) dari transformator.

Khusus untuk jenis transformator tenaga, kumbaran transformator umumnya dibuat berbentuk silinder ataupun berbentuk persegi panjang seperti diperlihatkan pada gambar 6 di bawah ini.



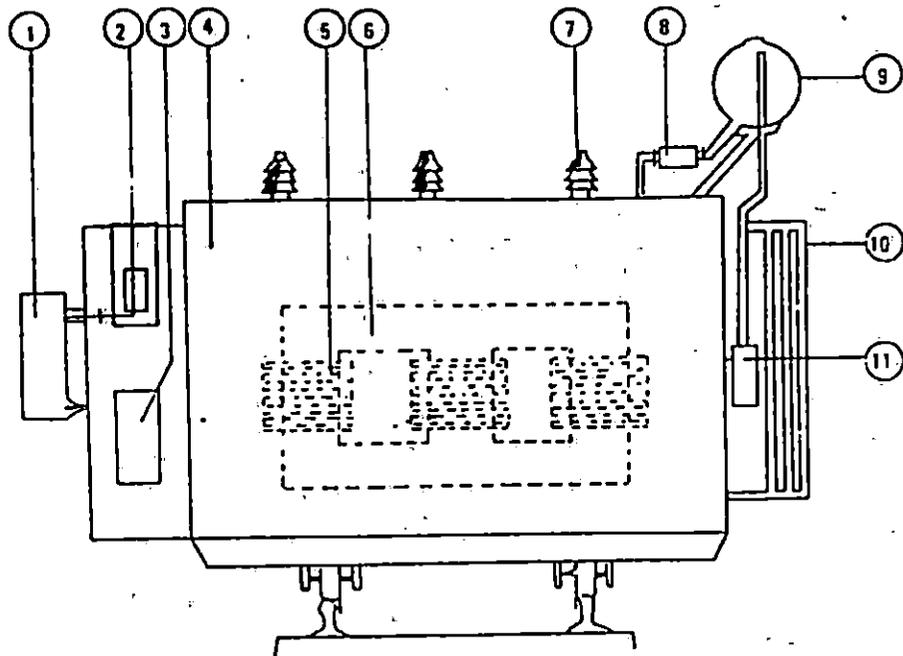
Gambar 6. Bentuk Kumbaran Transformator  
 (a). Bentuk Silinder  
 (b). Bentuk Persegi panjang

## 2. Konstruksi Luar Transformator

Konstruksi luar transformator tenaga pada umumnya terdiri dari:

a. Tangki

Tangki pada transformator berfungsi untuk menampung minyak transformator. Inti besi dan kumparan yang tersusun rapi dimasukkan ke dalam tangki yang berisi minyak dimana minyak berfungsi sebagai isolasi dan pendinginan. Tangki transformator ada yang berbentuk bulat, bujur sangkar dan di buat dari plat baja dengan tebal antara 5-12 mm. Dasar dan tutup tangki dibuat dari baja yang lebih tebal dari pada dinding tangki. Antara tutup tangki dengan dinding tangki dibuat dan disegel agar lebih kuat menerima tekanan dari dalam tangki. Di bawah ini diperlihatkan salah satu bentuk tanki dari transformator tenaga.



Gambar 7. Konstruksi Dasar Tangki Transformator

(R. Panjaitan, 1989 hal 12)

Keterangan:

- |                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| 1. Motor penggerak sakelar | 7. Bushing            |
| 2. Sakelar pengalih        | 8. Buchholz           |
| 3. Pemilih Tap             | 9. Tangki Conservator |
| 4. Tangki                  | 10. Pipa pendingin.   |
| 5. Belitan                 | 11. Penyerap Uap air. |
| 6. Inti                    |                       |

## b. Minyak Transformator

Minyak transformator secara luas digunakan pada transformator tenaga, atau transformator pemutus tenaga dan peralatan sistem tenaga elektrik lainnya. Transformator yang berkapasitas besar pada umumnya terdiri dari kumparan dan inti yang direndam dalam minyak transformator.

Minyak transformator mempunyai sifat sebagai media pemindah panas dan isolasi. Sebagai isolasi, minyak transformator merupakan suatu jenis isolasi minyak mineral yang mengandung campuran utama karbon dan hidrogen yang digabung dengan campuran lain yang berisi sulfur, oksigen, dan nitrogen.

Minyak transformator yang baik berwarna bening dan kuning muda. Bila telah dipakai terus minyak tersebut akan berwarna kecoklat-coklatan. Minyak transformator tidak boleh mengandung bagian mekanik, cairan asam dan basa, atau karbon, karena pengotoran tersebut akan mempercepat kurangnya ketahanan minyak dan bila pengotoran itu mengendap pada bagian yang berarus listrik dapat menyebabkan tegangan tembus (Flash over).

Kelembaban minyak menyebabkan turunnya kekuatan daya tahan antara bagian-bagian yang dialiri arus pada transformator. Minyak transformator harus mempunyai kekentalan yang rendah dan mampu mendinginkan transformator pada suatu nilai suhu dengan pendinginan yang lebih baik.

## c. Konservator

Konservator pada suatu transformator berfungsi sebagai :

1. Untuk memastikan agar transformator selalu berisi minyak. Biasanya konservator mempunyai isi antara 8-10% dari isi minyak dalam tangki. Minyak pendingin yang berada dalam konservator harus dipelihara atau diteliti secara terus

menerus agar minyak tersebut berada pada batas yang sama.

2. Untuk mengurangi tinggi permukaan minyak dalam hubungannya dengan udara luar.

Pada bagian atas konservator dipasang tutup (pipa) yang dapat terbuka agar udara dapat masuk ke dalam konservator atau mengeluarkan udara panas, apabila temperatur minyak naik dan tertutup kembali bila temperatur dalam transformator telah sesuai dengan temperatur kerja. Dalam pemakaiannya konservator biasanya dibuat berbentuk selinder dan dipasangkan pada bagian atas transformator yang dihubungkan dengan sebuah pipa pendek.

#### d. Bushing

Bushing pada suatu transformator berfungsi untuk menghubungkan antara kumparan transformator ke jaring luar. Bushing adalah suatu konduktor yang diselubungi oleh isolator yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator.

Bushing juga mempunyai klep (katup) berfungsi untuk mengambil minyak dari dalam tangki untuk dilakukan penggetesan kembali.

#### e. Radiator (Sirip)

Radiator pada suatu transformator berfungsi sebagai pendingin alamiah. Dalam pemakaiannya radiator dihubungkan pada tangki transformator melalui pipa radiator spesial.

#### f. Kipas Angin (motor fan)

Kipas angin pada transformator berfungsi sebagai pendingin, biasa dikatakan sebagai pendingin paksa. Pada suatu kondisi yang telah ditentukan kipas angin akan jalan dimana pendingin alami tidak mampu lagi mendinginkan transformator secara baik.

### 3. Peralatan Bantu Transformator Tenaga

Dalam operasinya suatu transformator membutuhkan beberapa peralatan bantu yang terdiri dari:

1. Pendingin
2. Pengubah Tab (Tap Changer)
3. Meter-meter atau indikator.

#### a. Pendinginan Transformator

Pada saat transformator tenaga dioperasikan maka pada inti besi dan kumparan transformator akan timbul panas yang diakibatkan oleh rugi-rugi besi dan rugi tembaga. Panas tersebut dapat mengakibatkan suhu minyak pendingin transformator menjadi lebih tinggi. Untuk mengurangi efek akibat panas yang timbul, suatu transformator perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin yang berfungsi untuk menyalurkan panas yang timbul pada transformator.

Adapun sistem pendinginan suatu transformator dapat dibagi atas 2 bagian, yaitu:

1. Pendinginan dengan minyak (dalam hal ini transformator dicelupkan ke dalam minyak transformator).
2. Pendinginan dengan udara, khusus untuk transformator jenis kering (dry type).

#### 1) Pendinginan dengan Minyak

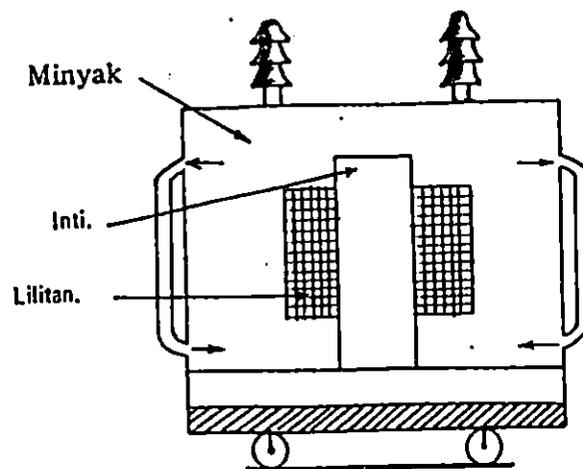
Sistem pendinginan transformator yang memanfaatkan minyak sebagai pendingin mempunyai 3 cara utama dalam mendinginkan suatu transformator, yaitu:

##### a) Pendinginan Alam

Pada cara ini panas yang menyelubungi inti besi dan kumparan transformator dipindahkan pada minyak yang mengelilingi kumparan. Kemudian panas dilewatkan melalui dinding tangki, hingga panas terserap oleh udara sekelilingnya.

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

Pemindahan panas tersebut dibantu oleh adanya sirkulasi udara alami yang diatur dalam minyak transformator. Panas menyebabkan naiknya permukaan penutup tangki. Hal ini menyebabkan turunnya minyak ke dasar tangki yang berfungsi sebagai pendingin dan memperkuat kepadatannya.



Gambar 8. Pendinginan Transformator dengan Minyak

(R. Panjaitan, 1989 hal 19)

Mempertinggi nilai penyerapan panas terhadap udara di dalam tangki transformator dibentuk dengan bantuan permukaan pendingin, dan tangki pembuluh radiator.

#### b) Pendingin minyak dan Udara Luar

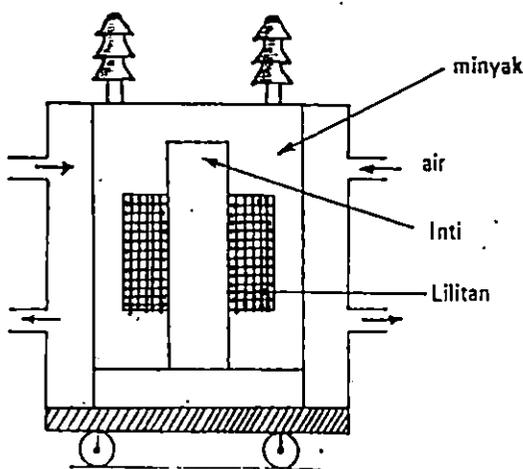
Untuk transformator yang mempunyai kapasitas dan keluaran yang besar, pendinginan minyak alam tidaklah mencukupi. Karena itu sebagai pendingin transformator tersebut dibuat dengan cara penggabungan minyak dengan udara atau minyak dengan air. Namun yang sering digunakan adalah gabungan minyak dengan udara (pendinginan paksaan).

Pada transformator dengan pendinginan minyak alam dengan cetusan udara, tabung penyimpanan (radiator) didinginkan oleh putaran udara dari beberapa unit kipas angin (pendingin paksaan) yang ditempatkan ke dalam ruangan masing-masing radiator.

Untuk beban di bawah 70% dari pada beban normal dan temperatur udara tidak melebihi  $55^{\circ}\text{C}$  minyak alam masih berfungsi sebagai pendingin. Tetapi bila beban sudah melebihi 70% keadaan operasi normal, kipas angin akan bekerja secara otomatis untuk mendinginkan transformator. Kipas angin ini akan berhenti bila besarnya beban turun kembali di bawah 70% dari beban normal. Bekerjanya kipas angin dilakukan secara otomatis dengan menggunakan bantuan rele.

c) Pendinginan minyak air

Pada cara ini minyak dan udara panas yang berada di dalam tangki transformator dialirkan ke dasar tangki melalui pompa sirkulasi secara berulang kali, seperti terlihat pada gambar berikut ini.



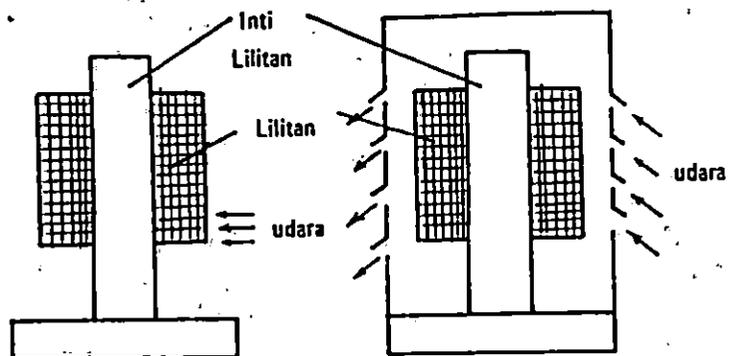
Gambar 9. Pendinginan Transformator dengan Minyak dan Air

(R. Panjaitan, 1989 hal 19)

Air sebagai pendingin dialirkan melalui pipa sambil mengadakan sirkulasi minyak pada permukaan melalui pipa, dimana tekanan minyak lebih tinggi dari tekanan air. Berdasarkan keterangan di atas dapatlah disimpulkan bahwa pendinginan dengan minyak air membutuhkan biaya yang mahal dan juga kurang begitu menyenangkan penggunaannya bila dibandingkan dengan pendinginan minyak alam maupun dengan pendinginan minyak dengan cetusan.

2) Pendinginan dengan udara (Transformator jenis kering)

Transformator yang mempunyai pendinginan jenis kering, pada penyalurannya mempunyai kerugian sirkulasi alam dan udara disebabkan kelilingnya akibat panas pada transformator itu dan tingkat pendinginan jenis kering ini hanya untuk ukuran tertentu (perhatikan gambar di bawah ini).



Gambar 10. Pendinginan Transformator Dengan Udara

(R. Panjaitan, 1989 hal 19)

Pendinginan jenis jenis kering dibuat untuk tegangan di atas 10 kV dan daya di atas 750 kVA. Ini hanya digunakan untuk keadaan khusus karena

konstruksinya yang sederhana, ukuran yang kecil serta tidak perlu menggunakan minyak untuk mengecilkan bahaya kebakaran.

#### b. Pengubah Tap (Tap Changer)

Pengubah tap adalah peralatan yang berfungsi untuk merubah nilai perbandingan transformasi dari suatu transformator. Fungsi utama dari peralatan ini adalah untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik dan sesuai dengan yang diinginkan dari tegangan jaringan primer yang berubah-ubah.

Ada dua cara untuk merubah tegangan keluaran suatu transformator, yaitu:

1. Memasang transformator dengan perubah tap (tap changer) dimana salah satu atau kedua sisi kumparan transformator dibuat tap atau penyadap dengan perbandingan transformasi tertentu:

Rumus perbandingan transformasi adalah  $(N_1/N_2=V_1/V_2)$ :

2. Memasang pengatur tegangan secara seri dan terpisah dari transformator. Biasanya dipergunakan pada transformator berbeban (on load tap changer).

Cara kerja dan pengoperasian pengubah tap terbagi atas dua macam, yaitu:

1. On load Tap Changer

Pengubah tap ini beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan berbeban dan tap ini dapat dioperasikan secara manual dan kontrol otomatis.

2. Off load Tap Changer

Pengubah tap ini beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan tidak berbeban dan hanya dapat dioperasikan secara manual.

#### c. Alat Pernafasan

Perubahan suhu udara luar maupun naik turunnya beban transformator akan mempengaruhi suhu minyak.

Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaannya dan akan keluar dari tangki. Sebaliknya apabila suhu minyak turun akan menyusutkan dan menyebabkan udara luar masuk ke dalam tangki. Proses perubahan suhu minyak tersebut dinamakan pernafasan transformator. Akibat dari pernafasan tersebut akan menyebabkan permukaan minyak selalu bersinggungan dengan udara luar yang lembab dan akan menurunkan tegangan tembus minyak transformator. Untuk mencegah hal ini maka pada ujung-ujung pipa penyambung udara luar dilengkapi dengan alat pernafasan berupa tabung yang berisi kristal silicagel.

d. Meter atau Indikator.

Agar aman dalam pengoperasiannya, maka transformator perlu dilengkapi dengan indikator-indikator tertentu. Indikator-indikator tersebut adalah:

1. Indikator permukaan minyak yang berguna untuk mengetahui tinggi permukaan minyak pada tangki.
2. Indikator suhu minyak yang berfungsi untuk mengetahui temperatur minyak transformator, yang diusahakan agar selalu tetap.
3. Indikator sistem pendingin yang berguna untuk mengetahui pada suhu mana kipas angin mulai bekerja.
4. Indikator posisi tap yang berfungsi untuk mengetahui posisi tap. Posisi tap penting diketahui dalam pengoperasian suatu transformator, terutama untuk mengatur besarnya tegangan keluaran agar berada pada range yang diinginkan.

Disamping itu suatu transformator juga dilengkapi dengan peralatan ukur penunjuk besaran elektrik keluaran dari transformator, yaitu Amper meter, kV meter, dan kVA meter.

