



BIODATA PENULIS



Ida Bagus Fery Citarsa adalah staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram sejak Tahun 1998. Pendidikan Strata 1 (S-1) di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Malang diselesaikan Tahun 1997. Pendidikan lanjut S-2 di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta diselesaikan pada tahun 2001. Bidang riset yang ditekuni saat ini adalah di bidang Konversi Daya untuk pengembangan Energi terbarukan (Renewable Energy). Dalam 10 tahun terakhir Citarsa telah menghasilkan puluhan jurnal baik Nasional maupun Internasional dan juga prosiding konferensi Internasional.



I Nyoman Wahyu Satiawan adalah staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram sejak Tahun 1998. Pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana (1996). Pendidikan lanjut S2 dan S3 di Liverpool John Moores University-England diselesaikan pada Tahun 2000 dan 2013. Dr. Satiawan, saat ini adalah Ketua Laboratorium Teknik Kendali Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram dan Ketua Kelompok Penelitian *Power Electronics and Drives* Fakultas Teknik, Universitas Mataram sejak Tahun 2013. Bidang riset yang ditekuni adalah di bidang Power Electronic Converters untuk pengembangan

Energi terbarukan dan kendali motor. Dalam 10 tahun terakhir Dr. Satiawan telah menghasilkan, 3 buku, puluhan jurnal baik Nasional maupun Internasional dan juga prosiding konferensi Internasional.

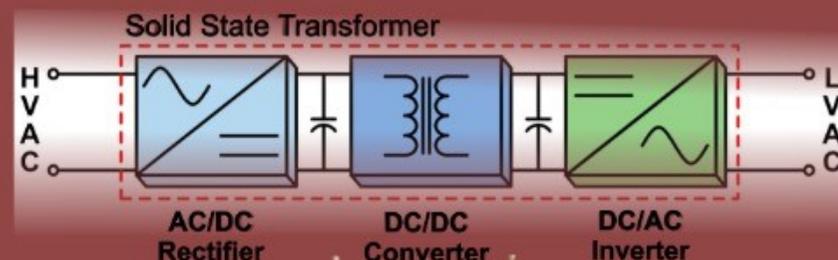


I Made Budi Suksmadana lahir di Denpasar Bali. Menyelesaikan pendidikan sarjana S1 di Teknik Elektro Universitas Udayana tahun 1999 bidang Sistem Tenaga Listrik (STL), pendidikan S2 di Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada tahun 2001 bidang Sistem Komputer dan Informatika (SKI). Sekarang bekerja sebagai dosen di Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram konsentrasi Elektronika. Bidang penelitian yang diminati adalah pengolahan sinyal digital, robotika dan machine learning.

TRANSFORMATOR ELEKTRONIKA
(SOLID STATE TRANSFORMER)

Ida Bagus Fery Citarsa dkk

TRANSFORMATOR ELEKTRONIKA (SOLID STATE TRANSFORMER)



Ida Bagus Fery Citarsa
I nyoman Wahyu Satiawan
I Made Budi Suksmadana



PENERBIT UPT. MATARAM UNIVERSITY PRESS
Jl. Pemuda Nomor 33 Telp. (0370) 633007, Mataram 83125
Email : upt.mataramuniversitypress@gmail.com
Website : <http://uptpress.unram.ac.id/>



.....

TRANSFORMATOR ELEKTRONIKA (SOLID STATE TRANSFORMER)

.....



Mataram University Press

.....

TRANSFORMATOR ELEKTRONIKA (SOLID STATE TRANSFORMER)

.....

PENULIS

**Ida Bagus Fery Citarsa
I Nyoman Wahyu Satiawan
I Made Budi Suksmadana**



Mataram University Press

Judul:

Transformator Elektronik (Solid State Transformer)

Penulis:

Ida Bagus Fery Citarsa
I Nyoman Wahyu Satiawan
I Made Budi Sukmadana

Layout:

Fatia Hijriyanti

Design Sampul:

Tim Mataram University Press

Design Isi:

Fatia Hijriyanti

Penerbit:

Mataram University Press
Jln. Majapahit No. 62 Mataram-NTB
Telp. (0370) 633035, Fax. (0370) 640189, Mobile Phone +6281917431789
e-mail: upt.mataramuniversitypress@gmail.com
website: www.uptpress.unram.ac.id.

Cetakan Pertama, 2022

ISBN: 978-623-5301-01-3

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang memperbanyak, sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk dan dengan cara apapun, tanpa izin penulis dan penerbit.

KATA PENGANTAR

Transformator mempunyai peran yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik yakni untuk menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai dengan kebutuhan. Tegangan dari pembangkit dinaikkan untuk mengurangi rugi-rugi dalam penyaluran tenaga listrik. Sedangkan pada sisi beban tegangan diturunkan lagi untuk keamanan pengguna listrik. Transformator konvensional terdiri dari lilitan primer dan lilitan sekunder yang terhubung secara magnetis. Selain itu terdapat inti besi yang disusun berlapis-lapis. Untuk menjaga temperatur transformator tidak berlebihan digunakan cairan minyak untuk merendam lilitan. Karena itu ukuran trafo menjadi relatif besar dan berat. Dengan perkembangan teknologi dibidang piranti semikonduktor daya (power semiconductor), terutama dengan meningkatnya rating tegangan dan arus atau peningkatan rating daya dari saklar elektronika / peralatan semikonduktir daya maka memungkinkan untuk mengganti transformator konvensional dengan transformator elektronika atau yang dikenal dengan istilah *solid state transformer*.

Buku ini membahas konsep transformator elektronika yang bekerja menggunakan prinsip konversi daya sebagai *counterpart* dari transformator konvensional yang bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik. Buku terdiri dari 6 Bab dan dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama menjelaskan prinsip kerja transformator konvensional yakni transformator ideal dan transformator actual serta transformator tiga fasa dimana hubungan

antara lilitan primer dan sekunder berpengaruh terhadap besarnya tegangan dan arus. Pada bagian kedua dibahas prinsip transformator elektronika dimana pembahasan meliputi perkembangan struktur transformator elektronika yang terdiri dari tiga tahap konversi. Tahap pertama adalah konversi dari tegangan AC menjadi DC, kemudian dikonversi lagi menjadi tegangan AC frekwensi tinggi, Tahap kedua perubahan level tegangan menggunakan trafo frekwensi tinggi. Dan tahap ketiga adalah konversi dari tegangan AC menjadi DC dan kembali ke AC dengan frekwensi standar (50 atau 60 Hz). Pada bagian akhir buku ini membahas secara mendalam pengaruh frekwensi tinggi terhadap sistem trafo secara keseluruhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena hanya atas perkenan Beliau buku yang berjudul: **“TRANSFORMATOR ELEKTRONIKA (SOLID STATE TRANSFORMER)”** ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia atas dukungan finansial sehingga penelitian dan penulisan buku bisa dilaksanakan dengan baik.
2. Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Mataram yang telah memfasilitasi kegiatan penyaluran dana Penelitian Dasar untuk Tahun 2021.
3. Fakultas Teknik dan Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram untuk dukungan moral dan material dalam penyediaan peralatan laboratorium dan fasilitas lainnya.
4. Rekan-rekan peneliti di kelompok penelitian Power Electronics and Drive (PEDRG) Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram yang telah membantu dan memberikan kritik dan saran untuk perbaikan buku ini.
5. Para teknisi laboratorium dan mahasiswa yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini.
6. Keluarga kami tercinta di rumah yang telah merelakan sebagian waktu kami untuk

melaksanakan penelitian ini baik di rumah, kampus atau lokasi lainnya.

Dan semua pihak yang tidak disebutkan yang telah memberikan kontribusinya sehingga buku ini bisa direalisasikan. Semoga kehadiran buku ini dapat memberikan tambahan pengetahuan dan manfaat bagi para pembaca yang budiman.

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I TRANSFORMATOR KONVENSIONAL	1
1.1 Pengertian transformator.....	1
1.2 Bagian dari transformator	2
1.3 Macam transformator	4
1.4 Prinsip Kerja.....	10
1.5 Transformator ideal	11
1.6 Transformator dengan rugi beban nol	15
Kesimpulan	22
Pustaka	22
BAB II TRANSFORMATOR AKTUAL	23
2.1 Transformator yang memiliki rugi beban penuh.....	23
2.2 Tahanan ekuivalen transformator dengan rugi beban penuh.....	25
2.3 Transformator yang memiliki kebocoran magnetik	27
2.4 Transformator dengan tahanan dan reaktansi bocor pada kumparannya.....	30
Kesimpulan	33

	Pustaka	33
BAB III	TRANSFORMATOR TIGA FASA	35
	3.1 Pengertian Transformator Tiga Fasa	35
	3.2 Hubungan ketiga kumparan fasa pada tiap sisi transformator tiga fasa	38
	3.3 Hubungan antara sisi primer dengan sekunder transformator 3 fasa	40
	3.4 Transformator tiga fasa hubungan open delta (V – V)	45
	Kesimpulan	47
	Pustaka	47
BAB IV	TRANSFORMATOR ELEKTRONIK (SOLID STATE TRANSFORMER).....	49
	4.1 Pendahuluan.....	49
	4.2 Definisi dan Organisasi SST	51
	Kesimpulan	60
	Pustaka	61
BAB V	EFEK FREKUENSI TINGGI PADA KUMPARAN TRANSFORMATOR.....	63
	5.1 Pendahuluan.....	63
	5.2 Faktor Efek Kedekatan	66
	5.3 Resistansi AC pada Konduktor Silindris ..	68
	5.4 Faktor Efek Kedekatan untuk Bentuk Gelombang Berubah Terhadap Waktu.....	71
	5.5 Mengurangi Efek Kedekatan dengan kumparan bersisipan	76
	5.6 Induktansi Kebocoran pada Kumparan Transformer.....	79
	Kesimpulan	80
	Pustaka	80

BAB VI EFEK FREKUENSI TINGGI PADA INTI BESI TRANSFORMATOR 81

6.1 Pendahuluan..... 81

6.2 Kerugian Arus Eddy Current di Core Toroidal 81

6.3 Kerugian Inti Besi..... 84

6.4 Permeabilitas Kompleks 84

6.5 Laminasi..... 88

Kesimpulan 89

Pustaka 89

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1.	Perbandingan antara topologi dan strategi kontrol	56
Tabel 5.1	Deret Fourier untuk berbagai bentuk gelombang dalam elektronika daya.	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Bagian utama transformator.....	2
Gambar 1.2	Transformator tipe inti	5
Gambar 1.3	Transformator tipe inti bentuk nyata	5
Gambar 1.4	Transformator tipe cangkang.....	6
Gambar 1.5	Transformator tipe cangkang bentuk nyata.....	6
Gambar 1.6.	Bentuk pecahan lempeng laminasi	7
Gambar 1.7.	Penggabungan pecahan lempeng laminasi transformator tipe inti (a) dan cangkang (b).....	7
Gambar 1.8.	Memasukkan lempeng laminasi ke dalam kumpulan transformator.....	8
Gambar 1.9.	Transformator penaik tegangan (a) dan penurun tegangan (b)	9
Gambar 1.10.	Transformator pengukur arus (a) dan pengukur tegangan (b)	9
Gambar 1.11	Prinsip kerja transformator	11
Gambar 1.12	Diagram 1 garis (a) dan diagram vektor (b) transformator ideal	12
Gambar 1.13.	Diagram vektor transformator dengan rugi beban nol saat tanpa beban	17

Gambar 1.14	Proses penetralisiran efek magnetis transformator dengan rugi beban nol pada saat berbeban	18
Gambar 1.15	Diagram vektor transformator dengan rugi beban nol saat berbeban	21
Gambar 2.1	Diagram vektor transformator dengan rugi beban penuh.....	24
Gambar 2.2	Diagram 1 garis transformator dengan rugi beban penuh.....	25
Gambar 2.3	Tahanan ekivalen transformator dengan rugi beban penuh.....	27
Gambar 2.4	Diagram 1 garis transformator dengan kebocoran fluks magnet	28
Gambar 2.5	Diagram 1 garis transformator dengan reaktansi bocor	30
Gambar 2.6	Diagram 1 garis transformator dengan tahanan dan reaktansi bocor pada kumparannya.....	30
Gambar 2.7	Diagram vektor transformator dengan tahanan dan reaktansi bocor pada kumparannya pada berbagai jenis beban yaitu resistif (a), induktif (b), kapasitif(c).....	32
Gambar 3.1	Transformator tiga fasa yang dibentuk dari hubungan interkoneksi antara 3 buah transformator 1 fasa yang sama/identik (3 x 1).....	37
Gambar 3.2	Transformator tiga fasa yang dibentuk 1 buah transformator 3 fasa (1 x 3) (a) hub. bintang - bintang (b) hub. Segitiga-segitiga	38
Gambar 3.3	Diagram 1 garis tipe hubungan (a) bintang dan (b) segitiga	39

Gambar 3.4	Tipe hubungan (a) bintang dengan bintang (b) segitiga dengan segitiga.....	42
Gambar 3.5	Tipe hubungan (a) bintang dengan segitiga (b) segitiga dengan bintang.....	44
Gambar 3.6.	Transformator tiga fasa hubungan open delta (V – V)	45
Gambar 4.1.	Klasifikasi topologi SST	53
Gambar 4.2.	Konfigurasi skematis SST tiga tahap.....	55
Gambar 5.1	Arus Eddy pada konduktor berbentuk lingkaran.....	65
Gambar 5.2	Grafik perbandingan R_{ac}/R_{dc} akibat efek kulit.....	66
Gambar 5.3	Gaya gerak magnet dalam kumparan transformator	67
Gambar 5.4	Silinder konduktor	69
Gambar 5.5	Penampang transformator dengan (a) diagram gaya gerak magnet terkait dan kerapatan arus pada frekuensi tinggi, (b) lapisan ke-n umum.	70
Gambar 5.6	Faktor efek kedekatan untuk eksitasi sinusoidal	71
Gambar 5.7	Gelombang arus berpulsa.....	72
Gambar 5.8	Plot dari R_{eff}/R_d terhadap D untuk variasi jumlah lapisan	73
Gambar 5.9	Plot dari R_{eff}/R_d terhadap D untuk variasi jumlah lapisan dalam 3D	74
Gambar 5.10.	Kumparan transformator sebelum bersisipan.....	77
Gambar 5.11	Distribusi kerapatan arus sebelum bersisipan.....	77
Gambar 5.12	Kumparan transformator setelah bersisipan.....	78

Gambar 5.13	Distribusi kerapatan arus setelah bersisipan.....	78
Gambar 6.1	Kerugian Arus Eddy pada suatu inti toroidal.....	82
Gambar 6.2	Lembaran arus	83
Gambar 6.3	Induktansi diri dalam inti toroidal sebagai fungsi frekuensi.....	85
Gambar 6.4	Resistivitas dari ferit tipe P.....	86
Gambar 6.5	Permeabilitas awal dari ferit tipe P.....	87
Gambar 6.6	Laminasi dalam suatu medan magnet seragam.....	88

BAB I

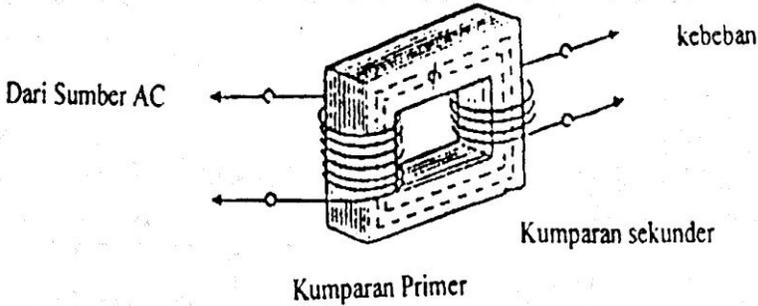
TRANSFORMATOR KONVENSIONAL

1.1 Pengertian transformator

Suatu transformator adalah suatu peralatan/mesin listrik statis (tidak bergerak/berputar) yang dapat memindahkan, serta mengubah/mentransformasi besaran daya listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain pada frekuensi yang sama.

Suatu transformator dapat menaikkan atau menurunkan tegangan dari suatu rangkaian listrik akan tetapi diikuti dengan turun atau naiknya aliran arus pada rangkaian listrik yang lain. Proses pemindahan dayanya dilakukannya melalui suatu gandengan magnetik antara kedua rangkaian listrik yang dihubungkan, sementara proses transformasi besarnya menggunakan prinsip induksi elektromagnetik di dalam gandengan magnetik tersebut.

Transformator pada dasarnya terbentuk dari dua kumparan induktif yang terpisah/terisolasi satu sama lain secara elektrik (agar tak terjadi aliran arus hubung singkat antara keduanya) tetapi tergendeng secara magnetik melalui suatu rangkaian magnetik berupa aliran fluks dalam suatu inti besi yang memiliki nilai reluktansi rendah.



Gambar 1.1. Bagian utama transformator

1.2 Bagian dari transformator

1.2.1 Bagian utama

Bagian utama dari suatu transformator sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.1 adalah sbb:

1. Kumparan primer

Kumparan yang terbentuk dari lilitan kawat tembaga, dimana ujung-ujungnya akan terhubung pada rangkaian listrik yang akan mensuplai tegangan dan arus listrik kepada rangkaian listrik yang terhubung pada kumparan sekunder. Kumparan ini berfungsi sebagai tempat menerima masukan arus dari sumber tegangan listrik, juga sebagai tempat dihasilkannya gaya gerak magnet (sumber fluks magnet) dan gaya gerak listrik (sumber arus listrik).

2. Kumparan sekunder

Kumparan yang terbentuk dari lilitan kawat tembaga, dimana ujung-ujungnya akan terhubung pada rangkaian listrik yang menerima suplai tegangan dan arus listrik dari rangkaian listrik yang terhubung pada kumparan primer. Kumparan ini berfungsi sebagai tempat mengalirkan keluaran arus ke beban listrik, juga sebagai tempat dihasilkannya gaya gerak

listrik (sumber arus listrik) dan gaya gerak magnet (sumber fluks magnet).

3. Inti besi

Merupakan tempat dililitkannya kumparan primer dan sekunder, dimana antara kumparan dengan inti besi diberi isolasi agar tak terjadi aliran arus hubung singkat antara keduanya karena inti besi juga memiliki konduktifitas walaupun rendah. Inti besi berfungsi sebagai medium hantaran fluks magnetik yang akan menjadikan adanya gandengan/rangkaian magnetik antara kumparan/rangkaian primer dengan sekunder. Umumnya dibentuk dari hasil laminasi lempengan baja dengan kandungan silicon yang tinggi. Ini akan menghasilkan inti besi dengan tingkat permeabilitas (kemampuan hantar fluks) yang tinggi sekaligus rugi histeresis yang rendah. Sementara rugi arus eddy inti besi ini diminimasi dari proses laminasi yang dilakukan, dimana ketebalan lempengan laminasi baja berkisar 0.35 mm untuk frekuensi 50 Hz sampai 0,5 mm untuk frekuensi 25 Hz. Dimana semakin tinggi frekuensi maka rugi arus eddy inti besi akan semakin besar sehingga lempeng besi harus semakin tipis untuk mengurangi rugi arus eddy tersebut. Antar lempeng baja diisolasi satu sama lain dengan cara memberi lapisan tipis yang terbuat dari pernis plat besi/baja pada lempeng-lempeng tersebut.

1.2.2 Bagian pendukung

Bagian pendukung dari transformator adalah :

1. Wadah transformator (container)

Berfungsi sebagai tempat/wadah dimasukkannya inti besi dan kumparan transformator yang bertujuan untuk melindungi transformator dari kontak secara elektrik maupun mekanis dengan lingkungan sekitar. Berupa suatu tangki yang terbuat dari logam (besi, baja, dll) yang diberi minyak didalamnya, minyak ini berfungsi untuk mencegah terjadinya kontak antara

transformator dengan badan dari wadah agar tidak terjadi arus hubung singkat antara keduanya, selain itu minyak juga digunakan sebagai medium pendingin dari panas yang dapat timbul akibat aliran arus pada transformator, agar tidak terjadi panas yang berlebihan dari transformator.

2. Terminal keluaran

Berfungsi sebagai tempat dikeluarkannya ujung-ujung kumparan pada badan wadah, umumnya terbuat dari bahan isolasi seperti porselin yang dapat mencegah terjadinya kontak listrik antara ujung kumparan dengan badan wadah.

1.3 Macam transformator

1.3.1 Berdasarkan konstruksinya

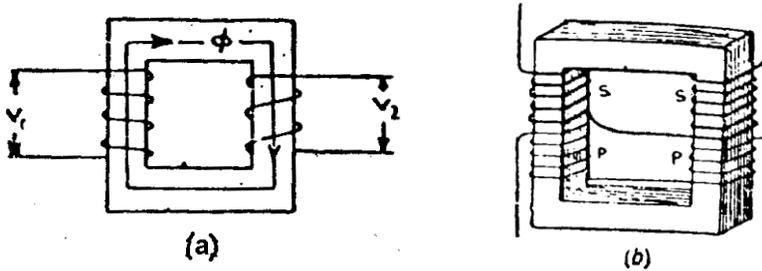
Ada 2 macam transformator, yaitu :

- a. Tipe inti (core type)
- b. Tipe cangkang (shell type)

a. Transformator tipe inti

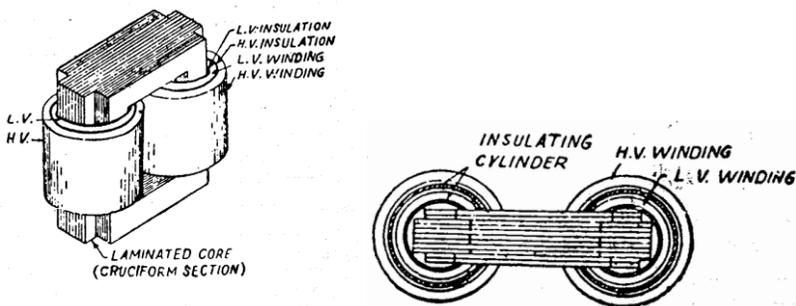
Dalam transformator tipe ini, konstruksinya dibuat sedemikian rupa agar kumparan yang mengelilingi inti besi, sebagaimana nampak pada Gambar 1.2. Pada Gambar 1.2a yang merupakan gambar konstruksi sederhana dari transformator tipe inti, nampak bahwa kumparan primer dan sekunder dililitkan pada 1 kaki yang berbeda dari suatu inti besi, tetapi pada konstruksi secara nyata sebenarnya cara melilitkan kumparan primer dan sekundernya adalah dengan melilitkan tiap kumparan masing-masing pada kedua kaki dari inti besi sebagaimana nampak pada Gambar 1.2b. Hal ini dilakukan bertujuan untuk mengurangi terjadinya fluks magnet yang bocor (leakage flux). Nampak pada Gambar 1.2b bahwa setengah bagian kumparan primer dan setengah bagian dari kumparan sekunder dililitkan (bisa

secara terdistribusi atau terkonsentrasi) pada tiap kaki dari inti besi.



