

SKRIPSI

**SIMULASI PENGARUH BEBAN LINEAR DAN NONLINEAR TERHADAP
ARUS NETRAL DI SISTEM TIGA FASE SIMETRIS DENGAN
MENGUNAKAN PERANGKAT-LUNAK *PSCAD/EMTDC***



MIRNAWATI DEWI SUTIAWATI

10582 00870 11

A. NUR ISHNAENI CHOSHARI PASELOI

10582 00928 11

**PROGRAM STUDI TEKNIK LISTRIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR
2016**

**SIMULASI PENGARUH BEBAN LINEAR DAN NONLINEAR TERHADAP
ARUS NETRAL DI SISTEM TIGA FASE SIMETRIS DENGAN
MENGUNAKAN PERANGKAT-LUNAK PSCAD/EMTDC**

Skripsi

Diajukan sebagai salah satu syarat

Untuk memperoleh gelar Sarjana

Program Studi Teknik Listrik

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik

Disusun dan diajukan oleh

MIRNAWATI DEWI SUTIAWATI

A. NUR ISHNAENI CHOSHARI P.

10582 00870 11

10582 00928 11

PADA

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

2016



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

FAKULTAS TEKNIK

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan untuk memenuhi syarat ujian guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **SIMULASI PENGARUH BEBAN LINEAR DAN NON LINEAR TERHADAP ARUS NETRAL DI SISTEM TIGA FASE SIMETRIS DENGAN MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK PSCAD/EMTDC**

Nama : 1. Mirnawati Dewi Sutiawati
2. A. Nur Ishnaeni Choshari Pseloi

Stambuk : 1. 105 82 00870 11
2. 105 82 00928 11

Makassar, 14 Maret 2015

Telah Diperiksa dan Disetujui
Oleh Dosen Pembimbing;

Pembimbing I

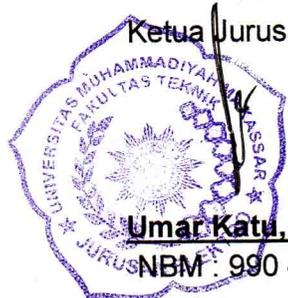
Pembimbing II


Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc.
NIP. 19640427 1989101 002


A. Faharuddin, S.T., M.T.
NIP. 132 169 984

Mengetahui,

Ketua Jurusan Elektro



Umar Katu, S.T., M.T.
NBM : 990 410



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

FAKULTAS TEKNIK

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

PENGESAHAN

Skripsi atas nama Mirnawati Dewi Sutiawati dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 00870 11 dan A. Nur Ishnaeni Choshari Pseloi dengan nomor induk Mahasiswa 105 82 00928 11, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 196/05/A.4-II/III/37/2016, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Rabu tanggal 2 Maret 2016.

Makassar, 5 Jumaidil Akhir 1437 H
14 Maret 2016 M

Panitia Ujian :

1. Pengawas Umum

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Dr. H. Irwan Akib, M.Pd.

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. -Ing. Ir. Wahyu H. Pirah, MSME.

2. Penguji

a. Ketua : Rizal Andiyat Duyo, S.T., M.T.

b. Sekertaris : Anugrah, S.T., M.M.

3. Anggota : 1. Dr. Eng. Ir. H. Zulfajri Basri H., M.Eng

2. Ir. Abd. Hafid, M.T.

3. Suriyani, S.T., M.T.

Mengetahui :

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc
NIP. 19640427 1989101 002


A. Faharuddin, S.T., M.T
NIP. 132 169 984

Ketua Program Studi
Teknik Elektro



Umar Katu, S.T., M.T.
NBM: 990 410

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat ALLAH SWT, karena rahmat dan hidayah-Nyalah sehingga penulis dapat menyusun skripsi ini, dan dapat kami selesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan Akademik yang harus ditempuh dalam rangkah menyelesaikan Program Studi pada Jurusan Teknik elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Adapun judul tugas akhir kami adalah : "SIMULASI PENGERTUH BEBAN LINEAR DAN NONLINEAR TERHADAP ARUS NETRAL DISISTEM TIGA FASE SIMETRIS DENGAN MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK *PSCAD/EMTDC*"

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa di dalam penulisan skripsi ini masih terdapat kekurangan-kekurangan, hal ini disebabkan penulis sebagai manusia biasa tidak lepas dari kesalahan dan kekurangan baik itu ditinjau dari segi teknis penulisan maupun dari perhitungan-perhitungan. Oleh karena itu penulis menerima dengan ikhlas dan senang hati segala koreksi serta perbaikan guna penyempurnaan tulisan ini agar kelak dapat bermanfaat.

Skripsi ini dapat terwujud berkat adanya bantuan, arahan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segala ketulusan hati, kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Bapak Hamzah Al Imran, S.T., M.T. Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar

2. Bapak Umar Katu, S.T., M.T. Ketuan Jurusan Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Makassar
3. Bapak Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc Selaku Pembimbing I dan Bapak Andi Faharuddin, S.T., M.T. Selaku Pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktu dalam membimbing kami.
4. Bapak dan ibu dosen serta staf pegawai pada Fakultas Teknik atas segala waktunya telah mendidik dan melayani penulis selama mengikuti proses belajar mengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
5. Ayahanda dan Ibunda yang tercinta, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas segala limpahan kasih sayang, dukungan, doa dan pengorbanannya terutama dalam bentuk materi dalam menyelesaikan kuliah.
6. Saudara-saudaraku serta rekan-rekan mahasiswa Fakultas Teknik terkhusus untuk Angkatan 2011 yang dengan keakraban dan persaudaraannya banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga semua pihak tersebut diatas mendapatkan pahala yang berlipat ganda di sisi Allah SWT dan skripsi yang sederhana ini dapat bermanfaat bagi penulis, rekan-rekan masyarakat serta bangsa dan Negara. Amin.

Makassar, 2016

Penulis

ABSTRAK

“Simulasi Pengaruh Beban Linear dan Nonlinear Terhadap Arus Netral Disistem Tiga Fase Simetris Dengan Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*” (2011). Dibimbing oleh Zahir Zainuddin dan Andi Faharuddin. Arus netral terjadi karena kondisi beban yang tak seimbang sehingga memunculkan arus harmonik atau distorsi tegangan yang di timbulkan dari pemakaian beban nonlinear. Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu : 1) Untuk menentukan pengaruh beban linear tiga fase simetris (Resistor, Induktor dan Kapasitor), terhadap arus netral. 2) Untuk mengetahui spektrum harmonik arus pada beban linear. 3) Untuk menentukan pengaruh beban nonlinear tiga fase simetris (dioda dan *thyristor*) terhadap arus netral. 4) Untuk mengetahui spektrum harmonik arus pada beban nonlinear. Hasil simulasi yang dilakukan pada beban linear pada prinsipnya menghasilkan arus netral, akan tetapi nilai arus netral yang dikeluarkan sangat kecil atau bisa dikatakan sama dengan nol, sehingga tidak mempengaruhi kualitas daya. Spektrum harmonik pada beban linear memiliki keluaran hasil yang *simetris*, sedangkan arus netral untuk beban nonlinear menghasilkan nilai arus netral yang tinggi melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992, dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah 20%, sehingga beban nonlinear mempengaruhi kualitas daya yang buruk. Spektrum harmonik untuk beban nonlinear memiliki keluaran yang *nonsimetris*.

Kata Kunci : *Beban Liner, Beban Nonlinear, Distorsi, Harmonik, Kualitas Daya, Simetris, Nonsimetris, PSCAD/EMTDC.*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERBAIKAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	2
C. Tujuan Penelitian.....	3
D. Manfaat Penelitian.....	3
E. Batasan Masalah.....	3
F. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
A. Sistem Tiga Fase Simetris dan Nonsimetris	5
A.1 Sistem Tiga Fase Simetris	5
A.1.1 Rangkaian Listrik Tiga Fase.....	6
A.2.2 Transformator Tiga Fase	8

A.2.1.1 Pengertian Transformator Tiga Fase	8
A.2.1.2 Sambungan Transformator Tiga-Fase.....	9
A.2 Sistem Tiga Fase Nonsimetris	10
B. Arus Netral	11
B.1 Pengertian Arus Netral	11
B.2 Pengaruh Beban Linear dan Nonlinear Terhadap Arus Netral.	12
C. Beban Linear dan Beban Nonlinear	13
C.1 Beban Linear.....	13
C.1.1 Pengertian Beban Linear	13
C.1.2 Rangkaian RLC	17
a. Beban Resistif	17
b. Beban Induktif.....	18
c. Beban Kapasitif.....	20
C.2 Beban Nonlinear	21
C.2.1 Pengertian Beban Nonlinear	21
C.2.1 Dioda.....	26
a. Karakteristik Utama Dioda	26
b. Dioda Penyearah Tifa Fase.....	28
c. <i>DIAC</i> (Dioda Ac).....	29
C.2.2 <i>Thyristor</i>	30
D. Harmonisa	32
D.1 Pengetian Harmonisa.....	32

D.2 Penyebab Harmonisa	36
D.3 Pengaruh Negatif dari Harmonisa	36
D.4 Standar Harmonisa	38
D.5 Urutan Harmonisa	41
D.6 Sumber-Sumber Harmonisa	43
E. <i>PSCAD / EMTDC</i>	44
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	48
A. Umum	48
B. Tempat dan Waktu.....	48
C. Alat dan Bahan.....	48
D. Skema Penelitian.....	49
E. Prosedur Percobaan	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	53
A. Model Sistem Daya Tanpa Beban	53
B. Simulasi Sistem Tiga Fase Dengan Komponen Linear	56
B.1 Sistem Tiga Fase Dengan Beban Resistif	56
B.1.1 Penghantar Fase A	57
B.1.2 Penghantar Arus Netral	58
B.2 Sistem Tiga Fase Dengan Beban Induktif	61
B.2.1 Penghantar Fase A	61
B.2.2 Penhantar Arus Netral	63
B.3 Sistem Tiga Fase Dengan Beban Kapasitif	66

B.3.1 Penghantar Fase A	66
B.3.2 Penghantar Arus Netral	69
C. Simulasi Sistem Tiga Fase Dengan Komponen Nonlinear	71
C.1 Sistem Tiga Fase Dengan Komponen Dioda	71
C.1.1 Penghantar Fase A	71
C.1.2 Penghantar Arus Netral	74
C.2 Sistem Tiga Fase Dengan Komponen Thyristor	78
C.2.1 Thyristor Sebagai Rektifier	79
C.2.1.1 Sudut Picu 30°	79
C.2.1.2 Sudut Picu 50°	84
C.2.1.3 Sudut Picu 70°	89
C.2.2 Thyristor Sebagai Inverter	98
C.2.2.1 Sudut Picu 110°	98
C.2.2.2 Sudut Picu 130°	103
C.2.2.3 Sudut Picu 150°	109
BAB V PENUTUP	120
A. Kesimpulan	120
B. Saran	121
DAFTAR PUSTAKA	122
LAMPIRAN	124
LAMPIRAN A	126
LAMPIRAN B	130

RIWAYAT PENULIS



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Vektor Diagram Arus Seimbang.....	5
Gambar 2.2	Gelombang Tiga-Fase.....	6
Gambar 2.3	Diagram Fasor Tegangan.....	6
Gambar 2.4	Rangkaian hubungan bintang-bintang (Y-Y).....	8
Gambar 2.5	Transformator tiga fase.....	9
Gambar 2.6	Vaktor diagram Arus Tak Seimbang.....	11
Gambar. 2.7	Terjadinya Arus Netral.....	12
Gambar 2.8	Bentuk gelombang arus dan tegangan pada beban Linear.....	13
Gambar 2.9	Diagram fasor beban linear.....	14
Gambar 2.10	Permodelan Beban Linear.....	15
Gambar 2.11	Penggunaan beban linear pada sistem tiga fase.....	15
Gambar 2.12	Gambar gelombang tegangan dan arus input akibat pemakaian beban linear.....	16
Gambar 2.13	Rangkaian RLC dengan sumber tegangan AC.....	17
Gambar 2.14	Gelombang Beban Resistif.....	18
Gambar 2.15	Diagram fasor arus dan Tegangan Pada Beban Resistif.....	18
Gambar 2.16	Gelombang Beban Induktif.....	19
Gambar 2.17	Diagram fasor Arus dan Tegangan Pada Beban Induktif.....	19
Gambar 2.18	Gelombang Beban Kapasitif.....	20
Gambar 2.19	Diagram fasor Arus dan Tegangan Pada Beban Kapasitif.....	21
Gambar 2.20	Bentuk Gelombang arus dan tegangan pada beban nonlinear.....	22
Gambar 2.21	Diagram fasor Beban Nonlinear.....	22
Gambar 2.22	Pemodelan beban nonlinear.....	23

Gambar 2.23	Penggunaan Beban Nonlinear.....	25
Gambar 2.24	Gelombang Tegangan dan Arus Input Akibat Pemakaian Beban Nonlinear.....	26
Gambar 2.25	Menunjukkan Ekivalen dan Simbol DIAC.....	30
Gambar 2.26	Gelombang Hasil Distorsi Harmonik.....	33
Gambar 2.27	Gelombang Sinus Murni.....	33
Gambar 2.28	Gelombang Sinus Terdistorsi.....	33
Gambar 2.29	Gelombang Harmonik.....	34
Gambar 2.30	Total Harmonik Distorsi (THD).....	39
Gambar 2.31	Tegangan Fundamental Pada Harmonisa ke-3.....	43
Gambar 2.32	Gelombang Tegangan Fundamental, Harmonik ke-3 dan Hasil Penjumlahan.....	43
Gambar 2.33	Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	45
Gambar 2.34	Lembar Kerja Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	46
Gambar 2.35	Beberapa model komponen dalam <i>PSCAD/EMTDC</i>	47
Gambar 3.1	Diagram balok skema penelitian.....	50
Gambar 4.1	Model Sistem Daya Tanpa Beban Menggunakan Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTD</i>	53
Gambar 4.2	Grafik Tegangan Fase-A, -B dan -C Pada Sistem Daya Tanpa Beban.....	54
Gambar 4.3	Grafik Nilai RMS Pada Tegangan Fase Di Sistem Daya Tanpa Beban.....	55
Gambar 4.4	Model Simulasi Beban Resistif Menggunakan Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTD</i>	56
Gambar 4.5	Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Beban Resistif Terhubung Y Pada Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTD</i>	57

Gambar 4.6	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Beban Resistif.....	58
Gambar 4.7	Arus Netral Pada Beban Resistif.....	59
Gambar 4.8	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Beban Resistif.....	60
Gambar 4.9	Model Simulasi Beban Induktif Menggunakan Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	61
Gambar 4.10	Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Beban Induktif yang Terhubung Y Pada Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	62
Gambar 4.11	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Beban Induktif	63
Gambar 4.12	Arus Netral Pada Beban Induktif.....	64
Gambar 4.13	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Beban Induktif.....	65
Gambar 4.14	Model Simulasi Beban Kapasitif Menggunakan Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTD</i>	66
Gambar 4.15	Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Pada Beban Kapasitif yang Terhubung Y pada Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	67
Gambar 4.16	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Beban Kapasitif.....	68
Gambar 4.17	Arus Netral Pada Beban Kapasitif.....	69
Gambar 4.18	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Beban Kapasitif.....	70
Gambar 4.19	Model Simulasi Dioda Menggunakan Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	71

Gambar 4.20	Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Pada Komponen Dioda yang Terhubung Y pada Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	72
Gambar 4.21	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen Dioda.....	73
Gambar 4.22	Arus Netral Pada komponen Dioda.....	74
Gambar 4.23	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen Dioda.....	75
Gambar 4.24	Model Simulasi Komponen <i>Thyristor</i> Menggunakan Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTD</i>	78
Gambar 4.25	Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Untuk Komponen <i>Thyristor</i> dalam Modus <i>Rectifier</i> Sudut 30° Pada Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	79
Gambar 4.26	Grafik THD dan Spektrum harmonik Arus pada komponen <i>Thyristor</i> Sudut 30°	80
Gambar 4.27	Grafik Arus Netral sudut 30°	82
Gambar 4.28	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Sudut 30°	83
Gambar 4.29	Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Pada Komponen <i>Thyristor</i> dalam Modus <i>Rectifier</i> Sudut 50° pada Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	85
Gambar 4.30	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Sudut 50°	86
Gambar 4.31	Gelombang Arus Netral sudut 50°	87
Gambar 4.32	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Sudut 50°	88

Gambar 4.33	Grafik Arus dan Tegangan Hasil Simulasi Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Sudut 70° Pada Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	90
Gambar 4.34	Grafik THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Sudut 70°	91
Gambar 4.35	Grafik Arus Netral sudut 70°.....	92
Gambar 4.36	Grafik THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Sudut 70°	93
Gambar 4.37	Grafik Nilai THD Arus Fase Dan Arus Netral Pada Sudut Picu 30°, 50° dan 70 ° Untuk Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i>	97
Gambar 4.38	Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Inverter</i> sudut 110° pada perangkat lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	98
Gambar 4.39	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Inverter</i> Sudut 110°.....	99
Gambar 4.40	Grafik Arus Netral sudut 110°.....	101
Gambar 4.41	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Inverter</i> Sudut	102
Gambar 4.42	Grafik Arus dan Tegangan Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Inverter</i> Sudut 130° Pada Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	104
Gambar 4.43	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Inverter</i> sudut 130°	105
Gambar 4.44	Grafik Arus Netral sudut 130°.....	107

Gambar 4.45	Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Inverter</i> sudut 130°	108
Gambar 4.46	Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Inverter</i> sudut 150° Pada Perangkat Lunak <i>PSCAD/EMTDC</i>	110
Gambar 4.47	Grafik THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Inverter</i> Sudut 150° ...	111
Gambar 4.48	Grafik Arus Netral sudut 150°	113
Gambar 4.49	Grafik THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Inverter</i> sudut 150°	114
Gambar 4.50	Grafik nilai THD arus fase dan arus netral pada sudut picu 110° , 130° dan 150° di thyristor <i>inverter</i>	119



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik Dari Beberapa Tipe Dioda	27
Tabel 2.2	Karakteristik dari beberapa tipe thyristor	31
Tabel 2.3	Polaritas dari Komponen Harmonik.....	37
Tabel 2.4	Akibat dari Polaritas Komponen Harmonisa.....	37
Tabel 2.5	Standar Harmonisa Arus	40
Tabel 2.6	Standar Harmonisa Tegangan	41
Tabel 2.7	Orde Harmonisa dan Urutan Fase	42
Tabel 4.1	Keluaran Tegangan Pada Sistem Daya Tanpa Beban	55
Tabel 4.2	Spektrum Harmonik Arus Fase A Pada Komponen Dioda.....	74
Tabel 4.3	Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen Dioda.....	76
Tabel 4.4	Luaran Spektrum Harmonik Pada Arus Fase-A <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Pada Sudut 30°	81
Tabel 4.5	Luaran Spektrum Harmonik Arus Netral Pada <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Pada Sudut 30°	84
Tabel 4.6	Luaran Spektrum Harmonik Pada Arus Fase-A <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Pada Sudut 50°	87
Tabel 4.7	Luaran Spektrum Harmonik Pada arus Fase-A <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Pada Sudut 50°	89
Tabel 4.8	Luaran Spektrum Harmonik Pada arus Fase-A <i>Thyristor</i> Dalam Modus <i>Rectifier</i> Pada Sudut 70°	92
Tabel 4.9	Luaran Spektrum Harmonik Pada Arus Netral <i>Thyristor</i>	

	Dalam Modus <i>Rectifier</i> Pada Sudut 30°	94
Tabel 4.10	Simulasi <i>PSCAD/EMTDC</i> Pada Komponen <i>Thyristor</i>	
	Dalam Modus <i>Inverter</i> Pada sudut 30°, 50°, dan 70°	95
Tabel 4.11	Perhitungan Manual Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus	
	<i>Rectifier</i> Pada sudut 30°, 50°, dan 70°	97
Tabel 4.12	Luaran Spektrum Harmonik Pada Arus Fase-A <i>Thyristor</i>	
	Dalam Modus <i>Inverter</i> Pada Sudut 110°	100
Tabel 4.13	Luaran Spektrum Harmonik Pada Arus Netral <i>Thyristor</i>	
	Dalam Modus <i>Inverter</i> Pada Sudut 110°	103
Tabel 4.14	Luaran Spektrum Harmonik Pada Arus Fase-A <i>Thyristor</i>	
	Dalam Modus <i>Inverter</i> Pada Sudut 130°	106
Tabel 4.15	Luaran Spektrum Harmonik Pada Arus Netral <i>Thyristor</i>	
	Dalam Modus <i>Inverter</i> Pada Sudut 130°	109
Tabel 4.16	Luaran Spektrum Harmonik Pada Arus Fase-A <i>Thyristor</i>	
	Dalam Modus <i>Inverter</i> Pada Sudut 150°	112
Tabel 4.17	Luaran Spektrum Harmonik Pada Arus Netral <i>Thyristor</i>	
	Dalam Modus <i>Inverter</i> Pada Sudut 150°	115
Tabel 4.18	Simulasi <i>PSCAD/EMTDC</i> Pada Komponen <i>Thyristor</i>	
	Dalam Modus <i>Inverter</i> Pada sudut 110°, 130°, dan 150°	116
Tabel 4.19	Perhitungan Manual Pada Komponen <i>Thyristor</i> Dalam Modus	
	<i>Inverter</i> Pada sudut 110°, 130°, dan 150°	118

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Peningkatan kandungan arus harmonik di jaringan distribusi sebagian besar merupakan akibat dari penggunaan luas beban nonlinear (Rodríguez dkk, 2009). Beban nonlinear ini umumnya adalah peralatan elektronika yang di dalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor, yang dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan (Sugiarto, 2012). Peralatan nonlinear ini dapat memengaruhi kualitas daya di suatu industri, karena beban nonlinear ini merupakan sumber utama dari gangguan harmonik. Arus harmonik dapat dibangkitkan oleh pemakaian peralatan elektronik, misalnya: konverter, inverter, dan beban nonlinier lainnya (Tanoto dkk, 2005).

Arus harmonik menimbulkan distorsi tegangan, peningkatan kerugian dan penuaan dini peralatan listrik (Rodríguez dkk, 2009). Pada sistem jaringan tiga fase empat kawat, jumlah vektor dari tiga arus fase merupakan arus netral yang dalam keadaan seimbang, menghasilkan penjumlahan arus linear tiga fase yang terdiri dari gelombang sinus yang tergeser 120° akan bernilai nol, dengan demikian tidak ada arus pada penghantar netral (Gruzs, 1990). Penghantar netral menurut dasar penentuan ukuran dapat dilihat pada IEC 60364-5-524 ayat 524.2, menjelaskan bahwa penghantar netral sekurang-kurangnya harus memiliki ukuran yang sama dengan penghantar fasenya (Desmet, 2003).

Arus harmonik ini dapat dengan mudah di ukur dengan menggunakan program komputer yaitu *PSCAD / EMTDC (Power System Computer Aided Design / Electro Magnetic Transient DC)*. *PSCAD / EMTDC* merupakan suatu program interaktif untuk menganalisis suatu besaran sistem daya listrik, misalnya masalah pembagi tegangan, penyearah setengah gelombang, penyearah gelombang penuh, *converter* (penaik tegangan, penurun tegangan dan penaik/penurun tegangan). Perangkat ini juga digunakan di beberapa negara-negara maju di seluruh dunia, kurang lebih 80 negara sudah menggunakan program tersebut. Sehingga ini dapat membantu kita dalam penyelesaian perbandingan mengenai beban linear dan beban nonlinear.

Atas dasar permasalahan di atas maka akan sangat perlu diadakan penelitian “**Simulasi Pengaruh Beban Linear dan Nonlinear Terhadap Arus Netral di Sistem Tiga Fase Simetris dengan Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD / EMTDC*”**”.

B. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang dapat penulis sebutkan yaitu :

1. Bagaimana pengaruh beban linear tiga fase simetris (Resistor, Induktor dan Kapasitor) terhadap arus netral ?
2. Bagaimana spektrum harmonik arus pada beban linear ?
3. Bagaimana pengaruh beban nonlinear tiga fase simetris (diode dan *thyristor*) terhadap arus netral ?
4. Bagaimana spektrum harmonisa arus pada beban nonlinear ?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penulisan ini yaitu :

1. Untuk menentukan pengaruh beban linear tiga fase simetris (Resistor, Induktor dan Kapasitor), terhadap arus netral ?
2. Untuk mengetahui spektrum harmonik arus pada beban linear ?
3. Untuk menentukan pengaruh beban nonlinear tiga fase simetris (dioda dan *thyristor*) terhadap arus netral ?
4. Untuk mengetahui spektrum harmonisa arus pada beban nonlinear ?

D. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yaitu ;

1. Menambah pengetahuan penulis mengenai fenomena arus netral disistem tiga fasa pada beban linear dan nonlinear.
2. Menambah pengetahuan tentang perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*
3. Memberikan masukan atau informasi pada pihak terkait seperti PLN mengenai fenomena arus netral disistem tiga fasa pada beban linear dan nonlinear.

E. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penulisan ini yaitu :

1. Jenis program yang digunakan yaitu “*Power System Computer Aided Design / Electro Magnetic Transient DC*” (*PSCAD/EMTDC*) versi 4.2.1
2. Jenis komponen nonlinear hanya dioda dan *Thyristor*.
3. Sudut picu *thyristor rectifier* yaitu 30°, 50°, dan 70° sedangkan untuk sudut picu *thyristor inverter* yaitu 110°, 130°, dan 150°.

F. Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan penulisan, penulis membuat sistematika penulisan sebagai berikut :

Bab Pertama, Bab ini terdiri dari latar belakang, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

Bab Kedua, Bab ini berisi teori-teori dasar mengenai sistem tiga fase simetris, arus netral, beban linear, nonlinear, tentang perangkat lunak *PSCAD / EMTDC*

Bab Ketiga, Bab ini berisi tentang objek penelitian, cara penelitian, waktu dan proses yang dilakukan saat penelitian.

Bab Keempat, Bab ini berisi tentang hasil dan pembahasan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

Bab Kelima, Bab ini berisi tentang simpulan dan saran yang diperoleh setelah melakukan penelitian.

Daftar Pustaka, Berisi daftar yang mencantumkan spesifikasi sebuah buku yang meliputi judul buku, nama pengarang, penerbit, dan informasi yang terkait.

Lampiran, Berisi tentang dokumentasi alat dan lain-lain.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Tiga-Fase Simetris dan Nonsimetris

A.1 Sistem Tiga Fase Simetris

Sistem tiga fase seimbang adalah suatu keadaan di mana :

- a. Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.



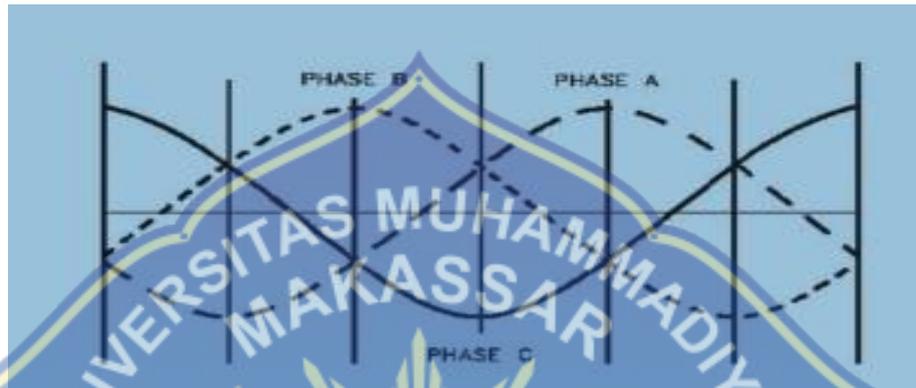
Gambar 2.1 Vektor Diagram Arus Seimbang (Setiadji dkk, 2006).

Gambar 2.1 menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N) (Setiadji dkk, 2006).

A.1.1 Rangkaian Listrik Tiga-Fase

Rangkaian listrik tiga fase merupakan rangkaian yang memiliki tiga buah keluaran simetris dan memiliki persamaan sudut untuk setiap fasenya sebesar 120° .

Berikut gambar dari gelombang tiga fase :



Gambar 2.2 Gelombang Tiga-Fase

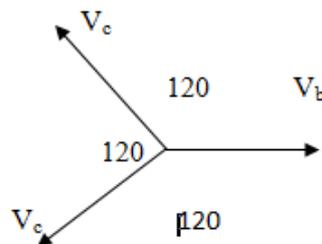
Dari gambar diatas terlihat bahwa setiap fase memiliki persamaan sudut dan didapatkan hubungan tegangan untuk masing-masing fase sebagai berikut :

$$V_a = V_m \angle 0^\circ \quad (2.1)$$

$$V_b = V_m \angle -120^\circ \quad (2.2)$$

$$V_c = V_m \angle -240^\circ \quad (2.3)$$

Berikut diagram fasor dari tegangan tiga fase :



Gambar 2.3 Diagram Fasor Tegangan

Arus yang mengalir pada setiap beban dinyatakan sebagai :

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.4)$$

Yang pada ketiga fasenya dapat dituliskan :

$$I_A = \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle -\theta \quad (2.5)$$

$$I_b = \frac{V \angle 120^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle (-120^\circ - \theta) \quad (2.6)$$

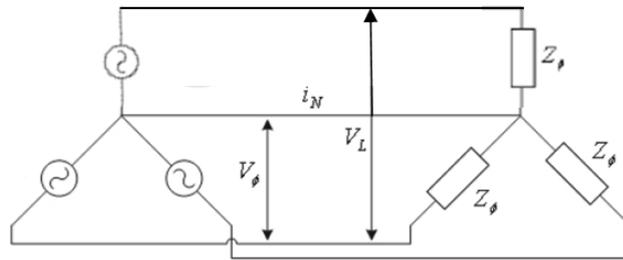
$$I_c = \frac{V \angle 240^\circ}{Z \angle \theta} = I_m \angle (-240^\circ - \theta) \quad (2.7)$$

Pada rangkaian tiga fase terdapat dua jenis hubungan yakni hubungan bintang dan hubungan delta. Rangkaian tiga fase hubungan delta menggunakan tiga kawat yakni kawat tiga fase sedangkan pada rangkaian tiga fase hubungan bintang menggunakan 4 kawat, 3 kawat untuk fase dan 1 kawat untuk netral. Arus netral pada rangkaian hubung bintang merupakan titik hubung antar ketiga fasenya. Arus netral (I_N) merupakan penjumlahan arus ketiga fasenya karena jalur netral tersebut dilalui oleh ketiga fase yang ada, menurut persamaan berikut :

$$I_N = I_A + I_B + I_C \quad (2.8)$$

$$I_N = 0 \quad (2.9)$$

Persamaan diatas menunjukkan jika beban yang diaplikasikan dalam satu tegangan tiga fase seimbang, maka arus netralnya sama dengan nol karena simetris saling meniadakan. Arus netral muncul akibat pembebanan yang tidak seimbang (Boromeus,2008).



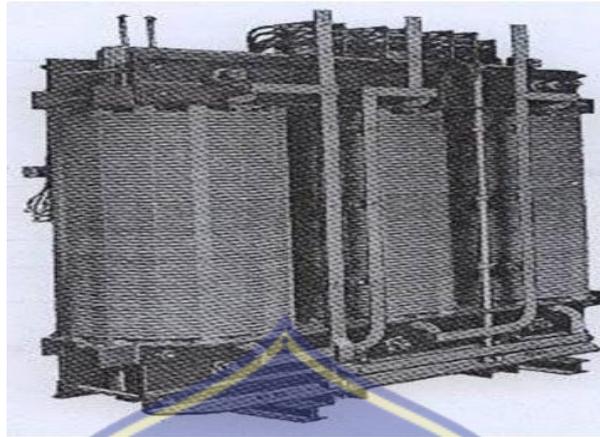
Gambar 2.4 Rangkaian hubungan bintang-bintang (Y-Y)

A.1.2 Transformator Tiga Fase

A.2.1.1 Pengertian Transformator Tiga Fase

Transformator khususnya transformator tiga fase memegang peranan yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Di dekat pembangkit, transformator tiga fase berfungsi menaikkan tegangan dari tegangan generator ke tegangan transmisi. Dalam hal ini digunakan transformator penaik tegangan (step up transformer). Sedangkan di dekat konsumen, transformator tiga fase berfungsi menurunkan tegangan dari tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.

Sebuah transformator tiga fase dapat diperoleh dari tiga buah transformator satu fase (transformer bank) atau satu unit transformator tiga fase. Gambar dibawah ini contoh sebuah transformator tiga fase, 30 MVA, 132 KV/33KV, 50 Hz (Sunnyoto, 2002).



Gambar 2.5 Transformator tiga fase

A.2.1.2. Sambungan Transformator Tiga Fase

Sambungan transformator tiga fase yang sering digunakan sesuai normalisasi pabrik adalah :

- Primer : sambungan bintang (Y), dan segitiga (Δ)
 Sekunder : sambungan bintang (Y),
 sambungan segitiga (Δ),
 dan sambungan liku-liku (Z).

1. Sambungan Bintang (Y)

Skema rangkaian transformator sambungan bintang adalah seperti pada gambar. Pada sambungan ini diperoleh persamaan :

$$V_{\text{fase}} (V_f) = V_{\text{line}} / \sqrt{3}$$

$$I_{\text{fase}} (I_f) = I_{\text{line}} (I_l) \quad (2.10)$$

$$\text{Daya} = V_l \times I_l \sqrt{3} \cos \varphi$$

$$\text{Atau Daya} = 3 V_f \times I_f \sqrt{3} \cos \varphi$$

2. Sambungan Segitiga (Δ)

Skema rangkaian transformator sambungan segitiga adalah sebagai berikut :

Pada sambungan ini di peroleh persamaan :

$$\begin{aligned} V_{\text{fase}} (V_f) &= V \text{ line } (V_l) \\ I_{\text{fase}} (I_f) &= I \text{ line } (I_l) \sqrt{3} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\text{Daya} = V_l \times I_l \sqrt{3} \cos \varphi$$

$$\text{Atau} \quad \text{Daya} = 3 V_f \times I_f \sqrt{3} \cos \varphi$$

3. Sambungan Liku-Liku (Z)

Sebuah transformator tiga fase dapat disambung liku-liku atau zig-zag jika lilitan sekunder tiap fase minimal mempunyai 2 buah kumparan. Skema rangkaian transformator sambungan liku-liku adalah seperti pada gambar dibawah ini (Sunyoto, 2002).

Pada sambungan ini diperoleh persamaan :

$$\begin{aligned} V_{\text{fase}} (Z) &= 0,866 V \text{ fase } (Y) \\ I_{\text{fase}} (I_f) &= I \text{ line } (I_l) \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\text{Daya} = V_l \times I_l \sqrt{3} \cos \varphi$$

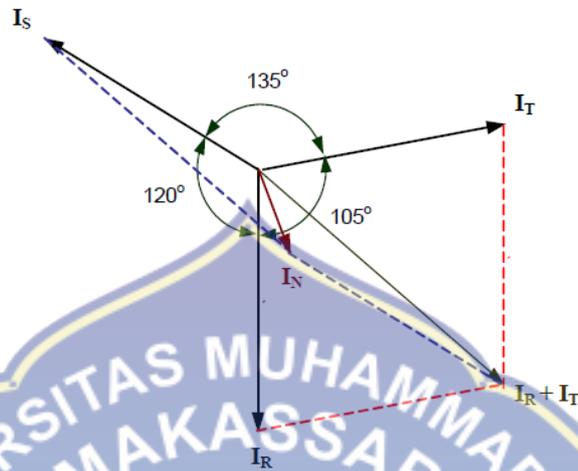
$$\text{Atau} \quad \text{Daya} = 3 V_f \times I_f \sqrt{3} \cos \varphi$$

A.2 Sistem Tiga Fase Nonsimetris

Sistem tiga fase dalam keadaan tidak seimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 yaitu:

- Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.

- c. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain



Gambar 2.6 Vektor diagram Arus Tak Seimbang (Setiadji dkk, 2006).

Pada Gambar 2.6 Menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya. (Setiadji dkk, 2006).

B. Arus Netral

B.1 Pengertian Arus Netral

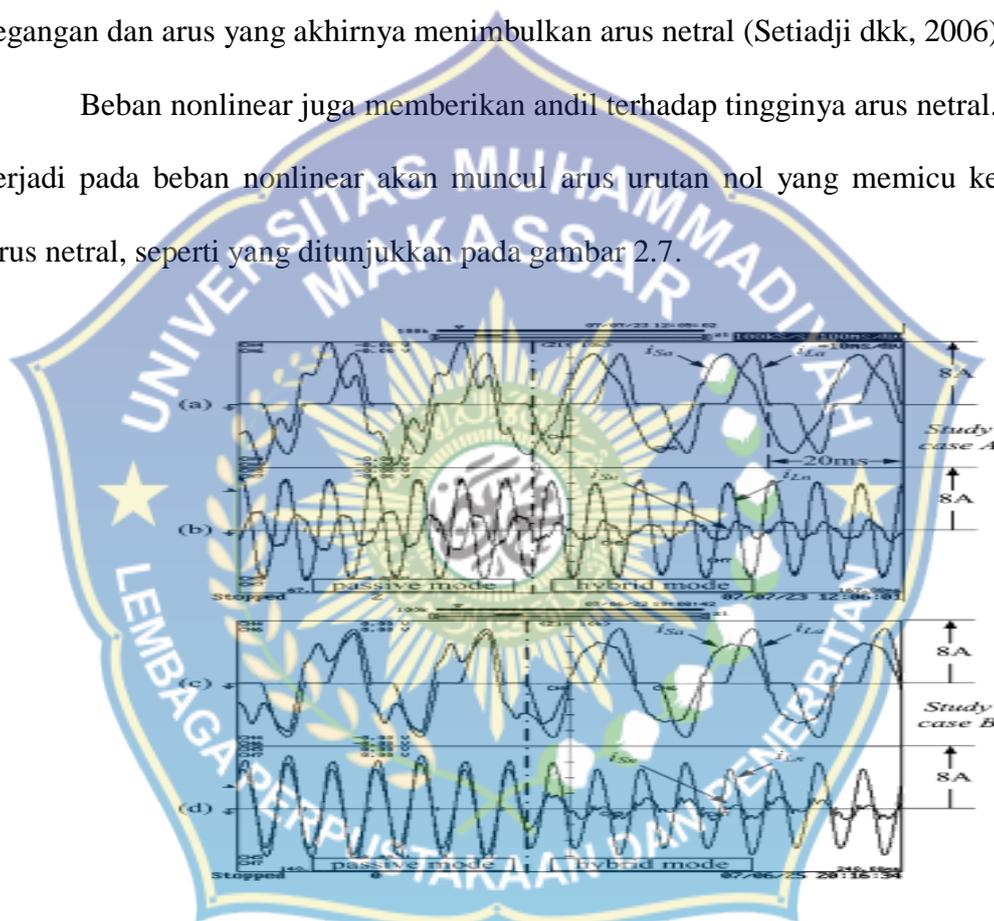
Arus netral dalam sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus netral ini muncul jika :

- Kondisi beban tidak seimbang
- Karena adanya arus harmonisa akibat beban non-linear.

Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus bolak-balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris (Badaruddin, 2012).

Arus netral yang tinggi dapat muncul akibat dari pembebanan yang tak seimbang. Perbedaan pembebanan antar fase akan menimbulkan perbedaan sudut tegangan dan arus yang akhirnya menimbulkan arus netral (Setiadji dkk, 2006).

Beban nonlinear juga memberikan andil terhadap tingginya arus netral. Hal ini terjadi pada beban nonlinear akan muncul arus urutan nol yang memicu keluarnya arus netral, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar. 2.7 Terjadinya Arus Netral (Pedro dkk, 2009).

B.2 Pengaruh Beban Linear dan Nonlinear Terhadap Arus Netral

Pada keadaan normal, arus beban setiap fase dari beban linear yang seimbang pada frekuensi dasarnya akan saling mengurangi sehingga arus netralnya menjadi nol. Sebaliknya beban tidak linear satu fase akan menimbulkan harmonik kelipatan tiga

ganjil. Harmonik ini tidak menghilangkan arus netral tetapi dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fase (Setiadji dkk. 2006).

Arus netral yang ditimbulkan adalah ;

Diketahui : $I_o =$

$$I_{o(riil)} = I_o \times \cos \Theta$$

$$I_{o(maj)} = I_o \times \sin \Theta$$

$$I_{fase(riil)} = 3 \times I_{o(riil)}$$

$$I_{fase(maj)} = 3 \times I_{o(maj)}$$

Sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

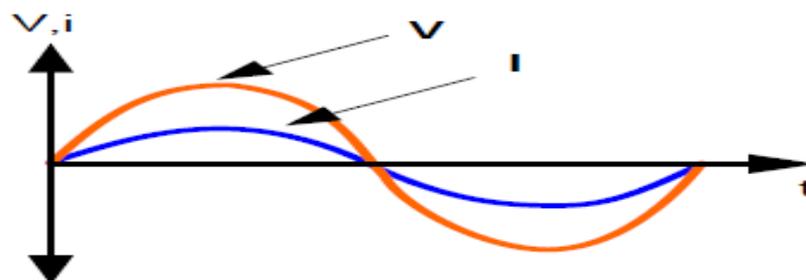
$$I_{netral} = \sqrt{I_{fase(riil)}^2 + (I_{fase(maj)})^2} \quad (2.29)$$

C. Pengertian Beban Linear dan Non Linear

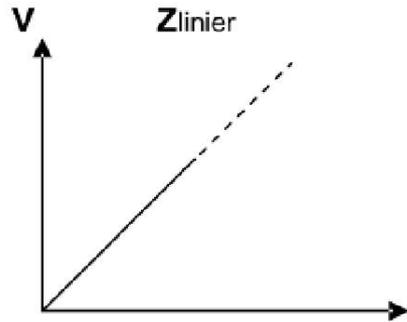
C.1 Beban Linear

C.1.1 Pengertian Beban Linear

Beban linear merupakan beban yang impedansinya selalu konstan sehingga arus selalu sebanding dengan tegangan setiap waktunya. Beban linear mengikuti hukum Ohm yang menyatakan bahwa arus sebanding dengan tegangan. Gelombang arus beban linear akan sama dengan bentuk gelombang tegangan (Amelia & Refdinal, 2015).



Gambar 2.8 Bentuk Gelombang Arus Dan Tegangan Pada Beban Linear

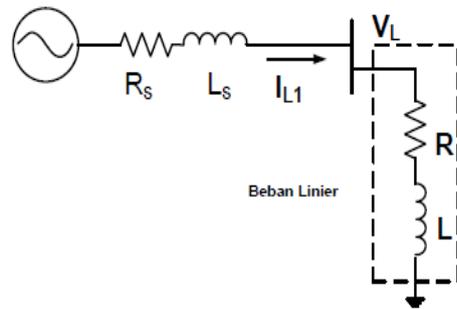


Gambar 2.9 Diagram Fasor Beban Linear

Beban linear adalah beban yang mempunyai output tegangan dan arus yang sepadam. Untuk tegangan *lagging*, arus juga ikut menjadi *lagging* pada rangkaian induktif, begitu juga pada kondisi tegangan *leading*, arus juga ikut menjadi *leading* pada rangkaian kapasitif. Untuk tegangan sinusoidal, arus juga sinusoidal. Beban linear antara lain: lampu pijar, pemanas (*Heater*), dan lain sebagainya. Beban-beban linier tersebut dapat mengalirkan tegangan dan arus dari frekuensi fundamentalnya untuk menyuplai sistem tenaga dengan sedikit atau tidak adanya gangguan harmonisa. Pada rangkaian AC, arus meningkat sebanding dengan tegangan yang meningkat dan arus menurun sebanding dengan tegangan yang menurun (Tanoto dkk., 2005).

Apa bila diberi tegangan sinusoidal, maka arus yang mengalir ke beban linear juga berbentuk gelombang sinusoidal sehingga tidak terjadi distorsi. Gambar diatas adalah contoh bentuk gelombang arus dan tegangan beban linear.

Pada umumnya beban linear dimodelkan dengan kombinasi antara resistansi dan induktansi. Pada beban nonlinear arus dari sumber masuk ke arah beban.



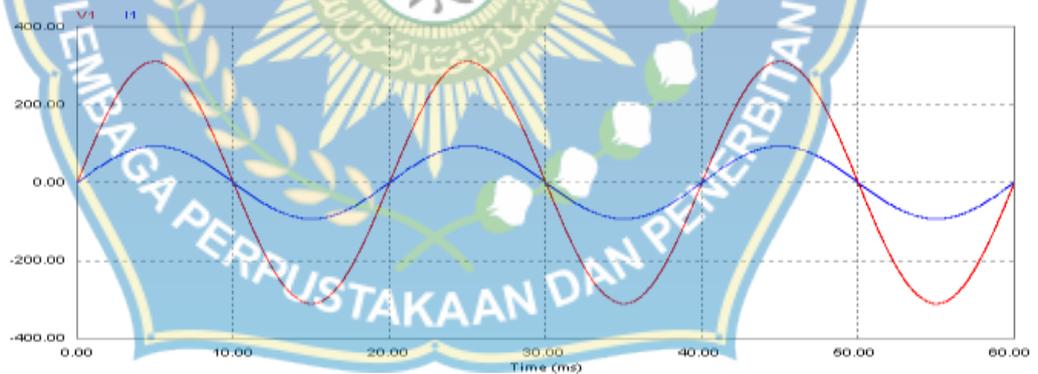
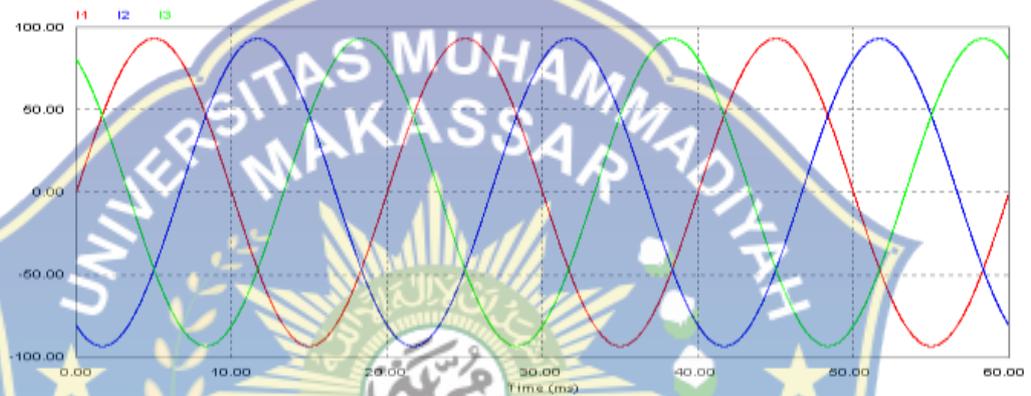
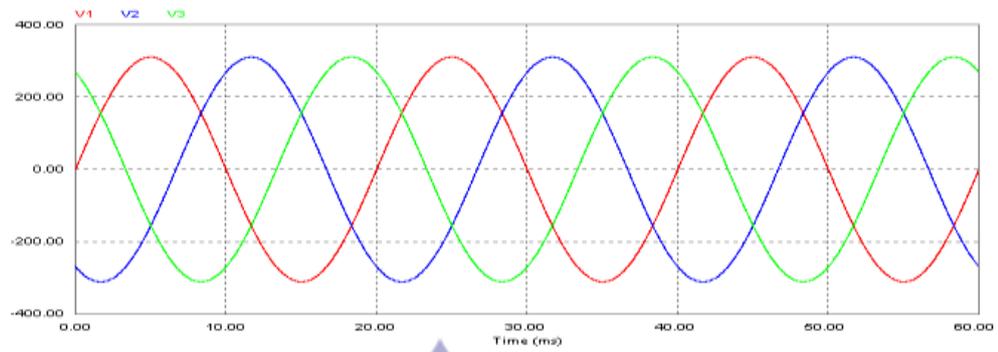
Gambar 2.10 Permodelan Beban Linear

Penggunaan beban linear pada sistem tiga fase dapat dimodelkan sebagai berikut :



Gambar 2.11 Penggunaan Beban Linear Pada Sistem Tiga Fase

Gambar gelombang tegangan dan arus input pemakaian beban linear dapat dilihat seperti Gambar 2.11 dibawah :

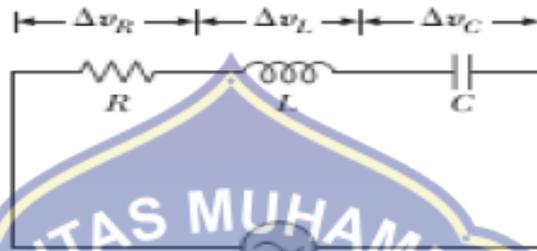


Gambar 2.12 Gambar Gelombang Tegangan Dan Arus Input Akibat Pemakaian Beban Linear (Agustinus, 2011).

Dari gambar diatas pemakaian beban linear, arus, dan tegangan sumber tidak mengalami distorsi (Agustinus, 2011).

C.1.2 Rangkaian RLC

Rangkaian RLC (Resistif, Induktif, dan Kapasitif) termasuk dalam beban linear, dimana Rangkaian RLC dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak-balik. Seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.13 Rangkaian RLC dengan sumber tegangan AC (Latifa. Neny).