### BAB III

#### ANALISIS OPERASI TRANSFORMATOR

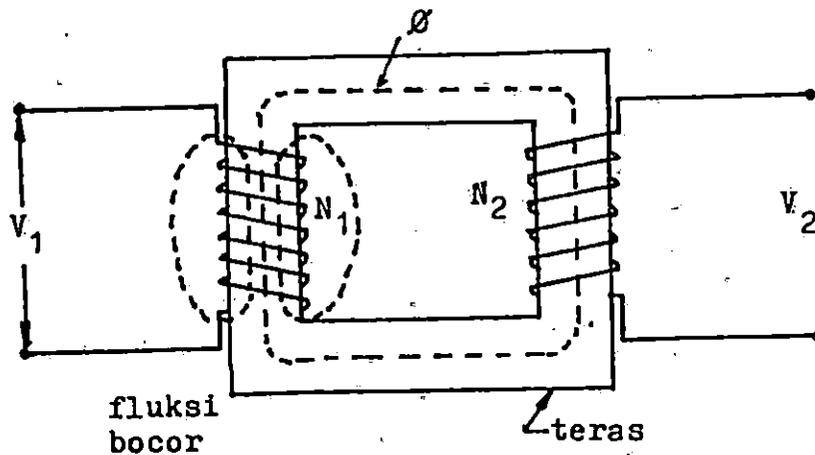
Seperti uraian pada bab sebelumnya bahwa fungsi utama sebuah transformator adalah untuk mentransformasikan energi elektrik dari suatu rangkaian ke rangkaian lain, yang dalam kenyataannya adalah dari suatu jaringan tenaga elektrik ke jaringan yang lainnya. Dalam keadaan tersambung dengan suatu jaringan tenaga elektrik, berbagai kemungkinan dapat terjadi, misalnya keadaan beban nol, keadaan berbeban dengan beban simetris, beban tidak simetris, serta keadaan hubung singkat. Keadaan hubung singkat merupakan kondisi operasi transformator yang perlu mendapat perhatian khusus, oleh karena kondisi ini dapat membahayakan transformator yang pada akhirnya dapat merusak transformator.

Uraian pada bab ini akan diutamakan pada kondisi beban nol, berbeban dan kondisi hubung singkat. Khusus untuk kondisi berbeban akan lebih dikembangkan lagi pada analisis transformator dalam kerja paralel.

#### A. Keadaan Beban Nol

Untuk memudahkan dalam pemahaman, anggaplah bahwa suatu transformator mempunyai konstruksi sederhana seperti gambar 11 di bawah ini. Sisi tegangan tinggi (primer) mempunyai belitan sebesar  $N_1$  dan sisi tegangan rendah (sekunder) dengan belitan sebesar  $N_2$  dan dipasang pada kaki/ sisi inti yang berbeda. Sisi sekunder dibiarkan dalam keadaan terbuka (tidak ada beban yang dihubungkan). Dengan demikian pada sisi tegangan rendah tidak ada arus mengalir ( $I_2=0$ ). Artinya pada kondisi ini transformator dapat dianggap sebagai suatu beban reaktansi.

Misalkan arus yang mengalir pada sisi tegangan tinggi dalam keadaan beban nol adalah  $I_0$ .



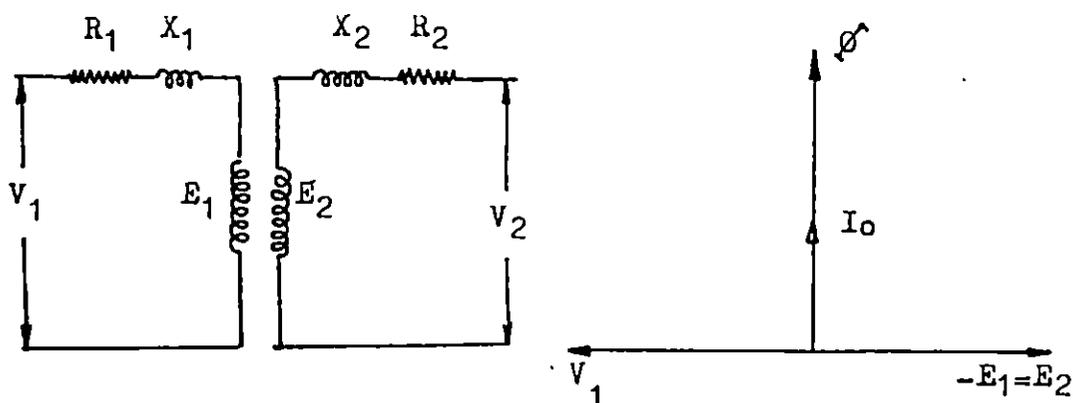
Gambar 11. Diagram Transformator Elemeneter  
(Djoko Warsito, hal. 14)

Untuk menganggap bahwa transformator yang digunakan adalah transformator ideal diperlukan beberapa asumsi. Djoko Warsito (1986, hal. 15) mengemukakan sebagai berikut:

1. Fluksi pada inti trafo sebanding dengan gaya gerak magnet (ggm) yang menghasilkannya. Dengan kata lain bahwa inti trafo belum jenuh oleh fluks dan permeabilitasnya konstan.
2. Tidak ada rugi-rugi besi pada inti trafo (histerisis dan eddy current).
3. Fluksi yang dibangkitkan oleh arus primer kesemuanya berada pada inti magnetik sehingga kedua belitan dilingkupi oleh fluksi ini.
4. Resistansi belitan primer tidak ada (nol).

Perlu diingat, untuk asumsi bila resistansi belitan primer sama dengan nol, maka fluksi yang dihasilkan akan berbanding lurus dengan arus primer beban nol. Selanjutnya berdasarkan kaedah hukum Lenz bahwa arus induksi yang timbul pada sisi primer juga akan melawan arah arus primer beban nol. Lebih jauh bahwa pada sisi primer juga terdapat ggl induksi dengan arah berlawanan dengan tegangan sumber  $V_1$ .

Berdasarkan asumsi ke empat juga dapat diterima bahwa tidak ada jatuh tegangan Ohmik pada sisi primer, karena arus yang mengalir sangat kecil. Jadi pada sisi primer hanya akan ada dua macam ggl, yaitu ggl pembangkit tegangan induksi dan ggl lawan. Kedua macam ggl ini pada prinsipnya harus sama besar dan berlawanan arah.



Gambar 12. Diagram Transformator Beban Nol  
 (a). Rangkaian Kesamaan  
 (b). Vektor Diagram Tanpa  
 Jatuh Tegangan Ohmik Primer.

Vektor diagram seperti pada gambar 12 dibuat berdasarkan asumsi bahwa tidak ada rugi histerisis dan eddy current yang terjadi, baik pada sisi primer ataupun pada sisi sekunder. Namun kerugian inti pada prinsipnya tetap ada, kendatipun diusahakan meredam dengan cara membuat inti trafo dari laminating inti dengan ketebalan yang relatif kecil. Sehingga vektor primer beban nol  $I_0$  tidak lagi tertinggal tepat  $90^\circ$  dari  $V_1$ . Melainkan sebesar  $\phi_0$  dari vektor tegangan  $V_1$ . Sudut  $\phi_0$  selanjutnya disebut dengan sudut pemberi histerisis (hysterisis advanced).

Hubungan vektor diantara parameter arus tersebut dapat dinyatakan sebagai.

$$\overline{I_0} = \overline{I_{h+e}} + \overline{I_m} \quad (14)$$

dimana:

- $I_0$  = vektor arus beban nol
- $I_{h+e}$  = vektor arus histerisis dan arus pusar
- $I_m$  = vektor arus magnetisasi

Nilai nyata arus magnetisasi ( $I_m$ ) dan arus histerisis & arus eddy ( $I_{h+e}$ ) terhadap nilai arus beban nol ( $I_o$ ) dapat diturunkan sebagai berikut:

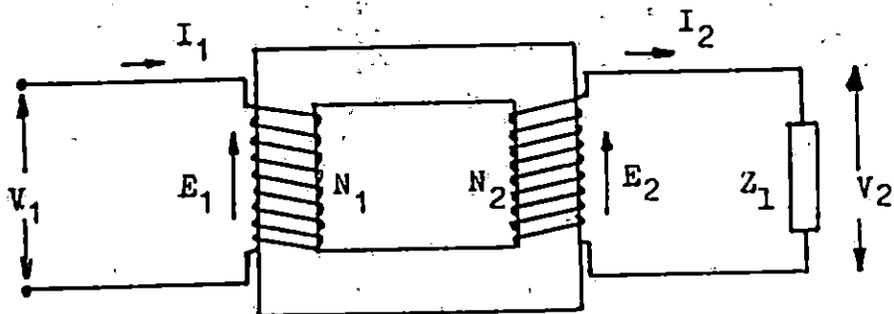
$$I_m = I_o \cdot \sin \phi_o$$

$$I_{h+e} = I_o \cdot \cos \phi_o \quad (15)$$

Kembali pada gambar 11, pada titik A dan B mesti ada perbedaan potensial untuk menimbulkan tegangan induksi  $E_1$ . Perbedaan ini menyebabkan timbulnya fluksi bocor yang hanya melingkupi belitan primer. Besarnya fluksi bocor ini berbanding lurus dan sefase dengan arus primer beban nol ( $I_o$ ). Fluksi bocor ini juga menghasilkan ggl reaktansi bocor dengan sudut fase tertinggal  $90^\circ$  dari fluksi bocor.

#### B. Keadaan Berbeban

Keadaan berbeban diperoleh bila sisi tegangan rendah dihubungkan dengan beban tertentu seperti pada gambar 13 di bawah ini. Pemasangan beban pada sisi tegangan rendah menyebabkan mengalirnya arus sekunder  $I_2$ .



Gambar 13. Transformator Dalam Keadaan Berbeban

Arus sekunder  $I_2$  akan menimbulkan gaya gerak magnet (Ggm) sebesar  $N_2 \cdot I_2$  dengan arah menentang arah fluksi bersama ( $\phi_o$ ) yang dibangkitkan oleh arus pemagnitan  $I_m$ . Agar supaya fluksi bersama ( $\phi_o$ ) tidak berubah besarnya, maka pada sisi tegangan tinggi, mesti ada arus tambahan

sebesar  $I_2'$ . Arus  $I_2'$  akan menghasilkan fluksi yang berlawanan arah dengan fluksi yang dibangkitkan oleh arus  $I_2$ . Jadi arus yang mengalir pada sisi tegangan tinggi menjadi:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2' \quad (16)$$

Bila rugi besi (yang diakibatkan oleh  $I_{h+e}$ ) diabaikan, maka arus yang mengalir pada sisi tegangan tinggi menjadi:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_m + \bar{I}_2' \quad (17)$$

Untuk menjaga agar fluksi bersama ( $\phi_0$ ) tidak berubah besarnya selama pengoperasian transformator, maka Ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnitan  $I_m$  besarnya adalah:

$$N_1 \cdot I_m = N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 \quad (18)$$

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

$$N_1 \cdot I_2' = N_2 \cdot I_2 \quad (19)$$

Dalam kenyataannya arus pemagnitan  $I_m$  relatif cukup kecil, sehingga didapat perubahan nilai  $I_2'$  akan sebanding dengan perubahan arus sisi tegangan tinggi  $I_1$ . Dengan demikian diperoleh lagi hubungan:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$$

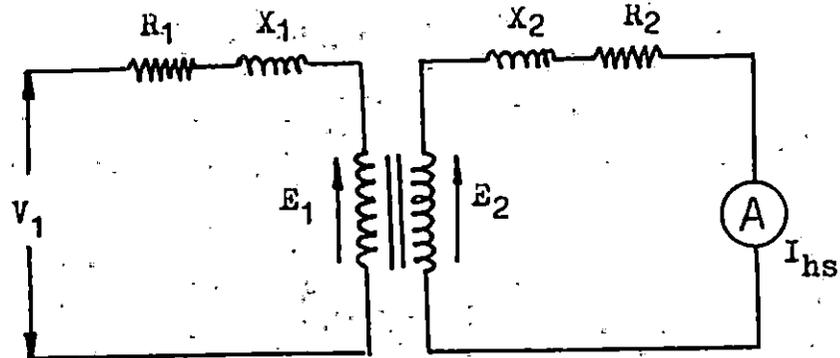
$$N_1/N_2 = I_2/I_1 \quad (20)$$

Persamaan di atas mengandung arti bahwa besarnya Ggm yang dibangkitkan pada belitan sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah adalah sebanding.

### C. Keadaan Hubung singkat

Kondisi hubung singkat terjadi bila rangkaian sisi tegangan rendah atau sisi yang tersambung pada beban terhubung singkat. Hubung singkat pada sisi beban dapat terjadi karena hubung singkat antar fasa-netral atau hubung

singkat antara fasa dengan ground (bodi transformator) seperti ditunjukkan pada gambar 14 berikut ini.



Gambar 14. Transformator Dalam Keadaan Hubung Singkat

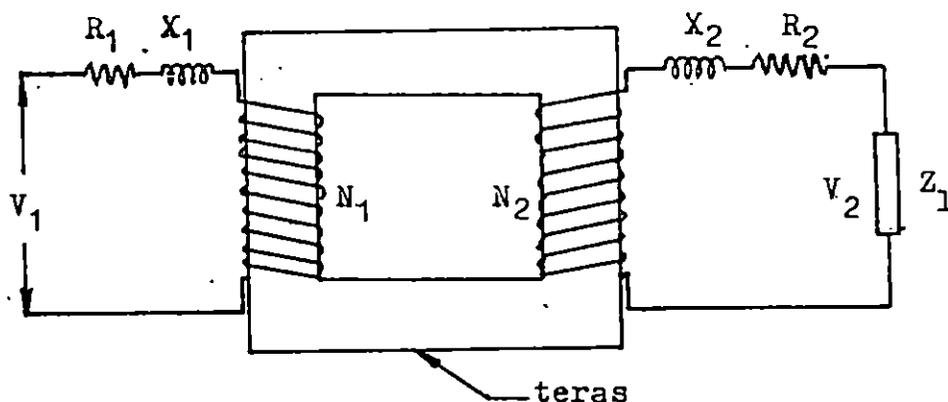
Dalam kondisi ini, impedansi beban  $Z_1$  sama dengan nol. Akibatnya jika transformator bekerja dengan tegangan nominal, maka arus sekunder akan menjadi sangat besar. Kondisi ini jelas akan mengakibatkan transformator menjadi panas, dalam waktu yang tidak terlalu lama dapat mengakibatkan transformator terbakar. Praktisnya melalui pengujian hubung singkat pada bab IV dapat diketahui bahwa besarnya tegangan hubung singkat hanya berkisar antara 15 - 30 % dari tegangan nominal transformator. Dapat diterima, bila transformator bekerja pada tegangan nominal, jelas akan mengakibatkan arus sekunder yang sangat besar.

#### D. Rangkaian Kesamaan Transformator

Rangkaian kesamaan transformator dimaksudkan adalah penggambaran rangkaian transformator yang dilakukan berdasarkan parameter rangkaian elektrik, yaitu resistansi, induktansi sendiri kumparan primer dan sekunder serta induktansi magnetik teras transformator.

Pada gambar 15 di bawah ini terlihat bahwa sisi primer dan sekunder mempunyai tahanan resistansi primer dan sekunder berturut-turut  $R_1$  dan  $R_2$  dan tahanan reaktansi induktif masing-masing  $X_1$  dan  $X_2$ . Sedangkan induktansi magnetik adalah tahanan magnetisasi ( $R_m$ ) dan induktansi bocor

( $X_m$ ). Berdasarkan gambar 15 juga dimungkinkan untuk melakukan pemindahan parameter elektrik transformator dari suatu sisi ke sisi yang lainnya dengan memperhatikan besarnya faktor transformasi, misalkan dari sisi primer ke sisi sekunder, atau sebaliknya.



Gambar 15. Diagram Transformator Bebeban

(BL. Theraja, 1982 hal 776)

Adapun keuntungan dari dilakukannya pemusatan besaran transformator pada suatu sisi, baik pada sisi primer ataupun pada sisi sekunder adalah untuk penyederhanaan rangkaian, sekaligus bertujuan untuk memudahkan analisis rangkaian, karena fokus analisis hanya terletak pada satu rangkaian.

#### 1. Faktor Reduksi

Analisis rangkaian kesamaan transformator didasarkan pada asumsi bahwa besarnya kerugian tembaga pada sisi primer bernilai sama dengan rugi tembaga pada sisi sekunder. Dalam bentuk persamaan dinyatakan dengan:

$$I_1^2 \cdot R_1 = I_2^2 \cdot R_2 \quad (21)$$

Jika dianggap bahwa  $R_2'$  adalah harga tahanan resistansi sekunder yang ditransformasikan pada sisi primer, maka:

$$I_1^2 \cdot R_2' = I_2^2 \cdot R_2 \quad (22)$$

$$R_2' = (I_2^2 / I_1^2) \cdot R_2$$

$$R_2' = a^2 \cdot R_2 \quad (23)$$

Dengan cara yang sama, jika  $R_1'$  adalah besarnya tahanan resistansi sisi primer yang ditransformasikan pada sisi sekunder, maka:

$$I_1^2 \cdot R_1 = I_2^2 \cdot R_1' \quad (24)$$

$$R_1' = (I_1^2 / I_2^2) \cdot R_1$$

$$R_1' = 1/a^2 \cdot R_2 \quad (25)$$

Identik dengan kedua cara di atas, untuk kedua transformasi tahanan reaktansi induktif dari kumparan sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah diperoleh berturut-turut sebagai berikut.

$$X_2' = a^2 \cdot R_2 \quad (26)$$

$$X_1' = 1/a^2 \cdot R_2 \quad (27)$$

Penting diperhatikan bahwa transformasi besaran pada salah satu sisi mesti dilakukan terhadap semua besaran elektrik transformator, yaitu arus ( $I$ ) dan tegangan ( $V$ ). Termasuk juga dalam transformasi besaran beban ( $Z_1$ ), jika transformator dalam keadaan berbeban. Untuk memudahkan pemahaman awal, diberikan contoh kasus jika semua besaran sekunder di bawa ke sisi primer.

Transformasi besaran sekunder ke sisi primer berturut-turut adalah:

1. nilai tegangan  $V_2' = V_2 \cdot a$
2. nilai tegangan induksi  $E_2' = E_2 \cdot a$ . harga  $E_2' = E_1$
3. nilai arus  $I_2' = I_2 / a$
4. nilai impedansi beban  $Z_1' = Z_1 \cdot a$ .

Untuk total harga tahanan resistansi dan reaktansi ekifalen pada sisi tegangan tinggi, yaitu.

