

UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS, PERANCANGAN DAN PENERAPAN TRANSFORMATOR
DISTRIBUSI DELTA PRIMER – TRANSPOSISI ZIGZAG SEKUNDER
UNTUK MEMINIMASI HARMONISA**

DISERTASI

**CHAIRUL GAGARIN IRIANTO
8404032016**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
KEKHUSUSAN TENAGA LISTRIK
DEPOK
12 JANUARI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Chairul Gagarin Irianto
NPM : 84 04 032016
Tanda Tangan :



Tanggal : 12 Januari 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh,

Nama : Chairul Gagarin Irianto
NPM : 84 04 032016
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Disertasi : Analisis, Perancangan dan Penerapan Transformator Distribusi
Delta Primer – Transposisi Zigzag Sekunder Untuk Meminimasi
Harmonisa

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

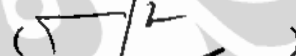
Promotor : Prof. Dr. Ir. Zuhail, M.Sc. EE



Ko-Promotor : Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA



Tim Penguji : Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa, MK, MT



Dr. Ir. Uno Bintang Sudibyo



Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT



Dr. Ir. Sasongko Pramonohadi, DEA



Dr. Ir. Soetjipto Soewono



Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 12 Januari 2011

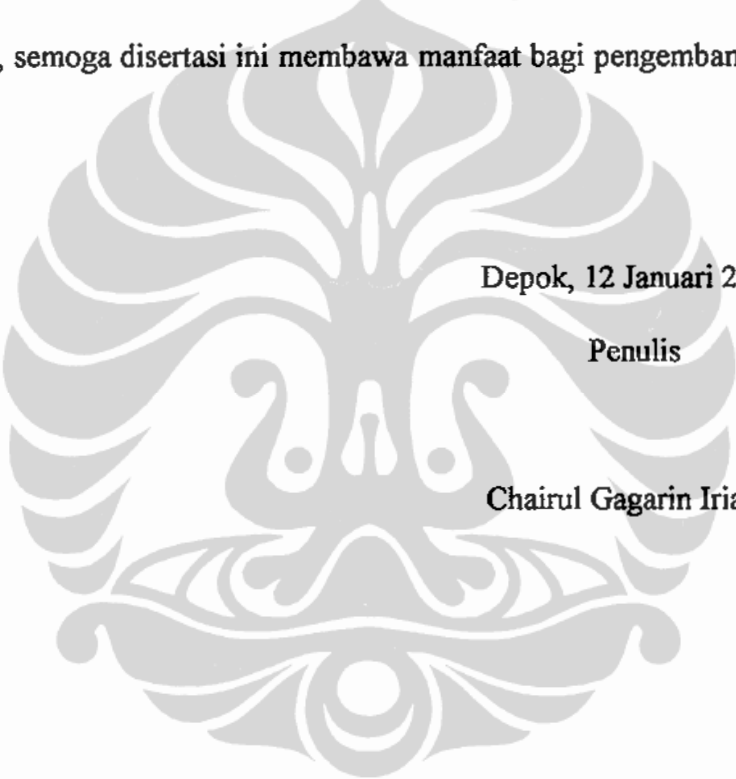
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada ALLAH SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor, Program Studi Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan disertasi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan disertasi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

- (1) Prof. Dr. Ir. Zuhail, M.Sc EE selaku Promotor yang telah menentukan dan menyetujui judul disertasi ini, bersedia meluangkan waktu untuk membimbing, memberikan petunjuk dan saran dalam menyelesaikan disertasi ini.
- (2) Prof.Dr.Ir. Rudy Setiabudy, DEA selaku Ko-Promotor yang telah bersedia meluangkan waktu, membimbing, memberikan saran dalam menyelesaikan disertasi ini.
- (3) Prof.Dr.Ir. Iwa Garniwa, MK, MT, Dr.Ir. Uno Bintang Sudibyo, DEA, Dr.Ir. Ridwan Gunawan, MT, Dr.Ir. Sasongko Pramono Hadi, DEA, dan Dr.Ir. Soetjipto Soewono selaku Penguji dalam proses disertasi ini.
- (4) Ir. Dharmananda Lugito, Ir. Maula Sukmawidjaja, MT, dan Ir. Pribadi Kadarisman serta Chairul Hudaya, ST. M.Sc yang telah membantu dalam pelaksanaan pengukuran dan pemodelan simulasi, dan

- (5) Pimpinan Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti dan Jurusan Teknik Elektro yang telah mengizinkan saya untuk studi lanjut, dan memberikan bantuan dukungan material dan moral, dan
- (6) Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral sehingga penulisan disertasi ini dapat terselesaikan.

Akhir kata, saya berharap ALLAH SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu, semoga disertasi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.



Depok, 12 Januari 2011

Penulis

Chairul Gagarin Irianto

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
DISERTASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Chairul Gagarin Irianto
NPM : 84 04 032016
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Disertasi

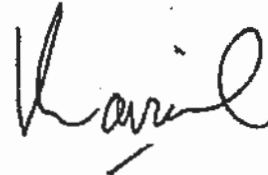
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**ANALISIS, PERANCANGAN DAN PENERAPAN TRANSFORMATOR
DISTRIBUSI DELTA PRIMER – TRANSPOSISI ZIGZAG SEKUNDER
UNTUK MEMINIMASI HARMONISA**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan disertasi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta
Pada tanggal : 12 Januari 2011
Yang Menyatakan



Chairul Gagarin Irianto

ABSTRAK

Nama : Chairul Gagarin Irianto
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis, Perancangan dan Penerapan Transformator Distribusi Delta Primer – Transposisi Zigzag Sekunder Untuk Meminimasi Harmonisa

Harmonisa dan dampaknya didalam sistem daya listrik semakin meningkat akibat penggunaan peralatan listrik yang dikendalikan dengan perangkat elektronik dan perangkat lainnya penghasil frekwensi tinggi. Satu hal penting yang diperhatikan didalam mengevaluasi dampak harmonisa adalah efek harmonisa pada komponen sistem daya listrik. Transformator adalah perangkat utama didalam sistem daya listrik. Meningkatnya harmonisa didalam sistem daya menyebabkan kenaikan rugi daya listrik didalam kumparan transformator dan menurunkan kemampuannya dalam membatasi penyebaran aliran harmonisa triplen.

Dalam perkembangan teknologi transformator peredam distorsi harmonisa terdapat berbagai tipe konfigurasi hubungan kumparan untuk berbagai kondisi pembebanan diantaranya adalah transformator Vee/vee, T-Scott, Le Blanc, Dy (delta-wye) atau Dz (delta-zigzag). Berdasarkan literatur dan simulasi pembebanan transformator tersebut diketahui bahwa transformator tersebut belum optimal menghambat penyebaran aliran harmonisa triplen ke sisi sumber.

Dalam disertasi ini transformator delta primer – transposisi zigzag sekunder (Dtz) dimodelkan berdasarkan tiga prinsip penghambatan induksi medan elektromagnetik, yaitu prinsip pertama menyeimbangkan induksi fluks magnetik; dan prinsip kedua penghambatan fasa fluks harmonisa; serta prinsip ketiga menyirkulasikan sisa induksi fluks magnetik harmonisa. Transposisi kumparan zigzag dilakukan dengan membagi setiap kumparan fasa sekunder menjadi tiga bagian identik dan meletakkannya pada ketiga kaki yang berbeda. Hal ini bertujuan untuk menyeimbangkan induksi fluks magnetik arus harmonisa triplen dari beban nonlinier satu fasa. Kelebihan tambahan transposisi zigzag dapat memperbesar impedansi dalam rangkaian transformator pada saat band frekwensi harmonisa triplen sehingga magnitud arus harmonisa triplen dapat diturunkan. Dengan semakin sedikitnya arus harmonisa triplen maka induksi ggm (ampere.lilitan) beban didalam kumparan delta primer akan turun. Hasilnya, magnitud arus harmonisa triplen yang bersirkulasi menurun sehingga tidak mendistorsi tegangan dan arus di sisi sumber.

Dalam penelitian pada disertasi ini dilakukan simulasi untuk arus arus harmonisa triplen yang dibangkitkan didalam kumparan primer dan sekunder transformator Dtz. Pengujian pembebanan pada sistem tiga fasa dilakukan untuk kondisi beban seimbang maupun beban tidak seimbang. Dari eksperimen dan simulasi dapat ditunjukkan bahwa tingkat distorsi (THD) arus harmonisa didalam kumparan sekunder pada kondisi beban seimbang adalah 70,8%, dan di sisi primer adalah 24,3%. Sedangkan untuk kondisi beban tidak seimbang, tingkat distorsi (THD) didalam kumparan sekunder adalah 68,44% dan di sisi delta primer adalah 26,4%. Hal ini menunjukkan bahwa transformator Dtz

memiliki kemampuan filter untuk menurunkan THD arus sebesar 42 – 46% untuk kondisi beban seimbang dan tidak seimbang, dengan kata lain menghambat arus harmonisa triplen mengalir ke sisi sumber, sehingga sangat cocok untuk diterapkan pada beban beban yang banyak menghasilkan harmonisa triplen terutama di industri.

Dengan membandingkan hasil simulasi komputer dengan data pengukuran melalui eksperimen laboratorium, ini dibuktikan bahwa penggunaan transformator Dtz adalah salah satu metode untuk menurunkan arus harmonisa dan menghambat aliran harmonisa ke sisi sumber.

Kata kunci: arus harmonisa triplen, pembebanan seimbang dan tidak seimbang, THD arus, delta primer – transposisi zigzag sekunder (Dtz), beban nonlinier.



ABSTRACT

Name : Chairul Gagarin Irianto
Study Program : Electrical Engineering
Title : Analysis, Design and Application of Delta Primary – Transposed Zigzag Secondary Winding Distribution Transformer to Minimize Harmonic

Harmonics and their impacts in the electric power system have increased due to the use of electrical equipments which are controlled by the electronic devices and other devices generating high frequency. One of important considerations when evaluating the impact of harmonics is their effects on the power system components and loads. Transformers are the major components in the electrical power systems. The increasing of harmonic level in power systems may cause the increasing of power losses in the transformer winding and in turn will reduce its ability to limit the triplen harmonics current flow to the distribution system.

There are various types of harmonic filter-capable transformers for various loading conditions such as Vee/vee, T-Scout, Le Blanc, Dy (delta-wye) and Dz (delta-zigzag) transformer. Based on review on literature and simulation of transformer loading, it can be concluded that those transformers have limitation on inhibiting the spread of the triplen harmonics current into the source side in the delta winding.

In this dissertation, delta primary - transposed zigzag secondary (Dtz) winding transformer is modeled based on the three basic electromagnetic inductions. First balance the magnetic flux induction, followed by suppression the phase of harmonics flux, and circulating the remaining magnetic flux harmonic. Transposition of the zigzag winding is done by dividing equally each secondary winding and laid the three into different legs. This is to balance triplen harmonic magnetic flux from the single phase nonlinear load. The additional advantages of the zigzag transposition can enhance internal impedance of its transformer at its triplen harmonics frequency band so that triplen harmonics current can be reduced. With it reducing triplen harmonic current, mmf load induction (ampere.turn) in delta primary can be reduced. The result is reducing magnitude of triplen harmonic circulation and eliminating distortion in the source.

The triplen harmonics currents generated on the primary and secondary winding of Dtz transformer are simulated in this research of dissertation. Both balanced and unbalanced loads of the three-phase distribution system are examined. The experiment shows that the total THD current in the secondary winding when balanced loads are applied is about 70.8 %, and in the primary side is 24.3 %. While for unbalanced loads, the average THD in secondary winding is 68.44 % and in delta winding is 26.4 %. It means the Dtz transformer has a filter-ability to reduce about 42 - 46 % THD for both balanced and unbalanced loads. This means suppressing triplen harmonics from flowing to the source and thus suitable to apply it to nonlinear load found in industry.

Comparing the computer simulation results and data measurements through experiment in the laboratory, it is proved that the use of the proposed Dtz transformer is one of the methods to reduce harmonic currents and inhibit them to enter to the supply system.

Keywords: triplen harmonic currents, balanced and unbalanced loads, delta primary - transposed zigzag secondary winding (Dtz) transformer, non-linear loads.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR SINGKATAN	xix
DAFTAR ISTILAH/SIMBOL	xx
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN	6
1.3 METODOLOGI PENELITIAN	7
1.4 HIPOTESIS PENELITIAN	8
1.5 KONTRIBUSI PENELITIAN	13
1.6 LINGKUP PENELITIAN	14
1.7 ALUR PENELITIAN	14
BAB 2 PENGARUH PEMBEBANAN NONLINIER PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DAN SISTEM DISTRIBUSI TENAGA	17
2.1 Harmonisa Ke-3 Dan Harmonisa Kelipatan Tiga (Triplen)	18
2.2 Pengaruh Harmonisa Pada Sistem Distribusi	24
2.2.1 Pengaruh Harmonisa Pada Pembebanan Seimbang	26
2.2.2 Pengaruh Harmonisa Pada Pembebanan Tidak Seimbang	29
2.2.3 Arus Harmonisa Triplen pada Transformator Distribusi Dy	31
2.2.4 Arus Harmonisa Triplen pada Transformator Dz	33
2.3 Dampak Harmonisa Sistem Tenaga Terhadap Transformator	34
2.3.1 Struktur Transformator Tipe Inti	36
2.3.2 Rugi Arus Sirkulasi	37
2.3.3 Dampak Tegangan Harmonisa	37
2.3.4 Dampak Arus Harmonisa	38
2.4 Dampak Harmonisa Sistem Tenaga Terhadap Kapasitor Tenaga	40

BAB 3 ANALISIS PEMBEBANAN TRANSFORMATOR PENGUBAH FASA DALAM MENGHAMBAT HARMONISA	44
3.1 Analisis Model Pembebanan Tidak Seimbang Transformator	46
3.1.1 Transformator Teknologi Narrow Bandwidth Technology (NBT)	46
3.1.2 Transformator Delta-Wye (Dy)	48
3.1.3 Transformator Hubungan Vee/vee (Open Delta)	50
3.1.4 Transformator Hubungan T-Scott	51
3.1.5 Transformator Hubungan Le Blanc	53
3.2 Simulasi Pembebanan Transformator Tidak Seimbang	55
3.2.1 Hasil Simulasi Pembebanan Transformator Vee/vee	56
3.2.2 Hasil Simulasi Pembebanan Transformator T-Scott	58
3.2.3 Hasil Simulasi Pembebanan Transformator Le Blanc	59
3.3 Rekapitulasi Hasil Simulasi Pembebanan Transformator Distribusi Berdasarkan NilaiFaktor Daya	61
3.3.1 Hubungan Faktor Daya dengan Tingkat Distorsi Harmonisa Arus (THD_i)	61
3.3.2 Rekapitulasi Simulasi Pembebanan Transformator	64
BAB 4 PEMODELAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Dtz SEKUNDER DENGAN TIGA KUMPARAN SILANG DAN Ddtz SEKUNDER ENAM KUMPARAN SILANG DALAM MENGHAMBAT HARMONISA	66
4.1 Pemodelan Konfigurasi Belitan pada Sisi Sekunder	67
4.1.1 Transformator Dz Konvensional	67
4.1.2 Transformator Dtz (Delta primary – transposed zigzag secondary)	71
4.1.3 Transformator Ddtz (Delta primary – doubly transposed zigzag secondary)	76
4.1.4 Perbandingan Nilai induktansi Transformator	80
4.2 Model Pembebanan Transformator Tidak Seimbang (Pembebanan Dua Fasa Dari Sumber Tiga Fasa)	83
4.2.1 Model Simulasi Konfigurasi Transformator Dtz	84
4.2.2 Model Simulasi Transformator Ddtz	85
4.3 Simulasi Pada Transformator Untuk Pembebanan Tidak Seimbang	87
4.3.1 Bentuk Gelombang dan Spektrum Frekwensi Transformator Dtz	89
4.3.2 Bentuk Gelombang dan Spektrum Frekwensi Transformator Ddtz	90
4.4 Rekapitulasi Hasil Simulasi Pembebanan Transformator Distribusi Berdasarkan Nilai Faktor Daya	91
BAB 5 KINERJA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Ddtz DALAM MENGHAMBAT HARMONISA TRIPLEN	95
5.1 Spesifikasi dan Implementasi Perancangan Transformator	95
5.1.1 Spesifikasi Transformator	95
5.1.2 Rancangan Transformator Ddtz	96
5.2 Eksperimen dan Simulasi Model Pembebanan	97
5.2.1 Pengujian Laboratorium	98
5.2.1.1 Kondisi Beban Seimbang	100
5.2.1.2 Kondisi Beban Tidak Seimbang	101

5.2.2 Simulasi Model Pembebanan	104
5.2.2.1 Kondisi Beban Seimbang	106
5.2.2.2 Kondisi Beban Tidak Seimbang	106
5.3 Perbandingan Hasil Pengujian dan Simulasi	108
BAB 6 KESIMPULAN	109
DAFTAR ACUAN/REFERENSI	
LAMPIRAN	



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1	Konfigurasi Sistem Distribusi Industri. 1
Gambar 1.2	Alur Penelitian. 13
Gambar 2.1	Rangkaian Penyearah Satu fasa dengan filter kapasitif. 16
Gambar 2.2	Penampilan dari arus yang ditarik beban nonlinier. 17
Gambar 2.3	Spektrum Harmonisa dari arus yang dihasilkan beban nonlinier. 17
Gambar 2.4	Rangkaian ekivalen beban nonlinier. 18
Gambar 2.5	Gelombang dasar dan gelombang harmonisa ke-3 serta bentuk gelombang yang terdistorsi oleh harmonisa ke-3. 18
Gambar 2.6	Beban Nonlinier satu fasa. 24
Gambar 2.7	Gelombang arus-arus tiga fasa pada frekuensi dasar dan frekuensi harmonisa ke-3. 25
Gambar 2.8	Pembebanan pada arus netral (beban seimbang). 26
Gambar 2.9	Beban tidak seimbang. 28
Gambar 2.10	Pembebanan dari arus netral (beban tidak seimbang). 28
Gambar 2.11	Diagram aliran arus harmonisa ke-3 di transformator Dy. 29
Gambar 2.12	Diagram aliran arus harmonisa ke-3 di transformator Dz. 30
Gambar 2.13	Klasifikasi rugi Transformator. 31
Gambar 2.14	Pandangan atas transformator type inti. 33
Gambar 2.15	Skema potongan penampang samping komponen bagian utama. 34

Gambar 2.16	Rangkaian ekivalen beban nonlinier dengan kapasitor PFC.	38
Gambar 2.17	Rangkaian ekivalen jaringan distribusi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16.	38
Gambar 3.1	Skema Rangkaian Penghambat Fasa pada Transformator NBT.	44
Gambar 3.2	Skema Hubungan Dy.	45
Gambar 3.3	Skema Hubungan Vee/vee.	47
Gambar 3.4	Skema Transformator Hubungan T-Scott.	48
Gambar 3.5	Skema Transformator Hubungan Le Blanc.	50
Gambar 3.6	Model Simulasi Operasi Transformator Pembebanan Tidak Seimbang.	52
Gambar 3.7	Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekwensi Arus Fasa Sisi Primer atau Sumber Trafo Vee/vee.	54
Gambar 3.8	Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekwensi Arus Fasa Sisi Primer atau Sumber trafo T-Scott.	55
Gambar 3.9	Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekwensi Arus Fasa Sisi Primer atau Sumber Le Blanc.	57
Gambar 4.1	Hubungan Lilitan Transformator Dz.	63
Gambar 4.2	Hubungan fasor induksi Ggm diantara sisi primer dan sekunder.	63
Gambar 4.3	Pengurangan dan sirkulasi Arus Harmonisa triplen pada Transformator Dz.	65
Gambar 4.4	Tiga Gelombang sinusoidal Induksi GGM per-lilitan fasa Sekunder.	67

Gambar 4.5	Hubungan Lilitan Transformator Dtz.	68
Gambar 4.6	Diagram fasor induksi GGM diantara sisi primer dan sekunder.	68
Gambar 4.7	Pengurangan dan sirkulasi Arus Harmonisa triplen pada Transformator Dtz.	70
Gambar 4.8	Hubungan Kumparan Transformator Ddtz.	72
Gambar 4.9	Diagram fasor induksi GGM diantara sisi primer dan sekunder.	72
Gambar 4.10	Pengurangan dan sirkulasi Arus Harmonisa triplen pada Transformator Ddtz.	74
Gambar 4.11	Fasor tegangan V_2 sisi Sekunder (a). Transformator Dz; (b). Transformator DTz; dan (c) Resultan fluks induksi transformator (c1) Dy, (c2) Dz dan (c3) DTz atau Ddtz.	76
Gambar 4.12	Rasio arus output dan rugi daya kumparan transformator Dy, Dz dan DTz atau Ddtz.	78
Gambar 4.13	Skema Transformator Dtz.	79
Gambar 4.13	Skema Transformator Ddtz.	82
Gambar 4.14	Model Simulasi Operasi Transformator Pembebanan Tidak Seimbang.	84
Gambar 4.15	Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekwensi Arus Fasa Sisi Primer trafo Dtz .	85
Gambar 4.16	Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekwensi Arus Fasa Sisi Primer atau Sumber.	87
Gambar 5.1	Diagram satu garis rangkaian percobaan.	95

Gambar 5.2	(a) Rangkaian Eksperimen Pembebanan Transformator; (b) dan (e) Transformator Ddtz dan rangkaian terminasi; (c) Lampu Hemat Energi; dan (d) Alat Ukur Power Analyzer,	95
Gambar 5.3	Gelombang arus beban seimbang pada (a) Kumparan Sekunder (b) Kumparan Delta Primer.	96
Gambar 5.4	Spectrum arus harmonisa beban seimbang pada (a) Kumparan Sekunder (b) Kumparan Delta Primer.	97
Gambar 5.5	Gelombang arus beban tidak seimbang pada (a).Kumparan Sekunder; (b) Kumparan Delta Primer.	98
Gambar 5.6	Spectrum arus harmonisa beban tidak seimbang pada (a) Kumparan sekunder (b) Kumparan Delta Primer.	99
Gambar 5.7	Skema simulasi transformator Ddtz menyuplai beban nonlinier satu fasa.	101
Gambar 5.8	Bentuk Gelombang arus distorsi harmonisa di kumparan primer (a) hasil pengujian, (b) hasil simulasi pada beban seimbang.	103
Gambar 5.9	Bentuk Gelombang arus distorsi harmonisa di kumparan primer (a) hasil pengujian, (b) hasil simulasi pada beban tidak seimbang.	104

DAFTAR TABEL

	Halaman	
Tabel 2.1	Peralatan elektronik dengan penyearah satu fasa dan filter kapasitif.	18
Tabel 2.2	Beban Nonlinier dan Harmonisa yang ditimbulkan.	19
Tabel 2.3	Polaritas dari komponen harmonisa.	22
Tabel 2.4	Akibat dari polaritas dari komponen harmonisa.	22
Tabel 3.1	Rekapitulasi Harga Arus Fasa rata-rata, THD Arus Fasa rata-rata dan Faktor daya di sisi Primer.	60
Tabel 4.1	Rekapitulasi Harga Arus Fasa rata-rata, THD Arus Fasa rata-rata dan Faktor daya di sisi Primer.	89
Tabel 5.1	Data pengawatan transformator.	92
Tabel 5.2	Data pengawatan transformator Ddtz.	93
Tabel 5.3	THD arus (%) pada pembebanan Seimbang dan Tidak Seimbang.	99
Tabel 5.4	Perbedaan antara data pengujian dan hasil simulasi.	105

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
LAMPIRAN 1 Tabel Standard Tegangan Dan Arus Harmonisa Maksimum Untuk Sistem Distribusi	L1.1
LAMPIRAN 2 Hasil Simulasi Pembebanan Transformator	L2.1



DAFTAR SINGKATAN

		Halaman
SCR	Silicon Controlled Rectifiers	1
THD	Total Harmonic Distortion	1
IT	Information Technology	4
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineering	5
Dy	Delta-wye	5
NBT	Narrow Bandwidth Technology	5
Dz	Delta-zigzag	5
DTz	Delta primer – transposisi zigzag sekunder	7
DdTz	Delta primer – double transposisi zigzag sekunder	7
Ggm	Gaya gerak magnetik (ampere.lilitan)	7
Rms	Root Mean Square (efektif)	8
AC/DC	Alternating current/direct current	18
C	Kapasitor perata	18
PC	Personal computer/komputer	21
TPF/PF	True Power Factor/Power Factor	61
DPF	Displacement Power Factor	61
Hz	Hertz	96
V	Volt	96
VA	Volt – ampere	96
W	Watt	96
Kg	Kilogram	96
mm	Millimeter	96

DAFTAR ISTILAH/SIMBOL

		Halaman
V_{th}	Tegangan Thevenin	19
V_o	Tegangan output/kapasitor	19
Z_L	Impedansi beban linier	20
Z_S	Impedansi sumber	20
V_h	Tegangan harmonisa	20
$p(t)$	Daya rata-rata satu periode	23
h	Urutan harmonisa ke- h	22
V_h / I_h	Tegangan/arus komponen harmonisa ke- h	22
$v(t)/i(t)$	Tegangan/arus sesaat	23
$p(t)$	Daya sesaat.	23
THD_i / THD_v	Total Harmonic Distortion arus/tegangan	24
V_1 / I_1	Tegangan/arus frekuensi dasar, 50/60 Hertz	24
$I_{a3}(t); I_{b3}(t); I_{c3}(t)$	Arus harmonisa fasa a,b,c urutan ke-3	27
I_N	Arus netral	28
I_L	Arus beban di saluran	30
P_T	Rugi total transformator	34
P_{NL}	Rugi akibat tegangan penguat pada inti besi	34
P_{LL}	Rugi berbeban	34
P_{dc}	Rugi daya akibat arus beban dan resistansi dc lilitan	35

P_{EC}	Rugi lilitan eddy	35
P_{OSL}	Rugi bocor lainnya pada clamps, tangki, dll	35
P_{EC}	Rugi arus eddy didalam kumparan akibat beban nonlinier	35
P_{EC-R}	Rugi arus eddy didalam kumparan pada frekuensi dasar	39
P_{SL}	Rugi arus bocor pada bagian komponen besi karena arus beban nonlinier	40
P_{SL-R}	Rugi arus bocor pada bagian komponen besi pada frekuensi dasar	40
PFC	Kapasitor koreksi faktor daya	40
R	Tahanan beban linier	41
Ls	Induktansi suplai (jaringan, transformator dan saluran)	41
C	Kapasitansi kapasitor koreksi faktor daya	41
L	Nilai induktansi seri dalam transformator	
Z_L	Impedansi beban	41
$k_1 = (N_1/n); n = (N_2/2)$	Rasio antara lilitan primer dan sekunder	74
N_1	Jumlah lilitan kumparan primer	74
N_2	Jumlah lilitan kumparan sekunder	74
$u_a; u_b; u_c$	Tegangan sekunder fasa a, b, c	74
$e_a; e_b; e_c$	Induksi ggm arus beban fasa a, b, c	74
$i_{ah3,9,15,\dots}; i_{bh3,9,15,\dots};$	Arus harmonisa triplen beban fasa a, b, c	
$i_{ch3,9,15,\dots}$		75
PQ	Power Quality/ Power Analyzer meter	99

BAB 1

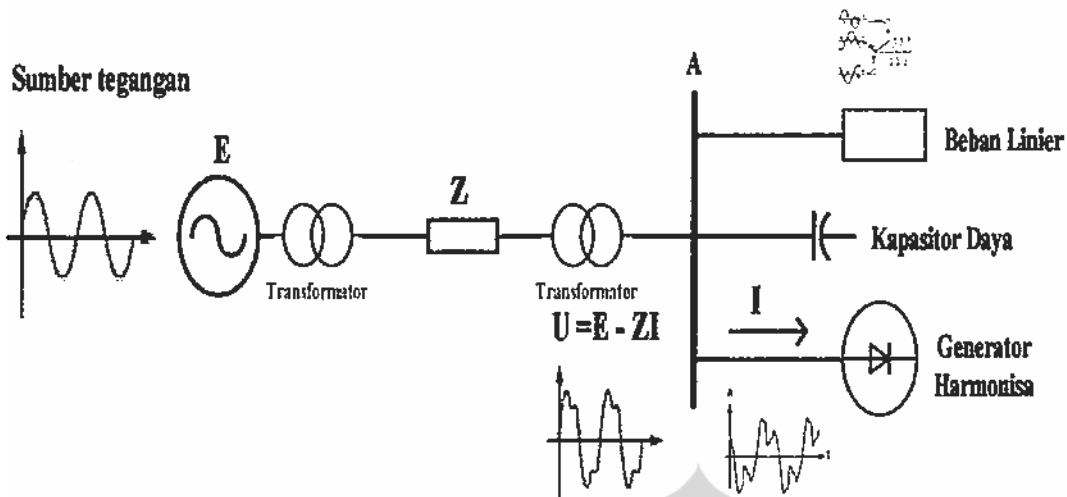
PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Harmonisa dan dampak distorsinya terhadap bentuk gelombang sumber tegangan dan arus merupakan fenomena mutu listrik pada sistem distribusi daya listrik. Harmonisa semakin menjadi masalah yang harus diatasi karena diperkirakan pada Tahun 2020, sistem kelistrikan akan dibebani lebih dari 50% perangkat elektronika atau beban nonlinier satu fasa, penghasil harmonisa [1]. Peralatan ini menggunakan diode, silicon controlled rectifiers (SCR), transistor daya, dan lain lain [2]. Peran peralatan berbasis elektronika daya ini semakin penting karena memiliki keunggulan dalam efisiensi dan mudah dikendalikan serta dipergunakan pada berbagai tingkatan daya mulai dari peralatan tegangan rendah hingga converter tegangan tinggi. Salah satu akibatnya adalah semakin tingginya tingkat distorsi harmonisa (THD) arus di jaringan sistem daya listrik.

Dampak harmonisa sistem daya diantaranya adalah panas berlebihan pada penghantar netral dan transformator serta menyebabkan terjadinya resonansi tenaga diantara jaringan distribusi dan kapasitor koreksi daya [3, 4, 5], seperti Gambar 1.1. Resonansi daya pada busbar menyebabkan tegangan harmonisa meningkat sangat tinggi dan dapat merusak bahan dielektrik kapasitor daya serta membahayakan peralatan listrik pada pelanggan sekitarnya [5].

Universitas Indonesia



Gambar 1.1 Konfigurasi Sistem Distribusi Industri.

Pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat diketahui bahwa harmonisa triplen memiliki karakteristik elektrik yang sama dengan arus urutan nol yaitu sudut fasa semua arus harmonisa triplen sefasa terhadap frekuensi dasar dan magnitudnya saling menjumlahkan. Karakteristik lainnya adalah arus harmonisa triplen mengalir di penghantar netral dan bersirkulasi didalam kumparan delta transformator sehingga menyebabkan distorsi tegangan dan menghasilkan kerugian panas tambahan di penghantar [2, 3, 6]. Semakin besar komponen arus harmonisa yang mengalir di penghantar dan bersirkulasi didalam kumparan transformator akan menyebabkan nilai rms arus beban bertambah besar, dan kuadrat dari arus akan memperbesar kerugian daya. Umumnya kerugian arus eddy diasumsikan sebanding dengan kuadrat arus rms dan kuadrat frekuensi (urutan harmonisa h , adalah urutan harmonisa $ke-h$) [2], seperti pada persamaan (1.1).

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=\max} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \quad (1-1)$$

Dimana

P_{EC} adalah kerugian arus eddy didalam kumparan karena arus beban nonlinier; P_{EC-R} adalah kerugian arus eddy didalam kumparan pada frekuensi dasar, h adalah urutan harmonisa adalah I_h , arus rms frekuensi harmonisa, dan I_R adalah arus rms frekuensi dasar.

Dari persamaan diatas menunjukkan bahwa kenaikan kerugian arus eddy menyebabkan kenaikan kerugian kumparan dan selanjutnya menaikkan temperatur yang lebih besar dari nilai arus frekuensi dasar.

Distorsi harmonisa triplen tidak hanya menimbulkan kerugian panas tambahan tetapi juga memperbesar resonansi daya diantara impedansi kapasitor tenaga (koreksi faktor daya) dengan impedansi sistem distribusi [5]. Saat terjadi resonansi daya, nilai reaktansi (impedansi) kapasitor tenaga menjadi kecil seiring dengan meningkatnya frekuensi, seperti ditunjukkan persamaan (1.2).

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \text{ Ohm} \quad (1.2)$$

Hal ini karena saat frekuensi tinggi, impedansi kapasitor berfungsi sebagai jalan balik atau perangkat bagi arus harmonisa dari beban nonlinier milik pelanggan sekitar dan/atau dari sistem distribusi. Efek dari meningkatnya aliran arus harmonisa pada kapasitor

adalah meningkatnya pemanasan dan stress dielektrik yang dapat menyebabkan kegagalan kapasitor bank.