Gambar 1.2 Transformator tipe inti

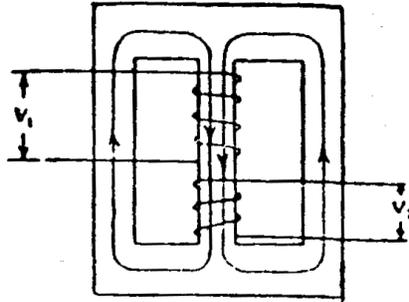
Pada konstruksi kenyataannya, kumparan dililitkan pada inti besi secara gelung dan dapat membentuk lingkaran, persegi, atau oval. Pada transformator ukuran kecil, digunakan inti berbentuk persegi dengan kumparan membentuk lingkaran atau persegi, sementara untuk transformator berukuran besar digunakan inti berbentuk persegi dengan kumparan yang membentuk lingkaran sebagaimana nampak pada Gambar 1.3. Pada Gambar 1.3 nampak digunakan adanya isolasi (yang dapat menggunakan bahan kertas, kain, atau mika) untuk memisahkan antara kumparan dengan inti besi ataupun dengan kumparan lain. Selain itu nampak pula bahwa kumparan dengan tegangan yang lebih rendah diletakkan pada posisi yang lebih dekat dengan inti besi karena isolasinya lebih sedikit dibanding kumparan dengan tegangan lebih tinggi.



Gambar 1.3 Transformator tipe inti bentuk nyata

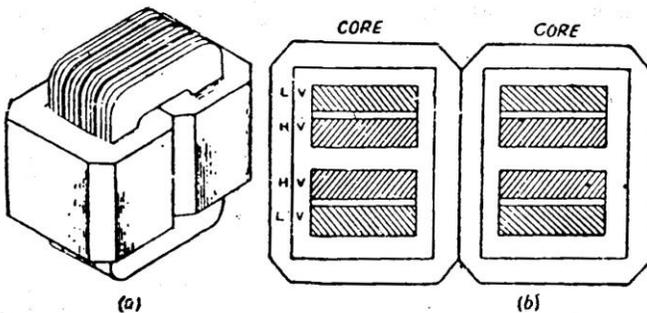
b. Transformator tipe cangkang

Dalam transformator tipe ini, konstruksinya dibuat agar inti besi yang mengelilingi kumparan, sebagaimana nampak pada Gambar 1.4.



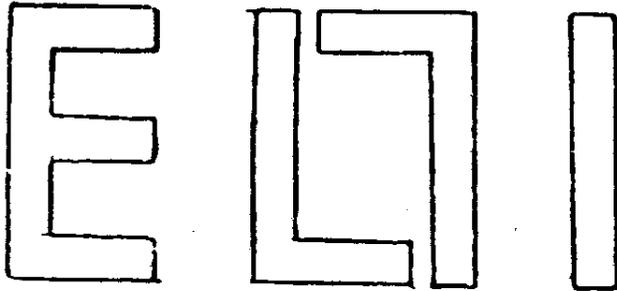
Gambar 1.4 Transformator tipe cangkang

Pada konstruksi kenyataannya, kumparan dililitkan pada inti besi secara gelung dan membentuk persegi yang berlapis-lapis sebagaimana nampak pada Gambar 1.5. Tampak pula digunakan adanya isolasi untuk memisahkan antara kumparan dengan inti besi ataupun dengan kumparan lain. Selain itu nampak pula bahwa tiap kumparan dibagi menjadi 2 bagian terpisah baik untuk kumparan tegangan tinggi maupun rendah sehingga nampak seperti berlapis-lapis, dengan tujuan untuk memperkecil fluks bocor yang dapat terjadi.

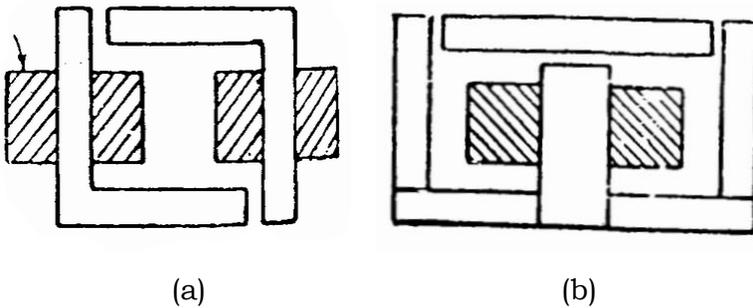


Gambar 1.5 Transformator tipe cangkang bentuk nyata

Baik pada transformator tipe inti maupun tipe cangkang, tiap lempengan laminasi inti besinya sebenarnya dapat terpecah ke dalam bentuk lempeng berbentuk L, E dan I sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.6. Cara penggabungan pecahan lempeng laminasi menjadi satu lempengan yang lengkap baik untuk transformator tipe inti maupun tipe cangkang ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.6. Bentuk pecahan lempeng laminasi



Gambar 1.7. Penggabungan pecahan lempeng laminasi transformator tipe inti (a) dan cangkang (b)



Gambar 1.8. Memasukkan lempeng laminasi ke dalam kumparan transformator

Pemilihan antara transformator tipe inti atau tipe cangkang biasanya tergantung pada segi ekonomis, karena secara teknis keduanya memiliki kemampuan yang hampir sama. Untuk kebutuhan konstruksi transformator dengan tingkat tegangan tinggi dengan jumlah lilitan yang banyak, transformator tipe cangkang banyak dipilih untuk digunakan karena dengan kumparan berada di antara inti besi maka tingkat keamanan/isolasi antara kumparan dengan wadah pada tegangan tinggi akan lebih terjamin.

1.3.2 Berdasarkan perubahan tegangannya

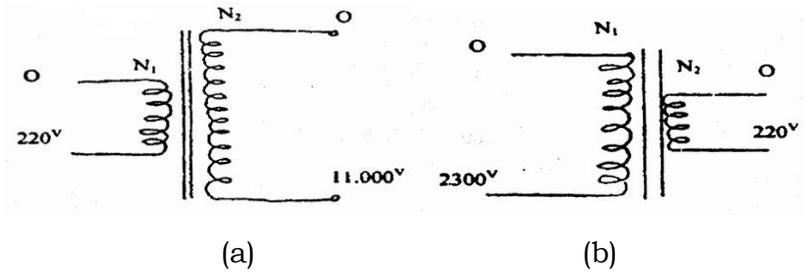
Ada 2 macam transformator, yaitu :

a. Tipe penaik tegangan (step-up)

Dilakukan dengan membuat $N_2 > N_1$ (N = jumlah lilitan kumparan, 1 = primer, 2 = sekunder) maka V_2 akan $> V_1$ (V = tegangan kumparan) karena $N_2/N_1 = V_2/V_1$.

b. Tipe penurun tegangan (step-down)

Dilakukan dengan membuat $N_2 < N_1$ maka V_2 akan $< V_1$



Gambar 1.9. Transformator penaik tegangan (a) dan penurun tegangan (b)

1.3.3 Berdasarkan penggunaan untuk pengukuran

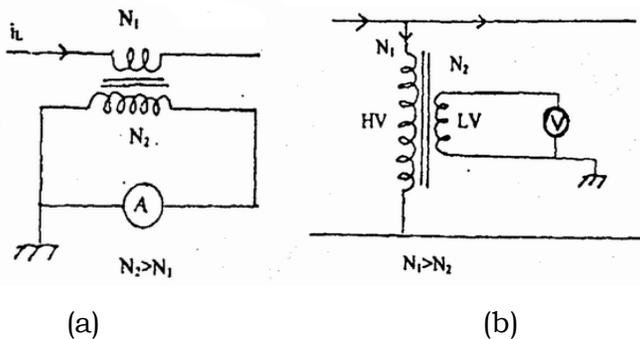
Ada 2 macam transformator, yaitu :

- a. Tipe pengukur arus (current transformer)

Digunakan untuk mengukur arus beban yang besar dengan menggunakan ampere meter yang biasa, dengan mengetahui perbandingan $N_1 : N_2$ dan pembacaan pada ampere meter (I_2) maka arus beban (I_1) dapat dihitung.

- b. Tipe pengukur tegangan (voltage/potential transformer)

Digunakan untuk mengukur tegangan tinggi suatu jaringan dengan menggunakan volt meter yang biasa, dengan mengetahui perbandingan $N_1 : N_2$ dan pembacaan pada volt meter (V_2) maka tegangan jaringan (V_1) dapat dihitung.

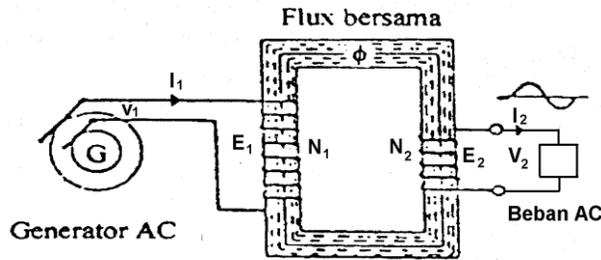


Gambar 1.10. Transformator pengukur arus (a) dan pengukur tegangan (b)

1.4 Prinsip Kerja

Adapun prinsip kerja transformator untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari rangkaian primer ke rangkaian sekunder dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Pada saat kumparan primer dihubungkan dengan suatu sumber tegangan ac (V_1), karena kumparan primer sekarang merupakan rangkaian tertutup, walaupun belum ada beban pada sisi kumparan sekunder, akan mengalir arus ac (disebut sebagai arus beban nol) pada kumparan primer (I_1) yang terlilit pada inti besi.
2. Aliran arus ac pada kumparan primer ini akan menyebabkan timbulnya gaya gerak magnet (g.g.m) ac (bolak balik) pada kumparan primer dan inti besi tempat kumparan primer tersebut dililitkan.
3. Timbulnya g.g.m ac ini akan menyebabkan mengalirnya hantaran fluks magnet Φ ac dari posisi kumparan primer dililitkan ke sekeliling lintasan inti besi. Fluks magnet ac ini juga akan melintasi posisi dimana kumparan sekunder dililitkan pada inti besi.
4. Berdasarkan hukum induksi Faraday, $e = N (d\Phi/dt)$, maka akibat aliran fluks magnet ac (yang berubah terhadap waktu, $d\Phi/dt$) yang melintasi kumparan primer dan sekunder (N_1 dan N_2) akan terinduksi suatu gaya gerak listrik ac pada kumparan primer dan sekunder (E_1 dan E_2) yang besarnya tergantung jumlah lilitan tiap kumparan.
5. Jika ujung-ujung kumparan sekunder tersebut dihubungkan dengan beban listrik, karena sekarang telah menjadi rangkaian tertutup, akan mengalir arus ac dari kumparan sekunder (I_2) menuju beban listrik sehingga akan timbul tegangan (V_2) pada beban tersebut.
6. Pada saat ini dikatakan bahwa transformator telah bekerja untuk memindahkan dan mengubah energi listrik dari rangkaian primer ke rangkaian sekunder.



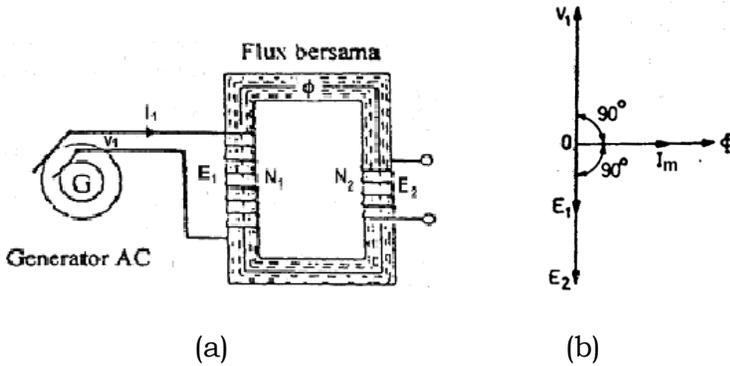
Gambar 1.11 Prinsip kerja transformator

1.5 Transformator ideal

Untuk dapat memahami lebih dalam mengenai prinsip kerja transformator secara kenyataan (praktis), maka pertama-tama transformator akan dianggap sebagai suatu transformator yang ideal. Transformator ideal adalah suatu transformator yang:

1. Tidak memiliki rugi-rugi, baik rugi beban nol (terdiri dari rugi inti besi dan rugi tembaga beban nol) maupun rugi beban penuh (terdiri dari rugi tembaga beban penuh).
2. Inti besinya memiliki permeabilitas yang tak terhingga (inti besi tak pernah jenuh), sehingga pertambahan arus akan selalu proporsional/linier dengan pertambahan fluks yang dihasilkan ($\Phi \approx N \times I$) untuk sepanjang waktu.
3. Tidak terjadi kebocoran fluks pada kumparannya, sehingga semua fluks bersirkulasi di dalam inti besi.

Sesungguhnya adalah mustahil untuk menghasilkan transformator ideal seperti di atas, tetapi hal ini perlu dianggap ada untuk kepentingan memudahkan pemahaman transformator aktual (tak ideal) yang harus dilakukan secara bertahap, yang dimulai dari transformator ideal.



Gambar 1.12 Diagram 1 garis (a) dan diagram vektor (b) transformator ideal

Pertama-tama, anggap terdapat suatu transformator ideal yang kumparan primernya dihubungkan dengan suatu sumber tegangan ac (V_1), sementara kumparan sekundernya terbuka sebagaimana tergambar pada Gambar 1.12a. Akibatnya akan mengalir arus ac pada kumparan primer, I_1 . Karena kumparan sekunder belum berbeban maka arus ini hanya akan mensuplai kebutuhan pembangkitan gaya gerak magnet (fluks magnet) pada kumparan primer, sehingga arus ini disebut juga sebagai arus pemagnetan, dilambangkan dengan I_m yang bernilai sangat kecil (dibanding arus beban penuh transformator).

Karena kumparan transformator ideal dianggap tidak memiliki rugi tembaga, ($I^2R = 0$), dengan $I_1 = I_m \neq 0$ maka kumparan primer dapat dianggap tidak memiliki R ($R = 0$) sehingga menjadi bersifat induktif murni. Akibatnya, arus ac yang ditarik oleh kumparan primer dari sumber akan mensuplai beban induktif murni dan vektornya akan menjadi tertinggal (lagging) 90° secara sudut fasa terhadap vector tegangan sumber V_1 sebagaimana tergambar pada Gambar 1.12b.

Arus pemagnitan ini akan menghasilkan timbulnya gaya gerak magnet (g.g.m) sekaligus aliran fluks magnet (Φ) ac pada kumparan primer dan inti besi, yang besarnya akan selalu proporsional terhadap arus pemagnetan untuk sepanjang waktu (karena permeabilitas dari inti besi tak terhingga) dengan sudut

fasa yang sama dengan arus pemagnetan (karena $\Phi \approx N \times I$, dengan N yang merupakan konstanta), sebagaimana tergambar pada Gambar 1.12b.

Karena adanya aliran fluks magnet ac yang bersirkulasi di dalam lintasan inti besi, maka berdasarkan hukum induksi Faraday, akan terinduksi gaya gerak listrik (g.g.l) pada kumparan primer (E_1) yang secara sudut fasa akan selalu berlawanan arah 180° terhadap V_1 (berdasarkan $e_1 = -N_1 d\Phi/dt$) sehingga disebut sebagai g.g.l lawan.

Selain itu aliran fluks magnet juga akan menginduksikan g.g.l pada kumparan sekunder (E_2) yang secara sudut fasa juga akan berlawanan arah 110° terhadap V_1 sebagai sumber fluks ($e_2 = -N_2 d\Phi/dt$), sehingga E_1 akan sefasa dengan E_2 sebagaimana tergambar pada Gambar 1.12b.

Berdasarkan diagram vektor transformator ideal, maka dapat dilakukan penurunan persamaan tegangan induksi yang ada pada transformator ideal. Bila fluks magnet Φ ac yang ditimbulkan arus pemagnetan ac pada kumparan primer dibuat persamaan fluks sesaatnya (gelombang ac) diperoleh :

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t \quad (\text{weber}) \quad (1.11)$$

Sehingga persamaan g.g.l yang diinduksikan oleh fluks tersebut pada kumparan primer :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d(\Phi_m \cos \omega t)}{dt} \quad (\text{volt}) \quad (1.12)$$

$$e_1 = N_1 \omega \Phi_m \sin \omega t \quad (\text{volt}) \quad (1.13)$$

karena $\sin \omega t = \cos(\omega t - 90^\circ)$, contoh : $\sin 90^\circ = \cos 0^\circ = 1$, maka pers. (1.13) menjadi :

$$e_1 = N_1 \omega \Phi_m \sin \omega t = N_1 \omega \Phi_m \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (\text{volt}) \quad (1.14)$$

$$e_1 = e_{m1} \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (\text{volt}) \quad (1.15)$$

dimana $e_{m1} = N_1 \omega \Phi_m$.

Selanjutnya apabila nilai efektif dari g.g.l maksimum ini dicari, akan diperoleh :

$$E_1 = \frac{e_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44N_1 f \Phi_m \quad (\text{volt}) \quad (1.16)$$

karena $\omega = 2\pi f$ radian, dengan $f =$ frekuensi dari tegangan sumber dan fluks ac (Hz).

Sementara pada kumparan sekunder, fluks magnet ac tersebut juga akan menginduksikan g.g.l dengan penurunan persamaan yang serupa dengan pada kumparan primer sehingga diperoleh :

$$e_2 = N_2 \omega \Phi_m \sin \omega t = N_2 \omega \Phi_m \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (\text{volt}) \quad (1.17)$$

$$e_2 = e_{m2} \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (\text{volt}) \quad (1.18)$$

dimana $e_{m2} = N_2 \omega \Phi_m$.

Selanjutnya apabila nilai efektif dari g.g.l maksimum ini dicari, akan diperoleh :

$$E_2 = \frac{e_{m2}}{\sqrt{2}} = \frac{N_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{N_2 2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44N_2 f \Phi_m \quad (\text{volt}) \quad (1.19)$$

Berdasarkan persamaan (1.11), (1.15) dan (1.18) dapat diketahui pula bahwa secara sudut fasa g.g.l kumparan primer dan sekunder (E_1 dan E_2) akan tertinggal 90° terhadap fluks (Φ) yang menyebabkan, sebagaimana pula tergambar pada Gambar 1.12b.

Berdasarkan persamaan nilai tegangan efektif dari g.g.l pada kumparan primer dan sekunder yaitu :

$$E_1 = 4,44N_1 f \Phi_m \quad (\text{volt})$$

$$E_2 = 4,44N_2 f \Phi_m \quad (\text{volt})$$

dapat diperoleh nilai perbandingan tegangan induksi dan jumlah lilitan antara kumparan primer

dengan sekunder, yang umum disebut sebagai rasio transformasi, yang dilambangkan dengan a , yaitu:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44N_1 f \Phi_m}{4,44N_2 f \Phi_m}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1.20)$$

Karena masih dianggap tidak terdapat R pada kumparan, maka tidak terdapat jatuh tegangan antara V_1 (tegangan sumber ac) dengan E_1 demikian juga antara E_2 dengan V_2 (tegangan terminal kumparan sekunder), sehingga $V_1 = E_1$ sementara $V_2 = E_2$, (secara besarnya saja tanpa melihat sudut fasanya), sehingga akan diperoleh :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1.21)$$

Jika dibalik perbandingannya maka rasio transformasi bisa dilambangkan dengan K , yaitu

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} = K$$

1.6 Transformator dengan rugi beban nol

Pada pembahasan sebelumnya dinyatakan bahwa transformator ideal dianggap tidak memiliki rugi-rugi beban nol, untuk lebih mendekati kondisi transformator kenyataan, maka perlu dilakukan perubahan pada anggapan.

Kini anggap bahwa transformator berkurang idealnya, yaitu kini dianggap memiliki rugi-rugi beban nol yaitu rugi inti besi dan rugi tembaga saat beban nol, yang dapat ditinjau pada 2 kondisi transformator, yaitu :

1. Pada saat tanpa beban (beban nol)
2. Pada saat sudah berbeban

1.6.1 Transformator dengan rugi beban nol pada saat tanpa beban (beban nol)

Pada kenyataannya, pada saat tanpa beban, sebenarnya arus beban nol (I_0) yang ditarik transformator (khususnya kumparan primer) dari sumber tegangan bukan hanya mensuplai pembangkitan fluks magnet saja (sebagai arus pemagnetan) tetapi juga mensuplai :

1. Rugi inti besi, yaitu rugi histeresis dan rugi arus eddy.
2. Sejumlah kecil rugi tembaga (yang merupakan rugi tembaga beban nol) dari kumparan primer saja (kumparan sekunder terbuka), karena arus beban nolnya juga sangat kecil.