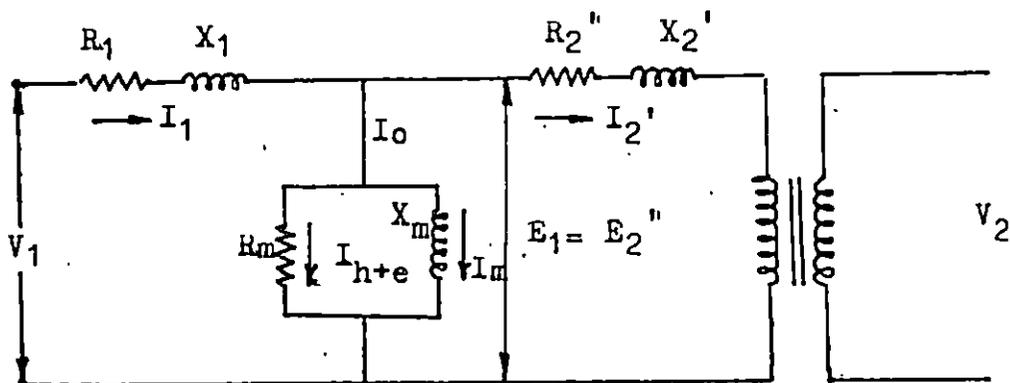
$$R_{eq1} = R_1 + R_2' \quad (28)$$

$$R_{eq1} = R_1 + a^2 \cdot R_2 \quad (29)$$

$$X_{eq1} = X_1 + X_2' \quad (30)$$

$$X_{eq1} = X_1 + a^2 \cdot X_2 \quad (31)$$

Dengan persamaan di atas diperoleh lagi representasi rangkaian kesamaan transformator dengan referensi sisi primer seperti gambar 16 sebagai berikut:



Gambar 16. Representasi Rangkaian Kesamaan Transformator dengan Referensi Sisi Primer

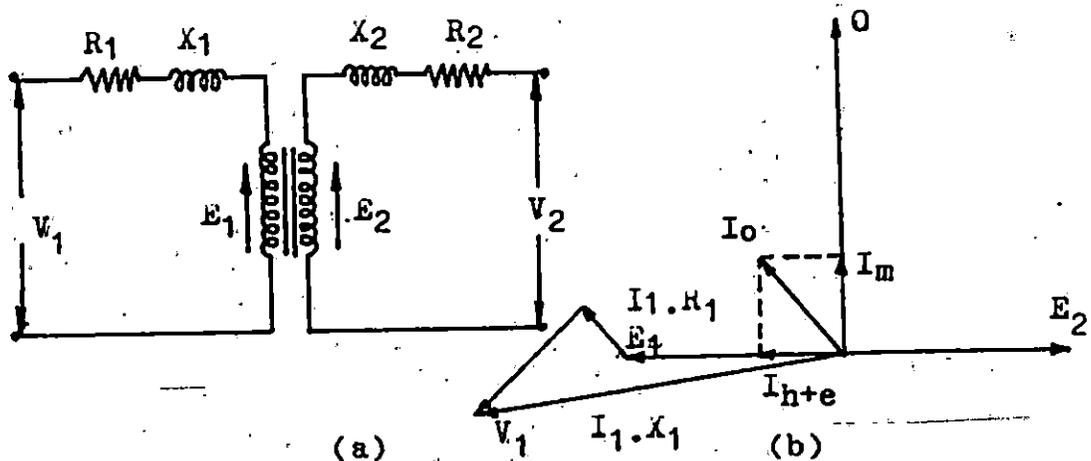
Berdasarkan gambar 16 di atas diperoleh lagi besarnya impedansi ekuivalen transformator dengan sisi tegangan tinggi sebagai referensi:

$$Z_{eq1} = R_{eq1} + jX_{eq1} \quad (32)$$

$$Z_{eq1} = (R_1 + a^2 R_2) + j(X_1 + a^2 X_2) \quad (33)$$

## 2. Rangkaian Kesamaan Beban Nol

Dalam keadaan beban nol, tidak ada arus yang mengalir pada sisi tegangan rendah ( $I_2 = 0$ ). Arus yang mengalir pada sisi tegangan tinggi hanyalah arus beban nol (arus penguatan) sebesar  $I_0$ . Gambar 17 berikut ini menunjukkan diagram transformator beban nol dan vektor diagram transformator dalam keadaan beban nol.



Gambar 17. Kondisi Beban Nol Transformator  
 (a). Rangkaian Kesamaan Beban Nol  
 (b). Vektor Diagram.

Hubungan antara besaran transformator dalam keadaan beban nol dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\overline{V_{o1}} = \overline{I_o} \cdot (R_1 + jX_1) + \overline{E_1} \quad (34)$$

$$\overline{V_{o1}} = \overline{I_o} \cdot Z_1 + \overline{E_1} \quad (35)$$

$$\overline{I_o} = \overline{I_{h+e}} + \overline{I_m} \quad (36)$$

$$= \sqrt{(I_{h+e}^2 + I_m^2)} \quad (37)$$

Keterangan:

$I_o$  = Arus beban nol sisi tegangan tinggi

$V_{o1}$  = Tegangan beban nol sisi primer

$R_1$  = Tahanan belitan sisi primer

$R_2$  = Tahanan belitan sisi sekunder

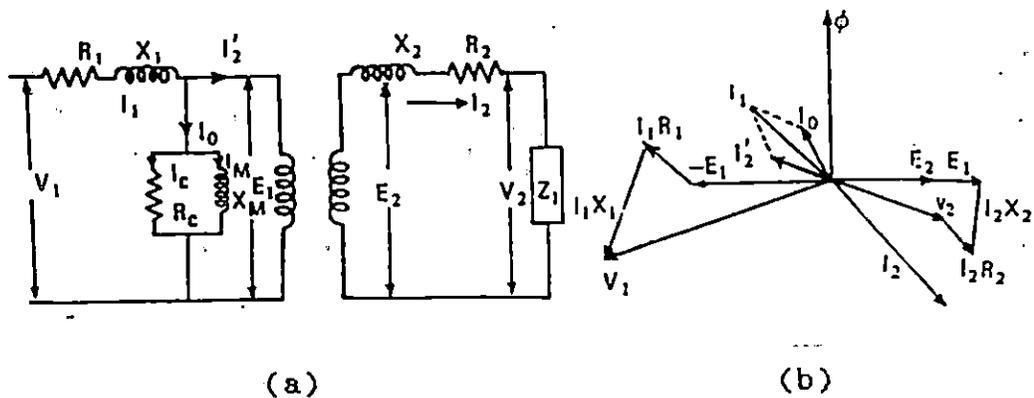
$X_1$  = Tahanan reaktansi belitan primer

$X_2$  = Tahanan reaktansi belitan sekunder.

$Z_1$  = Impedansi belitan sisi primer.

### 3. Rangkaian Kesamaan berbeban

Seperti uraian pada bab sebelumnya bahwa pada keadaan berbeban akan mengalir arus ( $I_2$ ) pada sisi sekunder. Besarnya arus  $I_2$  tidak tetap, sangat tergantung dari besarnya beban yang terpasang pada sisi sekunder. Gambar 18 berikut ini menunjukkan diagram transformator dalam keadaan berbeban.



Gambar 18. Kondisi Transformator Berbeban  
 (a). Rangkaian Kesamaan  
 (b). Vektor Diagram

Menurut gambar 18 di atas dapat diturunkan persamaan tegangan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\vec{V}_1 &= \vec{E}_1 + \vec{I}_1 \cdot (R_1 + jX_1) \\ &= \vec{E}_1 + \vec{I}_1 \cdot R_1 + \vec{I}_1 \cdot jX_1\end{aligned}\quad (38)$$

$$\begin{aligned}\vec{V}_2 &= \vec{E}_2 - \vec{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2) \\ &= \vec{E}_2 - \vec{I}_2 \cdot R_2 + \vec{I}_2 \cdot jX_2\end{aligned}\quad (39)$$

$$\begin{aligned}\vec{E}_2 &= \vec{V}_2 + \vec{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2) \\ &= \vec{V}_2 + \vec{I}_2 \cdot R_2 + \vec{I}_2 \cdot jX_2\end{aligned}\quad (40)$$

Harga  $E_1 = a \cdot E_2$ , sehingga diperoleh:

$$\vec{E}_1 = a \cdot (\vec{V}_2 + \vec{I}_2 \cdot R_2 + \vec{I}_2 \cdot jX_2) \quad (41)$$

$$= a \cdot (\vec{I}_2 \cdot Z_1 + \vec{I}_2 \cdot R_2 + \vec{I}_2 \cdot jX_2) \quad (42)$$

Arus primer  $\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + \vec{I}_2'$ , dengan arus  $I_2'$  adalah arus yang mesti ada pada sisi tegangan tinggi akibat mengalirnya arus  $I_2$  pada sisi sekunder. Oleh karena besarnya arus beban nol ( $I_0$ ) cukup kecil dan dapat diabaikan, maka persamaan arus dapat dituliskan menjadi:

$$\begin{aligned}I_1 &= I_2' \\ \frac{I_2}{I_1} &= \frac{N_1}{N_2} = a\end{aligned}\quad (43)$$

Atau:

$$\frac{I_2}{I_2'} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$I_2 = a \cdot I_2' \quad (44)$$

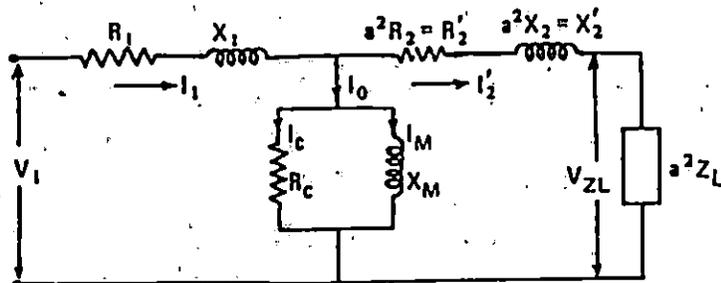
Selanjutnya persamaan tegangan transformator pada sisi primer kembali dapat dituliskan menjadi:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= a \cdot (a \cdot \vec{I}_2' \cdot Z_1 + a \cdot \vec{I}_2' \cdot R_2 + a \cdot \vec{I}_2' \cdot jX_2) \\ &= a^2 \cdot \vec{I}_2' \cdot Z_1 + a^2 \cdot \vec{I}_2' \cdot R_2 + a^2 \cdot \vec{I}_2' \cdot jX_2 \\ &= a^2 \cdot \vec{I}_2' \cdot (Z_1 + Z_2) \end{aligned} \quad (45)$$

Sehingga nilai tegangan primer  $V_1$  menjadi:

$$\begin{aligned} \vec{V}_1 &= a^2 \cdot \vec{I}_2' \cdot Z_1 + a^2 \cdot \vec{I}_2' \cdot R_2 + a^2 \cdot \vec{I}_2' \cdot jX_2 + \vec{I}_1 \cdot R_1 + \vec{I}_1 \cdot jX_1 \\ &= a^2 \cdot \vec{I}_2' \cdot (Z_1 + Z_2) + \vec{I}_1 \cdot Z_1 \end{aligned} \quad (46)$$

Persamaan tegangan primer di atas mengandung pengertian bahwa, jika parameter rangkaian sekunder ditransformasikan pada sisi primer, atau dinyatakan dalam besaran primer, mesti dikali dengan faktor  $a^2$ . Penyederhanaan persamaan tegangan di atas menghasilkan diagram rangkaian transformator seperti gambar 19 di bawah ini.



Gambar 19. Diagram transformator dengan rangkaian Sekunder dinyatakan dalam besaran primer.

Seperti pada gambar 19, semua besaran sekunder di bawa ke sisi primer dengan menggunakan faktor transformasi  $a^2$ , kecuali nilai tegangan induksi  $E_2$ , arus sekunder  $I_2$  dan tegangan beban  $V_1$  yang hanya menggunakan faktor transformasi  $a$ .

Selanjutnya total impedansi transformator dilihat dari terminal masukan dapat ditulis menjadi:

$$Z = Z_1 + \frac{Z_m.(Z_2' + Z_1')}{Z_m + (Z_2' + Z_1')} \quad (47)$$

dimana :  $Z_2' = R_2' + jX_2'$

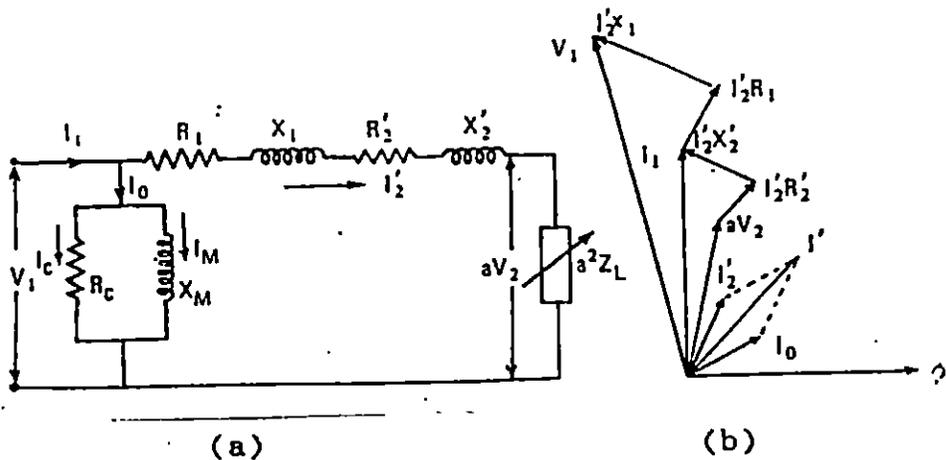
$Z_m$  = impedansi bocor

Dengan demikian diperoleh persamaan tegangan pada sisi masukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_1 &= I_1 \cdot Z \\ &= I_1 \cdot Z_1 + \frac{Z_m.(Z_2' + Z_1')}{Z_m + (Z_2' + Z_1')} \end{aligned} \quad (48)$$

Terhadap diagram rangkaian pada gambar 19 di atas dapat dilakukan penyederhanaan dengan jalan memindahkan rangkaian magnetisasi menjadi tersambung langsung dengan terminal tegangan sumber. Dengan demikian diperoleh besarnya impedansi bocor ( $Z_0$ ) adalah sebesar  $V_1/I_c$ . Tahanan magnetik ( $R_m$ ) sebesar  $V_1/I_c$  dan reaktansi bocor ( $X_m$ ) sebesar  $V_1/I_m$  dapat diperoleh pada keadaan beban nol seperti telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Diagram rangkaian dan vektor diagram untuk faktor kerja tertinggal diperlihatkan pada gambar 20.

Seperti pada gambar 20, terlihat bahwa impedansi  $Z_1$  tersambung seri dengan impedansi sekunder pada sisi primer ( $Z_2'$ ) dan impedansi beban pada sisi primer ( $Z_1'$ ).



Gambar 20. Penyederhanaan rangkaian transformator  
 (a). Diagram rangkaian  
 (b). Vektor diagram untuk pf. tertinggal

Sehingga diperoleh persamaan impedansi rangkaian menjadi:

$$Z = \frac{Z_m \cdot (Z_1 + Z_2' + Z_1')}{Z_m + (Z_1 + Z_2' + Z_1')} \quad (49)$$

Persamaan tegangan pada sisi terminal masukan berubah menjadi:

$$V_1 = I_1 \cdot Z \quad (50)$$

$$= I_1 \cdot \frac{Z_m \cdot (Z_1 + Z_2' + Z_1')}{Z_m + (Z_1 + Z_2' + Z_1')} \quad (51)$$

Penyederhanaan rangkaian kesamaan seperti gambar 20 dapat dilakukan dengan asumsi bahwa dalam keadaan beban nol, arus yang mengalir pada belitan primer cukup kecil, sehingga dapat diabaikan. Dengan demikian dapat diasumsikan bahwa rangkaian magnetik menjadi tersambung langsung dengan tegangan terminal ( $V_1$ ).

#### E. Penggunaan Transformator

Untuk melayani keperluan tertentu dalam sistem tenaga elektrik, kadang-kadang diperlukan rancangan transformator

secara khusus, mengingat fungsi transformator pada kasus tersebut tidak hanya untuk menaikkan tegangan, ataupun menurunkan tegangan saja. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga elektrik memungkinkan pemilihan sistem tegangan yang sesuai dan ekonomis, misalnya untuk kebutuhan tegangan tinggi dalam transmisi daya elektrik, penyaluran daya elektrik kekonsumen dan lain-lain sebagainya.

Penggunaan transformator dalam bidang elektronika, transformator juga berfungsi untuk gandengan impedansi antara sumber dengan beban. Sekaligus berfungsi untuk pemisah antara satu rangkaian dengan rangkaian lainnya sambil menghalangi arus searah dan tetap melewatkan arus bolak-balik.

Ada beberapa jenis transformator khusus yang sering digunakan, terutama dalam bidang sistem tenaga elektrik, yaitu:

1. Transformator daya
2. Transformator distribusi
3. Ototransformator
4. Transformator pengukuran
5. Transformator Las

#### 1. Transformator Daya

Transformator jenis ini umumnya digunakan dalam sistem tenaga elektrik dengan kapasitas besar, misalnya 500 kVA. Penggunaannya terutama pada rangkaian sistem transmisi, yaitu pada sistem gardu induk (GI), dengan fungsi untuk mentransformasikan tegangan dari suatu sistem ke sistem tegangan yang lainnya, sebagai contoh dari 150 kV ke 30 kV.

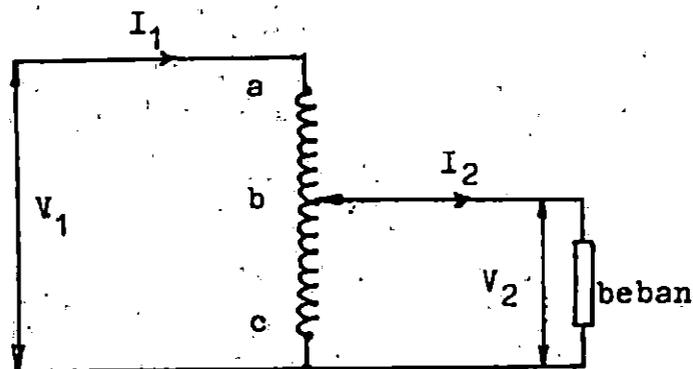
#### 2. Transformator Distribusi

Jenis transformator ini digunakan pada sistem distribusi daya elektrik ke konsumen. Sistem distribusi yang dilayani oleh transformator ini umumnya adalah sistem distribusi sekunder, artinya transformator ini

digunakan untuk pelayanan tenaga elektrik ke konsumen. Sistem tegangan yang dilayani oleh transformator ini berkisar antara 6 kV s.d 30 kV (pada sisi distribusi sekunder) dan 220/380 volt, atau 220/110 volt. Untuk keperluan khusus, misalnya industri kadang-kadang dilayani sistem tegangan 460/380 volt pada sisi konsumen.