Harmonisa triplen telah menjadi isu penting seiring dengan makin meluas dan tersebarnya penggunaan lampu fluorescent dan perangkat IT yang menimbulkan distorsi gelombang sinusoidal tegangan dan arus pada jaringan distribusi. Gelombang distorsi harmonisa tersebut menumpang pada gelombang dasar sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan penjumlahan antara gelombang dasar sesaat dengan gelombang harmonisa. Salah satu dampak distorsi gelombang sinusoidal adalah semakin besarnya tingkat distorsi harmonisa arus yang dapat menimbulkan masalah mutu listrik. Salah satu masalah tersebut adalah transformator distribusi menjadi tidak efektif dan efisien untuk mencegah aliran arus harmonisa triplen ke sisi sumber. Akibatnya, arus harmonisa triplen mengalir bebas dari sisi konsumen ke sisi suplai tanpa dapat diredam transformator [3].

Transformator adalah peralatan utama pada sistem daya listrik [2]. Umumnya transformator dibuat untuk beroperasi pada frekuensi dasar, namun saat ini sebagian besar beban yang terpasang adalah beban nonlinier satu fasa yang terdistribusi tidak seimbang dan waktu penggunaannya (penyalaaan) tidak serentak. Dampak harmonisa dan makin tingginya tingkat distorsi harmonisa akan meningkatkan kerugian daya dan kenaikan temperatur yang dapat memperpendek masa penggunaan transformator. Kondisi operasi pembebanan tidak seimbang dan karakteristik kelistrikan beban nonlinier mengakibatkan terjadinya derating transformator atau menggantinya dengan unit yang lebih besar [2]. Tuntutan akan kebutuhan pola pembebanan dengan dominasi beban nonlinier adalah tantangan bagi pihak pabrikan dan akademisi dalam mengembangkan

teknologi berbasis transformator untuk menghasilkan disain transformator yang optimal mengatasi salah satu masalah mutu daya listrik.

Teknologi transformator terus dikembangkan dan diharapkan mampu mengatasi masalah mutu daya listrik langsung di pangkal sumbernya. Charles Proteus Steinmetz (1916) adalah peneliti yang pertama mengusulkan transformator dengan konfigurasi kumparan delta untuk menghambat arus harmonisa ketiga akibat kejenuhan inti besi pada transformator dan mesin listrik [3]. Selanjutnya, diketahui bahwa disain kumparan delta primer mampu memaksa arus harmonisa triplen dari beban nonlinier bersirkulasi di kumparan transformator distribusi sehingga tidak mengalir ke sisi sumber [4]. Tetapi upaya “menyirkulasikan” tersebut menimbulkan panas tambahan di transformator dan menurunkan efisiensi transformator [4, 6]. Sebagai akibat dampak harmonisa triplen pada komponen sistem daya listrik maka IEEE menetapkan Standard 519-1992 untuk memberikan rekomendasi praktis dalam mengendalikan harmonisa [26, 27]. Standard ini juga menetapkan tingkat distorsi harmonisa maksimum yang diperbolehkan untuk berbagai jenis sistem distribusi, seperti Tabel L1.1 dan Tabel L1.2 didalam Lampiran 1.

Telah banyak literatur dan penelitian membahas teknologi transformator penghambat distorsi harmonisa arus dengan berdasarkan rancangan kumparan khusus transformator. Beberapa rancangan tersebut antara lain adalah transformator hubungan Delta-wye (Dy) [7], transformator Narrow Band Technology (NBT) [8], transformator Vee/vee (Open Delta), transformator T-Scott, transformator Le Blanc [9, 10], dan serta transformator Delta-zigzag (Dz) [6, 11]. Pada transformator Dy, kumparan primer dan sekunder berfungsi sebagai penghambat arus harmonisa yang mengalir dari sisi sekunder ke sisi primer. Arus harmonisa ke-3 dan harmonisa kelipatan tiga dari bilangan ganjil (triplen: 3,

Universitas Indonesia

9, 15,...dst) tersebut disirkulasikan didalam kumparan delta primer agar tidak mengalir ke sisi sumber [3, 4, 6]. Transformator Vee/Vee efisien dan efektif untuk melayani kebutuhan beban yang sedang meningkat. Transformator NBT beroperasi berdasarkan prinsip penghambat fasa dan teknologi filter frekuensi tinggi [8]. Sedangkan pada transformator Le Blanc dengan kombinasi filter resonansi frekuensi ganda mampu membatasi distorsi harmonisa arus dan tegangan, mengatasi ketidakseimbangan beban dan kenaikan arus netral akibat arus harmonisa yang tinggi [10]. Transformator T-Scott meminimisasi harmonisa arus dengan metode mensuper-posisi komponen arus harmonisa dari dua cabang beban sistem sehingga saling meniadakan [9]. Menurut J. Schonek, transformator Dz sekunder zigzag dua kumparan mampu meminimisasi harmonisa triplen pada pembebanan seimbang sistem tiga-fasa karena ggm arus harmonisa saling menghilangkan sehingga tidak menginduksikan ke kumparan primer [6].

1.2 TUJUAN PENELITIAN

Melihat latar belakang permasalahan bahwa transformator distribusi yang ada saat ini sudah tidak efektif dan efisien untuk menghambat aliran arus harmonisa triplen dari sisi konsumen ke sisi saluran distribusi maka perlu upaya untuk menghambat harmonisa dan memperkecil dampak distorsi harmonisa.

Tujuan dari penelitian disertasi ini adalah mengintegrasikan tiga teori penghambatan induksi fluks elektromagnetik untuk menghasilkan tingkat peredaman harmonisa triplen yang optimal sehingga didapat:

1. Fluks magnetik yang seimbang diantara kumparan delta tiga fasa sisi primer.
2. Menurunkan magnitud arus harmonisa triplen dengan memperbesar impedansi dalam kumparan rangkaian transformator.
3. Arus arus harmonisa triplen dipaksa bersirkulasi didalam kumparan delta primer agar tidak mengalir ke sisi sumber.

Tujuan akhir dari penelitian ini adalah mendapatkan transformator yang memiliki kriteria-kriteria diatas dan diharapkan dapat diterapkan untuk pemakaian di gardu-gardu distribusi terutama di pusat-pusat industri dan bisnis yang banyak terdapat beban nonlinier satu fasa.

1.3 METODOLOGI PENELITIAN

Dalam disertasi ini membahas solusi masalah harmonisa dengan menerapkan sistem delta primer – transposisi zigzag sekunder (Dtz atau DTz) berdasarkan integrasi 3 (tiga) teori yang dapat dijelaskan sebagai berikut. Pertama, prinsip menyeimbangkan fluks magnetik dengan tujuan agar induktansi diri kumparan fasa menjadi seimbang sehingga induksi tegangan didalam kumparan menjadi simetris. Salah satu cara untuk mendapatkan keseimbangan fluks adalah dengan menukar konfigurasi dari setiap 1/3 bagian kumparan fasa sisi sekunder agar menempati posisi di ketiga kaki inti secara bergantian. Prinsip kedua adalah penghambatan fasa fluks dengan tujuan agar polaritas

Universitas Indonesia

fluks magnetik arus arus harmonisa triplen saling berlawanan fasa atau melemahkan pada saat frekuensi triplen. Untuk itu, setiap $1/3$ bagian kumparan fasa identik pada ketiga kaki inti sisi sekunder dihubungkan seri secara silang simetris (transposisi) sehingga resultan fluks magnet yang saling berlawanan fasa akan menurun. Selanjutnya, prinsip ketiga yaitu mencegah penyebaran aliran induksi arus harmonisa triplen. Untuk itu, kumparan kumparan fasa di sisi primer dihubungkan secara delta untuk tempat bersirkulasi sisa dari induksi arus harmonisa triplen agar tidak menyebar ke sisi sumber dan tidak mendistorsi tegangan atau arus di sisi sumber.

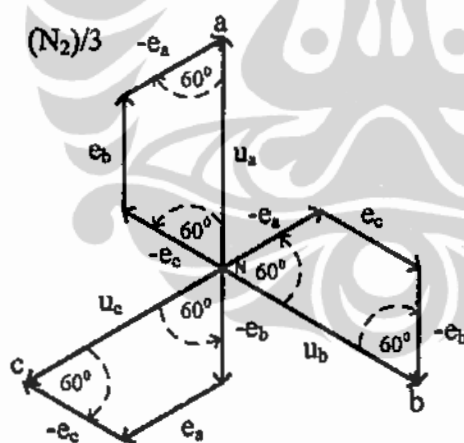
1.4 HIPOTESIS PENELITIAN

Dari penelusuran pustaka dan data serta kajian model matematika menunjukkan bahwa pada operasi transformator T-Scott dan Le Blanc pada kondisi pembebanan tidak seimbang beban nonlinier diperlukan perangkat autotransformator dan filter untuk mengatasi distorsi harmonisa. Dengan metode transformator Dy dan Dz terjadi kenaikan nilai rms arus setiap fasa arus akibat beban nonlinier dan pembebanan tidak seimbang. Dari keterbatasan transformator distribusi konvensional diatas maka digunakan teknologi transformator Dtz untuk mengatasi masalah aliran harmonisa arus dari beban ke saluran sistem distribusi. Teknologi pada transformator Dtz mampu menyeimbangkan arus arus di sisi primer sehingga bentuk gelombang arus di sisi primer tetap mendekati gelombang sinusoidal murni. Hasilnya, tingkat distorsi akibat induksi ggm harmonisa triplen beban nonlinier menurun.

Penelitian ini berupaya membuktikan bahwa penggunaan transformator konfigurasi Dtz diharapkan dapat menurunkan arus harmonisa triplen dengan kriteria-kriteria sebagai berikut.

1. Penelitian ini melakukan upaya menyeimbangkan induksi ggm arus arus fasa beban melalui transposisi kumparan di sisi zigzag sekunder.

Keseimbangan fluks magnetik kumparan perfasa sekunder diperoleh dengan mentransposisi tiga bagian kumparan zigzag di ketiga kaki inti yang berbeda. Resultan fluks magnetik didalam kumparan fasa sekunder menghasilkan resultan induksi tegangan sekunder perfasa yang lebih seimbang karena mengandung tiga arus fasa a-b-c beban. Sebagai contoh, ditinjau tegangan induksi didalam kumparan fasa-a yaitu u_a yang dibangkitkan oleh resultan induksi ggm tiga arus fasa beban, seperti pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Diagram fasor induksi ggm di sisi sekunder.

Berdasarkan Gambar 1.2 maka didapat hubungan fasor tegangan induksi didalam kumparan fasa-a sekunder, seperti persamaan (1.3).

$$u_a = \frac{N_2}{3} \cdot (i_c + i_b + i_a) \quad (1.3)$$

Universitas Indonesia

atau

$$u_a = (e_c + e_b + e_a) \quad (1.4)$$

Dimana:

$\frac{N_2}{3}$ adalah satu per tiga bagian kumparan sekunder di setiap kaki inti.

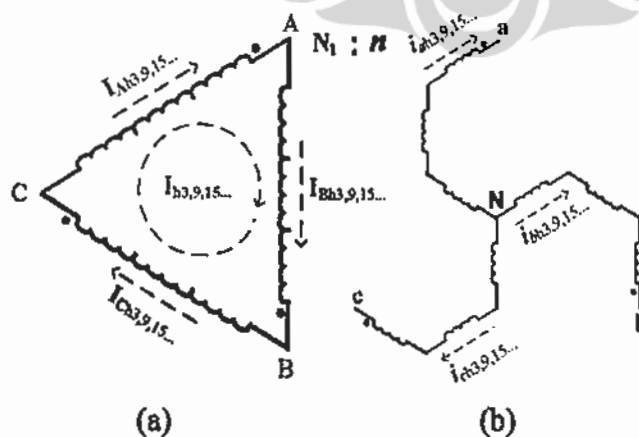
i_a, i_b dan i_c adalah arus fasa a-b-c beban

e_a, e_b dan e_c adalah fluks induksi atau gaya gerak magnetik arus fasa a-b-c beban.

Dengan semakin seimbangya induksi tegangan diantara kumparan sekunder maka diharapkan selisih THD arus harmonisa diantara arus beban yang diinduksikan melalui kaki inti ke kumparan fasa primer dengan THD arus rata-rata di sisi primer semakin kecil.

- Penelitian ini juga berupaya untuk menghambat aliran induksi fluks harmonisa triplen dengan membuat polaritas konfigurasi kumparan transposisi zigzag di sisi sekunder agar saling berlawanan fasa (*phase cancel out*).

Aliran arus harmonisa triplen di masing-masing kumparan transposisi zigzag sekunder yang diminimasi didalam kumparan delta primer, seperti Gambar 1.3.



Gambar 1.3 (a) Pengurangan dan (b) sirkulasi Arus Harmonisa triplen pada Transformator Dtz.

Universitas Indonesia

Berdasarkan Gambar 1.3(a) maka didapat arus harmonisa triplen didalam kumparan transposisi zigzag sekunder yang diminimasi didalam kumparan delta primer contohnya pada kumparan fasa-A, seperti persamaan (1.5).

$$I_{Ah3,9,15,\dots} = \frac{n}{N_1} \left(-i_{ch3,9,15,\dots}/3 + i_{bh3,9,15,\dots}/3 - i_{ah3,9,15,\dots}/3 \right) \quad (1.5)$$

Aliran arus harmonisa yang diminimasi tersebut adalah selisih diantara THD arus harmonisa di sisi sekunder dan THD arus di sisi primer.

- Selanjutnya, penelitian ini juga mengupayakan bahwa penyebaran aliran arus harmonisa triplen ke sisi sumber dapat dibatasi dengan cara menyirkulasikan sisa induksi ggm arus harmonisa beban di sisi delta primer. Selanjutnya resultan magnitud aliran arus harmonisa triplen untuk kondisi pembebanan seimbang pada persamaan (1.5) dapat diturunkan menjadi seperti persamaan (1.6).

$$i_{Ah3,9,15,\dots} = \frac{n}{3N_1} I_{ah3,9,15,\dots} \angle 0^\circ \quad (1.6)$$

Persamaan (1.6) menunjukkan sisa arus harmonisa yang diindukasikan didalam kumparan delta melalui inti yang menjadi lebih kecil.

Penelitian dalam disertasi ini membuktikan model transformator konfigurasi Dtz adalah salah satu pilihan untuk mengatasi masalah distorsi harmonisa karena ketidakseimbangan beban nonlinier berdasarkan teorema penghambatan induksi medan elektromagnetik. Dalam penelitian ini magnitud aliran arus harmonisa dan ggm induksinya dibatasi dan diseimbangkan dengan metode transposisi belitan zigzag di sisi sekunder. Transposisi belitan zigzag selain akan menyeimbangkan induksi fluks arus

Universitas Indonesia

harmonisa juga memperbesar impedansi dalam transformator sehingga arus harmonisa pada frekuensi harmonisa menurun, Induksi ggm harmonisa triplen yang seimbang diantara ketiga kumparan fasa sekunder menghasilkan induksi tegangan relatif seimbang didalam kumparan tiga fasa. Dengan induksi tegangan kumparan sekunder yang seimbang maka beda tegangan diantara kumparan fasa akan lebih kecil akibatnya magnitud arus harmonisa yang bersirkulasi didalam kumparan delta primer semakin kecil. Apabila sirkulasi arus harmonisa triplen dibatasi maka penyebaran arus harmonisa ke sisi sumber dapat dihambat sehingga tidak mendistorsi bentuk gelombang tegangan dan arus sumber. Dengan semakin sedikitnya kandungan THD arus maka nilai rms arus setiap fasa yang mengalir dari suplai ke terminal input sisi primer transformator menurun. Hasilnya, penggunaan transformator Dtz peredam harmonisa mampu mengoptimalkan kapasitas atau kemampuan (ability) pembebanan pada transformator distribusi.

1.5 KONTRIBUSI PENELITIAN

Kontribusi dari penelitian ini adalah didapatnya keseimbangan induksi magnetik dan perancangan konfigurasi kumparan transformator Dtz yaitu:

1. Keseimbangan fluks magnetik dapat mengoptimalkan peredaman harmonisa triplen dibuktikan melalui pengembangan pemodelan konfigurasi kumparan delta primer – transposisi zigzag sekunder transformator. Metode modifikasi kopling medan elektromagnetik melalui transposisi kumparan zigzag diterapkan untuk memastikan keseimbangan fluks magnetik dan penghambatan fasa fluks secara benar dan akurat.

2. Rancangan konfigurasi transposisi belitan zigzag sekunder menghasilkan resultan fluks utama yang lebih simetris sehingga induksi tegangan (ampere.lilitan) kumparan fasa lebih simetris. Selanjutnya, konfigurasi kumparan transposisi ini menyebabkan fluks ggm lawan (*back electromotive force*) lebih kecil sehingga kerugian fluks magnetik lebih sedikit di sisi primer. Akhirnya, pengaruh aliran balik arus harmonisa triplen, dalam bentuk THD arus harmonisa triplen, ke sistem distribusi dapat dikurangi. Tingkat peredaman THD arus harmonisa triplen dan faktor daya kondisi sistem terdistorsi harmonisa di sisi primer atau di sisi sumber menjadi lebih baik.

1.6 LINGKUP PENELITIAN

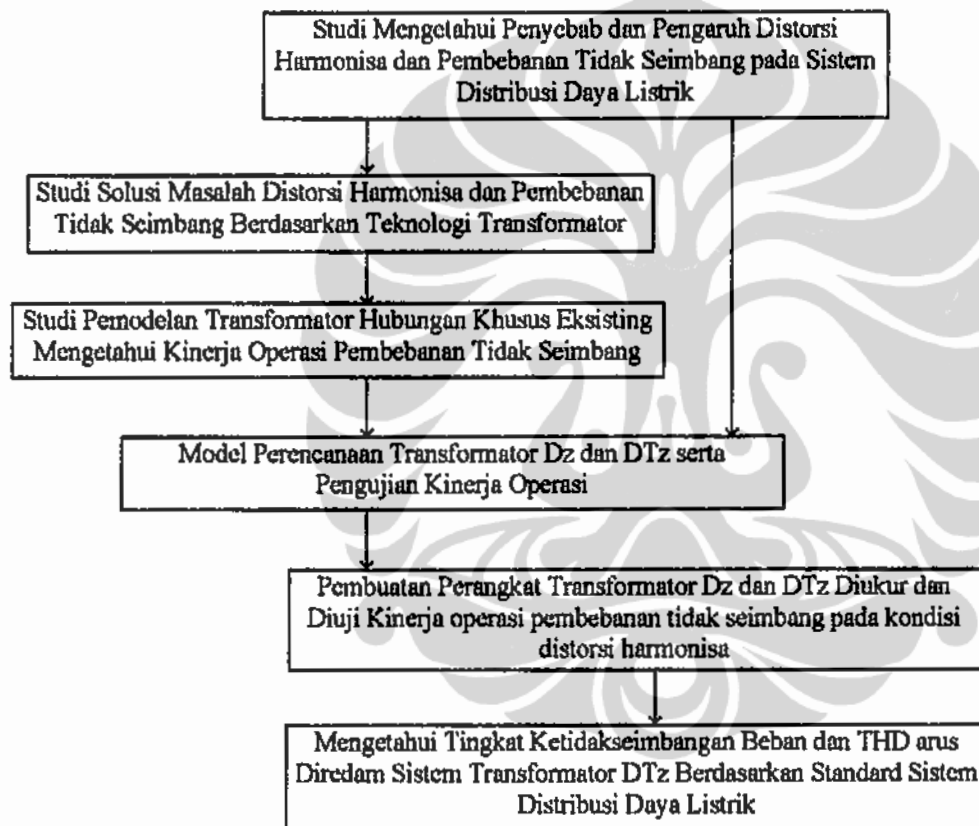
Dalam penelitian untuk disertasi ini dilakukan beberapa tahapan utama yaitu:

1. Studi evaluasi terhadap model matematika transformator distribusi NBT, Vee/vee, T-Scott, Le Blanc, Dy dan Dz dan Dtz untuk mengetahui kemampuannya dalam operasi pembebanan tidak seimbang.
2. Pengembangan model matematika untuk rangkaian listrik dan rangkaian kopling medan elektromagnetik pada transformator distribusi Dtz berdasarkan metode matematika dan teori fisika yang berlaku pada transformator.
3. Simulasi model konfigurasi transformator distribusi Dtz dan analisis kemampuannya dalam mengatasi distorsi harmonisa dan masalah ketidakseimbangan beban.
4. Pembuatan perangkat transformator Dz dan Dtz dan melakukan eksperimen untuk menguji kemampuannya dalam berbagai kasus untuk menghambat aliran distorsi harmonisa triplen akibat distorsi harmonisa.

1.7 ALUR PENELITIAN

Hasil penelitian untuk disertasi disusun atas 5 (lima) bab yang saling terkait satu sama lain.

Bab satu merupakan bab pendahuluan yang memuat: latar belakang permasalahan, tujuan penelitian, hipotesis, kontribusinya dari lingkup penelitian. Dalam bab ini juga, penelitian untuk disertasi ini dilengkapi dengan alur penelitian, seperti pada Gambar 1.4.



Gambar 1.4 Alur Penelitian.

Bab dua memuat tinjauan teori mengenai model matematika transformator distribusi. Bab ini menjelaskan rangkaian ekuivalen perfasa dari transformator hubungan NBT, Vee/vee, T-Scott, Le Blanc, Dy dan Dz serta sedikit penjelasan penggunaannya. Pada bab

Universitas Indonesia

dua ini juga dibahas kekurangan dan kelebihan dari masing-masing tipe transformator distribusi ini.

Dalam Bab tiga dilakukan pengembangan model matematika transformator distribusi Dz dan Dtz untuk membatasi tingkat ketidakseimbangan beban dan distorsi harmonisa. Pada bab ini juga dibahas teori distribusi kumparan sekunder untuk menyeimbangkan induksi ggm arus beban di kaki inti transformator. Demikian pula, untuk meminimasi aliran arus harmonisa dari beban kembali ke sumber diusulkan metode penghambatan fasa dan isolasi pada transformator.

Selanjutnya dalam Bab empat dilakukan analisis melalui simulasi operasi pembebanan tidak seimbang terhadap transformator distribusi Dz, Dtz dan Ddtz untuk ditentukan tingkat pengaruh ketidakseimbangan beban. Pengaruh tingkat ketidakseimbangan pada transformator diidentifikasi dari bagaimana bentuk gelombang arus fasa di sisi primer atau sumber, apakah masih mendekati bentuk gelombang sinusoidal. Serta bagaimana perbandingan relatif magnitud antara arus harmonisa urutan terhadap arus frekuensi dasarnya, apakah rasionya besar atau kecil. Semua hal tersebut dibahas dalam bab ini.

Kemudian dalam bab lima dilakukan tahapan implementasi rancangan konfigurasi kumparan delta primer – transposisi zigzag sekunder untuk diuji secara eksperimen di laboratorium. Selanjutnya, hasil ekperimen dibandingkan dengan simulasi model pembebanan transformator untuk memastikan bahwa pengaruh integrasi tiga teori adalah benar, layak dan dapat dicapai.

Setelah mengkaji, menganalisis dan menguji dari model transformator yang ada serta membandingkan dan memeriksa dengan rancangan transformator yang dibangun secara

Universitas Indonesia

eksperimen maka hasilnya disimpulkan dalam bab enam. Selanjutnya, untuk kegiatan pengembangan teknologi transformator Dtz dan penerapannya didalam sistem distribusi maka beberapa saran topik penelitian lebih lanjut juga disampaikan didalam bab enam ini.



Universitas Indonesia

BAB 2

PENGARUH PEMBEBANAN NONLINIER PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DAN SISTEM DISTRIBUSI TENAGA

Harmonisa dan dampak distorsinya pada bentuk gelombang tegangan dan arus telah ada sejak awal sejarah sistem tenaga arus bolak balik [2]. Saat ini jenis dan jumlah peralatan listrik penghasil harmonisa telah meningkat dengan cepat, seperti peralatan elektronika daya yang menggunakan diode, silicon controlled rectifiers (SCR), transistor daya, dll [2]. Karena memiliki keunggulan dalam efisiensi dan mudah dikendalikan, maka peran peralatan elektronika daya ini di masa mendatang terus dikembangkan. Selanjutnya peralatan elektronika daya dapat dipergunakan untuk berbagai tingkatan daya mulai dari peralatan domestic tegangan rendah hingga converter tegangan tinggi. Selain keunggulan-keunggulannya, maka peralatan-peralatan tersebut merupakan sumber harmonisa yang salah satu dampak merugikannya adalah, semakin besarnya tingkat distorsi harmonisa arus pada sistem jaringan distribusi.

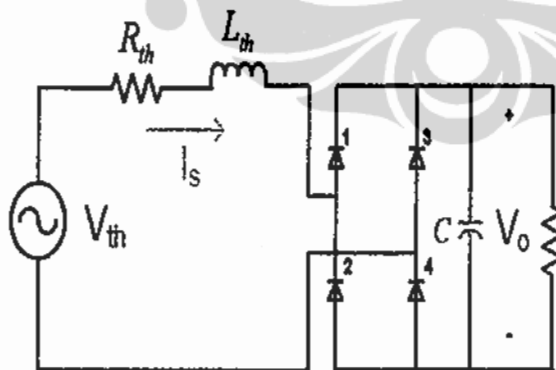
Transformator adalah peralatan utama pada sistem daya listrik [2] dengan meningkatnya harmonisa dapat menyebabkan meningkatnya arus rms sehingga terjadi kenaikan temperatur pada penghantar kumparan dengan demikian rugi kumparan juga mengalami kenaikan dan pada akhirnya efisiensi transformator juga menurun. Arus harmonisa tidak hanya menimbulkan rugi panas tambahan di saluran distribusi, transformator dan beban lainnya tetapi arus harmonisa yang mendistorsi sistem tenaga juga dapat memperbesar resonansi daya diantara kapasitor koreksi daya dan impedansi

Universitas Indonesia

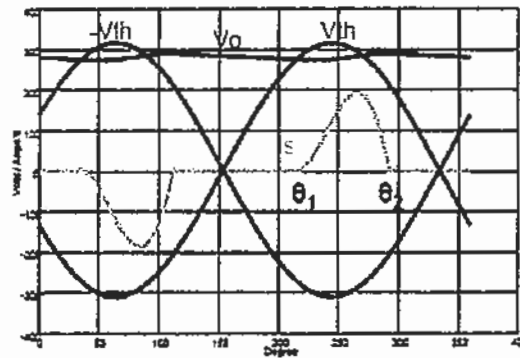
sistem distribusi di Industri. Dalam Bab ini dibahas dampak harmonisa ke-3 dan kelipatan tiga (triplen) serta dampak harmonisa pada transformator distribusi dan kapasitor koreksi faktor daya terhadap kinerja jaringan distribusi.

2.1 Harmonisa Ke-3 Dan Harmonisa Kelipatan Tiga (Triplen)

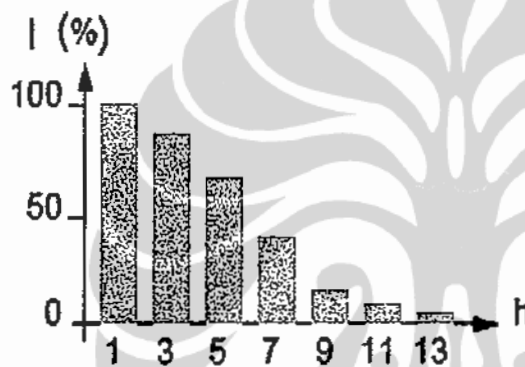
Umumnya pada beban nonlinier satu fasa terdapat penyearah diode dan filter kapasitif, seperti Gambar 2.1, dimana kandungan harmonisa ke-3 yang dibangkitkan mencapai 80% dari frekuensi dasar [6]. Peralatan elektronik ini menggunakan tegangan DC yang didapatkan dengan menyearahkan tegangan bolak balik saluran menggunakan penyearah satu fasa dan kapasitor perata C , seperti pada Gambar 2.1. Ketika tegangan Thevenin, V_{th} lebih tinggi dari tegangan pada kapasitor, V_0 maka dioda akan melakukan arus. Hal ini menghasilkan bentuk gelombang arus yang tidak sebangun dengan gelombang tegangan (nonlinier) dan mengalami distorsi (nonsinusoidal) seperti pada Gambar 2.2. Sedangkan, spektrum frekuensi harmonisa arus yang dihasilkan beban nonlinier seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.1 Rangkaian Penyearah Satu fasa dengan filter kapasitif.



Gambar 2.2 Penampilan dari arus yang ditarik beban nonlinier.



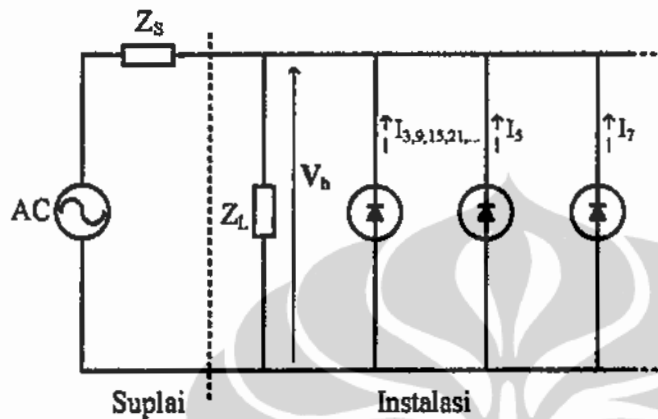
Gambar 2.3 Spektrum Harmonisa dari arus yang dihasilkan beban nonlinier.

Setiap gelombang periodik dapat diuraikan menjadi gelombang sinusoidal dengan frekuensi dasar dijumlahkan dengan sejumlah gelombang sinusoidal pada berbagai frekuensi harmonisa. Dengan demikian bentuk gelombang arus terdistorsi seperti pada Gambar 2.2 dapat diwakili oleh gelombang dasar dijumlahkan dengan gelombang harmonisa ke-3 dijumlahkan gelombang harmonisa ke-5 dan seterusnya.

Gambar 2.4 menunjukkan rangkaian ekuivalen dari sebuah beban nonlinier seperti pada Gambar 2.1. Rangkaian ini dapat dimodelkan dengan impedansi beban linier, Z_L , yang diparalel dengan sejumlah sumber arus, satu sumber arus harmonisa untuk setiap

Universitas Indonesia

frekuensi harmonisa. Arus arus harmonisa yang dibangkitkan beban nonlinier mengalir didalam rangkaian melalui impedansi sumber, Z_s dan ke semua jalur paralel lainnya. Hasilnya, tegangan harmonisa, V_h timbul pada impedansi sumber dan pada seluruh instalasi.



Gambar 2.4 Rangkaian ekivalen beban nonlinier.

Impedansi sumber, Z_s sangat kecil sehingga distorsi tegangan harmonisa yang dihasilkan dari arus harmonisa adalah juga kecil dan umumnya diabaikan. Kurva spektrum frekuensi dasar dan frekuensi harmonisa dari Gambar 2.4 dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 2.3.

Peralatan elektronika yang digunakan pada berbagai bidang kegiatan seperti pada Tabel 2.1 ini merupakan sumber harmonisa ke-3 yang terbesar pada sistem distribusi.

Tabel 2.1 Peralatan elektronika dengan penyearah satu fasa dan filter kapasitif.

Bidang Kegiatan	Peralatan elektronika
Domestik	TV, hi-fi, video, microwave, ovens, lampu fluorescent balastt elektronika, dll.
Perkantoran	Micro-computers, printers, mesin photocopy, mesin fax dll.
Industri	Catu daya tipe saklar elektronika, kendali kecepatan motor

Universitas Indonesia

Spektrum frekuensi harmonisa triplen yang paling dominan diantara beban nonlinier [6, 14], seperti Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Beban Nonlinier dan Harmonisa yang ditimbulkan.

Peralatan elektronik	THD Arus (%)		
	Ke-3	Ke-5	Ke-7
Komputer-mikro, Komputer (PC)	78	44	17
Lampu fluorescent balastt elektronik	36	3	
Main-computer, server, peralatan IT	48	-	16

Harmonisa triplen telah menjadi isu penting seiring dengan makin meluas dan tersebarnya penggunaan lampu fluorescent dan perangkat IT yang menimbulkan distorsi gelombang sinusoidal tegangan dan arus di jaringan distribusi. Gelombang distorsi harmonisa tersebut menumpang pada gelombang dasar sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang dasar sesaat dengan gelombang harmonisa.