Akibatnya, arus ac I_0 yang ditarik kumparan primer kini tidak lagi terbelakang 90° secara sudut fasa terhadap tegangan sumber V_1 , karena bebannya tidak lagi bersifat induktif murni (ada sejumlah kecil rugi tembaga I^2R , sehingga $R \neq 0$) tetapi kini terbelakang dengan sudut $\phi_0 < 90^\circ$.

Berdasarkan kenyataan di atas, arus I_0 dapat dikatakan terdiri dari 2 bagian:

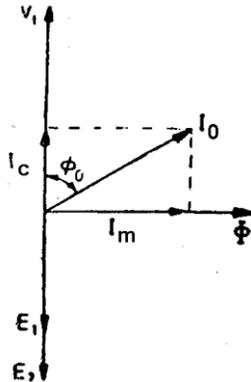
1. Bagian yang sefasa terhadap V_1 , disebut sebagai arus aktif atau arus rugi inti besi (disimbolkan dengan I_c), karena bagian ini mensuplai rugi inti besi dan sejumlah kecil rugi tembaga (rugi tembaga beban nol) pada kumparan primer, besarnya :

$$I_c = I_0 \cos \phi_0 \quad (\text{ampere}) \quad (1.22)$$

2. Bagian yang terbelakang 90° terhadap V_1 , disebut sebagai arus reaktif atau arus pemagnetan (I_m), karena bagian ini mensuplai pembangkitan fluks magnet pada kumparan primer, besarnya :

$$I_m = I_0 \sin \phi_0 \quad (\text{ampere}) \quad (1.23)$$

Sehingga, secara vektoris $I_0 = I_c + I_m$, sebagaimana tergambar pada Gambar 1.13.



Gambar 1.13. Diagram vektor transformator dengan rugi beban nol saat tanpa beban

Saat ini transformator dikatakan akan menarik daya masukan dari sumber tegangan ac sebesar daya beban nol, yaitu :

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \phi_0 \quad (\text{watt}) \quad (1.24)$$

dimana

$\cos \phi_0$ = faktor daya transformator saat beban nol.

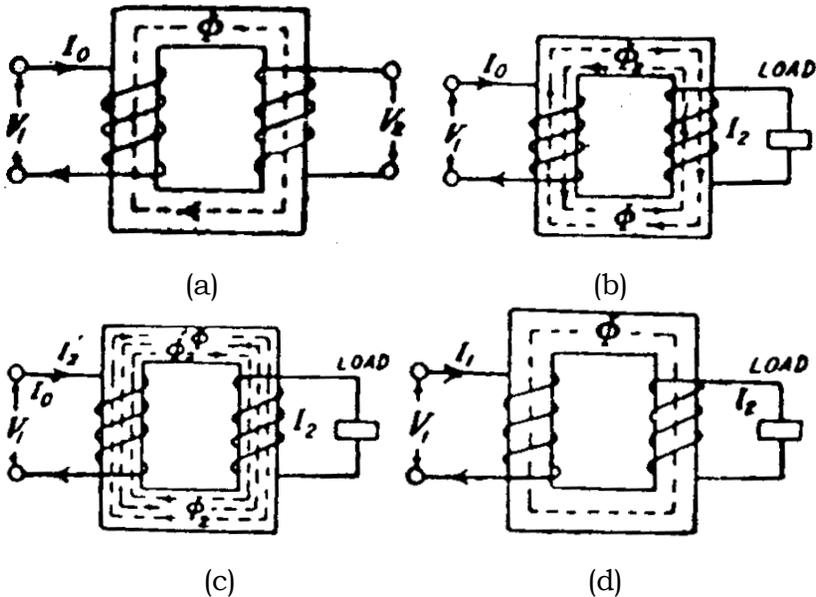
Dimana daya beban nol (watt) ini hanya akan mensuplai rugi inti besi dan sejumlah kecil rugi tembaga pada kumparan primer saat beban nol saja, karena daya untuk pembangkitan fluks magnet merupakan daya reaktif (VAr).

Harus diperhatikan bahwa:

1. Arus beban nol ini besarnya sangat kecil bila dibandingkan dengan arus kumparan primer saat transformator diberi beban penuh, I_0 berkisar 1 % dari arus beban penuh.
2. Karena I_0 sangat kecil, maka rugi tembaga kumparan primer saat beban nol ($I_0^2 R_1$) juga akan menjadi sangat kecil, bahkan dapat diabaikan, sehingga dapat dikatakan bahwa daya beban nol P_0 (watt) hanya mensuplai (besarnya sama dengan) rugi inti besi saja.

1.6.2 Transformator dengan rugi beban nol pada saat berbeban

Pada kenyataannya, pada saat transformator diberi beban, akan timbul arus pada kumparan sekunder yaitu I_2 . Besar dan sudut fasa I_2 terhadap tegangan pada beban yang dipasang pada terminal kumparan sekunder, yaitu V_2 , adalah tergantung dari jenis bebannya (resistif, induktif atau kapasitif).



Gambar 1.14 Proses penetralisan efek magnetis transformator dengan rugi beban nol pada saat berbeban

Gambar 1.14 menunjukkan urutan proses yang akan terjadi apabila transformator diberi beban dengan anggapan rugi yang terjadi hanya rugi beban nol saja, yaitu:

- Kondisi pada saat transformator belum diberi beban pada kumparan sekundernya.
- Setelah diberi beban maka aliran arus beban pada kumparan sekunder, I_2 ini akan menyebabkan pada kumparan sekunder akan terbangkitkan adanya gaya gerak magnet (g.g.m) pada kumparan sekunder

(= $N_2 \times I_2$) sekaligus aliran fluks magnet Φ_2 yang arahnya berlawanan dengan arah fluks Φ yang dihasilkan arus pemagnetan I_0 pada kumparan primer. Oleh karena itu Φ_2 itu akan melemahkan Φ dari kumparan primer, sehingga g.g.l yang diinduksikan oleh Φ yaitu E_1 dan E_2 juga akan berkurang dari sebelum munculnya Φ_2 .

- c. Dengan berkurangnya E_1 akan menyebabkan beda potensial antara sumber tegangan V_1 dengan E_1 akan semakin besar, sehingga arus yang mengalir dari V_1 ke E_1 juga akan bertambah besar mengalir pada kumparan primer dibanding sebelum berbeban. Tambahan arus dari sumber tegangan saat berbeban tersebut diberi nama I_2' (karena timbul akibat munculnya I_2) yang merupakan komponen beban dari arus yang mengalir pada kumparan primer (selain komponen pemagnetan yaitu I_0). Dimana arah vektornya akan berlawanan terhadap arah vektor I_2 (karena I_2' dihasilkan oleh fluks yang disebabkan I_2 , dan sesuai hukum induksi Faraday). Aliran I_2' ini akan menyebabkan timbulnya g.g.m $N_1 I_2'$ pada kumparan primer (selain $N_1 I_0$ yang sebelumnya telah ada) yang juga akan menyebabkan timbulnya aliran fluks Φ_2' yang besarnya sama tetapi arahnya berlawanan terhadap Φ_2 (tetapi searah dengan Φ).
- d. Hasilnya, Φ_2' akan menetralkan keberadaan Φ_2 , sehingga kini dalam inti besi fluks yang mengalir adalah Φ , sebagaimana sebelum adanya arus beban I_2 .

Kesimpulannya adalah efek magnetis (pelemahan Φ) akibat timbulnya I_2 pada saat berbeban akan segera dinetralkan oleh timbulnya I_2' . Sehingga bagaimanapun kondisi beban yang dipasang pada suatu transformator, fluks yang bersirkulasi dalam inti besi akan selalu sama dengan pada saat beban nol. Akibatnya rugi inti besi transformator juga akan selalu sama dengan saat beban nol (karena disebabkan oleh besarnya aliran fluks pada inti besi yang selalu sama). Pada saat berbeban, kumparan primer akan dialiri 2 bagian arus primer yaitu

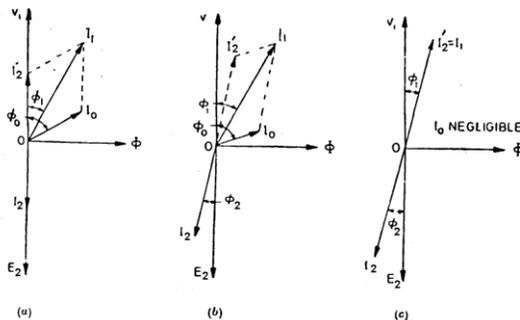
I_0 dan I_2' , sehingga total arus primer adalah penjumlahan vektor antara I_0 dengan I_2' (keduanya tidak sefasa).

Karena $\Phi_2 = \Phi_2'$ maka $N_2 I_2 = N_1 I_2'$ sehingga diperoleh persamaan :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_2'} = a \quad (1.25)$$

Sementara untuk diagram vektor transformator dengan rugi beban nol pada saat berbeban (untuk berbagai jenis beban) dapat dilihat pada Gambar 1.25. Nilai a di sana dianggap 1 agar besar vektor tegangan primer dengan sekunder dapat dibuat sama (untuk memudahkan penggambaran). Gambar a menggambarkan saat transformator berbeban resistif sehingga I_2 sefasa dengan V_2 atau E_2 ($E_2 = V_2$ karena rugi tembaga kumparan sekunder dianggap belum ada). Gambar b menggambarkan saat transformator berbeban induktif sehingga I_2 akan tertinggal sebesar sudut ϕ_2 terhadap E_2 . Sementara Gambar c menggambarkan saat transformator berbeban induktif tetapi dengan I_0 yang diabaikan (karena I_0 dianggap terlalu kecil dibanding I_2' , sehingga dianggap $I_2' = I_1$), akibatnya diperoleh bahwa persamaan (1.25) dapat berubah menjadi :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_2'} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (1.26)$$



Gambar 1.15 Diagram vektor transformator dengan rugi beban nol saat berbeban

Kesimpulannya, berdasarkan persamaan (1.26) bahwa perbandingan antara arus primer dengan arus sekunder akan selalu sama pada saat transformator (dengan rugi beban nol) sudah berbeban, karena nilai a (N_1/N_2) juga akan selalu sama.

Kesimpulan

1. Suatu transformator adalah suatu peralatan/mesin listrik statis (tidak bergerak/berputar) yang dapat memindahkan, serta mengubah/mentransformasi besaran daya listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain pada frekuensi yang sama.
2. Perbandingan antara arus primer dengan arus sekunder akan selalu sama pada saat transformator (dengan rugi beban nol) sudah berbeban , karena nilai a ($N1/N2$) juga akan selalu sama.

Pustaka

Theraja, B.L, 1993, A Text Book of Electrical Technology, Volume II, AC & DC Machines, Publication Division of Nirja Construction & Development Co. Ltd., Ram Nagar, New Delhi.

BAB II

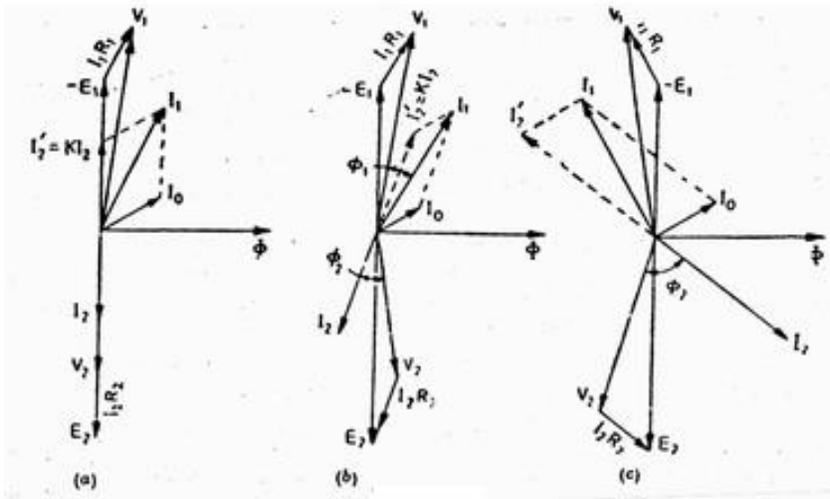
TRANSFORMATOR AKTUAL

2.1 Transformator yang memiliki rugi beban penuh

Pada pembahasan sebelumnya dinyatakan bahwa transformator dianggap telah memiliki rugi-rugi beban nol tetapi belum memiliki rugi beban penuh, selanjutnya untuk mencapai pemahaman kondisi transformator aktual (kenyataan), maka perlu dilakukan tambahan perubahan pada anggapan.

Kini anggap bahwa transformator bertambah mendekati kondisi aktualnya, yaitu kini dianggap juga memiliki rugi beban penuh, yaitu rugi tembaga beban penuh (I^2R). Yang dimaksud rugi tembaga beban penuh adalah rugi tembaga yang terjadi pada kumparan primer ($I_1^2R_1$) dan kumparan sekunder ($I_2^2R_2$) pada saat transformator sudah berbeban.

Oleh karena kini rugi tembaga (I^2R) pada kumparan primer dan sekunder dianggap ada, itu artinya bahwa nilai tahanan R pada kedua kumparan tersebut juga akan dianggap ada. Dengan adanya tahanan R selain dapat menimbulkan adanya rugi tembaga ternyata juga akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan ($I \times R$) pada kedua kumparan tersebut.



Gambar 2.1 Diagram vektor transformator dengan rugi beban penuh

Akibat adanya jatuh tegangan I_2R_2 pada kumparan sekunder, maka akan diperoleh persamaan secara vektoris :

$$V_2 = E_2 - I_2R_2 \quad (\text{volt}) \quad (2.1)$$

dengan :

V_2 = tegangan terminal pada beban

E_2 = g.g.l kumparan sekunder

Sementara akibat adanya jatuh tegangan I_1R_1 pada kumparan primer, maka akan diperoleh persamaan secara vektoris :

$$-E_1 = V_1 - I_1R_1 \quad (\text{volt}) \quad (2.2)$$

dengan :

V_1 = tegangan sumber ac

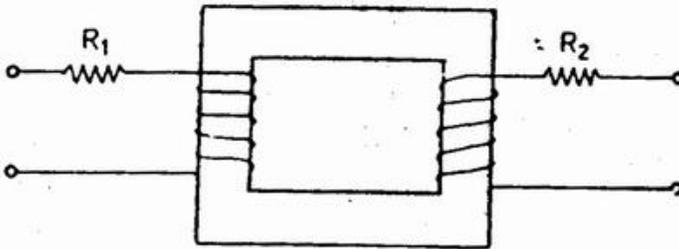
E_1 = g.g.l kumparan primer

- E_1 = vector lawan dari vector E_1 (digunakan agar arah vector E_1 yang sebenarnya berlawanan menjadi searah dengan vector V_1 sehingga dapat menjadi satu persamaan vektor).

Dengan adanya tahanan dan jatuh tegangan pada kumparan primer dan sekunder yang ikut diperhitungkan, maka diagram vektor dari transformator akan menjadi seperti pada Gambar 2.1.

2.2 Tahanan ekivalen transformator dengan rugi beban penuh

Dengan adanya tahanan pada kumparan primer dan sekunder maka transformator dengan rugi beban penuh akan memiliki gambar diagram satu garis seperti terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram 1 garis transformator dengan rugi beban penuh

Untuk memudahkan dalam penggambaran, maka tahanan dari tiap kumparan yang sebenarnya berada di dalam kumparan digambarkan berada diluar kumparan, yaitu R_1 untuk tahanan kumparan primer dan R_2 untuk tahanan kumparan sekunder. Tahanan dari kedua kumparan selanjutnya akan dapat ditransfer nilainya ke salah satu kumparan saja. Dengan mengkonsentrasikan nilai tahanan kedua kumparan pada 1 kumparan saja akan memudahkan dalam melakukan perhitungan, karena perhitungan keseluruhan transformator cukup dilakukan hanya pada 1 kumparan saja. Untuk mentransfer nilai tahanan R_2 pada kumparan primer maka perlu dilakukan penurunan persamaannya. Diketahui bahwa rugi tembaga pada kumparan sekunder yaitu $I_2^2 R_2$, ini disuplai oleh arus I_1 dari kumparan

primer, sehingga jika R_2' dianggap sebagai nilai tahanan ekivalen dari R_2 pada kumparan primer, maka dapat dianggap pula bahwa :

$$I_2^2 R_2 = I_1^2 R_2' \quad (2.3)$$

sehingga

$$R_2' = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 R_2 \quad (2.4)$$

Selanjutnya jika I_0 diabaikan karena terlalu kecil, maka $I_1 = I_2'$, dan $I_2/I_1 = I_2/I_2' = a$, sehingga R_2' persamaan (2.4) akan dapat dinyatakan dengan :

$$R_2' = a^2 R_2 \quad (2.5)$$

Sementara dengan cara yang serupa maka nilai tahanan R_1 pun dapat ditransfer pada kumparan sekunder. Diketahui bahwa rugi tembaga pada kumparan primer yaitu $I_1^2 R_1$, ini diteruskan oleh arus I_2 dari kumparan primer, sehingga jika R_1' dianggap sebagai nilai tahanan ekivalen dari R_1 pada kumparan sekunder, maka dapat dianggap pula bahwa :

$$I_1^2 R_1 = I_2^2 R_1' \quad (2.6)$$

sehingga

$$R_1' = \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2 R_1 \quad (2.7)$$

Selanjutnya karena $I_1/I_2 = I_2'/I_2 = 1/a$, sehingga R_1' persamaan (2.7) akan dapat dinyatakan dengan :

$$R_1' = (1/a)^2 R_1 = 1/a^2 R_1 \quad (2.8)$$

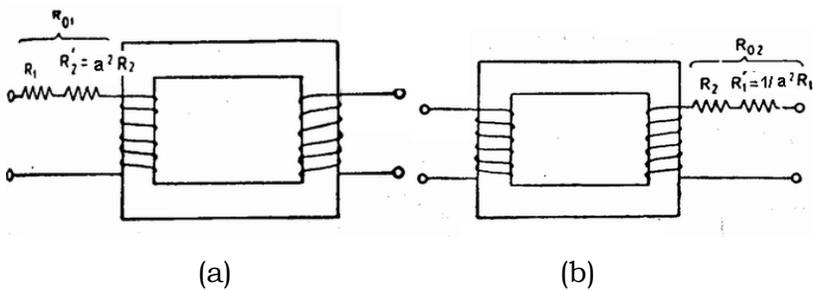
Selanjutnya jika tahanan R_2 ditransfer ke kumparan primer menjadi R_2' sehingga tahanan pada kumparan sekunder dianggap menjadi nol, maka pada kumparan primer akan dapat dilakukan penjumlahan antara $R_1 + R_2'$ yang disebut sebagai tahanan ekivalen dari transformator dipandang dari kumparan primer,

yang umum disimbolkan dengan R_{01} , sebagaimana tergambar pada gambar 2.3a, dan dapat dinyatakan dengan :

$$R_{01} = R_1 + R_2' = R_1 + a^2 R_2 \quad (2.9)$$

Sementara jika tahanan R_1 ditransfer ke kumparan sekunder menjadi R_1' sehingga tahanan pada kumparan primer dianggap menjadi nol, maka pada kumparan sekunder akan dapat dilakukan penjumlahan antara $R_1' + R_2$ yang disebut sebagai tahanan ekivalen dari transformator dipandang dari kumparan sekunder, yang umum disimbolkan dengan R_{02} , yang tergambar pada gambar 2.3b, dan dapat dinyatakan dengan :

$$R_{02} = R_1' + R_2 = 1/a^2 R_1 + R_2 \quad (2.10)$$



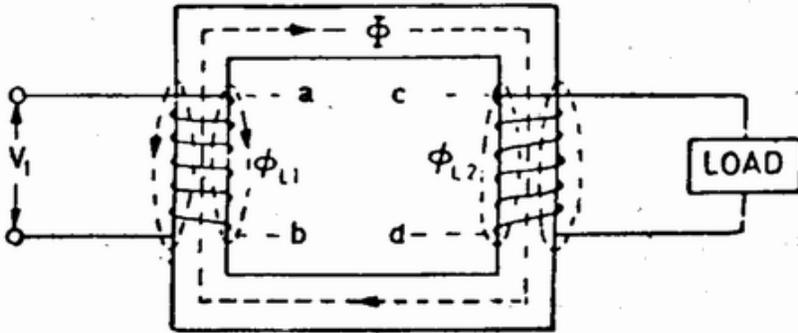
Gambar 2.3 Tahanan ekivalen transformator dengan rugi beban penuh

2.3 Transformator yang memiliki kebocoran magnetik

Pada pembahasan sebelumnya dinyatakan bahwa transformator dianggap telah memiliki rugi beban penuh, selanjutnya untuk mencapai pemahaman kondisi transformator aktual (kenyataan), maka perlu dilakukan tambahan perubahan pada anggapan.

Kini anggap bahwa transformator sudah mencapai kondisi aktualnya, yaitu kini dapat terjadi kejenuhan pada inti besi dan adanya kebocoran fluks pada

kumparnya, sehingga tidak semua fluks magnet yang dihasilkan kumparan akan dapat bersirkulasi di dalam inti besi. Ada sebagian dari fluks magnet yang dihasilkan suatu kumparan yang akan bersirkulasi di luar inti besi sebagaimana tergambar pada Gambar 9.4.



Gambar 2.4 Diagram 1 garis transformator dengan kebocoran fluks magnet

Kebocoran fluks magnet ini terjadi karena adanya sebagian fluks magnet dari g.g.m yang dihasilkan oleh suatu kumparan (primer atau sekunder), yang bergerak mengalir di luar inti besi.

Pada kumparan primer, fluks bocor yang terjadi disebut sebagai fluks bocor primer, yang disimbolkan dengan Φ_{L1} . Besarnya proporsional terhadap $N \times I$ pada kumparan primer saja karena kumparan sekunder tidak berpengaruh terhadap Φ_{L1} , sementara sudut fasa dari Φ_{L1} akan sama dengan sudut fasa I_1 yang menyebabkannya. Φ_{L1} ini akan dapat menginduksikan adanya g.g.l induksi sendiri pada kumparan primer, yang disebut sebagai e_{L1} , selain g.g.l kumparan primer E_1 yang diinduksikan oleh fluks yang tidak bocor pada inti besi.