Rangkaian RLC dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{Z} \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.13)$$

Dimana :

I_{\max} : Arus Maksimum

V_{\max} : Tegangan Maksimum

Z : Impedansi

$X_L = \omega L$ merupakan Reaktansi Induktif

$X_C = \frac{1}{\omega C}$ merupakan Reaktansi Kapasitif

a. Beban Resistif (R)

Beban resistif (R) yaitu beban yang terdiri dari komponen tahanan ohm saja (*resistance*), seperti elemen pemanas (*heating element*) dan lampu pijar. Beban jenis ini hanya mengkonsumsi beban aktif saja dan mempunyai faktor daya sama

dengan satu tegangan dan arus sefase. Persamaan daya sebagai berikut (Fahdi. Rachman, 2013).

$$P = V.I \quad (2.14)$$

Dengan : P = Daya aktif yang serap beban (watt)

V = Tegangan yang mencatu beban (volt)

I = Arus yang mengalir pada beban (A)

Adapun gambar gelombang pada beban resistif yaitu :



Gambar 2.15 Diagram Fasor Arus dan Tegangan Pada Beban Resistif

b. Beban Induktif (L)

Beban induktif (L) yaitu beban yang terdiri dari kumparat kawat yang dililitkan pada suatu inti, seperti *coil*, transformator, dan solenoida. Beban ini dapat mengakibatkan pergeseran fase (*phase shift*) pada arus sehingga bersifat *lagging*. Hal ini disebabkan oleh energi yang tersimpan berupa medan magnetis akan mengakibatkan fase arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan.

Beban jenis ini menyerap daya aktif dan daya reaktif. Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut (Fahdi & Rachman, 2013).

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.15)$$

Dengan : P = Daya aktif yang diserap beban (Watt)

V = Tegangan yang menentu beban (Volt)

I = Arus yang mengalir pada beban (A)

φ = Sudut antara arus dan tegangan



Gambar 2.17 Diagram Fasor Arus dan Tegangan Pada Beban Induktif

Untuk menghitung besarnya rektansi induktif (X_L), dapat digunakan rumus :

$$X_L = 2 \pi f L \quad (2.16)$$

Dengan : X_L = reaktansi induktif
 F = frekuensi (Hz)
 L = induktansi (Henry)

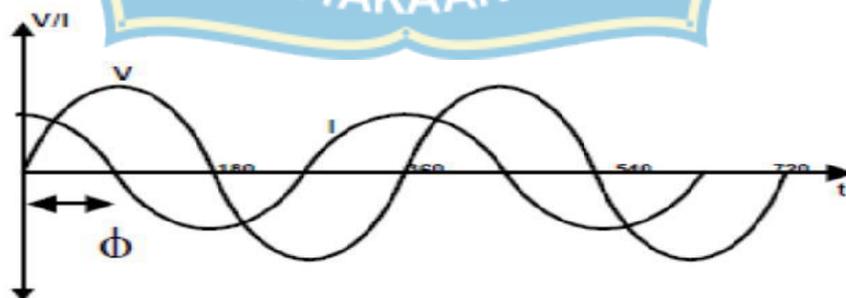
c. Beban Kapasitif (C)

Beban kapasitif (C) yaitu beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau kemampuan untuk menyimpan energi yang berasal dari pengisian elektrik (*electrical discharger*) pada suatu sirkuit. Komponen ini dapat menyebabkan arus *leading* terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif (Fahdi & Rachman, 2013).

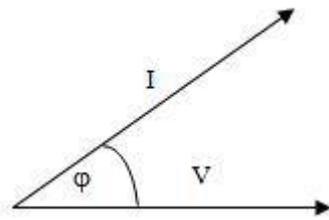
Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut :

$$P = VI \cos \phi \quad (2.17)$$

Dengan : P = daya aktif yang diserap beban (watt)
 V = tegangan yang mencatu beban (volt)
 I = arus yang mengalir pada beban (A)
 ϕ = sudut antara arus dan tegangan



Gambar 2.18 Gelombang Beban Kapasitif



Gambar 2.19 Diagram Fasor Arus dan Tegangan Pada Beban Kapasitif

Untuk menghitung besarnya reaktansi kapasitif (X_C), dapat digunakan rumus :

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \longrightarrow X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.18)$$

Dengan : X_C = reaktansi kapasitif (Ohm)

f = frekuensi (Hz)

C = kapasitansi (Farad)

C.2 Beban Nonlinear

C.2.1 Pengertian Beban Nonlinear

Beban nonlinear adalah jenis beban dimana arus beban tidak sepadan pada tegangan beban yang dipakai. pada saat itu juga, sering kali arus beban tidak selalu kontinyu. Arus beban nonlinear tidak sinusoidal meskipun sumber tegangan yang dipakai pada saat itu berbentuk gelombang sinusoidal yang bagus (Yusak dkk., 2005).

Beban nonlinear merupakan beban yang menghasilkan gelombang arus tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan sehingga terjadi cacat (distorsi) seperti terlihat pada gambar dibawah :



Gambar 2.20 Bentuk Gelombang Arus Dan Tegangan Pada Beban Nonlinear



Gambar 2.21 Diagram Fasor Beban Nonlinear

Sinyal tegangan dan arus beban nonlinear dapat dinyatakan dengan deret fourier seperti pada persamaan dibawah (Amelia & Refdinal, 2015) :

$$v_t = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2V_n} \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (2.19)$$

Dimana :

$\omega_1 = 2\pi f_1$ Untuk $n=1$ sampai ∞

V_0 = Komponen DC

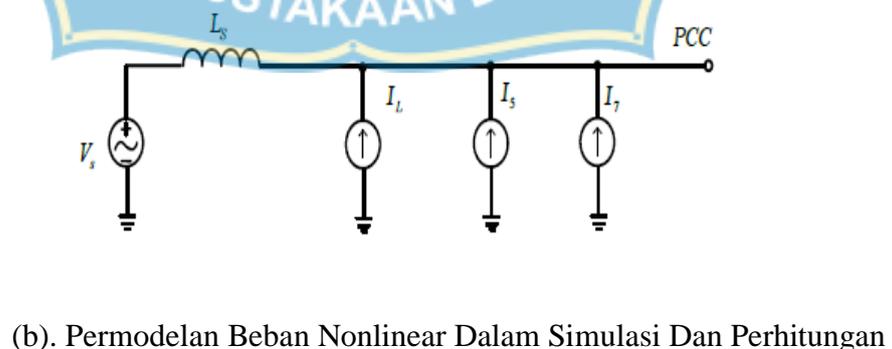
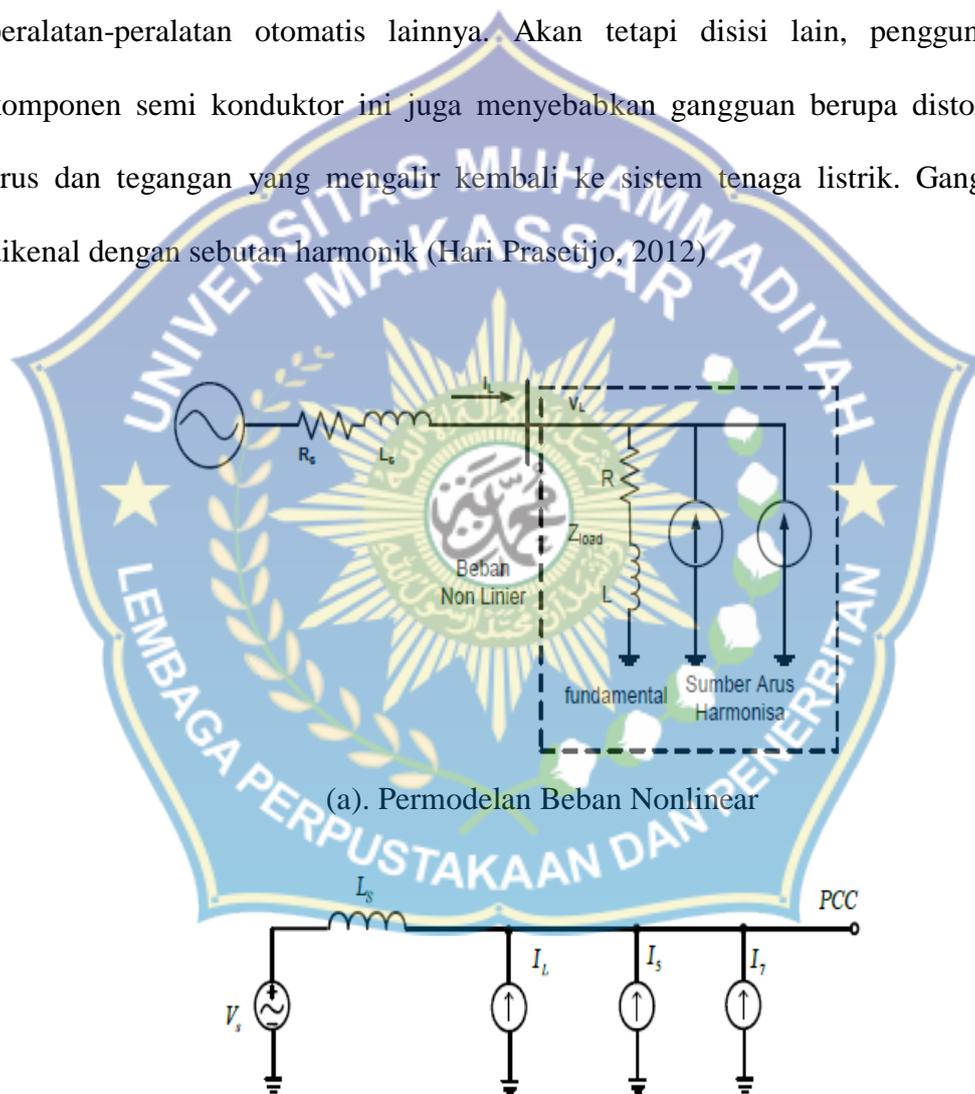
$V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ = Nilai Puncak gelombang harmonisa secara berurutan

f_1 = Frekuensi fundamental (harmonik pertama)

nf_1 = Frekuensi harmionisa ke n.

θ_n = Pergeseran Fase

Beban nonlinear dirancang untuk dapat menghemat penggunaan energi listrik dan lebih efisien karena menggunakan komponen semi konduktor yang dapat diatur waktu penggunaannya. Contoh beban-beban nonlinear adalah variable speed drive, komputer, peralatan yang menggunakan SCR seperti furnace, konverter-konverter statis kendali motor listrik, komputer, lampu fluorescent dengan balast elektronik, dan peralatan-peralatan otomatis lainnya. Akan tetapi disisi lain, penggunaan dari komponen semi konduktor ini juga menyebabkan gangguan berupa distorsi sinyal arus dan tegangan yang mengalir kembali ke sistem tenaga listrik. Gangguan ini dikenal dengan sebutan harmonik (Hari Prasetijo, 2012)



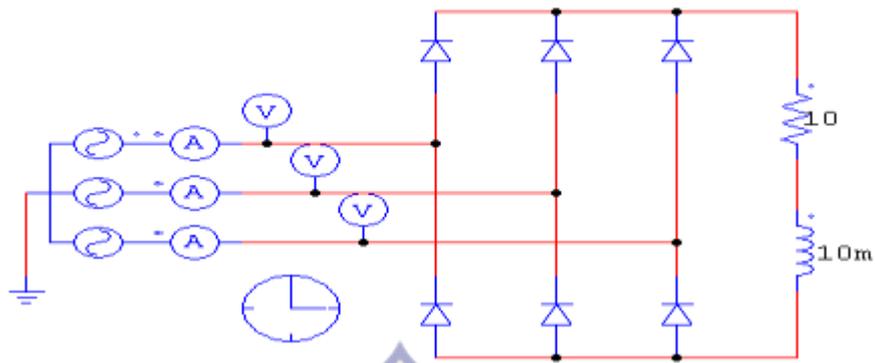
Gambar 2.22 Pemodelan Beban Nonlinear

Beban nonlinear seperti peralatan elektronik dapat dimodelkan sebagai beban linear R dan L serta sumber arus harmonisa seperti pada gambar 2.19 (a). Bila model pada gambar 2.19 (b) di gunakan dalam perhitungan, maka tidak sesuai dengan aturan deret fourier pada persamaan 1 dimana nilai harmonisa merupakan penjumlahan orde pertama dan orde-orde berikutnya. Selain itu, jika komponen fundamental (orde 1) tetap digambarkan sebagai R dan L , maka arah arus menuju R dan L sedangkan orde lain yang di modelkan dengan komponen sumber arus yang arah arusnya berkebalikan (keluar dari sumber arus) sehingga arah arus saling bertentangan antara orde satu dengan orde-orde lainnya.

Model pada gambar 2.21 (a) secara ril mudah dipahami namun tidak sesuai dengan teori deret fourier yang menyatakan penjumlahan fundamental dan komponen harmonisanya. Dalam hal pengukuran kita tidak bisa memisahkan antara fundamental dengan harmonisanya yang artinya semua komponen fundamental dan orde lain memiliki arah arus yang sama.

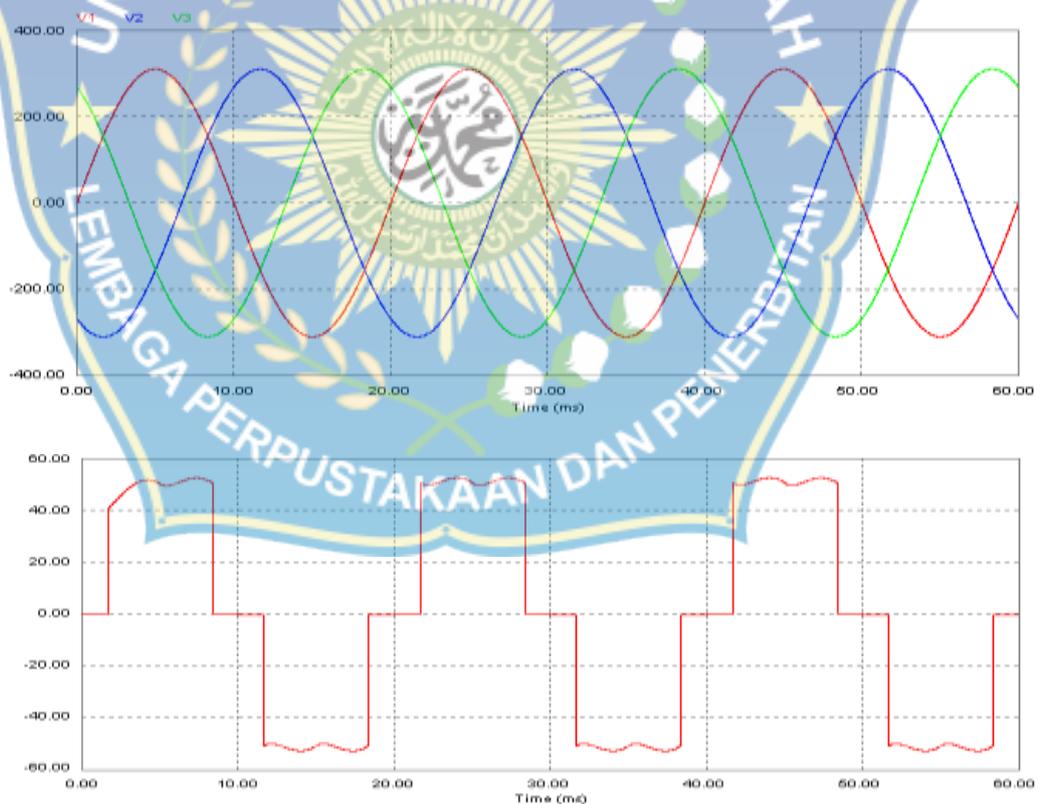
Guna pendekatan dalam simulasi dan perhitungannya, munculah pemodelan seperti pada gambar 2.21 (b). Komponen fundamental beban non-linier atau yang disebut juga harmonisa orde pertama tidak lagi dimodelkan sebagai resistansi dan induktansi seperti pada gambar 2.21 (a), akan tetapi di modelkan sebagai sumber arus sama halnya dengan komponen harmonisa orde lainnya. Komponen arus fundamentalnya di beri nama I_L , komponen harmonisa orde ke-5 diberi nama I_5 dan komponen harmonisa orde ke-7 diberi nama I_7 (Rizka. Refdinal. 2015).

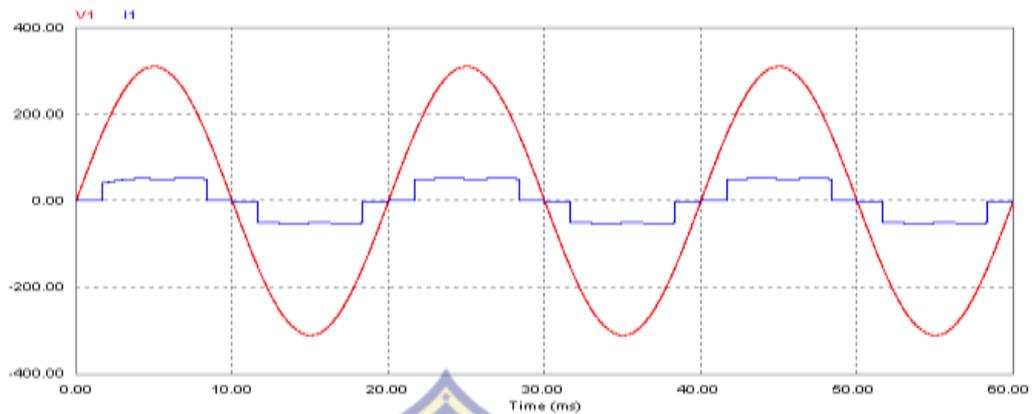
Adapun rangkaian penggunaan beban nonlinear pada system tiga fase pada gambar :



Gambar 2.23 Penggunaan Beban Nonlinear

Gambar gelombang tegangan dan arus input akibat pemakaian beban nonlinear seperti pada gambar 2.23





Gambar 2.24 Gelombang Tegangan dan Arus Input Akibat Pemakaian Beban Nonlinear (Agustinus, 2011).

Dari Gambar 2.23 pemakaian beban nonlinier berupa converter 6 pulsa menyebabkan gelombang arus input mengalami distorsi berat tetapi tegangan sumber tidak terdistorsi.

C.2.2 Dioda

a. Karakteristik Utama Dioda

Menurut Wildi (2006) karakteristik utama pada diode yaitu :

1. Tegangan Inversi Puncak (PIV)

Dioda dapat menahan begitu banyak tegangan inversi sebelum rusak. Tegangan inversi puncak (PIV) berkisar dari 50V sampai 4000V, tergantung pada konstruksi. Jika dinilai PIV (*Peak Inverse Voltage*) terlampaui, dioda mulai melakukan secara inversi.

2. Arus Maksimum Rata-Rata

Ada juga batas untuk rata-rata dioda yang dapat membawa arus maksimum berkisar dari beberapa ratus milliamperes sampai 4000A lebih,

tergantung pada konstruksi dan ukuran dioda. Nilai arus nominal tergantung pada suhu dioda dan cara pemasangannya.

3. Suhu Maksimum

Tegangan dioda di kali arus sama dengan kehilangan daya, yang seluruhnya dikonversi menjadi panas. Kenaikan suhu yang dihasilkan dari dioda tidak pernah harus melebihi batas yang diizinkan, jika tidak dioda akan rusak. kebanyakan dioda silikon dapat beroperasi pada suhu internal antara -50°C dan $+200^{\circ}\text{C}$. perubahan suhu dioda sangat cepat di karenakan ukuran dan massanya yang kecil. untuk meningkatkan perpindahan panas, dioda biasanya dipasang pada logam tebal yang disebut *heat sink*. Selanjutnya dalam instalasi besar dioda dapat di dinginkan oleh fans, minyak, atau dengan aliran air deionisasi.

Perhatikan pada tabel 2.1 yang menjelaskan tentang karakteristik dari beberapa tipe dioda.

Tabel 2.1 Karakteristik Dari Beberapa Tipe Dioda (Wildi, 2006).

Daya Relatif	I_0 [A]	E_0 [V]	I_{cr} [A]	E_2 [V]	I_2 [mA]	T_1 [°C]	d [mm]	l [mm]
Rendah	1	0,8	30	1000	0,05	175	3,8	4,6
Medium	12	0,6	240	1000	0,6	200	11	32
Tinggi	100	0,6	1600	1000	4,5	200	25	54
Sangat Tinggi	1000	1,1	10000	2000	50	200	47	26

Dimana :

I_0 : Arus DC Rata-rata

E_0 : Jatuh tegangan yang sesuai dengan I_0

I_{cr} : Nilai puncak arus gelombang untuk satu siklus

E_2 : Tegangan infersi puncak

I_2 : Membalikkan kebocoran arus yang sesuai dengan E_2

T_1 : Suhu maksimum pada persimpangan (di dalam dioda)

d : Diameter

l : Panjang

b. Dioda Penyearah Tiga Fase

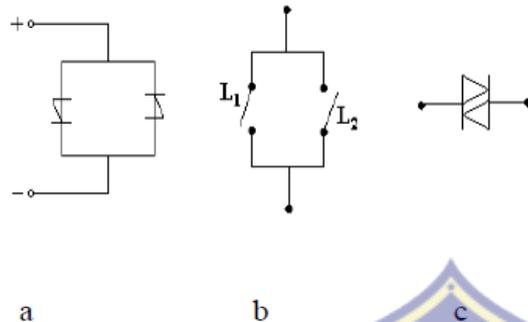
Penyearah diode gelombang penuh tiga fase menggunakan sistem jembatan dengan enam buah dioda R1, R3, dan R5 katodanya disatukan sebagai terminal positif, dioda R4, R6, dan R2 anodanya yang disatukan sebagai terminal negative. Tegangan DC yang dihasilkan memiliki enam pulsa yang dihasilkan oleh masing-masing dioda tersebut. Tegangan DC yang dihasilkan halus karena tegangan riak (*ripple*) kecil dan lebih rata. Urutan konduksi dari keenam dioda dapat dilihat dari siklus gelombang sinusoida yang konduksi secara bergantian. Konduksi dimulai dari dioda R1 + R6 sepanjang sudut komutasi 60° . Berturut-turut disusul dioda R1 + R2, lanjutnya diode R3 + R2, urutan keempat R3 + R4, kelima R5 + R4 dan terakhir R5 + R6. Jelas dalam satu siklus gelombang tiga fase terjadi enam kali komutasi dari keenam dioda secara bergantian dan bersama-sama (Agustinus, 2011)

c. DIAC (Dioda AC)

DIAC merupakan salah satu anggota dari thyristor dan termasuk dalam jenis “Bidirectional Thyristor” yang juga dikenal sebagai “*Bilateral Trigger Diode*”. Istilah DIAC diambil dari “Dioda ac”. DIAC mempunyai dua buah terminal dan dapat menghantar dari kedua arah jika tegangan breakovernya (*VBB*) terlampaui. DIAC tersusun dari tiga lapis bahan semikonduktor walaupun beberapa buku mengatakan bahwa DIAC tersusun dari piranti lapis-empat, namun demikian pembuatnya menyatakan bahwa DIAC dibuat dari tiga lapis bahan semikonduktor. Tidak seperti halnya transistor, DIAC mempunyai tingkatan doping sekitar *junctionnya* yang sebanding (Denny dkk. 2013).

DIAC mempunyai impedansi yang tinggi bagi arus dalam dua arah, hingga bias DIAC melewati breakover arah mundurnya. Biasanya bias untuk DIAC agar mencapai breakover ini adalah antara 28 sampai 36 volt, namun demikian tergantung dari pada tipenya. Agar kita mengetahui prinsip kerja DIAC, maka kita nggap pemberian catu dayanya seperti terlihat pada gambar 3. Jika tegangan yang diberikan pada DIAC menyamai atau melebihi tegangan *breakover*, maka salah satu *Latch* akan menutup juga.

DIAC adalah suatu komponen yang berkelakuan seperti dua buah thyristor yang dihubungkan saling bertolak belakang. Oleh karena itu DIAC mempunyai dua buah tegangan penyalan. Tegangan penyalan pertama berada pada tegangan maju (+*Vbo*) sedangkan yang kedua ada pada tegangan baliknya (-*Vbo*) (Denny dkk. 2013).



Keterangan :

- a. Ekuivalen DIAC
- b. DIAC sebagai susunan pengancing (*Latch*)
- c. Simbol DIAC

Gambar 2.25 Menunjukkan Ekuivalen dan Simbol DIAC (Denny dkk. 2013).

C.2.3 Thyristor

Thyristor secara resmi dikenal sebagai *SCR* (*Silicon Controlled Rectifier*). *Thyristor* adalah salah satu alat semikonduktor yang penting untuk mengontrol dan memutuskan hubungan arus bolak-balik kecil dan besar. *Thyristor* mempunyai kemudahan dimana dapat mempengaruhi penyearahan arus bolak-balik ke arus searah demikian juga sebaliknya yaitu pengubahan dari arus searah ke arus bolak-balik (Denny dkk. 2013).