### 3. Autotransformator

Transformator jenis ini memang dirancang khusus, dimana belitan primer dan sekunder menjadi satu, seperti terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 21. Autotransformator

Pada gambar 21 di atas, tegangan keluaran autotransformator dapat diatur dengan mengubah posisi pengatur tegangan (dapat secara manual, ataupun secara otomatis). Dilihat dari segi prinsip rangkaian elektrik, mengatur posisi tuas pengatur tegangan berarti mengubah jumlah belitan sekunder aktif terhadap beban.

Seperti terlihat pada gambar 21 di atas, arus primer  $I_1$  akan mengalir jika pada sisi sekunder terpasang beban. Arus tersebut akan terbagi menjadi 2, yaitu arus yang mengalir pada beban  $I_2$  dan arus yang mengalir langsung pada belitan ototransformator  $I_1$ . Besarnya arus  $I_1$  dan  $I_2$  akan sangat tergantung dari besarnya beban dan posisi tuas pengatur tegangan sekunder.

Penggunaan yang lebih luas dari autotransformator terutama pada penstabil tegangan (stabilizer), pengatur

tegangan pada peralatan listrik, bahkan digunakan pada industri secara lebih luas untuk pengasutan (starting) motor-motor listrik.

#### 4. Transformator Pengukuran

Khusus untuk besaran arus bolak-balik, pengukuran besaran elektrik dengan nilai yang relatif besar tidak dapat dilakukan secara langsung, oleh karena batas ukur meter-meter pengukur besaran elektrik umumnya cukup kecil, misalnya volt meter hanya dari 0 - 1000 volt. Berbeda dengan arus searah, terhadap meter pengukur dapat dilakukan penambahan komponen resistor baik yang dipasang secara seri, ataupun paralel terhadap meter. Sehingga besaran elektrik dengan nilai yang cukup besar dapat diukur.

Untuk pengukuran arus bolak-balik dengan nilai ukur yang relatif besar, perlu dirancang khusus transformator ukur. Transformator ukur ini berfungsi sebagai standard ukur dari besaran elektrik bolak balik yang lebih rendah.

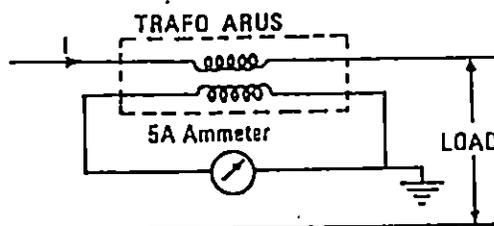
Ada dua jenis transformator ukur yang sering digunakan dalam sistem tenaga elektrik, yaitu transformator arus dan transformator tegangan.

##### a. Transformator arus

Transformator arus biasa dipergunakan untuk bersama-sama dengan amper meter rating rendah untuk mengukur besaran arus pada tegangan tinggi dengan nilai arus yang relatif besar (bahkan sampai ratusan amper).

Transformator ini terdiri dari belitan primer dengan jumlah belitan sedikit dan penampang kawat lilitan yang relatif besar. Sedangkan sisi sekunder dengan belitan yang lebih banyak dan penampang kawat yang lebih halus. Sisi sekunder biasanya dihubungkan langsung dengan amper meter (biasanya dengan range 5 A). Belitan primer dari transformator arus dihubung-

kan seri dengan saluran yang akan diukur, seperti diperlihatkan pada gambar berikut ini.



Gambar 22. Transformator Arus

Kembali pada prinsip dasar transformator bahwa arus berbanding terbalik dengan tegangan, maka pada transformator arus penurunan arus pada sisi sekunder, berarti memperbesar tegangan. Perbandingan belitan yang umum digunakan pada transformator arus adalah 500:5, 100:5, 50:5, 25:5 dan seterusnya. Sebagai contoh, bila perbandingan belitan adalah 50:5, maka pada sisi sekunder terjadi penurunan arus sebesar 10x, namun dari segi tegangan terjadi penaikan tegangan sebesar 1:10. Jadi dengan menggunakan perbandingan belitan, dengan mudah besarnya arus pada sisi primer suatu transformator arus dapat ditentukan dengan cara:

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \times I_2 \quad (52)$$

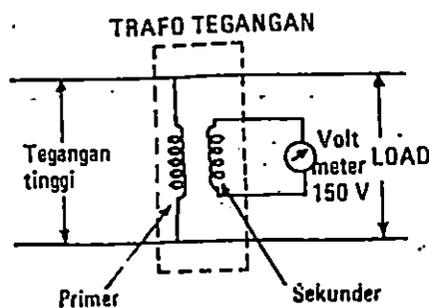
Persamaan di atas hanya berlaku, jika transformator adalah transformator ideal. Dalam arti tidak terdapat kerugian akibat fluksi bocor.

Perlu ditambahkan, bahwa jika terhadap saluran tidak dilakukan pengukuran, maka sisi sekunder harus dalam keadaan tertutup (hubung singkat dapat dilakukan dengan sebuah sakelar). Hubung singkat pada sisi tegangan rendah sangat penting artinya, oleh karena jika sisi sekunder terbuka, maka Ggm sisi sekunder ( $I_2 \cdot N_2$ ) akan sama dengan nol. Akibatnya Ggm

primer ( $I_1.N_1$ ) yang sangat besar tidak dikompensasi, sehingga mengakibatkan inti transformator menjadi panas. Akhirnya dapat menyebabkan isolasi belitan transformator terbakar.

b. Transformator tegangan

Transformator tegangan yang digunakan untuk transformator ukur pada umumnya adalah transformator penurun tegangan (step down transformer). Dengan demikian tegangan pada sisi primer dengan nilai sampai ratusan kV dapat diukur pada sisi sekunder dengan volt meter dengan skala ukur yang relatif kecil (biasanya 150 sampai 300 volt).



Gambar 23. Transformator Tegangan

Prinsipnya masih sama dengan transformator biasa, yaitu dengan menggunakan persamaan:

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

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} \times V_2 \quad (53)$$

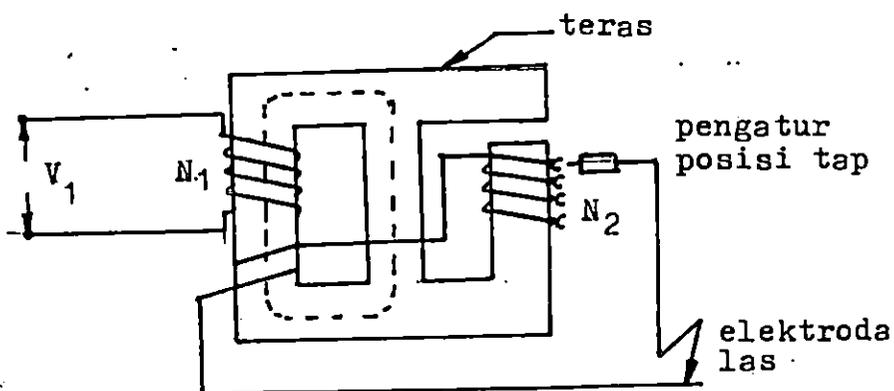
Berdasarkan persamaan di atas, jika perbandingan belitan transformator diketahui dan tegangan pada sisi sekunder diukur melalui volt meter, maka besarnya tegangan pada sisi tegangan tinggi (primer) dapat langsung diketahui. Biasanya alat ukur volt meter

yang digunakan telah dikalibrasi sedemikian rupa, sehingga penunjukkan volt meter telah langsung menunjukkan nilai sebenarnya dari tegangan pada sisi tegangan tinggi.

Berbeda dengan transformator arus, pada sisi tegangan rendah suatu transformator tegangan sangat dihindari terjadinya hubung singkat. Hubung singkat pada sisi sekunder transformator tegangan justru menyebabkan Ggm sekunder ( $I_2 \cdot N_2$ ) menjadi besar, sekaligus menyebabkan Ggm primer ( $I_1 \cdot N_1$ ) juga menjadi besar, karena besarnya arus primer hanya ditentukan oleh besarnya beban yang terpasang. Kondisi ini jelas akan dapat merusak belitan transformator, bahkan dapat menyebabkan transformator terbakar.

#### 5. Transformator Las

Transformator Las merupakan salah satu jenis transformator yang dirancang khusus untuk bekerja dengan arus yang sangat besar (bahkan sampai 1000 amper) dan tegangan yang relatif kecil (bisa sampai dengan 30 volt). Suatu model transformator Las dengan pengaturan reaktansi melalui tap diperlihatkan pada gambar 24 di bawah ini.



Gambar 24. Transformator Las dengan Pengaturan Reaktansi Melalui Pengaturan Tap.

Pengaturan besarnya arus pada sekunder suatu transformator las dapat dilakukan dengan cara menam-

bahkan rangkaian reaktansi seri pada belitan sekunder. Pengaturan reaktansi sekunder dapat dilakukan dengan menggunakan tap (titik-titik tegangan yang berbeda), atau dengan mengatur besarnya fluksi magnet yang mengalir pada inti.

Khusus pada transformator las diperlukan karakteristik tegangan sekunder yang sangat curam. Artinya pada waktu transformator beroperasi, tegangan sekunder (hubung singkat) melalui benda dan batang las harus cukup kecil.

#### F. Regulasi Tegangan

Regulasi tegangan (voltage drop) didefinisikan sebagai perbedaan antara besarnya tegangan beban nol ( $V_0$ ) dengan tegangan beban penuh ( $V_1$ ).

Pernyataan di atas menimbulkan pertanyaan, mengapa terjadi perbedaan tegangan tersebut? Penjelasannya dapat dijelaskan berdasarkan uraian pada bagian sebelumnya bahwa penambahan beban transformator menyebabkan bertambah besarnya arus sekunder ( $I_2$ ). Pertambahan nilai  $I_2$  akan menyebabkan jatuh tegangan pada belitan sekunder ( $I_2 \cdot Z_2$ ) juga menjadi lebih besar. Dengan asumsi bahwa tegangan induksi sekunder  $E_2$  tetap, maka jelaslah bahwa penambahan beban transformator akan menyebabkan berkurangnya tegangan klem ( $V_2$ ).

Untuk transformator, nilai regulasi tegangan ( $V_r$ ) dapat dilihat pada sisi tegangan tinggi, ataupun pada sisi tegangan rendah. Besarnya  $V_r$  juga dapat dinyatakan dalam satuan per unit (pu) atau dalam persentase (%). Jika dilihat pada sisi tegangan rendah, besarnya regulasi tegangan dinyatakan dalam bentuk persamaan dinyatakan sebagai:

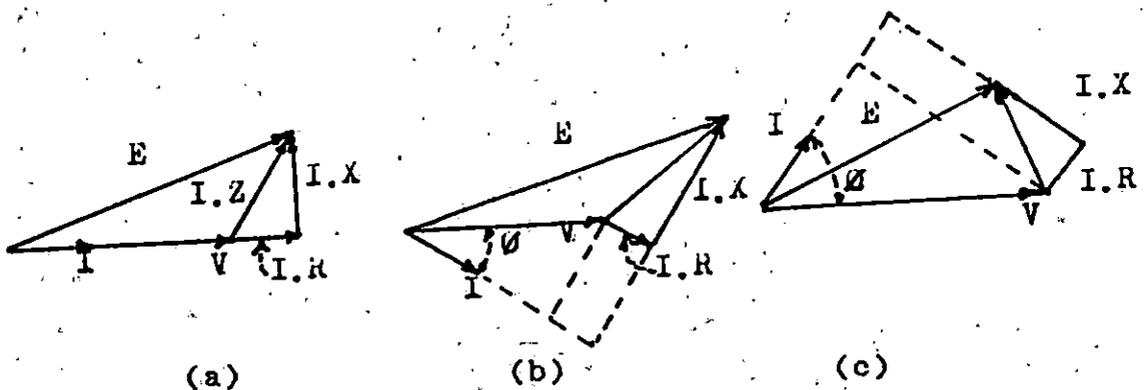
$$V_r = \frac{V_{02} - V_2}{V_{02}} \quad \text{pu} \quad (54)$$

Atau dalam bentuk persentase dinyatakan sebagai:

$$V_r = \frac{V_{o2} - V_2}{V_{o2}} \times 100 \% \quad (55)$$

Persamaan di atas juga menunjukkan bahwa dalam pengoperasian suatu transformator, nilai  $V_r$  tidak tetap dan sangat tergantung dari besarnya beban dan faktor kerja beban ( $\cos\phi$ ). Biasanya nilai  $V_r$  suatu transformator ditentukan pada waktu beban penuh (full load).

Gambar 25 di bawah ini memperlihatkan bagaimana nilai  $V_r$  dipengaruhi oleh faktor kerja beban. Kemungkinan nilai faktor kerja adalah sama dengan 1,0, kecil atau sama dengan 1,0 dan tertinggal, serta kecil atau sama dengan 1,0 dan mendahului.



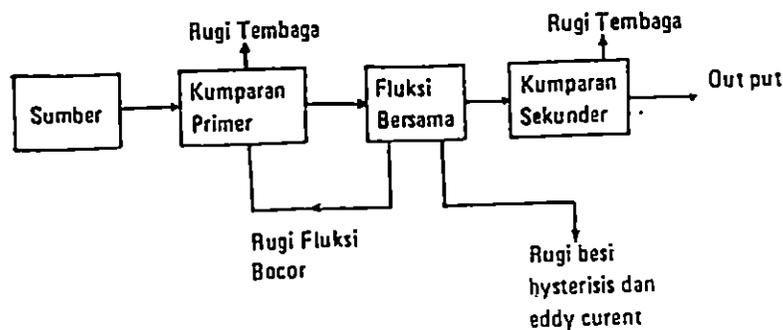
Gambar 25. Jenis Pembeban Transformator  
 (a). Beban resistif  
 (b). Beban induktif  
 (c). Beban kapasitif.

Pada diagram gambar 25(a), arus sefasa dengan tegangan sekunder (faktor kerja =1.0 atau unity power factor). Kemudian pada diagram gambar 25(b), vektor arus tertinggal dari vektor tegangan sebesar ( $\phi$ ). Sedangkan pada diagram gambar 25(c), vektor arus mendahului vektor tegangan sebesar ( $\phi$ ). Untuk setiap kondisi di atas, nilai jatuh tegangan  $I_2.Ze_2$  harus lebih kecil dari tegangan beban  $V_2$ . Nilai  $V_r$  untuk diagram (a) dan (b) adalah positif, sedangkan pada diagram (c) adalah negatif.

### G. Rugi-rugi dan Efisiensi

Seperti telah dijelaskan pada bagian terdahulu bahwa terdapat 2 belitan belitan/ kumparan transformator. Belitan ini terdiri dari belitan tegangan tinggi dan belitan tegangan rendah. Terdapat 2 besaran elektrik yang cukup berpengaruh terhadap pengoperasi transformator, yaitu tahanan resistansi ( $R_1$  dan  $R_2$ ) dan tahanan reaktansi induktif ( $X_1$  dan  $X_2$ ). Jika transformator dihubungkan dengan sumber tegangan, maka akan timbul kerugian-kerugian. Kerugian-kerugian tersebut jelas akan mempengaruhi rendemen (efisiensi) dari transformator.

Adapun kerugian-kerugian tersebut adalah kerugian tembaga ( $P_{cu}$ ) dan kerugian inti ( $P_i$ ). Dengan adanya kerugian tersebut, model blok diagram aliran daya elektrik dari suatu transformator dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 26. Blok Diagram Aliran Daya Elektrik Transformator

Gambar di atas juga memperlihatkan bahwa rugi inti ( $P_i$ ) besarnya tetap, tidak tergantung dari besarnya beban. Sementara rugi tembaga ( $P_{cu}$ ) terjadi pada ke dua sisi transformator, baik pada sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah. Praktisnya rugi tembaga total adalah jumlah dari kedua rugi tembaga dari masing-masing belitan.

Besarnya rugi tembaga, baik pada sisi tegangan tinggi, ataupun pada sisi tegangan rendah tidak tetap, sangat tergantung dari besarnya beban yang dihubungkan pada transformator. Berarti juga bahwa besarnya efisiensi transforma-

tor tidak tetap, sangat tergantung dari besarnya beban terpasang.

### 1. Rugi Tembaga (Pcu)

Bila transformator (transformator 1 fasa ataupun 3 fasa), dibebani selalu timbul kerugian pada belitan, baik pada belitan tegangan tinggi ataupun pada belitan tegangan rendah. Kerugian ini timbul akibat mengalirnya arus listrik pada ke dua belitan transformator. Besarnya kerugian tembaga dari suatu transformator dapat ditentukan dari data hasil pengujian hubung singkat. Jika arus yang mengalir pada rangkaian transformator yang dihubung singkat sebesar  $I_{hs}$  dan tahanan ekivalen transformator sebesar  $R_{eq}$ , maka besarnya rugi tembaga untuk satu fasa adalah:

$$P_{hs} = I_{hs}^2 \cdot R_{eq} \quad \text{watt} \quad (56)$$

$$\begin{aligned} R_{eq} &= R_1 + R_2' \\ &= R_1 + a^2 \cdot R_2 \end{aligned} \quad (57)$$

Oleh karena belitan transformator dianggap seimbang dan transformator dibebani dengan seimbang, maka besarnya kerugian tembaga untuk transformator 3 fasa adalah:

$$P_{hs(3\phi)} = 3 \cdot I_{hs}^2 \cdot R_{eq} \quad \text{watt} \quad (58)$$

Jika beban transformator tidak seimbang, maka besarnya rugi tembaga total untuk transformator 3 fasa adalah jumlah dari rugi tembaga setiap fasa.