Pada kumparan sekunder, fluks bocor yang terjadi disebut sebagai fluks bocor sekunder, yang disimbolkan dengan Φ_{L2} . Besarnya proporsional terhadap $N \times I$ pada kumparan sekunder saja karena kumparan primer tidak berpengaruh terhadap Φ_{L2} , sementara sudut fasa dari Φ_{L2} akan sama dengan sudut fasa I_2 yang menyebabkannya.

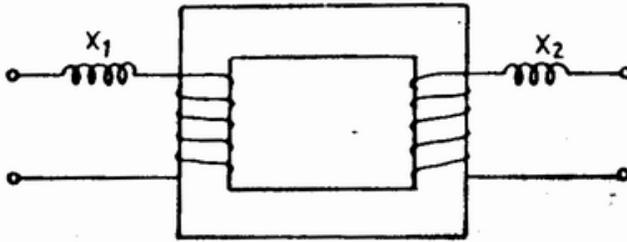
Φ_{L2} ini akan dapat menginduksikan adanya g.g.l induksi sendiri pada kumparan sekunder, yang disebut sebagai e_{L2} , selain g.g.l kumparan sekunder E_2 yang diinduksikan oleh fluks yang tidak bocor pada inti besi.

Perlu diperhatikan bahwa pada saat transformator masih tanpa beban ataupun berbeban ringan, maka karena I_1 dan I_2 sangat kecil maka fluks bocor pada kumparan primer dan sekunder akan dapat diabaikan karena juga bernilai sangat kecil. Namun pada saat transformator berbeban besar maka fluks bocor pada kumparan primer dan sekunder pun menjadi bertambah besar, sehingga tegangan induksi sendiri pada tiap kumparan juga akan bertambah besar. Berdasarkan hukum induksi Faraday bahwa tegangan induksi akan memiliki polaritas yang berlawanan dengan tegangan sumber yang menyebabkannya (penghasil I_1 dan I_2), maka e_{L1} dan e_{L2} akan memiliki polaritas yang berlawanan dengan V_1 . Akibatnya maka e_{L1} dan e_{L2} akan dapat dianggap sebagai jatuh tegangan dari V_1 ke beban, sehingga tegangan induksi sendiri ini dapat juga dianggap merupakan perkalian antara arus dengan suatu reaktansi induktif yang dihasilkan oleh fluks bocor pada tiap kumparan, atau dapat dinyatakan dengan:

$$e_{L1} = I_1 X_1 \quad \text{atau} \quad X_1 = e_{L1} / I_1 \quad (2.11)$$

$$e_{L2} = I_2 X_2 \quad \text{atau} \quad X_2 = e_{L2} / I_2 \quad (2.12)$$

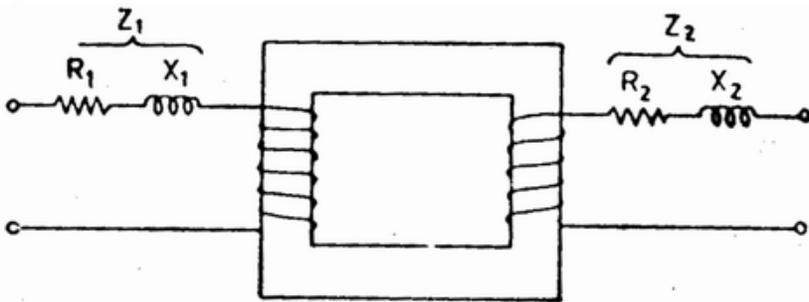
Dimana X_1 dan X_2 disebut sebagai reaktansi bocor dari kumparan primer dan sekunder dan dapat digambarkan pada transformator sebagaimana Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram 1 garis transformator dengan reaktansi bocor

2.4 Transformator dengan tahanan dan reaktansi bocor pada kumparannya

Setelah diketahui bahwa pada kondisi aktual, transformator itu memiliki tahanan dan reaktansi bocor pada kumparannya, maka transformator dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram 1 garis transformator dengan tahanan dan reaktansi bocor pada kumparannya

Sehingga impedansi dari kumparan primer dan sekunder akan dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \text{ atau } Z_1 = \sqrt{(R_1^2 + X_1^2)}$$

(2.13)

dan

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \text{ atau } Z_2 = \sqrt{(R_2^2 + X_2^2)}$$

(2.14)

Impedansi ini akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan antara V_1 dengan E_1 pada kumparan primer dan antara E_2 dengan V_2 pada kumparan sekunder, sehingga akan diperoleh persamaan secara vektoris yaitu :

$$V_1 = -E_1 + I_1(R_1 + jX_1) = -E_1 + I_1Z_1 \quad (2.15)$$

dan

$$E_2 = V_2 + I_2(R_2 + jX_2) = V_2 + I_2Z_2 \quad (2.16)$$

Diagram vektor untuk transformator dengan tahanan dan reaktansi bocor yang diberi berbagai jenis beban dapat dilihat pada Gambar 2.7. Pada diagram tersebut, arah vektor untuk jatuh tegangan resistif (IR) digambar searah terhadap arah vektor I , sementara jatuh tegangan reaktif (IX) digambar pada arah tegak lurus mendahului arah vektor I .

Selain itu, perlu juga diketahui bahwa reaktansi bocor pada suatu kumparan juga dapat dinyatakan pada kumparan lainnya sebagaimana yang telah dilakukan pada tahanan, sehingga akan diperoleh juga bahwa :

$$X_2' = a^2 X_2 \quad (2.17)$$

dan

$$X_1' = (1/a)^2 X_1 = 1/a^2 X_1 \quad (2.18)$$

Sehingga dapat dihitung reaktansi bocor ekivalen dari transformator jika dipandang dari kumparan primer dan sekunder yaitu :

$$X_{01} = X_1 + X_2' = X_1 + a^2 X_2 \quad (2.19)$$

dan

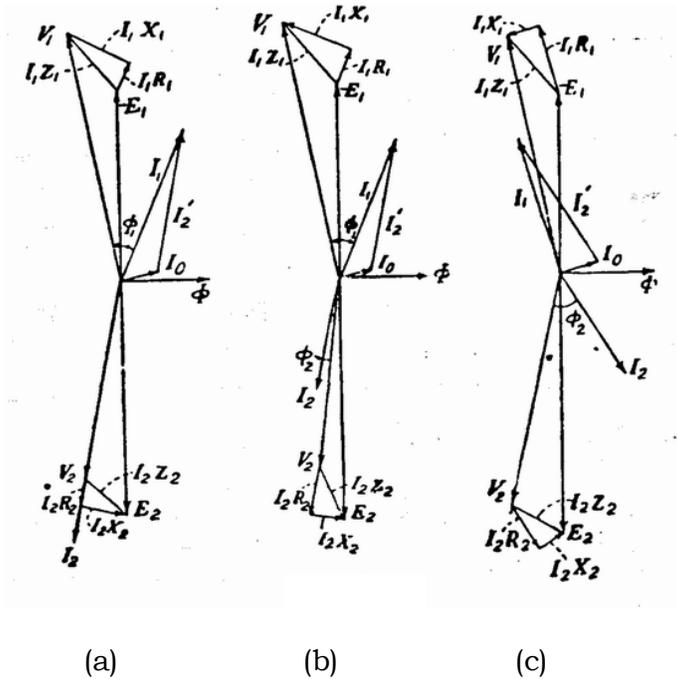
$$X_{02} = X_1' + X_2 = 1/a^2 X_1 + X_2 \quad (2.20)$$

Hasilnya, total impedansi ekivalen dari transformator jika dipandang dari kumparan primer dan sekunder akan menjadi :

$$Z_{01} = R_{01} + jX_{01} \quad (2.21)$$

dan

$$Z_{02} = R_{02} + jX_{02} \quad (2.22)$$



Gambar 2.7 Diagram vektor transformator dengan tahanan dan reaktansi bocor pada kumparannya pada berbagai jenis beban yaitu resistif (a), induktif (b), kapasitif(c)

Kesimpulan

1. Transformator bertambah mendekati kondisi aktualnya, yaitu kini dianggap juga memiliki rugi beban penuh, yaitu rugi tembaga beban penuh (I^2R). Yang dimaksud rugi tembaga beban penuh adalah rugi tembaga yang terjadi pada kumparan primer ($I_1^2R_1$) dan kumparan sekunder ($I_2^2R_2$) pada saat transformator sudah berbeban.
2. Oleh karena kini rugi tembaga (I^2R) pada kumparan primer dan sekunder dianggap ada, itu artinya bahwa nilai tahanan R pada kedua kumparan tersebut juga akan dianggap ada. Dengan adanya tahanan R selain dapat menimbulkan adanya rugi tembaga ternyata juga akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan ($I \times R$) pada kedua kumparan tersebut.

Pustaka

Theraja, B.L, 1993, A Text Book of Electrical Technology, Volume II, AC & DC Machines, Publication Division of Nirja Construction & Development Co. Ltd., Ram Nagar, New Delhi.

BAB III

TRANSFORMATOR TIGA FASA

1.1 Pengertian Transformator Tiga Fasa

Suatu sistem tenaga listrik dalam menjalankan tugasnya yaitu membangkitkan, menyalurkan/mengirimkan dan mendistribusikan tenaga listrik sampai ke pelanggan/beban listrik terdiri dari 3 bagian utama yaitu : sistem pembangkit , sistem transmisi, dan sistem distribusi tenaga listrik.

Suatu sistem pembangkit tenaga listrik yang berukuran besar dalam membangkitkan tenaga listrik umumnya menggunakan suatu generator sinkron tiga fasa sebagai alat pengkonversi tenaga mekanik menjadi tenaga listrik, dengan besar tegangan ac umumnya sekitar 6 kV atau lebih.

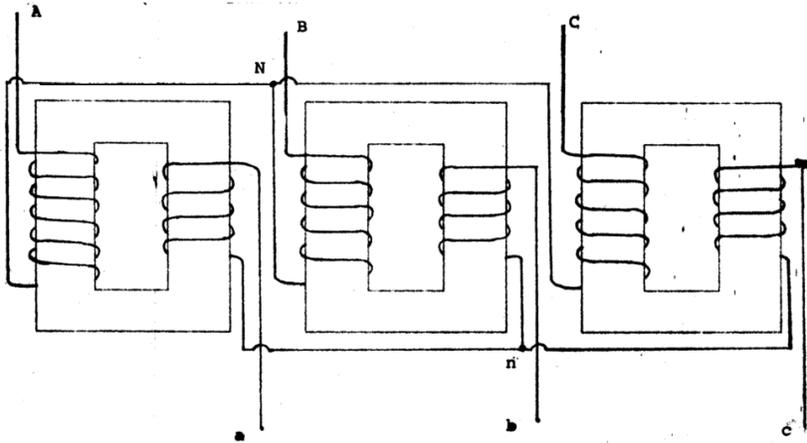
Sementara sistem transmisi tenaga listrik dalam menyalurkan tenaga listrik dari sistem pembangkit ke sistem distribusi tenaga listrik umumnya menggunakan tingkat tegangan (V) yang tinggi yaitu sebesar 70 sampai 150 kV untuk SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) serta 500 kV atau lebih untuk SUTET (Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi). Tingginya tegangan akan memperkecil arus yang mengalir pada saluran transmisi agar terjadi pengurangan rugi-rugi tembaga I^2R (dengan memperkecil arus I, dengan R saluran tetap) yang dapat terjadi pada saluran mengingat besarnya daya ($S = V \times I$ kVA) yang disalurkan.

Pada sistem distribusi tenaga listrik dalam mendistribusikan tenaga listrik dari sistem transmisi ke instalasi beban listrik umumnya menggunakan tingkat tegangan (V) yang menengah yaitu sebesar 20 sampai 6 kV untuk Sistem Distribusi Primer (JTM) sampai tegangan rendah yaitu 380/220 V untuk Sistem Distribusi Sekunder (JTR). Tingkat tegangan ini digunakan mengingat rendahnya tingkat tegangan yang dibutuhkan oleh beban listrik di konsumen, seperti : Radio, TV, dan lain-lain.

Karena tenaga listrik berukuran besar yang dibangkitkan adalah dalam sistem tiga fasa (generator sinkron tiga fasa) maka saluran transmisi pun harus menggunakan sistem tiga fasa untuk dapat dihubungkan dengan sistem pembangkit dan menyalurkannya ke sistem distribusi tenaga listrik. Mengingat tingkat tegangan sistem pembangkit tenaga listrik lebih rendah daripada sistem transmisi tenaga listrik maka antara keduanya akan membutuhkan bantuan transformator sebagai alat yang dapat menaikkan tegangan listrik. Mengingat baik sistem pembangkit maupun sistem transmisi tenaga listrik menggunakan sistem tiga fasa, maka transformator penghubung keduanya pun harus dalam sistem tiga fasa, oleh karena itu transformator yang digunakan adalah transformator tiga fasa. Transformator tiga fasa ini juga dibutuhkan sebagai penurun tegangan dari tenaga listrik yang disalurkan dari sistem transmisi ke sistem distribusi tenaga listrik primer, dan dari sistem distribusi primer ke sistem distribusi sekunder.

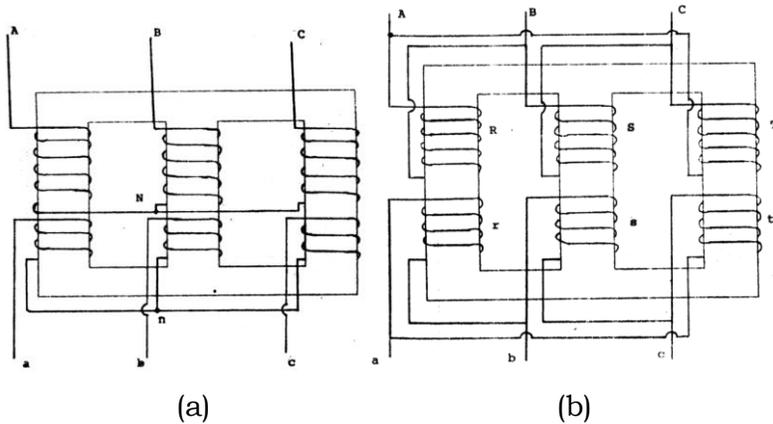
Di awal penggunaannya, karena lebih mudah dalam proses fabrikasinya maka transformator tiga fasa yang banyak digunakan adalah yang dibentuk dari hubungan interkoneksi antara 3 buah transformator 1 fasa yang sama/identik (3 x 1) sebagaimana nampak pada Gambar 3.1. Pada masa kini dengan perkembangan teknologi fabrikasi, transformator tiga fasa yang banyak digunakan adalah yang dibentuk dari 1 buah transformator 3 fasa (1 x 3) sebagaimana nampak pada Gambar 3.2.

Kecenderungan ini karena lebih banyak kelebihan yang dimiliki bentuk ini dibanding bentuk yang pertama.



Gambar 3.1 Transformator tiga fasa yang dibentuk dari hubungan interkoneksi antara 3 buah transformator 1 fasa yang sama/identik (3 x 1)

Kelebihan dari transformator tiga fasa 1 x 3 ini adalah untuk kapasitas daya yang sama, maka transformator tiga fasa 1 x 3 akan membutuhkan ukuran inti besi yang lebih kecil dibanding transformator tiga fasa 3 x 1. Hasilnya karena membutuhkan bahan yang lebih sedikit maka harganya akan lebih murah, bobotnya akan lebih ringan sehingga memudahkan untuk dipindahkan, ia juga akan membutuhkan ruangan yang lebih kecil sehingga tidak menghabiskan tempat.



Gambar 3.2 Transformator tiga fasa yang dibentuk 1 buah transformator 3 fasa (1 x 3) (a) hub. bintang -bintang (b) hub. Segitiga-segitiga

Kekurangan dari transformator tiga fasa 1 x 3 adalah pada saat terjadi gangguan/kerusakan pada salah satu fasanya, maka keseluruhan transformator menjadi tidak bisa digunakan karena keseluruhan transformator tersebut harus diperbaiki terlebih dulu untuk bisa digunakan kembali. Akan tetapi pada transformator tiga fasa 3 x 1 pada saat terjadi gangguan/kerusakan pada salah satu fasanya, maka cukup 1 transformator 1 fasa yang terganggu saja yang diperbaiki sementara 2 transformator 1 fasa yang lain masih bisa digunakan untuk mensuplai tenaga listrik dengan sementara waktu mengoperasikan keduanya menggunakan hubungan open delta tetapi dengan kapasitas yang berkurang dari sebelumnya.

1.2 Hubungan ketiga kumparan fasa pada tiap sisi transformator tiga fasa

Ada 2 macam tipe hubungan antara ke tiga kumparan fasa pada tiap sisi (primer atau sekunder) transformator tiga fasa berdasarkan cara

menghubungkan ujung-ujung kumparan fasa yang satu dengan yang lain, antara lain :

- a. Tipe hubungan bintang/star (Y) , yaitu ujung-ujung akhir tiap kumparan fasa digabung menjadi satu titik yang menjadi titik netral yang umumnya untuk diketanahkan sebagaimana tergambar pada Gambar 3.2 a (tiap sisi trafo).

Berdasarkan diagram 1 garisnya pada Gambar 3.3a , maka pada tipe hubungan ini persamaan yang berlaku :

$$V_L = \sqrt{3} V_f \quad (\text{volt}) \quad (3.1)$$

$$I_L = I_f \quad (\text{ampere}) \quad (3.2)$$

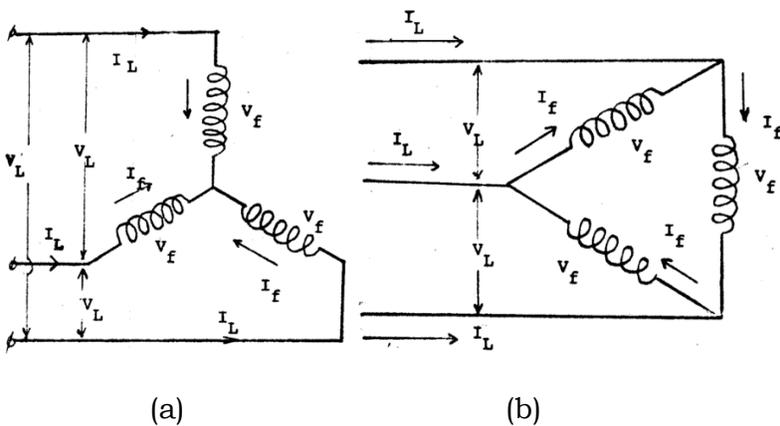
dengan :

V_L = tegangan antar saluran (di luar kumparan) = tegangan line (line to line)

V_f = tegangan dalam kumparan/fasa = tegangan fasa (line to netral)

I_L = arus yang mengalir pada saluran (di luar kumparan) = arus line

I_f = arus yang mengalir di dalam kumparan/fasa = arus fasa



Gambar 3.3 Diagram 1 garis tipe hubungan (a) bintang dan (b) segitiga

- b. Tipe hubungan segitiga/delta (Δ), yaitu ujung akhir dari satu kumparan fasa dihubungkan dengan ujung awal kumparan fasa yang lain, sehingga tidak memiliki titik netral untuk diketanahkan sebagaimana tergambar pada Gambar 3.2 b (tiap sisi trafo). Berdasarkan diagram 1 garisnya pada Gambar 3.3b, maka pada tipe hubungan ini persamaan yang berlaku :

$$V_L = V_f \quad (\text{volt}) \quad (3.3)$$

$$I_L = \sqrt{3} I_f \quad (\text{ampere}) \quad (3.4)$$

Kedua tipe hubungan antara ke tiga kumparan fasa dapat diterapkan pada tiap sisi (primer atau sekunder) transformator tiga fasa. Kedua tipe dapat dikombinasikan satu sama lain untuk menghasilkan hubungan primer – sekunder dari suatu transformator tiga fasa. Kombinasi ini ditentukan berdasarkan kebutuhan besar tegangan dan arus fasa dan line antara sisi primer terhadap sisi sekunder pada suatu bagian dari sistem tenaga listrik yang membutuhkan transformator tiga fasa dengan tingkat perubahan tegangan tertentu.

1.3 Hubungan antara sisi primer dengan sekunder transformator 3 fasa

Ada 4 tipe hubungan antara sisi primer dengan sisi sekunder dari transformator tiga fasa berdasarkan kombinasi dari ke 2 tipe hubungan antara ke tiga kumparan fasa pada tiap sisi (primer atau sekunder) yang telah dibahas sebelumnya, antara lain :

1. Hubungan bintang dengan bintang
2. Hubungan segitiga dengan segitiga
3. Hubungan bintang dengan segitiga
4. Hubungan segitiga dengan bintang

Selanjutnya akan dibahas satu per satu ke empat tipe hubungan antara sisi primer dengan sisi sekunder dari transformator tiga fasa.

1.3.1 Hubungan bintang dengan bintang

Hubungan ini adalah tipe hubungan yang paling ekonomis untuk menghasilkan transformator tiga fasa dengan tingkat tegangan keluaran yang tinggi tetapi dengan kapasitas arus yang kecil ($S = V \times I$).

Hal ini karena untuk menghasilkan tingkat V_L yang sama, maka tegangan per fasa ($\approx V_f$) yang diperlukan lebih sedikit dibanding tipe hubungan lainnya mengingat pada tipe hubungan ini $V_L = \sqrt{3}V_f$ atau $V_f = V_L / \sqrt{3}$ baik pada sisi primer maupun sekunder, sebagaimana tergambar pada Gambar 3.4a. Dengan tegangan per fasa lebih kecil maka jumlah lilitan dan tingkat isolasi lilitan ke inti besi yang dibutuhkan juga menjadi lebih sedikit sehingga biayanya menjadi lebih murah.