Karakteristik harmonisa dapat dinyatakan dalam deret Fourier.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h * \cos(h\omega_0 t) + b_h * \sin(h\omega_0 t)\} \quad (2.1)$$

Atau dalam bentuk lain menjadi:

$$f(t) = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h * \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2.2)$$

Dimana

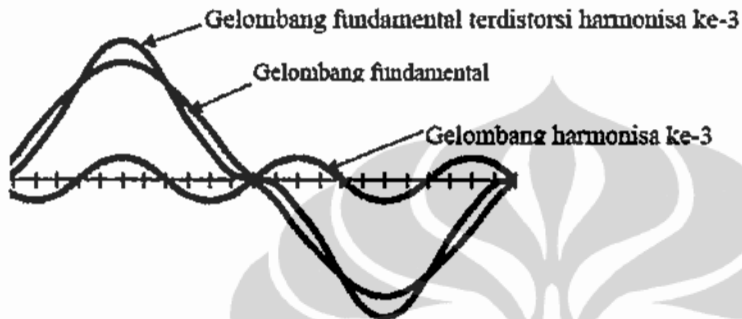
$C_0 = a_0/2$: komponen dc

$C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$: nilai harmonisa ke-h

Universitas Indonesia

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a_h}{b_h}\right) : \text{sudut fasa harmonisa ke-}h$$

Gambar bentuk gelombang dasar dan, misalnya gelombang harmonisa ke-3 serta bentuk gelombang dasar yang terdistorsi oleh harmonisa ke-3, seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Gelombang dasar dan gelombang harmonisa ke-3 serta bentuk gelombang yang terdistorsi oleh harmonisa ke-3.

Deret Fourier dapat diterapkan untuk persamaan tegangan dan arus harmonisa, seperti persamaan (2.3).

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (2.3)$$

Dan

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_0 t + \delta_h) \quad (2.4)$$

Dengan mengabaikan komponen DC maka V_h dan I_h adalah harga rms (root mean square) atau efektif untuk harmonisa orde ke- h dari tegangan dan arus.

Daya sesaat didefinisikan sebagai:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.5)$$

Dan daya rata-rata untuk satu periode T dari $p(t)$ didefinisikan seperti persamaan (2.6).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.6)$$

Jika persamaan (2.3) dan (2.4) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.5) dan dengan menggunakan relasi orthogonal maka didapat:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) menunjukkan bahwa setiap harmonisa memberikan kontribusi pada daya rata-rata.

Perbandingan antara akar dari jumlah kuadrat nilai rms komponen harmonisa ke-2, ke-3 dan seterusnya terhadap komponen dasar yang biasanya dinyatakan dalam persen, indeks ini disebut THD (Total Harmonic Distortion), dan biasanya digunakan untuk menyatakan penyimpangan bentuk gelombang yang mengandung harmonisa terhadap gelombang sinusoidal sempurna dalam satu periode. Bentuk gelombang sinusoidal sempurna pada frekuensi dasar, nilai THDnya adalah nol.

Persamaan untuk menentukan THD tegangan dan THD arus, seperti persamaan (2.8) dan (2.9).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.8)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.9)$$

Nilai arus rms atau efektif dapat dinyatakan dengan Identitas Parseval [33], seperti persamaan (2.10).

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (2.10)$$

Dimana:

I_{rms} adalah arus rms/efektif total

h adalah urutan harmonisa ke- h

I_h adalah arus komponen harmonisa ke- h

I_1 adalah arus frekuensi dasar, 50/60 Hertz

2.2 Pengaruh Harmonisa Pada Sistem Distribusi

Setiap komponen sistem distribusi dapat dipengaruhi oleh harmonisa dan akibatnya komponen tersebut akan mengalami penurunan kinerja dan bahkan mengalami kerusakan. Salah satu dampak yang umum dari gangguan harmonisa adalah panas lebih pada transformator sebagai akibat timbulnya harmonisa triplen yang dibangkitkan oleh peralatan listrik satu fasa. Pada keadaan normal, arus beban setiap fasa dari beban non linier satu fasa akan menimbulkan harmonisa triplen yang sering disebut harmonisa urutan nol (zero sequence harmonics), seperti Tabel 2.3. Harmonisa ini dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa.

Tabel 2.3 Polaritas dari komponen harmonisa.

Harmonisa	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frekuensi (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Urutan	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Harmonisa pertama urutan polaritasnya adalah positif, harmonisa kedua polaritasnya adalah negatif dan harmonisa tiga (= triplen) urutan polaritasnya adalah nol, harmonisa keempat adalah positif (berulang berurutan sampai seterusnya).

Akibat yang dapat ditimbulkan oleh urutan polaritas komponen harmonisa, seperti Tabel 2.4, antara lain tingginya arus netral pada sistem tiga fasa empat kawat (sisi sekunder transformator) karena arus urutan nol (zero sequence) dan arus ini akan terinduksi ke sisi primer transformator dan akan berputar pada sisi primer transformator yang biasanya memiliki kumparan delta (D).

Tabel 2.4 Akibat dari polaritas dari komponen harmonisa.

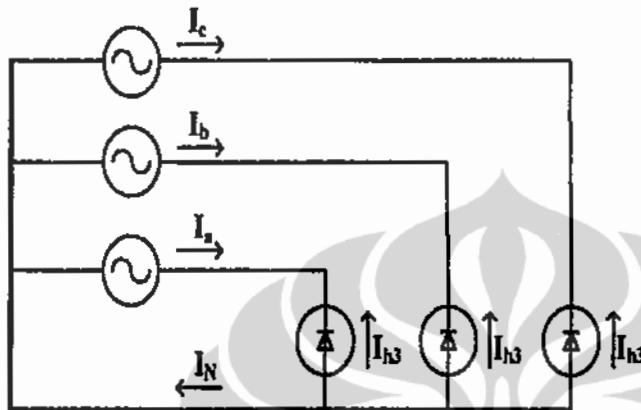
Urutan	Pengaruh pada sistem distribusi dan transformator
Positif	Panas
Negatif	- Panas - Arah putaran motor berubah
Nol	- Panas - Menimbulkan/menambah arus pada kawat netral

Pengaruh Harmonisa pada transformator sering tanpa disadari dan diantisipasi keberadaannya sampai terjadi gangguan yang penyebabnya tidak jelas. Transformator selalu terpengaruh oleh harmonisa karena transformator itu sendiri dirancang sesuai dengan frekuensi kerjanya. Frekuensi harmonisa yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya transformator.

Universitas Indonesia

2.2.1 Pengaruh Harmonisa Pada Pembebanan Seimbang

Ditinjau sistem tiga fasa terdiri dari sumber tiga fasa seimbang dan tiga kelompok beban nonlinier satu fasa, dipasang diantara penghantar fasa dan netral, seperti Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Beban Nonlinier satu fasa.

Karena tiga arus fasanya sama besar maka arus harmonisa urutan ke-3 memiliki magnitud yang sama besar dan ditulis seperti persamaan (2.11) – (2.13) berikut:

$$I_{a3}(t) = I_3 \sin 3(\omega t) \quad (2.11)$$

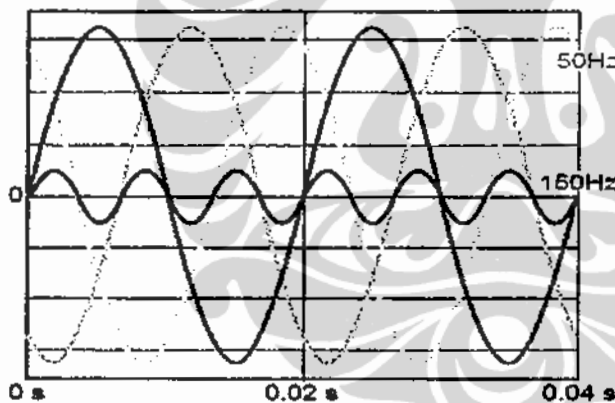
$$I_{b3}(t) = I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = I_3 \sin (3\omega t - 2\pi) = i_{a3} \quad (2.12)$$

$$I_{c3}(t) = I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = I_3 \sin (3\omega t - 4\pi) = i_{a3} \quad (2.13)$$

Karena arus di penghantar netral sama besar dengan jumlah dari arus di penghantar fasa, maka harmonisa komponen urutan ke-3 arus netral sama dengan jumlah harmonisa komponen urutan ke-3, seperti persamaan (2.14).

$$I_N(t) = 3 \times I_3 \sin 3(\omega t) = 3i_{a3} \quad (2.14)$$

Arus harmonisa triplen tersebut saling menjumlahkan secara aritmatika di penghantar netral, sementara arus arus komponen dasar dan harmonisa urutan bukan kelipatan tiga akan saling menghilangkan (cancel out) satu dengan lainnya [6]. Arus-arus harmonisa urutan ke-3 atau disebut arus urutan nol ini bersirkulasi didalam penghantar fasa di tiga fasa, seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Gelombang arus-arus tiga fasa pada frekuensi dasar dan frekuensi harmonisa ke-3.

Ditinjau arus harmonisa ke-3 di penghantar netral ketika harmonisa ke-3 dominan.

Maka

$$THD = i_3(\%)$$

Universitas Indonesia

Pada kondisi beban seimbang, maka arus netral hampir sama dengan $3I_3$.

Jadi:

$$I_N \approx 3I_3 \text{ Amper}$$

Arus netral dapat dinyatakan dalam bentuk THD arus

$$I_N \approx 3i_3 I_1 \approx 3THD I_1$$

Dengan menggunakan rumus umum:

$$I_1 = \frac{I_L}{\sqrt{1+THD^2}}$$

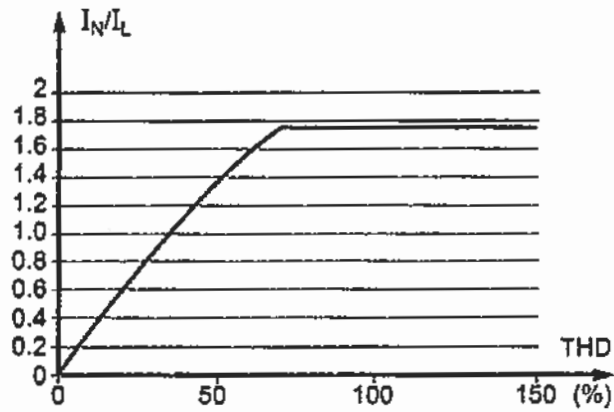
Didapatkan:

$$I_N \approx 3THD \frac{I_L}{\sqrt{1+THD^2}}$$

Dan

$$\frac{I_N}{I_L} \approx \frac{3THD}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (2.15)$$

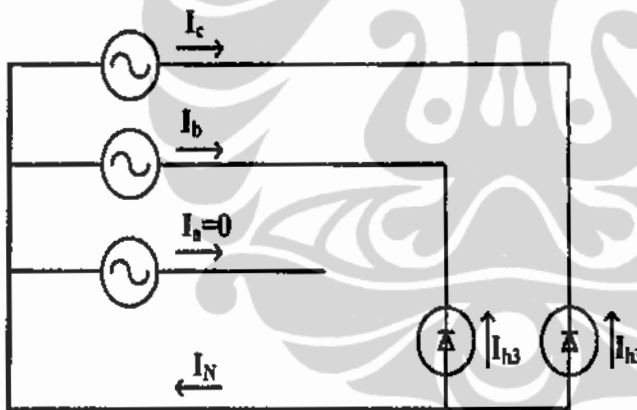
Rumus pendekatan (2.15) ini berlaku jika rasio arus netral terhadap arus fasa adalah lebih kecil dari tiga. Pembebanan seimbang pada sistem tiga fasa terhadap rasio arus netral sebagai fungsi faktor distorsi, THD seperti kurva grafik pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pembebanan pada arus netral (beban seimbang).

2.2.2 Pengaruh Harmonisa Pada Pembebanan Tidak Seimbang

Ditinjau sistem tiga fasa terdiri dari sumber tiga fasa seimbang dan dua beban linier satu fasa identik, dipasang diantara penghantar fasa dan netral, seperti Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Beban tidak seimbang.

Jika ditinjau hanya arus dasar dan arus harmonisa urutan ke-3 di setiap bebannya, maka arus di netral adalah jumlah dari arus dasar dan arus harmonisa ke-3 [6].

Arus rms di penghantar netral adalah sama dengan:

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + (2I_3)^2} \text{ Amper}$$

Universitas Indonesia

Dengan menggunakan rumus umum:

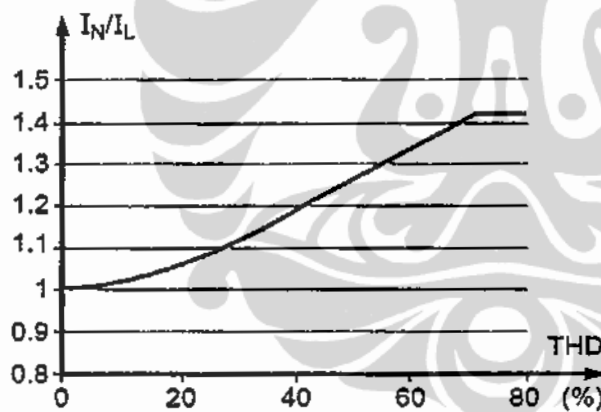
$$I_N = \sqrt{I_1^2 + (2 THD I_1)^2}$$

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + 4 THD^2}$$

$$I_N \approx \frac{I_L}{\sqrt{1+THD^2}} \sqrt{1+4THD^2}$$

$$\frac{I_N}{I_L} \approx \frac{\sqrt{1+4THD^2}}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (2.16)$$

Rumus pendekatan (2.16) ini berlaku hanya jika rasio arus netral terhadap arus fasa adalah lebih kecil dari dua. Pembebanan dari arus netral tergantung pada faktor distorsi seperti pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Pembebanan dari arus netral (beban tidak seimbang).

Berdasarkan data hasil pengukuran pada 20 gardu distribusi dengan jumlah transformator sebanyak 32 buah di daerah DKI Jakarta diketahui bahwa jumlah transformator yang mempunyai ketidakseimbangan beban lebih besar dari 30 %. Prosentase ketidakseimbangan beban dengan perbedaan nilai arus arus diantara fasa ini

Universitas Indonesia

cukup besar sehingga perlu dilakukan pemerataan beban pada transformator [12]. Ketidakseimbangan beban merupakan prosentase perbedaan beban antara fasa dibandingkan dengan besarnya beban rata-rata. Ketidakseimbangan beban menyebabkan timbulnya arus pada netral yang mengakibatkan peningkatan rugi-rugi pada transformator dan meningkatkan panas. Selain itu ketidakseimbangan beban menyebabkan tegangan antara fasa menjadi tidak seimbang.

2.2.3 Arus Harmonisa Triplen pada Transformator Distribusi Dy

Transformator Dy pada gardu distribusi yang digunakan untuk mensuplai beban nonlinier satu fasa dan terdistribusi tidak merata menyebabkan masalah harmonisa arus dan ketidakseimbangan beban. Ketidakseimbangan beban nonlinier satu fasa ini makin meningkatkan distorsi harmonisa triplen (THD) pada arus fasa dan netral dan mengakibatkan rugi-rugi tambahan dan meningkatkan temperatur transformator.

Dari kasus operasi pembebanan transformator Dy pada gardu distribusi dengan kapasitas pembebanan hanya 27% dari ratingnya dan THD arus 45% telah terjadi kenaikan panas pada transformator. Diketahui bahwa kenaikan temperatur ini terutama disebabkan arus harmonisa ke-3, ke-5 dan ke-7 yang dihasilkan beban nonlinier, dimana terjadi sirkulasi arus harmonisa ke-3 didalam kumparan delta primer transformator. Karena sisi sekunder transformator Dy konvensional ini tidak mempunyai kumparan penghambat harmonisa ke-3, maka distorsi tegangan dan arus lebih besar dari 3%, yaitu diatas nilai batas kritis pemakaian yang direkomendasikan IEEE [13].

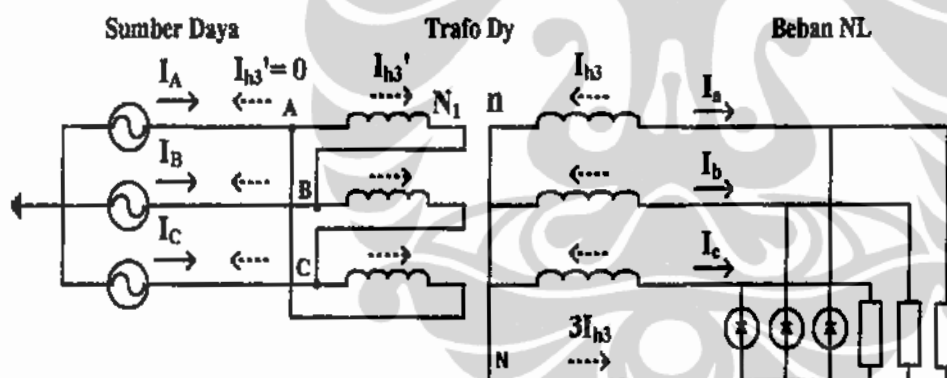
Ditinjau diagram transformator Dy menyuplai beban nonlinier (beban NL) yang sama besar, seperti Gambar 2.11. Setiap beban nonlinier satu fasa identik membangkitkan arus

harmonisa ke-3, I_{h3} yang mengandung komponen harmonisa ke-3 sama besar. Selanjutnya, arus harmonisa ke-3 beban ini menginduksikan arus harmonisa ke-3, I_{h3}' yang juga sama besar pada kumparan primer transformator.

Menurut hukum Ampere II bahwa jumlah arus yang masuk dan arus yang keluar node (titik simpul) adalah sama dengan nol,

$$\sum I_{h3}' = 0 \quad (2.17)$$

Jadi pada kondisi beban seimbang, jumlah arus harmonisa ke-3 di setiap node delta primer adalah sama dengan nol, karena I_{h3}' diantara dua lilitan kumparan adalah sama besar dan saling mengurangkan, seperti Gambar 2.11.



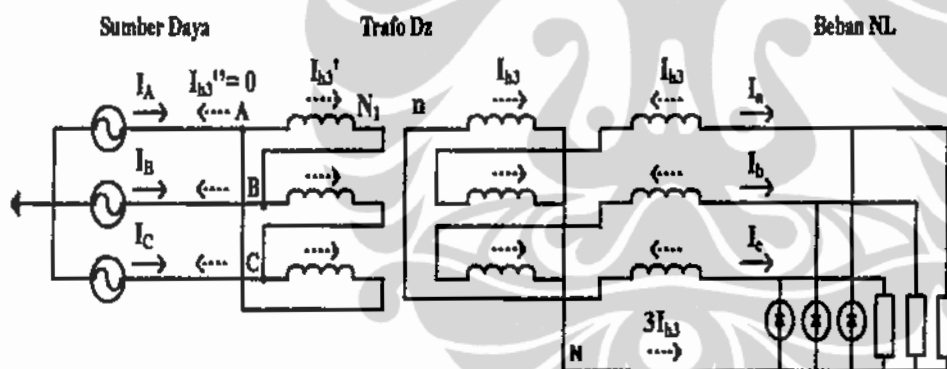
Gambar 2.11 Diagram aliran arus harmonisa ke-3 di transformator Dy.

Dengan demikian, arus balik yang mengalir dari delta primer ke saluran sistem suplai tidak mengandung komponen harmonisa ke-3. Arus harmonisa ke-3 tersebut dipaksa bersirkulasi di delta primer dan tidak mengalir ke jaringan suplai. Namun, arus harmonisa

ke-3 yang bersirkulasi didalam kumparan delta primer menimbulkan rugi panas tambahan dan mengakibatkan kenaikan temperatur pada transformator.

2.2.4 Arus Harmonisa Triplen pada Transformator Dz

Ditinjau diagram transformator Dz menyuplai beban nonlinier sama besar, seperti Gambar 2.12. Dimana setiap beban nonlinier satu fasa identik membangkitkan arus harmonisa ke-3, I_{h3} sama besar di penghantar fasa. Dari diagram diketahui bahwa fluks induksi ggm komponen harmonisa triplen diantara dua arus fasa pada kaki inti yang sama di sisi sekunder saling mengurangkan. Akibatnya, arus harmonisa ke-3 yang bersirkulasi di sisi delta primer menjadi nol.



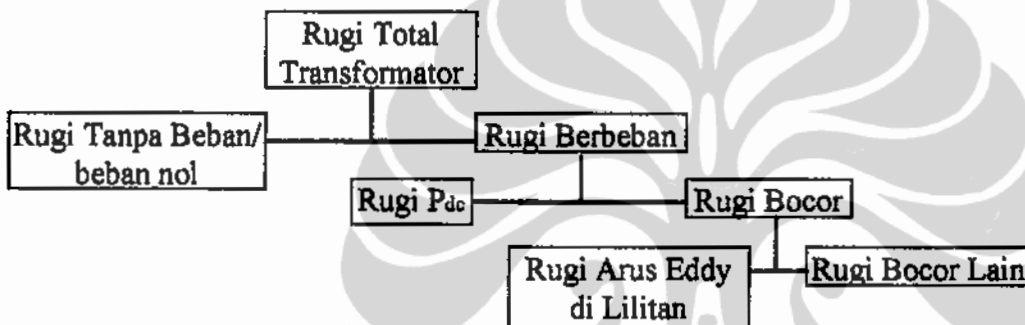
Gambar 2.12 Diagram aliran arus harmonisa ke-3 di transformator Dz.

Diketahui bahwa arus harmonisa ke-3 hanya dapat diturunkan jika beban didistribusikan secara seimbang merata. Namun dalam kenyataannya pembebanan di saluran distribusi tidak pernah seimbang. Dengan demikian, arus harmonisa ke-3 di arus fasanya tidak sama besar sehingga pengurangan fluks harmonisa secara total di kaki inti

sekunder tidak terjadi. Akibatnya, arus harmonisa ke-3 tetap bersirkulasi didalam kumparan primer dan selanjutnya mengalir ke saluran suplai daya [13].

2.3 Dampak Harmonisa Sistem Tenaga Terhadap Transformator

Umumnya rugi daya transformator dibedakan menjadi rugi beban nol atau rugi inti dan rugi berbeban seperti pada Gambar 2.13. Pengelompokan rugi transformator ini juga berlaku untuk rugi daya karena pengaruh harmonisa sistem daya beban [4].



Gambar 2.13 Klasifikasi rugi Transformator.

Rugi transformator ini dapat dinyatakan dengan persamaan (2.18).

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \text{ (W)} \quad (2.18)$$

Dimana,

P_{NL} adalah rugi beban nol

P_{LL} adalah rugi berbeban

P_T adalah rugi total.

P_{NL} adalah rugi akibat tegangan penguat pada inti besi.

P_{LL} adalah rugi rugi yang terdiri dari rugi P_{dc} ($I^2 R_{dc}$) dan rugi bocor akibat aliran medan elektromagnetik pada lilitan, inti, selubung magnet, dinding tangki minyak (pada transformator pendingin minyak), dll. P_{dc} ditentukan dari pengukuran resistansi dc dari lilitan dan mengalikannya dengan kuadrat arus beban. Rugi arus bocor dapat dibagi menjadi rugi arus eddy di lilitan dan rugi bocor komponen terbuat dari besi. Rugi arus eddy di lilitan terdiri dari rugi arus eddy dan rugi arus sirkulasi, dimana semua ini adalah rugi arus eddy di lilitan transformator. Rugi arus bocor lainnya adalah rugi pada struktur komponen selain pada lilitan, seperti clamps, tangki atau selubung dinding, dll.; seperti persamaan (2.19).

$$P_{LL} = P_{dc} + P_{EC} + P_{OSL} \text{ (W)} \quad (2.19)$$

Dimana,

P_{dc} adalah rugi daya akibat arus beban dan resistansi dc lilitan

P_{EC} adalah rugi lilitan eddy

P_{OSL} adalah rugi bocor lainnya pada clamps, tangki, dll.

Rugi bocor total P_{SL} ditentukan dengan mengurangkan P_{dc} dari rugi berbeban yang diukur pada pengujian impedansi, seperti persamaan (2.20).

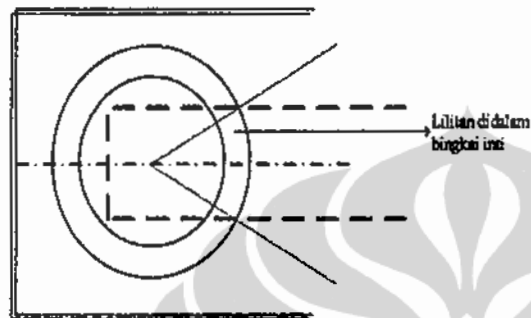
$$P_{SL} = P_{EC} + P_{OSL} = P_{LL} - P_{dc} \text{ (W)} \quad (2.20)$$

Metode pengujian untuk menentukan rugi daya arus eddy pada lilitan dari rugi bocor yang terjadi pada struktur komponen tidak dapat dilakukan.

Universitas Indonesia

2.3.1 Struktur Transformator Tipe Inti

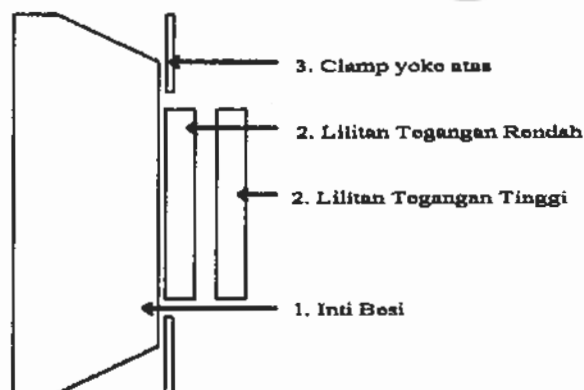
Transformator distribusi type inti memiliki bentuk kumparan tegangan tinggi HV dan tegangan rendah TR berupa silinder konsentris yang mengelilingi kaki inti vertikal dengan penampang segi empat atau lingkaran, seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Pandangan atas transformator type inti.

Komponen utama transformator ditinjau menurut fluks bocor, seperti Gambar 2.15.

1. Rangkaian kemagnetan, yaitu inti besi.
2. Kumparan primer dan sekunder
3. Clamps yoke



Gambar 2.15 Skema potongan penampang samping komponen utama.

Universitas Indonesia

Seperti telah dinyatakan sebelumnya fluks bocor memiliki pengaruh menimbulkan rugi arus eddy diantara lilitan lilitan. Rugi arus eddy terkonsentrasi di ujung piringan lilitan akibat fluks radial.

Pada kondisi arus transformator tinggi maka fluks bocor yang dibangkitkan mengalir secara radial melalui bagian dalam permukaan lilitan dan memotong bagian inti besi serta bagian komponen yang terbuat dari besi. Fluks bocor ini menghasilkan rugi arus eddy di bagian komponen yang terbuat dari besi dan menimbulkan kenaikan temperatur setempat (hot spot).

2.3.2 Rugi Arus Sirkulasi

Rugi daya didalam kumparan karena arus sirkulasi adalah akibat adanya perbedaan nilai fluks medan bocor yang melingkupi kumparan transformator. Berarti rugi arus sirkulasi tergantung pada letak lilitan didalam medan magnet. Untuk menurunkan rugi rugi akibat arus sirkulasi maka letak setiap lilitan harus dilingkupi fluks bocor yang sama besar. Salah satu upaya menurunkan arus sirkulasi adalah dengan mentransposisi lilitan secara berurutan dan simetris di sepanjang lintasan kumparan [4].

2.3.3 Dampak Tegangan Harmonisa

Umumnya peningkatan rugi rugi diasumsikan sebanding dengan kuadrat frekuensi. Pada subbab ini dibahas pengaruh harmonisa sistem daya pada transformator. Pengaruh harmonisa tegangan pada berbagai rugi rugi dibahas berikut ini.

Berdasarkan hukum Faraday tegangan induksi berbanding lurus dengan perubahan fluks magnet persatuan waktu

$$N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \cong u_1(t)$$

Persamaan diatas dinyatakan dalam domain frekuensi menunjukkan hubungan diantara tegangan harmonisa dan komponen fluks harmonisa.

$$N_1 \cdot j(h\omega) \cdot \phi_h \cong U_h \quad h = 1, 3, \dots$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa magnitud fluks sebanding dengan tegangan harmonisa dan berbanding terbalik dengan urutan harmonisa ke-h. Umumnya, distorsi harmonisa tegangan, THD_v pada sistem daya adalah 5% dan tingkat magnitud komponen harmonisa tegangan adalah kecil dibandingkan dengan komponen dasarnya, yaitu sekitar 2-3%.

2.3.4 Dampak Arus Harmonisa

Pengaruh harmonisa arus pada sistem tenaga akan lebih merugikan karena komponen arus harmonisa ini menyebabkan rugi tambahan didalam kumparan dan struktur komponen transformator.

Rugi Resistensi dc Kumparan P_{dc}

P_{dc} adalah rugi akibat arus beban dan resistansi dc kumparan, seperti persamaan (2.18)

Jika nilai rms dari arus beban meningkat karena komponen harmonisa maka rugi ini akan meningkatkan sebanding dengan kuadrat arus.

Rugi Arus Eddy didalam Kumparan Transformator

Pada umumnya, rugi arus eddy yang dibangkitkan fluks elektromagnetik diasumsikan berubah terhadap kuadrat arus rms dan kuadrat frekuensi harmonisa [5], seperti pada persamaan (2.21).

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=\max} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \quad (2.21)$$

Dimana

P_{EC} adalah rugi arus eddy didalam kumparan karena arus beban nonlinier; P_{EC-R} adalah rugi arus eddy didalam kumparan pada frekuensi dasar, h adalah urutan harmonisa adalah I_h , arus rms frekuensi harmonisa, dan I_R adalah arus rms frekuensi dasar.

Meningkatnya rugi arus eddy akibat arus beban nonlinier dapat menyebabkan menaikkan rugi kumparan dan selanjutnya menaikkan temperatur diatas normalnya. Dengan demikian, dampak arus harmonisa menjadi penting, tidak hanya karena kuadrat arus komponen harmonisa saja tetapi juga dapat memperbesar munculnya arus harmonisa pada sistem daya.

Rugi Arus Bocor (stray losses)

Rugi arus bocor akibat fluks bocor pada inti besi, clamp, tangki, dan bagian komponen terbuat dari besi. Rugi bocor ini meningkatkan temperatur bagian komponen

Universitas Indonesia

transformator yang terbuat dari besi. Rugi arus bocor berubah sebanding dengan kuadrat arus rms dan frekuensi harmonisa pada daya pangkat 0,8 [4], seperti pada persamaan (2.22).

$$P_{SL} = P_{SL-R} \sum_{h=1}^{h=\max} h^{0,8} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \quad (2.22)$$

dimana

P_{SL} adalah rugi arus bocor pada bagian komponen besi karena arus beban nonlinier;

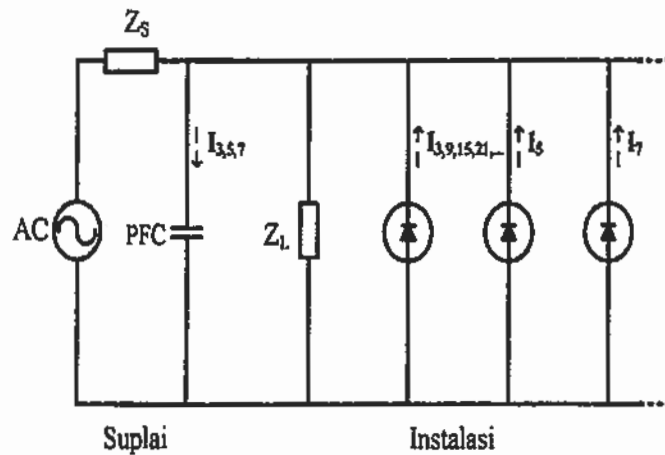
P_{SL-R} adalah rugi arus bocor pada bagian komponen besi pada frekuensi dasar. Nilai faktor 0,8 merupakan standard yang digunakan manufaktur.

Kenaikan Temperatur

Semua pengaruh dari arus harmonisa dapat memperbesar rugi transformator. Kenaikan rugi rugi transformator akan menaikkan temperatur transformator dari nilai temperatur arus normalnya. Dengan demikian, peningkatan rugi transformator akibat spektrum arus harmonisa triplen harus dibatasi.