Perlu diingat, baik untuk transformator 1 fasa, maupun 3 fasa, besarnya rugi tembaga (Pcu) selama operasi transformator tidak tetap. Nilainya akan sangat dipengaruhi oleh besarnya arus yang mengalir pada belitan transformator.

## 2. Rugi Inti

Rugi inti ( $P_i$ ) terdiri dari:

- a. Rugi hysteresis, yaitu kerugian yang diakibatkan mengalirnya fluksi bolak-balik pada inti transformator baik dalam keadaan beban nol, ataupun dalam keadaan berbeban dan disimbolkan dengan ( $P_h$ ).
- b. Rugi Arus pusar (eddy current), yaitu kerugian yang diakibatkan adanya arus pusar yang timbul pada inti dan disimbolkan dengan  $P_e$ .

Berdasarkan penyelidikan di laboratorium, besarnya kerugian masing-masing dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut:

$$\begin{aligned} P_h &= f \cdot V \cdot B_{\max}^a \cdot 10^{-7} && \text{watt} && (59) \\ &= K_h \cdot f \cdot B_{\max}^a && \text{watt} \end{aligned}$$

Nilai  $K_h$  untuk persamaan di atas adalah:

$$K_h = V \cdot 10^{-7}$$

Sedangkan untuk kerugian arus pusar ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} P_e &= (2/6 \cdot 10^6) \cdot V^2 \cdot f^2 \cdot B_{\max}^a \cdot t^2 && \text{watt} && (60) \\ &= K_e \cdot f^2 \cdot B_{\max}^a \end{aligned}$$

Nilai  $K_e$  untuk persamaan di atas adalah:

$$K_e = (2/6 \cdot 10^6) \cdot V^2 \cdot t^2$$

Keterangan:

$V$  = Volume inti

$t$  = Tebal lapisan inti

$B_{\max}$  = Kerapatan fluksi maksimum

$f$  = frekuensi

$a$  = konstanta jenis dari teras transformator antara 1,5 sampai 1,7.

Dari persamaan di atas ternyata bahwa besarnya kerugian inti akan bernilai tetap, jika frekuensi tegangan sumber yang dihubungkan pada transformator juga tetap.

### 3. Efisiensi

Besarnya efisiensi suatu transformator dapat ditentukan dengan mudah dengan menggunakan perbandingan antara daya keluaran ( $P_{out}$ ) dan daya elektrik masukan ( $P_{in}$ ). Besarnya efisiensi dapat dinyatakan dalam satuan per unit (pu) atau dalam persentase (%), dan dalam persamaan ditulis sebagai:

$$Eff = P_{out}/P_{in} \quad (pu) \quad (61)$$

$$= P_{out}/P_{in} \times 100 \% \quad (\%) \quad (62)$$

Persamaan di atas ternyata hanya dapat digunakan untuk perhitungan-perhitungan kasar. Oleh karena bagaimanapun besarnya daya masukan transformator akan sangat dipengaruhi oleh besarnya kerugian (losses) yang timbul, terutama sekali jika besarnya beban terpasang tetap. Jadi untuk menentukan efisiensi transformator akan lebih baik dimulai dengan menentukan besarnya kerugian-kerugian terlebih dahulu, baru kemudian menentukan besarnya efisiensi. Dalam bentuk persamaan dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned} Eff &= \frac{P_{out}}{P_{out} + \text{Rugi-rugi}} \\ &= \frac{P_{out}}{P_{out} + P_i + P_{cu}} \end{aligned} \quad (63)$$

Atau:

$$\begin{aligned} Eff &= \frac{P_{in} - \text{Rugi-rugi}}{P_{in}} \\ &= 1 - \frac{\text{Rugi-rugi}}{P_{in}} \end{aligned} \quad (64)$$

Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa besar rugi inti ( $P_i$ ) dapat ditentukan melalui percobaan beban nol dan besarnya rugi tembaga ( $P_{cu}$ ) dapat ditentukan dari hasil percobaan hubung singkat.

#### 4. Efisiensi maksimum

Analisis ini cukup penting dalam pengoperasian suatu transformator, oleh karena sangat penting ditentukan titik pembebanan yang paling baik, dimana pada saat tersebut diperoleh nilai maksimum dari efisiensi penggunaan transformator. Analisis untuk menentukan efisiensi maksimum dapat ditentukan pada salah satu sisi dari transformator, dalam hal ini akan ditentukan dari sisi tegangan tinggi. Urutan analisis dimulai dengan asumsi bahwa rugi Cu primer dan sekunder dianggap sama dan besarnya rugi inti ( $P_i$ ) adalah tetap.

$$\begin{aligned} \text{Rugi tembaga} &= I_1^2 \cdot R_{1eq} \\ &= I_2^2 \cdot R_{2eq} \end{aligned} \quad (85)$$

$$\text{Rugi inti} = P_h + P_e \quad (86)$$

Bila daya elektrik masukkan pada sisi tegangan tinggi sebesar  $V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1$ , maka:

$$\text{Eff} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1 - \text{Rugi-rugi}}{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1} \quad (87)$$

$$= \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1 - I_1^2 \cdot R_{1eq} - P_i}{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1} \quad (88)$$

$$= 1 - \frac{I_1^2 \cdot R_{1eq}}{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1} - \frac{P_i}{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1} \quad (89)$$

Agar supaya efisiensi mempunyai harga maksimum, maka harga  $d\eta/dI_1 = 0$ , sehingga:

$$\begin{aligned} \frac{d\eta}{dI_1} &= 0 - \frac{R_{1eq}}{V_1 \cdot \cos\phi_1} - \frac{P_i}{V_1 \cdot I_1^2 \cdot \cos\phi_1} = 0 \\ \frac{R_{1eq}}{V_1 \cdot \cos\phi_1} &= \frac{P_i}{V_1 \cdot I_1^2 \cdot \cos\phi_1} \end{aligned}$$

Atau:

$$P_i = I_1^2 \cdot R_{1eq} \text{ atau } I_2^2 \cdot R_{2eq} \quad (90)$$

Jadi dapat diterima bahwa harga efisiensi menjadi maksimum pada waktu besarnya rugi inti ( $P_i$ ) sama dengan besarnya rugi tembaga ( $P_{ou}$ ).

Contoh-contoh Soal:

1. Suatu transformator 50 kVA; 4400/220 volt mempunyai tahanan primer dan reaktansi primer masing-masing 3,4 dan 5,4 ohm.

Tahanan dan reaktansi sekunder masing-masing 0,0085 ohm dan 0,014 ohm.

Tentukan:

- Tahanan ekivalen dilihat dari primer
- Tahanan ekivalen dilihat dari sekunder
- Reaktansi ekivalen dilihat dari primer
- Reaktansi ekivalen dilihat dari sekunder
- Impedansi ekivalen
- Besarnya rugi tembaga.

Penyelesaian:

$$R_1 = 3,4 \text{ ohm} ; R_2 = 0,0085 \text{ ohm}$$

$$X_1 = 5,4 \text{ ohm} ; X_2 = 0,014 \text{ ohm}$$

a. Dilihat dari primer, maka:

$$\begin{aligned} R_{eq1} &= R_1 + \left[ \frac{N_1}{N_2} \right]^2 \cdot R_2 \\ &= 3,4 + (4400/220)^2 \cdot (0,0085) = 6,85 \text{ ohm.} \end{aligned}$$

b. Dilihat dari sekunder:

$$\begin{aligned} R_{eq2} &= R_2 + \left[ \frac{N_2}{N_1} \right]^2 \cdot R_1 \\ &= (0,0085) + (220/4400)^2 \cdot (3,4) = 0,017125 \text{ ohm.} \end{aligned}$$

c. Reaktansi ekivalen dilihat dari primer, maka:

$$X_{eq1} = X_1 + \left[ \frac{N_1}{N_2} \right]^2 \cdot X_2$$

$$= 5,4 + \left[ \frac{4400}{220} \right]^2 \cdot (0,014) = 11 \text{ ohm.}$$

d. Reaktansi dilihat dari sekunder:

$$\begin{aligned} X_{eq2} &= X_2 + \left[ \frac{N_2}{N_1} \right]^2 \cdot X_1 \\ &= (0,014) + \left[ \frac{220}{4400} \right]^2 \cdot (5,4) = 0,0275 \text{ ohm.} \end{aligned}$$

e. Impedansi ekivalen dilihat dari primer:

Dilihat dari primer:

$$\begin{aligned} Z_{eq1} &= \sqrt{(R_{eq1})^2 + (X_{eq1})^2} \\ &= \sqrt{(6,85)^2 + (11)^2} = 12,96 \text{ ohm} \end{aligned}$$

Dilihat dari sekunder:

$$\begin{aligned} Z_{eq2} &= \sqrt{(R_{eq2})^2 + (X_{eq2})^2} \\ &= \sqrt{(0,017125)^2 + (0,0275)^2} = 12,96 \text{ ohm} \end{aligned}$$

d. Arus sekunder beban penuh :

$$\begin{aligned} I_2 &= 50000/220 \\ &= 227,27 \text{ Amper} \end{aligned}$$

Diperoleh rugi tembaga (P<sub>cu</sub>):

$$\begin{aligned} P_{cu} &= (I_2)^2 \cdot R_{eq2} \\ &= (227,27)^2 \cdot (0,017125) \\ &= 884,6 \text{ watt} \end{aligned}$$

2. Suatu transformator 1 fasa 5 kVA; 2200/220 volt; 50 Hz dilakukan pengujian dengan data sebagai berikut:

Test beban nol : 2300 volt ; 0,1 Amper ; pf 0,4

Test hubung singkat : 72 volt ; I nom ; 100 watt

Bila transformator di atas diberi beban sebesar 4,4 kW pada tegangan 2200 volt dan pf 0,9 lagging. Tentukan:

- Daya elektrik input
- Faktor kerja input
- Efisiensi pada beban di atas.
- Tegangan terminal input.

Penyelesaian:

$$a. \text{ Arus nominal (Inom)} = \frac{5000}{2200} = 2,27 \text{ Amper}$$

Impedansi ekivalen sisi primer:

$$Z_{eq1} = \frac{72}{2,27} = 31,7 \text{ ohm}$$

$$R_{eq1} = \frac{100}{(2,27)^2} = 19,4 \text{ ohm}$$

$$X_{eq1} = \sqrt{(31,7)^2 - (19,4)^2} = 25,09 \text{ ohm}$$

Daya tanpa beban:

$$P_i = (2300) \cdot (0,1) \cdot (0,4) = 92 \text{ Watt}$$

Rugi tembaga pada waktu berbeban dihitung dengan cara:

$$I_1 = \frac{4400}{(0,9)(2200)} = 2,22 \text{ Amper}$$

$$R_{cu} = (2,22)^2 \cdot (19,4) = 95 \text{ Watt}$$

Daya masukkan:

$$P_{in} = 4400 + 92 + 95 \text{ Watt} = 4587 \text{ Watt}$$

Daya reaktif keluaran:

$$Q_{out} = (4400)(\text{Tg} \cdot \text{Cos}^{-1} 0,9) = 2131 \text{ Var}$$

$$\text{Losses} = I_1^2 \cdot X_{eq1} = (2,22)^2 (25,09) = 123 \text{ Var}$$

$$\text{losses Beban nol} = (92)(\text{Tg} \cdot \text{Cos}^{-1} 0,4) = 211 \text{ Var}$$

$$\text{-----}$$

$$Q_{in} = 2464 \text{ Var}$$

Faktor Kerja ( $\text{Cos}\phi$ ) pada sisi primer:

$$\text{Cos}\phi_1 = \text{Cos}(\text{arc} \cdot \text{tg} (Q_{in}/P_{in}))$$

$$= \text{Cos}(\text{arc} \cdot \text{tg} (2464/4587)) = 0,88$$

b. Efisiensi:

$$\text{Eff} = P_{out}/P_{in} \times 100\%$$

$$= 4400/4587 \times 100\% = 96,6\%$$

c. Impedansi sisi primer:

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ &= 19,4 + j25,09 \\ &= 31,71 \angle 52,29^\circ \end{aligned}$$

Diperoleh besarnya tegangan terminal input:

$$\begin{aligned} V_1 &= 2200 + (31,71 \angle 52,29^\circ) \cdot (2,27 \angle -28,35^\circ) \\ &= 2200 + 71,98 \angle 23,9^\circ \\ &= 2200 + 65,5 + j29,16 \\ &= 2266 \angle 0,7^\circ \text{ volt} \end{aligned}$$

Jadi tegangan terminal input adalah 2266 volt.

3. Terhadap suatu transformator distribusi 20 kVA, 2200/200 volt, 50 Hz dilakukan pengujian beban nol (No-Load Test) dan pengujian hubung singkat (Short Circuit Test). Pada pengujian beban nol, meter-meter ditempatkan pada sisi tegangan rendah, sedangkan sisi tegangan tinggi terbuka. Data pengukuran: 148 watt : 4,2 Amper : 220 volt. Pada pengujian hubung singkat, meter-meter ditempatkan pada sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah dihubungkan singkatkan.

Data pengukuran: 360 watt : 10,5 Amper : 86 volt

Tentukan:

- Besarnya rugi inti transformator
- Tahanan ekivalen dilihat dari sisi tegangan tinggi.
- Tahanan ekivalen dilihat dari sisi tegangan rendah.
- Reaktansi ekivalen dilihat dari sisi tegangan tinggi.
- Reaktansi ekivalen dilihat dari sisi tegangan rendah.

Penyelesaian:

- Besarnya rugi inti ( $P_i$ ) ditunjukkan oleh pembacaan watt meter pada pengujian beban nol. Jadi  $P_i = 148$  watt.

$$b. P_{hs} = I_{hs}^2 \cdot R_{eq}$$

$$R_{eq} = \frac{P_{hs}}{I_{hs}^2} = \frac{360}{10,5^2} = 3,26 \text{ ohm.}$$

c. Dengan menggunakan perbandingan:

$$\frac{Req_1}{Req_2} = \left[ \frac{N_1}{N_2} \right]^2 = \frac{3,26}{10^2} = 0,0326 \text{ ohm}$$

d.  $V_{hs} = I_{hs} \cdot Z_{hs}$

$$Z_{hs} = \frac{V_{hs}}{I_{hs}} = \frac{86}{10,5} = 8,19 \text{ ohm.}$$

Reaktansi ekivalen  $X_{eq}$  ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} X_{eq_1} &= \sqrt{(Z_{eq_1}^2 - Req_1^2)} \\ &= \sqrt{(8,19)^2 - (3,26)^2} = 7,51 \text{ ohm.} \end{aligned}$$

e. Reaktansi ekivalen dilihat dari sisi tegangan rendah dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$X_{eq_2} = \left[ \frac{N_2}{N_1} \right]^2 \cdot X_{eq_1} = 7,51/100 = 0,0751 \text{ ohm/}$$

f. Regulasi tegangan dihitung dengan persamaan:

$$V_r = \frac{V_1 \cdot (N_2/N_1) - V_2}{V_2}$$

$$I_2 = 20000/220 = 90,9 \text{ Amper}$$

$$\begin{aligned} V_1 \left[ \frac{N_2}{N_1} \right] &= \sqrt{(V_2 \cdot \cos\phi + I_2 \cdot Req_2)^2 + (V_2 \sin\phi + I_2 \cdot X_2)^2} \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,8 + 90,9 \cdot 0,0326)^2 + (220 \cdot 0,6 + 90,9 \cdot 0,0751)^2} \\ &= 226,49 \text{ volt} \end{aligned}$$

Sehingga nilai regulasi tegangan menjadi:

$$V_r = \frac{226,49 - 220}{220} \times 100 \% = 2,95\%$$

g. Efisiensi pada beban penuh:

$$Eff = \frac{20000 \cdot 0,8}{20000 \cdot 0,8 + P_i + P_{cu}} \times 100\%$$

$$\text{Eff} = \frac{20000 \cdot 0,8}{20000 \cdot 0,8 + 148 + (90,9)^2 \cdot (0,0326)} \times 100\%$$

$$= 97,40 \%$$

Pada waktu 1/2 beban penuh: Arus sekunder 1/2 beban penuh

$$= 90,9/2 = 45,45 \text{ Amper.}$$

$$\text{Eff} = \frac{(1/2) \cdot (16000)}{(1/2) \cdot (16000) + 148 + (45,45)^2 \cdot (0,0326)} \times 100\%$$

$$= 97,36 \%$$

4. Suatu transformator fasa tunggal 10 kVA; 800/400 volt; 50 Hz dengan data pengujian sebagai berikut:

Test beban nol : 200 volt : 1,3 Amper : 1200 Watt

Test hubung singkat: 22 volt : 30 Amper : 200 Watt

Pada pengujian beban nol, meter-meter ditempatkan pada sisi tegangan rendah dan sisi tegangan tinggi terbuka.

Sedangkan pada pengujian hubung singkat meter-meter ditempatkan pada sisi tegangan tinggi, dan sisi tegangan rendah dihubungkan singkatkan.

Tentukan:

- Besarnya arus magnetisasi  $I_0$  dan besarnya arus yang menyatakan rugi besi pada tegangan dan frekuensi kerja normal.
- Regulasi tegangan pada beban penuh dengan  $\text{pf} = 0,8$  lag.
- Beban kVA yang menghasilkan efisiensi maksimum dengan nilai maksimum terjadi pada  $\text{pf} = 1,0$ .