Perbandingan tegangan line antara sisi primer dengan sisi sekunder akan sama dengan perbandingan tegangan kumparan/fasa (perbandingan tegangan kumparan/fasa = perbandingan lilitan = perbandingan/rasio transformasi) dari transformator yaitu :

$$V_{L1}/V_{L2} = V_{f1}/V_{f2} = a \quad (3.5)$$

1.3.2 Hubungan segitiga dengan segitiga

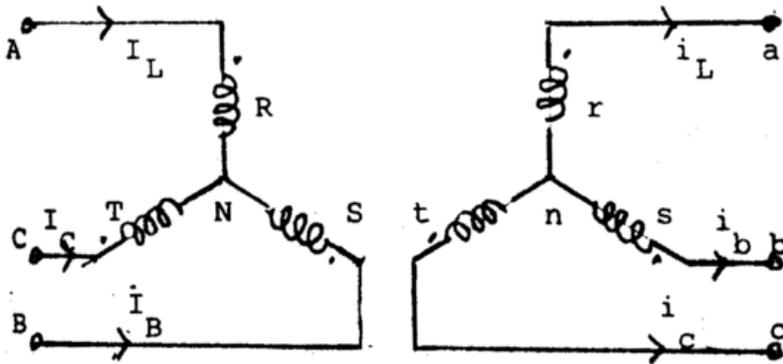
Hubungan ini adalah tipe hubungan yang paling ekonomis untuk menghasilkan transformator tiga fasa dengan tingkat tegangan yang rendah tetapi dengan kapasitas keluaran arus yang besar ($S = V \times I$).

Hal ini karena untuk menghasilkan tingkat I_L yang sama, maka arus per fasa ($\approx I_f$) yang diperlukan lebih sedikit dibanding tipe hubungan lainnya mengingat pada tipe hubungan ini $I_L = \sqrt{3}I_f$ atau $I_f = I_L / \sqrt{3}$ baik pada

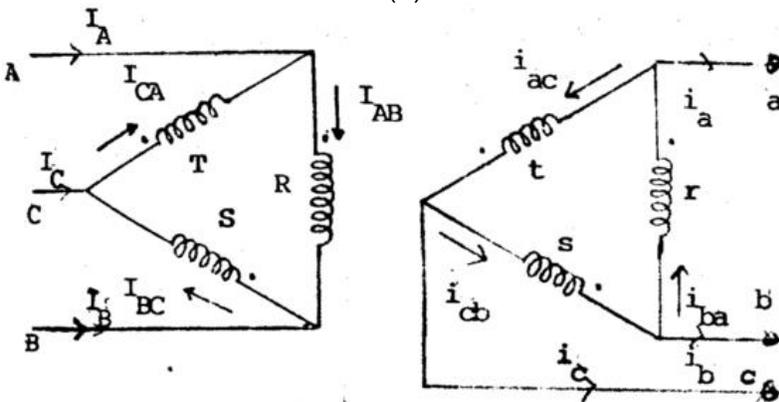
sisi primer maupun sekunder sebagaimana tergambar pada Gambar 3.4b. Dengan arus per fasa lebih kecil maka ukuran konduktor yang dibutuhkan juga menjadi lebih kecil sehingga biayanya lebih murah.

Perbandingan arus line antara sisi primer dengan sisi sekunder akan sama dengan perbandingan arus kumparan/fasa dari transformator yaitu :

$$I_{L1}/I_{L2} = I_{f1}/I_{f2} = 1/a \quad (3.6)$$



(a)



(b)

Gambar 3.4 Tipe hubungan (a) bintang dengan bintang (b) segitiga dengan segitiga

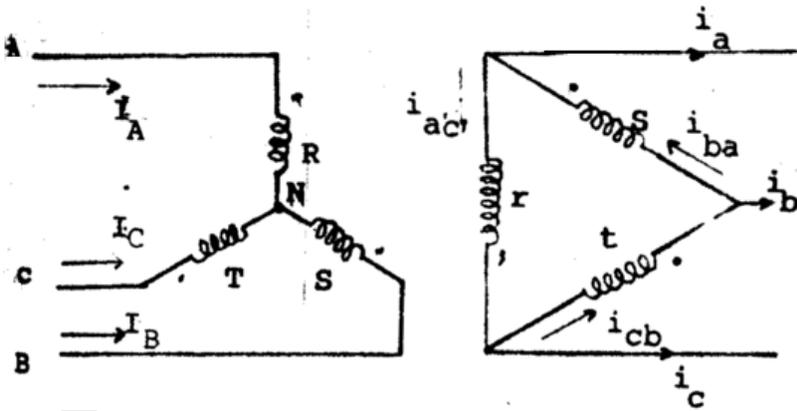
1.3.3 Hubungan bintang dengan segitiga

Hubungan ini secara teknis paling sesuai untuk digunakan pada ujung akhir dari sistem transmisi yaitu pada transformator dari gardu induk distribusi yang berfungsi untuk menurunkan tegangan tenaga listrik dari sistem transmisi ke sistem distribusi sebagaimana tergambar pada Gambar 3.5a.

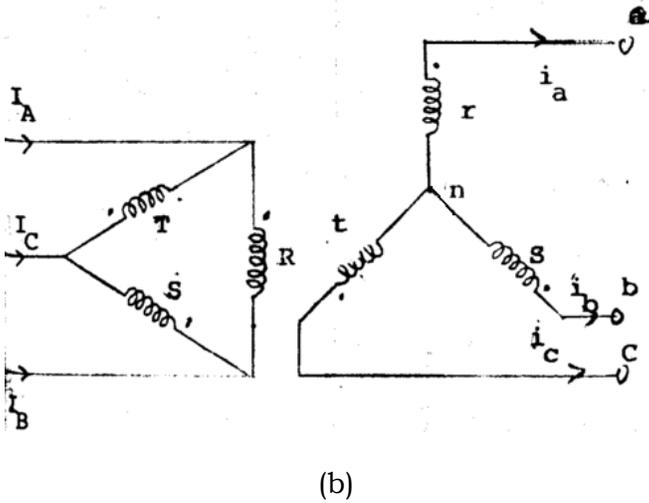
Perbandingan antara tegangan line sisi primer dengan sekunder adalah $\sqrt{3}$ kali perbandingan tegangan fasanya, yaitu:

$$V_{L1}/V_{L2} = \sqrt{3} (V_{f1}/V_{f2}) = a\sqrt{3} \quad (3.7)$$

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa tipe hubungan ini sesuai untuk digunakan sebagai transformator penurun tegangan karena nilai perbandingan transformasi (a) transformator penurun tegangan yang umumnya > 1 ($V_{f1} > V_{f2}$) akan semakin diperbesar dengan perkaliannya dengan $\sqrt{3}$. Hasilnya dengan nilai a yang sama, hubungan ini akan menghasilkan perbandingan penurunan tegangan line V_{L1}/V_{L2} yang lebih besar dari hubungan lainnya.



(a)



Gambar 3.5 Tipe hubungan (a) bintang dengan segitiga (b) segitiga dengan bintang

1.3.4 Hubungan segitiga dengan bintang

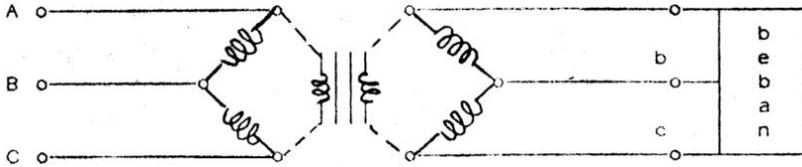
Hubungan ini secara teknis paling sesuai untuk digunakan pada ujung awal dari sistem transmisi yaitu pada transformator dari gardu induk transmisi yang berfungsi untuk menaikkan tegangan tenaga listrik dari sistem pembangkit ke sistem transmisi sebagaimana tergambar pada Gambar 3.5b.

Perbandingan antara tegangan line sisi primer dengan sekunder adalah $1/\sqrt{3}$ kali perbandingan tegangan fasanya, yaitu:

$$V_{L1}/V_{L2} = (1/\sqrt{3}) (V_{f1}/V_{f2}) = a/\sqrt{3} \quad (3.8)$$

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa tipe hubungan ini sesuai untuk digunakan sebagai transformator penaik tegangan karena nilai perbandingan transformasi (a) transformator penaik tegangan yang umumnya < 1 ($V_{f1} < V_{f2}$) akan semakin diperkecil dengan perkaliannya dengan $1/\sqrt{3}$. Hasilnya dengan nilai a yang sama, hubungan ini akan menghasilkan perbandingan penaikan tegangan line V_{L1}/V_{L2} yang lebih besar dari hubungan lainnya.

1.4 Transformator tiga fasa hubungan open delta (V – V)



Gambar 3.6. Transformator tiga fasa hubungan open delta (V – V)

Sebagai tambahan ada satu lagi tipe hubungan antara sisi primer dengan sekunder transformator 3 fasa yang juga terkadang digunakan yaitu yang disebut sebagai transformator tiga fasa hubungan open delta (V-V) sebagaimana tergambar pada Gambar. 3.6. Hubungan ini akan terbentuk apabila salah satu transformator 1 fasa dari transformator tiga fasa (konstruksi 3 x 1) tipe hubungan segitiga – segitiga dilepaskan namun kedua transformator 1 fasa lainnya tetap dioperasikan, dengan menghubungkan sisi primernya ke sumber tegangan ac 3 fasa dan sisi sekundernya ke beban listrik 3 fasa. Hubungan ini umumnya digunakan pada saat :

1. Beban listrik tiga fasa yang terhubung pada transformator tiga fasa hubungan segitiga-segitiga, kapasitasnya berukuran terlalu kecil dibanding kapasitas dari transformator.
2. Salah satu transformator 1 fasa dari transformator tiga fasa hubungan segitiga – segitiga mengalami kerusakan sehingga memerlukan perawatan/perbaikan, namun kedua transformator 1 fasa lainnya masih dapat digunakan untuk mensuplai beban, tetapi akan terjadi pengurangan pada kapasitas daya dibanding sebelumnya.
3. Transformator ini digunakan untuk mengantisipasi perkembangan beban di masa datang, apabila suatu saat beban bertambah maka hubungannya akan dirubah menjadi hubungan segitiga – segitiga sehingga kapasitas transformator juga akan

bertambah besar dibanding saat dihubung open delta.

Dari Gambar 3.6 dapat dilihat bahwa terjadi perubahan pada hubungan antara arus line dengan arus fasanya dibanding pada hubungan segitiga-segitiga ($I_L = \sqrt{3}I_f$), dimana kini $I_f = I_L$. Hal ini menyebabkan akan terjadi penurunan kapasitas daya kVA pada transformator open delta dibandingkan dengan transformator hubungan segitiga – segitiga, yaitu dengan berdasarkan perbandingan persamaan kVA sebagai berikut :

$$\frac{kVA(V - V)}{kVA(\Delta - \Delta)} = \frac{\sqrt{3}V_l I_l}{\sqrt{3}V_l I_l} = \frac{\sqrt{3}V_l I_f}{\sqrt{3}V_l (\sqrt{3}I_f)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (3.9)$$

Sehingga

$$\begin{aligned} kVA(V - V) &= \frac{1}{\sqrt{3}} \times kVA(\Delta - \Delta) \\ &= 0,58 \times kVA(\Delta - \Delta) \\ &= 58\% \times kVA(\Delta - \Delta) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Dengan

V_L = tegangan line transformator (volt)

I_L = arus line (ampere)

I_f = arus fasa (ampere)

Kesimpulan

1. Mengingat baik sistem pembangkit maupun sistem transmisi tenaga listrik menggunakan sistem tiga fasa, maka transformator penghubung keduanya pun harus dalam sistem tiga fasa, oleh karena itu transformator yang digunakan adalah transformator tiga fasa. Transformator tiga fasa ini juga dibutuhkan sebagai penurun tegangan dari tenaga listrik yang disalurkan dari sistem transmisi ke sistem distribusi tenaga listrik primer, dan dari sistem distribusi primer ke sistem distribusi sekunder.
2. Ada 4 tipe hubungan antara sisi primer dengan sisi sekunder dari transformator tiga fasa berdasarkan kombinasi dari ke 2 tipe hubungan antara ke tiga kumparan fasa pada tiap sisi (primer atau sekunder) yang telah dibahas sebelumnya, antara lain : Hubungan bintang dengan bintang, Hubungan segitiga dengan segitiga, Hubungan bintang dengan segitiga, Hubungan segitiga dengan bintang

Pustaka

Theraja, B.L, 1993, A Text Book of Electrical Technology, Volume II, AC & DC Machines, Publication Division of Nirja Construction & Development Co. Ltd., Ram Nagar, New Delhi.

BAB IV

TRANSFORMATOR ELEKTRONIK (SOLID STATE TRANSFORMER)

4.1 Pendahuluan

Smart grid masa depan dirancang untuk mengurangi atau menghindari konsekuensi yang berasal dari penurunan kualitas daya (contoh: kedip tegangan), meningkatkan indeks keandalan (contoh: mengurangi jumlah interupsi dan durasinya), dan meningkatkan efisiensi (contoh: mengurangi kerugian). Komponen kunci untuk smart grid di masa depan adalah solid-state transformer (SST), SST menyediakan cara baru untuk mengendalikan penyaluran listrik dan juga menambah fungsi-fungsi baru ke jaringan distribusi seperti kompensasi daya reaktif, membatasi arus hubung singkat atau kompensasi kedip tegangan. Namun, harus dipertimbangkan bahwa semua fungsi ini akan tercapai dengan harga sistem yang lebih kompleks dan mahal. SST diperkirakan akan memainkan peran kunci dalam penggantian transformator frekuensi rendah konvensional.

Kelemahan utama transformator besi dan tembaga konvensional antara lain:

1. Desain memiliki ukuran besar dan berat,

2. Dapat menimbulkan masalah lingkungan jika terjadi kebocoran minyak mineral
3. Jatuh tegangan karena beban,
4. Tidak mampu untuk mengurangi kedipan tegangan,
5. Sensitif terhadap harmonik,
6. Tidak mampu mengubah layanan satu fase menjadi tiga fase untuk memberi daya pada jenis peralatan tertentu,
7. Tidak ada kapasitas penyimpanan energi,
8. Karakteristik tegangan yang tidak diinginkan (contoh : kedip tegangan, atau gangguan) di satu sisi disebarkan ke sisi lain,
9. Rugi-rugi trafo konvensional relatif tinggi pada tingkat beban rata-rata.

Manfaat utama SST dibandingkan dengan transformator konvensional antara lain:

1. Ukuran dan berat lebih kecil,
2. Kontrol cepat dari aliran daya aktif dua arah,
3. Meningkatkan kinerja kualitas daya,
4. Integrasi yang mudah dari sumber daya yang didistribusikan,
5. Mengoreksi faktor daya,
6. Kontrol daya reaktif di kedua sisi sst,
7. Penyeimbangan otomatis dan frekuensi yang variabel,
8. Pengaturan tegangan secara instan,
9. Kompensasi jatuh tegangan
10. Kompensasi harmonik,
11. Isolasi gangguan antara sisi primer dan sekunder.

Namun, SST juga memiliki beberapa kelemahan dibanding transformator konvensional, antara lain:

1. Biaya SST lebih tinggi, diperlukan semikonduktor daya tinggi bertegangan tinggi dan dapat diandalkan untuk dapat bersaing dengan transformator konvensional.
2. SST memiliki efisiensi yang lebih rendah karena rugi-rugi pada semikonduktor.
3. SST memiliki desain yang lebih canggih, dan ini menambah beberapa risiko dalam hal keandalan.
4. SST menunjukkan EMI lebih tinggi, membutuhkan desain yang lebih baik untuk mengurangi dampak ini.

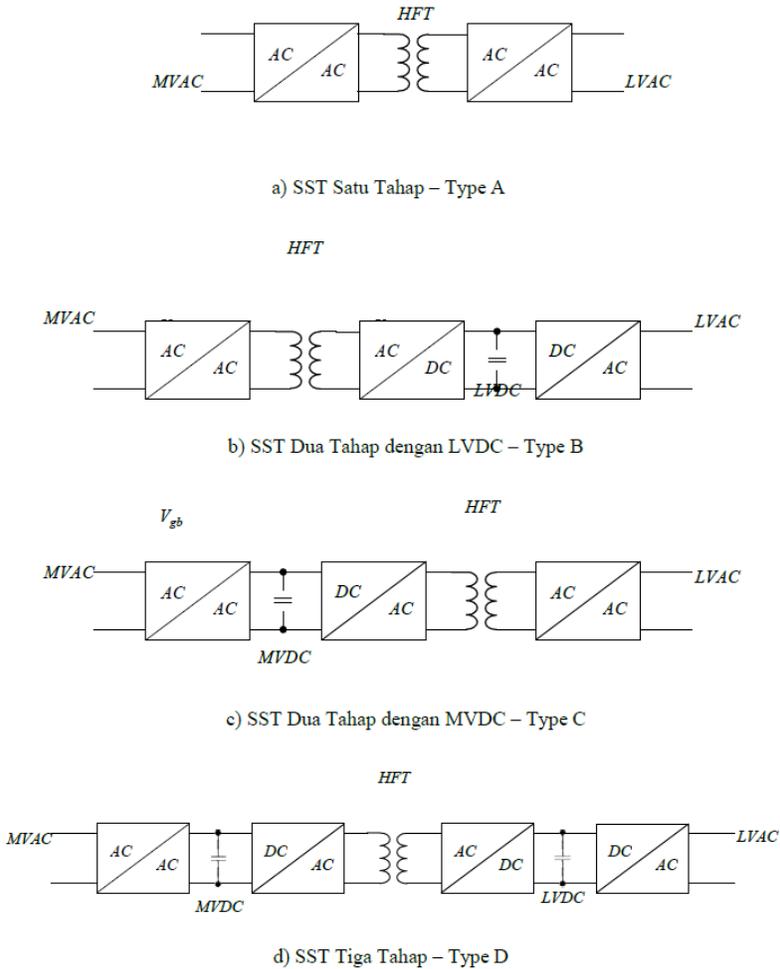
Dalam beberapa tahun terakhir, perangkat elektronik daya frekuensi tinggi dengan daya tinggi, dan rugi daya rendah tersedia dengan harga lebih murah. Keunggulan SST yang dikombinasikan dengan perangkat elektronik berdaya murah dapat mendukung kelayakan ekonomi SST untuk mengganti trafo konvensional. Kombinasi dari semua aspek ini dengan kemampuan dan keunggulan yang ditawarkan oleh perangkat ini juga telah mempromosikan penelitian yang signifikan dalam pengembangan dan penerapan SST.

4.2 Definisi dan Organisasi SST

Ide "solid state transformer" telah dibahas sejak 1970. Tujuan awalnya adalah mengubah AC ke AC untuk peningkatan atau penurunan dengan cara yang mirip dengan yang dilakukan oleh transformator konvensional. Pada tahun 1970, W. McMurray dari General Electric pertama kali memperkenalkan konverter AC / AC frekuensi tinggi, yang menjadi dasar untuk transformator keadaan padat berdasarkan konverter AC / AC langsung. Literatur yang signifikan telah diterbitkan sejak saat itu untuk mempelajari desain, operasi dan kontrol solid state transformer [1,14]. Meskipun ide SST dapat digunakan untuk perangkat

yang bekerja pada tegangan apa pun di sisi primer dan sekunder, umumnya diasumsikan perangkat ini dirancang sebagai antarmuka antara sistem yang bekerja pada tegangan menengah dan rendah. Beberapa struktur dapat mewujudkan fungsi konversi AC-AC yang terisolasi agar berpotensi sesuai dengan peran SST dalam sistem distribusi. Empat konfigurasi dasar SST terkait dengan aplikasi tertentu:

1. SST satu tahap (tanpa kapasitansi DC link): secara langsung mengubah tegangan AC menengah (MVAC) menjadi tegangan AC rendah (LVAV) dengan transformator frekuensi tinggi sebagai isolasi.
2. SST dua tahap (dengan tautan DC di sisi LV): MVAC dikonversi ke LVDC pada tahap pertama dan kemudian LVDC dikonversi ke LVAC oleh inverter.
3. SST dua tahap (dengan DC link di sisi MV): pada tahap pertama MVAC dikonversi ke MVDC melalui AC / DC rectifier, kemudian pada tahap kedua MVDC dikonversi ke LVAC tanpa menggunakan kapasitansi DC link tegangan rendah.
4. SST tiga tahap SST: MVAC dikonversi ke MVDC di tahap pertama, MVDC dikonversi ke LVDC melalui jembatan aktif ganda (DAB) di tahap kedua, dan akhirnya LVDC dikonversi ke LVAC di tahap ketiga.



Gambar 4.1. Klasifikasi topologi SST

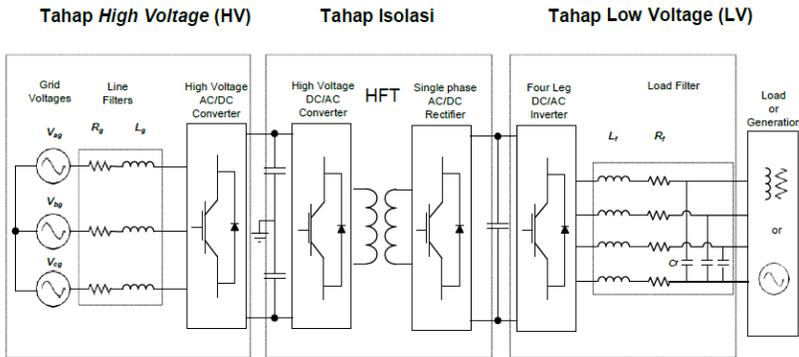
Gambar 4.1 menunjukkan empat konfigurasi topologi dasar, yaitu tipe A, B, C, dan D, yang dapat disesuaikan dengan fungsi SST. Sebagian besar konfigurasi SST yang dirancang untuk aplikasi lapangan telah mengadopsi tipe D karena banyak topologi yang cocok dapat dipilih untuk setiap tahap yang

menyediakan ruang untuk mengoptimalkan kinerjanya. Terdapat enam topologi SST yang banyak digunakan:

1. SST satu tahap yang terdiri dari modul konverter jembatan penuh AC-AC.
2. SST satu tahap yang terdiri dari modul konverter *flyback* AC-AC.
3. SST dua tahap yang terdiri dari modul konverter *boost* terisolasi AC-DC dan pulsa dengan inverter fase-termodulasi (PWM).
4. SST dua tahap yang terdiri dari modul konverter dual-aktif AC-DC (DAB) dan inverter fase-ganda PWM.
5. SST tiga tahap yang terdiri dari penyearah bertingkat *cascaded-full-bridge*, modul DC-DC DAB dan inverter fase-ganda PWM.
6. SST tiga tahap yang terdiri dari penyearah bertingkat *diode-clamped*, konverter jembatan penuh DC-DC dan inverter fase ganda PWM.