Penggunaan *thyristor* (*SCR*) sebagai penyearahan dan sebagai pengontrolan saklar arus kecil dan besar menguntungkan karena pemakaian energinya yang minimal dibandingkan dengan alat-alat mekanik karena :

- a. Tak ada kontak-kontak yang aus karena terbakar.
- b. Tidak menjangkitkan busur api.
- c. Memerlukan sedikit komponen-komponen tambahan.

Sudut picu untuk rangkaian *thyristor* yang diberikan, biasanya disimpan antara 15° dan 165° , *thyristor* bertindak sebagai penyearah (*rectifier*) antara sudut 15° dan

90°, dan sebagai inverter antara 90° dan 165°. Kondisi ini, tegangan DC dikembangkan mencapai nilai maksimum pada sudut 15° dan 165°, itu adalah nol pada sudut 90° (Wildi, 2006).

Tabel 2.2 yang menjelaskan tentang karakteristik dari beberapa tipe *thyristor* (Wildi, 2006).

Tabel 2.2. Karakteristik Dari Beberapa Tipe Thyristor

Daya Relatif	I_1 [A]	I_{cr} [A]	E_2 [V]	E_p [V]	I_G [mA]	E_G [V]	T_1 [°C]	d [mm]	l [mm]
Medium	8	60	500	-10	50	2,5	105	11	33
Tinggi	110	1500	1200	-5	50	1,25	125	27	62
Sangat tinggi	1200	10000	1200	-20	50	1,5	125	58	27

Dimana :

I_1 : Arus efektif maksimum selama konduksi

I_{cr} : Nilai arus puncak pada lonjakan siklus

E_2 : Tegangan balik puncak A

E_p : Tegangan puncak gerbang indera

E_G : Tegangan gerbang positif pada saat konduksi

I_G : Gerbang arus sesuai dengan E_G

T_1 : Suhu maksimum pada persimpangan

d : Diameter

l : Panjang

Rectifier adalah alat yang digunakan untuk mengubah sumber arus bolak-balik (AC) menjadi sinyal sumber arus searah (DC). Sudut picu pada *thyristor* sebagai penyearah (*Rectifier*) yaitu 15° sampai 90° . *Inverter* adalah suatu rangkaian elektronika yang berfungsi untuk merubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) dengan besar magnitude dan frekuensi tertentu. Sudut picu pada *thyristor* sebagai *Inverter* yaitu 90° sampai 165° (Wildi,2006).

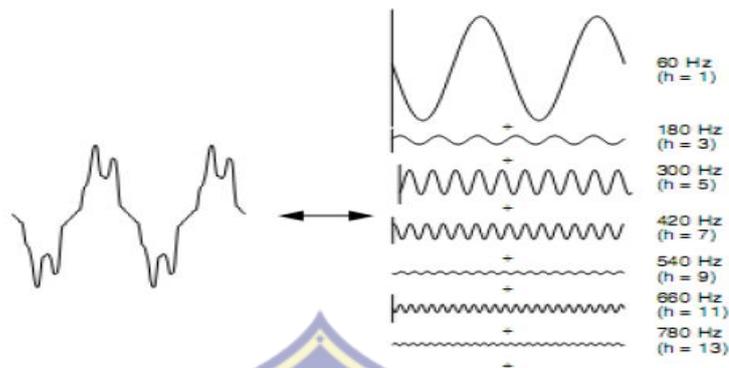
D. Harmonik

D.1 Pengertian Harmonik

Harmonik adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang sinus dengan frekuensi kelipatan (*integer*) dari frekuensi sumber. Gelombang sinus apa bila digabungkan dengan frekuensi sumber akan menghasilkan gelombang yang terdistorsi (*Non-Sinus*) (Setiawan, 2007).

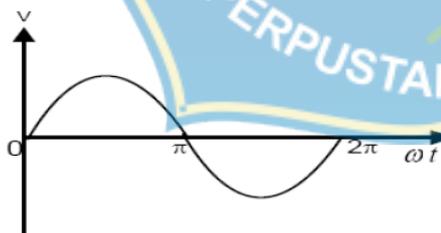
Harmonik merupakan komponen sinusoidal dari sebuah gelombang periodis yang memiliki frekuensi kelipatan bulat dari fundamental frekuensi gelombang periodis tersebut (IEEE Std. 519:1992). Bila terjadi superposisi antara gelombang frekuensi dasar dengan gelombang frekuensi harmonik maka terbentuklah gelombang yang terdistorsi sehingga bentuk gelombang tidak lagi sinusoidal.

Pembentukan gelombang non-sinusoidal hasil distorsi harmonik dapat dilihat pada gambar 1 berikut:

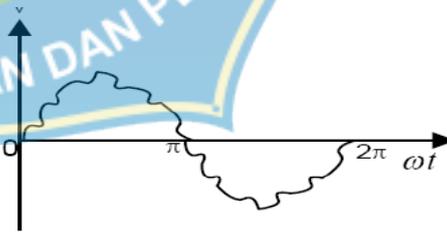


Gambar 2.26 Gelombang Hasil Distorsi Harmonik (Prasetijo, 2012).

Pada sistem tenaga listrik, daya yang didistribusikan adalah pada level tegangan dengan frekuensi tunggal (50 Hz atau 60 Hz) ,tetapi karena perkembangan beban listrik yang semakin pesat dan kompleks, terutama penggunaan beban-beban non linear, akan menimbulkan perubahan pada bentuk gelombang sinusnyanya, sehingga yang semula seperti Gambar 2.27 tetapi setelah dialirkan kebeban-beban non linear, bentuk gelombangnya tidak lagi sinus melainkan akan cacat atau terdistorsi seperti yang terlihat pada gambar 2.28 :



Gambar 2.27 Gelombang Sinus Murni

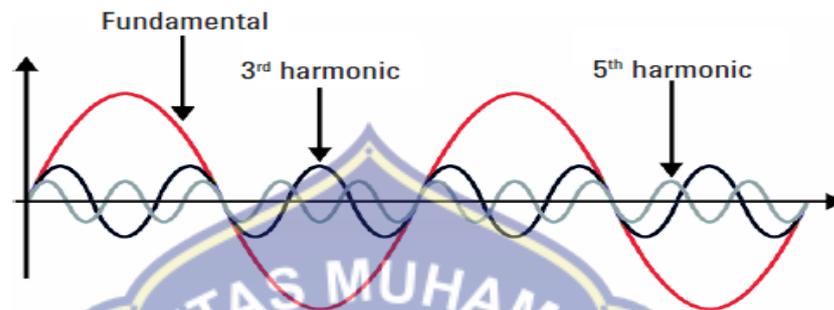


Gambar 2.28 Gelombang Sinus

Terdistorsi

Cacat gelombang yang disebabkan oleh interaksi antara bentuk gelombang sinusoidal sistem dengan komponen gelombang lain yang disebabkan oleh pemakaian beban nonlinear lebih dikenal dengan harmonik, dengan kata lain harmonik adalah

komponen gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan integer dari komponen frekuensi fundamental (Agustinus, 2011).



Gambar 2.29 Gelombang Harmonik (Keysight, 2014).

Frekuensi harmonik adalah suatu frekuensi yang menyebabkan cacatnya gelombang amplitude dalam suatu sistem tenaga listrik. Untuk bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angkatan urutan harmonik. Misal, frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka harmonik kedua adalah gelombang dengan frekuensi 100 Hz, harmonisa ketiga adalah gelombang dengan frekuensi 150 Hz dan seterusnya sehingga dapat dituliskan dengan persamaan :

$$f_h = n \times f_i \quad (2.20)$$

Keterangan : f_h = Frekuensi harmonik

n = Bilangan bulat positif

f_i = Frekuensi Fundamental

Gelombang ini kemudian menumpang pada gelombang murni atau aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat. Ini merupakan penjumlahan antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmoniknya. Karakteristik harmonik dapat dipersentasikan dengan deret *fourier* :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} (a_n \cos(h\omega_0 t) + b_n - \sin(h\omega_0 t)) \quad (2.21)$$

Keterangan :

- Nilai dari f fundamental untuk satu periode dengan limit 0 hingga T

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.22)$$

- 2x nilai rata-rata $f(t) \cos n$ untuk satu periode gelombang

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt \quad (2.23)$$

- 2 x nilai rata-rata $f(t) \sin n$ untuk satu periode gelombang

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt \quad (2.24)$$

- n = Indeks Harmonik

Harmonik sangat mempengaruhi sistem tenaga listrik karena harmonik cenderung akan menuju ke tempat yang mempunyai impedansi yang rendah. Dalam sistem penyaluran energi listrik harmonik dapat bergerak menuju generator pembangkit tenaga listrik karena mempunyai impedansi yang sangat rendah. Harmonik juga dapat bergerak menuju transformator, sehingga transformator akan mengalami panas berlebihan yang disebabkan oleh naiknya *losses*. Untuk mengetahui hal tersebut diantaranya bisa dilakukan dengan memasang tumpuk kapasitor. Sifat kapasitor adalah memiliki impedansi yang rendah sehingga arus harmonik dapat menuju tumpuk kapasitor. Untuk mengetahui berbagai persoalan yang ditimbulkan oleh adanya arus harmonik pada sistem distribusi tenaga listrik, dengan cara menghilangkan atau mengurangi kandungan arus harmonik sampai memenuhi batasan harmonik yang diijinkan (Setiawan, 2007).

D.2 Penyebab Harmonik

Harmonik pada sistem tenaga listrik disebabkan antara lain karena pemakaian beban yang bersifat nonlinear yang berbasis elektronika. Peralatan elektronika tersebut banyak menggunakan komponen semikonduktor, yang dalam proses kerjanya menghasilkan arus dan tegangan nonsinusoidal. Peralatan ini dirancang untuk menggunakan arus listrik secara hemat dan efisien karena arus listrik hanya dapat melalui komponen semikonduktornya selama periode pengaturan yang ditentukan. Disisi lain hal ini juga akan menyebabkan gangguan gelombang arus dan tegangan yang mempengaruhi kinerja peralatan listrik lainnya (Faharuddin & Wibisana, 2012).

Peralatan-peralatan elektronik modern memiliki beban nonlinear penyebab terjadi harmonik. Beban nonlinear ini membuat harmonik dengan saat menggambar di pulsa pendek tiba-tiba. Pulsa pendek menyebabkan gelombang arus terdistorsi yang pada gilirannya menyebabkan arus harmonik mengalir kembali ke bagian lain dari sistem tenaga. Harmonik sangat lazim di mana ada sejumlah besar komputer pribadi, printer laser, mesin fax, mesin foto kopi, peralatan medis, lampu neon, pasokan listrik uninterruptable (UPS), dan variabel kecepatan drive (Keysight Teknologi, 2014).

D.3 Pengaruh Negatif dari Harmonik

Pada keadaan normal, arus beban setiap fase dari beban linear yang seimbang pada frekuensi dasarnya akan saling menghapuskan sehingga arus netralnya menjadi nol. Sebaliknya beban tidak linear satu fase akan menimbulkan harmonik kelipatan tiga ganjil yang disebut triplen harmonik (harmonik ke-3 , ke-9, ke-15 dan seterusnya) yang sering disebut *zero sequence* harmonik (Tabel 2.3).

Tabel 2.3. Polaritas dari Komponen Harmonik (Irianto dkk, 2008)

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

Harmonik ini dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fase karena saling menjumlah di tiap fasenya. Harmonik pertama urutan polaritasnya adalah positif, harmonik kedua urutan polaritasnya adalah negatif dan harmonik ketiga urutan polaritasnya adalah nol, harmonik keempat adalah positif (berulang berurutan dan demikian seterusnya).

Akibat yang ditimbulkan oleh arus urutan nol dari komponen harmonik (Tabel 2.3) antara lain tingginya arus netral pada sistem 3 fase 4 kawat (sisi sekunder transformator) karena arus urutan nol (*zero sequence*) kawat netral 3 kali arus urutan nol masing-masing fase. Arus ini untuk transformator yang memiliki belitan delta (Δ) akan terus berputar didalam kumparan Δ tersebut (Irianto dkk, 2008).

Tabel 2.4 Akibat dari Polaritas Komponen Harmonik (Irianto dkk, 2008).

Urutan	Pengaruh Pada Sistem Distribusi
Positif	- Panas
Negatif	- Panas - Menghambat atau memperlambat putaran motor
Nol	- Panas - Menimbulkan atau menambah arus pada kawat netral

Pengaruh harmonik pada transformator sering tanpa disadari keberadaannya sampai terjadi gangguan yang penyebabnya tidak jelas. Hal ini dapat juga terjadi bila perubahan konfigurasi atau jenis beban yang dipasang. Transformator dan peralatan induksi lainnya, selalu terpengaruh oleh harmonisa karena trafo itu sendiri dirancang sesuai dengan frekuensi kerjanya. selain itu transformator juga merupakan media utama antara pembangkit dengan beban. Frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya tambahan pada trafo (Irianto dkk, 2008).

D.4 Standard Harmonik

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari harmonik individual dan nilai RMS dari fundamental.

$$IHD = \sqrt{\left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}}\right)^2} \times 100\% \quad (2.25)$$

dimana :

I_{HD} : *Individual Harmonisa Distrotion* (%)

I_{sh} : Arus harmonik pada orde ke-h (A)

I_{s1} : Arus fundamental (I_{rms}) dalam A

Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai RMS dari komponen harmonik dan nilai RMS dari fundamental. Hubungan antara THD dengan IHD dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$I_H = \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2} \quad (2.26)$$

$$THD = \frac{I_H}{I_F} \times 100 \% \quad (2.27)$$

Atau,

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h \neq 1}^{\infty} \left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}}\right)^2} \times 100 \% \quad (2.28)$$

dimana:

THD : *Total Harmonisa Distrotion* (%)

I_{sh} : Arus harmonik pada orde ke-h (A)

I_{s1} : Arus fundamental (Irms) dalam A

I_H : Arus Harmonik

I_F : Aruf Fundamental

Pengaruh harmonik total untuk tegangan dapat dihitung, dengan mengganti notasi I menjadi V. Hasil perhitungan sebaiknya tidak melebihi atau sama dengan nilai yang ditetapkan oleh standar yang berlaku. Bila hasilnya lebih maka tingkat harmonik sistem membahayakan komponen-komponen sistem dan sebaiknya harus dipikirkan cara menguranginya.



Gambar 2.30 Total Harmonik Distorsi (THD) (Rodr'iguez dkk, 2010).

Ada dua kriteria yang digunakan dalam analisa distorsi harmonik, limitasi untuk distorsi arus harmonik dan limitasi untuk distorsi tegangan harmonik. Standar yang dipakai untuk limitasi tegangan harmonik adalah IEEE 519. Untuk standard

harmonik arus, ditentukan oleh rasio I_{sc}/I_L (arus hubung singkat dibagi dengan arus beban) seperti Tabel :

Tabel 2.5. Standar Harmonik Arus IEEE 519-1992 (Irianto dkk, 2008).

I_{sc}/ I_{Load}	Orde Harmonik (dalam %)					Total Harmonik Distorsi
	< 11	11-16	17-22	23-24	> 35	
< 20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
> 10000	15	7	6	2.5	1.4	20

dimana:

I_{sc} : arus hubung singkat pada PCC (*Point of Common Coupling*)

I_{Load} : arus beban fundamental nominal

THD : Total Harmonic Distortion dalam %

I_{sc} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*) (Dugan, 2003), I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan untuk standard harmonik tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai seperti Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Standar Harmonik Tegangan (Irianto dkk, 2008).

Maximum Distorsi (dalam %)	Tegangan Sistem		
	Dibawah 69 kV	69-138 kV	>138 kV
Individual Harmonik	3	1.5	1
Total Harmonik	5	2.5	1.5

D.5 Urutan Harmonik

Harmonik yang mendistorsi gelombang sinus fundamental dapat terdiri dari beberapa komponen harmonik, yaitu misalnya harmonik ke-1, ke-2, ke-3 dan seterusnya. Harmonik ke-3 artinya harmonik yang mempunyai frekuensi Tiga kali dari frekuensi fundamentalnya. Jadi, bila frekuensi fundamental 50 Hz, maka harmonik ke-3 mempunyai frekuensi 150 Hz atau dapat dituliskan dengan persamaan (Amelia & Refaldi, 2015).

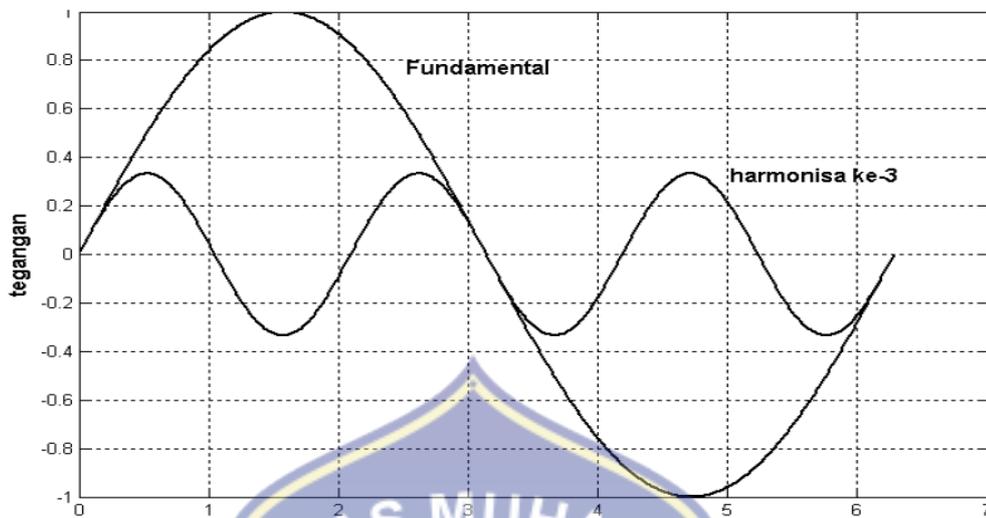
Adapun urutan orde harmonik dengan urutan fase yaitu :

Tabel 2.7. Orde Harmonik dan Urutan Fase (Amelia & Refaldi, 2015)

Orde Harmonik	Urutan Fase	Contoh
1,4,7,10,13,16,19,...	Positif	
2,5,8,11,14,17,20,...	Negatif	
3,5,9,12,15,18,21,...	Nol	

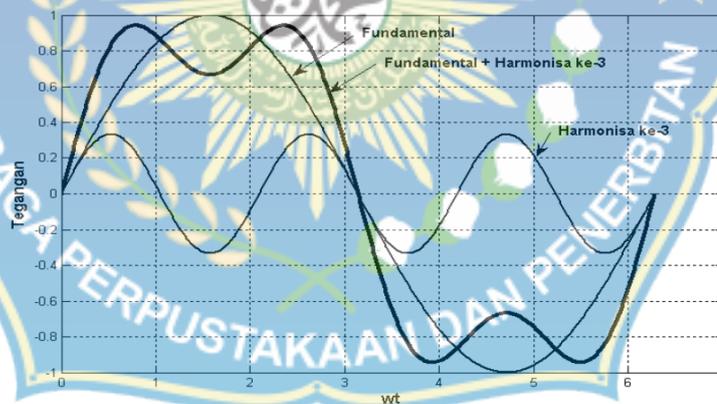
Sebagai contoh untuk urutan harmonik ke-2 adalah $n=2$ diperoleh $2 \times (0^\circ, -120^\circ, -120^\circ)$ atau $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$, yang berarti urutan negative (*Negative-Sequence*). Untuk urutan harmonik ke-3, $n=3$ maka didapatkan $3 \times (0^\circ, -120^\circ, -120^\circ)$ atau $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, artinya urutan nol (*Zero Sequence*). Urutan fasa untuk semua urutan harmonik orde ke- n dapat ditunjukkan dengan mode yang sama.

Gelombang harmonik tersebut menumpang pada gelombang fundamental sehingga berbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang fundamental sesaat dengan gelombang harmonik. Gelombang tegangan fundamental mempunyai frekuensi f_0 , harmonik ke-dua mempunyai frekuensi $2f_0$, harmonik ke-tiga mempunyai frekuensi $3f_0$ dan harmonik ke- h mempunyai frekuensi hf_0 . Pada Gambar 2.30 di bawah ini dapat dilihat bentuk gelombang tegangan fundamental dan harmonik ke-3 (Setiawan, 2007).



Gambar 2.31 Tegangan Fundamental Pada Harmonik ke-3

Jika gelombang tegangan fundamental dijumlahkan dengan harmonik ke-3 akan diperoleh bentuk gelombang tegangan yang non sinusoidal, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.31.



Gambar 2.32 Gelombang Tegangan Fundamental, Harmonik ke-3 dan Hasil Penjumlahan

D.6 Sumber-Sumber Harmonik

Komponen-komponen sistem tenaga listrik yang dapat menimbulkan arus harmonik hendaknya perlu diperhatikan, dengan tujuan untuk memprediksi permasalahan yang diakibatkan oleh harmonik, sehingga sudah dapat diperkirakan

cara yang tepat untuk menekan kehadiran harmonik tersebut, baik dengan cara memasang filter, maupun mendesain peralatan-peralatan listrik agar dampak harmonik yang ditimbulkan peralatan tersebut masih dibawah standar yang ditentukan (Agustinus, 2011).

Berikut ini adalah beberapa contoh sumber-sumber harmonik :

1. Konverter
2. Tanur Listrik
3. Induktor
4. Penyearah (*rectifier*)

E. PSCAD/EMTDC

PSCAD (Power System Computer Aided Design) pertama kali dikonseptualisasi pada tahun 1988 dan memulai evolusi panjang sebagai alat untuk menghasilkan data program simulasi *EMTDC*. Pada bentuk awal, versi 1 sebagian besar hanya eksperimen. Namun demikian, itu merupakan lompatan besar dalam produktifitas kecepatan, karena program *EMTDC* sekarang bisa menggambarkan sistem mereka dari pada membuat daftar teks.

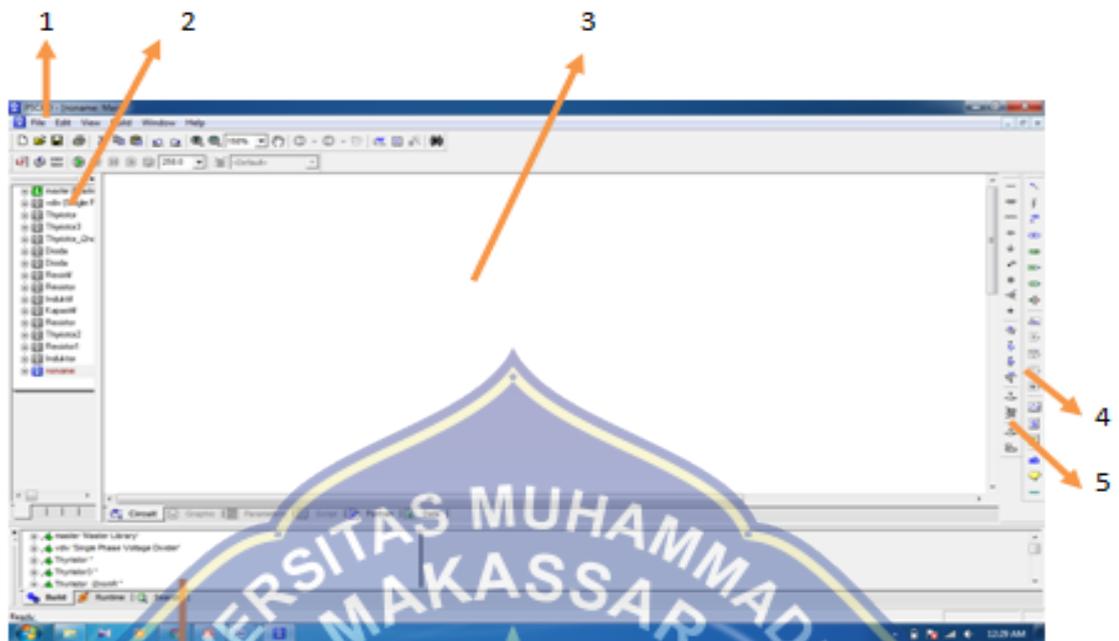
PSCAD / EMTDC adalah perangkat lunak yang kuat dan fleksibel yang digunakan dinegara-negara maju, kurang lebih 80 negara sudah menggunakan program tersebut. *PSCAD* memungkinkan pengguna untuk secara sistematis, menjalankan simulasi, menganalisis hasil dan pengolahan menjadi grafik. Fungsi *Online Plotting, control* dan meter juga disertakan, sehingga penggunaan dapat mengubah parameter selama menjalankan simulasi dan melihat hasilnya secara langsung (Muller, 2005).

EMTDC (Electro Magnetic Transient DC) merupakan interaktif program yang hasil keluaran akhirnya dapat dimonitor atau disimulasikan dalam besaran listrik, yang hasilnya dapat diatur melalui simulasi juga yang berupa kontak, slider, dial dan push-button. Sedangkan *RTDS* program interaktif yang hasil keluarannya dapat *diinterface* kan ke peralatan (meter ukur) atau plan yang dikontrol secara *real time*.