Penyelesaian:

Dari data pengujian beban nol diperoleh:

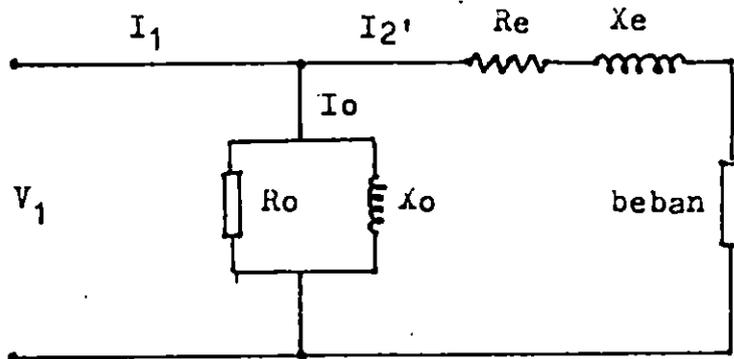
$$R_0 = \frac{V_0^2}{P_0} = \frac{200^2}{120} = 333 \text{ ohm}$$

$$Q_0 = \sqrt{(V_0 \cdot I_0)^2 - P_0^2}$$

$$= \sqrt{(200 \cdot 1,3)^2 - 120^2}$$

$$= 232 \text{ Var.}$$

$$X_o = \frac{V_o^2}{Q_o} = \frac{200^2}{232} = 173 \text{ ohm.}$$



Gambar 27. Untuk penyelesaian soal 4.

Dari hasil pengujian hubung singkat diperoleh:

$$R_{eq} = \frac{P_{hs}}{I_{hs}^2} = \frac{200^2}{30^2} = 0,222 \text{ ohm}$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{hs}}{I_{hs}} = \frac{22}{30} = 0,734 \text{ ohm}$$

$$X_{eq} = \sqrt{(Z_{eq})^2 - (R_{eq})^2} \\ = \sqrt{(0,734)^2 - (0,222)^2} = 0,7 \text{ ohm}$$

Arus magnetisasi:

$$I_q = \frac{V_1}{X_o} = \frac{800}{173} = 4,62 \text{ Amper}$$

Arus rugi besi:

$$I_c = V_t/R_o = 800/333 = 2,4 \text{ amper.}$$

b. Arus beban  $I_2 = 10000/400 = 25 \text{ amper.}$

Jatuh tegangan pada  $Z_{eq} = I_2 \cdot Z_{eq}$

$$= 25 \cdot 0,734 = 18,3 \text{ volt.}$$

$$V_2 = 400 + 18,3 \text{ volt} = 418,3 \text{ volt.}$$

$$V_r = \frac{418,3 - 400}{400} \times 100 \% = 4,57 \%$$

c. Untuk harga  $pf = 1.0$ , maka daya yang diserap beban semuanya menjadi daya efektif yang dapat dimanfaatkan.

Jadi:

$$P_{out} = 10 \text{ kW} = 10000 \text{ Watt.}$$

$$\text{Rugi-rugi tembaga} = I_a^2 \cdot R_{eq} = (25)^2 \cdot 0,222 = 138,5 \text{ watt}$$

$$\text{Rugi-rugi inti} = I_c^2 \cdot R_o = (2,4)^2 \cdot 0,333 = 1860 \text{ watt}$$

---


$$\text{Jumlah} = 1998,5 \text{ watt}$$

$$\text{Besarnya daya masuk total} = 10000 + 1998,5 = 11998,5 \text{ watt}$$

$$\text{Effisiensi} = 10000/11998,5 \times 100 \% = 83,5 \%$$

Effisiensi maksimum terjadi bila rugi inti = rugi tembaga

Jadi untuk efisiensi maksimum, jumlah kerugian adalah:

$$\text{Rugi-rugi} = 1860 + 1860 = 3720 \text{ watt}$$

Besarnya daya masukkan menjadi:

$$P_{in} = 10000 + 3720 = 13720 \text{ watt}$$

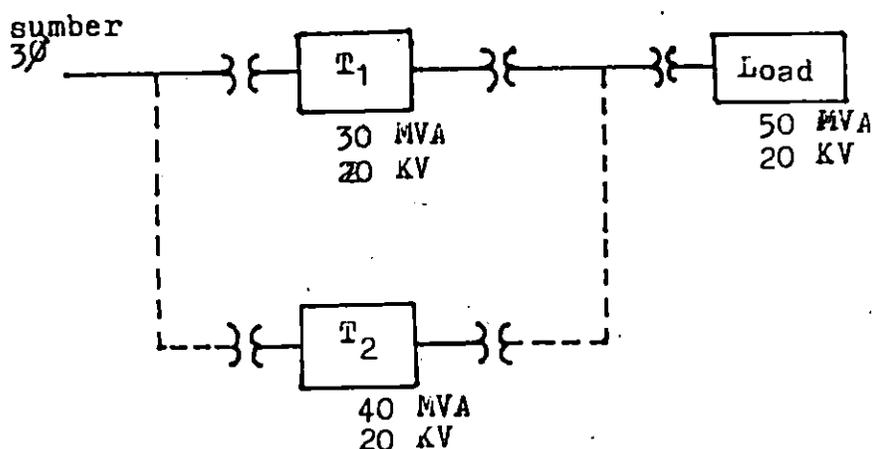
$$\text{Eff}_{maks} = 10000/13720 \times 100 \% = 72,96 \%$$

## BAB IV KERJA PARALEL TRANSFORMATOR

### A. Pengertian

Pengertian kerja jajar atau paralel adalah pengoperasian 2 (dua) atau lebih transformator (baik 1 fasa, maupun 3 fasa) pada suatu sumber yang sama dan sama-sama melayani beban yang sama pula. Kerja paralel sangat penting artinya dan biasa dilakukan orang, terutama untuk melayani penyaluran daya elektrik dengan kapasitas besar. kerja paralel juga bertujuan untuk melayani pekerjaan-pekerjaan perbaikan dalam suatu sistem tenaga elektrik.

Ilustrasi berikut ini memberikan gambaran, betapa pentingnya kerja paralel tersebut dilakukan, terutama untuk mengatasi permasalahan-permasalahan seperti disebutkan di atas.



Gambar 28. Dasar Kerja Paralel Transformator.

Seperti ditunjukkan pada gambar 28 di atas, beban sebesar 50 MVA, tidak akan mungkin dapat dilayani oleh 1 buah transformator dengan kapasitas hanya sebesar 30 MVA. Untuk ini diperlukan tambahan 1 buah transformator lagi, misalnya dengan kapasitas sama atau lebih besar, misal 40 MVA. Dengan demikian kontinuitas penyaluran daya elektrik dapat dilakukan dengan baik.

Pertanyaan yang mungkin timbul adalah apakah suatu transformator akan memikul beban melebihi kapasitas terpasangnya. Kemungkinan lain adalah, apakah transformator dengan kapasitas lebih besar hanya memikul beban jauh lebih kecil dari kapasitasnya. Sedangkan transformator dengan kapasitas lebih kecil akan memikul beban sama atau lebih besar dari kapasitas terpasangnya. Kemungkinan-kemungkinan tersebut jelas tidak diinginkan dan akan sangat berbahaya bagi transformator dengan kapasitas kecil yang justru dibebani melebihi kapasitasnya.

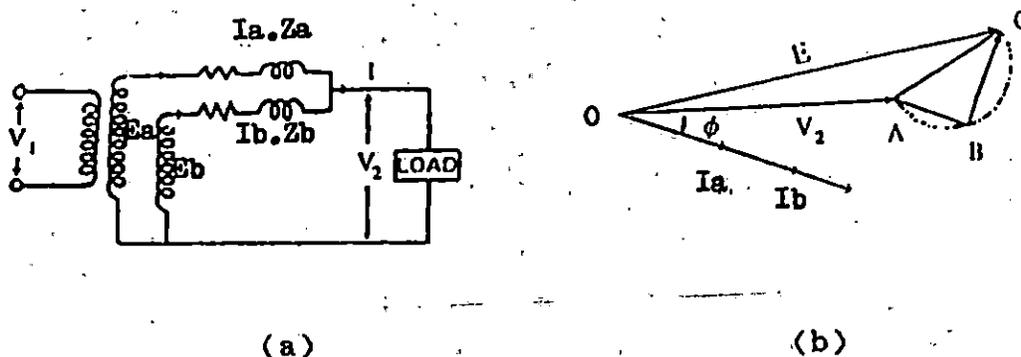
Agar kerja jajar transformator dapat dilakukan dengan baik dan benar, maka persyaratan-persyaratan berikut ini penting untuk diperhatikan.

1. Tegangan kerja sama, baik pada sisi primer ataupun pada sisi sekunder, sekaligus perbandingan belitan kedua transformator sama.
2. Tegangan hubung singkat kedua transformator sebanding.
3. Polaritas kedua transformator harus sama, penyambungan belitan harus memperhatikan arah arus sesaat yang timbul pada sisi primer ataupun pada sisi sekunder.
4. Perbandingan  $R_{eq}/X_{eq}$  diharapkan sama, hal ini bertujuan agar pada waktu bekerja kedua transformator bekerja dengan faktor kerja ( $\cos\phi$ ) yang sama.
5. Frekuensi kerja kedua transformator sama, ini berkaitan dengan besarnya rugi inti yang terjadi pada kedua transformator.
6. Khusus untuk transformator 3 fasa, penyambungan kumparan fasa harus memperhatikan urutan fasa yang benar. Kedua transformator juga diharapkan bekerja dengan sistem angka jam dan kelompok hubungan yang sama. Jadi tidak mungkin transformator dengan hubungan Y-y dijajarkan dengan transformator hubungan Y-d, atau transformator dengan hubungan D-y11 dijajarkan dengan transformator hubungan Y-d5 dan seterusnya.

### B. Kondisi Ideal Kerja Paralel Transformator

Kondisi ideal dimaksudkan adalah jika 2 transformator yang diparalelkan mempunyai perbandingan belitan yang sama dan segitiga tegangan hubung singkat yang sama dalam ukuran dan bentuk.

Suatu contoh kerja paralel ideal diperlihatkan pada gambar 29 berikut ini.



Gambar 29. Kerja Paralel Ideal Transformator  
 (a) Diagram rangkaian sekunder  
 (b) Segitiga tegangan yang sama

Pada gambar 29(b) menunjukkan bentuk segitiga tegangan transformator A dan transformator B yang sama. Terlihat juga bahwa kedua transformator akan bekerja dengan faktor kerja yang sama.

Dengan vektor arus  $I_a$  dan  $I_b$  yang sama dan berimpit dengan vektor arus beban  $I$ , maka persamaan daya elektrik masing-masing transformator dapat diturunkan sebagai berikut:

$$I = I_a + I_b \quad (71)$$

Diperoleh:

$$I_a = I - I_b \quad (72)$$

$$I_b = I - I_a \quad (73)$$

Oleh karena kedua transformator mempunyai tegangan impedansi yang sama, maka:

$$I_a.Z_a = I_b.Z_b \quad (74)$$

Bila harga  $I_a$  diganti dengan  $(I - I_b)$ , diperoleh:

$$(I - I_b).Z_a = I_b.Z_b$$

$$I.Z_a - I_b.Z_a = I_b.Z_b$$

$$\begin{aligned} I.Z_a &= I_b.Z_b + I_b.Z_a \\ &= I_b.(Z_a + Z_b) \end{aligned}$$

$$I_b = \frac{Z_a}{(Z_a + Z_b)} \times I \quad (75)$$

Dengan cara yang sama diperoleh:

$$I_a.Z_a = (I - I_a).Z_b$$

$$I_a.Z_a = I.Z_b - I_a.Z_b$$

$$I_a.Z_a + I_a.Z_b = I.Z_b$$

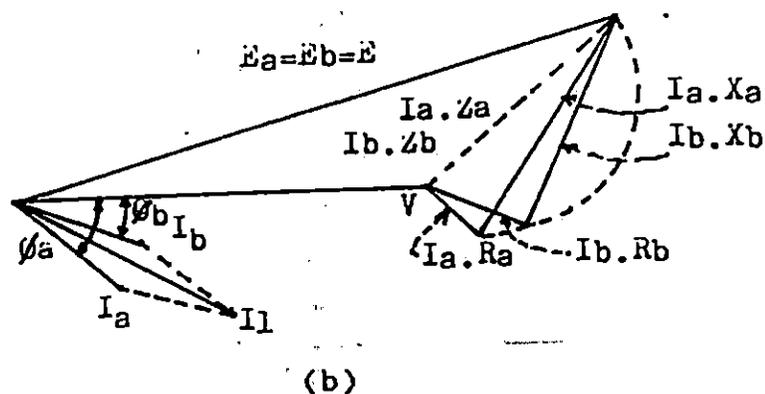
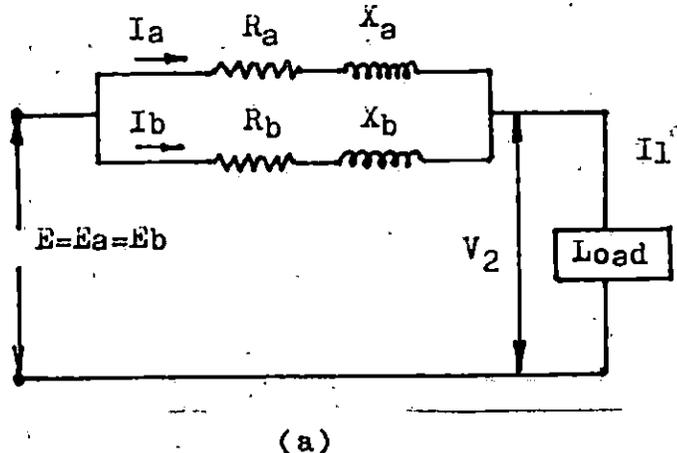
$$I_a.(Z_a + Z_b) = I.Z_b$$

$$I_a = \frac{Z_b}{(Z_a + Z_b)} \times I \quad (76)$$

Persamaan arus ke dua transformator juga menunjukkan bahwa pada beban tetap, besarnya arus masing-masing transformator ditentukan oleh besarnya impedansi setiap transformator

### C. Perbandingan tegangan sama

Keadaan ini didapatkan bila nilai perbandingan  $(V_1/V_2)$  setiap transformator sama. Misalkan jika tegangan beban nol transformator A dan B adalah  $E_a$  dan  $E_b$  dan antara ke tegangan tidak terdapat pergeseran fasa (lihat gambar 30(a). Khusus untuk vektor arus  $I_a$  dan  $I_b$  yang tidak sefasa diperoleh vektor diagram seperti pada gambar 30(b) di bawah ini.



Gambar 30. Transformator dengan Perbandingan tegangan yang sama  
 (a). Diagram rangkaian jajar  
 (b). Diagram vektor.

Keterangan:

- $Z_a, Z_b$  = Impedansi transformator A dan B  
 $I_a, I_b$  = Arus sekunder transformator A dan B  
 $V_2$  = Tegangan terminal  
 $I_l$  = Arus beban

Dari diagram rangkaian seperti gambar 30(a) dapat diturunkan persamaan jatuh tegangan pada masing-masing belitan sekunder.

$$I_a \cdot Z_a = I_b \cdot Z_b = I \cdot (Z_a // Z_b) \quad (77)$$

Besarnya impedansi gabungan belitan sekunder kedua transformator dapat dituliskan sebagai:

$$Z_{ab} = \frac{Z_a \cdot Z_b}{Z_a + Z_b} \quad (78)$$

Selanjutnya dari persamaan:  $I_a \cdot Z_b = I_b \cdot Z_a = I \cdot Z_{ab}$ , diperoleh persamaan arus sekunder masing-masing transformator sebagai berikut:

$$I_a = \frac{I \cdot Z_{ab}}{Z_a} = \frac{Z_b}{(Z_a + Z_b)} \cdot I \quad (79)$$

$$I_b = \frac{I \cdot Z_{ab}}{Z_b} = \frac{Z_a}{(Z_a + Z_b)} \cdot I \quad (80)$$

Jika kedua ruas persamaan arus  $I_a$  dan  $I_b$  di atas dikalikan dengan tegangan beban sebesar  $V$ , diperoleh lagi besarnya kVA yang dilayani oleh masing-masing transformator seperti berikut ini:

$$S_b = \frac{Z_a}{(Z_a + Z_b)} \times S \quad (81)$$

$$S_a = \frac{Z_b}{(Z_a + Z_b)} \times S \quad (82)$$

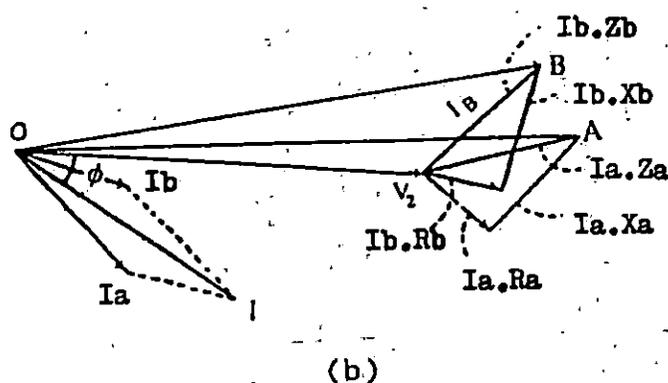
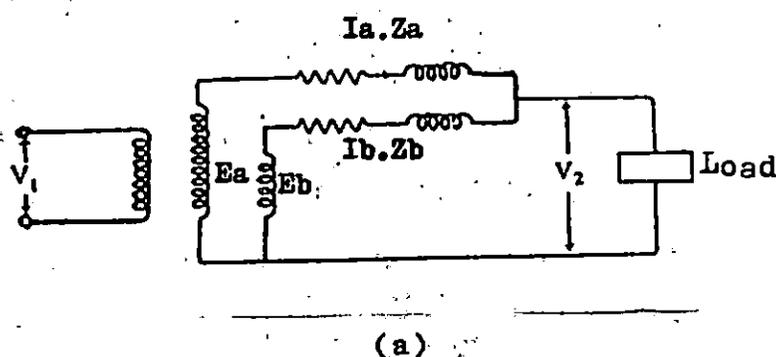
Persamaan daya yang dipikul oleh masing-masing transformator di atas menunjukkan bahwa besarnya kVA yang dilayani oleh setiap transformator dipengaruhi oleh besarnya tegangan impedansi hubung singkat ( $I \cdot Z_{eq}$ ) setiap transformator. Ternyata juga bahwa transformator dengan tegangan hubung singkat lebih besar akan memikul beban kVA yang lebih besar.