Desain SST tiga tahap dapat direncanakan seperti pada Gambar 4.2. Desain ini menggunakan dua jembatan konverter semikonduktor dan satu transformator di antaranya. Konverter pertama terhubung ke sisi MV dan mengubah tegangan AC tiga fase, dengan frekuensi 50 atau 60 HZ, menjadi tegangan DC di tautan MV DC. Tegangan DC kemudian dikonversi kembali ke AC, tetapi dengan frekuensi yang lebih tinggi, pada bagian kedua jembatan MV-converter. Berkat frekuensi AC yang lebih tinggi, sifat magnetik inti transformator lebih baik digunakan dan transformator dapat dibuat lebih kecil dengan tetap mempertahankan kemampuan daya yang sama. Di sisi LV, jembatan konverter kedua mengubah tegangan AC frekuensi tinggi pertama menjadi DC dan kemudian kembali ke frekuensi daya spesifik, 50 atau 60 Hz. Seperti dapat dilihat dari Gambar 4.2, SST menggunakan konverter elektronik daya bersama dengan transformator frekuensi tinggi untuk mengubah tegangan menengah atau tinggi di sisi primer ke tegangan rendah di sisi sekunder. Hasilnya adalah keluaran yang memberikan utilitas peningkatan

kemampuan pengendalian pada grid, dikombinasikan dengan penurunan ukuran dan berat. Desain yang sama atau sangat mirip dapat digunakan untuk mendapatkan bentuk gelombang sisi sekunder DC atau bentuk gelombang AC frekuensi tinggi.



Gambar 4.2. Konfigurasi skematis SST tiga tahap.

Analisis terperinci topologi dan strategi kontrol yang diusulkan untuk desain SST tiga tahap dirangkum dalam Tabel 4.1. Menurut tabel, konverter MMC dapat memberikan topologi yang efektif untuk sisi MV SST. Keunggulan utama mereka adalah pada aspek modularitas dan skalabilitas. Tingkat tegangan yang diinginkan dapat dengan mudah dicapai dengan koneksi seri sub-modul MMC (SM). Selain itu, topologi MMC dapat memberikan kualitas dan efisiensi daya tinggi dengan berkurangnya ukuran filter pasif. Fitur-fitur ini menjadikan opsi MMC topologi yang menarik untuk tahap MV SST. Selain itu, dari informasi yang disajikan dalam tabel, terbukti bahwa level shifted PWM (LS-PWM) adalah metode modulasi yang cocok untuk MMC karena algoritma yang sederhana dan persyaratan perangkat keras yang minimal.

Tabel 4.1. Perbandingan antara topologi dan strategi kontrol

Topologi/Kontrol	Kelebihan	Kekurangan
Tahap Input AC-DC MV		
Topologi Konverter		
Flying Capacitor (FC)	Modularitas	Level output yang lebih tinggi membutuhkan sejumlah besar kapasitor Kontrol yang kompleks Kontrol keseimbangan tegangan yang kompleks
Cascade H-Bridge (CHB)	Kontrol sederhana Kontrol keseimbangan tegangan sederhana Modularitas	Tidak menghasilkan High voltage DC-link
H-bridge NPC (HNPC)		Kontrol yang kompleks Kontrol keseimbangan tegangan yang kompleks Modularitas terbatas
Multilevel Active NPC (ML-ANPC)	Modularitas	Jumlah clamped-diode meningkat dengan kuadrat tingkat output Kontrol keseimbangan tegangan yang kompleks
Transistor	Kontrol sederhana	Perlu banyak

Clamped (TTC)	Modularitas	transistor Kontrol keseimbangan tegangan yang kompleks
Modular Multilevel Converter (MMC)	Modularitas dan fleksibilitas	Kontrol yang kompleks Kontrol keseimbangan tegangan yang kompleks
Strategi Kontrol		
Phase Shifted PWM (PS-PWM)	Algoritma control sederhana Kebutuhan perangkat keras minimal Setiap sel mudah dikontrol karena diatur oleh sepasang pembawa	
Level Shifted PWM (LS-PWM)	Algoritma control sederhana Kebutuhan perangkat keras minimal Peredaman harmonic yang sedikit lebih baik	
Tahap Isolasi DC-DC MV/LV		
Topologi Konverter		
Single-phase Dual Active Bridge	Lebih sedikit komponen pasif Efficiency bagus	Dapat menimbulkan arus kapasitor DC RMS yang besar

converter		
Three-phase Dual Active Bridge converter	<p>Dapat menimbulkan arus kapasitor DC RMS yang lebih kecil</p> <p>Rating komponen lebih rendah</p> <p>Tidak memerlukan inductor tambahan</p>	<p>Banyak memerlukan saklar dan inductor</p> <p>Rugi daya lebih besar</p>
Bidirectional Isolated Full Bridge converter	<p>Frekuensi pensaklaran dan kerapatan daya yang lebih tinggi</p>	<p>Memerlukan inductor tambahan</p> <p>Memerlukan rangkaian snubber</p>
Bidirectional Isolated Current Doubler topology	<p>Mampu menangani arus yang tinggi</p> <p>Rugi konduksi yang lebih rendah</p> <p>Jumlah saklar lebih sedikit</p>	<p>Memerlukan dua inductor tambahan</p> <p>Tegangan operasi yang terbatas</p>
Bidirectional Isolated Push-Pull topology	<p>Mampu menangani arus yang tinggi</p> <p>Mengurangi kebutuhan inductor</p>	<p>Penggunaan transformator kompleks yang tidak efektif</p>

	Memerlukan saklar yang lebih sedikit	
Strategi Kontrol		
Phase Shift Modulation	Algoritma dan control sederhana	Rugi daya lebih tinggi pada level daya rendah
Trapezoidal Modulation	Mencapai jangkauan tegangan tinggi	Tidak dapat beroperasi pada beban nol
Triangular Modulation	Rugi pensaklaran yang rendah	Arus RMS tinggi
Tahap Keluaran DC-AC LV		
Topologi Konverter		
1P-3W converter	Dapat menangani beban tak seimbang	Banyak memerlukan saklar
3P converter	Rangkaian dan control sederhana	Ketidakseimbangan DC-link
3P-4L converter	Dapat menangani beban tak seimbang	Kontrol kompleks
Strategi Kontrol		
3D Space Vector PWM (3D-SVPWM)	Implementasinya sulit	Rugi pensaklaran sedang
Continuous PWM (CPWM)	Rugi pensaklaran sedang Implementasinya mudah	
Discontinuous PWM (DPWM)	Implementasinya sulit	Rugi pensaklaran cukup rendah

Kesimpulan

1. *Smart grid* masa depan dirancang untuk mengurangi atau menghindari konsekuensi yang berasal dari penurunan kualitas daya (contoh: kedip tegangan), meningkatkan indeks keandalan (contoh: mengurangi jumlah interupsi dan durasinya), dan meningkatkan efisiensi (contoh: mengurangi kerugian). Komponen kunci untuk *smart grid* di masa depan adalah solid-state transformer (SST), SST menyediakan cara baru untuk mengendalikan penyaluran listrik dan juga menambah fungsi-fungsi baru ke jaringan distribusi seperti kompensasi daya reaktif, membatasi arus hubung singkat atau kompensasi kedip tegangan.
2. Beberapa struktur dapat mewujudkan fungsi konversi AC-AC yang terisolasi agar berpotensi sesuai dengan peran SST dalam sistem distribusi. Empat konfigurasi dasar SST terkait dengan aplikasi tertentu:
 - a. SST satu tahap (tanpa kapasitansi DC link): secara langsung mengubah tegangan AC menengah (MVAC) menjadi tegangan AC rendah (LVAV) dengan transformator frekuensi tinggi sebagai isolasi.
 - b. SST dua tahap (dengan tautan DC di sisi LV): MVAC dikonversi ke LVDC pada tahap pertama dan kemudian LVDC dikonversi ke LVAC oleh inverter.
 - c. SST dua tahap (dengan DC link di sisi MV): pada tahap pertama MVAC dikonversi ke MVDC melalui AC / DC rectifier, kemudian pada tahap kedua MVDC dikonversi ke LVAC tanpa menggunakan kapasitansi DC link tegangan rendah.
 - d. SST tiga tahap SST: MVAC dikonversi ke MVDC di tahap pertama, MVDC dikonversi ke LVDC melalui jembatan aktif ganda (DAB) di tahap kedua, dan akhirnya LVDC dikonversi ke LVAC di tahap ketiga.

Pustaka

Firouzjaee, M., 2018, Advanced Modeling Of Solid State Transformer, Phd Thesis, Universitat Politècnica De Catalunya, Barcelona

BAB V

EFEK FREKUENSI TINGGI PADA KUMPARAN TRANSFORMATOR

5.1 Pendahuluan

Mengoperasikan transformator pada frekuensi tinggi memiliki keuntungan dan kerugian. Keuntungan yang diperoleh bahwa ia akan dapat mengurangi ukuran transformator, namun kerugiannya adalah adanya rugi-rugi tambahan yang timbul pada transformator saat dioperasikan pada frekuensi tinggi. Tambahan rugi-rugi ini berkontribusi pada kenaikan suhu, dan inti yang lebih besar akan diperlukan untuk meningkatkan area permukaan sehingga dapat meningkatkan pembuangan panas transformator. Pemahaman yang tepat tentang efek frekuensi tinggi diperlukan untuk memastikan keseimbangan antara aspek pengurangan ukuran dan peningkatan kerugian.

Diketahui bahwa bahwa suatu desain optimal transformator adalah yang memiliki rugi inti besi yang hampir sama besarnya dengan rugi tembaga pada transformator tersebut. Metodologi untuk desain transformator yang telah dikembangkan mengasumsikan bahwa rugi tembaga disebabkan oleh adanya tahanan DC dari kumparan transformator. Pada kenyataannya, dan khususnya untuk aplikasi elektronika daya, operasi frekuensi tinggi menyebabkan peningkatan rugi-rugi AC akibat adanya efek kulit dan pendekatan.

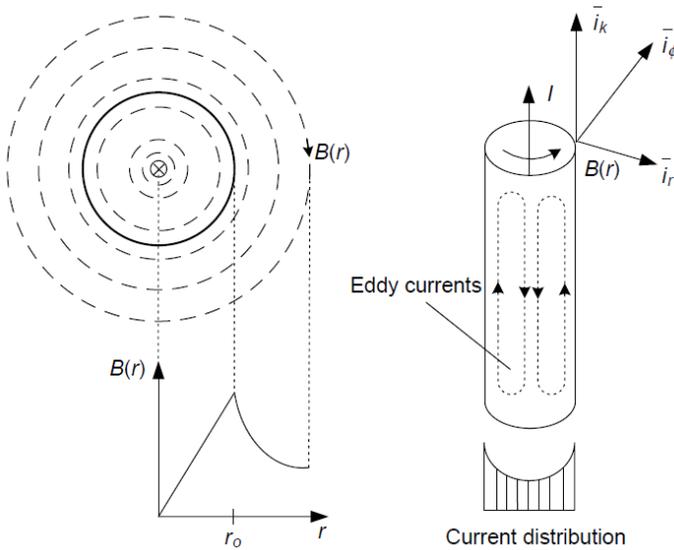
Efek kulit dan efek pendekatan menimbulkan peningkatan rugi-rugi pada konduktor, karena distribusi arus yang tidak seragam pada konduktor. Efek ini adalah akibat langsung dari hukum Faraday, di mana arus eddy diinduksi untuk menentang fluks yang dibuat dalam kumparan oleh arus AC.

Secara umum, formula terkenal Dowell digunakan untuk menghitung kehilangan efek frekuensi tinggi dengan eksitasi sinusoidal. Formula Dowell dikembangkan untuk memperhitungkan bentuk gelombang arus yang ditemui dalam pasokan daya mode sakelar dengan menghitung rugi pada frekuensi individu pada deret Fourier. Rugi total yang dihasilkan dapat dihitung untuk kisaran ketebalan lapisan kumparan, dan ketebalan lapisan optimal dapat dibuat secara grafis. Dengan menggunakan pendekatan yang lebih mudah, berdasarkan turunan dari bentuk gelombang arus, akan menghasilkan ekspresi sederhana untuk ketebalan lapisan optimal dalam suatu kumparan banyak lapis.

Konduktor bulat terisolasi yang membawa arus AC menghasilkan medan magnet bolak balik konsentris yang, pada gilirannya, menginduksi arus eddy (hukum Faraday). Gambar 5.1 menunjukkan distribusi medan magnet pada frekuensi rendah.

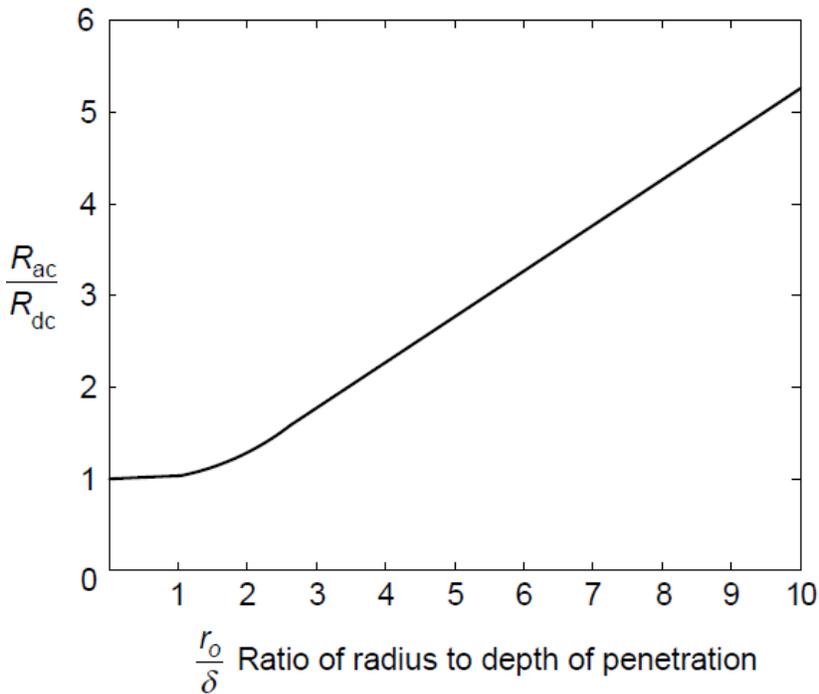
$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} \quad (5.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (5.2)$$



Gambar 5.1 Arus Eddy pada konduktor berbentuk lingkaran

Arus eddy melawan arah fluks, dan distribusi arus yang dihasilkan berarti bahwa arus eddy memperkecil sebagian arus di pusat konduktor, sekaligus meningkatkan arus di dekat permukaan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1. Efek secara keseluruhan adalah bahwa keseluruhan arus mengalir di area berbentuk lingkaran yang lebih kecil. Pada frekuensi tinggi, arus mengalir dalam silinder berbentuk lingkaran yang ekuivalen di permukaan, dengan ketebalan d , yang disebut kedalaman kulit.



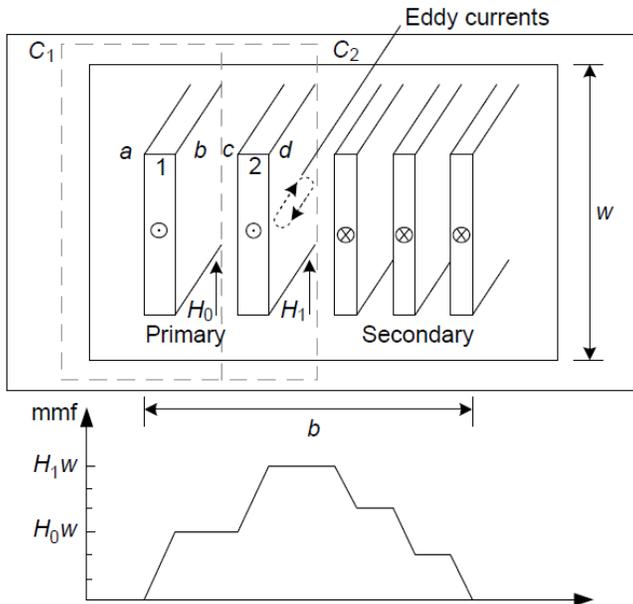
Gambar 5.2 Grafik perbandingan R_{ac}/R_{dc} akibat efek kulit.

R_{dc} adalah resistansi DC dari konduktor per satuan panjang. Kami sekarang memiliki bentuk impedansi internal konduktor yang sangat padat. Resistansi AC diberikan oleh bagian nyata dari Z_i dan reaktansi induktif internal diberikan oleh bagian imajiner dari Z_i .

5.2 Faktor Efek Kedekatan

Efek kedekatan muncul ketika distribusi arus dalam satu lapisan dari belitan mempengaruhi distribusi arus di lapisan lain. Dapat dilihat pada transformator yang digambarkan pada Gambar 5.3, yang memiliki belitan primer dua lapis, setiap lapisan membawa arus I . Dengan asumsi bahan magnetik ideal, intensitas medan magnet H bernilai nol di dalam inti. Dengan bantuan

hukum Ampere, dapat diplot intensitas medan magnet di jendela transformator.



Gambar 5.3 Gaya gerak magnet dalam kumparan transformator

Kondisi ini paling baik untuk digambarkan menggunakan suatu grafik gaya gerak magnet. Gaya gerak magnet pada kumparan sekunder akan mengurangi gaya gerak magnet yang dihasilkan oleh kumparan primer. Hal ini menyebabkan nilai intensitas medan akan kembali bernilai nol pada sisi jauh dari jendela transformator. Intensitas medan bersifat bolak-balik dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi tegangan yang mensuplai transformator tersebut. Kehadiran intensitas medan yang berdekatan dengan lapisan kumparan akan menginduksi arus eddy dalam konduktor, sehingga menentang medan magnet sesuai dengan hukum Faraday, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3.

Intensitas bidang di sebelah kanan lapisan 1 pada Gambar 5.3 adalah H_0 dan nol ke kiri. Arah arus eddy

yang diinduksi adalah sedemikian rupa sehingga distribusi arus keseluruhan meningkat di sisi kanan lapisan saat ini dan berkurang di sebelah kiri. Pada frekuensi yang cukup tinggi (di mana kedalaman kulit kurang dari ketebalan d lapisan), distribusi saat ini akan menjadi nol di sisi kiri lapisan dan arus dapat dianggap mengalir dalam lapisan tebal d ; resistensi keseluruhan meningkat karena ada area konduksi yang lebih kecil. Harus diingat bahwa arus bersih yang mengalir tidak berubah dari nilai DC-nya.

Pada bagian selanjutnya, faktor efek kedekatan diturunkan dari prinsip pertama. Penurunan didasarkan pada lapisan foil yang memperpanjang ketinggian penuh jendela. Perbaikan untuk lapisan yang terdiri dari konduktor bulat atau foil yang tidak memanjang sepenuhnya dari jendela dapat diakomodasikan oleh konsep 'porositas', di mana area tembaga yang setara tersebar sepanjang w . Rumus umum untuk faktor efek kedekatan dapat diturunkan dengan memecahkan persamaan Maxwell untuk lapisan silinder tebal annular d dan dengan intensitas medan H_{ϕ} dan H_z di kedua sisi.

5.3 Resistansi AC pada Konduktor Silindris

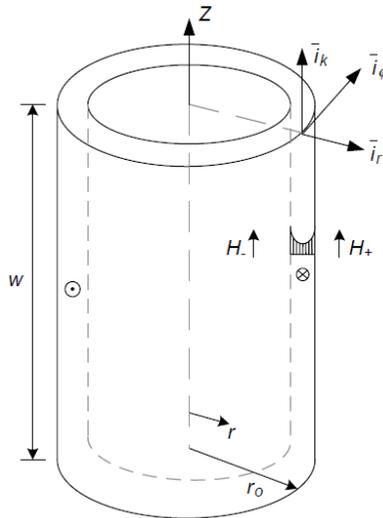
Persamaan Maxwell (Persamaan 5.1 dan 5.2) berlaku untuk lapisan konduktor berbentuk silinder annular, ditunjukkan pada Gambar 5.4, yang membawa arus sinusoidal jika $i(t) = I_m \cos \omega t$. Konduktivitas media konduksi adalah s dan dimensi fisik ditunjukkan pada Gambar 5.4. H_z dan H_{ϕ} adalah medan magnet yang paralel dengan permukaan dalam dan luar silinder, masing-masing. Kita akan dapat melihat bahwa H_z dan H_{ϕ} tidak tergantung pada z .