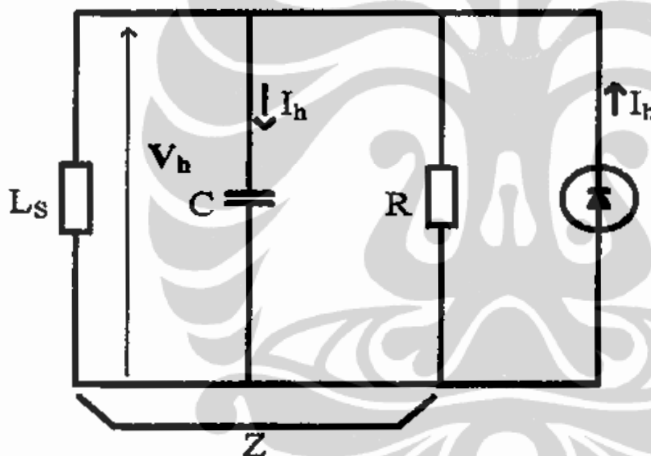
2.4 Dampak Harmonisa Sistem Tenaga Terhadap Kapasitor Tenaga

Pemasangan kapasitor koreksi faktor daya (PFC) pada sistem distribusi adalah untuk menarik arus leading dengan tujuan membatasi dampak merugikan arus lagging akibat beban induktif, contohnya motor induksi. Ditinjau suatu sistem distribusi industri menggunakan kapasitor daya untuk mengurangi daya reaktif. Gambar 2.16 menunjukkan rangkaian ekuivalen terdiri dari sumber tegangan AC dan impedansi sumber, kapasitor PFC serta beban beban nonlinier.



Gambar 2.16 Rangkaian ekivalen beban nonlinier dengan kapasitor PFC.

Untuk menganalisis harmonisa pada jaringan distribusi digunakan Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Rangkaian ekivalen jaringan distribusi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16.

Penggunaan perangkat kapasitif ini dalam jaringan distribusi menimbulkan resonansi parallel yang ditunjukkan dengan nilai impedansi kapasitor PFC yang kecil dan nilai impedansi induktif sumber bertambah besar seiring dengan meningkatnya frekuensi.

Akibatnya, kapasitor dialiri arus harmonisa yang tinggi dan dapat mengakibatkan kerusakan dan kegagalan pada sistem kapasitor.

Impedansi Z dihitung dengan persamaan (2.23).

$$Z = \frac{jL_s\omega}{1 - L_s C \omega^2} \quad (2.23)$$

Dimana

- R = adalah tahanan beban linier, diabaikan
- L_s = adalah induktansi suplai (jaringan, transformator dan saluran)
- C = adalah kapasitansi kapasitor koreksi faktor daya
- I_h = adalah arus harmonisa.

Resonansi terjadi ketika penyebut $1 - L_s C \omega^2$ cenderung mendekati nol. Frekuensi sistem jaringan saat resonansi disebut frekuensi resonansi dari rangkaian. Pada frekuensi ini, nilai impedansi Z adalah pada nilai maksimum dan tegangan harmonisa menjadi sangat besar sehingga menghasilkan distorsi maksimum pada tegangan sistem. Tegangan distorsi menyebabkan arus harmonisa pada rangkaian $L_s + C$ lebih besar dari pada arus yang mengalir pada beban. Jaringan distribusi dan kapasitor koreksi faktor daya akan diterapakan arus harmonisa yang tinggi dan mengakibatkan resiko gangguan beban lebih dan selanjutnya menyebabkan kegagalan dari kapasitor sistem.

Pada beberapa tahun terakhir, tingkat kerusakan pada kapasitor tenaga akibat harmonisa semakin bertambah serius [6]. Hal ini terjadi sebagai akibat penggunaan beban nonlinier yang makin meluas dan kapasitasnya makin besar. Kapasitor sering mengalami gangguan akibat tegangan harmonisa suplai karena nilai reaktansi kapasitif kapasitor

Universitas Indonesia

menjadi kecil seiring dengan kenaikan frekuensi. Prosentase kandungan harmonisa tegangan yang kecil dapat menyebabkan arus yang mengalir pada rangkaian kapasitor menjadi sangat besar.

Dalam operasinya, jika frekuensi pada kombinasi reaktansi kapasitor tenaga dan sistem daya adalah sama dengan frekuensi harmonisa maka timbul resonansi yang menaikkan nilai tegangan dan arus. Arus yang besar ini akan menaikkan temperatur kapasitor dan merusak dielektrik yang dapat menyebabkan kegagalan kapasitor. Kegagalan operasi kapasitor tenaga dapat mengakibatkan gangguan pemadaman tenaga listrik dan kecelakaan pada industri.

Transformator gardu distribusi belum mampu menghambat aliran balik arus harmonisa dari beban nonlier ke busbar. Akibatnya, arus harmonisa beban yang menginjeksi kapasitor tenaga menimbulkan resonansi harmonisa sehingga bentuk gelombang tegangan menjadi terdistorsi; semakin besar harmonisa, semakin besar tingkat distorsi.

BAB 3

ANALISIS PEMBEBANAN TRANSFORMATOR PENGUBAH FASA DALAM MENGHAMBAT HARMONISA

Dalam memenuhi kebutuhan energi listrik, pada awalnya pembagian beban diantara tiga saluran fasa adalah seimbang. Tetapi, kemudian dalam perkembangannya pada umumnya kondisi pembebanan sistem daya menjadi tidak seimbang. Hal ini sebagai konsekuensi kegiatan pengembangan jaringan listrik dan penginstalasian beban yang tidak merata pada sistem distribusi menyebabkan ketidakseimbangan sistem. Kebanyakan beban beban yang tersambung ke sistem adalah beban beban satu fasa, dan pada saat ini umumnya merupakan beban nonlinier yang merupakan sumber penghasil harmonisa triplen.

Perpaduan masalah antara dampak beban tidak seimbang dan meluasnya penggunaan beban nonlinier menimbulkan masalah mutu listrik. Salah satunya, transformator Distribusi menjadi tidak efektif lagi mencegah aliran balik energi elektromagnetik arus harmonisa triplen ke sisi suplai atau sumber. Akibatnya, komponen harmonisa triplen dari sisi konsumen mengalir bebas ke sisi suplai tanpa dapat diredam transformator [23].

Beban tidak seimbang dan harmonisa adalah dua jenis gangguan (distorsi) didalam sistem distribusi tiga fasa empat kawat. Penelitian tentang distribusi tidak seimbang beban nonlinier diantara saluran fasa yang memperberat dampak harmonisa difokuskan pada kinerja transformator untuk mencegah aliran harmonisa triplen ke sisi suplai.

Universitas Indonesia

Charles Proteus Steinmetz (1916) adalah peneliti yang pertamakali mengusulkan transformator dengan konfigurasi kumparan delta untuk menghambat (*blocking*) arus harmonisa ke-3 akibat kejenuhan inti besi [10]. Metode yang berdasarkan teknologi transformator ini mampu menghambat aliran medan elektromagnetis arus harmonisa triplen dengan cara menyirkulasikan arus harmonisa di dalam kumparan delta agar tidak mengalir ke saluran distribusi daya. Dalam perkembangan teknologi transformator pembatas distorsi harmonisa terdapat berbagai tipe konfigurasi transformator kombinasi hubungan delta untuk kebutuhan beban-beban satu fasa, dua fasa dan tiga fasa dengan tiga atau empat kawat penghantar. Konfigurasi kombinasi hubungan antara kumparan delta, kumparan wye dan kumparan zigzag dapat menimbulkan bentuk gangguan ketidakseimbangan yang berbeda. Untuk membuat perbandingan pengaruh distorsi harmonisa karena beban tidak seimbang terhadap kinerja transformator Distribusi kumparan khusus maka penggunaan simulasi komputer merupakan salah satu pilihan metode yang efektif.

Umumnya dalam memenuhi kebutuhan pembebanan satu fasa atau dua fasa kapasitas daya besar menggunakan transformator pengubah sistem distribusi tiga fasa yaitu transformator Vee/vee, T-Scott atau Le Blanc. Sedangkan untuk kebutuhan pembebanan satu fasa dan tiga fasa dengan tiga atau empat kawat penghantar digunakan transformator Distribusi Dy atau Dz dengan dua kumparan silang di sisi sekunder.

Tujuan menghambat harmonisa adalah membatasi magnitud sirkulasi arus harmonisa agar sekecil mungkin dengan cara memodifikasi kopling medan elektromagnet melalui konfigurasi kumparan di kaki inti transformator. Tujuan memodifikasi kopling medan elektromagnet adalah menghasilkan resultan fasa fluks magnetik harmonisa saling

Universitas Indonesia

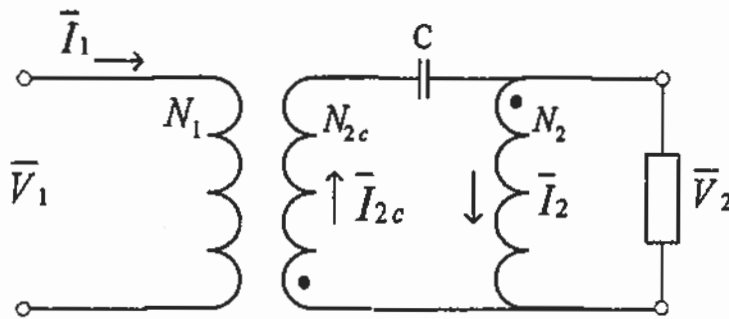
mengambat atau meminimasi sehingga magnitud induksi ggm arus harmonisa fasa-fasa beban di inti dapat diturunkan. Hasilnya, aliran energi medan elektromagnetik harmonisa dari beban ke saluran suplai menjadi lebih kecil. Penggunaan kumparan zigzag di sisi sekunder merupakan solusi efektif untuk menjamin distorsi harmonisa adalah minimum di sisi sekunder atau beban. Pada kondisi ini arus harmonisa triplen tidak mengalir di sisi primer dan impedansi transformator hanya tergantung kumparan sekunder.

Pada bab tiga ini membahas analisis kinerja pembebanan tidak seimbang dengan konfigurasi dua buah beban nonlinier satu fasa identik pada transformator NBT, Vee/vee, T-Scott dan Le Blanc. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kinerja diantara tiga transformator tersebut yang paling optimal meminimasi tingkat distorsi harmonisa ketika digunakan sebagai transformator pengubah sistem distribusi dari sumber tiga fasa ke sistem dua fasa identik.

3.1 Analisis Model Pembebanan Tidak Seimbang Transformator

3.1.1 Transformator Teknologi Narrow Bandwidth Technology (NBT)

Transformator NBT berfungsi sebagai filter frekuensi rendah tertentu yang diinginkan [5]. Sistem penghambat distorsi harmonisa komponen frekuensi rendah ini berdasarkan dua prinsip, yaitu prinsip memperbesar nilai induktansi dalam dan prinsip penghambat fasa (*the phase cancellation principle*). Prinsip penghambat fasa diperoleh dengan menyambung kumparan sekunder, N_2 melalui kapasitor kendali, C ke kumparan kendali bifiler, N_{2c} yang jumlah lilitannya sama tetapi polaritasnya berlawanan, seperti Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema Rangkaian Penghambat Fasa pada Transformator NBT.

Hubungan fasor tegangan dan arus diantara sisi primer dan sekunder sebagai berikut:

$$\bar{V}_1 = k_1 \bar{V}_2 \quad (3.1)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{k_1} (\bar{I}_2 - \bar{I}_{2c}) \quad (3.2)$$

Dimana

$k_1 = (N_1/N_{2c})$ adalah rasio lilitan.

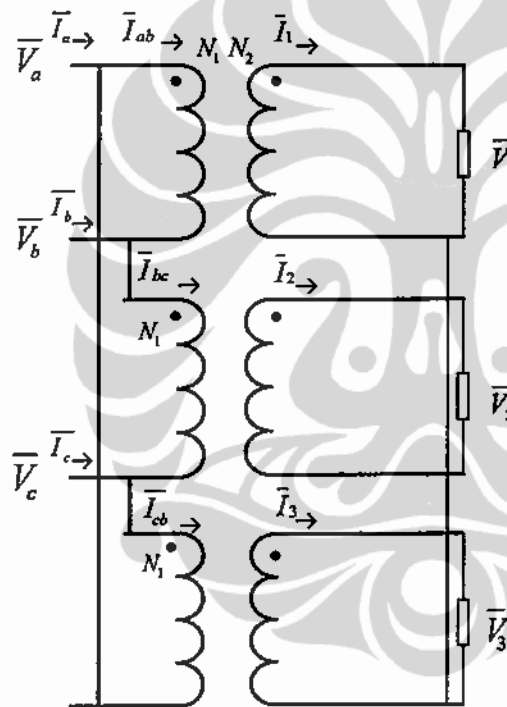
Kapasitor kendali, C berfungsi sebagai saklar untuk berbagai tingkatan frekuensi. Pada frekuensi rendah kapasitor berfungsi sebagai saklar terbuka untuk mengalirkan frekuensi daya (50/60 Hz) melalui salah satu kumparan sekunder, N_2 . Pada frekuensi tinggi (diatas 1 kHz), kapasitor kendali, C berfungsi sebagai saklar tertutup. Kedua kumparan sekunder membangun fluks magnet pada inti tetapi fasa kedua fluksnya berbeda 180 derajat. Dengan demikian, fluks magnet kedua kumparan saling menghilangkan dan terjadi penghilangan penuh sinyal frekuensi tinggi. Dengan demikian, transfer energi elektromagnetik dari inti ke sekunder tidak terjadi. Prinsip kedua adalah dengan menaikkan nilai induktansi seri dalam, L. Kombinasi yang tepat diantara nilai elemen L, C, dan R transformator serta nilai impedansi beban, Z_L dapat

Universitas Indonesia

berfungsi sebagai filter untuk sinyal-sinyal frekuensi tinggi. Teknologi NBT diterapkan pada transformator Distribusi telah dipatenkan di Amerika Serikat [5].

3.1.2 Transformator Delta-Wye (Dy)

Transformator hubungan Dy terdiri dari tiga transformator satu fasa seperti pada Gambar 3.2 [3]. Transformator menarik arus tiga fasa dari sisi primer dan menyuplai tiga beban satu fasa di sisi sekunder.



Gambar 3.2 Skema Hubungan Dy

Hubungan fasor tegangan dan arus diantara sisi primer dan sekunder untuk pembebanan tiga fasa seperti persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{ab} \\ \bar{V}_{bc} \\ \bar{V}_{ca} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a - \bar{I}_b \\ \bar{I}_b - \bar{I}_c \\ \bar{I}_c - \bar{I}_a \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

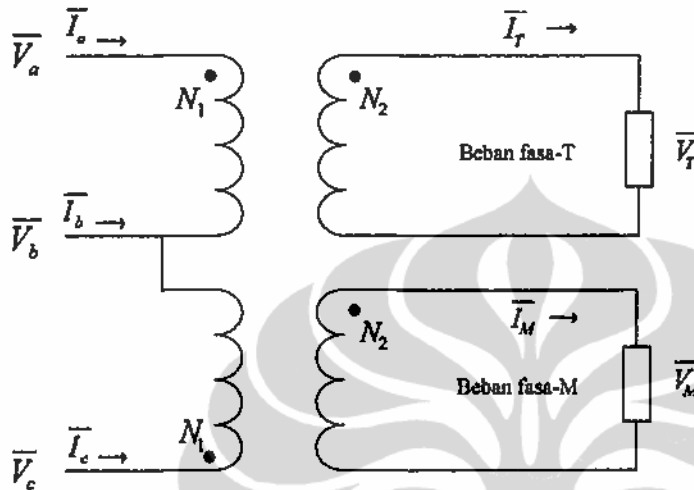
Dimana

$k_1 = (N_1/N_2)$ adalah rasio lilitan primer dan sekunder.

Dua kumparan transformator Dy yaitu hubungan delta primer dan hubungan wye sekunder berfungsi sebagai penghambat karena mampu membatasi arus harmonisa urutan nol yang mengalir dari sisi sekunder ke sisi primer transformator. Resultan arus harmonisa triplen disirkulasikan di kumparan delta primer sehingga tidak mengalir ke sisi saluran. Dengan menghambat harmonisa triplen tersebut dapat mengurangi THD arus hingga 50%. Semua harmonisa triplen di sisi primer transformator memiliki magnitud kurang 1% dari dasarnya [6]. Transformator Dy merupakan peralatan yang murah untuk menghilangkan harmonisa triplen pada sistem fasa tiga, empat kawat yang memiliki banyak beban penghasil harmonisa satu fasa.

3.1.3 Transformator Hubungan Vee/vee (Open Delta)

Transformator hubungan Vee/vee terdiri dari dua transformator satu fasa seperti pada Gambar 3.3 [3]. Transformator menarik arus tiga fasa dari sisi primer dan menyuplai dua beban satu fasa di sisi sekunder.



Gambar 3.3 Skema Hubungan Vee/vee.

Hubungan fasor tegangan dan arus diantara sisi primer dan sekunder sebagai persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{ab} \\ \bar{V}_{bc} \\ \bar{V}_{ca} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_T \\ \bar{V}_M \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_T \\ \bar{I}_M \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

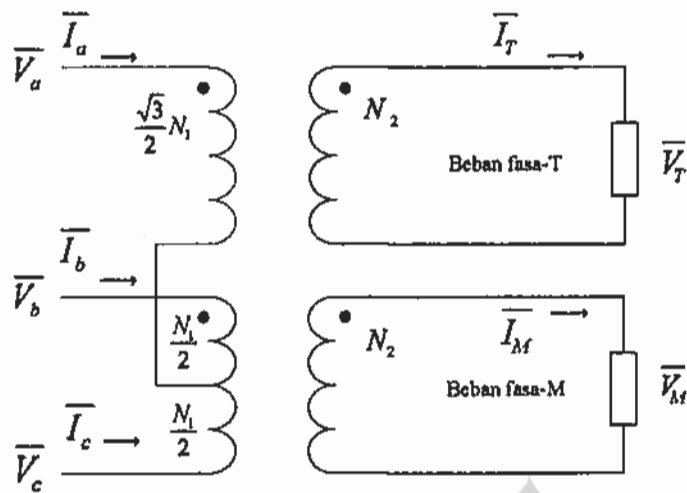
Dimana

$k_1 = (N_1/N_2)$ adalah rasio lilitan primer dan sekunder.

Skema hubungan Vee/vee tidak ada hubungan kumparan delta untuk tempat sirkulasi arus harmonisa ke-3 maka timbul tegangan harmonisa ke-3 pada kumparan fasa transformator. Meskipun transformator Vee/vee dibebani dengan beban tiga fasa seimbang, tegangan beban menjadi tidak seimbang dan tergantung pada impedansi transformator dan faktor daya beban. Selain itu, karena arus di salah satu kumparan leading 30° terhadap tegangan fasanya sedangkan arus pada kumparan lainnya lagging 30° terhadap tegangan fasa lainnya maka faktor daya untuk fasa yang berbeda menyebabkan sistem menjadi tidak seimbang [11].

3.1.4 Transformator Hubungan T-Scott

Hubungan T-Scott digunakan untuk suplai daya beban dua fasa atau satu fasa dari sistem suplai tiga fasa, atau sebaliknya [11]. Diagram transformator hubungan T-Scott dengan dua rasio lilitan transformator yang berbeda, seperti Gambar 3.4. Transformator utama (fasa-M) memiliki sebuah kumparan tunggal di sisi dua fasa, dan kumparan sadapan-tengah (center-tap winding) di sisi tiga fasanya. Transformator tersiernya (fasa-T) memiliki sebuah kumparan tunggal setiap sisinya [3].



Gambar 3.4 Skema Transformator Hubungan T-Scott.

Hubungan fasor tegangan dan arus seperti pada persamaan-persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{ab} \\ \bar{V}_{bc} \\ \bar{V}_{ca} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_T \\ \bar{V}_M \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -1 \\ -1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_T \\ \bar{I}_M \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Dimana

$k_1 = (N_1/N_2)$ adalah rasio lilitan primer dan sekunder.

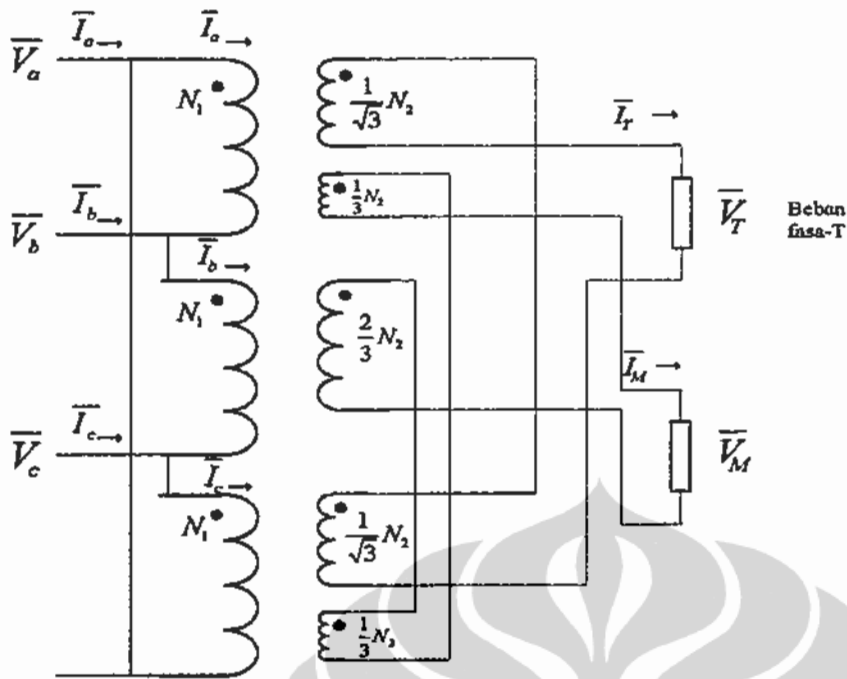
Pada transformator T-Scott penurunan harmonisa arus sistem distribusi dilakukan dengan mensuper-positikan komponen-komponen arus harmonisa arus diantara dua cabang beban agar saling meniadakan. Super-posisi komponen arus harmonisa dilakukan dengan menggeser sudut fasa tegangan suplai beban melalui autotransformator. Hasil eksperimen memperlihatkan metode ini menghasilkan tingkat distorsi arus sistem yang minimum, terutama untuk kondisi operasi pembebanan seimbang [8].

Pada sisi kumparan tiga fasa transformator T-Scott terdapat titik netral untuk pentanahan atau pembebanan tiga fasa. Sedangkan, kumparan di sisi dua fasa dapat digunakan untuk suplai beban dua fasa dan tiga fasa baik dengan tiga atau empat kawat.

Dari skema konstruksi hubungan T-Scott tidak ada hubungan delta untuk sirkulasi arus harmonisa ke-3. Hasilnya, arus harmonisa beban menginduksikan ggm harmonisa arus dan tegangan ke sisi primer dan selanjutnya harmonisa triplen ini mengalir ke sisi saluran sistem distribusi tenaga listrik [11].

3.1.5 Transformator Hubungan Le Blanc

Hubungan Le Blanc digunakan untuk suplai daya beban-beban dua fasa atau satu fasa dari sistem tiga fasa, atau sebaliknya. Gambar 3.5 memperlihatkan skema hubungan transformator Le Blanc yang juga menunjukkan transformasi sistem tiga fasa ke arus dua fasa. Kumparan primer terhubung delta untuk membatasi arus harmonisa ke-3 dari beban [7].



Gambar 3.5 Skema Transformator Hubungan Le Blanc.

Hubungan fasor tegangan dan arus seperti persamaan-persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{ab} \\ \bar{V}_{bc} \\ \bar{V}_{ca} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{3}{4} \\ 0 & \frac{3}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{3}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_T \\ \bar{V}_M \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{k_1} \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_T \\ \bar{I}_M \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Dimana

$k_1 = (N_1/N_2)$ adalah rasio lilitan primer dan sekunder.

Kumparan delta primer transformator Le Blanc menyeimbangkan tegangan harmonisa ke-3 dan fluks maknit harmonisa ke-3 di inti besi. Besarnya induksi ggm diantara kumparan fasa sisi primer selalu diseimbangkan dengan jumlah vector dari amper-lilitan sisi sekunder di fasa yang sama [11].

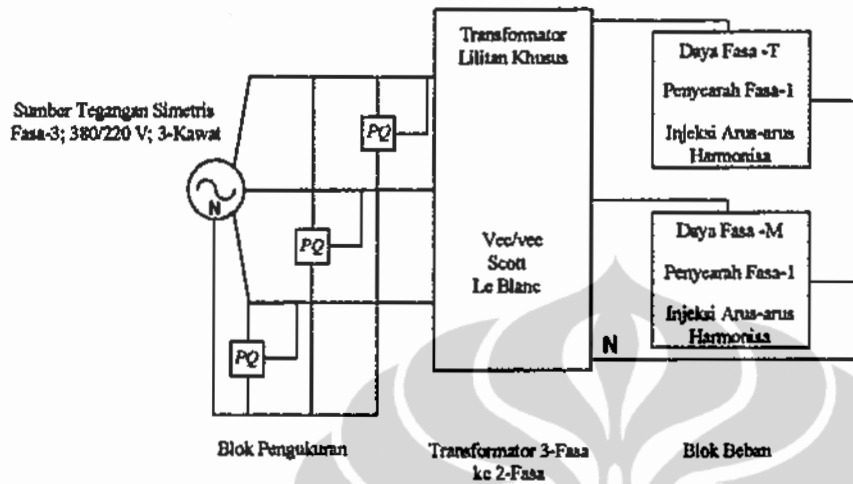
Transformator Le Blanc didisain khusus untuk mencegah gangguan keseimbangan sumber tiga fasa. Sisi delta primer didisain untuk tegangan tinggi sedang kedua sisi sekundernya terhubung ke tegangan menengah dan sudut fasa diantara kedua sisi sekunder tergeser 90 derajat listrik [11].

3.2 Simulasi Pembebanan Transformator Tidak Seimbang

Model rangkaian simulasi transformator menyuplai beban tidak seimbang terdiri dari 2 (dua) beban satu fasa dengan penyearah AC/DC, seperti Gambar 3.6. Sedangkan alat yang digunakan untuk simulasi menggunakan perangkat keras komputer PC prosesor Pentium Core Duo dan perangkat lunak OrCad Versi 8.1 dan PSpice Versi 7.1. Adapun parameter yang digunakan dalam simulasi rangkaian pembebanan ini adalah tegangan fasa input/output seimbang 380/220 Volt setiap beban terdapat penyearah menyuplai beban resistif dengan kapasitas beban identik yaitu resistor sebesar 150 Ohm. Diasumsikan transformator ideal dan rasio lilitan $(N_1/N_2)=1$. Pada kondisi seimbang, sudut fasa tegangan dan arus masing-masing $0^\circ, 120^\circ$ dan 240° . Dengan menggunakan analisis simulasi pada rangkaian pembebanan maka digambar gelombang sinusoidal arus

Universitas Indonesia

fasa dan spektrum frekuensi dari arus fasa baik di sisi primer maupun di sisi sekunder berdasarkan analisis Fourier [22].



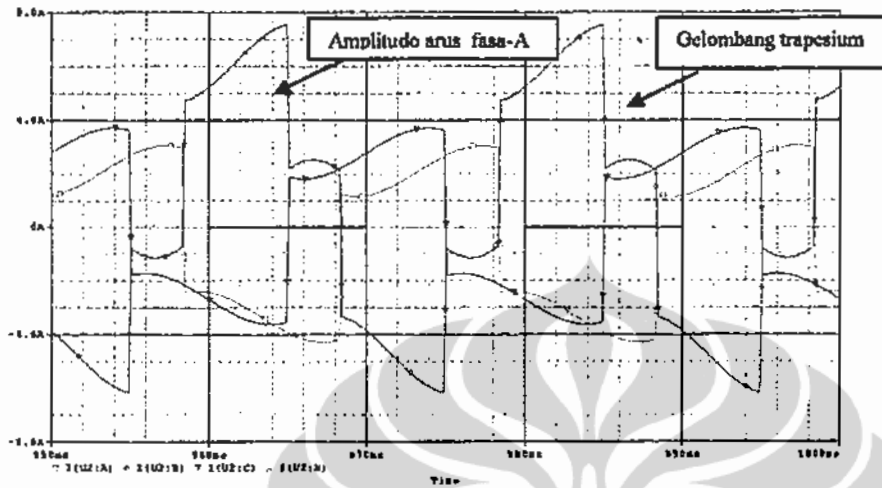
Gambar 3.6 Model Simulasi Operasi Transformator Pembebanan Tidak Seimbang.

Seperti diketahui bahwa harmonisa triplen dan harmonisa ke-5 dan ke-7 adalah sumber utama gangguan pada sistem suplai daya untuk dua penyearah satu fasa dengan kapasitas beban identik [10]. Dari hasil simulasi operasi pembebanan tidak seimbang transformator Vee/vee, T-Scott, dan Le Blanc menunjukkan bahwa tanpa dilengkapi dengan perangkat pendukung luar, misalnya filter atau autotransformator maka transformator belum mampu maksimal membatasi distorsi harmonisa [7, 8].

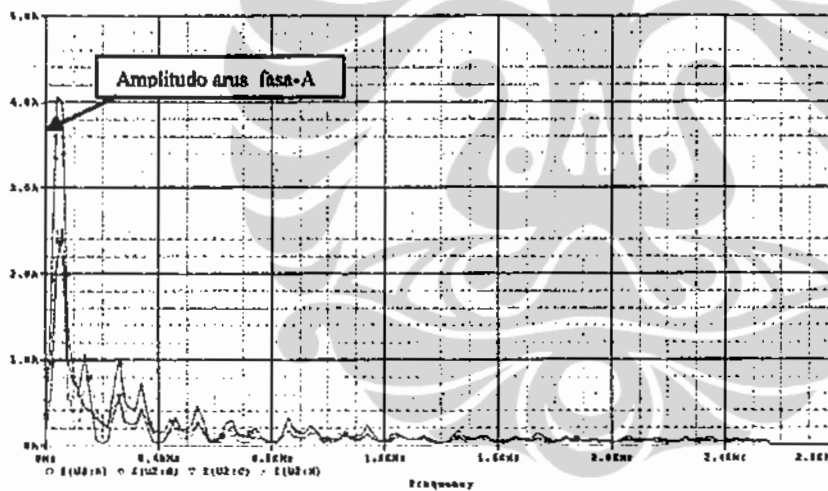
3.2.1 Hasil Simulasi Pembebanan Transformator Vee/vee

Ditinjau dari struktur skema hubungan Vee/vee paling tidak seimbang dan tidak efektif menurunkan tingkat ketidakseimbangan sistem tiga fasa. Hal ini ditunjukkan dengan adanya satu amplitud arus fasa yang lebih tinggi dibandingkan arus fasa lainnya.

Selain itu, bentuk gelombang arus di sisi primer tidak sinusoidal tetapi bentuk puncak gelombang adalah trapezium dan bagian tepinya yang curam, seperti Gambar 3.7a.



(a).



(b).

Gambar 3.7 Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekuensi Arus Fasa Sisi Primer atau Sumber.

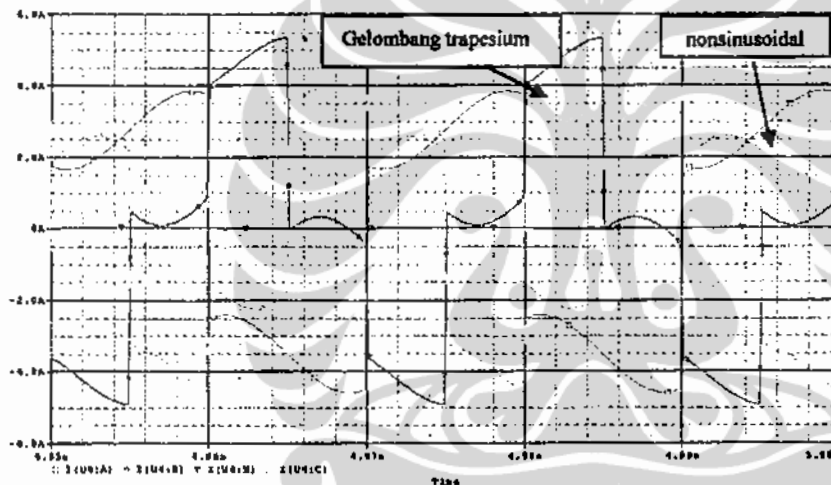
Demikian pula, Gambar 3.7b menunjukkan bentuk spektrum frekuensi arus fasa sisi primer terdapat lonjakan frekuensi harmonisa triplen serta harmonisa ke-5 dan ke-7 dengan magnitud cukup besar dibandingkan dengan frekuensi dasarnya. Hal ini

Universitas Indonesia

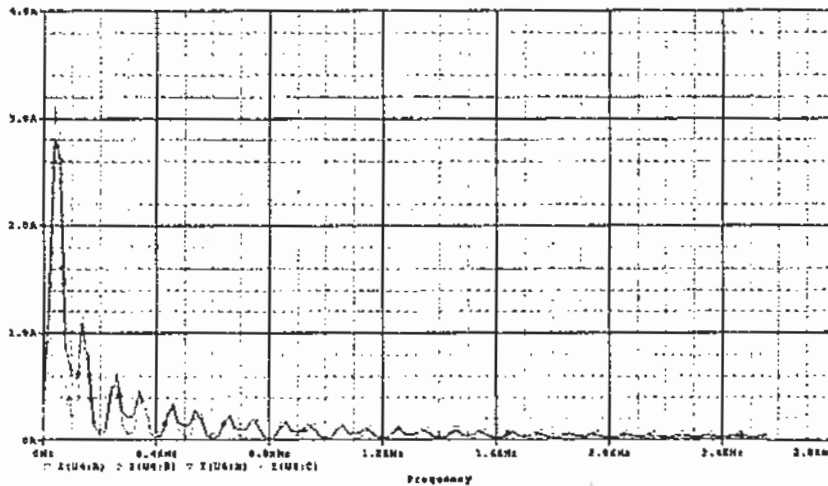
membuktikan bahwa transformator Vee/vee tidak dapat mengatasi ketidakseimbangan beban nonlinier.