#### D. Perbandingan tegangan tidak sama

Penjajaran dua atau lebih transformator dengan perbandingan tegangan (perbandingan transformasi =  $a$ ) yang tidak sama akan menimbulkan beberapa permasalahan, diantaranya menyebabkan besar dan arah vektor tegangan beban nol kedua transformator menjadi tidak sama pula. Demikian

juga dengan vektor arus setiap transformator akan berbeda fasa satu dengan yang lainnya.

Misalkan parameter  $E_a$ ,  $E_b$  dan  $Z$  berturut-turut adalah besarnya tegangan induksi transformator A, tegangan induksi transformator B dan impedansi beban. Diagram rangkaian dan vektor diagram ke dua transformator ditunjukkan pada gambar berikut ini. Berdasarkan gambar di atas terlihat bahwa meskipun tidak ada beban yang terpasang, pada rangkaian tertutup kedua belitan transformator akan tetap mengalir sirkulasi  $I_s$  dengan besar dan arah tertentu. Dalam bentuk persamaan diperlihatkan sebagai berikut:



Gambar 31. Transformator dengan Perbandingan Tegangan yang tidak sama.

(a) Diagram rangkaian

(b) Vektor diagram tegangan.

Untuk pemahaman kasus di atas, misalkan  $E_a$ ,  $E_b$  dan  $Z$ , masing-masing adalah besarnya tegangan sekunder beban nol ( $E_a = E_b$ ), dan impedansi beban. Rangkaian kesamaan dan diagram vektornya diperlihatkan pada gambar 31(b). Dalam

keadaan beban nol, pada rangkaian tertutup impedansi transformator akan menghasilkan arus sirkulasi beban nol ( $I_s$ ), akibat terjadinya perbedaan tegangan  $E_a$  dan  $E_b$ .

Hal tersebut dapat diterima dari persamaan berikut:

$$I_s = \frac{E_a - E_b}{Z_a + Z_b} \quad (83)$$

Jelas jika terdapat perbedaan antara  $E_a$  dan  $E_b$ , arus sirkulasi  $I_s$  akan mempunyai nilai tertentu. Semakin besar perbedaan antara  $E_a$  dan  $E_b$ , maka arus  $I_s$  akan semakin besar pula. Sedangkan arah  $I_s$  dapat bernilai positif (+) ataupun bernilai negatif (-), tergantung dari  $E_a$  dan  $E_b$ .

Persamaan tegangan induksi dan jatuh tegangan (drop tegangan) pada masing-masing impedansi transformator dituliskan sebagai berikut:

$$E_a = I_a \cdot Z_a + V_2 \quad (84)$$

$$E_b = I_b \cdot Z_b + V_2 \quad (85)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= I \cdot Z_1 \\ &= (I_a + I_b) Z_1 \end{aligned} \quad (86)$$

$$E_a = I_a \cdot Z_a + (I_a + I_b) Z_1 \quad (87)$$

$$E_b = I_b \cdot Z_b + (I_a + I_b) Z_1 \quad (88)$$

Jika persamaan  $E_a$  dikurangkan dengan persamaan  $E_b$ , maka diperoleh:

$$E_a - E_b = I_a \cdot Z_a - I_a \cdot Z_b \quad (89)$$

$$I_a = \frac{(E_a - E_b) + I_b \cdot Z_b}{Z_a} \quad (90)$$

Selanjutnya bila harga  $I_a$  pada persamaan di atas disubstitusikan kedalam persamaan  $E_b$ , diperoleh:

$$E_b = I_b \cdot Z_b + \frac{(E_a - E_b) + I_b \cdot Z_b}{Z_a} \cdot Z_a \quad (91)$$

$$I_b = \frac{E_b \cdot Z_a - (E_a - E_b) Z_1}{Z_a \cdot Z_b + Z_1 (Z_a + Z_b)} \quad (92)$$

$$I_a = \frac{E_a \cdot Z_b - (E_a - E_b) Z_1}{Z_a \cdot Z_b + Z_1 (Z_a + Z_b)} \quad (93)$$

Besaran arus primer dapat diperoleh dengan mudah dengan cara memperhitungkan faktor transformasi (a). Bila nilai  $Z_a$  dan  $Z_b$  sangat kecil jika dibandingkan dengan nilai impedansi beban  $Z_1$ , maka persamaan arus di atas dapat lebih disederhanakan menjadi:

$$I_a = \frac{E_a \cdot Z_b}{Z_1 (Z_a + Z_b)} + \frac{E_a - E_b}{Z_a + Z_b} \quad (94)$$

$$I_b = \frac{E_b \cdot Z_a}{Z_1 (Z_a + Z_b)} - \frac{E_a - E_b}{Z_a + Z_b} \quad (95)$$

Persamaan di atas mengandung pengertian bahwa besarnya arus sekunder setiap transformator  $I_a$  dan  $I_b$  akan sangat dipengaruhi oleh perbandingan impedansi, dan perbedaan tegangan induksi beban nol kedua transformator.

Contoh Soal:

1. Dua buah transformator fasa tunggal dengan impedansi ekuivalen (primer dibawa ke sekunder) masing-masing:

$$Z_a = 0,3 + j4 \text{ ohm, dan}$$

$$Z_b = 0,5 + j8 \text{ ohm.}$$

Beban yang terpasang sebesar 100 kWatt dengan pf 0,8 lag.

Tentukan: Distribusi beban yang dipikul masing-masing transformator.

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} Z_a &= 0,3 + j4 \text{ ohm} \\ &= \sqrt{(0,3)^2 + (4)^2} \\ &= 4,01 \angle 95,2^\circ \end{aligned}$$

$$Z_b = 0,5 + j8 \text{ ohm.}$$

$$= \sqrt{(0,5)^2 + (8)^2}$$

$$= 8,01 \angle 96,02^\circ$$

$$Z_a + Z_b = (0,3+j4)+(0,5+j8)$$

$$= 0,8 + j12$$

$$= 12,06 \angle 95,76^\circ$$

$$\text{Beban } P = 100 \text{ kWatt, } \cos\phi = 0,8$$

$$\phi = \arccos(0,8)$$

$$= -36,9^\circ$$

$$S = P/\cos\phi$$

$$= 100/0,8 = 125 \angle -36,9^\circ$$

$$S_A = \frac{Z_b}{Z_a + Z_b} \cdot S$$

$$= \frac{8,01 \angle 96,02^\circ}{12,06 \angle 95,76^\circ} \cdot 125 \angle -36,9^\circ$$

$$= 82,5 \angle -36,64^\circ$$

$$S_B = \frac{Z_a}{Z_a + Z_b} \cdot S$$

$$= \frac{4,01 \angle 95,2^\circ}{12,06 \angle 95,76^\circ} \cdot 125 \angle -36,9^\circ$$

$$= 41,25 \angle -37,46^\circ$$

Dari hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa transformator dengan nilai impedansi besar akan memikul beban yang lebih kecil. Sebaliknya transformator dengan impedansi lebih kecil justru memikul beban lebih besar.

2. Dua buah transformator 1 fasa masing-masing 2200/ 220 volt; 50 Hz diparalelkan untuk melayani beban sebesar 100 kVA,  $\text{pf}=0,85$  lagging. Setiap transformator dioperasikan dengan impedansi berikut ini:

Transformator A = 75 kVA, 1,2% tahanan resistansi  
9,0% tahanan reaktansi.

Transformator B = 50 kVA, 1,1% tahanan resistansi  
6,0% tahanan reaktansi.

Tentukan: Besarnya beban yang dilayani oleh setiap transformator.

Penyelesaian:

Catatan:

Data transformator di atas adalah nilai impedansi untuk kVA yang berbeda. Untuk penyelesaian kasus di atas harus diperhitungkan nilai impedansi (%) untuk kVA yang sama (100 kVA).

Jadi untuk masing-masing transformator diperoleh:

$$\% Z_a = 1,2 + j 9,0 \text{ ohm}$$

$$\begin{aligned} \% Z_b &= 75/50 (1,1 + j6,0) \text{ ohm} \\ &= 1,65 + j9 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_a + Z_b &= (1,2 + j9,0) + (1,65 + j9) \\ &= 2,85 + j 18 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Z_a}{Z_a + Z_b} &= \frac{1,2 + j9,0}{2,85 + j 18} \\ &= \frac{(1,2 + j9,0)(2,85 - j18)}{(2,85 + j 18)(2,85 - j18)} \\ &= \frac{165,46 + j4,05}{(2,85^2 + 18^2)} \\ &= 0,4981 \angle 1,55^\circ. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{Z_b}{Z_a + Z_b} &= \frac{1,65 + j9,0}{2,85 + j 18} \\ &= \frac{(1,65 + j9,0)(2,85 - j18)}{(2,85 + j 18)(2,85 - j18)} \end{aligned}$$

$$= \frac{166,70 + j4,05}{(2,85^2 + 18^2)}$$

$$= 0,502 \angle -1,54^\circ.$$

Bila pf beban = 0,85 lagging,  $\phi = -35,32^\circ$ .

Sehingga diperoleh:

$$S_a = \frac{Z_b}{Z_a + Z_b} \times S_{\text{beban}}$$

$$= (0,502 \angle -1,54^\circ)(100 \angle -35,32^\circ)$$

$$= 50,2 \angle -36,86^\circ.$$

$$S_b = \frac{Z_a}{Z_a + Z_b} \times S_{\text{beban}}$$

$$= (0,4981 \angle 1,55^\circ)(100 \angle -35,32^\circ)$$

$$= 49,81 \angle -33,70^\circ.$$

## BAB V PENGUJIAN TRANSFORMATOR

Unjuk kerja transformator (performance) merupakan hal yang penting untuk diteliti, disamping juga akan sangat bermanfaat untuk menentukan efisiensi suatu transformator. Penampilan yang dimaksud dapat berupa penampilan pada keadaan beban nol, keadaan berbeban, dan keadaan hubung singkat.

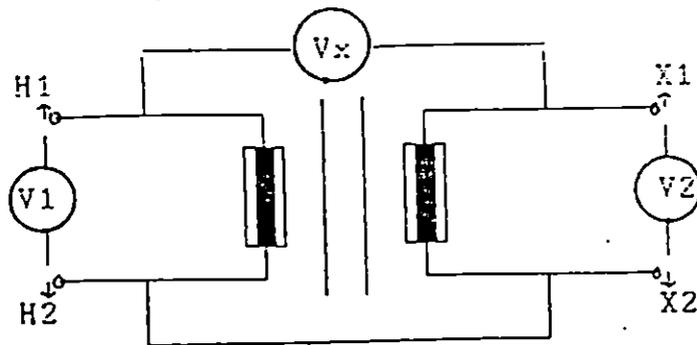
Untuk memperoleh informasi mengenai keadaan tersebut dapat dilakukan melalui beberapa macam model pengujian yang mungkin, yaitu (1) pengujian beban nol (no load test), (2) pengujian berbeban (load test) dan (3) pengujian hubung singkat (short circuit test). Melalui pengujian-pengujian tersebut dapat diperoleh bentuk karakteristik atau watak dari setiap kondisi operasi transformator. Disamping itu informasi yang diperoleh juga dapat digunakan sebagai dasar untuk perencanaan peralatan pengaman (proteksi) transformator pada waktu dioperasikan. Bab ini akan membahas secara berturut-turut setiap jenis pengujian transformator seperti yang dijelaskan di atas. Pada bagian akhir pembahasan akan diberikan beberapa contoh soal yang berhubungan dengan hasil pengujian untuk memperoleh informasi yang lebih jelas mengenai pentingnya pengujian tersebut dilakukan.

### A. Pengujian polaritas

Pengujian polaritas transformator penting dilakukan. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan arah tegangan induksi pada kumparan transformator, baik pada sisi tegangan tinggi (primer) ataupun pada sisi tegangan rendah (sekunder). Penentuan polaritas transformator juga merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi untuk memparalel 2 atau lebih transformator.

Untuk memudahkan cara penentuan polaritas, maka diberi penamaan pada kedua sisi kumparan transformator. Sisi tegangan tinggi dengan  $H_1$  dan  $H_2$ . Sedangkan sisi tegangan

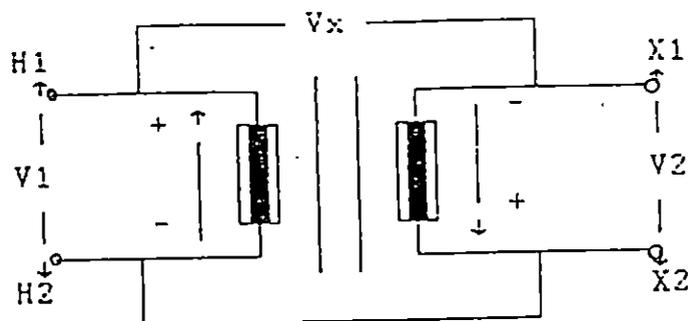
rendah dengan  $X_1$  dan  $X_2$ . Suatu model rangkaian pengujian polaritas transformator diperlihatkan pada gambar 32 di bawah ini.



Gambar 32. Rangkaian Pengujian Polaritas Transformator.

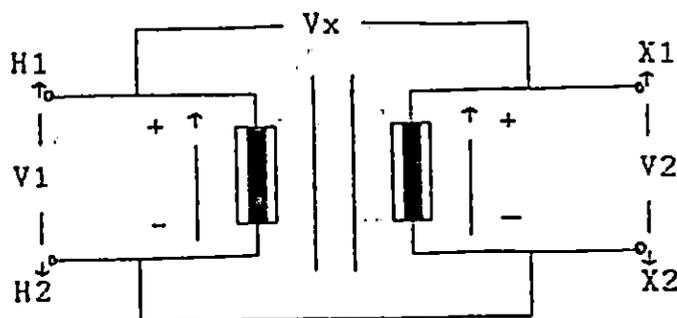
Pengujian polaritas dilakukan dengan cara menghubungkan salah satu sisi tegangan rendah ( $H_2$  dan  $X_2$ ), sedangkan sisi  $H_1$  dan  $X_1$  dihubungkan melalui volt meter. Volt meter sekaligus berfungsi untuk menentukan besarnya tegangan  $V_x$  yang diperoleh terhadap besarnya tegangan  $V_1$ .

Bila nilai tegangan terukur ( $V_x$ ) lebih besar dari tegangan  $V_1$ , maka polaritas transformator yang diperoleh adalah polaritas penjumlahan (additive polarity). Gambar berikut ini juga menunjukkan bahwa, bila terminal  $H_1$  dan  $X_1$  serta  $H_2$  dan  $X_2$  mempunyai polaritas yang berbeda, akan diperoleh polaritas penjumlahan.



Gambar 33. Polaritas Penjumlahan

Terhadap hasil pengukuran pada rangkaian pengujian diperoleh, jika tegangan terukur ( $V_x$ ) lebih kecil dari tegangan terminal  $V_1$ , maka polaritas transformator adalah polaritas pengurangan (subtractive polarity). Pernyataan tersebut juga dapat dijelaskan dengan gambar 34 berikut ini.



Gambar 34. Polaritas Pengurangan.

Berdasarkan gambar 34 di atas dapat disimpulkan bahwa, bila terminal  $H_1$  dan  $X_1$  (+) serta terminal  $H_2$  dan  $X_2$  (-) atau sebaliknya, maka polaritas transformator pada waktu itu adalah polaritas pengurangan.

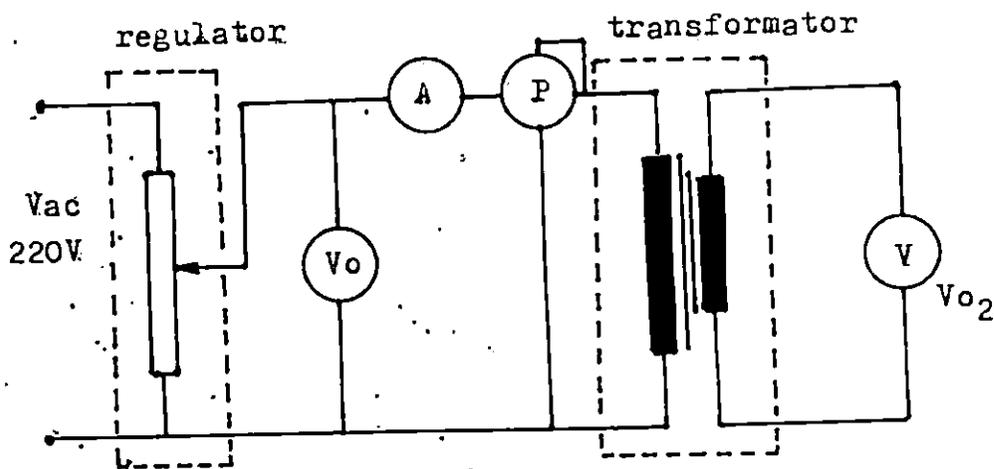
#### B. Pengujian beban nol (No Load Test)

Pengujian yang dilakukan terhadap transformator dalam keadaan beban nol bertujuan untuk menentukan besarnya kerugian inti (magnetic losses) yang bakal timbul sebagai akibat pembebanan transformator. Disamping itu pengujian ini bertujuan untuk menentukan karakteristik beban nol transformator yang terdiri dari karakteristik impedansi, resistansi dan reaktansi bocor transformator.

Pengujian beban nol dilakukan dengan cara mengoperasikan transformator dalam keadaan beban nol. Artinya pada sisi sekunder tidak terdapat beban (baca: arus sekunder sama dengan nol). Sisi kumparan yang dihubungkan pada sumber bisa sisi tegangan tinggi ataupun sisi tegangan rendah. Jika sisi kumparan sekunder dihubungkan pada sumber tegangan, maka semua peralatan ukur (meter-meter ukur)

ditempatkan pada sisi tegangan rendah. Sisi tegangan tinggi dibiarkan dalam keadaan terbuka.