PSCAD dilengkapi dengan perpustakaan model yang akan deprogram dan diuji, mulai dari unsur-unsur elemen pasif sederhana dan fungsi kontrol, jalur transmisi dan kabel. Jika model tertentu tidak ada, *PSCAD* memberikan fleksibilitas dengan membangun sendiri modul konstum yang diinginkan, baik peralatan grafis dengan menggunakan model yang ada atau dengan memanfaatkan editor desain.



Gambar 2.33 Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

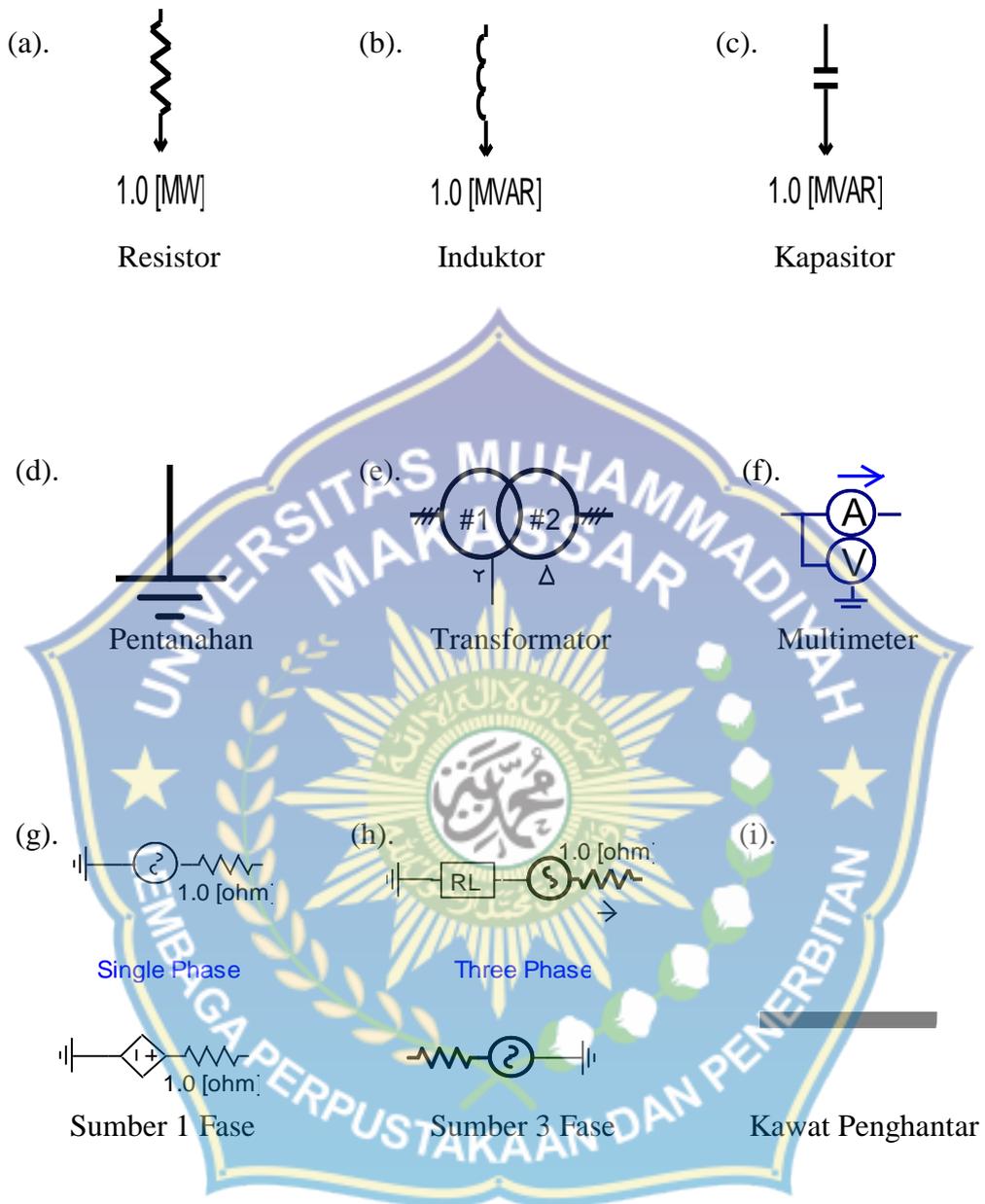


Gambar 2.34 Lembar Kerja Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Keterangan :

1. Menu
2. Nama File
3. Lembar Kerja
4. *Tool*
5. *Master Library*
6. Laporan Kerja

Laporan Kerja Berikut ini adalah beberapa model komponen yang umum ditemukan dalam sistem pembelajaran *PSCAD* :



Gambar 2.35 Beberapa Model Komponen Dalam PSCAD/EMTDC

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Umum

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode simulator “*Power System Computer Aided Desig / Electro Magnetic Transient DC*” (*PSCAD / EMTDC*), untuk mensimulasikan pengaruh beban linear dan beban nonlinear terhadap arus netral pada sistem tiga fase simetris.

B. Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat pelaksanaan penelitian yang kami lakukan yaitu :

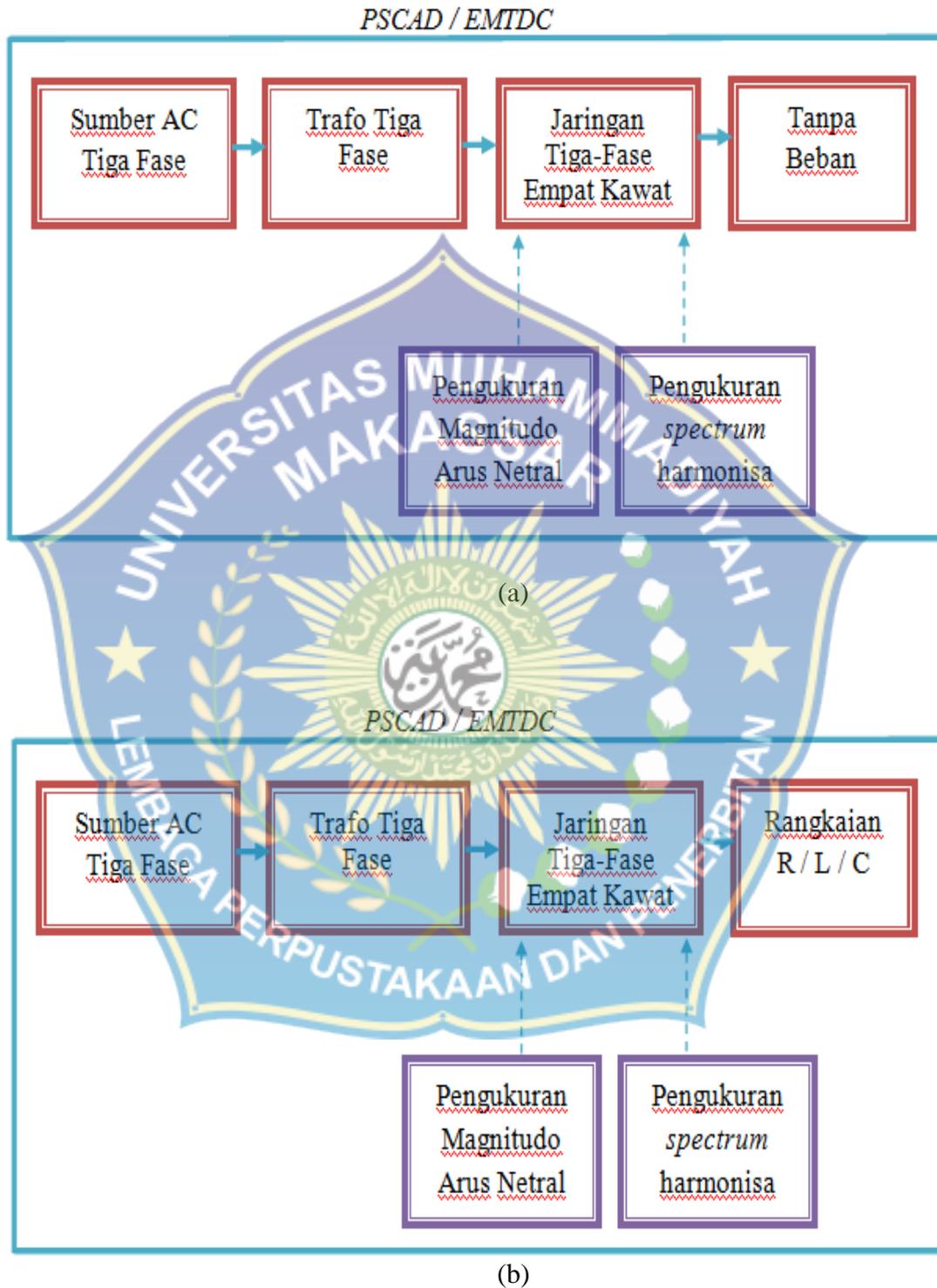
Waktu : Juli – Desember

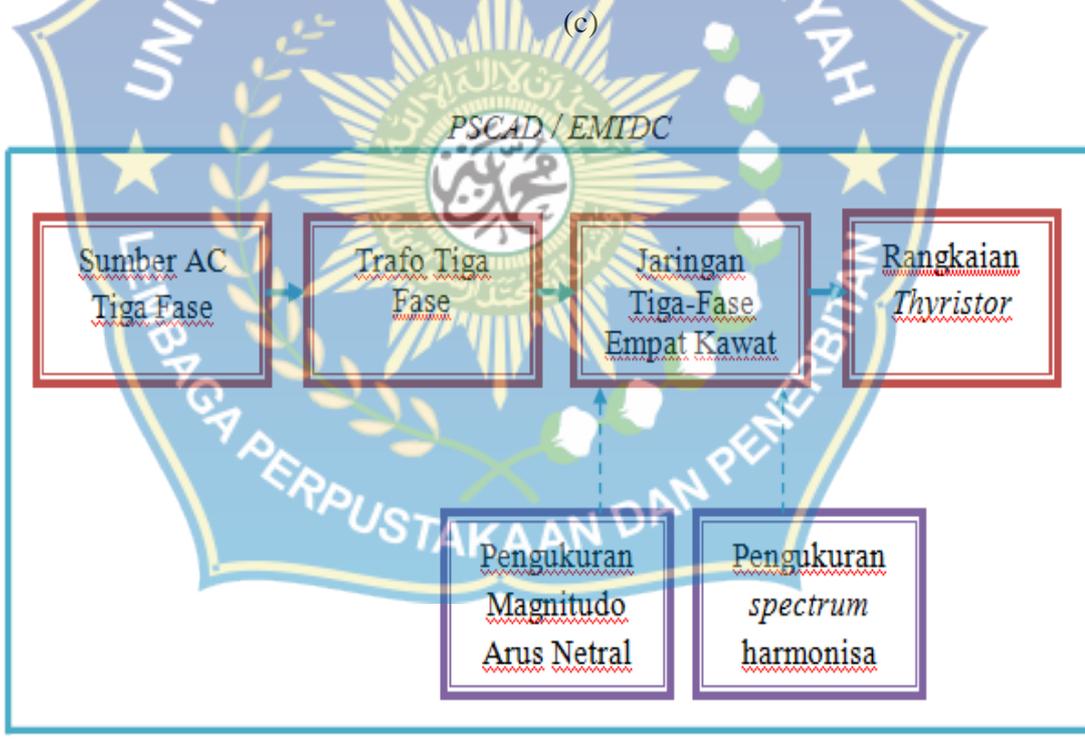
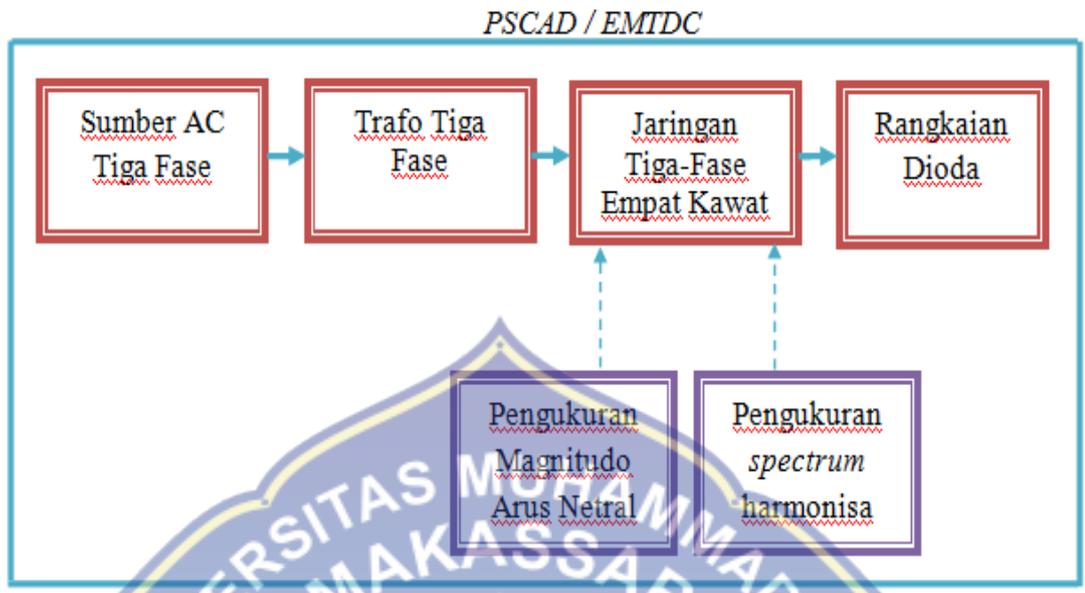
Tempat : Laboratorium Teknik Elektro
Universitas Muhammadiyah Makassar

C. Alat dan Bahan

1. Komputer dengan spesifikasi prosesor *Intel Inside* @2.00 GHz, 2.00 GB RAM
2. *Windows 7 Ultimate*
3. *Software PSCAD 4.2.1*
4. *Software Microsoft Office 2007*

D. Skema Penelitian





(d)

Gambar 3.1 Diagram Balok Skema Penelitian

Keterangan :

- a. Rangkaian Tanpa Beban
- b. Rangkaian R, L, dan C
- c. Rangkaian Dioda
- d. Rangkaian *Thyristor*

E. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yaitu :

1. Mulai

Pengajuan judul pada pembimbing, dimana judul ini akan menjadi dasar dari pembuatan skripsi.

2. Studi Pustaka

Tahap ini, penulis mengumpulkan dan mempelajari berbagai macam ilmu pengetahuan yang menyangkut tentang judul, baik itu dari artikel, modul, makalah, jurnal, eksplorasi internet dan buku-buku literature maupun referensi.

3. Pengambilan Data

Tahap ini, penulis mulai mengambil data atau mengumpulkan data yang akan di olah.

4. Pendesainan

Tahap ini, penulis mendesain alat yang akan dianalisa pada suatu perangkat lunak yang telah ditentukan.

5. Hasil Analisa

Pada tahap ini , penulis menganalisa hasil yang didapatkan, apakah desain tersebut layak untuk digunakan atau tidak.

6. Selesai

Semua langkah kerja dari mulai sampai hasil analisa telah selesai sehingga menghasilkan suatu desain yang sesuai dengan harapan, maka penelitian dapat dikatakan selesai.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

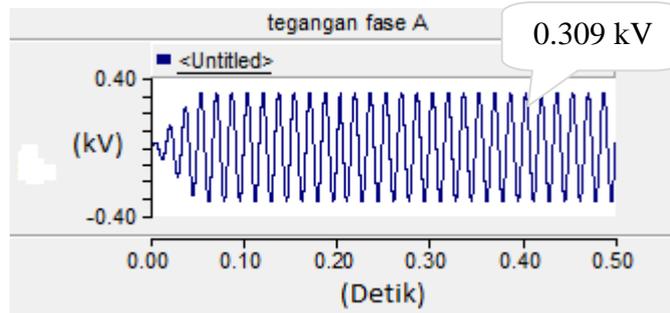
A. Model Sistem Daya Tanpa Beban

Model simulasi sistem daya tanpa beban merupakan rangkaian sumber yang terdiri dari sumber/generator tiga fase 20 kV, dan Frekuensi 60 Hz yang terhubung ke sebuah transformator tiga-fase, terhubung Δ -Y, Tegangan 20 kV – 0,380 kV dan daya 0,2 MVA.

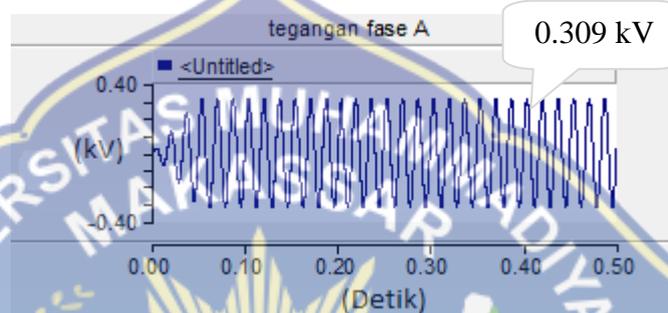
Gambar 4.1 memperlihatkan model *PSCAD/EMTDC* sistem daya tanpa beban dari sistem tiga fase. Simulasi ini menghasilkan tegangan yang dalam bentuk grafik fase-A, -B dan -C pada sistem daya tanpa beban. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 :



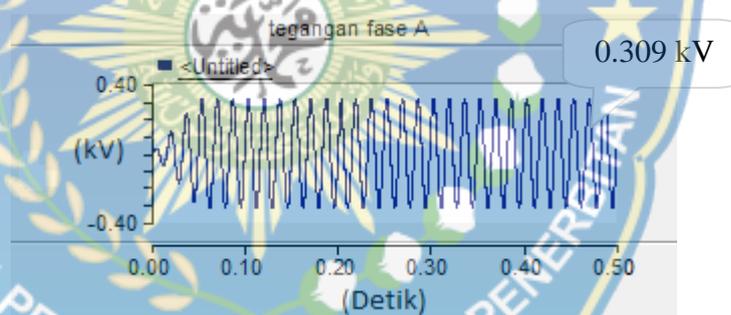
Gambar 4.1 Model Sistem Daya Tanpa Beban Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD/EMTD*



(a) Tegangan fase-A



(b) Tegangan fase-B



(c) Tegangan fase-C

Gambar 4.2 Grafik Tegangan Fase-A, -B, -C Pada Sumber Tanpa Beban

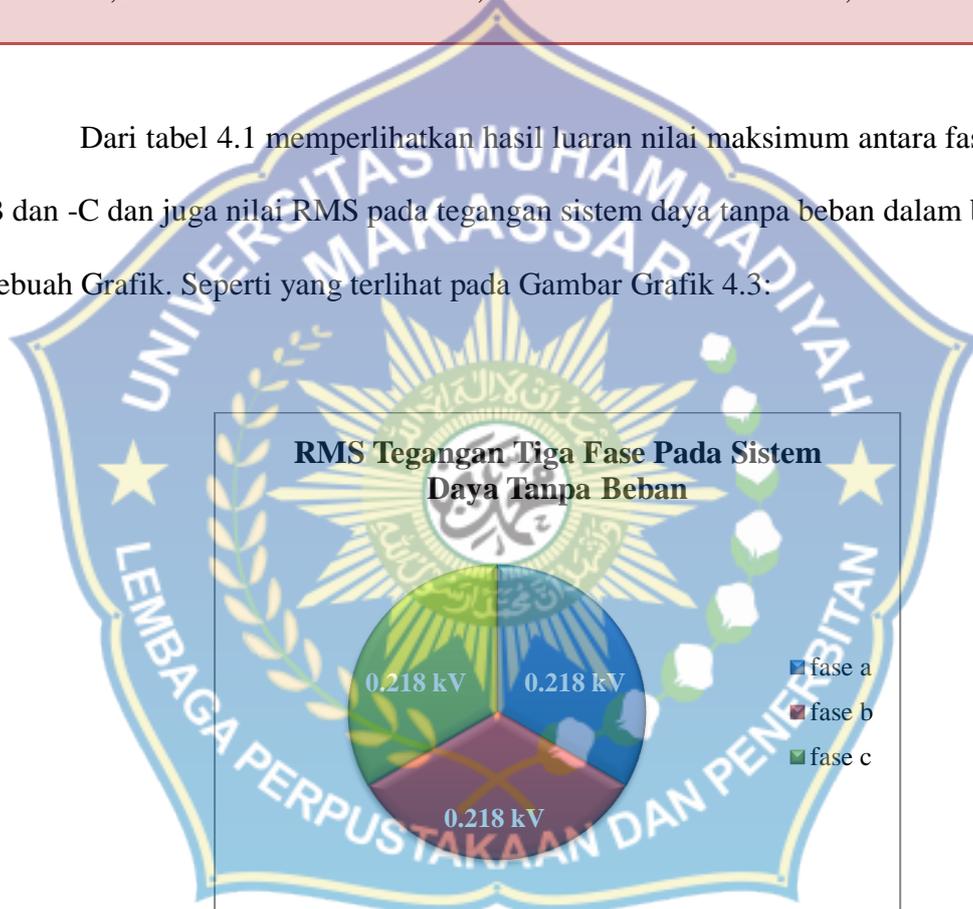
Gambar 4.2 memperlihatkan luaran tegangan fase-A, -B, dan -C pada sistem daya tanpa beban. Tegangan fase-A, -B dan -C memiliki nilai sebesar 0,309 kV dari hasil simulasi yang dilakukan pada rangkaian sistem daya tanpa beban. Hal ini membuktikan, bahwa tegangan pada sistem daya tanpa beban ke tiga fase tersebut adalah simetris.

Tabel 4.1 merupakan luaran dari tegangan fase-A, -B dan -C pada sistem daya tanpa beban.

Tabel 4.1 Hasil Luaran Tegangan Pada Sistem Daya Tanpa Beban

Tegangan fase (V_f)		
Fase A	Fase B	Fase C
0,309 kV	0,309 kV	0,309 kV

Dari tabel 4.1 memperlihatkan hasil luaran nilai maksimum antara fase-A, -B dan -C dan juga nilai RMS pada tegangan sistem daya tanpa beban dalam bentuk sebuah Grafik. Seperti yang terlihat pada Gambar Grafik 4.3:



Gambar 4.3 Grafik Nilai RMS Pada Tegangan Fase Di Sistem Daya Tanpa Beban

Gambar 4.3 dan Tabel 4.1 memiliki nilai hasil luaran pada tegangan sistem daya tanpa beban dengan nilai RMS sebesar 0,218 kV dan nilai maksimum sebesar 0,309 kV.

Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya tegangan pada sistem daya tanpa beban adalah simetris atau memiliki luaran yang sama yaitu 0,218 kV untuk RMS dan 0,309 kV pada tegangan maksimum di sistem daya tanpa beban.

B. Simulasi Sistem Tiga Fase Dengan Komponen Linear

B.1 Sistem Tiga Fase Dengan Beban Resistif



Gambar 4.4 Model Simulasi Beban Resistif Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD/EMTD*

Gambar 4.4 memperlihatkan model simulasi beban resistif pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* dengan menggunakan tiga buah beban resistor tiga fase yang terhubung Y. Model tersebut terdiri dari komponen utama yaitu generator, trafo dan beban resistor.

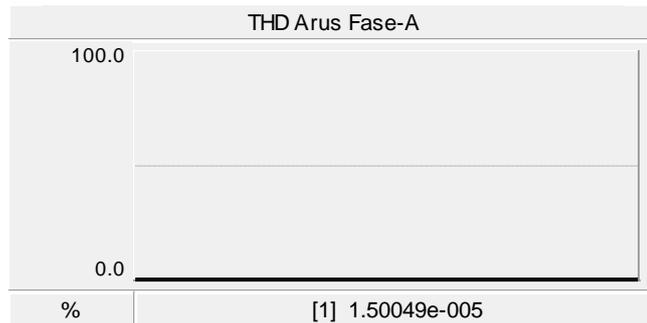
B.1.1 Penghantar Fase - A

Simulasi hasil luaran arus dan tegangan fase-A pada beban resistif dapat dilihat pada gambar 4.5 :



Gambar 4.5 Grafik Arus Dan Tegangan Fase-A Beban Resistif Yang Terhubung Y Pada Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Gambar 4.5 arus dan tegangan fase-A berbeban resistif terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus dan tegangan fase-A sebesar 0,3 kA dan 0,31 kV. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar fase-A adalah 0,3 kA atau sama dengan nol. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus fase dapat dilihat pada Gambar 4.6 :



(a) Grafik THD Fase-A



(b) Grafik Spektrum Harmonik Arus Fase-A

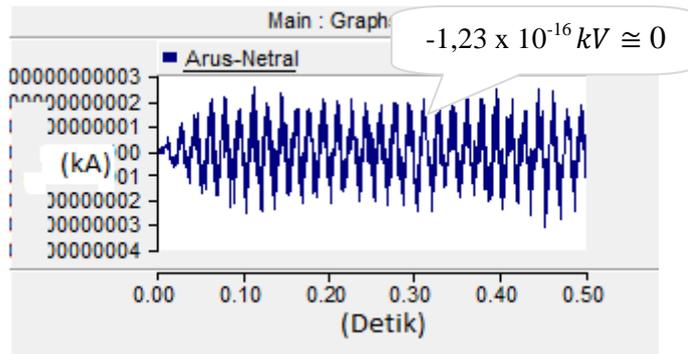
Gambar 4.6 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Beban Resistif

Gambar 4.6 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus fase-A di beban resistif tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui fase-A yakni $1,5 \times 10^{-5} \%$. Hal ini membuktikan bahwa beban resistif tidak menyebabkan distorsi arus.