3.2.2 Hasil Simulasi Pembebanan Transformator T-Scott

Dari hasil simulasi operasi pembebanan tidak seimbang transformator Scott menunjukkan bahwa bentuk gelombang arus fasa di sisi primer atau sumber tidak sinusoidal dan mendekati bentuk trapezium dengan tepi yang tajam, seperti pada Gambar 3.8a.



(a)



(b).

Gambar 3.8 Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekuensi Arus Fasa Sisi Primer atau Sumber.

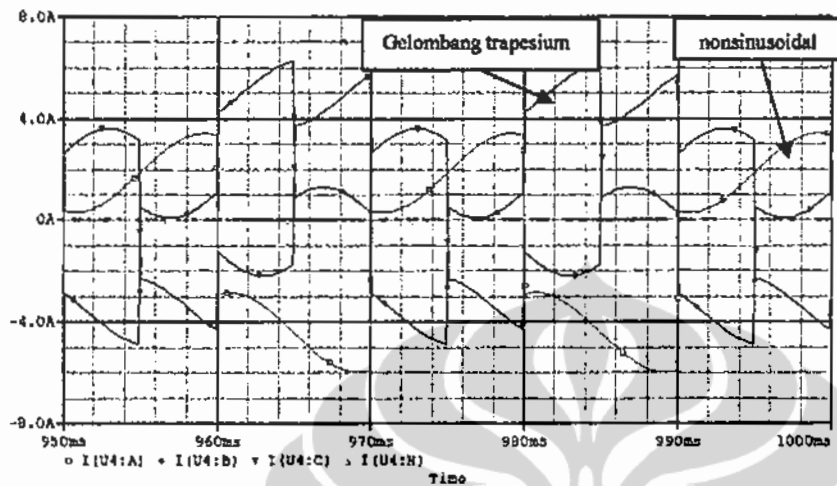
Hasil simulasi operasi pembebanan tidak seimbang transformator T-Scott menunjukkan spektrum frekuensi arus fasa sisi sekunder atau beban pada frekuensi harmonisa triplen serta harmonisa ke-5 dan ke-7 dengan magnitud cukup besar dibandingkan dengan frekuensi dasarnya, seperti pada Gambar 2.6b. Seperti pada Tabel L2.2 dalam Lampiran 2 dapat ditentukan bahwa THD arus untuk frekuensi harmonisa triplen untuk hubungan T-Scott adalah 55,11 % sedangkan THD arus untuk frekuensi harmonisa ke-5 dan ke-7 adalah 31,81 %.

3.2.3 Hasil Simulasi Pembebanan Transformator Le Blanc

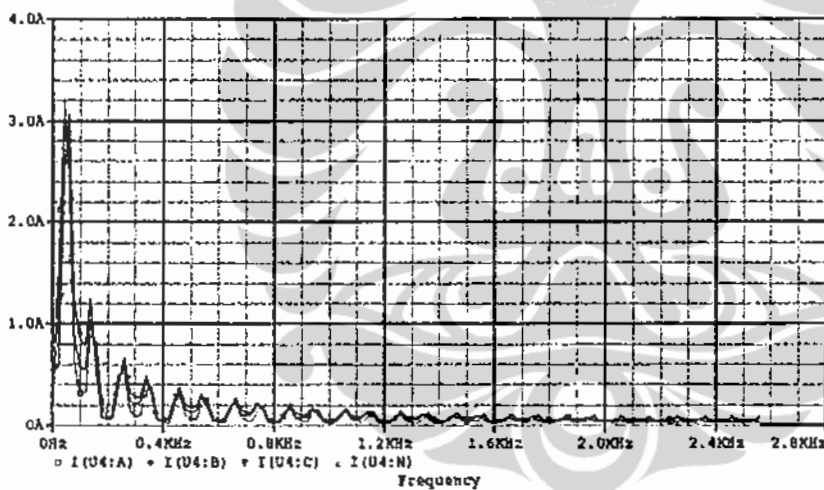
Meskipun, kumparan sisi primer hubungan Le Blanc terhubung delta dan beban satu fasa pada fasa-M dan fasa-T adalah sama besar tetapi kumparan delta primer tidak optimal menyeimbangkan beban dan mengeliminasi frekuensi harmonisa triplen. Dari hasil simulasi transformator Le Blanc menunjukkan bentuk gelombang arus fasa di sisi

Universitas Indonesia

primer tidak sinusoidal dengan bentuk trapesium dengan tepi yang tajam, seperti pada Gambar 3.9a.



(a).



(b).

Gambar 3.9 Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekuensi Arus Fasa Sisi Primer atau Sumber.

Selain itu, Gambar 3.9b menunjukkan bentuk spektrum frekuensi arus fasa sisi primer atau sumber dengan lonjakan frekuensi harmonisa triplen serta harmonisa ke-5 dan ke-7 dengan magnitud cukup besar dibandingkan dengan frekuensi dasarnya. Seperti pada

Universitas Indonesia

Tabel L2.3 dalam Lampiran 2 dapat ditentukan bahwa THD arus untuk frekuensi harmonisa triplen untuk hubungan Le Blanc adalah 35 % sedangkan THD arus untuk frekuensi harmonisa ke-5 dan ke-7 adalah 22,74 %.

3.3 Rekapitulasi Hasil Simulasi Pembebanan Transformator Distribusi Berdasarkan Nilai Faktor Daya

3.3.1 Hubungan Faktor Daya dengan Tingkat Distorsi Harmonisa Arus (THD_I)

Nilai faktor daya merupakan gambaran sebenarnya dari karakteristik pembebanan transformator dalam mengatasi masalah mutu listrik. Ada dua definisi yang digunakan berkaitan dengan bentuk arus dan tegangan yang nonsinusoidal [18], yaitu :

1. *True Power Factor* (TPF atau PF saja)

$$TPF \approx \frac{P_1}{V_{rms} I_{rms}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}} \quad (3.11)$$

Dan

2. *Displacement Power Factor* (DPF)

$$DPF \approx \frac{P_1}{V_{rms} I_{rms}} \quad (3.12)$$

Maka

$$TPF \approx \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}} \times DPF \quad (3.13)$$

Dimana nilai efektif atau rms didapat dari:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2} \quad (3.14)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2} \quad (3.15)$$

THD_I adalah tingkat harmonisa gelombang arus sinusoidal yaitu rasio dari nilai rms arus harmonisa dengan nilai rms arus dasar dikalikan 100%. Hal ini juga berlaku untuk besaran tegangan.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

$$V_{rms} = V_{rms1} \sqrt{1 + (THD_V)^2} \quad (3.17)$$

$$I_{rms} = I_{rms1} \sqrt{1 + (THD_I)^2} \quad (3.18)$$

Dimana:

I_{rms} adalah arus rms/efektif (root mean square)

I_1 adalah arus frekuensi dasar.

Hubungan diantara faktor daya dan distorsi harmonisa THD untuk tegangan sinusoidal atau mendekati sinusoidal maka persamaan daya listrik dapat ditunjukkan [6], seperti persamaan (3.19).

$$P = P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1 \quad (3.19)$$

Universitas Indonesia

$$\text{Faktor daya (PF)} = PF = \frac{P_1}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1}{V_1 \cdot I_{rms}}$$

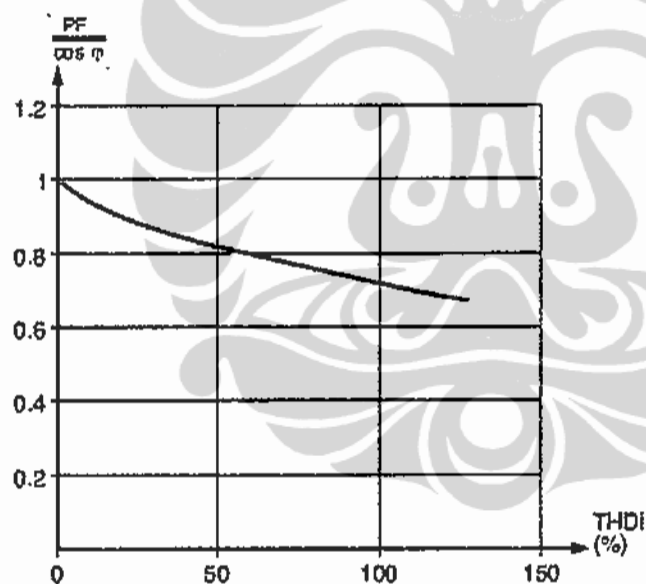
Karena

$$\frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}}$$

Maka

$$PF = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}} \quad (3.20)$$

Dari Gambar 3.10 dapat ditunjukkan kurva hubungan $\frac{PF}{\cos \phi_1}$ sebagai fungsi dari THD arus.



Gambar 3.10 Kurva Hubungan antara Faktor daya sebagai fungsi dari THD arus.

Dari Gambar 3.10 dapat ditunjukkan bahwa setiap penurunan nilai faktor daya adalah akibat dari meningkatnya distorsi harmonisa, berarti nilai faktor daya dipengaruhi langsung dengan distorsi harmonisa didalam sistem daya.

Universitas Indonesia

3.3.2 Rekapitulasi Simulasi Pembebanan Transformator

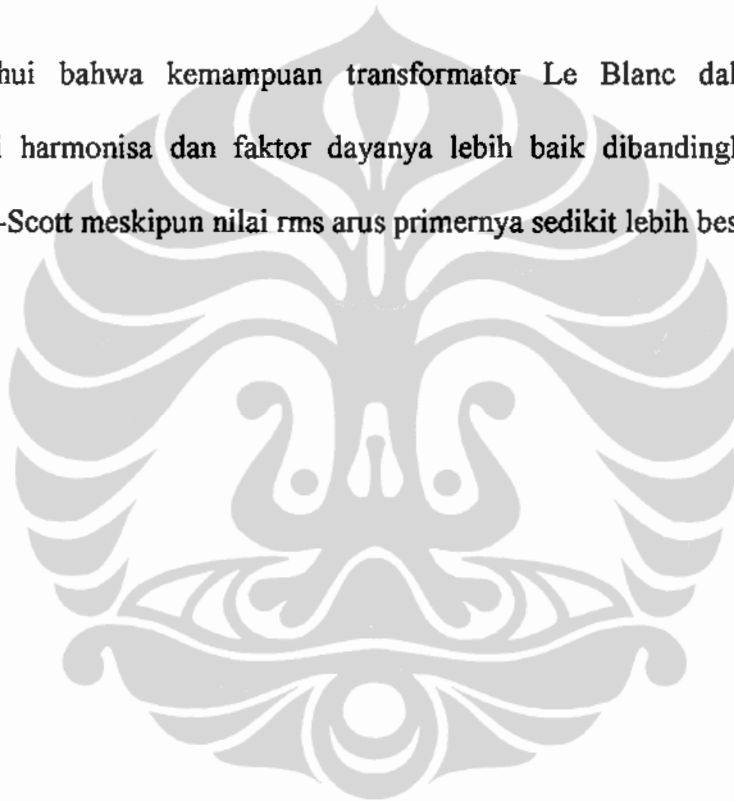
Penggunaan transformator Vee/vee, Scott dan Le Blanc pada operasi pembebanan tidak seimbang memperlihatkan bentuk gelombang arus di sisi primer atau sumber tidak sinusoidal dan mendekati bentuk trapezium dengan bagian tepi yang tajam, seperti pada Gambar 3.7a, 3.8a, dan 3.9a. Demikian pula, spektrum frekuensi arus fasa sisi primer menunjukkan lonjakan-lonjakan frekuensi harmonisa triplen serta harmonisa ke-5 dan ke-7 dengan magnitud cukup besar dibandingkan dengan komponen dasar, seperti pada 3.7b, 3.8b, dan 3.9b. Hal tersebut membuktikan bahwa kinerja pembebanan transformator khusus Vee/vee, Scott dan Le Blanc belum efektif menurunkan tingkat ketidakseimbangan beban dan belum optimal menghambat aliran distorsi harmonisa arus dari sisi beban ke sisi sumber.

Kinerja pembebanan transformator dapat diketahui dari nilai efektif arus fasa sisi primer yang diseimbangkan dan total distorsi harmonisa arus di sisi primer yang diredam transformator, seperti pada Tabel 3.1 berikut. Selain tingkat distorsi harmonisa, kinerja transformator dapat diketahui dari faktor kerja sistem dan beban yang disuplai transformator. Berdasarkan persamaan (3.20) dapat ditentukan faktor daya transformator dengan asumsi nilai faktor daya pergeseran (power factor displacement) adalah satu, hasilnya seperti pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Rekapitulasi Nilai Arus Fasa rata-rata, THD Arus Fasa rata-rata dan Faktor daya di sisi Primer

Tipe Transformator Khusus	Arus Primer (rms)			THD Arus Rata-rata (%)	Faktor Daya Rata-rata
	R	S	T		
Vee/vee	2,74	4,28	2,82	45,28	0,8296
T-Scott	3,31	3,11	3,27	45,92	0,8278
Le Blanc	3,4	3,3	3,37	44	0,8333

Dari Tabel 3.1 diketahui bahwa kemampuan transformator Le Blanc dalam meminimasi tingkat distorsi harmonisa dan faktor dayanya lebih baik dibandingkan transformator Vee/vee dan T-Scott meskipun nilai rms arus primernya sedikit lebih besar.



BAB 4

PEMODELAN TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Dtz DAN Ddtz DALAM MENGHAMBAT HARMONISA

Pada bab tiga telah dijelaskan bahwa hasil simulasi konfigurasi transformator Le Blanc dimana sisi kumparan primer terhubung delta dan salah satu fasa sisi sekunder kumparannya silang simetris lebih optimal menurunkan arus harmonisa dibandingkan transformator konvensional Vee/vee dan T-Scott ketika digunakan sebagai transformator pengubah sistem distribusi dari sumber tiga fasa ke sistem satu fasa. Dengan membagi kumparan fasa sisi sekunder menjadi tiga bagian kumparan untuk diletakkan di tiga kaki yang berbeda, seperti Gambar 3.5 maka induksi ggm dari sisi sekunder ke sisi primer menjadi lebih seimbang. Selanjutnya, induksi ggm arus harmonisa dari beban di inti besi disirkulasikan pada kumparan delta primer agar tidak mengalir ke saluran sumber. Transformator Le Blanc dengan konfigurasi delta primer dan zigzag sekunder terbukti mampu lebih baik mengatasi distorsi harmonisa dan menurunkan pengaruh yang merugikan pembebanan tidak seimbang.

Pada subbab 4.1 ini membahas analisis kinerja transformator Dtz untuk pembebanan tiga fasa, empat kawat dalam menentukan kemampuan transformator mengatasi distorsi harmonisa dari beban nonlinier satu fasa. Selanjutnya, pada subbab 4.2 membahas analisis kinerja transformator Dtz sebagai transformator pengubah sistem distribusi tiga fasa menjadi dua fasa dalam menentukan kemampuannya mengatasi distorsi harmonisa dari beban nonlinier satu fasa identik.

Universitas Indonesia

4.1 Pemodelan Konfigurasi Belitan pada Sisi Sekunder

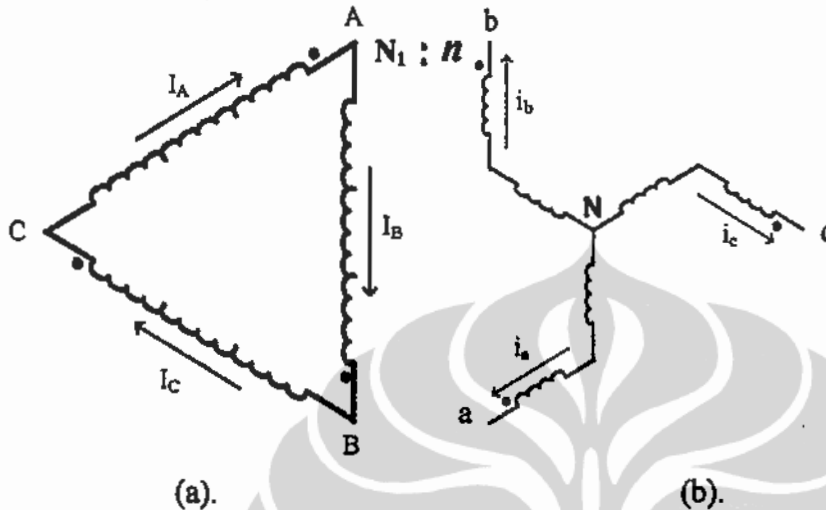
Dari studi solusi masalah distorsi harmonisa beban nonlinier satu fasa yang terdistribusi tidak merata berdasarkan teknologi transformator Dz terdapat aliran balik energi medan elektromagnet harmonisa arus triplen ke saluran suplai [6]. Hal ini karena kumparan sisi sekunder transformator Dz dan Dy tidak memiliki kemampuan optimal menurunkan dan menyeimbangkan magnitud fluks magnetik (ampere.lilitan) arus harmonisa triplen [6]. Akibatnya, induksi fluks magnetik arus harmonisa triplen yang bersirkulasi di kumparan delta primer tidak sepenuhnya dapat dihambat sehingga mengalir ke saluran distribusi dan mendistorsi tegangan sumber. Dampak distorsi harmonisa dan pembebanan tidak seimbang tersebut dapat meningkatkan kerugian daya pada transformator dan menurunkan efisiensi sistem distribusi. Pada penelitian untuk disertasi ini dibuat suatu konfigurasi kumparan zigzag sisi sekunder dengan tiga bagian (transposisi zigzag), yaitu Dtz, dan enam bagian (transposisi zigzag – dua tingkat/ganda), yaitu Ddtz untuk mengurangi dampak ketidakseimbangan beban sekaligus menaikkan nilai impedansi dalam transformator pada rentang (*band*) frekuensi harmonisa triplen.

4.1.1 Transformator Dz

Di sisi sekunder setiap jumlah kumparan fasa tegangan rendah, N_2 dibagi menjadi dua bagian sama besar, $n = N_2/2$. Dan, setiap n bagian kumparan fasa diletakkan secara silang simetris pada tiga kaki inti yang berbeda, seperti Gambar 4.1.(b). Kedua bagian n bagian kumparan diseri menyusun satu kumparan fasa, hasilnya resultan gaya gerak magnet (ampere.lilitan) fasa adalah $\sqrt{3}$ kali n . Kelebihan konfigurasi ini mampu

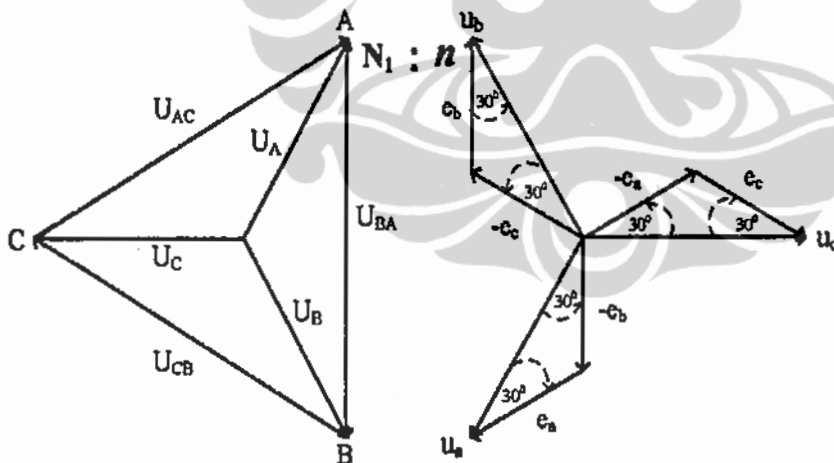
membatasi tegangan harmonisa triplen diantara saluran fasa beban dan netral dengan cara memposisikan saling berlawanan fasa setiap tegangan n bagian kumparan seri [7].

Diagram skema transformator Dz seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hubungan Kumparan Transformator Dz.

Hubungan fasor induksi ggm diantara sisi primer dan sekunder, seperti Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hubungan fasor induksi ggm diantara sisi primer dan sekunder.

Hubungan Fasor tegangan primer dan sekunder, seperti persamaan (4.1).

$$\begin{bmatrix} U_{AC} \\ U_{BA} \\ U_{CB} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Ditinjau diagram vektor tegangan sekunder fasa - a , seperti Gambar 4.2 adalah:

$$u_a = (e_a - e_b)$$

Jadi untuk kondisi beban seimbang, jumlah ggm kumparan fasa adalah sama dengan $(2/\sqrt{3})$ kali ggm 1/2 bagian kumparan sekunder, seperti persamaan (4.2).

$$u_a = e_a \cos 30^\circ + e_b \cos 30^\circ = (2/\sqrt{3}) e \quad (4.2)$$

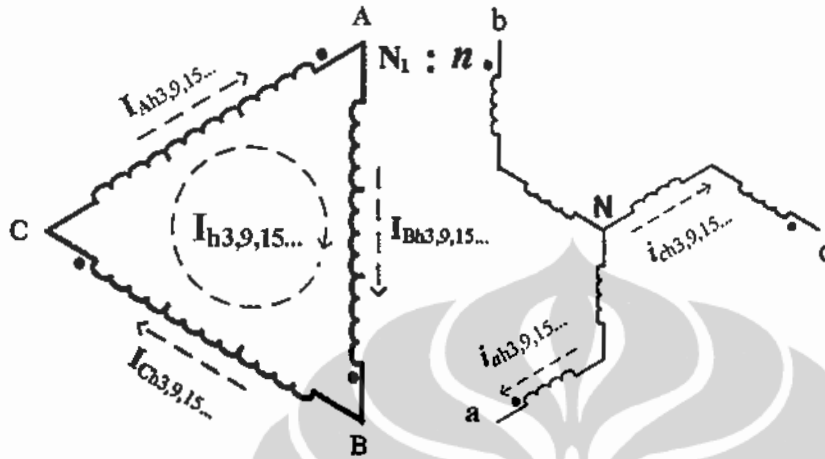
Karena hubungan vektor ggm arus fasa sekunder dibentuk dari hubungan dua bagian kumparan zigzag, maka arus di kumparan zigzag yang diturunkan di kumparan delta adalah, seperti persamaan (4.3).

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = 1/k_1 \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Dimana, $k_1 = \frac{N_1}{n}$, k_1 adalah rasio kumparan diantara primer dan sekunder.

Ditinjau skema diagram transformator Dz menyuplai beban nonlinier satu fasa yang terdistribusi seimbang, seperti Gambar 4.3. Beban.beban nonlinier membangkitkan arus harmonisa triplen, I_3 identik seimbang di setiap penghantar fasanya. Dari diagram

diketahui bahwa ggm harmonisa triplen saling mengurangkan atau menurunkan di kumparan kaki inti fasa – a sekunder. Hasilnya, tidak ada arus harmonisa triplen yang bersirkulasi di sisi delta primer.



Gambar 4.3 Pengurangan dan sirkulasi Arus Harmonisa triplen pada Transformator Dz.

Dalam prakteknya pembebanan di saluran distribusi tiga fasa empat kawat tidak pernah seimbang karenanya arus harmonisa triplen di arus fasanya tidak selalu sama besar sehingga resultan fluks ggm pada kaki yang sama di sisi sekunder tidak saling menurunkan secara total [6]. Hasilnya, arus harmonisa triplen tetap bersirkulasi di kumparan primer dan di saluran suplai daya. Selain itu, karena konstruksi transformator Dz dimana tiga kaki inti tidak dilewati fluks tiga arus beban maka penghapusan fasa (cancel out phase) arus harmonisa triplen tidak terjadi secara keseluruhan, seperti persamaan (4.3).

4.1.2 Transformator Dtz

Transformator distribusi selain mampu memperbaiki keseimbangan impedansi dalam juga dapat memperbaiki bentuk gelombang tegangan dan arus belitan transformator dengan memperkecil harmonisa. Bila nilai impedansi dalam transformator yang besar dan terhubung ke beban yang nilai induktansinya juga besar maka ripple arus output dapat diabaikan [37].

Berdasarkan studi transformator penyearah membuktikan bahwa distorsi gelombang arus pada transformator menyebabkan kenaikan nilai rms arus dan rating daya sesaat transformator. Selain itu, transformator penyearah juga menyebabkan distorsi gelombang tegangan pada sistem suplai dimana upaya untuk membatasi distorsi tersebut adalah dengan memperbanyak jumlah pulsa per siklus gelombang sinusoidal tegangan kumparan per-fasa. Sebagai contoh adalah dengan membagi sebuah kumparan fasa menjadi tiga bagian kumparan identik, atau kelipatan tiga bilangan integer. Dengan demikian, jumlah pulsa gelombang sinusoidal per-siklus dapat diperbanyak/ditambah sehingga jumlah komponen ripple dapat diturunkan sesuai dengan komponen yang disearahkan dalam satu siklus positif [37].

Sebagai contoh simulasi dapat dibuktikan dalam persamaan (4.4), (4.5), (4.6), dan (4.7) serta Gambar 4.4 penambahan pulsa pulsa gelombang sinusoidal.

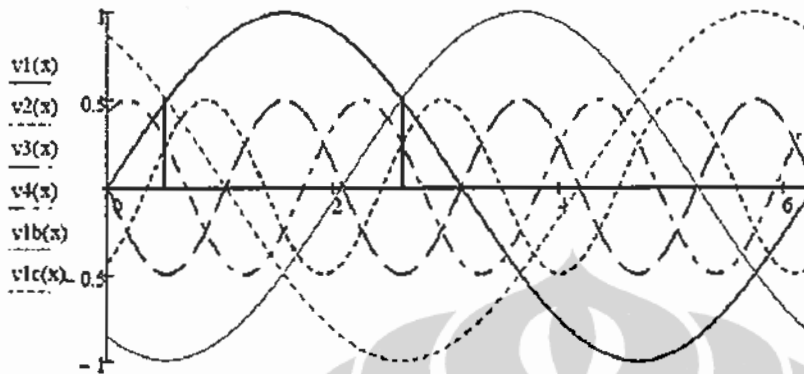
$$v_1(x) = \sin(x) \quad (4.4)$$

$$v_2(x) = \frac{1}{2} \sin [3(x - 20^\circ)] \quad (4.5)$$

$$v_3(x) = \frac{1}{2} \sin [3(x - 60^\circ)] \quad (4.6)$$

Universitas Indonesia

$$v_4(x) = \frac{1}{2} \sin [3(x - 100^\circ)] \quad (4.7)$$



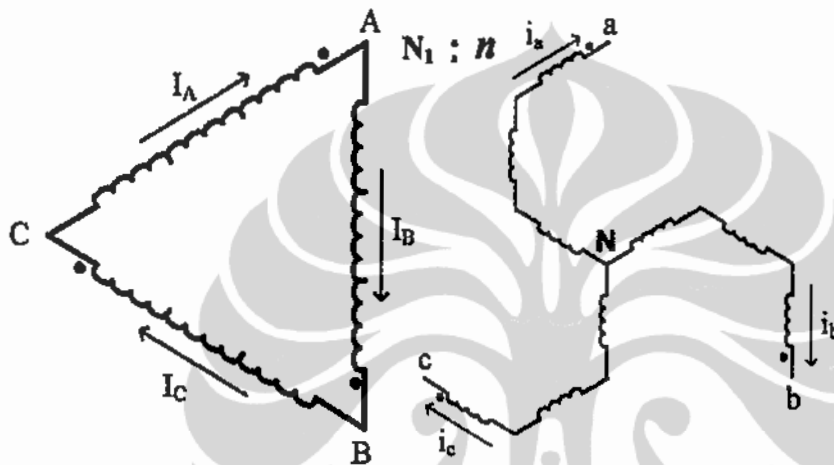
Gambar 4.4 Tiga Gelombang sinusoidal Induksi ggm setiap kumparan fasa Sekunder.

Seperti disampaikan bahwa upaya menurunkan distorsi harmonisa dengan menambah pulsa gelombang sinusoidal dapat diterapkan pada transformator distribusi, misalnya untuk kebutuhan sumber penyearah dengan beban kapasitas besar di pusat industri [37].

Berdasarkan metodologi memperbanyak jumlah gelombang sinusoidal perfasa untuk menurunkan harmonisa [37] dan teori transposisi kawat.kawat saluran transmisi daya tiga fasa untuk mengatasi ketidak simetrisan akibat letak geometris kumparan [35, 38] maka dibangun ide metode hubungan tiga kumparan zigzag sekunder. Di sisi kumparan sekunder setiap jumlah kumparan fasa tegangan rendah, N_2 dibagi menjadi tiga bagian kumparan sama besar, $n = N_2/3$. Dan, setiap n bagian kumparan fasa diletakkan secara silang simetris pada tiga kaki inti yang berbeda. Kemudian, tiga bagian dari n kumparan diseri menyusun satu kumparan fasa, seperti Gambar 4.4. Hasilnya, resultan ggm

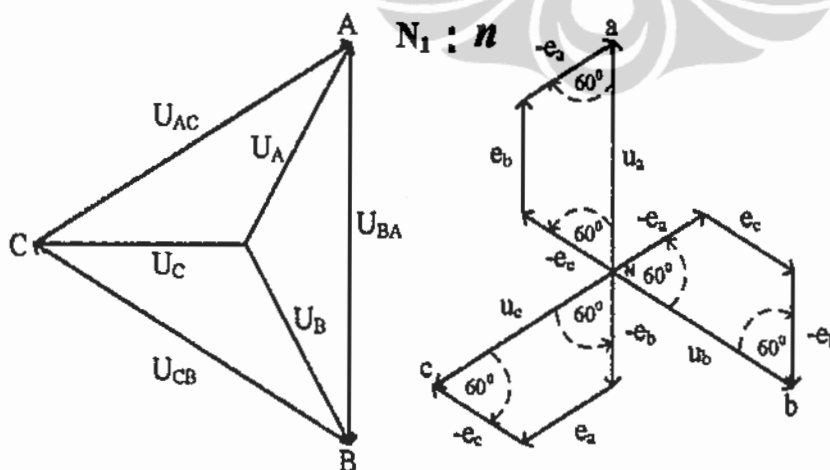
kumparan fasa adalah $1/2$ kali setiap n , atau $1/3$ bagian ggm. Kelebihan konfigurasi ini mampu membatasi tegangan harmonisa triplen diantara saluran fasa beban dan netral dengan cara memposisikan saling berlawanan fasa dari setiap tegangan n kumparan seri tersebut. Dengan konfigurasi zigzag sisi sekunder ini maka impedansi dalam transformator Dtz menjadi lebih besar dari transformator standard Dy.

Diagram konfigurasi transformator Dtz seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Hubungan Kumparan Transformator Dtz.

Hubungan fasor induksi ggm diantara sisi primer dan sekunder, seperti Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Diagram fasor induksi ggm diantara sisi primer dan sekunder.

Universitas Indonesia

Hubungan fasor tegangan primer dan sekunder, seperti persamaan (4.8).

$$\begin{bmatrix} U_{BA} \\ U_{CB} \\ U_{AC} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} u_b \\ u_c \\ u_a \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Ditinjau diagram vektor tegangan sekunder fasa – a , seperti Gambar 4.6 adalah:

$$u_a = (-e_c - e_b + e_a)$$

Jadi untuk kondisi beban seimbang, jumlah ggm kumparan fasa adalah sama dengan dua kali ggm 1/3 bagian kumparan sekunder, yaitu:

$$u_a = e_c \cos 60^\circ + e_b + e_a \cos 60^\circ = 2e \quad (4.9)$$

Sedangkan untuk kondisi beban tidak seimbang, karena arus fasa beban mengalir di 1/3 kumparan pada kaki maka inti diinduksikan ggm yang relatif sama besar sehingga fluks resultan inti mendekati seimbang. Dengan demikian, resultan ggm lawan yang diinduksikan dari sisi sekunder ke sisi primer tetap relatif seimbang meskipun beban tidak seimbang.

Karena hubungan vektor ggm arus kumparan fasa sekunder diatas dibentuk dari hubungan tiga bagian kumparan zigzag, maka arus di kumparan zigzag yang diturunkan di kumparan delta, seperti persamaan (4.10).