Dengan asumsi simetri silinder, berbagai komponen intensitas medan listrik E dan intensitas medan magnet H di dalam silinder, dalam koordinat

silinder (r, ϕ, z) , kedua persamaan (5.1 dan 5.2) kemudian direduksi menjadi:

$$-\frac{\partial H_z}{\partial r} = \sigma E_\phi \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\phi) = -j\omega \mu_0 H_z \quad (5.4)$$

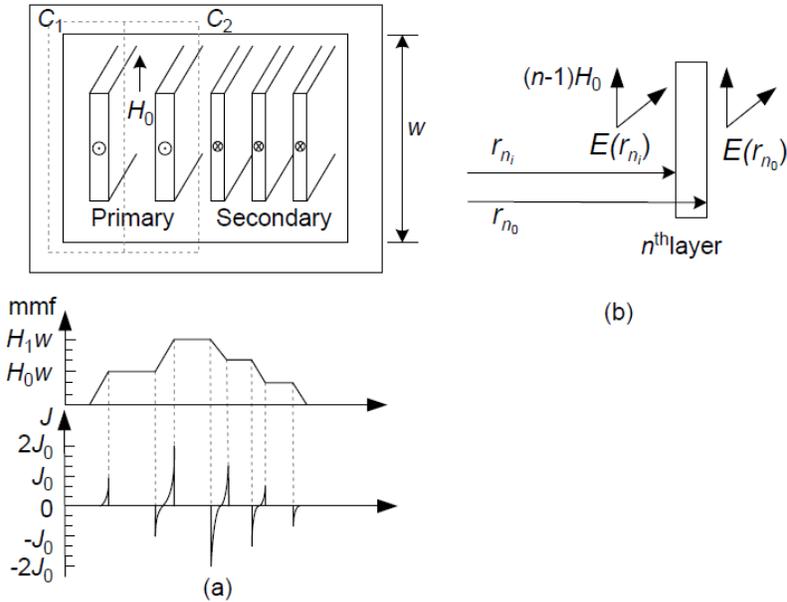


Gambar 5.4 Silinder konduktor

Karena H hanya memiliki komponen- z dan E hanya memiliki komponen- ϕ , dibuatkan subskrip tanpa ambiguitas. Selain itu, intensitas medan listrik dan magnet bersifat bebas divergensi, sehingga E dan H adalah fungsi r saja.

Penampang transformator tipikal ditunjukkan pada Gambar 5.5 (a), dengan distribusi gaya gerak magnet terkait dan distribusi kerapatan arus untuk kumparan primer dua lilitan dan kumparan sekunder tiga lilitan. Dimensi fisik lapisan ke- n umum ditunjukkan pada Gambar 5.5 (b) (lapisan paling dalam dihitung sebagai lapisan pertama). Diasumsikan bahwa bahan magnetik dalam inti adalah ideal ($\mu_r, \sigma = 0$), sehingga intensitas

medan magnet pergi ke nol di dalam inti. Diasumsikan bahwa dimensi w jauh lebih besar daripada dimensi radial, sehingga efek akhir dapat diabaikan.



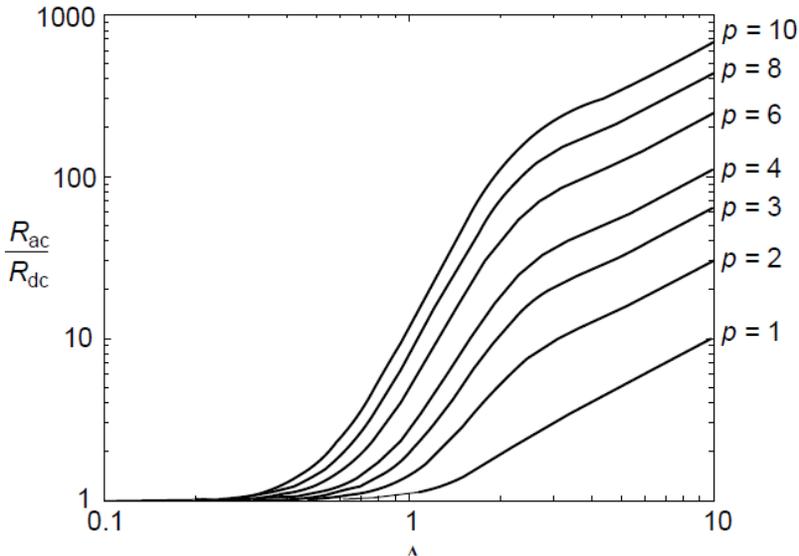
Gambar 5.5 Penampang transformator dengan (a) diagram gaya gerak magnet terkait dan kerapatan arus pada frekuensi tinggi, (b) lapisan ke- n umum.

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \Re \left(\Delta(1+j) \left[\coth(\Delta(1+j)) + \frac{2(p^2-1)}{3} \tanh\left(\frac{\Delta}{2}(1+j)\right) \right] \right) \quad (5.5)$$

$$= \Delta \left[\frac{\sinh 2\Delta + \sin 2\Delta}{\cosh 2\Delta - \cos 2\Delta} + \frac{2(p^2-1)}{3} \frac{\sinh \Delta - \sin \Delta}{\cosh \Delta + \cos \Delta} \right]$$

Persamaan di atas adalah persamaan Dowell yang menunjukkan rasio resistansi AC terhadap resistansi DC untuk efek kedekatan dengan eksitasi sinusoidal, yang ditunjuk k_p , dan diplot pada Gambar 5.6. Terlihat bahwa, ketika jumlah lapisan meningkat, ada peningkatan substansial dalam resistansi AC untuk ketebalan dan frekuensi lapisan tertentu. Ini adalah pendekatan yang sangat baik untuk solusi silinder asli, terutama jika ketebalan lapisan kurang dari 10% dari

jari-jari kelengkungan. Kumparan yang terdiri dari konduktor bundar, atau foil yang tidak memperpanjang jendela putaran penuh, dapat diperlakukan sebagai foil dengan ketebalan setara d dan konduktivitas efektif $\delta_w = \eta\delta$. Dimana δ disebut faktor porositas.



Gambar 5.6 Faktor efek kedekatan untuk eksitasi sinusoidal

5.4 Faktor Efek Kedekatan untuk Bentuk Gelombang Berubah Terhadap Waktu

Sampai saat ini, faktor efek kedekatan hanya berlaku untuk proses eksitasi sinusoidal. Untuk aplikasi daya elektronik, diperlukan adanya analisis yang lebih luas untuk memasukkan frekuensi yang lebih tinggi sebagaimana yang berlaku dalam Deret Fourier untuk bentuk gelombang non-sinusoidal.

R_{dc} adalah resistansi DC dari lapisan dengan ketebalan d . Tetapkan R_{δ} sebagai resistansi DC dari lapisan dengan ketebalan δ_0 , mengingat bahwa δ_0

adalah kedalaman kulit pada frekuensi dasar dari bentuk gelombang periodik. Maka akan berlaku :

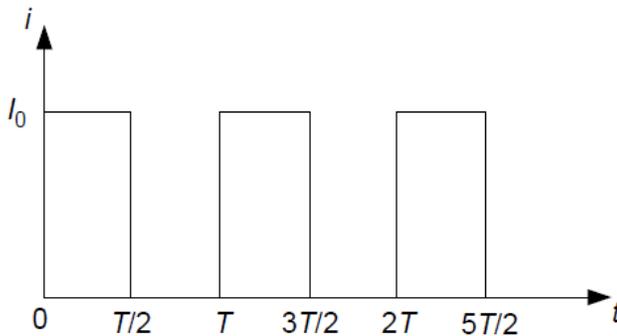
$$\frac{R_{\delta}}{R_{dc}} = \frac{d}{\delta_0} = \Delta \quad (5.6)$$

Sehingga :

$$\frac{R_{eff}}{R_{dc}} = \frac{R_{eff}}{R_{\delta}} \frac{R_{\delta}}{R_{dc}} = \frac{R_{eff}}{R_{\delta}} \Delta \quad (5.7)$$

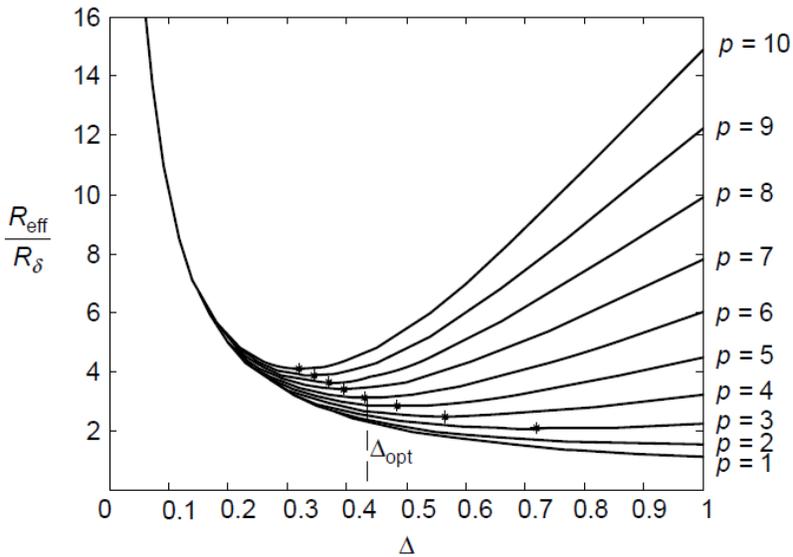
Dan :

$$\frac{R_{eff}}{R_{\delta}} = \frac{R_{eff}}{\Delta} \quad (5.8)$$



Gambar 5.7 Gelombang arus berpulsa

Plot pada Gambar 5.8 adalah untuk bentuk gelombang berpulsa pada Gambar 5.7, yang selanjutnya digambar ulang pada Gambar 5.9 dalam 3-D dengan menunjukkan lokus nilai minimum resistansi AC.



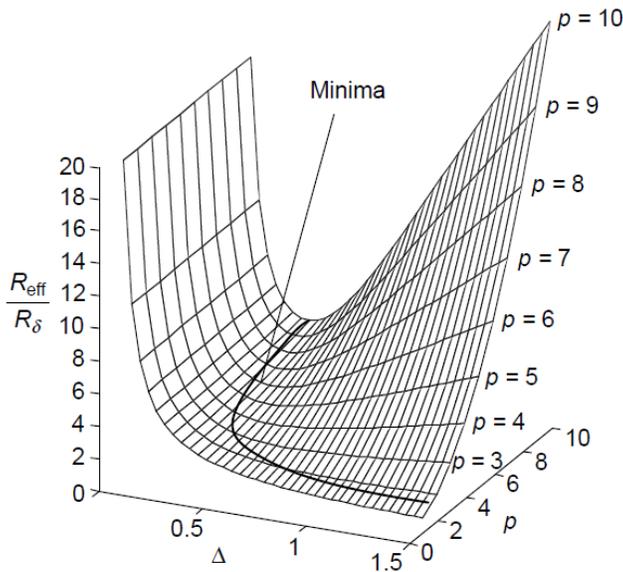
Gambar 5.8 Plot dari $R_{\text{eff}}/R_{\delta}$ terhadap Δ untuk variasi jumlah lapisan

Plot pada Gambar 5.8 dapat ditafsirkan untuk sejumlah kondisi. Pertimbangkan kondisi di mana frekuensi gelombang bernilai tetap. Baik R_{δ} dan δ_0 adalah tetap dan plot dapat diinterpretasikan sebagai resistensi efektif sebagai fungsi dari ketebalan lapisan.

Dimulai dengan nilai-nilai kecil seiring dengan meningkatnya ketebalan lapisan, ada penurunan resistensi. Namun, ketika ketebalan mendekati nilai yang sebanding dengan kedalaman kulit pada frekuensi dasar, efek kedekatan menjadi dominan dan resistensi meningkat sesuai.

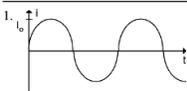
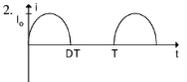
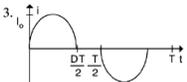
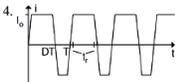
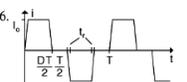
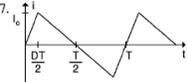
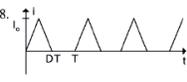
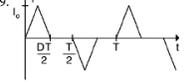
Untuk nilai-nilai $D > 3$, distribusi arus di pusat bernilai mendekati nol dan resistansi bernilai tetap pada suatu nilai berdasarkan arus yang terbatas pada wilayah di setiap sisi lapisan dan dengan ketebalan δ_0 . Dalam desain praktis, nilai-nilai $D < 2$ biasanya akan dipertimbangkan.

Sumbu horizontal pada Gambar 5.8 terkait dengan ketebalan lapisan. Plot menunjukkan bahwa, untuk sejumlah lapisan tertentu, ada nilai optimal D , disebut sebagai D_{opt} , yang meminimalkan kerugian sebagai fungsi dari ketebalan lapisan. Untuk $0 < D < D_{opt}$, resistansi DC berkurang saat ketebalan lapisan bertambah. Namun, untuk $D > D_{opt}$, efek AC pada resistansi lebih besar daripada efek mitigasi peningkatan ketebalan pada resistansi DC.



Gambar 5.9 Plot dari R_{eff}/R_d terhadap D untuk variasi jumlah lapisan dalam 3D

Tabel 5.1 Deret Fourier untuk berbagai bentuk gelombang dalam elektronika daya.

Current Waveform	I_{rms} and I'_{rms}	Fourier series, $i(t)$	Δ_{opt}
	$I_{rms} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$ $I'_{rms} = \frac{2\pi}{T\sqrt{2}} I_o$	$I_o \sin(\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt{\frac{1}{\Psi}}$
	$I_{rms} = I_o \sqrt{\frac{D}{2}}$ $I'_{rms} = I_o \frac{\pi}{DT} \sqrt{\frac{D}{2}}$	$\frac{2DI_o}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4DI_o}{\pi} \left\{ \frac{\cos(n\pi D)}{(1-4n^2D^2)} \right\} \times \cos(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt{\frac{4D^2}{\Psi}}$
	$I_{rms} = I_o \sqrt{\frac{D}{2}}$ $I'_{rms} = I_o \frac{2\pi}{DT} \sqrt{\frac{D}{2}}$	$\sum_{n=1, \text{ odd}}^{\infty} \frac{4DI_o}{\pi} \left\{ \frac{\cos(n\pi D/2)}{(1-n^2D^2)} \right\} \times \cos(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt{\frac{D^2}{\Psi}}$
	$I_{rms} = I_o \sqrt{1 - \frac{8I_r}{3T}}$ $I'_{rms} = I_o \sqrt{\frac{4}{I_r T}}$	$I_o(2D-1) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_o}{n\pi} \sin(n\pi D) \times \text{sinc}\left(\frac{n\pi 2I_r}{T}\right) \cos(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt{\frac{\left[1 - \frac{8I_r}{3T}\right] \pi^2 \frac{I_r}{T}}{\Psi}}$
	$I_{rms} = I_o \sqrt{D - \frac{4I_r}{3T}}$ $I'_{rms} = I_o \sqrt{\frac{2}{I_r T}}$	$I_o \left(D - \frac{I_r}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_o}{n\pi} \sin\left[n\pi \left(D - \frac{I_r}{T}\right)\right] \times \text{sinc}\left(\frac{n\pi I_r}{T}\right) \cos(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt{\frac{\left[D - \frac{4I_r}{3T}\right] 2\pi^2 \frac{I_r}{T}}{\Psi}}$
	$I_{rms} = I_o \sqrt{D - \frac{8I_r}{3T}}$ $I'_{rms} = I_o \sqrt{\frac{4}{I_r T}}$	$\sum_{n=1, \text{ odd}}^{\infty} \frac{4I_o}{n\pi} \sin\left[n\pi \left(D - \frac{I_r}{T}\right)\right] \times \text{sinc}\left(\frac{n\pi I_r}{T}\right) \cos(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt{\frac{\left[D - \frac{8I_r}{3T}\right] \pi^2 \frac{I_r}{T}}{\Psi}}$
	$I_{rms} = I_o \sqrt{\frac{1}{3}}$ $I'_{rms} = \frac{2I_o}{T\sqrt{D(1-D)}}$	$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_o \text{sinc}(n\pi D)}{\pi n(1-D)} \sin(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt{\frac{\pi^2 D(1-D)}{3\Psi}}$
	$I_{rms} = I_o \sqrt{\frac{D}{3}}$ $I'_{rms} = \frac{2I_o}{\sqrt{DT}}$	$\frac{I_o D}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} I_o \sin^2\left(\frac{n\pi D}{2}\right) \cos(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt{\frac{\pi^2 D}{3\Psi}}$
	$I_{rms} = I_o \sqrt{\frac{D}{3}}$ $I'_{rms} = \frac{4I_o}{\sqrt{DT}}$	$\sum_{n=1, \text{ odd}}^{\infty} I_o \sin^2\left(\frac{n\pi D}{4}\right) \cos(n\omega t)$	$\Delta_{opt} = \sqrt{\frac{\pi^2 D}{12\Psi}}$

Plot pada Gambar 5.8 dan 5.9 adalah untuk bentuk gelombang berdenyut pada Gambar 5.7. Jenis plot ini dapat dihasilkan untuk bentuk gelombang apa pun, begitu koefisien Fouriernya diketahui, dengan mengikuti prosedur. Deret Fourier untuk berbagai bentuk gelombang yang ditemui dalam elektronika daya diberikan pada Tabel 5.1. Untuk setiap nilai p pada Gambar 5.9, ada nilai optimal D di mana resistansi AC belitan minimum. Titik-titik optimal ini terletak pada garis bertanda 'minima' pada Gambar 5.9.

Nilai optimal dari resistansi AC yang efektif dengan bentuk gelombang arus periodik sinusoidal:

$$\left(\frac{R_{\text{eff}}}{R_{\text{dc}}}\right)_{\text{opt}} = \frac{4}{3} \quad (5.9)$$

Untuk eksitasi sinusoidal, nilai yang sesuai untuk konduktor kawat adalah $3/2$ sehingga persamaan (5.9) di atas dapat dirubah menjadi:

$$\frac{R_{\text{eff}}}{R_{\text{dc}}} = 1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta}{\Delta_{\text{opt}}}\right)^4 \quad (5.10)$$

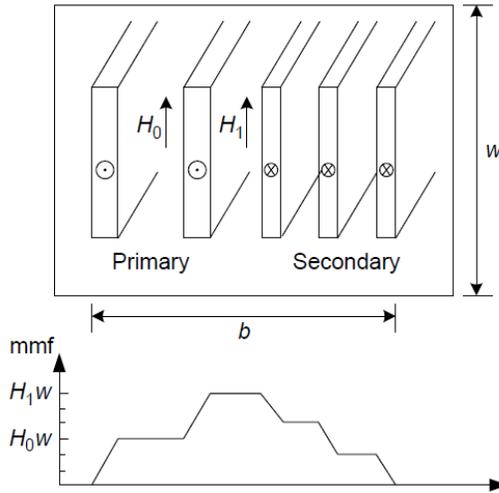
Persamaan (5.10) dapat digunakan untuk menentukan nilai optimal dari lapisan atau ketebalan lapisan kumparan dan resistansi AC yang efektif, di mana persamaan ini didasarkan pada nilai rms dari bentuk gelombang arus dan nilai rms dari turunannya. Persamaan ini telah diterapkan untuk masing-masing bentuk gelombang pada Tabel 6.1 dan hasilnya dapat dilihat pada table tersebut.

5.5 Mengurangi Efek Kedekatan dengan kumparan bersisipan

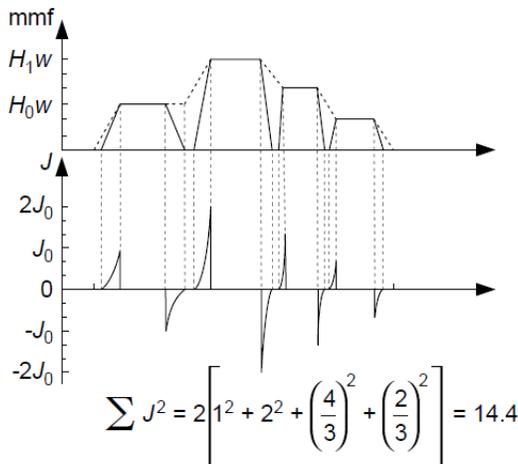
Gambar 5.10 memperlihatkan suatu transformator dengan rasio kumparan 2:3, Kepadatan arus pada permukaan lapisan pada Gambar tersebut terkait dengan intensitas medan listrik E ($J \text{ sE}$) yang, pada gilirannya, terkait dengan besarnya intensitas medan magnet H . Kepadatan arus pada kumparan sebelum dibentuk bersisipan ditunjukkan pada Gambar 5.11.

Kerugian sebanding dengan J kuadrat dan, dengan mengambil jumlah kuadrat dari kepadatan arus di setiap lapisan sebagai indikasi dari total kerugian, kerugian adalah 14,4, mengambil 1 sebagai nilai dasar sesuai dengan J_0 . Oleh karena itu, masuk akal bahwa nilai permukaan H harus dijaga agar tetap minimum.

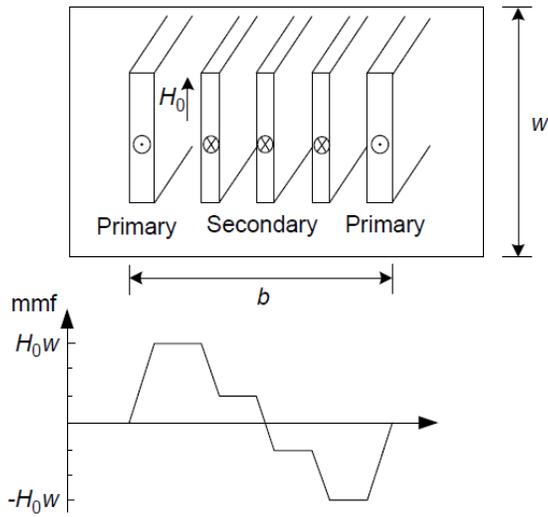
Distribusi kerapatan arus menentukan bentuk distribusi gaya gerak magnet, dan ini ditunjukkan dengan garis putus-putus mewakili distribusi frekuensi rendah. Kerugian akibat efek kedekatan dapat dikurangi dengan kumparan bersisipan, bergantian antara lapisan primer dan sekunder. Ini ditunjukkan pada Gambar 5.12 dengan kepadatan arus ditunjukkan pada Gambar 5.13.