B.1.2 Penghantar Netral

Simulasi hasil luaran pada penghantar arus netral yang melalui beban resistif dapat dilihat pada Gambar 4.7 :

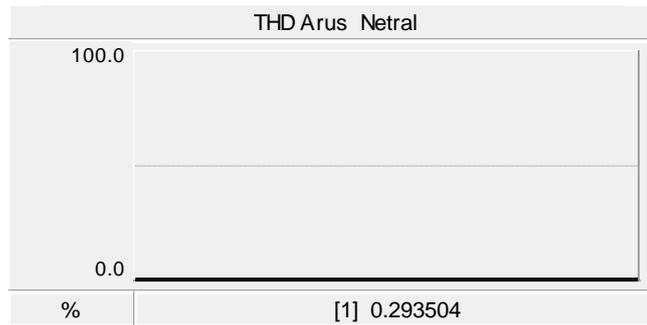


Gambar 4.7 Arus Netral Pada Beban Resistif

Gambar 4.7 memperlihatkan hasil simulasi beban resistif yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* menghasilkan arus netral.

Hasil simulasi yang didapatkan pada arus netral adalah $-1,23 \times 10^{-16} \text{ kA} \cong 0$. Hal ini membuktikan bahwa pada prinsipnya nilai arus yang melalui penghantar netral adalah nol.

Selain simulasi yang dilakukan pada beban resistif untuk arus netral, simulasi juga dilakukan untuk mengetahui jumlah THD dan spektrum harmonik arus netral seperti yang terlihat pada Gambar 4.8 :



(a) Grafik THD Arus Netral



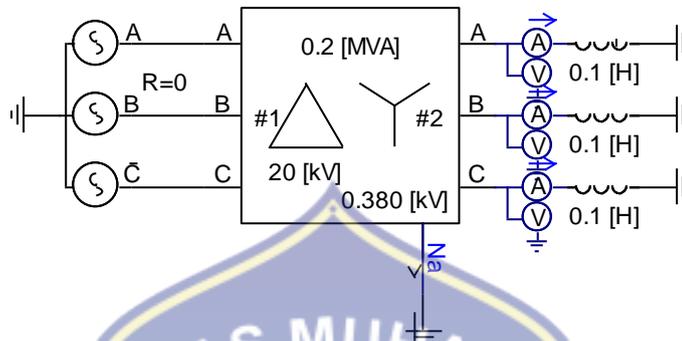
(b) Grafik Spektrum Harmonik Arus Netral

Gambar 4.8 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Beban Resistif

Gambar 4.8 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus netral di beban resistif tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus fase yakni 0,29 %. Hal ini membuktikan bahwa beban resistif tidak menyebabkan distorsi arus.

B.2 Sistem Tiga Fase Dengan Beban Induktif

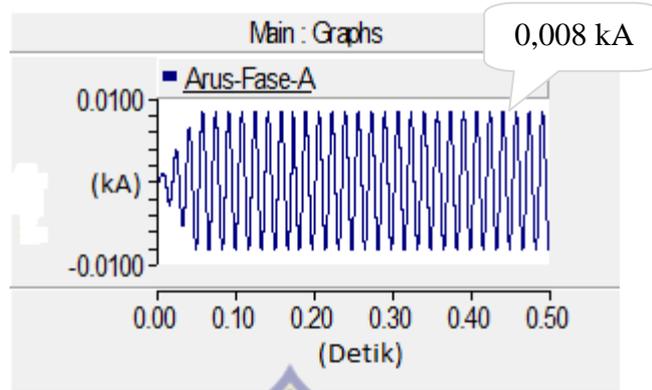


Gambar 4.9 Model Simulasi Beban Induktif Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD/EMTD*

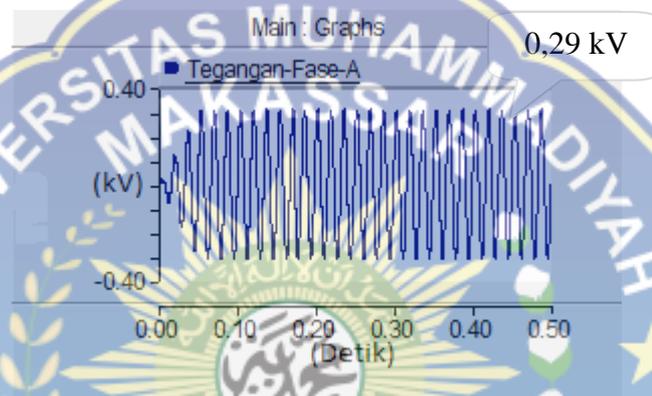
Gambar 4.9 memperlihatkan model simulasi pada komponen induktif yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* dengan menggunakan tiga buah beban induktor tiga fase yang terhubung Y. Model tersebut terdiri dari komponen utama yaitu generator, trafo dan beban induktif.

B.2.1 Penghantar Fase - A

Model simulasi dari beban induktif didapatkan luaran arus dan tegangan fase-A pada beban induktif. Luaran Arus dan tegangan fase-A yang berbeban induktif ini dapat dilihat pada Gambar 4.10 :



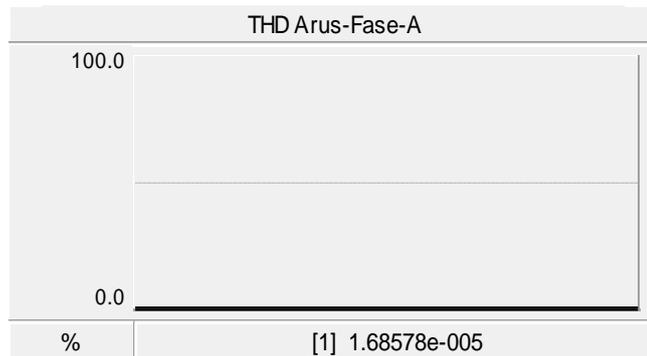
(a) Grafik Arus Fase-A



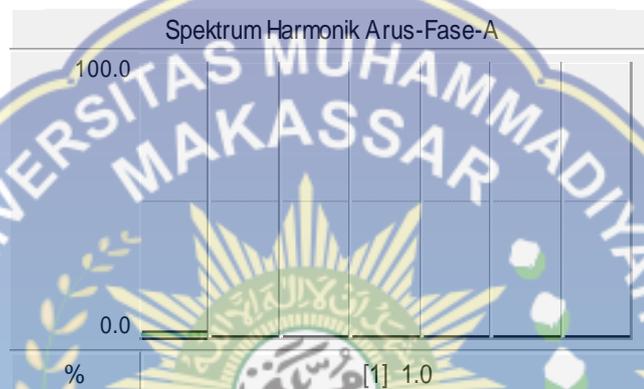
(b) Grafik Tegangan Fase-A

Gambar 4.10 Grafik Arus Dan Tegangan Fase-A Beban Induktif Yang Terhubung Y Pada Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Gambar 4.10 arus dan tegangan fase-A berbeban induktif terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus dan tegangan fase-A sebesar 0,008 kA dan 0,29 kV. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar fase-A adalah 0,004 kA atau sama dengan nol. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus fase dapat dilihat pada Gambar 4.11



(a) Grafik THD Arus Fase-A



(b) Grafik Spektrum Harmonik Arus Fase-A

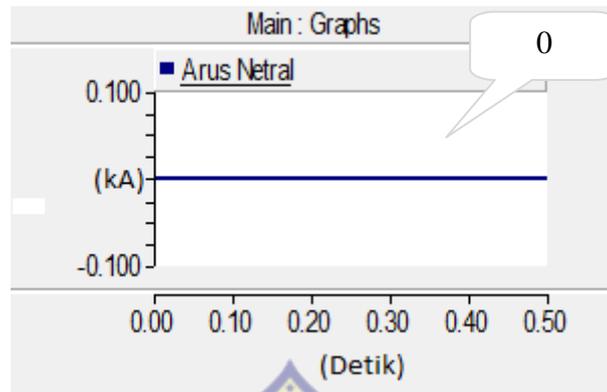
Gambar 4.11 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Beban Induktif

Gambar grafik 4.11 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus fase-A di beban induktif tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus fase yakni $1.68 \times 10^{-5} \%$. Hal ini membuktikan bahwa beban induktif tidak menyebabkan distorsi arus.

B.2.2 Penghantar Netral

Simulasi hasil luaran pada penghantar arus netral fase-A yang melalui beban induktif dapat dilihat pada Gambar 4.12 :

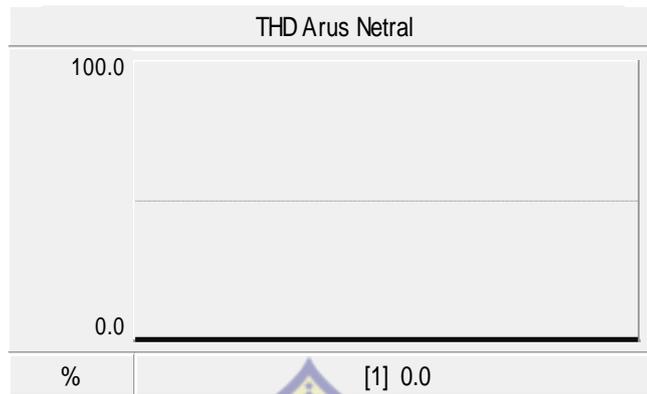


Gambar 4.12 Arus Netral pada Beban Induktif

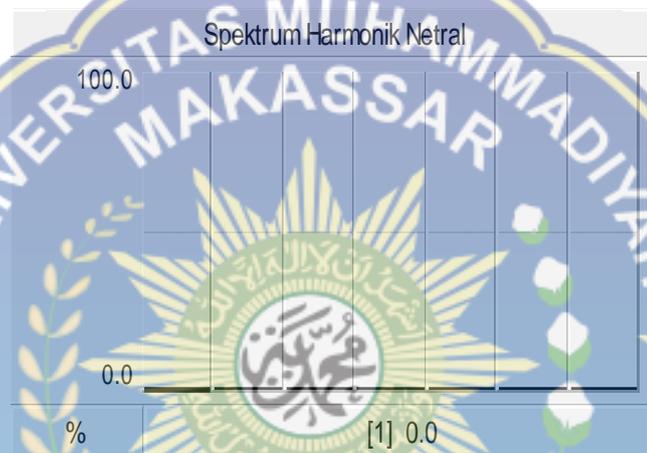
Gambar 4.12 memperlihatkan hasil simulasi beban induktif yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* menghasilkan arus netral.

Hasil simulasi yang didapatkan pada arus netral adalah 0. Hal ini membuktikan bahwa pada prinsipnya nilai arus yang melalui penghantar netral adalah nol.

Selain simulasi yang dilakukan pada beban induktif untuk arus netral, simulasi juga dilakukan untuk mengetahui jumlah THD dan spektrum harmonik arus netral seperti yang terlihat pada Gambar 4.13 :



(a) Grafik THD Arus Netral



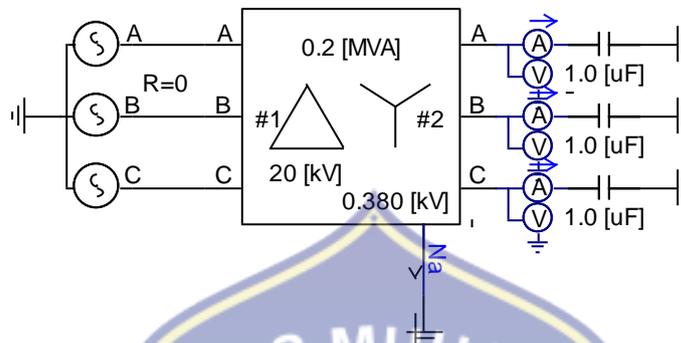
(b) Grafik Spektrum Harmonik Arus Netral

Gambar 4.13 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Beban Induktif

Gambar 4.13 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus netral di beban induktif tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus fase yakni 0 %. Hal ini membuktikan bahwa beban induktif tidak menyebabkan distorsi arus.

B.3 Sistem Tiga Fase Dengan Beban Kapasitif

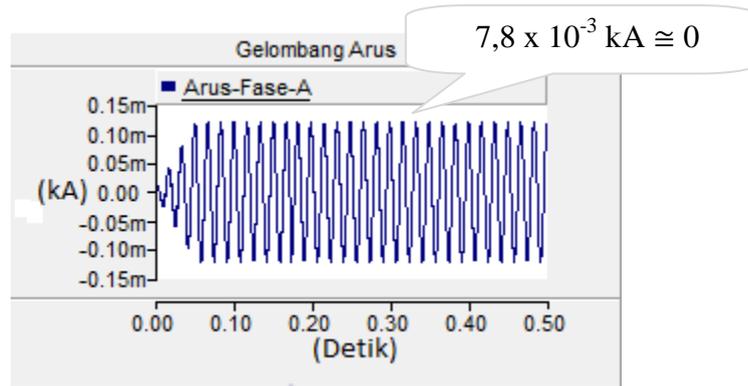


Gambar 4.14 Model Simulasi Beban Kapasitif Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD/EMTD*

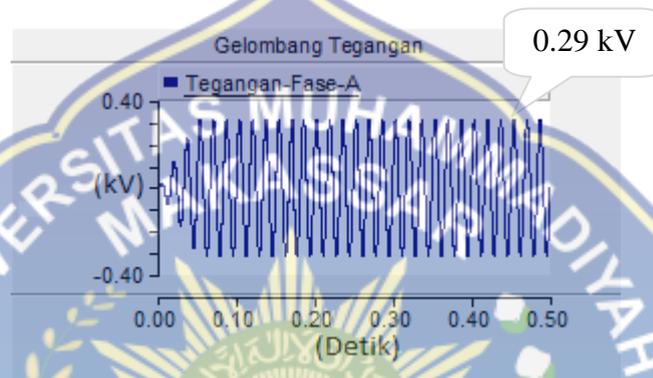
Gambar 4.14 memperlihatkan model simulasi pada komponen kapasitif yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* dengan menggunakan tiga buah beban kapasitor tiga fase yang terhubung Y. Model tersebut terdiri dari komponen utama yaitu generator, trafo dan beban kapasitif.

B.3.1 Penghantar Fase - A

Simulasi hasil luaran pada arus dan tegangan fase-A pada beban kapasitif dapat dilihat pada gambar 4.15 :



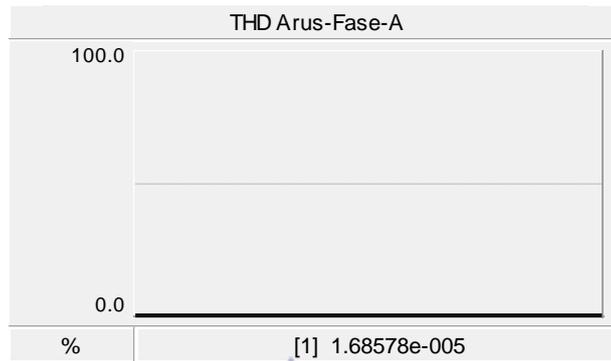
(a) Grafik Arus Fase-A



(b) Grafik Tegangan Fase-A

Gambar 4.15 Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Beban Kapasitif Yang Terhubung Y Pada Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Gambar 4.15 arus dan tegangan fase-A berbeban kapasitif terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus dan tegangan fase-A sebesar $7,8 \times 10^{-3} \text{ kA} \approx 0$ dan $0,29 \text{ kV}$. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar fase A adalah $7,8 \times 10^{-3} \text{ kA}$ atau sama dengan nol. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus fase dapat dilihat pada Gambar 4.16 :



(a) Grafik THD Arus Fase-A



(b) Grafik Spektrum Harmonik Arus Fase-A

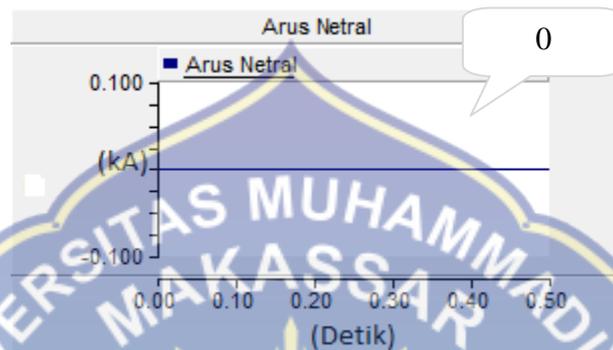
Gambar 4.16 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Beban Kapasitif

Gambar 4.16 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus fase-A di beban kapasitif tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus fase yakni $1,68 \times 10^{-5} \%$. Hal ini membuktikan bahwa beban kapasitif tidak menyebabkan distorsi arus.

B.3.2 Penghantar Netral

Model simulasi hasil luaran pada penghantar arus netral fase-A yang mengalir pada beban kapasitif dapat dilihat pada gambar 4.17 :

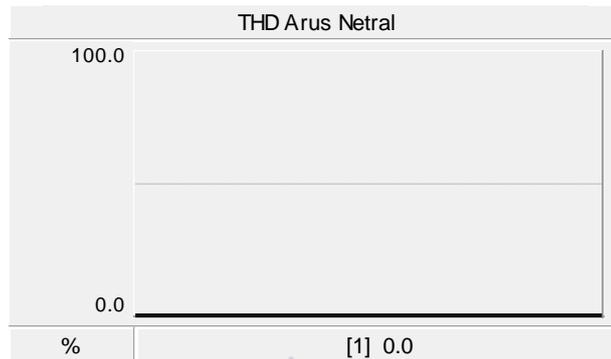


Gambar 4.17 Arus Netral Pada Beban Kapasitif

Gambar 4.17 memperlihatkan hasil simulasi beban kapasitif yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* menghasilkan arus netral.

Hasil simulasi yang didapatkan pada arus netral adalah 0 kA. Hal ini membuktikan bahwa pada prinsipnya nilai arus yang melalui penghantar netral adalah nol.

Selain simulasi yang dilakukan pada beban kapasitif untuk arus netral, simulasi juga dilakukan untuk mengetahui jumlah THD dan spektrum harmonik arus netral seperti yang terlihat pada gambar 4.18 :



(a) Grafik THD Arus Netral



(b) Grafik Spektrum Harmonik Netral

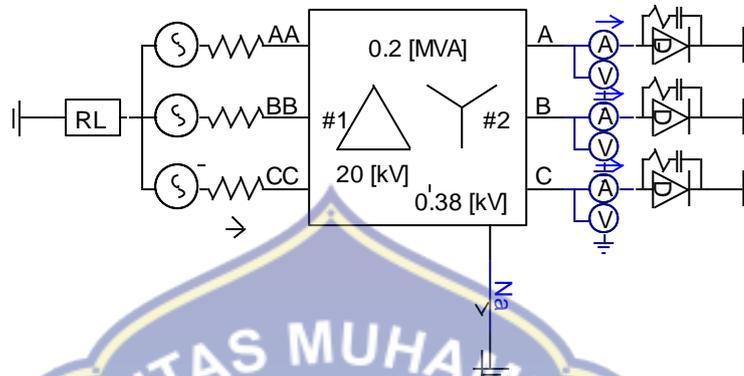
Gambar 4.18 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Beban Kapasitif

Gambar 4.18 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus netral di beban kapasitif tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus fase yakni 0 %. Hal ini membuktikan bahwa beban kapasitif tidak menyebabkan distorsi arus.

C. Simulasi Sistem tiga fase Dengan komponen Nonlinear

C.1 Sistem Tiga Fase Dengan Kompone Dioda

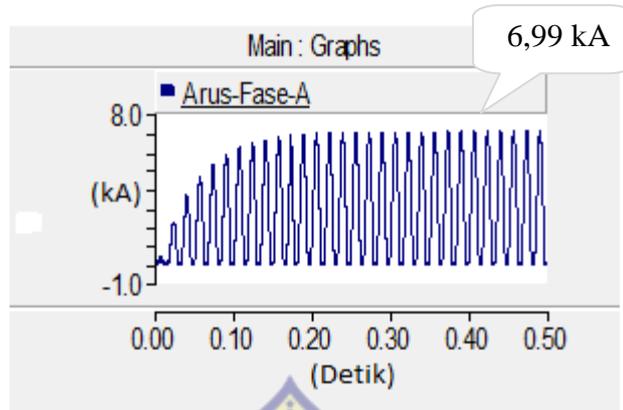


Gambar 4.19 Model Simulasi Dioda Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

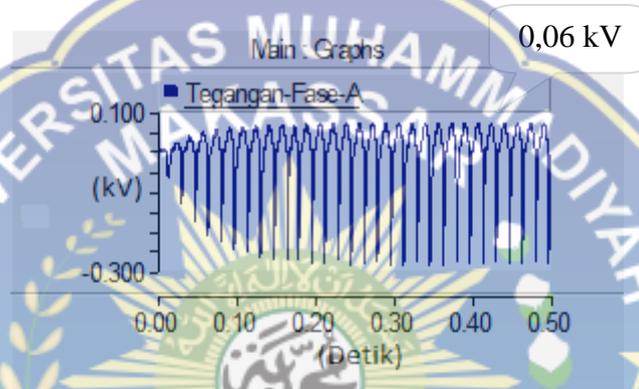
Gambar 4.19 memperlihatkan model simulasi pada komponen dioda yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* dengan menggunakan tiga buah komponen dioda tiga fase yang terhubung Y. Model tersebut terdiri dari komponen utama yaitu generator, trafo dan komponen dioda.

C.1.1 Pengantar Fase-A

Permodelan hasil simulasi komponen dioda yang telah dilakukan, menghasilkan luaran arus dan tegangan fase. Adapun arus dan tegangan fase hasil keluaran komponen diode dapat dilihat pada Gambar 4.20 :



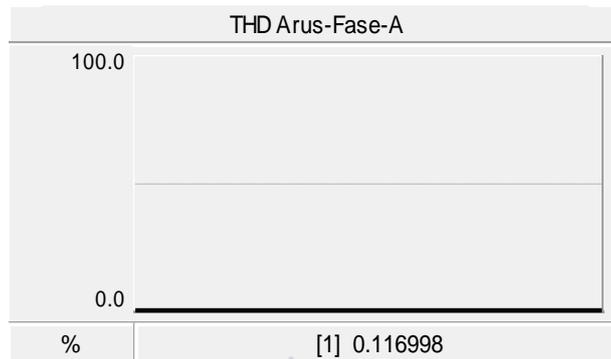
(a) Grafik Arus fase-A



(a) Grafik Tegangan Fase-A

Gambar 4.20 Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Pada Komponen Dioda yang Terhubung Y pada Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Gambar 4.20 arus dan tegangan fase-A komponen dioda terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus dan tegangan fase-A pada komponen dioda sebesar 6,99 kA dan 0,06 kV. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar fase-A sangat besar. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus fase dapat dilihat pada Gambar 4.21:



(a) Grafik THD Arus Fase-A



(b) Grafik Spektrum Harmonik Arus Fase-A

Gambar 4.21 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen Dioda

Gambar 4.21 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus fase-A di komponen dioda tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus fase menghasilkan nilai luaran sebesar 0,117 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen dioda masih memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 512-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Spektrum Harmonik Arus Fase-A

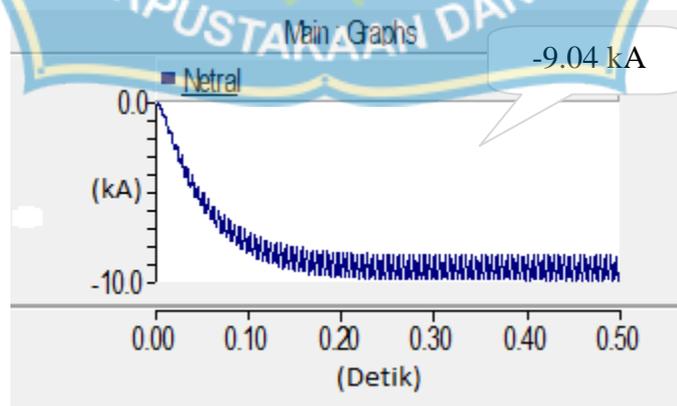
Spektrum Harmonik Arus fase-A pada Komponen Dioda						
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
1.00	0.098	0.053	0.029	0.015	0.0082	0.0055

Dari tabel 4.2 memperlihatkan grafik spektrum harmonik arus fase-A pada komponen dioda dengan H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan.

Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada Tabel 4.2.

C.1.2 Penghantar Arus Netral

Permodelan hasil simulasi komponen dioda yang telah dilakukan, menghasilkan sebuah arus netral. Adapun hasil keluaran penghantar arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.22:



Gambar 4.22 Arus Netral Pada Komponen Dioda

Gambar 4.22 arus netral komponen dioda terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus netral yang melalui komponen dioda sebesar $-9,04$ kA. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar arus netral adalah $-9,04$ kA. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.23:



Gambar 4.23 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen Dioda

Gambar 4.23 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus netral di komponen dioda tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai luaran sebesar 2696,69 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen dioda tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen Dioda
Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen Dioda

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
1.00	0.35	2662.81	3.23	0.32	420.99	66.03

Tabel 4.3 memperlihatkan grafik spektrum harmonik arus netral pada komponen dioda dengan H1 adalah fundamental dan H3 adalah dominan. Hal ini membuktikan bahwa H3 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H2, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada tabel 4.3.

Untuk mencari nilai THD dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$I_H = \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}$$

$$\text{THD} = \frac{I_H}{I_F} \times 100 \%$$

dimana:

THD : *Total Harmonisa Distrotion* (%)

I_{sh} : Arus harmonisa pada orde ke-h (A)

I_{s1} : Arus fundamental (Irms) dalam A

❖ Analisis Data

Rumus yang digunaka untuk mencari THD :

➤ Mencari THD pada Arus Netral

$$\begin{aligned} I_H &= \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_7^2} \\ &= \sqrt{0.35^2 + 2662.81^2 + 3.23^2 + 0.32^2 + 420.99^2 + 66.03^2} \\ &= \sqrt{7272162.41} \\ &= 2696.69 \\ \text{THD} &= \frac{I_H}{I_F} \times 100 \% \\ &= \frac{2696.69}{1.00} \times 100 \% \\ &= 2696.69 \% \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan THD untuk arus netral sama dengan hasil luaran pada simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak PSCAD/EMTDC untuk THD arus netral .

➤ Mencari THD pada Arus Fase-A

$$\begin{aligned} I_H &= \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_7^2} \\ &= \sqrt{0.098^2 + 0.053^2 + 0.029^2 + 0.015^2 + 0.0082^2 + 0.0055^2} \\ &= \sqrt{0.0135765} \end{aligned}$$

$$= 0.116$$

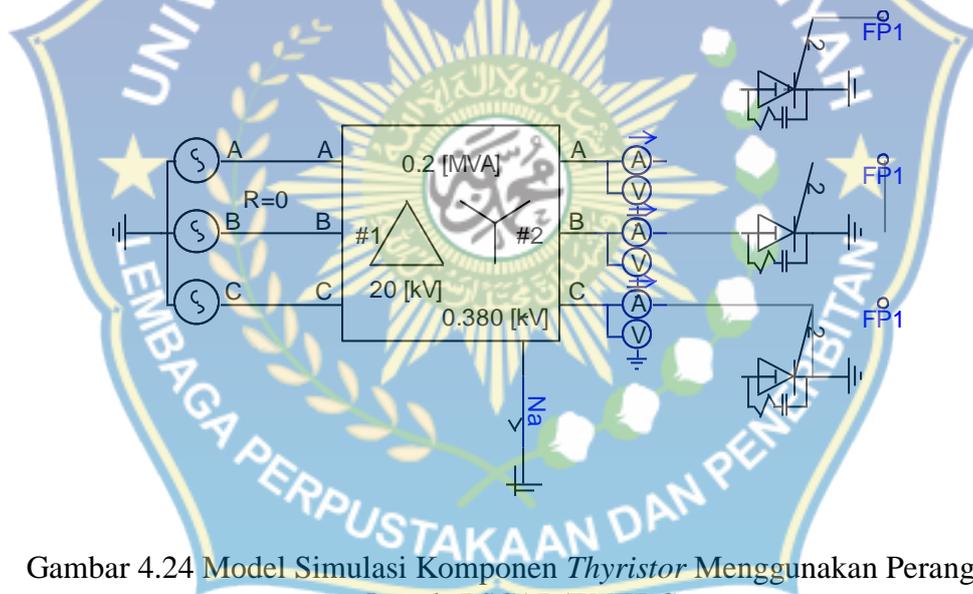
$$\text{THD} = \frac{IH}{IF} \times 100 \%$$

$$= \frac{0.116}{1.00} \times 100 \%$$

$$= 0.116 \%$$

Dari hasil perhitungan THD untuk arus fase-A pada sudut hampir sama dengan hasil luaran pada simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* untuk THD arus fase-A.

C.2 Sistem Tiga Fase Dengan Komponen *Thyristor*



Gambar 4.24 Model Simulasi Komponen *Thyristor* Menggunakan Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Gambar 4.24 memperlihatkan model simulasi pada komponen *thyristor* yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* dengan menggunakan tiga buah komponen *thyristor* tiga fase yang terhubung Y. Model tersebut terdiri dari komponen utama yaitu generator, trafo dan komponen *thyristor*.

C.2.1 Thyristor Sebagai Rectifier

C.2.1.1 Sudut Picu 30°

a. Penghantar Fase-A Pada Sudut Picu 30°

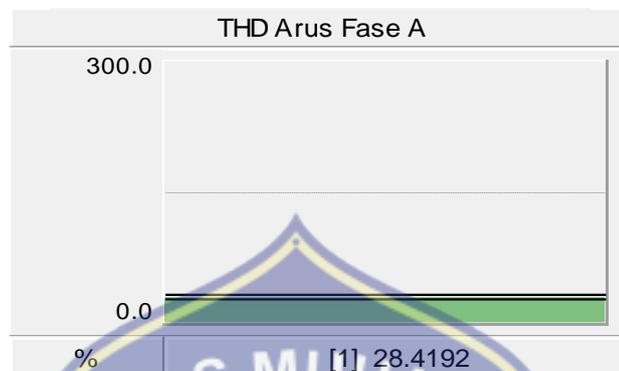
Model simulasi penghantar Fase-A pada komponen *thyristor* sudut 30° menghasilkan gelombang arus dan gelombang tegangan seperti pada Gambar 4.25



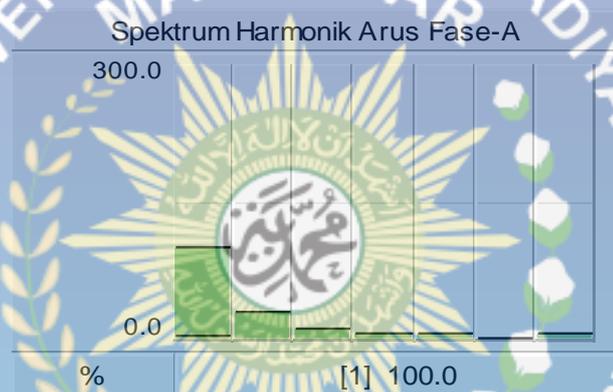
Gambar 4.25. Grafik Arus dan Tegangan Fase-A untuk Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Sudut 30° pada Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Hasil luaran gelombang arus dan tegangan pada simulasi *thyristor* sudut 30° yaitu sebesar 5,16 kA dan 0,26 kV seperti yang terlihat pada Gambar 4.25. Selain

gelombang arus dan tegangan, simulasi ini juga menghasilkan THD arus dan spektrum harmonik arus fase-A dapat dilihat pada Gambar 4.26 :



(a) THD Arus Fase-A



(b) Spektrum Harmonik Arus Fase-A

Gambar 4.26 Grafik THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus pada Komponen *Thyristor* Sudut 30°

Gambar grafik 4.26 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus fase di komponen *thyristor* dalam modes *rectifier* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus fase menghasilkan nilai luaran sebesar 28,42 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut

standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.4

Tabel 4.4 Luaran Spektrum Harmonik Arus Fase-A Komponen *Thyristor*

Dalam Modus *Rectifier* Dengan Sudut 30°

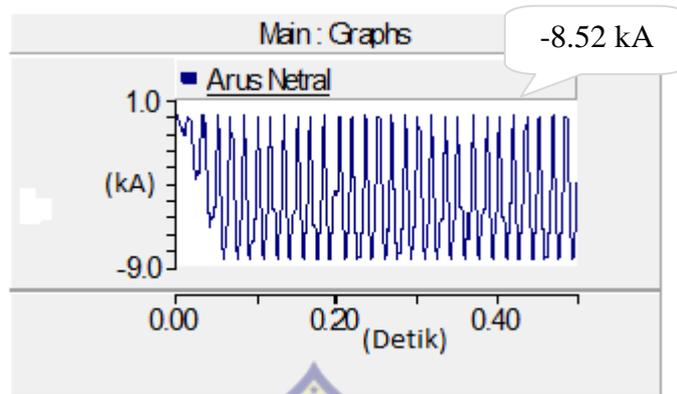
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	26.76	8.22	2.31	3.81	1.23	1.57

Tabel 4.4 memperlihatkan nilai hasil simulasi pada spektrum harmonik arus fase-A pada komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* Sudut 30° dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan.

Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada Tabel 4.4.

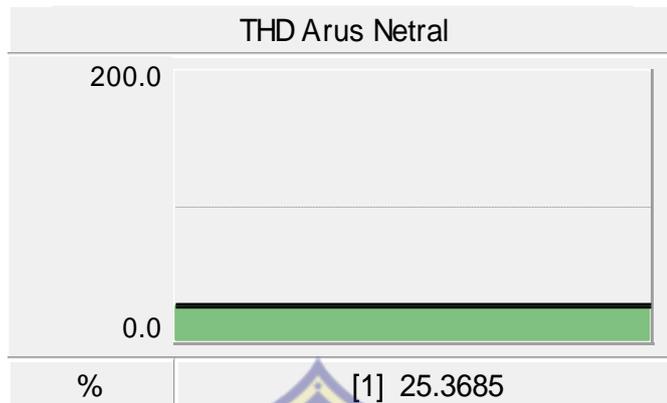
b. Arus Netral Pada Sudut Picu 30°

Permodelan hasil simulasi komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* yang telah dilakukan, menghasilkan sebuah arus netral. Adapun arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.27:

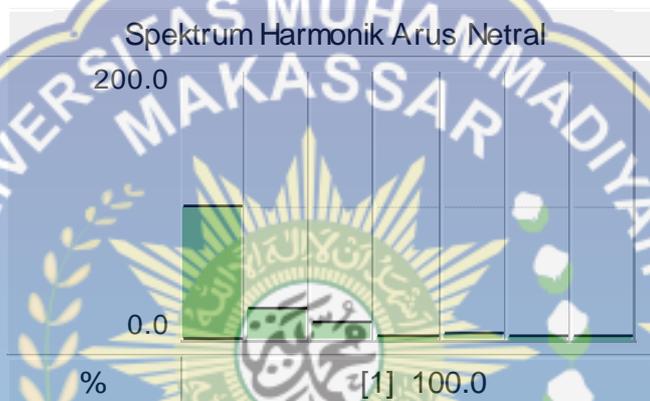


Gambar 4.27 Grafik Arus Netral sudut 30°

Gambar grafik 4.29 arus netral komponen *thyristor* terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus netral yang melalui komponen *thyristor* sebesar -8,52 kA. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar arus netral adalah -8,52 kA. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.28:



(a) THD Arus Netral



(b) Spektum Harmonik Arus Netral

Gambar 4.28 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Sudut 30°

Gambar Grafik 4.28 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus netral di komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai luaran sebesar 25,37 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L

adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.5

Tabel 4.5 Luaran Spektrum Harmonik Arus Netral Komponen *Thyristor*

Dalam Modus *Rectifier* Dengan Sudut 30°

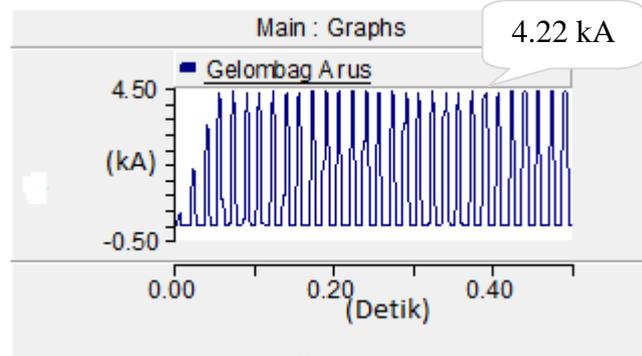
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	21.46	12.22	2.47	4.65	2.03	1.29

Tabel 4.5 memperlihatkan nilai hasil luaran spektrum harmonik arus netral pada komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan. Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada Tabel 4.5 diatas.

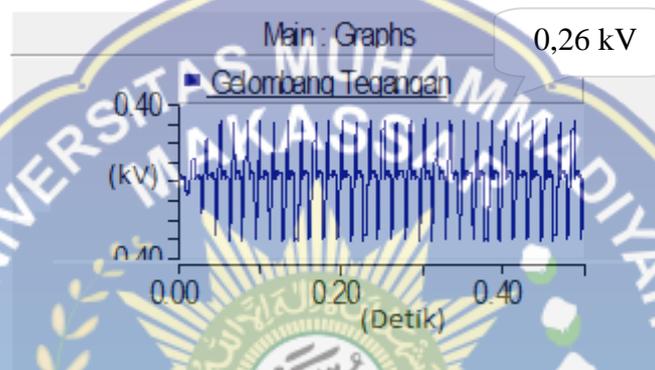
C.2.1.2 Sudut Picu 50°

a. Penghantar Fase A Pada Sudut Picu 50°

Simulasi penghantar Fase-A pada komponen *thyristor* sudut 50° menghasilkan gelombang arus dan gelombang tegangan seperti pada Gambar 4.31



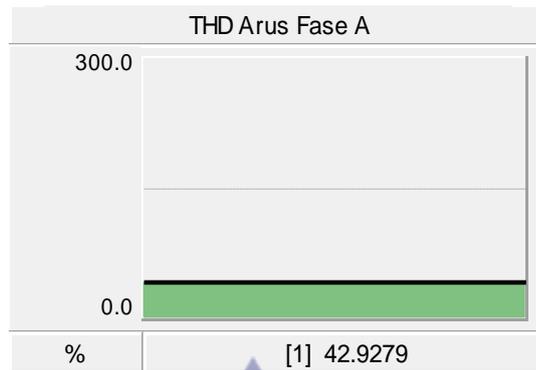
(a) Grafik Arus Fase-A



(b) Grafik Tegangan Fase-A

Gambar 4.29 Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Sudut 50° pada Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Hasil luaran gelombang arus dan tegangan pada simulasi *thyristor* sudut 50° yaitu sekitar 4,22 kA dan 0,3 kV seperti yang dilihat pada Gambar 4.31 di atas. Selain gelombang arus dan tegangan, simulasi ini juga menghasilkan THD arus dan spektrum harmonik arus.



(a) THD Arus Fase-A



(b) Spektrum Harmonik Arus Fase-A

Gambar 4.30 Grafik THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Sudut 50°

Gambar 4.30 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* pada luaran THD dan spektrum harmonik arus fase di komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai luaran sebesar 42,93 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi

telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.6

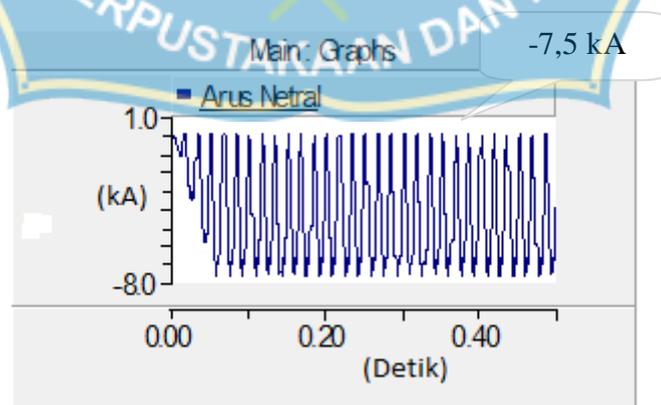
Tabel 4.6 Luaran Spektrum Harmonik Arus Fase-A Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Dengan Sudut 50°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	41.64	1.17	9.16	0.54	4.85	0.2

Tabel 4.6 memperlihatkan tabel spektrum harmonik arus netral pada komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan. Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7.

b. Arus Netral Pada Sudut Picu 50°

Permodelan hasil simulasi komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* yang telah dilakukan, menghasilkan sebuah arus netral. Adapun arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.31:



Gambar 4.31 Gelombang Arus Netral sudut 50°

Gambar 4.31 arus netral komponen *thyristor* terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus netral yang melalui komponen *thyristor* sebesar -7,5 kA. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar arus netral adalah -7,5 kA. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.32:



Gambar 4.32 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Sudut 50°

Gambar 4.32 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus netral di komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai luaran sebesar 25,56 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.7 :

Tabel 4.7 Luaran Spektrum Harmonik Arus Fase-A Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Dengan Sudut 50°

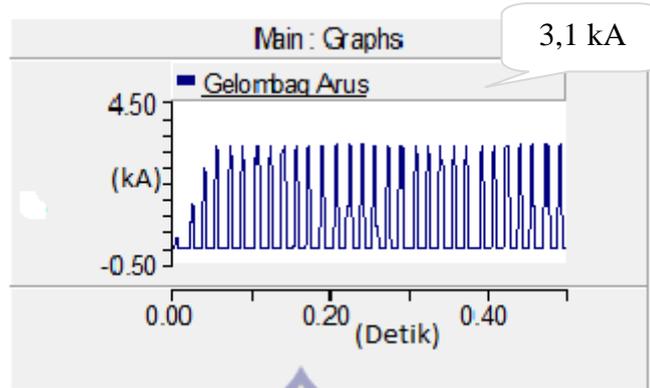
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	24.23	6.56	4.16	2.12	0.85	0.76

Tabel 4.7 memperlihatkan nilai spektrum harmonik arus netral pada komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan. Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7.

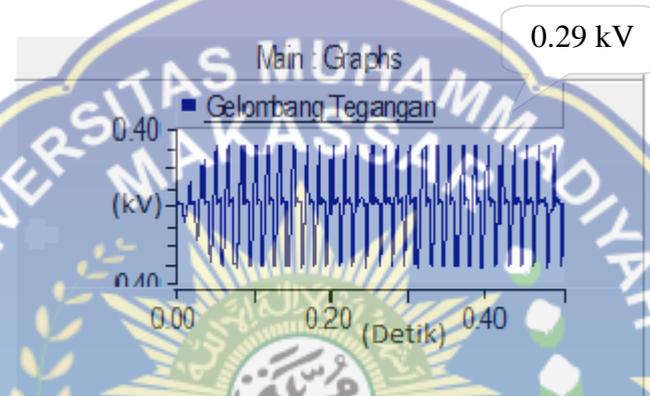
C.2.1.2 Sudut Picu 70°

a. Penghantar Fase A Pada Sudut Picu 70°

Simulasi penghantar Fase-A pada komponen *thyristor* sudut 70° menghasilkan gelombang arus dan gelombang tegangan seperti pada Gambar 4.35



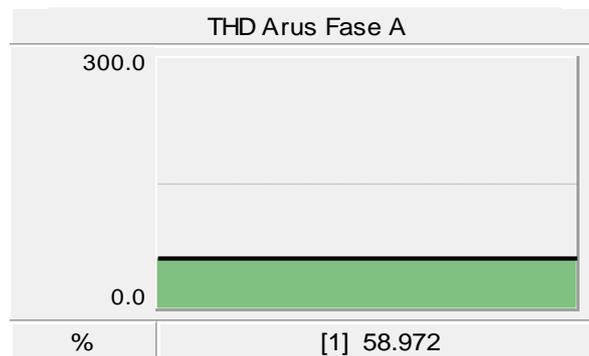
(a) Grafik Arus Fase-A



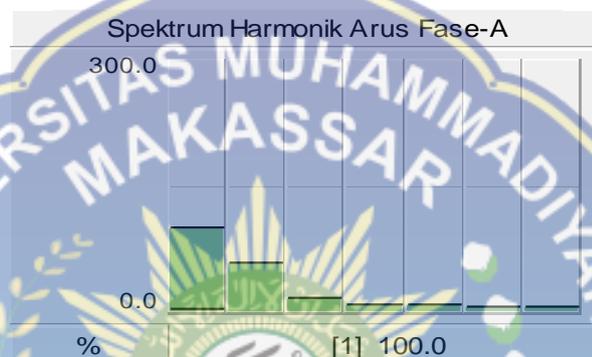
(b) Grafik Tegangan Fase-A

Gambar 4.33 Grafik Arus dan Tegangan Hasil Simulasi Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Sudut 70° Pada Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Hasil keluaran gelombang arus dan tegangan pada simulasi *thyristor* sudut 70° yaitu sekitar 3,1 kA dan 0,29 kV seperti yang dilihat pada Gambar 4.33 di atas. Selain gelombang arus dan tegangan, simulasi ini juga menghasilkan THD arus dan spektrum harmonik arus.



(a) THD Arus Fase-A



(b) Spektrum Harmonik Arus Fase-A

Gambar 4.34 Grafik THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Sudut 70°

Gambar 4.34 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* pada luaran THD dan spektrum harmonik arus fase di komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai keluaran sebesar 58,97 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada

simulasi telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.8 :

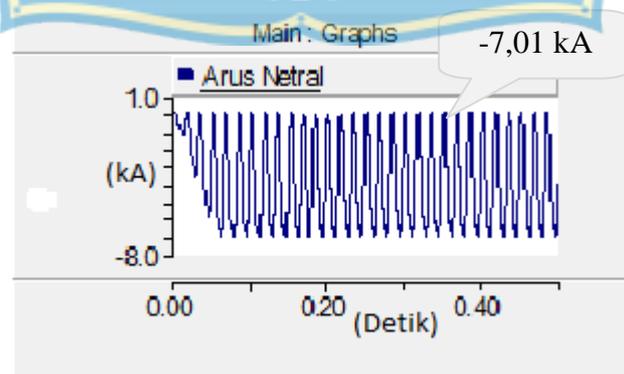
Tabel 4.8 Luaran Spektrum Harmonik Arus Fase-A Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Dengan Sudut 70°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	56.25	14.5	6.47	6.91	1.53	2.29

Tabel 4.8 memperlihatkan nilai spektrum harmonik arus fase pada komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan. Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada Tabel 4.8.

b. Arus Netral Pada Sudut Picu 70°

Permodelan hasil simulasi komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* yang telah dilakukan, menghasilkan sebuah arus netral. Adapun arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.35:



Gambar 4.35 Grafik Arus Netral sudut 70°

Gambar 4.35 arus netral komponen *thyristor* terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus netral yang melalui komponen *thyristor* sebesar -7,01 kA. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar arus netral adalah -7,01 kA. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.36:



Gambar 4.36 Grafik THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Sudut 70°

Gambar 4.36 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* pada keluaran THD dan spektrum harmonik arus netral di komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai keluaran sebesar 22,46 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{sc}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Luaran Spektrum Harmonik Arus Netral Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Rectifier* Dengan Sudut 30°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	21.69	2.97	1.98	3.08	1.05	3.18

Tabel 4.9 memperlihatkan nilai spektrum harmonik arus fase pada komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan. Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada Tabel 4.9.

Hasil simulasi yang telah dilakukan pada komponen *thyristor* dalam modus *rectifier* pada sudut 30°, 50°, dan 70° dapat dilihat pada tabel 4.10 dimana nilai THD antara arus fase-A dan arus netral mengeluarkan nilai yang berbeda antar sudut.

Tabel 4.10 Simulasi PSCAD/EMTDC Pada Komponen Thyristor Dalam Modus Rectifier Dengan Sudut 30°, 50°, dan 70°

THD	Sudut 30°	sudut 50°	Sudut 70°
Arus Fase-A	28.42	42.93	58.97
Arus Netral	25.37	25.56	22.46

Untuk mencari nilai THD dengan cara manual dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$I_H = \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}$$

$$THD = \frac{I_H}{I_F} \times 100 \%$$

dimana:

THD : Total Harmonisa Distortion (%)

I_H : Arus harmonisa

I_F : Arus fundamental

❖ Analisis Data

Rumus yang digunakan untuk mencari THD :

➤ Mencari THD pada Arus Fase

a. Sudut 30°

$$\begin{aligned}
 I_H &= \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_7^2} \\
 &= \sqrt{26,76^2 + 8,22^2 + 2,31^2 + 3,81^2 + 1,23^2 + 1,57^2} \\
 &= \sqrt{807,496} \\
 &= 28,42
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{THD} &= \frac{I_H}{I_F} \times 100 \% \\ &= \frac{28.42}{100} \times 100 \% \\ &= 28,42 \% \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan THD untuk arus fase A pada sudut 30° hampir sama dengan hasil luaran pada simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak PSCAD/EMTDC untuk THD arus fase A sudut 30° .