Besaran transformator yang dapat diperoleh dari hasil pengujian beban nol ini adalah beban nol ( $I_0$ ), Daya masukan beban nol ( $P_0$ ), Tegangan masukan beban nol sebesar 1,25x harga tegangan nominal kadang diperlukan untuk mendapatkan informasi yang jelas tentang efek perubahan fluksi pada inti dan efek fluksi bocor pada kumparan-kumparan transformator baik pada sisi tegangan rendah maupun pada sisi tegangan tinggi. Skema rangkaian pengujian beban nol transformator diperlihatkan pada gambar 35 di bawah ini.



Gambar 35. Skema Rangkaian Pengujian Beban Nol Transformator

Seperti pada gambar 35 di atas semua peralatan yang dibutuhkan untuk merecord data pengujian beban nol dipasang pada sisi primer. Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah Volt meter, Amper meter, dan Watt meter. Fungsi masing-masing peralatan adalah:

1. Volt meter, berfungsi untuk mengetahui besarnya tegangan beban nol transformator. Besarnya tegangan ini mesti sama dengan besarnya tegangan nominal transformator.
2. Amper meter, berfungsi untuk menentukan besarnya arus transformator dalam keadaan beban nol. Nilai arus yang

terbaca pada amper meter merupakan besarnya arus magnetisasi ( $I_0$ ).

3. Watt meter, berfungsi untuk mengetahui besarnya daya yang diserap oleh transformator dalam keadaan beban nol. Besarnya daya yang ditunjukkan oleh watt meter sekaligus, merupakan besarnya nilai kerugian inti yang terjadi pada transformator.

Seperti pada gambar 35 di atas, sisi tegangan rendah dibiarkan dalam keadaan terbuka. Berarti pada sisi tegangan rendah tidak mengalir arus sekunder. Selanjutnya tidak akan terjadi pertentangan fluksi utama oleh fluksi sekunder. Sehingga pada sisi primer tidak diperlukan tambahan arus untuk kesetimbangan fluksi di dalam inti transformator. Jadi arus yang akan ditarik dari sumber tegangan hanyalah arus yang dibutuhkan untuk menimbulkan ggm pada inti. Arus ini relatif kecil dan selanjutnya disebut dengan arus beban nol ( $I_0$ ).

Dengan menggunakan data pengujian beban nol dari suatu transformator, selanjutnya diperoleh hubungan, sebagai berikut:

$$W = V_1 \cdot I_0 \cdot \cos\phi_0 \quad (96)$$

$$\cos\phi_0 = W / (V_1 \cdot I_0) \quad (97)$$

$$Z_0 = V_1 / I_0 \quad (98)$$

Selanjutnya dari data di atas dapat ditentukan besaran-besaran sebagai berikut:

$$I_m = I_0 \cdot \sin\phi_0 \quad (99)$$

$$I_w = I_0 \cdot \cos\phi_0 \quad (100)$$

$$X_0 = V_1 / I_m \quad (101)$$

$$R_0 = V_1 / I_w \quad (102)$$

Juga dapat dihitung admitansi penguatan  $Y_0$  adalah:

$$Y_0 = I_0 / V_1 \quad (103)$$

$$I_0 = V_1 \cdot Y_0 \quad (104)$$

Untuk konduktansi penguatan  $G_o$  adalah

$$G_o = W/V_1^2 \quad (105)$$

$$W = G_o \cdot V_1^2 \quad (106)$$

Besarnya nilai susceptansi penguatan  $B_o$  adalah

$$B_o = \sqrt{(Y_o^2 - G_o^2)} \quad (107)$$

### C. Pengujian Hubung Singkat

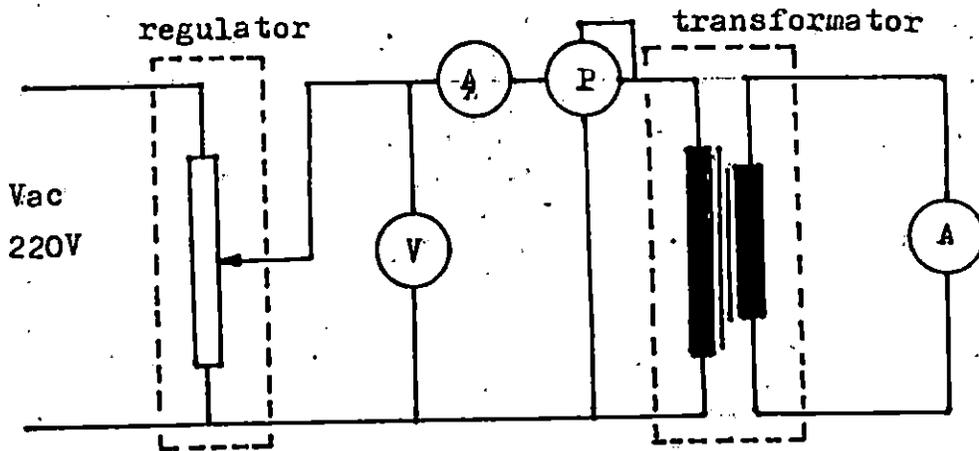
Pengujian transformator dalam keadaan hubung singkat (short circuit) bertujuan untuk menentukan besarnya rugi tembaga ( $P_{cu}$ ), baik kerugian tembaga pada sisi tegangan tinggi ataupun pada sisi tegangan rendah. Disamping itu pengujian ini juga bertujuan untuk menentukan karakteristik transformator dalam keadaan hubung singkat. Karakteristik transformator dalam keadaan hubung singkat yang terpenting adalah  $I_{hs}=f(V_{hs})$ ,  $R_{hs}=f(I_{hs})$ ,  $X_{hs}=f(I_{hs})$ , dan  $Z_{hs}=f(I_{hs})$ .

Secara umum pengujian hubung singkat akan sangat baik digunakan untuk menentukan parameter-parameter transformator hubung singkat, seperti:

1. Impedanse ekifalen ( $Z_{o1}$  dan  $Z_{o2}$ ), reaktansi bocor ( $X_{o1}$  dan  $X_{o2}$ ) dan tahanan  $R_{o1}$  dan  $R_{o2}$  dari transformator dan sebagai patokan adalah kumparan dimana alat ukur diletakkan.
2. Rugi  $Cu$  pada beban penuh, besarnya kerugian ini dipakai untuk menghitung efisiensi transformator.
3. Penentu  $Z_{o1}$  atau  $Z_{o2}$  sehingga jatuh tegangan dalam transformator dapat dihitung dengan patokan dibagian primer atau sekunder.

Dalam test ini salah satu dari sisi kumparan transformator dihubung singkat, umumnya yang dihubung singkat adalah sisi tegangan rendah. Hubung singkat pada sisi tegangan rendah juga dapat dilakukan melalui sebuah amper meter yang sekaligus untuk mengetahui arus hubung singkat pada sisi tegangan rendah. Pemasangan meter-meter penunjuk record data pengujian akan sama halnya yang dilakukan pada test rangkaian terbuka. Amper meter (A) berguna untuk mengetahui arus maksimum ( $I_{hs}$ ), Volt meter untuk mengeta-

hui tegangan hubung singkat ( $V_{hs}$ ). Sedangkan Watt meter ( $W$ ) untuk mengetahui daya yang dipergunakan oleh transformator pada waktu kondisi hubung singkat. Rangkaian sederhana pengujian hubung singkat suatu transformator diperlihatkan pada gambar 36 di bawah ini.



Gambar 36. Rangkaian Pengujian Transformator Hubung Singkat

Berdasarkan data hasil pengujian hubung singkat, selanjutnya dapat ditentukan parameter transformator dalam kondisi hubung singkat, yaitu:

$$Z_{o1} = V_{hs}/I_{hs} \quad (108)$$

$$W = I_{hs}^2 \cdot R_{hs} \quad (109)$$

$$\cos\phi = W/V_{hs} \cdot I_{hs} \quad (110)$$

$$\sin\phi = \text{Arc}^{-1} \cdot \cos\phi \quad (111)$$

$$Z_{hs} = V_{hs}/I_{hs} \quad (112)$$

$$R_{hs} = Z_{hs} \cdot \cos\phi \quad (113)$$

$$X_{hs} = Z_{hs} \cdot \sin\phi \quad (114)$$

Tegangan hubung singkat ( $V_{hs}$ ) merupakan jatuh tegangan pada kumpulan primer dan sekunder. Jika  $R_1$  dapat diukur, misalnya dengan menggunakan pengukur rangkaian jembatan (bridge), ataupun dengan ohm meter dan nilai  $R_{hs}$  telah diketahui maka  $R_2$  dapat ditentukan dari  $R_2 = R_{hs} - R_1$ .

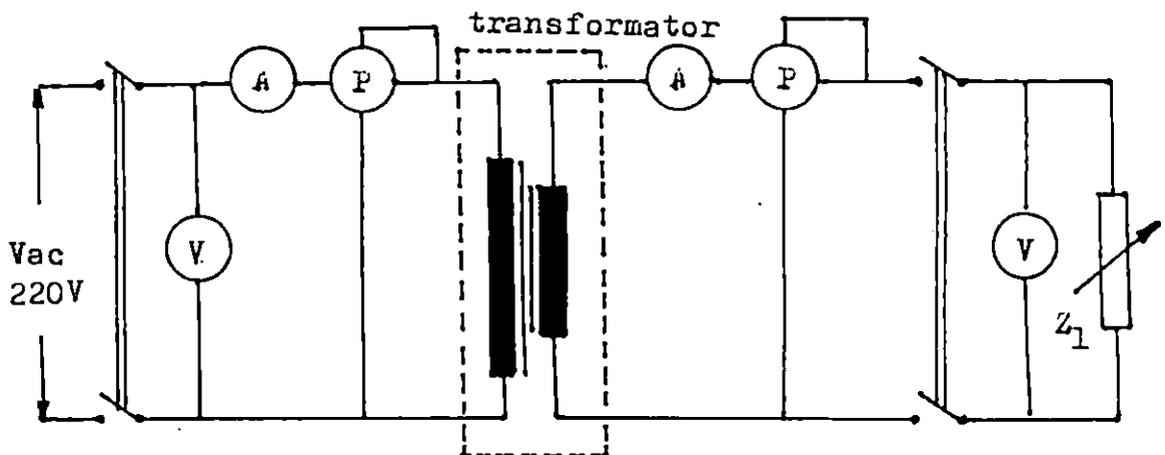
#### D. Pengujian Berbeban

Untuk mengetahui unjuk kerja transformator perlu dilakukan pengujian dalam keadaan berbeban. Beban yang dihubungkan dapat berupa beban resistif ataupun kombinasi beban resistif dan beban reaktif. Variasi dari nilai beban inilah yang selanjutnya digunakan untuk mengetahui unjuk kerja transformator pada kondisi berbeban.

Besaran yang terpenting untuk diketahui pada waktu pengujian berbeban ini terdiri dari besaran pada sisi tegangan tinggi, dan besaran pada sisi tegangan rendah.

Pada sisi tegangan tinggi perlu diketahui besaran-besaran: arus primer ( $I_1$ ), daya masukan primer ( $P_1$ ) dan faktor kerja pada sisi primer ( $\cos\phi_1$ ). Sedangkan pada sisi tegangan rendah diperlukan besaran-besaran: arus sekunder atau arus beban ( $I_2$ ), tegangan beban ( $V_2$ ), daya keluaran transformator ( $P_2$ ) dan faktor kerja ( $\cos\phi_2$ ) pada sisi sekunder. Perlu diingat bahwa pengujian berbeban mesti dilakukan pada nilai tegangan masukan ( $V_1$ ) yang tetap.

Suatu model rangkaian pengujian transformator dalam keadaan berbeban diperlihatkan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 37. Rangkaian Pengujian Transformator Berbeban

Percobaan berbeban dilakukan dengan melakukan variasi perubahan terhadap beban yang terpasang pada sisi tegangan rendah. Selanjutnya dilakukan pengamatan terhadap meter-

meter, baik yang terpasang pada sisi tegangan tinggi, ataupun pada sisi tegangan rendah. Perhitungan yang perlu dilakukan adalah:

1. Menentukan besarnya regulasi tegangan
2. Menentukan besarnya faktor kerja ( $\cos\phi$ ), jika kedua sisi transformator tidak dilengkapi dengan meteran pencatat faktor kerja.
3. Menentukan besarnya efisiensi transformator.

Perlu diperhatikan bahwa besaran yang akan dijadikan patokan adalah hasil perhitungan dengan data pada waktu beban penuh (full load).

Contoh Soal:

- 
1. Hasil pengujian beban nol (no load test) suatu transformator 1 fasa 1 kVA 220/137 volt pada tegangan rating adalah:

$$V_{o1} = 220 \text{ volt}$$

$$I_o = 0,34 \text{ amper}$$

$$P_o = 14 \text{ watt}$$

$$V_{o2} = 142 \text{ volt}$$

Tentukan:

- a. Besarnya rugi inti ( $P_i$ )
- b. Tahanan magnetisasi dan reaktansi bocor
- c. Arus magnetisasi, arus rugi-rugi.

Penyelesaian:

- a. Besarnya rugi inti ( $P_i$ ) transformator = 14 watt

(langsung diperoleh dari pembacaan watt meter).

- b. Impedansi bocor  $Z_o$

$$Z_o = \frac{V_{o1}}{I_o}$$

$$= 220/0,34 = 2200 \text{ ohm}$$

Faktor kerja beban nol  $\cos\phi_o$

$$\begin{aligned}\cos\phi_o &= \frac{P_o}{V_o \cdot I_o} \\ &= \frac{14}{220 \cdot 0,34} = 0,1871\end{aligned}$$

$$\phi_o = 88,01^\circ.$$

$$\sin\phi_o = 0,9823$$

Tahanan magnetisasi  $R_m$

$$R_m = Z_o \cdot \cos\phi_o = 2200 \cdot 0,1871 = 411,62 \text{ ohm.}$$

Reaktansi bocor  $X_o$

$$\begin{aligned}X_o &= \sqrt{(Z_o^2 - R_m^2)} \\ &= \sqrt{(2200^2 - 411,62^2)} \\ &= 2161,14 \text{ ohm.}\end{aligned}$$

c. Arus magnetisasi  $I_m$

$$\begin{aligned}I_m &= I_o \cdot \sin\phi_o \\ &= 0,34 \cdot 0,9823 = 0,3339 \text{ amper.}\end{aligned}$$

Arus rugi-rugi (arus pusar dan histerisis)  $I_{h+e}$

$$\begin{aligned}I_{h+e} &= I_o \cdot \cos\phi_o \\ &= 0,34 \cdot 0,1871 = 0,0636 \text{ amper.}\end{aligned}$$

2. Hasil pengujian hubung singkat (short circuit test) transformator 1 fasa 1 kVA; 220/137 volt pada arus rating adalah:

$$V_{hs} = 30 \text{ volt}$$

$$I_{hs} = 4,55 \text{ amper}$$

$$P_{hs} = 110 \text{ watt}$$

Tentukan:

- Besarnya rugi tembaga ( $P_{cu}$ )
- tahanan ekivalen
- reaktansi ekivalen
- impedansi ekivalen.

Penyelesaian:

a. Besarnya rugi tembaga ( $P_{cu}$ ) = 110 watt (diperoleh langsung dari pembacaan watt meter)..

b. Tahanan ekivalen  $R_{eq}$ .

$$R_{eq} = P_{hs}/I_{hs}^2 = 110/(4,55)^2 = 5,31 \text{ ohm}$$

c. Impedansi ekivalen  $Z_{eq}$

$$Z_{eq} = V_{hs}/I_{hs} = 30/4,55 = 6,5934 \text{ ohm.}$$

d. Reaktansi ekivalen  $X_{eq}$

$$\begin{aligned} X_{eq} &= \sqrt{(Z_{eq}^2 - R_{eq}^2)} \\ &= \sqrt{(6,5934^2 - 5,31^2)} \\ &= 3,9085 \text{ ohm.} \end{aligned}$$

3. Dari hasil pengujian berbeban suatu transformato 1 fasa 1 kVA 220/137 volt diperoleh data sebagai berikut:

$$V_1 = 220 \text{ volt}$$

$$I_1 = 4,5 \text{ amper}$$

$$P_1 = 840 \text{ watt}$$

$$V_2 = 130 \text{ volt}$$

$$I_2 = 7,2 \text{ amper}$$

$$P_2 = 795 \text{ watt}$$

Tentukan:

a. Faktor kerja ( $\cos\phi$ )

b. Efisiensi transformator

c. Regulasi tegangan.

Penyelesaian:

a. Faktor kerja  $\cos\phi$

$$\cos\phi = \frac{P_2}{V_2 \cdot I_2} = \frac{795}{130 \cdot 7,2} = 0,849$$

b. Efisiensi

$$= P_2 / P_1 = 795/840 = 0,9464$$

$$\sim 0,95 = 95\%$$

c. Regulasi tegangan  $V_r$

$$V_r = \frac{V_{o2} - V_2}{V_{o2}}$$

Sejauh ini pembahasan mengenai transformator 1 fasa telah dilakukan secara lengkap, yang mencakup prinsip kerja, konstruksi dan analisis pengoperasian transformator. Termasuk juga beberapa macam pengujian transformator yang umum dilakukan dilaboratorium. Contoh soal yang dikemukakan diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang materi transformator, khususnya transformator 1 fasa. Namun demikian, kiranya pembahasan dalam buku ini akan lebih sempurna, jika dilengkapi dengan penguasaan materi transformator dari berbagai buku referensi lainnya.

Penulis juga menyarankan untuk melengkapi materi ini dengan bacaan yang memuat tentang materi transformator 3 fasa. Sehingga diperoleh gambaran yang lebih lengkap tentang perbedaan dan kesamaan yang terdapat antara transformator 1 fasa dan 3 fasa.

## DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Panjaitan, R. (1989). *Mesin Listrik Arus Bolak Balik*. Tarsito. Bandung.
- Sumanto (1991). *Teori Transformator*. Andi Offset. Yogyakarta.
- Theraja, BL. (1982). *Electrical Technology*. S. Chand & Company, Ltd. New Delhi.
- Warsito, Djoko. (1986). *Teori Transformator*. CV. Baru, Jakarta.
- Zuhail. (1977). *Dasar Teknik Tenaga Listrik*. Institut Teknologi Bandung. Bandung