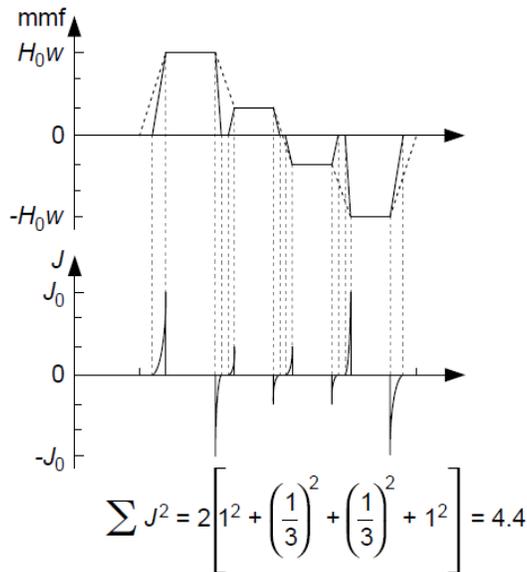
Gambar 5.10. Kumparan transformator sebelum bersisipan



Gambar 5.11 Distribusi kerapatan arus sebelum bersisipan



Gambar 5.12 Kumparan transformator setelah bersisipan



Gambar 5.13 Distribusi kerapatan arus setelah bersisipan

Menambahkan kontribusi J^2 dalam hal ini menghasilkan total 4,4, menunjukkan pengurangan indikatif dengan faktor lebih dari 3 dalam kerugian efek

kedekatan. Sisipan juga mengurangi induktansi kebocoran dan kapasitansi kumparan bersisipan.

5.6 Induktansi Kebocoran pada Kumparan Transformer

Perhatikan kumparan yang ditunjukkan pada Gambar 5.3, dapat dilihat bahwa medan magnet diarahkan sepanjang bidang lapisan. Semua fluks di dalam jendela transformator pada Gambar 5.3 adalah fluks bocor dengan persamaan :

$$L_{l1} + L_{l2} = \frac{\mu_0 N_p^2 MLTb}{3w} \quad (5.11)$$

L_{l1} dan L_{l2} adalah komponen fluks bocor yang terkait dengan kumparan primer dan sekunder. Kebocoran total secara langsung terkait dengan volume total yang ditempati oleh kumparan. Dengan penyebaran kumparan yang lebih besar di sepanjang inti akan dapat (peningkatan b) mengurangi efek kebocoran. Persamaan 5.11 menunjukkan bahwa induktansi bocor dapat dikurangi dengan menggunakan kumparan yang lebih sedikit atau juga pendekatan yang paling langsung yaitu dengan menggunakan kumparan bersisipan. Oleh karena itu untuk kebocoran yang lebih kecil, kumparan harus ditempatkan di jendela yang panjang dan sempit.

Ini adalah kasus yang ideal dan tidak memperhitungkan energi magnetik yang disimpan dalam kumparan itu sendiri, namun itu memberikan perkiraan yang wajar dari induktansi bocor pada tipikal transformator. Estimasi yang lebih akurat dapat diperoleh dengan analisis elemen hingga.

Kesimpulan

1. Mengoperasikan transformator pada frekuensi tinggi memiliki keuntungan dan kerugian. Keuntungan yang diperoleh bahwa ia akan dapat mengurangi ukuran transformator, namun kerugiannya adalah adanya rugi-rugi tambahan yang timbul pada transformator saat dioperasikan pada frekuensi tinggi.
2. Suatu desain optimal transformator adalah yang memiliki rugi inti besi yang hampir sama besarnya dengan rugi tembaga pada transformator tersebut. Metodologi untuk desain transformator yang telah dikembangkan mengasumsikan bahwa rugi tembaga disebabkan oleh adanya tahanan DC dari kumparan transformator.
3. Untuk aplikasi elektronika daya, operasi frekuensi tinggi menyebabkan peningkatan rugi-rugi AC akibat adanya efek kulit dan pendekatan. Efek kulit dan efek pendekatan menimbulkan peningkatan rugi-rugi pada konduktor, karena distribusi arus yang tidak seragam pada konduktor. Efek ini adalah akibat langsung dari hukum Faraday, di mana arus eddy diinduksi untuk menentang fluks yang dibuat dalam kumparan oleh arus AC.

Pustaka

Hurley, W.G., Wolfe, W.H., 2013, *Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications*, First Edition, John Wiley & Sons, Ltd.

BAB VI

EFEK FREKUENSI TINGGI PADA INTI BESI TRANSFORMATOR

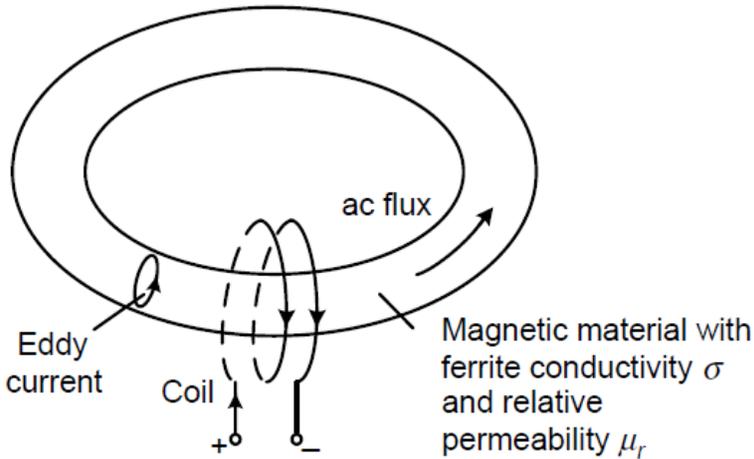
6.1 Pendahuluan

Pada bab sebelumnya telah dibahas bahwa efek kulit dan kedekatan memiliki pengaruh besar pada operasi transformator atau induktor pada frekuensi tinggi karena sirkulasi arus eddy. Kedua efek tersebut memiliki pengaruh dapat meningkatkan kerugian pada kumparan. Arus eddy juga dapat mengalir dalam materi inti besi, karena inti besi memiliki resistivitas terbatas. Di masa lalu, laminasi digunakan pada frekuensi daya untuk mengatasi efek arus eddy dari resistivitas rendah baja silikon. Dalam elektronika daya, frekuensi operasi terus meningkat, dengan bahan-bahan baru, resistivitas bahan yang tinggi tetapi terbatas seperti bahan ferrites berarti bahwa berlaku batas atas pada frekuensi operasi.

6.2 Kerugian Arus Eddy Current di Core Toroidal

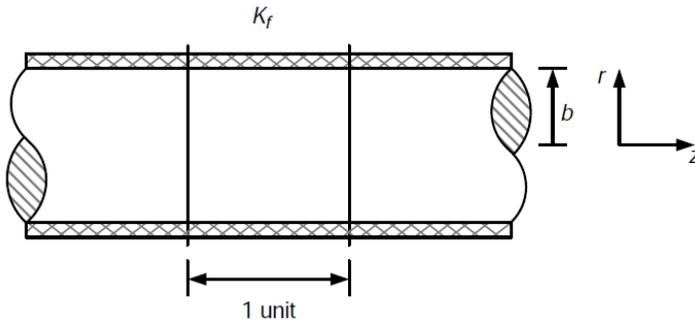
Kerugian Arus Eddy muncul dengan oleh sebab yang sama dengan kerugian efek kulit pada konduktor, yaitu karena fluks bolak-balik dalam media konduksi. Hal ini ditunjukkan oleh inti besi toroidal pada Gambar 6.1. Ketika arus bolak-balik mengalir dalam kumparan, Arus Eddy mengalir seperti yang ditunjukkan sesuai dengan prinsip hukum Lenz. Jumlah fluks berkurang di

tengah inti besi dan bertambah di permukaan inti besi. Ini memiliki dua efek yaitu fluks bersih berkurang, dengan pengurangan konsekuensial pada induktansi, dan kerugian Arus Eddy muncul. Kedua efek ini dapat diwakili sebagai impedansi dalam kumparan, dengan bagian nyata mewakili kerugian Arus Eddy dan bagian imajiner mewakili induktansi. Jumlah ini jelas tergantung pada frekuensi.



Gambar 6.1 Kerugian Arus Eddy pada suatu inti toroidal

Kumparan penuh pada inti besi ditunjukkan pada Gambar 6.1. Untuk keperluan menghitung induktansi diri dan kerugian Arus Eddy, dapat diabaikan efek kebocoran. Gulungan dapat diganti dengan lembaran arus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.2, dengan kepadatan arus permukaan K_f A/m. Dengan tidak adanya kebocoran, intensitas medan magnet H hanya memiliki arah z dan medan listrik E hanya memiliki komponen w .



Gambar 6.2 Lembaran arus

Impedansi diri dari kumparan diberikan oleh persamaan :

$$Z = R_s + j\omega L_s \quad (6.1)$$

dimana R_s mewakili nilai kerugian Arus Eddy di dalam inti besi dan L_s mewakili nilai induktansi diri kumparan yang keduanya tergantung pada nilai frekuensi.

Dengan mengasumsikan bahwa diameter luar toroid jauh lebih besar dari diameter penampang inti besi untuk mengambil panjang kumparan sebagai panjang inti besi rata-rata. Dengan asumsi kerapatan fluks magnetik $B = B_{max} \sin vt$ pada permukaan inti besi, nilai rata-rata $(B_{max} \sin vt)^2$ adalah $B_{max}^2/2$ dan kerugian daya rata-rata dalam inti besi akibat Arus Eddy adalah:

$$p = \frac{\pi f^2 \sigma B_{max}^2 \pi b^2}{4} \quad (6.2)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa kerugian inti besi dapat dikurangi dengan meningkatkan resistivitas listrik (mengurangi konduktivitas listrik) dari bahan inti besi. Kerugian total karena Arus Eddy sebanding dengan kuadrat dari jari-jari penampang. Penggunaan penampang inti besi yang lebih kecil untuk mengurangi kerugian Arus Eddy mengarahkan penggunaan lapisan

berlapis dari bahan inti besi untuk operasi frekuensi tinggi.

6.3 Kerugian Inti Besi

Persamaan umum untuk kerugian inti besi umumnya digunakan untuk menggambarkan kerugian inti besi total di bawah eksitasi sinusoidal :

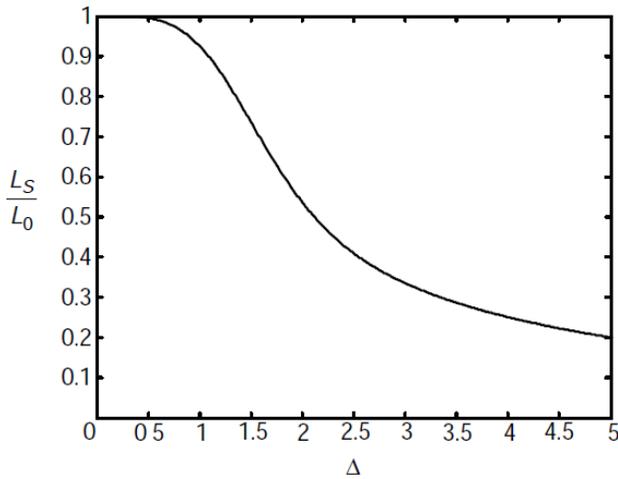
$$P_{fe} = K_c f^a B_{max}^b \quad (6.3)$$

P_{fe} adalah kerugian inti besi rata-rata waktu per unit volume; B_{max} adalah nilai puncak kerapatan fluks dengan eksitasi sinusoidal pada frekuensi f ; K_c , a dan b adalah konstanta yang dapat ditemukan dari data pabrikan.

Eksitasi non-sinusoidal adalah normal untuk aplikasi elektronik daya tertentu. Sifat non-linear dari bahan feromagnetik berarti bahwa ini bukan kasus sederhana untuk menambahkan komponen frekuensi individual dari Deret Fourier. Cukup menggunakan nilai puncak kerapatan fluks akan dapat mengurangi total kerugian inti besi.

6.4 Permeabilitas Kompleks

Pihak pabrikan menyediakan plot permeabilitas relative (m_r) terhadap frekuensi sehingga induktansi dihitung dengan menggunakan nilai m_r yang sesuai dalam persamaan toroidal frekuensi rendah. Ini mencapai hasil yang sama seperti Gambar 6.3. Namun, D adalah fungsi dari diameter inti besi dan pengukuran pada satu inti besi tidak sepenuhnya sesuai untuk inti besi dengan ukuran berbeda dari bahan yang sama.



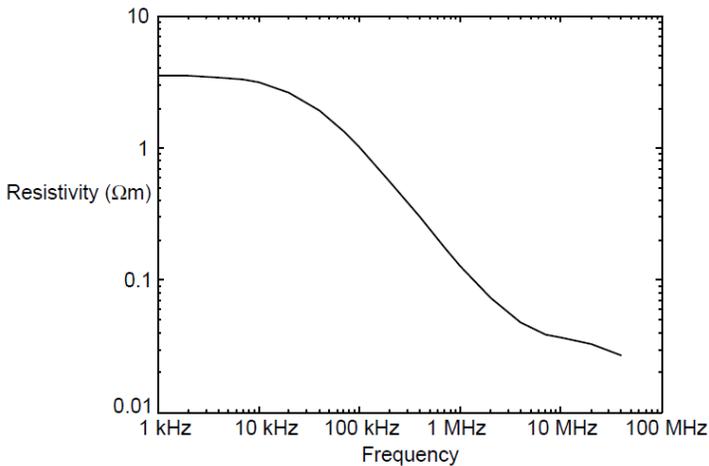
Gambar 6.3 Induktansi diri dalam inti toroidal sebagai fungsi frekuensi

$$L_0 = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A_c}{\ell_c} \quad (6.4)$$

Persamaan (6.4) didasarkan pada inti besi isotropik homogen. Secara khusus, diasumsikan bahwa permeabilitas relatif dan resistivitas listrik adalah konstan. Ternyata tahanan listrik ferit bergantung pada frekuensi. Diketahui bahwa nilai khas untuk ferrit Mn-Zn sebagai 1 Vm pada frekuensi rendah dan 0,001 Vm pada frekuensi tinggi. Ada dua faktor yang berkontribusi terhadap resistivitas dalam ferrites polikristalin seperti Mn-Zn. Ada struktur granular, di mana resistensi melintasi batas butir berada di urutan satu juta kali lebih besar dari pada bahan ferit di dalam butiran.

Pada frekuensi rendah, batas butir mendominasi resistivitas, sementara pada frekuensi tinggi, efek kapasitif mengecilkan batas butir dan bahan ferit di dalam resistivitas butir mendominasi keseluruhan resistivitas. Resistivitas diukur pada sampel P tipe Mn-Zn ferit dan variasi dengan frekuensi diilustrasikan pada Gambar 6.4.

Pabrikan menyajikan bagian imajiner dari permeabilitas relatif kompleks μ_{rs} untuk memungkinkan perancang menemukan induktansi dengan memasukkan nilai dependen-frekuensi permeabilitas relatif dalam rumus induktansi toroidal klasik yang diberikan oleh Persamaan (6.4). Akibatnya, pabrikan menghasilkan permeabilitas kompleks dengan melakukan pengukuran pada inti besi toroidal dari dimensi yang diketahui, dan menyimpulkan permeabilitas kompleks dari impedansi terukur.

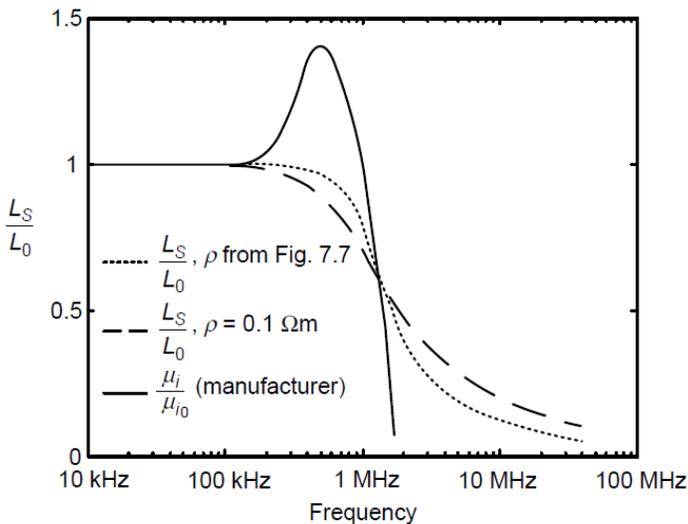


Gambar 6.4 Resistivitas dari ferit tipe P

Persamaan (6.5) diplot pada Gambar 6.5 untuk inti besi ferit tipe P berdiameter 10 mm (b 5 mm). Satu perhitungan dilakukan menggunakan nilai frekuensi rendah tunggal resistivitas, 0,1 Vm , dan perhitungan lain dilakukan dengan nilai yang diambil dari Gambar 6.4. Pabrikan memasok permeabilitas awal sebagai fungsi frekuensi untuk ferit tipe P Mn-Zn, dan ini dinormalisasi ke nilai frekuensi rendah (μ_0 2500). Terlihat bahwa persamaan (6.5) sangat cocok untuk pengukuran pabrikan, bahkan dalam kasus di mana nilai resistivitas tunggal digunakan.

$$\frac{L_s}{L_0} = \begin{cases} 1 - \frac{\Delta^4}{12 + 1.43\Delta^4} & \Delta < 2.1 \\ \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{16\Delta^3} + \frac{1}{16\Delta^4} & \Delta > 2.1 \end{cases} \quad (6.5)$$

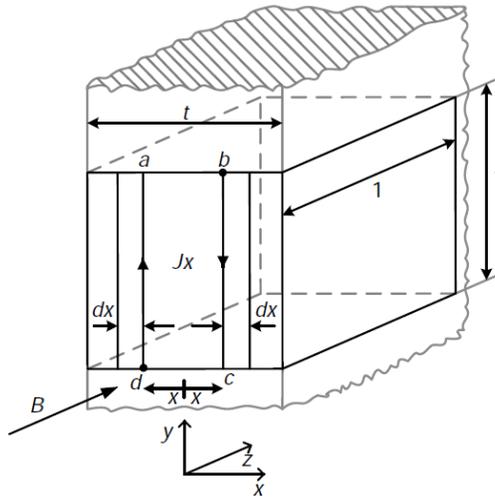
Puncak dalam data pabrikan pada 600 kHz adalah karena efek kapasitif kompleks pada dinding domain dalam ferit. Penting untuk ditekankan bahwa hanya satu nilai permeabilitas relatif yang digunakan dalam perhitungan pada Gambar 6.5. Permeabilitasnya konstan, dan pengurangan induktansi sendiri pada frekuensi tinggi adalah karena resistivitas listrik dari bahan inti besi sehingga menimbulkan Arus Eddy. Pabrikan bertanggung jawab untuk pengurangan induktansi pada frekuensi tinggi dengan memasok permeabilitas yang bergantung pada frekuensi untuk digunakan dalam formula toroidal klasik. Variasi sepenuhnya dapat diprediksi dan dapat dihitung dengan Persamaan (6.5) dengan mengetahui resistivitas listrik dan permeabilitas relatif dari bahan inti besi dan dimensi fisik inti besi.



Gambar 6.5 Permeabilitas awal dari ferit tipe P

6.5 Laminasi

Faktor-faktor yang mempengaruhi pilihan bahan laminasi inti besi dan ketebalan dapat disimpulkan dengan mempertimbangkan pelat laminasi dalam medan magnet yang seragam, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.6.



Gambar 6.6 Laminasi dalam suatu medan magnet seragam

Pertimbangkan volume bahan laminasi magnetik dengan tinggi dan kedalaman unit, dengan kerapatan fluks sinusoidal yang seragam $B = B_{\max} \sin \omega t$ pada sudut kanan ke wajah laminasi. Aliran yang berubah menginduksi Arus Eddy, sebagaimana diwakili oleh kerapatan arus J_x . Menerapkan hukum Faraday di sekitar loop abcd, dengan kontribusi dari sisi ab dan cd pada jarak x dari garis tengah, menghasilkan ekspresi untuk ggl yang diinduksi E_x :

$$2E_x = -2 \frac{dB}{dt} \quad (6.6)$$

Kesimpulan

1. Arus eddy juga dapat mengalir dalam materi inti besi, karena inti besi memiliki resistivitas terbatas. Di masa lalu, laminasi digunakan pada frekuensi daya untuk mengatasi efek arus eddy dari resistivitas rendah baja silikon. Dalam elektronika daya, frekuensi operasi terus meningkat, dengan bahan-bahan baru, resistivitas bahan yang tinggi tetapi terbatas seperti bahan ferrites berarti bahwa berlaku batas atas pada frekuensi operasi.
2. Kerugian Arus Eddy muncul dengan oleh sebab yang sama dengan kerugian efek kulit pada konduktor, yaitu karena fluks bolak-balik dalam media konduksi.
3. Kerugian inti besi dapat dikurangi dengan meningkatkan resistivitas listrik (mengurangi konduktivitas listrik) dari bahan inti besi. Kerugian total karena Arus Eddy sebanding dengan kuadrat dari jari-jari penampang. Penggunaan penampang inti besi yang lebih kecil untuk mengurangi kerugian Arus Eddy mengarahkan penggunaan lapisan berlapis dari bahan inti besi untuk operasi frekuensi tinggi.
4. Pada frekuensi rendah, batas butir mendominasi resistivitas, sementara pada frekuensi tinggi, efek kapasitif mengecilkan batas butir dan bahan ferit di dalam resistivitas butir mendominasi keseluruhan resistivitas.

Pustaka

Hurley, W.G., Wolfe, W.H., 2013, *Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications*, First Edition, John Wiley & S