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = 1/k_1 \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Dimana

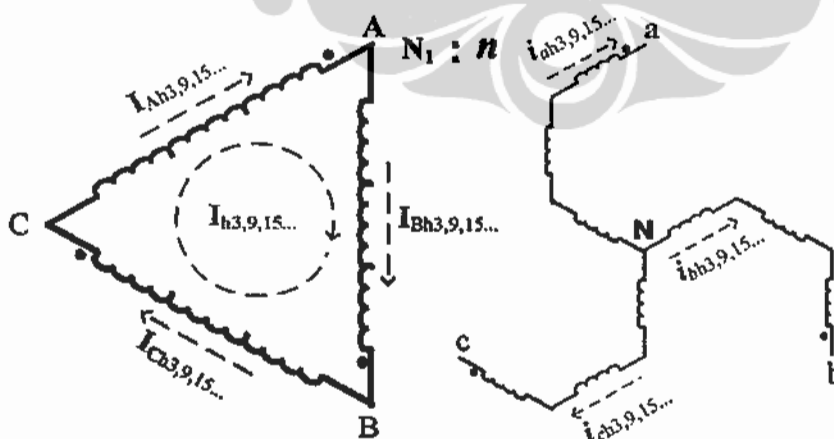
$$k_1 = (N_1/n); \quad n = (N_2/2)$$

Universitas Indonesia

Persamaan (4.9) menunjukkan bahwa vektor resultan ggm arus saling menghilangkan atau mengurangi pada setiap $1/3$ bagian kumparan zigzag sekunder pada kaki inti yang sama. Selisih arus fasa sekunder yang diinduksikan ke kumparan delta primer menjadi lebih kecil. Arus induksi di sisi primer tersebut sudut fasanya sama atau sefasa dengan arus urutan nol dan bersirkulasi di kumparan delta primer sama seperti arus harmonisa triplen.

Dari penjelasan diatas, bahwa aliran arus harmonisa beban nonlinier yang mengalir balik dari beban ke sumber melalui transformator akan diturunkan dengan cara disirkulasikan di delta primer sedangkan arus dasar mengalir ke beban.

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa transformator Dtz menyuplai beban nonlinier satu fasa penghasil arus harmonisa triplen, I_3 . Pada Gambar tersebut juga dapat diketahui bahwa ggm harmonisa triplen saling mengurangi atau menurunkan di kumparan kaki inti fasa - a sekunder. Hasilnya, arus harmonisa triplen yang bersirkulasi di sisi delta primer makin sedikit.



Gambar 4.7 Pengurangan dan sirkulasi Arus Harmonisa triplen pada Transformator Dtz.

Universitas Indonesia

Dari tiga arus beban pada masing-masing 1/3 bagian kumparan sekunder membangun fluks magnet di inti yang sama, dimana sudut fasanya berbeda 180 derajat listrik. Dengan demikian, fluks magnet diantara tiga bagian kumparan saling mengurangi dan terjadi penghapusan sinyal. Sinyal frekuensi harmonisa triplen. Karena magnitud tiga arus arus beban di 1/3 bagian kumparan fasa sekunder adalah 1/2 lebih kecil dari magnitud arus kumparan fasa, maka resultan fluks ggm arus arus harmonisa triplen di inti menjadi lebih kecil. Akibatnya, jumlah aliran energi elektromagnetik harmonisa arus dari inti ke kumparan sekunder dapat diturunkan. Hasilnya, arus fasa kumparan delta primer transformator mengandung komponen harmonisa triplen yang sedikit dan diharapkan tidak muncul di gelombang sinusoidal arus fasa di saluran sumber.

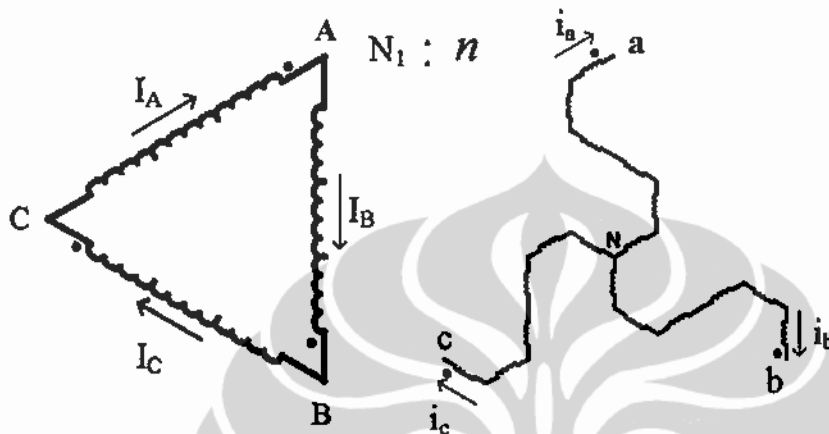
4.1.3 Transformator Ddtz (Delta primary – doubly transposed zigzag secondary)

Ide metode hubungan zigzag sekunder enam kumparan ini adalah sama seperti metode hubungan zigzag sekunder tiga kumparan silang, bahwa setiap jumlah kumparan fasa tegangan rendah, N_2 dibagi menjadi enam bagian kumparan sama besar, $N_2/6$. Selanjutnya dari setiap $N_2/6$ bagian kumparan fasa diletakkan secara *silang dua tingkat (ganda)* pada tiga kaki inti yang berbeda. Kemudian, enam bagian dari $N_2/6$ dihubungkan seri menyusun sebuah kumparan fasa, seperti pada Gambar 4.8.

Kelebihan konfigurasi *transposisi zigzag – dua tingkat (doubly transposed zigzag)* adalah dengan semakin banyak jumlah pembagian kumparan fasa sekunder maka jumlah pulsa gelombang semakin banyak. Semakin banyak jumlah pulsa gelombang yang dibangkitkan kumparan fasa maka semakin tinggi redaman ripple yang dihasilkan

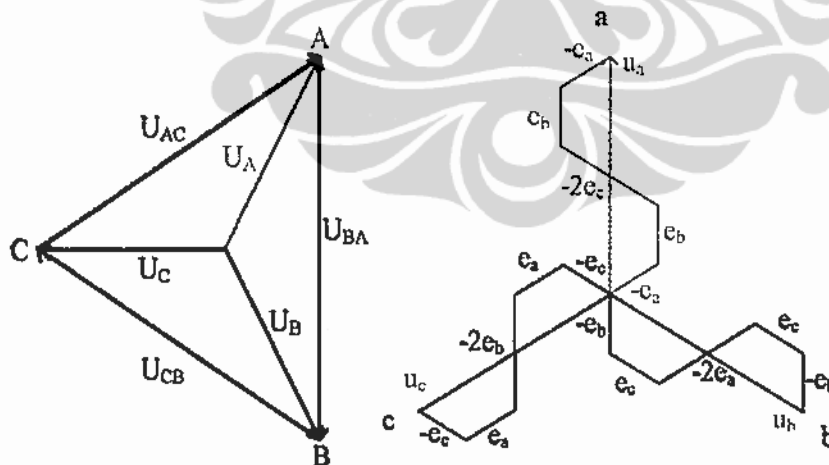
rangkaian transformator. Dengan menurunkan ripple distorsi harmonisa diharapkan bentuk gelombang sinusoidal tegangan induksi semakin sempurna.

Diagram skema transformator Ddtz seperti pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Hubungan Kumparan Transformator Ddtz.

Hubungan fasor induksi GGM diantara sisi primer dan sekunder seperti Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Diagram fasor induksi ggm diantara sisi primer dan sekunder.

Hubungan fasor tegangan primer dan sekunder, seperti persamaan (4.11).

$$\begin{bmatrix} U_{BA} \\ U_{CB} \\ U_{AC} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} u_b \\ u_c \\ u_a \end{bmatrix} = 2k_1 \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Ditinjau diagram vektor tegangan sekunder fasa – a, seperti Gambar 4.9.

$$u_a = (-e_c - e_b + e_a)$$

Jadi untuk kondisi beban seimbang, jumlah ggm kumparan fasa adalah sama dengan empat kali ggm 1/6 kumparan, yaitu:

$$e_1 = 2(e_3 \cos 60^\circ + e_2 + e_1 \cos 60^\circ) = 4e \quad (4.12)$$

Sedangkan untuk kondisi beban tidak seimbang, karena arus fasa beban mengalir di 1/6 kumparan pada kaki maka inti diinduksikan ggm yang relatif identik sehingga fluks resultan inti mendekati seimbang. Dengan demikian, resultan ggm lawan yang diinduksikan dari sisi sekunder ke sisi primer tetap relatif seimbang meskipun beban tidak seimbang.

Hubungan vektor ggm arus fasa sekunder diatas dibentuk dari enam bagian kumparan zigzag, maka arus di kumparan zigzag yang diturunkan di kumparan delta, seperti persamaan (4.13).

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = 1/2k_1 \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

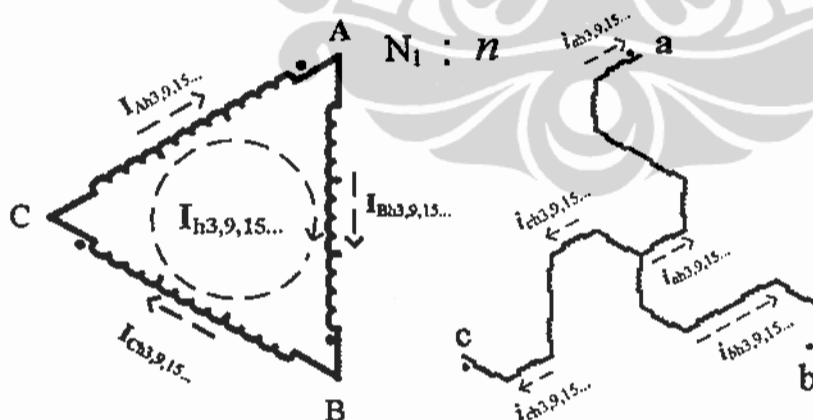
Dimana

$$k_1 = (N_1/n); \quad n = (N_2/4)$$

Universitas Indonesia

Dari persamaan (4.2) menunjukkan bahwa vektor resultan ggm arus (ampere.lilitan) di 1/6 bagian kumparan zigzag sekunder pada kaki inti yang sama diharapkan saling menghilangkan atau mengurangkan. Sehingga dari selisih arus fasa kumparan sekunder yang diinduksikan ke kumparan delta primer menjadi lebih kecil. Arus induksi di sisi primer tersebut sudut fasanya sama atau sefasa dengan arus urutan nol dan bersirkulasi di kumparan delta primer sama seperti arus harmonisa urutan triplen. Dari penjelasan tersebut, bahwa aliran arus harmonisa akan diturunkan dengan cara disirkulasikan di delta primer sedangkan arus fasa beban komponen dasar tetap mengalir ke beban.

Pada Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa transformator Dtz menyuplai beban nonlinier satu fasa penghasil arus harmonisa triplen, I_3 . Pada Gambar tersebut juga dapat diketahui bahwa ggm harmonisa triplen saling mengurangkan atau menurunkan pada kumparan kaki inti fasa - a sekunder. Hasilnya, arus harmonisa triplen yang bersirkulasi di sisi delta primer makin sedikit.



Gambar 4.10 Pengurangan dan sirkulasi Arus Harmonisa triplen pada Transformator Ddtz.

Dari tiga arus beban pada masing-masing 1/6 bagian kumparan sekunder membangun fluks magnet di inti identik dimana sudut fasanya berbeda 180 derajat listrik. Dengan demikian, fluks magnet diantara tiga bagian kumparan saling mengurangi dan terjadi penghapusan sinyal. Sinyal frekuensi harmonisa. Karena magnitud tiga arus arus beban di 1/6 bagian kumparan fasa sekunder adalah 1/4 lebih kecil dari magnitud arus fasa [25], maka resultan fluks ggm arus arus harmonisa triplen di inti menjadi lebih kecil. Hasilnya, jumlah aliran energi elektromagnetik harmonisa arus dari inti ke kumparan sekunder dapat diturunkan. Dengan demikian, arus fasa kumparan delta primer transformator mengandung harmonisa triplen yang sedikit dan diharapkan tidak muncul di gelombang sinusoidal arus fasa di saluran sumber.

Dengan meletakkan 1/6 bagian kumparan fasa secara silang pada kaki yang berbeda, tiga kaki inti akan mendapat atau mengalami 1/6 bagian induksi ggm dari tiga arus fasa beban tersebut, $\left(e_{2z} = \frac{N_2}{6} \times i_2 \right)$. Karena masing-masing kaki inti diinduksikan oleh ggm dari tiga arus fasa beban maka fluks resultan di inti akan relatif seimbang. Selain itu, karena kuantitas resultan ggm lawan yang diinduksikan dari sisi sekunder ke sisi primer lebih kecil maka kerugian fluks inti lebih kecil.

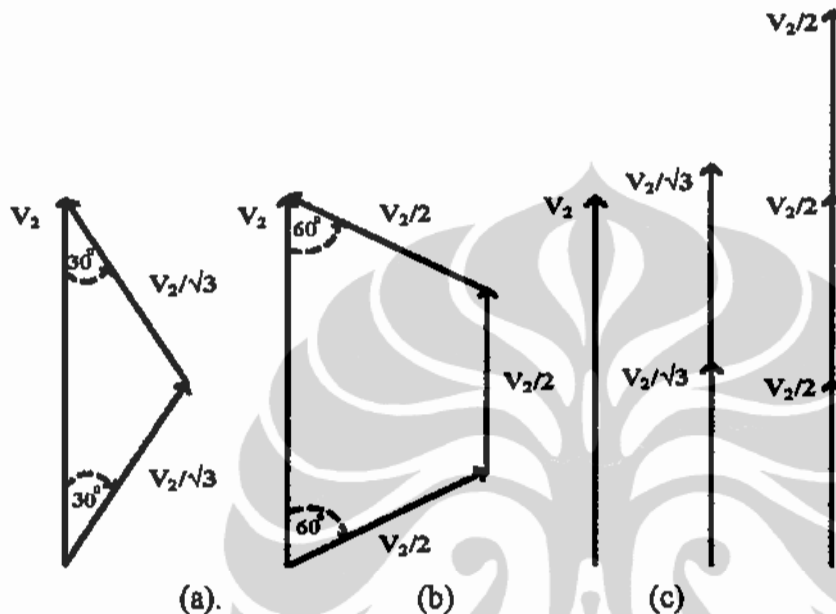
4.1.4 Perbandingan Nilai induktansi Transformator

Transformator Ddtz ini selain memiliki kemampuan meredam harmonisa triplen juga mampu menurunkan kerugian pada transformator. Kelebihan tambahan ini adalah mampu memperbesar nilai impedansi resistif didalam kumparan transformator.

Dari Gambar 4.11 dan persamaan (4.14) ditunjukkan bahwa untuk menghasilkan tegangan output efektif V_2 maka kebutuhan induksi ggm (ampere.lilitan) per fasa sisi

Universitas Indonesia

sekunder transformator Dtz lebih besar dibandingkan sisi sekunder transformator Dy dan Dz [13]. Kebutuhan induksi ggm perfasa sisi sekunder transformator Dy, Dz dan Dtz masing.masing adalah $V_2 : (2V_2/\sqrt{3}) : (3V_2/2)$, seperti Gambar (4.11c1), (4.11c2) dan (4.11c3).



Gambar 4.11 Fasor tegangan V_2 sisi Sekunder (a). Transformator Dz; (b). Transformator Dtz; dan (c) Resultan fluks induksi transformator (c1) Dy, (c2) Dz dan (c3) Dtz atau Ddtz.

Gambar 4.11 menunjukkan rasio impedansi (dalam per unit) kumpulan transformator Dy, Dz dan Dtz atau Ddtz masing masing adalah 1: (1,155) : (1,5). Berarti, kedua transformator Dtz dan Ddtz membutuhkan ggm 1,5 kali lebih besar untuk menghasilkan tegangan output efektif, V_2 . Pada nilai arus fasa yang sama seolah.olah jumlah kumpulan fasa sekunder transformator Dtz adalah 1,5 kali lebih banyak dari pada transformator konvensional sehingga nilai impedansi induktifnya, L lebih besar. Dengan impedansi

induktif L yang lebih besar, saat frekuensi triplen, maka aliran energy elektromagnetik harmonisa yang diredam, $L \frac{di(t)}{dt}$, makin besar dan tidak mengalir ke saluran tenaga [22].

Selain itu, berdasarkan hukum Ohm dimana

$$V = I R \quad (4.14)$$

Dimana

V adalah tegangan ouput efektif ($= V_2$) (Volt); I arus fasa beban (Ampere); dan R adalah impedansi resistif kumparan (Ohm).

Dan, berdasarkan persamaan rugi daya kumparan transformator

$$P_{rugi} = I^2 R \approx \left(\frac{V_2}{R} \right)^2 R \quad (4.15)$$

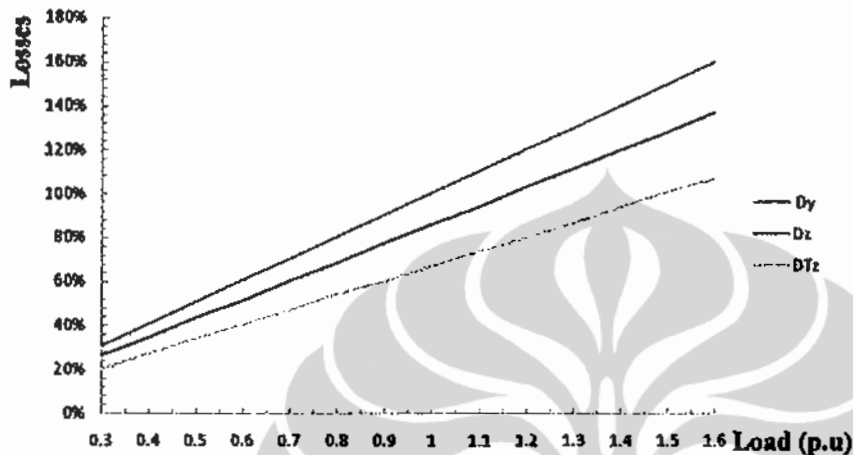
$$P_{rugi} \approx (1/R) \quad (4.16)$$

Dimana

P_{rugi} adalah Rugi daya di kumparan transformator (Watt).

Dari persamaan (4.14) dan (4.16) didapatkan rasio arus output/beban dan rasio rugi daya kumparan transformator Dy , Dz dan transformator Dtz atau $Ddtz$ masing masing adalah $1: (1/1,155) : (1/1,5)$. Hal ini menunjukkan bahwa saat frekuensi dasar dan frekuensi triplen, nilai impedansi rangkaian kumparan Dtz lebih besar dari pada impedansi kumparan transformator lainnya, seperti Gambar 4.12. Untuk tegangan ouput efektif V_2 , maka arus output sekunder transformator Dtz menjadi lebih kecil. Hal ini, karena pengaruh nilai perubahan linier impedansi resistif lebih kecil dari pada pengaruh nilai

perubahan kuadratis arus sehingga rugi daya kumparan Dtz lebih kecil. Berarti, untuk kapasitas daya input yang sama besar maka efisiensi transformator Dtz akan lebih tinggi dan arus yang dapat dikirim ke beban menjadi semakin besar.



Gambar 4.12 Rasio arus output dan rugi daya kumparan transformator Dy, Dz dan Dtz atau Ddtz.

Dari pembahasan diatas dibuktikan bahwa transformator Dtz atau Ddtz disamping memiliki kemampuan utama meredam harmonisa triplen dengan metode menghambat fasa dan sirkulasi. Kelebihan tambahan dari teknologi kumparan Dtz adalah lebih efisien dan hemat energy karena mampu menurunkan rugi kumparan transformator. Kelebihan ini diperoleh melalui disain konfigurasi transposisi zigzag sekunder Dtz yang dapat memperbesar nilai impedansi rangkaian transformator.

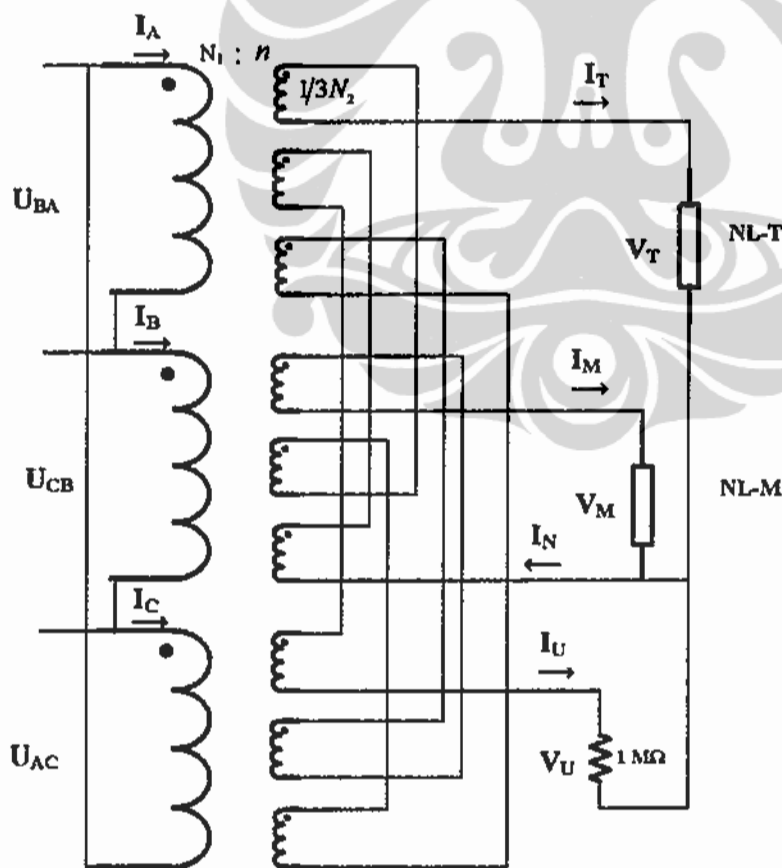
4.2 Model Pembebanan Transformator Tidak Seimbang (Pembebanan Dua Fasa Dari Sumber Tiga Fasa)

Seperti dibahas pada sebelumnya bahwa untuk memenuhi kebutuhan pembebanan satu fasa atau dua fasa kapasitas daya besar menggunakan transformator pengubah sistem

distribusi dari sumber tiga fasa yaitu transformator Vee/vee, T-Scott atau Le Blanc. Dalam penelitian untuk disertasi ini digunakan transformator Dtz dan Ddtz sebagai transformator pengubah sistem distribusi dari sumber tiga fasa ke sistem dua fasa. Untuk membuktikan kemampuan transformator Dtz tersebut mengatasi distorsi harmonisa maka dibuat model matematika tiga fasa dan analisis simulasi kinerja pada kondisi pembebanan tidak seimbang dua fasa.

4.2.1 Model Simulasi Konfigurasi Transformator Dtz

Kelebihan konfigurasi ini mampu membatasi tegangan harmonisa triplen diantara saluran fasa beban dan netral dengan cara memposisikan saling berlawanan fasa dari setiap tegangan $N_2/3$ kumparan yang diseri, seperti Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Skema Transformator Dtz.

Universitas Indonesia

Hubungan fasor tegangan dan arus diantara sisi primer dan sekunder untuk pembebanan tiga fasa seperti persamaan (4.16) dan (4.17).

$$\begin{bmatrix} U_{BA} \\ U_{CB} \\ U_{AC} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_T \\ V_M \\ V_U \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Dan

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = 1/k_1 \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_M \\ I_U \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Dimana

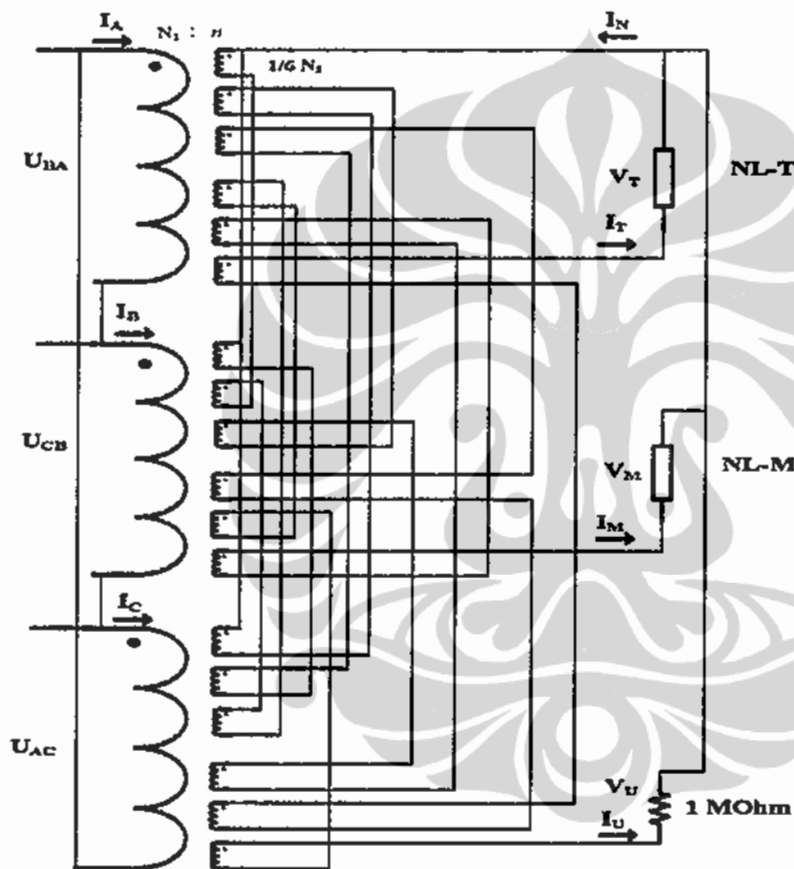
$$k_1 = (N_1/n); \quad n = (N_2/2)$$

Sebagai catatan, untuk simulasi pembebanan dua fasa seimbang maka fasa-U dihubungkan ke impedansi resistif R tidak terhingga (= 1 Mega Ohm) agar arus fasa-U, \bar{I}_U nol. Dengan meletakkan 1/3 bagian kumparan fasa secara silang pada kaki yang berbeda, tiga kaki inti akan mendapat atau mengalami 1/3 bagian induksi ggm dari tiga arus fasa beban tersebut, $\left(e_{2z} = \frac{N_2}{3} \times i_2 \right)$. Karena masing-masing kaki inti diinduksikan oleh ggm dari tiga arus fasa beban maka fluks resultan di inti akan relatif seimbang. Selain itu, karena kuantitas resultan ggm lawan yang diinduksikan dari sisi sekunder ke sisi primer lebih kecil maka kerugian fluks inti jadi lebih kecil.

4.2.2 Model Simulasi Transformator Ddtz

Kelebihan konfigurasi ini adalah dengan semakin banyak jumlah pembagian kumparan sisi sekunder diharapkan bentuk gelombang sinusoidal tegangan induksi

semakin mendekati sinusoidal murni, seperti pada Gambar 4.13. Karena bentuk gelombang tegangan induksi di satu kumparan tergantung pada distribusi dari kerapatan fluks gaya gerak magnet di inti. Dengan mendistribusikan kerapatan fluks melalui pembagian sama besar jumlah kumparan sekunder distorsi harmonisa dibatasi. Dengan demikian, tegangan induksi frekuensi dasarnya akan dapat diturunkan, meskipun dalam jumlah yang sedikit.



Gambar 4.13 Skema Transformator Ddtz.

Hubungan fasor tegangan dan arus diantara sisi primer dan sekunder untuk pembebanan tiga fasa seperti persamaan (4.19) dan (4.20).

$$\begin{bmatrix} U_{BA} \\ U_{CB} \\ U_{AC} \end{bmatrix} = 2k_1 \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_T \\ V_M \\ V_U \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Dan

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = 1/2k_1 \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_M \\ I_U \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Dimana

$$k_1 = (N_1/n); \quad n = (N_2/4)$$

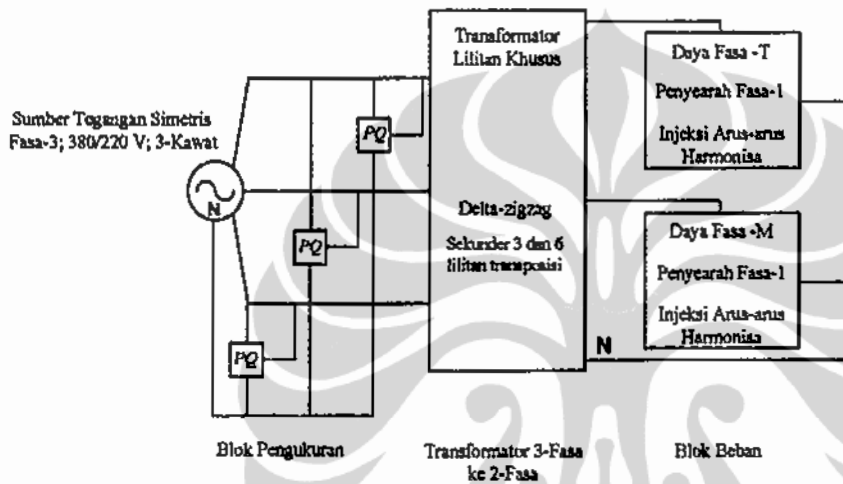
Sebagai catatan, untuk simulasi pembebanan dua fasa seimbang maka fasa-U dihubungkan ke impedansi resistif R tidak terhingga ($= 1$ Mega Ohm) agar arus fasa-U, \bar{I}_U nol. Karena masing-masing kaki inti diinduksikan oleh ggm dari tiga arus fasa beban maka fluks resultan di inti relatif seimbang. Selain itu, karena magnitudo resultan ggm lawan yang diinduksikan dari sisi sekunder ke sisi primer lebih kecil maka kerugian fluks inti jadi lebih kecil.

4.3 Simulasi Pada Transformator Untuk Pembebanan Tidak Seimbang

Model rangkaian simulasi transformator distribusi menyuplai daya ke beban tidak seimbang dua buah beban satu fasa dengan penyearah, seperti Gambar 4.14. Setiap penyearah melayani beban resistif dengan kapasitas daya yang sama besar, yaitu R adalah 125 Ohm. Diasumsikan transformator kondisi ideal dan rasio

Universitas Indonesia

kumparan $(N_1/N_2)=1$. Pada kondisi seimbang, sudut fasa tegangan dan arus masing-masing $0^\circ, 120^\circ$ dan 240° . Dengan menggunakan analisis PSpice pada rangkaian pembebanan maka digambar gelombang sinusoidal arus fasa dan spektrum frekuensi dari arus fasa baik di sisi primer maupun di sisi sekunder berdasarkan analisis Fourier [28, 40].

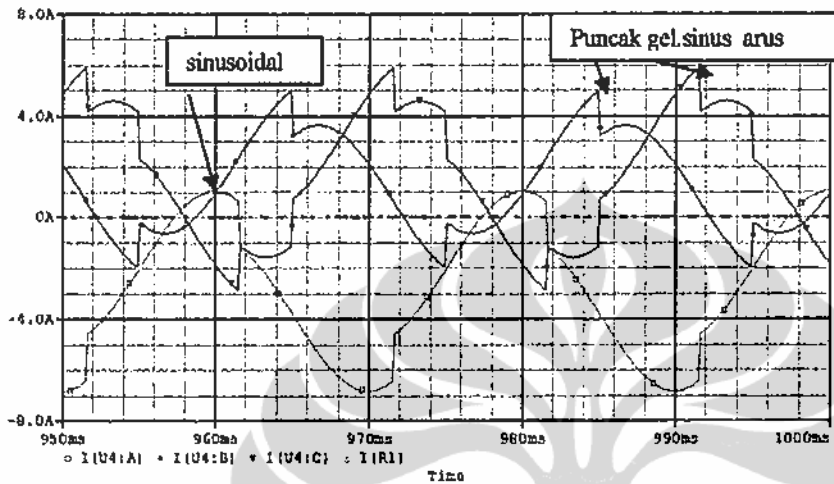


Gambar 4.14 Model Simulasi Pembebanan Transformator Tidak Seimbang.

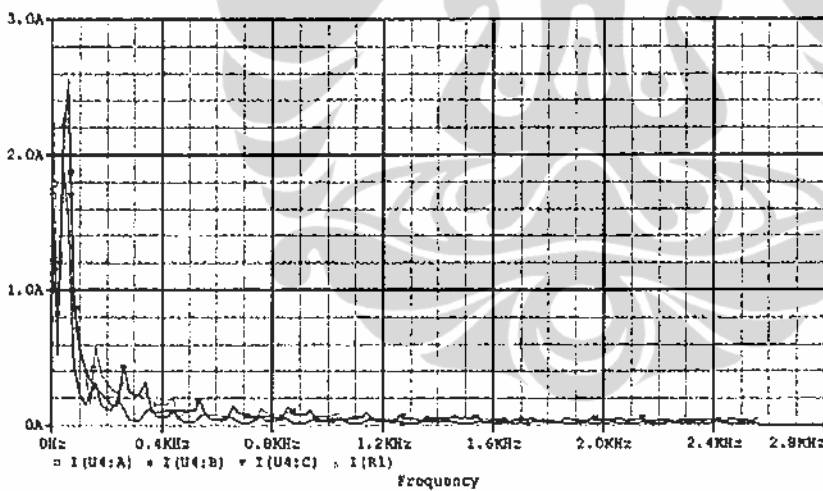
Seperti diketahui bahwa harmonisa triplen dan harmonisa ke.5 dan ke.7 adalah sumber utama dari gangguan pada sistem suplai daya untuk dua penyearah satu-fasa dengan kapasitas beban sama. Dengan transformator Dtz atau Ddtz, maka gelombang arus di sisi primer atau sumber tetap mendekati bentuk sinusoidal karena kemampuannya lebih baik menurunkan tingkat distorsi harmonisa arus agar tidak mengalir ke saluran sumber.

4.3.1 Bentuk Gelombang dan Spektrum Frekuensi Transformator Dtz

Dengan penggunaan transformator Dtz menunjukkan bentuk gelombang arus sinusoidal meskipun puncak gelombang masih cukup tajam di sisi primer atau sumber, seperti pada Gambar 4.15a.



(a).



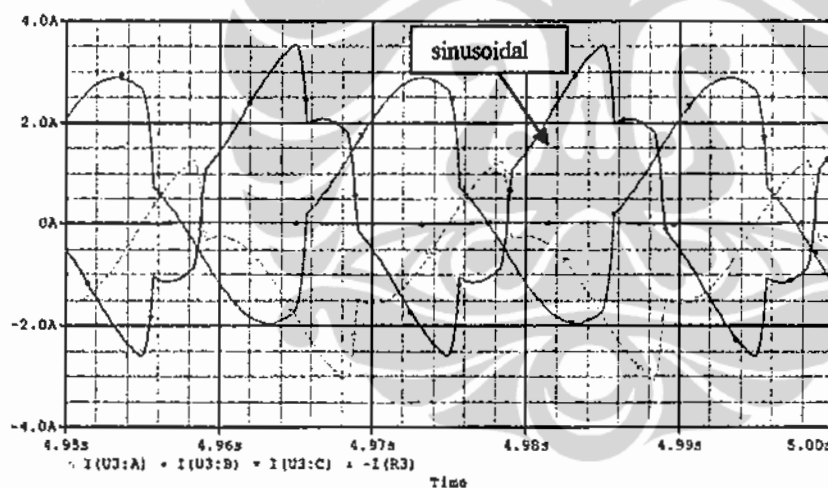
(b).

Gambar 4.15 Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekuensi Arus Fasa Sisi Primer.

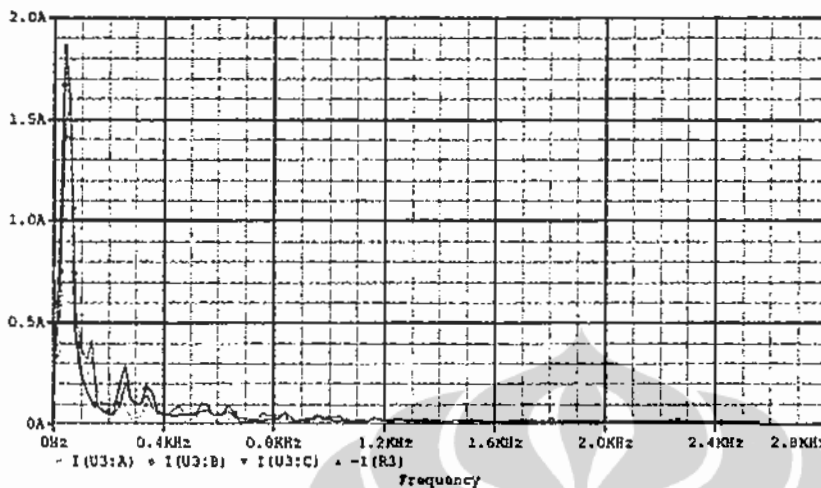
Berdasarkan Tabel L2.4 dalam Lampiran 2 transformator Dtz diketahui THD arus untuk frekuensi harmonisa triplen adalah 20,36 % dan THD arus untuk frekuensi harmonisa ke.5 dan ke.7 saja adalah 18,08 % pada nilai rms arus rata-rata fasa 2,34 Ampere.

4.3.2 Bentuk Gelombang dan Spektrum Frekuensi Transformator Ddtz

Ketajaman puncak gelombang arus arus primer pada transformator Dtz dapat dibatasi dengan penggunaan transformator Ddtz, seperti pada Gambar 4.16a. Hal ini membuktikan bahwa pada pembebanan tidak seimbang transformator Ddtz mampu lebih efektif menurunkan aliran energi elektromagnetik berupa distorsi harmonisa dari sisi beban ke sisi sumber.



(a).



(b).

Gambar 4.16 Bentuk (a) Gelombang dan, (b) Spektrum Frekuensi Arus Fasa Sisi Primer atau Sumber.

Berdasarkan Tabel L2.5 dalam Lampiran 2 transformator Ddtz diketahui THD arus untuk frekuensi harmonisa triplen adalah 17,45% dan THD arus untuk frekuensi harmonisa ke.5 dan ke.7 saja adalah 16,07% pada nilai rms arus rata-rata fasa 1,54 Ampere.

4.4 Rekapitulasi Hasil Simulasi Pembebanan Transformator Distribusi Berdasarkan Nilai Faktor Daya

Diketahui karena skema hubungan Vee/vee memiliki konstruksi tidak seimbang maka kinerjanya dalam membatasi pengaruh ketidakseimbangan tiga fasa adalah yang paling kecil dibandingkan dengan skema hubungan Scott, Le Blanc, dan Dtz serta Ddtz yang lebih efektif mengubah suplai daya tiga fasa menjadi dua suplai daya satu fasa identik.

Skema konstruksi transformator T.Schott dan Le Blanc memang lebih seimbang karena dibuat khusus mengubah dari sumber tiga fasa untuk dibebani dua buah beban satu fasa identik atau beban dua fasa pada kondisi pembebanan seimbang. Seperti pada hubungan Vee/vee karena skema konstruksi Scott tidak ada hubungan delta untuk tempat sirkulasi arus harmonisa triplen maka rangkaian transformator tidak efektif menghambat aliran balik arus harmonisa tersebut ke sisi suplai. Demikian pula, meskipun kumparan sisi primer hubungan Le Blanc terhubung delta dan beban.fasa-M dan fasa-T adalah seimbang tetapi hubungan delta primer saja tidak dapat menyeimbangkan beban dan mengeliminasi frekuensi harmonisa triplen secara efisien. Dari penjelasan diatas diketahui bahwa transformator T-Scott dan Le Blanc hanya efektif menurunkan distorsi harmonisa pada kondisi pembebanan seimbang saja sedangkan pada beban tidak seimbang perlu dilengkapi tambahan peralatan seperti filter atau autotransformator penggeser fasa.

Pada Tabel 4.1 dapat diketahui kemampuan transformator Dtz membatasi distorsi harmonisa lebih baik dimana nilai rms arus primernya lebih kecil karena kandungan komponen harmonisa lebih sedikit. Hal ini, membuktikan prinsip penghambat fasa dengan menghubungkan seri setiap bagian kumparan di tiga kaki inti maka polaritas fluks ggm saling berlawanan fasa sekaligus kumparan transformator ini memiliki impedansi dalam paling besar.

Tabel 4.1 Rekapitulasi Nilai Arus Fasa rata-rata, THD Arus Fasa rata-rata dan Faktor daya di sisi Primer.

Tipe Transformator	Arus Primer (rms)			THD Arus Rata-rata (%)	Faktor Daya Rata-rata
	A	B	C		
Vee/vee	2,74	4,28	2,82	45,28	0,8296
T-Scott	3,31	3,11	3,27	45,92	0,8278
Le Blanc	3,4	3,3	3,37	44	0,8333
Dtz	2,60	1,94	2,48	24,94	0,8946
Ddtz	1,06	1,94	1,62	28,86	0,8809

Dengan membagi kumparan perfasa secara geometris simetris menjadi tiga dan enam bagian identik menyebabkan lintasan fluks magnetik secara elektrik dan magnetik menjadi lebih panjang sehingga nilai relatif impedansi kumparan transformator lebih besar. Akibatnya magnitud aliran arus harmonisa ke sisi suplai atau sumber dapat dibatasi dan dihambat di rangkaian kumparan transformator. Hasilnya, arus fasa sisi primer atau sisi sistem distribusi yang menyuplai beban adalah yang lebih kecil nilainya diantara transformator hubungan khusus lainnya.

Selain itu, berdasarkan studi transformator penyearah membuktikan bahwa distorsi gelombang arus pada transformator dapat diturunkan dengan memperbanyak jumlah pulsa per siklus gelombang sinusoidal tegangan kumparan perfasa [37, 39]. Sebagai contoh adalah dengan membagi sebuah kumparan fasa menjadi tiga atau enam bagian kumparan identik atau sama besar maka jumlah pulsa gelombang sinusoidal dalam satu perioda dapat diperbanyak sehingga jumlah komponen ripple yang diturunkan dapat semakin sedikit sesuai dengan komponen yang disearahkan dalam satu siklus positif.

Dari hasil simulasi pembebanan juga menunjukkan bahwa nilai faktor daya transformator Vee/vee, Scott, Le Blanc, dan Dtz serta Ddtz berbeda meskipun dibebani dengan kapasitas daya listrik sama besar. Nilai faktor daya transformator Dtz dan Ddtz

Universitas Indonesia

lebih tinggi dibandingkan dengan transformator lainnya menunjukkan bahwa bentuk gelombang resultan induksi ggm perfasanya semakin mendekati bentuk gelombang sinusoidal murni. Dengan gelombang induksi ggm yang mendekati sinusoidal murni menunjukkan semakin sedikit tingkat distorsi harmonisa arus fasanya berarti nilai faktor daya transformator lebih tinggi, seperti pada Tabel 4.1.



Universitas Indonesia

BAB 5

KINERJA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI Ddtz DALAM MENGHAMBAT HARMONISA TRIPLLEN

Agar dapat membuktikan pengaruh integrasi tiga teori penghambatan induksi fluks elektromagnetik harmonisa triplen dapat meningkatkan kinerja transformator mengatasi ketidakseimbangan beban dan distorsi harmonisa maka dilakukan tahapan implementasi konfigurasi kumparan, pengujian eksperimen dan pengembangan simulasi model transformator Dtz. Dengan menerapkan integrasi tiga teori induksi elektromagnetik (lihat Subbab 1.2 Tujuan Penelitian disertasi ini) diharapkan transformator mampu membuat sistem distribusi kompatibel secara elektromagnetik dengan beban-beban elektronik (beban nonlinier) yang disuplainya.

5.1 Spesifikasi dan Implementasi Perancangan Transformator

Dalam tahapan pertama dibuat spesifikasi konfigurasi kumparan dan konstruksi kaki inti transformator Dtz yang lebih efisien dan efektif membatasi distorsi harmonisa dan dampak pembebanan tidak seimbang.

5.1.1 Spesifikasi Transformator

Untuk mendapatkan kinerja transformator rancangan maka pelaksanaan pengujian dan perancangan dilakukan di lingkungan laboratorium sesuai fungsi penggunaan

Universitas Indonesia

transformator. Implementasi perancangan transformator Ddtz sekunder enam bagian kumparan simetris dengan data transformator seperti pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Data pengawatan transformator.

Rating Daya	1250 Volt-Ampere (VA)
Rating Tegangan input/output	380/220 V : 6 x 55 V, 50 Hz
Kumparan Primer	380 V
Regulasi Tegangan	+ 5 %, -10 %
Bagian 1, 2, 3, 4, 5, 6 Kumparan Sekunder kaki inti 1	@ 55 V
Bagian 1, 2, 3, 4, 5, 6 Kumparan Sekunder kaki inti 2	@ 55 V
Bagian 1, 2, 3, 4, 5, 6 Kumparan Sekunder kaki inti 3	@ 55 V
Rugi Beban Nol @ 250 V (RMS – Sinusoidal)	29,5 W
Berat, Ukuran, dan Bentuk Inti	15 Kg, 400 x 150 mm, persegi

Meskipun transformator dalam tahap awal eksperimen namun perancangan yang akurat harus memperhatikan arus sesungguhnya yang lebih besar dari pada spesifikasi transformator standard. Dalam praktiknya, arus primer dihitung dari persamaan rasio lilitan dan kumparan sekunder harus mampu mengalirkan arus beban nominal.

5.1.2 Rancangan Transformator Ddtz

Implementasi perancangan transformator kumparan Ddtz didapat dengan menghubungkan seri enam bagian kumparan atau *transposisi zigzag – dua tingkat (doubly transposed zigzag)* membentuk sebuah kumparan fasa sekunder, seperti konfigurasi kumparan pada Gambar 4.8 yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya, dan Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Data pengawatan transformator Ddtz.

Rating Daya	1250 VA
Rating Tegangan input/output	380/220 V, 50 Hz
Kumparan Kumparan Primer	380 V
Regulasi Tegangan	+ 5 %, -15 %
Seri silang simetris kumparan sekunder diantara bagian 1 kaki inti 1, bagian 2 kaki 3 dan bagian 3 kaki 2, selanjutnya diulang dari semula	55 V/bagian kumparan
Seri silang simetris kumparan sekunder diantara bagian 1 kaki inti 2, bagian 2 kaki 1 dan bagian 3 kaki 3, selanjutnya diulang dari semula	55V/bagian kumparan
Seri silang simetris kumparan sekunder diantara bagian 1 kaki inti 3, bagian 2 kaki 2 dan bagian 3 kaki 1 selanjutnya diulang dari semula	55 V/bagian kumparan
Rugi Beban Nol @ 250 V (RMS – Sinusoidal)	30,7 W

5.2 Eksperimen dan Simulasi Model Pembebanan

Penentuan tingkat distorsi harmonisa beban dan kemampuan peredaman transformator dilaksanakan sesuai prosedur pengujian laboratorium. Untuk itu dilakukan pengukuran tingkat distorsi harmonisa arus di sisi sekunder dan primer untuk kondisi pembebanan seimbang dan tidak seimbang. Dari hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk mengetahui distribusi spektrum frekuensi arus harmonisa dan arus harmonisa yang diminimasi di sisi primer. Selanjutnya, data aktual pengujian pembebanan di sisi sekunder digunakan sebagai data input proses evaluasi menggunakan deret Fourier untuk menentukan bentuk gelombang sinus dan konversinya di belitan delta primer menurut uraian transformator secara matematika atau simulasi. Untuk mengetahui kebenaran dan keakuratan hasil evaluasi Fourier maka data hasil simulasi dibandingkan dengan data aktual pengukuran dalam bentuk kurva gelombang dan spektrum frekuensi. Untuk itu, data aktual hasil pengukuran dibuatkan tampilan kurva dalam bentuk gelombang arus

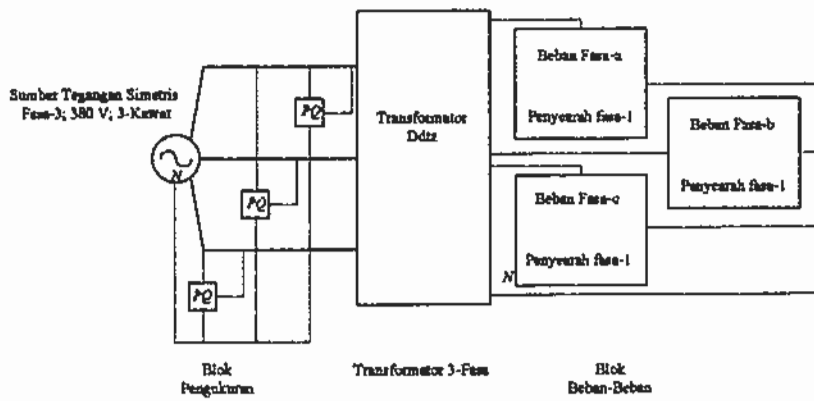
Universitas Indonesia

dengan bantuan deret Fourier kemudian kurva aktual hasil olahan ini dibandingkan dengan kurva simulasi. Hasilnya, bentuk gelombang arus aktual hasil pengukuran dan hasil simulasi di sisi primer transformator ini diharapkan mendekati identik.

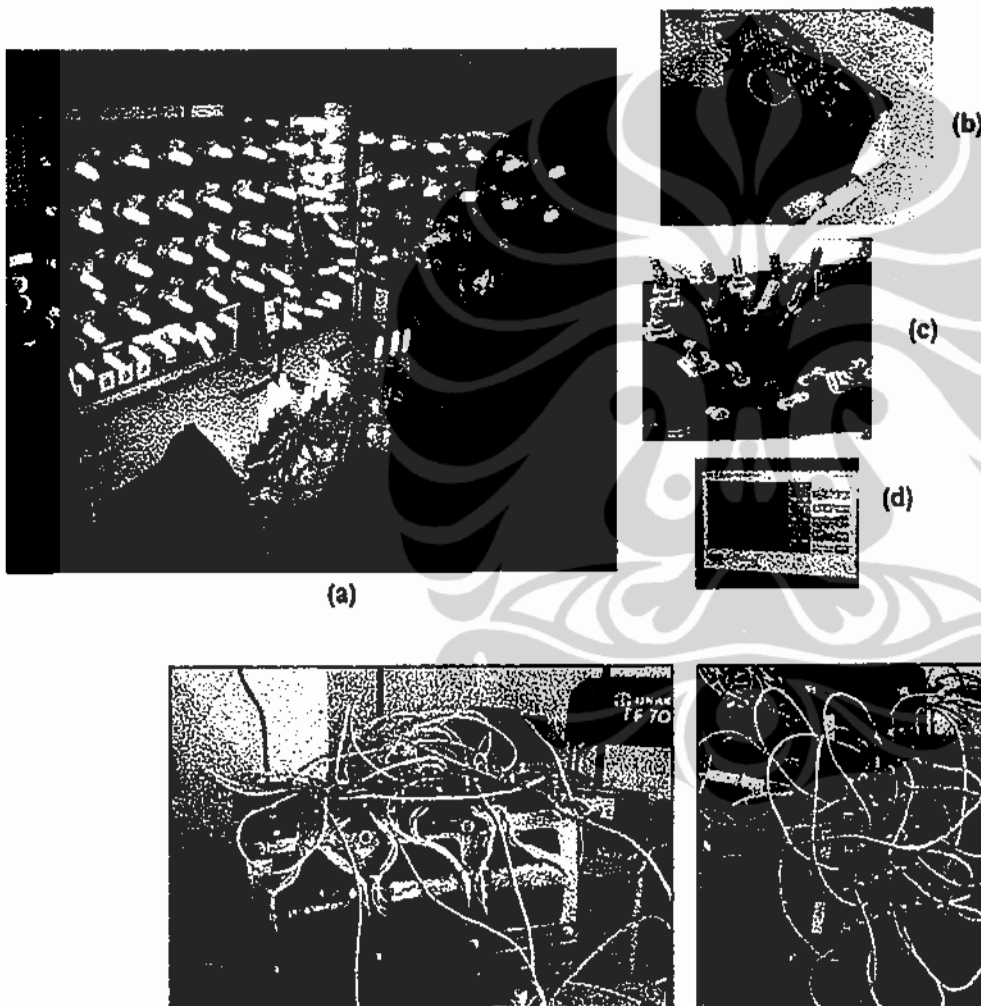
5.2.1 Pengujian Laboratorium

Pengujian menggunakan sumber tegangan tiga fasa 380 Volt; transformator Ddtz transposisi zigzag sekunder kapasitas daya 1250 VA; konfigurasi kumparan delta di sisi primer dan *transposisi zigzag – dua tingkat* di sisi sekunder; tegangan primer 380 Volt dan tegangan sekunder 220 Volt/6 x 55 V, 50 Hz; kapasitas nominal beban perfasa 450 VA; sedangkan beban nonlinier membangkitkan distorsi harmonisa sebesar 70%. Oleh karena itu, untuk memenuhi karakteristik harmonisa beban nonlinier tersebut maka dipilih lampu fluorescent dengan balast elektronik dilengkapi penyearah dioda gelombang penuh. Diketahui perangkat elektronika ini membangkitkan harmonisa arus (THD) sebesar 70%.

Untuk pembebanan pada kondisi seimbang setiap terminal tegangan output fasa sekunder dibebani daya 300 VA. Sedangkan, untuk pembebanan pada kondisi tidak seimbang terminal tegangan output fasa sekunder fasa a-b-c masing-masing dibebani daya 390 VA, 300 VA, dan 210 VA. Skema diagram satu garis pengujian pengukuran dan rangkaian eksperimen pembebanan transformator, seperti pada Gambar 5.1 dan 5.2.



Gambar 5.1 Diagram satu garis rangkaian percobaan.



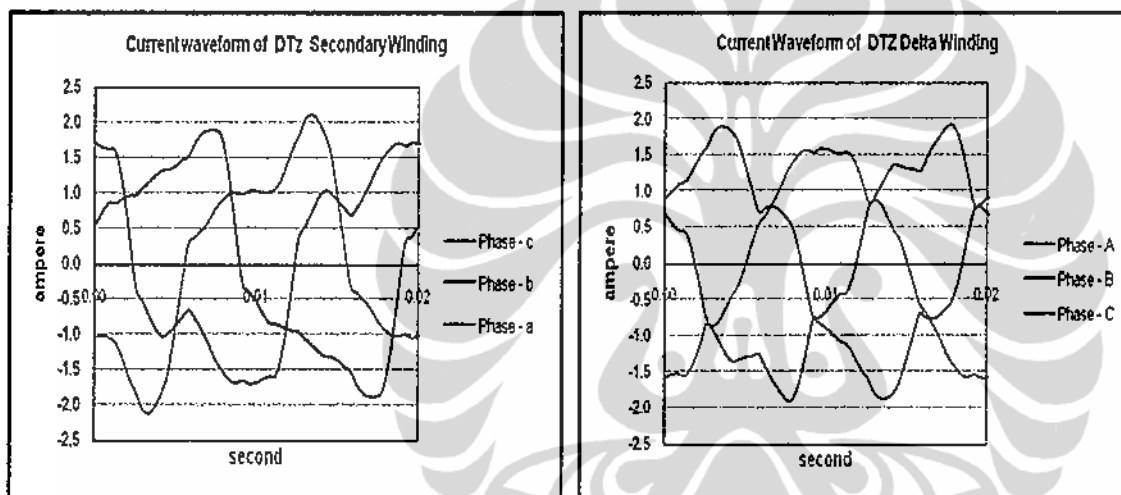
(b). (e).
 Gambar 5.2 (a) Rangkaian Eksperimen Pembebanan Transformator;
 (b) dan (e) Transformator Ddtz dan rangkaian terminasi;
 (c) Lampu Hemat Energi; dan (d) Alat Ukur Power Analyzer,

Universitas Indonesia

Pengujian laboratorium dilaksanakan untuk memberikan data input pada tahap simulasi komputer. Hasil simulasi diharapkan dapat membuktikan bahwa pemodelan transformator adalah cocok, layak dan dapat dicapai.

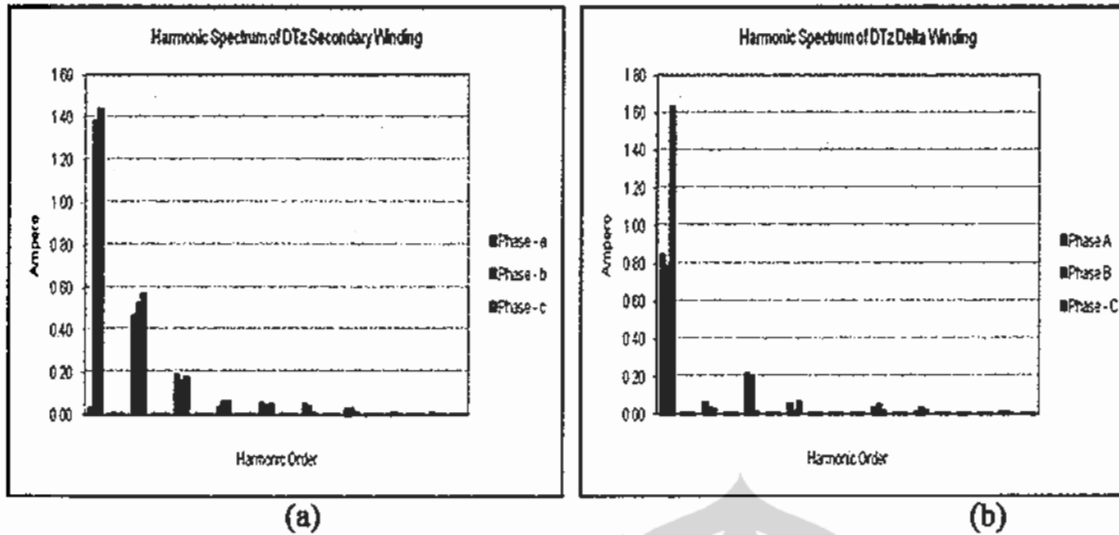
5.2.1.1 Kondisi Beban Seimbang

Gambar 5.3 menunjukkan gelombang arus di kumparan transposisi zigzag sekunder dan delta primer pada beban seimbang.



Gambar 5.3. Gelombang arus beban seimbang pada (a) Kumparan Sekunder (b) Kumparan Delta Primer.

Sedangkan Gambar 5.4 menunjukkan spektrum frekuensi arus harmonisa saat transformator dibebani dengan beban seimbang.

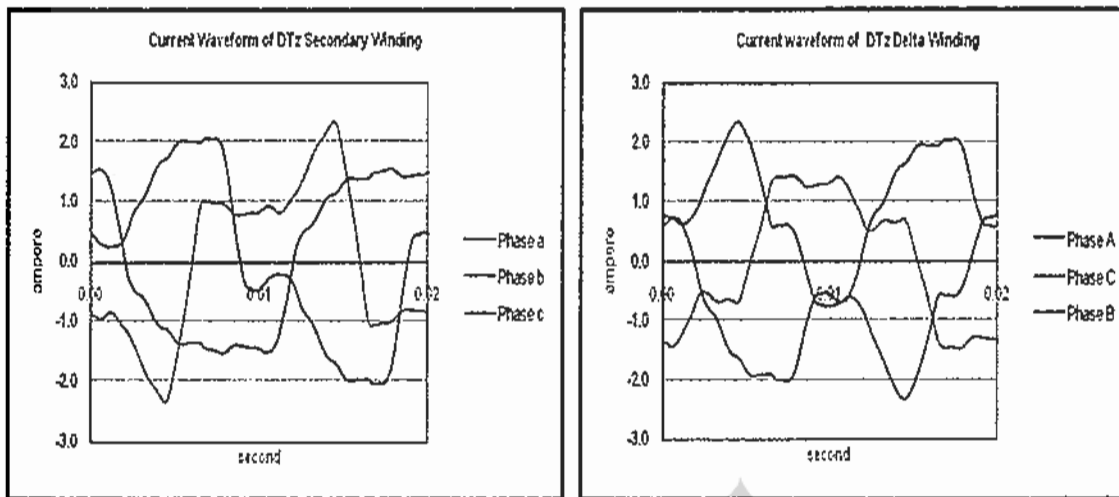


(a) (b)
Gambar 5.4 Spektrum arus harmonisa beban seimbang pada
(a) Kumparan Sekunder (b) Kumparan Delta Primer.

Pada Gambar 5.4(a) ditunjukkan bahwa arus harmonisa triplen yang diinjeksikan ke kumparan sekunder sekitar 70.8 %. Meskipun jumlahnya sedikit namun arus harmonisa ke-5, 7, 11, 13, dan 17 juga berkontribusi didalam arus harmonisa. Pada sisi belitan primer, Gambar 5.4(b) menunjukkan bahwa transformator Ddtz yang diusulkan memiliki kemampuan filter meredam arus harmonisa triplen. Hal ini dapat diketahui dengan menurunnya THD arus di kumparan primer hingga 24.3 %.

5.2.1.2 Kondisi Beban Tidak Seimbang

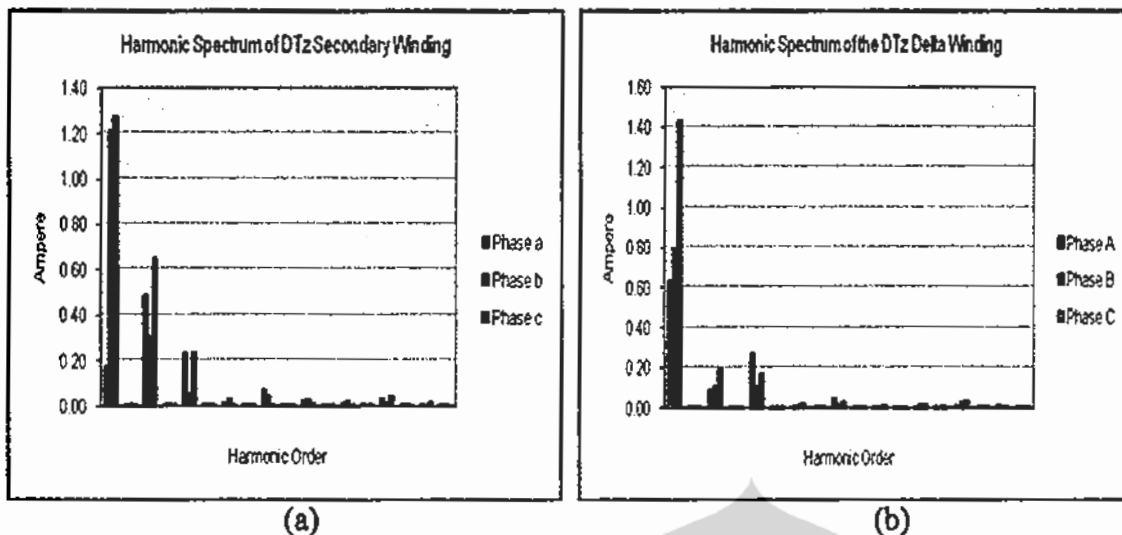
Dalam eksperimen ini diterapkan faktor ketidakseimbangan beban adalah 30%. Gambar 5.5 menunjukkan gelombang arus ketika masing-masing fasa pada transformator Ddtz dibebani 390 VA, 300 VA and 210 VA.



(a) (b)
**Gambar 5.5 Gelombang arus beban tidak seimbang pada
 (a) Kumbaran Sekunder (b) Kumbaran Delta Primer.**

Pada Gambar 5.5(a) ditunjukkan bahwa magnitud arus harmonisa triplen yang paling besar kontribusinya pada THD arus yaitu 68,44%. Meskipun jumlahnya sedikit namun arus harmonisa ke-5, 7, 11, 13, dan 17 juga berkontribusi didalam arus harmonisa. Peredaman arus harmonisa triplen ditunjukkan pada Gambar 5.5(b). THD arus dapat diturunkan dari 68 % pada sisi sekunder menjadi 26.4% di kumbaran delta.

Pada sisi belitan primer, Gambar 5.6(b) menunjukkan peredaman arus harmonisa triplen yaitu sebesar 68 % pada sisi sekunder menjadi 26.4% di kumbaran delta.



(a) (b)
Gambar 5.6 Spektrum arus harmonisa beban tidak seimbang pada
(a) Kumparan Sekunder (b) Kumparan Delta Primer.

Rekapitulasi data pengujian laboratorium diberikan pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 THD arus (%) pada pembebanan Seimbang dan Tidak Seimbang.

Parameter	Fasa	Pengujian Beban Seimbang		Pengujian Beban Tidak Seimbang	
		Sekunder	Primer	Sekunder	Primer
THD	a/A	72.5	27.98	57.31	17.15
Arus (%)	b/B	71.8	22.29	75.16	30.27
	c/C	68.05	22.52	72.85	31.74
Rata-rata		70.8	24.3	68.44	26.4

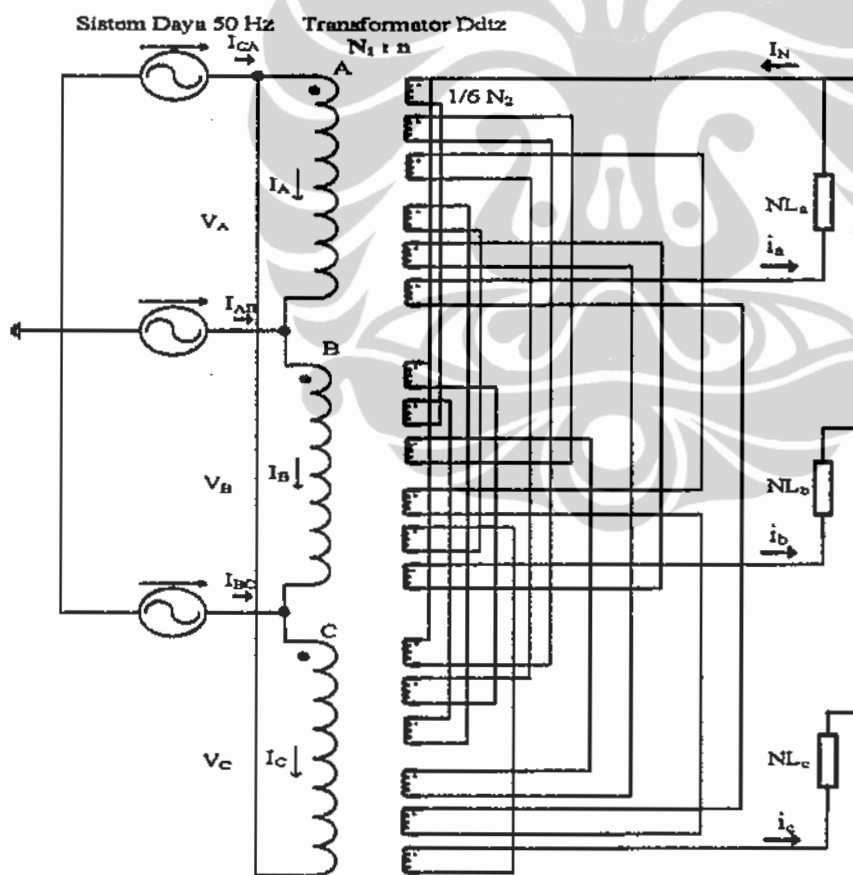
Tabel 5.3 menunjukkan bahwa terjadi tingkat peredaman aliran energi elektromagnetik arus harmonisa, THD yang bermakna dari sisi sekunder ke kumparan delta transformator Ddtz. Hal ini juga berarti, menunjukkan bahwa transformator Ddtz memiliki kemampuan menurunkan arus harmonisa. Magnitudo arus harmonisa yang bersirkulasi di kumparan delta dapat diturunkan dan kemudian dihambat agar tidak

Universitas Indonesia

mengalir balik ke sisi suplai. Dengan turunnya arus harmonisa maka arus rms di sisi beban akan lebih kecil. Hal ini menyebabkan penurunan pemanasan dan rugi daya reaktif. Hasilnya, efisiensi transformator dapat ditingkatkan.

5.2.2 Simulasi Model Pembebanan

Model Kondisi pembebanan transformator dapat dijelaskan seperti pada Gambar 5.7. Tiga kelompok beban nonlinier satu fasa disuplai melalui transformator Ddtz. Kemampuan peredaman harmonisa triplen transformator dapat diketahui dari sisi primer atau sisi sistem distribusi. Untuk mempelajari karakteristik transformator dibangun model sistem suplai daya, transformator Ddtz dan beban nonlinier satu fasa.



Gambar 5.7 Skema simulasi transformator Ddtz menyuplai beban nonlinier satu fasa.

Dalam penelitian ini model sistem daya adalah sumber tegangan tiga fasa sinusoidal 380 Volt dimana setiap fasa tergeser 120 derajat listrik. Impedansi dan tegangan harmonisa sistem daya diabaikan. Kapasitas daya transformator 1250 VA. Konfigurasi transformator terdiri dari kumparan delta di sisi primer dan enam bagian kumparan disilang simetris (ditransposisi) perfasa di sisi sekunder, tegangan primer 380 Volt dan tegangan sekunder 220 Volt, 50 Hz. Kapasitas nominal beban perfasa 450 VA. Model beban nonlinier satu fasa dilengkapi penyearah diode gelombang penuh dihubungkan ke terminal sekunder tiga fasa empat kawat. Beban nonlinier ini membangkitkan harmonisa arus (THD) lebih dari 70%.

Dalam penelitian ini model matematika rangkaian transformator Ddtz dibangun untuk menentukan kandungan arus harmonisa triplen dan spektrum frekuensi harmonisa. Dalam kondisi ini simulasi sistem dilakukan dari kondisi peralihan hingga mencapai kondisi mantap.

Metode Fourier diaplikasikan untuk analisis bentuk gelombang arus distorsi harmonisa dengan menguraikan bentuk gelombang arus dalam bentuk deret Fourier trigonometri, seperti persamaan (2.1) atau (2.2).

Selanjutnya, menghitung spektrum frekuensi arus dengan Deret Fourier, seperti persamaan (5.1), (5.2) dan (5.3).

$$a_h = 2 \times (I_{har-record-ke-n} \times \cos(2 \times \pi \times h \times t_{pd-step-ke-n} / T) \times t_{satu-step}) / T \quad (5.1)$$

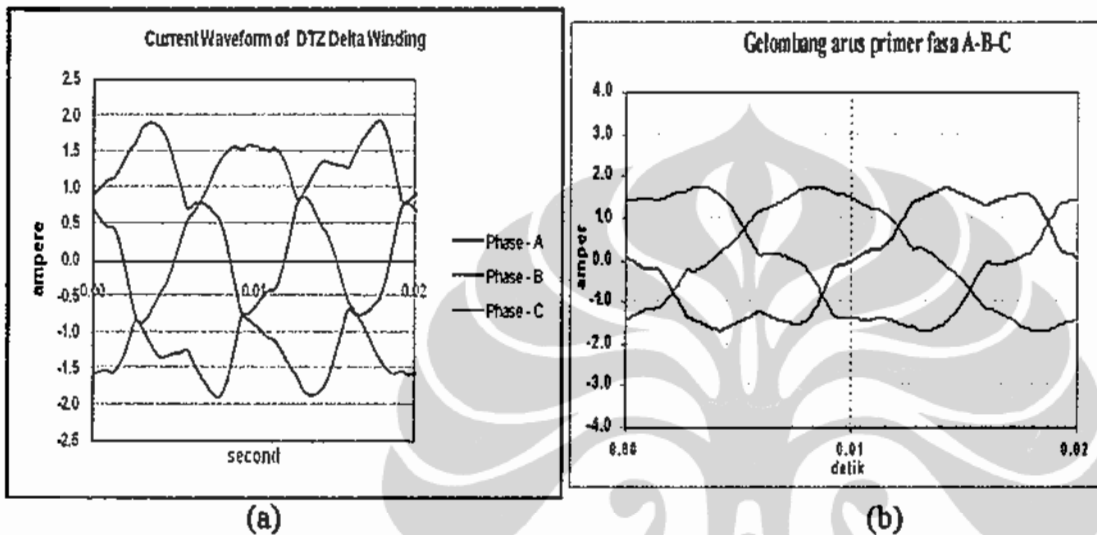
$$b_h = 2 \times (I_{har-record-ke-n} \times \sin(2 \times \pi \times h \times t_{pd-step-ke-n} / T) \times t_{satu-step}) / T \quad (5.2)$$

$$g_h = a_0 + \sum_{h=1}^{50} \left(\begin{array}{l} a_h \times \cos(2 \times \pi \times h \times t_{pd-step-ke-n} / T) \\ + \\ b_h \times \sin(2 \times \pi \times h \times t_{pd-step-ke-n} / T) \end{array} \right) \quad (5.3)$$

Universitas Indonesia

5.2.2.1 Kondisi Beban Seimbang

Pada pembebanan seimbang, sekunder transformator dibebani dengan impedansi beban sama besar yaitu 300 VA. Dengan simulasi komputer diketahui THD arus di sisi sekunder 74 % dan sisi primer 28 % sedangkan bentuk gelombang arus di sisi primer dan sekunder seperti pada Gambar 5.8 a dan b.



Gambar 5.8 Bentuk Gelombang arus distorsi harmonisa di kumparan primer (a) hasil pengujian, (b) hasil simulasi pada beban seimbang.

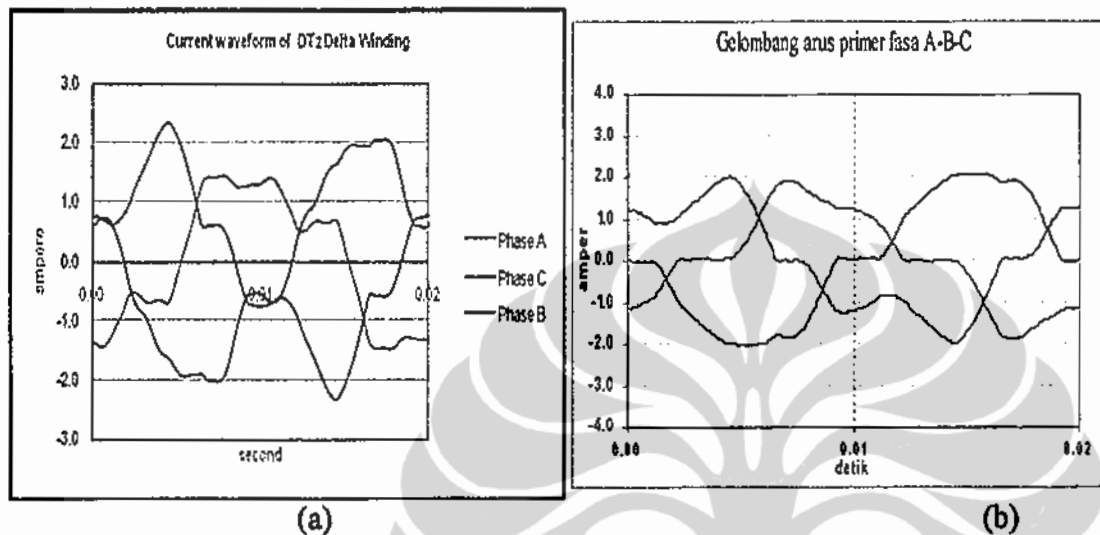
Arus harmonisa triplen di kumparan primer 1.7 A dengan tingkat THD 10%. Sedangkan, di belitan sekunder diketahui arus harmonisa total 2,4 A dengan tingkat THD 70%. Berarti komponen harmonisa triplen adalah bagian terbesar dari arus rms beban yaitu lebih dari 90%.

5.2.2.2 Kondisi Beban Tidak Seimbang

Pada pembebanan tidak seimbang, sekunder transformator dibebani dengan faktor keseimbangan sebesar 30 % maka masing-masing fasa-a, fasa-b, dan fasa-c dibebani 210VA, 390VA, dan 300VA.

Universitas Indonesia

Gambar 5.9(a) menunjukkan bentuk gelombang arus fasa a-b-c di kumparan sekunder sedangkan Gambar 5.9(b) menunjukkan bentuk gelombang arus fasa A-B-C di kumparan primer. Tingkat distorsi harmonisa, THD arus di sisi sekunder 75 % dan sisi primer 33%.



Gambar 5.9 Bentuk Gelombang arus distorsi harmonisa di kumparan primer (a) hasil pengujian, (b) hasil simulasi pada beban tidak seimbang.

Arus harmonisa triplen akibat beban tidak seimbang di kumparan sekunder adalah 2,04 A dengan THD arus triplen 70%. Berarti komponen harmonisa triplen adalah bagian terbesar dari arus rms beban yaitu lebih dari 90%. Sedangkan, arus harmonisa triplen primer adalah 1,49 A dan THD arus triplen 16%, komponen arus harmonisa triplen adalah lebih dari 90 % arus rms primer dan komponen harmonisa triplen adalah 53% dari THD arus.

5.3 Perbandingan Hasil Pengujian dan Simulasi

Perbandingan antara pengujian laboratorium dan simulasi komputer seperti pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Perbedaan diantara data pengujian dan hasil simulasi.

Parameter	Fasa	Pengujian Beban Seimbang		Simulasi Beban Seimbang	Pengujian Beban Tidak Seimbang		Simulasi Beban Tidak Seimbang
		Sekunder	Primer	Primer	Sekunder	Primer	Primer
THD Arus (%)	a/A	72.5	27.98	28	57.31	17.15	33
	b/B	71.8	22.29	28	75.16	30.27	33
	c/C	68.05	22.52	28	72.85	31.74	33

Dari Tabel 5.4 dapat ditunjukkan rekapitulasi hasil pemeriksaan perbandingan antara hasil simulasi dan data pengujian laboratorium dari transformator Ddtz secara benar dan tepat. Dari hasil analisis operasi pembebanan transformator pada kondisi seimbang dan tidak seimbang menunjukkan bahwa penggunaan konfigurasi kumparan Ddtz pada transformator distribusi tenaga adalah salah satu metode yang efektif dan efisien. Sistem distribusi mampu beroperasi dan menyesuaikan kinerjanya dengan beban nonlinier yang disuplainya. Ini karena sistem distribusi dapat mengurangi distorsi harmonisa beban nonlinier yang terdistribusi tidak seimbang dan sekaligus mengurangi dampak pada mutu daya listrik.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 KESIMPULAN

Setelah dilakukan pemodelan dan simulasi serta dilanjutkan dengan eksperimen maka hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Konfigurasi kumparan Dtz memiliki kemampuan menyeimbangkan induksi ggm (ampere.lilitan) arus fasa beban didalam kumparan transposisi zigzag sekunder pada kaki inti yang sama. Kemampuan menyeimbangkan dapat ditunjukkan dengan melihat selisih diantara rasio THD arus primer terhadap rasio THD arus fasa sekunder yang ada pada hasil eksperimen. Dari hasil eksperimen pada Tabel 5.3 dapat ditunjukkan bahwa rasio antara THD arus didalam setiap kumparan fasa delta primer terhadap THD arus rata-ratanya adalah 10% pada kondisi seimbang. Sedangkan rasio antara THD arus didalam setiap kumparan fasa delta primer terhadap THD arus rata-ratanya adalah 23.32% pada kondisi beban tidak seimbang. Besarnya prosentase diantara THD arus di kumparan fasa primer dengan THD arus rata-rata di sisi primer tersebut menunjukkan tingkat keseimbangan induksi fluks magnetik didalam kumparan transposisi zigzag sekunder. Semakin sedikit nilai prosentase tersebut menunjukkan keseimbangan induksi fluks magnetik yang lebih baik. Pada kondisi pembebanan seimbang, prosentase THD arus primer sebesar 10% terjadi karena prosentase THD arus fasa di sisi sekunder terhadap THD arus rata-ratanya di sekunder juga berbeda sekitar 7,14%. Sedangkan pada pembebanan tidak seimbang, prosentase THD arus primer sebesar 23% karena prosentase THD arus sekunder terhadap THD arus rata-ratanya di

sekunder juga berbeda sekitar 10,83% pada kondisi tingkat perbedaan pembebanan transformator sebesar 30%. Selain itu, perbedaan THD arus diantara kumparan fasa juga dapat terjadi karena nilai impedansi kumparan kumparan transformator yang dibuat secara teknik manual tidak sama besar. Keseimbangan induksi ggm dapat dilaksanakan jika selisih diantara prosentase THD arus primer terhadap prosentase THD arus fasa sekunder adalah semakin kecil.

2. Aliran induksi fluks harmonisa triplen dihambat dengan membuat polaritas konfigurasi kumparan transposisi zigzag di sisi sekunder saling berlawanan fasa (*phase cancel out*) akibatnya distorsi harmonisa beban ke sisi primer dapat diturunkan. Aliran induksi fluks harmonisa triplen yang menurun dapat ditunjukkan dari tingkat peredaman distorsi harmonisa dari sisi beban atau sisi sekunder ke sisi primer atau sisi sumber. Dari hasil eksperimen laboratorium menunjukkan bahwa THD arus rata-rata didalam kumparan sekunder pada kondisi pembebanan seimbang adalah 70,8% dan di sisi primer diturunkan menjadi 24,3%. Sedangkan pada kondisi beban tidak seimbang, THD arus rata-rata didalam kumparan sekunder adalah 68,44% dan di sisi primer adalah 26,4%.
3. Penyebaran aliran arus harmonisa triplen ke sisi sumber dapat dihambat dengan cara menyirkulasikan sisa induksi ggm arus harmonisa beban di sisi delta primer. Penghambatan aliran arus harmonisa triplen ke sisi sumber ditunjukkan dengan kemampuan transformator menurunkan THD arus beban. Dari hasil eksperimen pada Tabel 5.3 menunjukkan bahwa transformator Dtz memiliki kemampuan filter menurunkan THD arus sekitar 42 – 46% masing-masing untuk kondisi pembebanan seimbang dan tidak seimbang dengan cara menyirkulasikan didalam kumparan delta primer. Sisa aliran energi medan elektromagnetik

arus harmonisa yang mengalir ke sisi sumber adalah sekitar 24,3% dan 26,4% masing-masing untuk kondisi pembebanan seimbang dan tidak seimbang.

Dari hasil eksperimen yang didapat seperti telah disimpulkan diatas maka transformator dengan konfigurasi Dtz dapat diterapkan pada gardu-gardu distribusi, terutama di pusat-pusat beban nonlinier satu fasa yang banyak terdapat di kawasan industri dengan berbagai tingkat tegangan distribusi dan rating daya dari 100 kVA sampai dengan 1250 kVA.

6.2 SARAN

Dalam penelitian yang sudah dilakukan maka didapat beberapa hal yang masih harus dilakukan penelitian lebih lanjut, seperti :

- Kumparan delta primer mampu memaksa aliran sisa induksi ggm harmonisa triplen bersirkulasi didalam rangkaian transformator sehingga tidak mendistorsi tegangan dan arus di sisi sumber. Penelitian lebih lanjut mengkaji mekanisme untuk mengeliminasi sirkulasi arus harmonisa triplen didalam kumparan delta dengan cara pentanahan (grounding) delta yaitu menghubungkan salah satu kumparan delta ke tanah untuk mengalirkan sisa arus harmonisa triplen kedalam tanah.
- Dalam penelitian ini, eksperimen pembebanan transformator dilakukan pada kondisi mantap (steady state) dengan beban nonlinier satu fasa. Penelitian lebih lanjut, eksperimen pembebanan menggunakan beban nonlinier yang memiliki model karakteristik beban yang pulsasi atau melonjak-lonjak, contoh las listrik, tanur busur listrik dan traksi.

- Terakhir, untuk meningkatkan kemampuan pembebanan sistem distribusi akibat penambahan kapasitas beban maka diusulkan kerja paralel transformator. Penelitian lebih lanjut menerapkan kerja paralel antara dua atau lebih transformator konfigurasi kumparan Dtz secara antiparalel sekaligus untuk mengeliminasi harmonisa triplen dari sisi beban.



DAFTAR ACUAN

1. Ewald F. Fuch, Mohammad A.S. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Elsevier, 2008.
2. Asaad A. Elmouidi, *Evaluation Of Power System Harmonic Effects On Transformers Hot Spot Calculation and Loss of Life Estimation*, Doctoral Dissertation, Department of Electrical and Communications Engineering Power Systems and High Voltage Engineering, Helsinki University of Technology, Espoo 2006.
3. Grady, WM, Santoso, Surya, *Understanding Power System Harmonics*, September, 22, 2002.
4. Azhar Ahmad, Rosli Omar and Marizan Sulaiman, *Application of ZigZag Transformers to Mitigate Triplen Harmonics in 3 Phase 4 Wire Electrical Distribution System*, 4th Student Conference on Research and Development (SCOReD 2006), Shah Alam, Selangor, MALAYSIA, 27-28 June, 2006.
5. Jinn-Chang Wu, et al, *Power converter based method for suppressing Power capacitor harmonic current*, Published in IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 151, No. 3, May 2004.
6. J. Schonek, Cahier technique no. 202 *The singularities of the third Harmonic*, Schneider Electric, <http://www.schneider-electric.com>, ECT 202(e) first issued February 2001.
7. Leon M. Tolbert, Harold D. Hollis, Peyton S. Hale, Jr. *Evaluation Of Harmonic Suppression Devices*, IEEE IAS Annual Meeting, Oct. 6-10, 1996, San Diego, CA, pp. 2340-2346.

8. PLITRON Manufacturing Inc. #8-601 Magnetic Drive, *Narrow Bandwidth Technology, A Plitron White Paper*, www.plitron.com, Toronto Ontario M3J 3J2 Canada, May 8, 2002.
9. Cheng-Ping Huang, Chi-Jui Wu, Yung-Sung Chuang, Shih-Kai Peng, Jung-Liang Yen, and Ming-Hong Han, *Loading Characteristics Analysis of Specially connected Transformers Using Various Power Factor Definitions*, IEEE Transaction On Power Delivery, Vol.21. no. 3, July 2006.
10. Sy-Ruen Huang, Bing-Nan Chen, *Harmonic Study of Le Blanc Transformer for Taiwan Railway's Electrification System*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17 No.2 April 2002.
11. Bhim Singh, P. Jayaprakash, T. R. Somayajulu, and D. P. Kothari, *Reduced Rating VSC With a Zig-Zag Transformer for Current Compensation in a Three-Phase Four-Wire Distribution System*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 24, No. 1, January 2009.
12. Rudy Setiabudy et al, *Eksekutif Summary Penelitian Gardu Distribusi, Studi Energi Listrik Transformator Gardu Distribusi*,
13. Philip J.A. Ling, Cyril J. Eldridge, *Designing Modern Electrical Systems With Transformers That Inherently Reduce Harmonic Distortion In A Pc-Rich Environmen*", Powersmiths International Corp 416-439-1077...internet.
14. Technical Bulletin 1-11, *MGE Dual Zig-Zag Harmonic Reduction Transformers*
15. Deng Ming-li, et al, *The simulation analysis of harmonics and Negative sequence with Scott wiring transformer*, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.

16. David Chapman," *Harmonics Causes and Effects* Copper Development Association
March 2001...internet.
17. Tri Wahyudi, A. S. Habibie, Suhadi, Ismu Priyanto, Deddy. S, Siswadi, *Kajian perubahan karakteristik trip mcb tipe C & CL terhadap arus harmonisa*, PT PLN (PERSERO) PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN KETENAGALISTRIKAN, 02-12-2008
18. R.Fehr,P.E., Engineering Consultant, *Harmonics Made Simple*, Electrical Construction & Maintenance, http://ecmweb.com/email_article/, Jan 01, 2004 12:00 PM.
19. Steven L. Pay, Finnegan Erickson Associates, *The Case of Overheated Transformers and Neutral Conductors*, Electrical Construction & Maintenance, <http://ecmweb.com/topics/transformers/>, Sep 1, 2008 12:00 PM.
20. Robert E Fuhr, *Save energy and improve power quality, A case study – 75 kVA transformer*, 05/25/01.
21. W. Mack Grady, Robert J. Gilleskie, *Harmonics And How They Relate To Power Factor*, Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93), San Diego, CA, November 1993.
22. Robert Henderson, *HARMONICS OF COMPACT FLUORESCENT LAMPS IN THE HOME*, Domestic Use of Electrical Energy Conference 1999, Page 114-114.
23. Francisco de León, Brian Gladstone, Menno van der Veen, *Transformer Based Solutions to Power Quality Problems*, Presented by Henry Pajooman September/12/2001 at Powersystems World 2001 Conference.

24. Tongxin Zheng, Elham B. Makram, and Adly A. Girgis, *Evaluating Power System Unbalance in the Presence of Harmonic Distortion*, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 18, NO. 2, APRIL 2003.
25. IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Inc., New York, NY, April 1993.
26. ANSI/IEEE C57.12.00 IEEE Standard General Requirements for Liquid Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.
27. Larry Lawhead, Randy Hamilton, John Horak, *Three Phase Transformer Winding Configurations and Differential Relay Compensation*, Basler Electric Company Presented before the 60th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference May 2-5, 2006, info@basler.com.
28. Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, Chairul Hudaya, *Design of Delta Primary – Transposed zigzag Secondary (DTz) Transformer to Minimize Harmonic Currents on Three-phase Electric Power Distribution System*, accepted to be published in International Journal on Electrical Engineering and Informatics Volume 2 Number 4, December 2010, School of Electrical Engineering and Informatics, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.
29. Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, *Efektivitas Transformator Delta-Zigzag Sekunder Lilitan Ditransposisi Membatasi Harmonisa*, Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi, Vol. 9, No. 3, Juli – Desember 2009, Akreditasi LIPI No:72/Akred LIPI/P2MBI/5/2007 ISSN 1411-8289.
30. Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, Maula Sukmawidjaja, Dharmananda Lugito, *Pemodelan Matematik Transformator Fasa-3 Dalam Meminimasi Distorsi*

Harmonisa, Jurnal Elektronika Dan Telekomunikasi, Vol. 9, No. 1, Januari – Juni 2009, Akreditasi LIPI No:72/Akred LIPI/P2MBI/5/2007 ISSN 1411-8289.

31. Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, *Performance Analysis of Delta-zigzag (Dz) Connection Transformer With Secondary symmetrical Cross-winding Minimized Harmonics Based on the Rating of Volt-Ampere Output Power*, Proceeding of the 11th International Conference on QiR (Quality in Research) Faculty of Engineering, University of Indonesia, Depok, Indonesia, 3-6 August 2009 ISSN 114-1284.
32. Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, Dharmananda Lugito, Maula Sukmawidjaja, Surya Hardi, *Performance Analysis of Delta-Zigzag Connection Transformer with Secondary Symmetrical Cross Winding Minimized Harmonics Based On Power Factor Value*, Presiding International Conference 7-5 December 2009 Electrical Energy & Industrial Electronic System, Unimap School Of Electrical System Engineering, Malaysia.
33. Chairul Gagarin Irianto, Rudy Setiabudy, Dharmananda Lugito, Maula Sukmawidjaja, Liem Ek Bien, *Membatasi Pengaruh Distorsi Harmonisa Tegangan Dan Arus Pada Sistem Distribusi Daya Listrik*, Prosiding Seminar Nasional Penelitian Teknologi Industri 2009, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti, Jakarta Indonesia ISBN: 978-979-18625-1-8.
34. Chairul Gagarin Irianto, Maula Sukmawidjaja, Aditya Wisnu, *Mengurangi Harmonisa pada Transformator Tiga Fasa*, JETri Jurnal Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri – Universitas Trisakti, Volume 7, No. 2, Jakarta Februari 2008, ISSN 1412-0372.
35. TS Hutauruk, *Analisa Sistem Tenaga Listrik*, Erlangga.

36. M.Kostenko, L. Piotrovsky, *Electrical Machines Vol. I Direct Current Machines And Transformer*, MIR Publishers, Moscow 1968.
37. VK Mehta, Rohit Mehta, *Principles of Power System*, S. Chand & Company Ltd, New Delhi, 2008.
38. C.F. Wagner, R.D. Evans, *Symmetrical Components*, Mc Graw Hill, 1933.
39. NN Hancock, *Electric Power Utilization*, Wheeler Publishing, 1979.
40. Cadence Design Systems, Inc, *PSpice® User's Guideincludes PSpice A/D, PSpice A/D Basics, and PSpiceProduct Version 15.7July 2006*.
41. Syafrudin, Pekik A. Dahono, Sukisno, T.M Soelaiman, *Analisis Penggunaan Autotrafo Penggeser Fasa Sebagai Minimisator Harmonisa Arus di Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Laboratorium Penelitian Konversi Energi Elektrik, Institut Teknologi Bandung Jln. Ganesa No 10. Bandung, 40132.

LAMPIRAN 1 TABEL STANDARD

Tabel L1.1 IEEE-519 Batas Arus Harmonisa Maksimum untuk Sistem Distribusi, 120 V sampai dengan 69 Kv.

Ratio I_{scc}/I_{load}	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	THD
<20	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%	5.0%
20-50	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%	8.0%
50-100	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%	12.0%
100-1000	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%	15.0%
>1000	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%	20.0%

Tabel L1.2 IEEE-519 Batas Distorsi Tegangan.

Tegangan Bus	Harmomisa Individual	THD
$\leq 69\text{kV}$	3.0%	5.0%
69.001kV–161kV	1.5%	2.5%
$> 161\text{kV}$	1.0%	1.5%

LAMPIRAN 2 HASIL SIMULASI PEMBEBANAN TRANSFORMATOR

L2. Tabel-tabel Spektrum Frekwensi Arus-arus Transformator Distribusi

1. Spektrum Frekwensi Arus-arus Transformator Vee/vee

Tabel L2.1. Hasil Pengukuran Simulasi Kandungan Distorsi Harmonisa Arus

Harmonisa	Arus Primer (p,u)			Arus Sekunder (p,u)		
	I _a	I _b	I _c	I _T	I _M	I _N
1	2,5	4,0	2,5	2,4	2,45	2,45
3	0,8	0,6	1,0	0,9	1,05	1,05
5	0,5	1,0	0,6	0,55	0,55	0,55
7	0,4	0,7	0,4	0,4	0,2	0,4
9	0,3	0,2	0,3	0,3	-	0,3
11	0,2	0,45	0,2	0,25	0,25	0,25
13	0,2	0,3	0,2	0,15	-	0,2
15	0,2	-	0,2	0,15	0,2	0,2
17	-	0,3	-	0,15	0,3	0,15
19	-	0,2	-			
21	-	0,2	-			
Irms	2,74	4,28	2,82			
(Irms) ²	7,51	18,35	7,98			
THD(Irms)(%)	44,9	38,34	52,61			

2. Spektrum Frekwensi Arus-arus Transformator T-Scott

Tabel L2.2. Hasil Pengukuran Simulasi Kandungan Distorsi Harmonisa Arus

Harmonisa	Arus Primer (p,u)			Arus Sekunder (p,u)		
	I _a	I _b	I _c	I _T	I _M	I _N
1	3,1	2,8	2,9	2,65	2,45	2,45
3	0,85	1,0	1,2	0,75	1,0	1,0
5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,5
7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4
9	0,3	0,3	0,3	0,25	-	0,3
11	0,2	0,3	0,3	0,2	0,25	0,35
13	0,2	0,2	0,2	0,2		0,2
15	0,2	0,2	0,2	0,15	0,2	0,2
17	0,2	0,2	0,2	0,1	-	0,1
19	0,1	0,1	0,1	0,1	-	0,1
21	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1
Irms	3,31	3,11	3,27			
(Irms) ²	10,94	9,68	10,69			
THD(Irms)(%)	37,24	48,44	52,07			

L2-1

Universitas Indonesia

3. Spektrum Frekwensi Arus-arus Transformator Le Blanc

Tabel L2,3. Hasil Pengukuran Simulasi Kandungan Distorsi Harmonisa Arus

Harmonisa	Arus Primer (p,u)			Arus Sekunder (p,u)		
	I _a	I _b	I _c	I _T	I _M	I _N
1	3,2	3,0	3,0	2,7	2,45	2,45
3	0,8	1,0	1,2	0,7	1,0	1,0
5	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,5
7	0,3	0,45	0,45	0,3	0,4	0,4
9	0,3	0,3	0,3	0,25	0,3	0,3
11	0,2	0,3	0,3	0,2	0,25	0,25
13	0,2	0,2	0,3	0,15	0,2	0,2
15	0,2	0,2	0,2	0,15	0,15	0,15
17	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
19	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
21	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Irms	3,4	3,3	3,37			
(Irms) ²	11,49	10,88	11,37			
THD(Irms)(%)	34,94	45,73	51,34			

4. Spektrum Frekwensi Arus Transformator Dtz

Tabel L2,4. Hasil Pengukuran Simulasi Kandungan Distorsi Harmonisa Arus

Harmonisa	Arus Primer (p,u)			Arus Sekunder (p,u)		
	I _a	I _b	I _c	I _T	I _M	I _N
1	2,5	1,9	2,4	1,4	1,37	1,37
3	0,55	0,3	0,25	0,6	0,55	0,9
5	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,3
7	0,25	0,1	0,3	0,25	0,25	0,25
9	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3
11	0,1	-	0,18	0,15	0,13	0,1
13	0,1	-	0,1	0,12	0,12	0,12
15	0,1	-	0,1	0,1	0,1	0,16
17	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	0,1
Irms	2,60	1,94	2,48			
(Irms) ²	6,77	3,76	6,13			
THD(Irms)(%)	28,98	20,38	25,51			

5. Spektrum Frekwensi Arus Transformator Ddtz

Tabel L2.5. Hasil Pengukuran Simulasi Kandungan Distorsi Harmonisa Arus

Harmonisa	Arus Primer (p.u)			Arus Sekunder (p.u)		
	I_a	I_b	I_c	I_T	I_M	I_N
1	1,0	1,9	1,55	1,38	1,38	1,3
3	0,3	0,1	0,4	0,47	0,55	0,9
5	0,18	0,28	0,2	0,3	0,3	0,3
7	0,1	0,18	0,15	0,2	0,2	0,2
9	-	-	-	0,14	0,13	0,25
11	-	0,1	-	0,11	0,1	0,1
13	-	0,1	-	0,1	0,1	-
15	-	-	-	-	-	0,11
17	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	0,1
Irms	1,06	1,94	1,62			
(Irms) ²	1,13	3,75	2,62			
THD(Irms)(%)	36,39	19,75	30,43			

Catatan:

$I_{a,b,c}$ = arus-arus fasa sisi primer atau sumber fasa-tiga

$I_{T,M}$ = arus-arus fasa sisi sekunder atau beban satu fasa

I_N = arus penghantar netral sisi sekunder transformator atau beban satu fasa.