➤ **Mencari THD pada Arus Netral**

a. Sudut 30°

$$\begin{aligned} I_H &= \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_7^2} \\ &= \sqrt{21,46^2 + 12,22^2 + 2,47^2 + 4,65^2 + 2,03^2 + 1,29^2} \\ &= \sqrt{643,3684} \\ &= 25,36 \\ \text{THD} &= \frac{I_H}{I_F} \times 100 \% \\ &= \frac{25,36}{100} \times 100 \% \\ &= 25,36 \% \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan THD untuk arus netral pada sudut 30° hampir sama dengan hasil luaran pada simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak PSCAD/EMTDC untuk THD arus netral sudut 30° .

Dari hasil simulasi yang dilakukan pada komponen *thyristor* dengan menggunakan perangkat lunak PSCAD/EMTDC, dapat dilihat bahwa nilai THD dan Spektrum harmonik hampir sama dengan nilai hasil perhitungan secara manual. Dapat dilihat pada Tabel 4.11

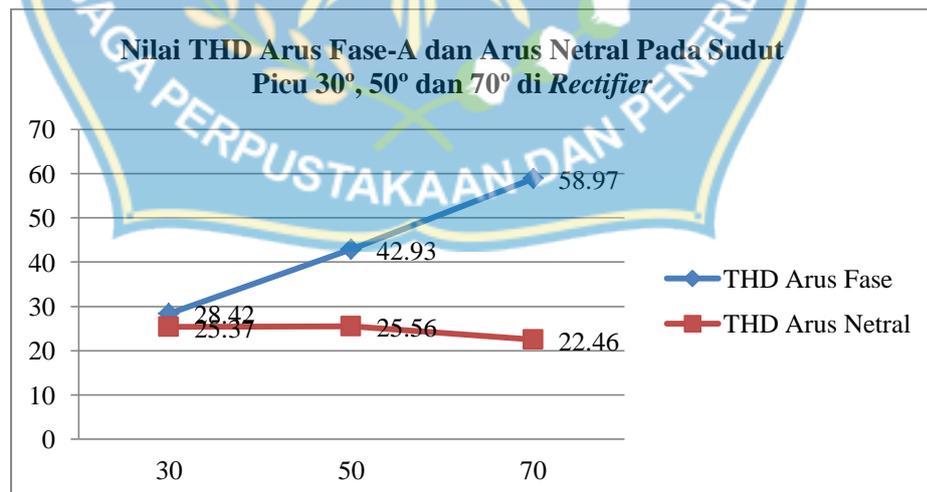
Tabel 4.11 Perhitungan Manual Pada Komponen Thyristor Dalam Modus

Rectifier Dengan Sudut 30°, 50°, dan 70°

THD	Sudut 30°	sudut 50°	Sudut 70°
Arus Fase-A	28.42	42.93	58.97
Arus Netral	25.36	25.56	22.46

Berdasarkan standar IEEE 519-1992 tentang batas THD berdasarkan rasio I_{sc}/I_L , maka pada sistem ini batas THD arus adalah 20 % , ini dapat disebut bahwa harmonisa belum mengganggu kualitas daya.

Tapi seperti yang kita lihat pada Tabel 4.9 dan 4.10 Nilai THD arus fase-A dan THD arus netral mendapatkan nilai lebih dari standar IEEE 519-1992, sehingga ini membuktikan bahwa THD pada sudut 30°, 50°, dan 70° mengalami gangguan kualitas daya. Perhatikan Grafik perbandingan pada Gambar 4.39



Gambar 4.37 Grafik Nilai THD Arus Fase Dan Arus Netral Pada Sudut Picu 30°, 50° dan 70 ° Untuk Komponen Thyristor Dalam Modus Rectifier

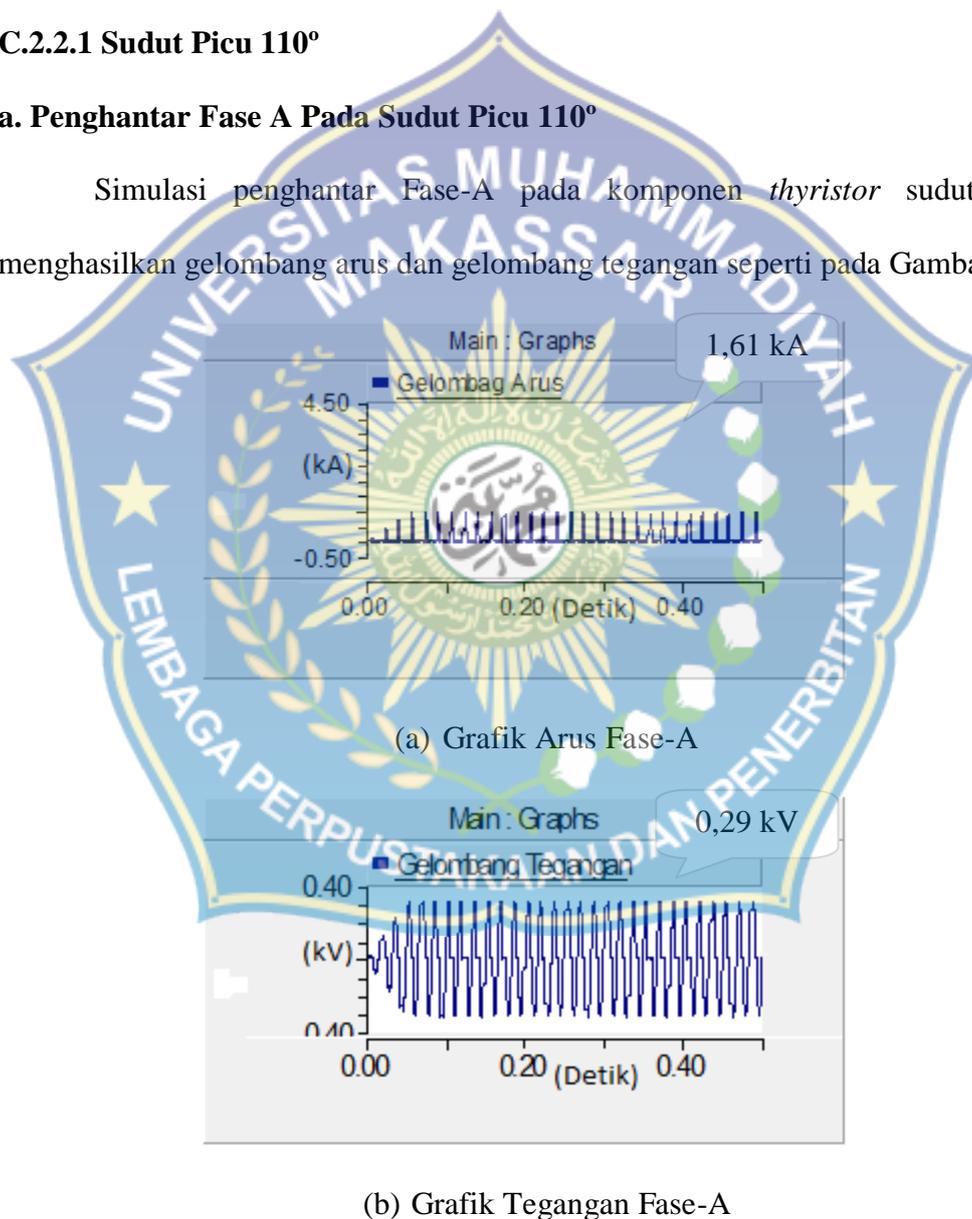
Gambar 4.37 memperlihatkan nilai THD arus fase dan arus netral pada sudut 30° , 50° dan 70° , di mana nilai THD arus netral mengalami penurunan dan nilai THD arus fase mengalami kenaikan.

C.2.2 Thyristor Sebagai Inverter

C.2.2.1 Sudut Picu 110°

a. Penghantar Fase A Pada Sudut Picu 110°

Simulasi penghantar Fase-A pada komponen *thyristor* sudut 110° menghasilkan gelombang arus dan gelombang tegangan seperti pada Gambar 4.46



Gambar 4.38 Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* sudut 110° pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*

Hasil keluaran gelombang arus dan tegangan pada simulasi *thyristor* sudut 110° yaitu sekitar 1,61 kA dan 0,29 kV seperti yang dilihat pada Gambar 4.40 di atas. Selain gelombang arus dan tegangan, simulasi ini juga menghasilkan THD arus dan spektrum harmonik arus seperti pada gambar 4.41:



Gambar 4.39 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* Sudut 110°

Gambar 4.39 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* pada keluaran THD dan spektrum harmonik arus fase di komponen *thyristor* dalam modus *inverter* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus fase menghasilkan nilai luaran sebesar 118,32 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan an rasio I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.12

Tabel 4.12 Luaran Spektrum Harmonik Arus Fase-A Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* Dengan Sudut 110°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	85.29	64.71	42.83	23.89	10.66	4.31

Tabel 4.12 memperlihatkan nilai spektrum harmonik arus fase pada komponen *thyristor* dalam modus *inverter* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan.

Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada tabel 4.12

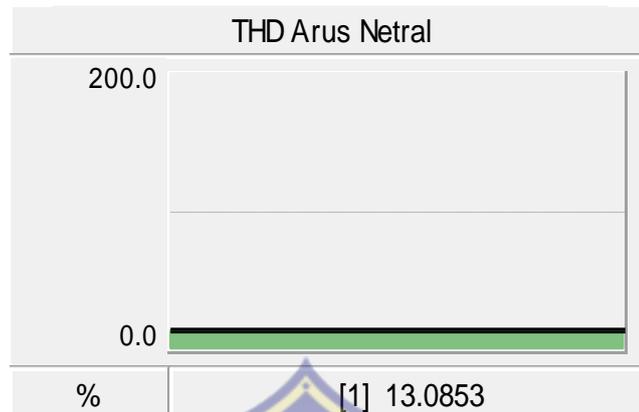
b. Arus Netral Pada Sudut Picu 110°

Permodelan hasil simulasi komponen *thyristor* dalam modus *inverter* yang telah dilakukan, menghasilkan sebuah arus netral. Adapun arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.40:

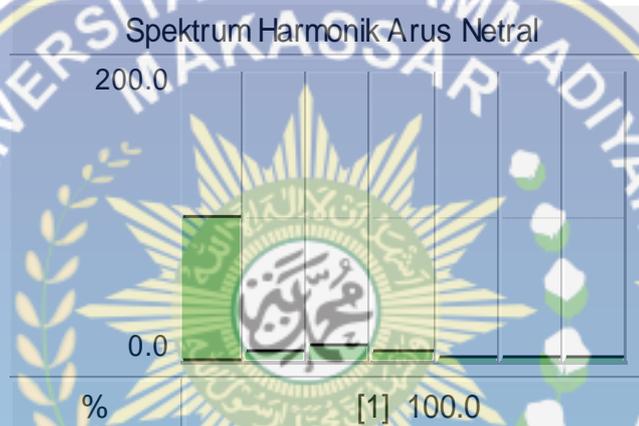


Gambar 4.40 Grafik Arus Netral Sudut 110°

Gambar 4.40 Arus netral komponen *thyristor* terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus netral yang melalui komponen *thyristor* sebesar -9,4 kA. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar arus netral adalah -9,4 kA. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.41:



(a) THD Arus Netral



(b) Spektum Harmonik Arus Netral

Gambar 4.41 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* Sudut 110°

Gambar 4.41 grafik memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* pada keluaran THD dan spektrum harmonik arus netral di komponen *thyristor* dalam modus *inverter* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai luaran sebesar 13,08 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah

20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.13

Tabel 4.13 Luaran Spektrum Harmonik Arus Netral Komponen *Thyristor*

Dalam Modus *Inverter* Dengan Sudut 110°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	5.83	10.08	5.53	1.13	1.19	1.49

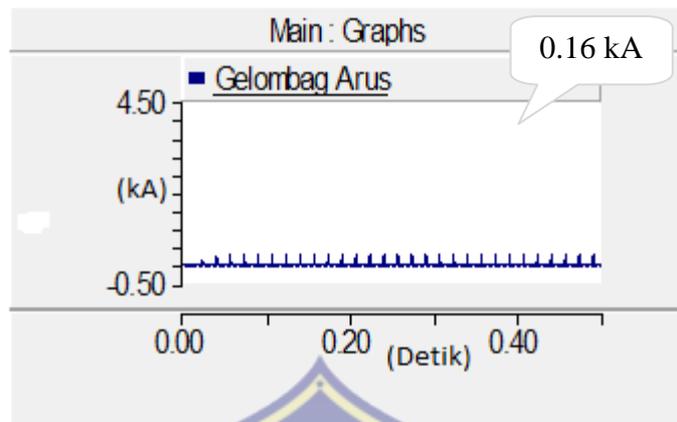
Tabel 4.13 memperlihatkan nilai spektrum harmonik arus fase pada komponen *thyristor* dalam modus *inverter* dimana H1 adalah fundamental dan H3 adalah dominan.

Hal ini membuktikan bahwa H3 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H2, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada Tabel 4.13.

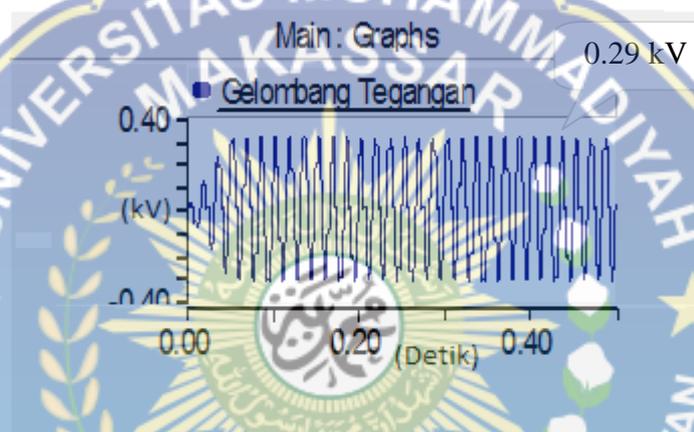
C.2.2.1 Sudut Picu 130°

a. Penghantar Fase A Pada Sudut Picu 130°

Simulasi penghantar Fase-A pada komponen *thyristor* sudut 130° menghasilkan gelombang arus dan gelombang tegangan seperti pada Gambar 4.44



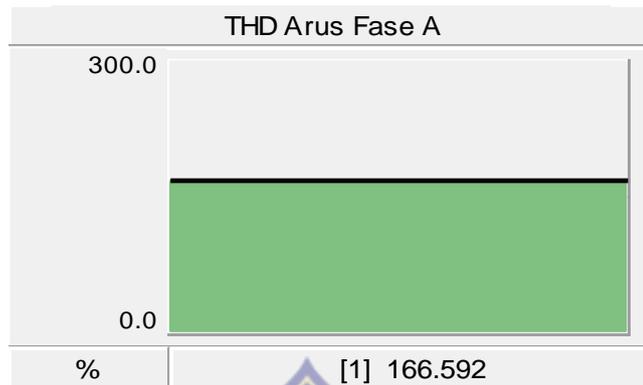
(a) Grafik Arus Fase-A



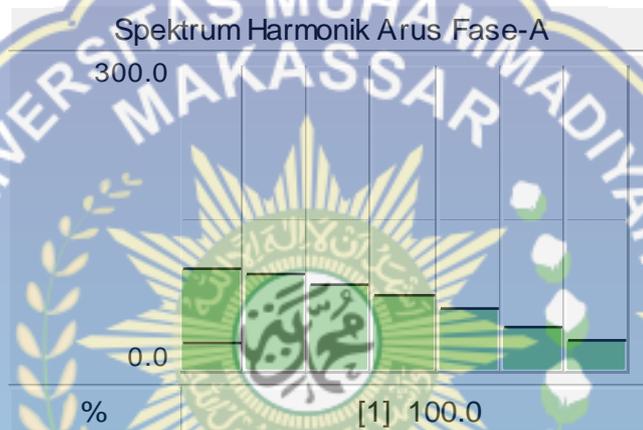
(b) Grafik Tegangan Fase-A

Gambar 4.42 Grafik Arus dan Tegangan Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* Sudut 130° Pada Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Hasil luaran gelombang arus dan tegangan pada simulasi *thyristor* sudut 130° yaitu sekitar 0,16 kA untuk arus dan 0,29 kV untuk tegangan seperti yang dilihat pada Gambar 4.44 di atas. Selain gelombang arus dan tegangan, simulasi ini juga menghasilkan THD arus dan spektrum harmonik arus.



(a) THD Arus Fase-A



(b) Spektrum Harmonik Arus Fase-A

Gambar 4.43 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* sudut 130°

Gambar 4.43 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* pada keluaran THD dan spektrum harmonik arus fase di komponen *thyristor* dalam modus *inverter* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai keluaran sebesar 166,59 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio

I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada tabel 4.14

Tabel 4.14 Luaran Spektrum Harmonik Arus Fase-A Komponen *Thyristor*

Dalam Modus *Inverter* Dengan Sudut 130°

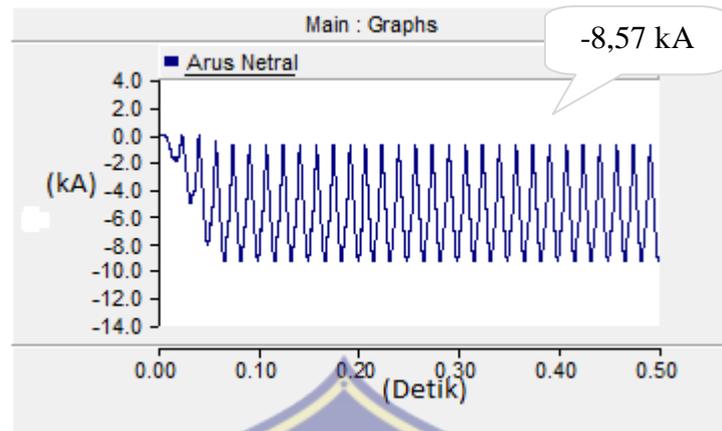
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	94.45	85.45	73.44	59.03	43.2	28.03

Tabel 4.14 memperlihatkan nilai spektrum harmonik arus fase pada komponen *thyristor* dalam modus *inverter* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan.

Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H2, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada tabel 4.14.

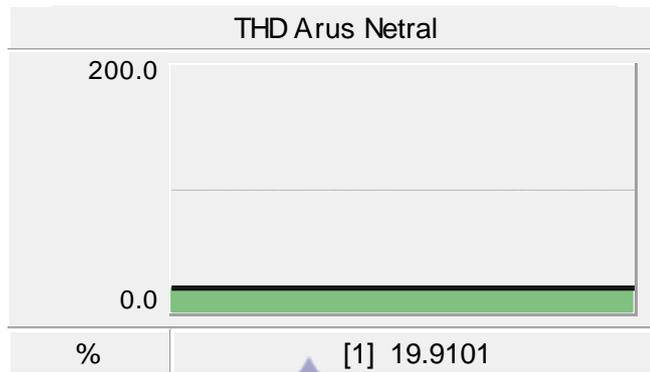
b. Arus Netral Pada Sudut Picu 130°

Permodelan hasil simulasi komponen *thyristor* dalam modus *inverter* yang telah dilakukan, menghasilkan sebuah arus netral. Adapun arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.44:

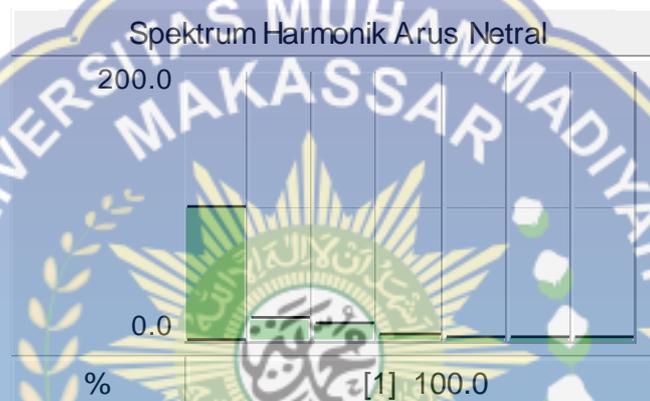


Gambar 4.44 Grafik Arus Netral sudut 130°

Gambar grafik 4.44 arus netral komponen *thyristor* terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus netral yang melalui komponen *thyristor* sebesar -8,57 kA. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.45:



(a) THD Arus Netral



(b) Spektrum Harmonik Arus Netral

Gambar 4.45 Grafik THD dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* sudut 130°

Gambar 4.45 grafik memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus netral di komponen *thyristor* dalam modus *inverter* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai luaran sebesar 19,91 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah

melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Luaran Spektrum Harmonik Arus Netral Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* Dengan Sudut 130°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	14.96	12.26	3.15	1.97	2.36	1.68

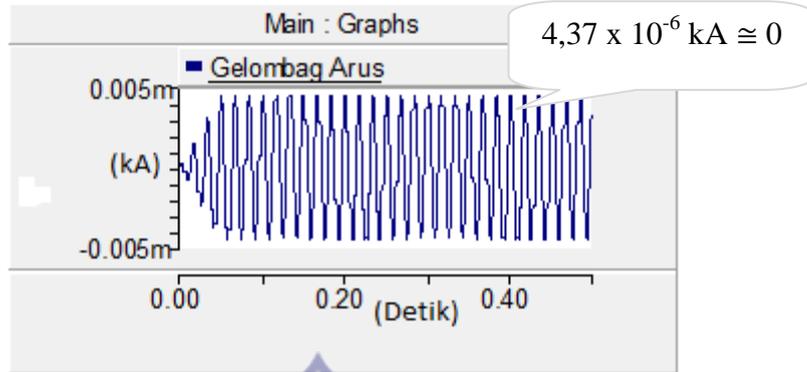
Tabel 4.15 memperlihatkan nilai spektrum harmonik arus fase pada komponen *thyristor* dalam modus *inverter* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan.

Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada Tabel 4.15

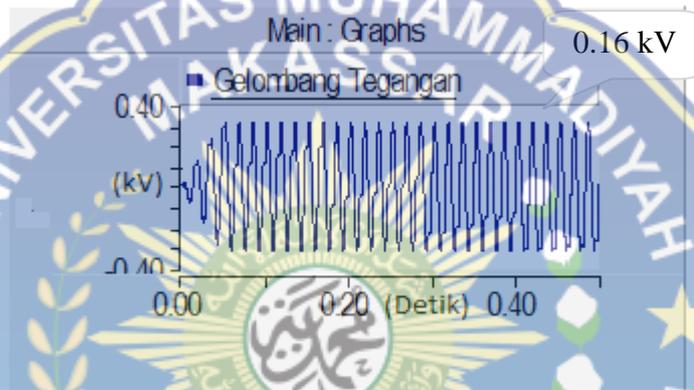
C.2.2.3 Sudut Picu 150°

a. Penghantar Fase A Pada Sudut Picu 150°

Simulasi penghantar Fase-A pada komponen *thyristor* sudut 150° menghasilkan gelombang arus dan gelombang tegangan seperti pada Gambar 4.48



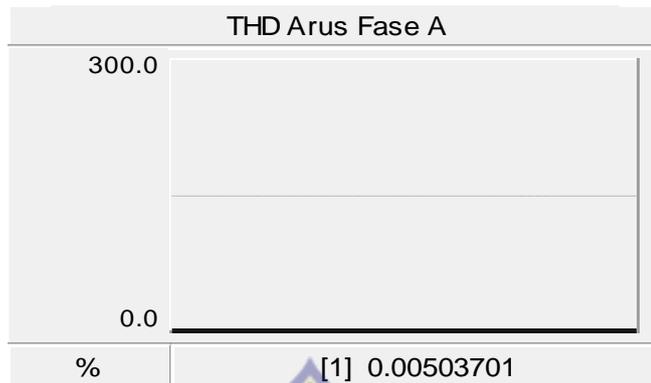
(a) Grafik Arus Fase-A



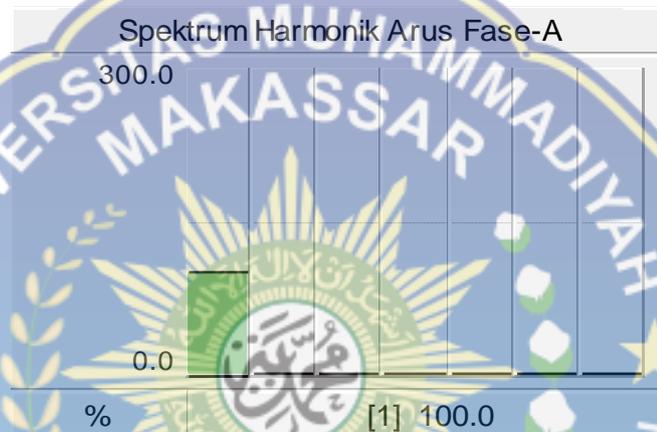
(b) Grafik Tegangan Fase-A

Gambar 4.46 Grafik Arus dan Tegangan Fase-A Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* sudut 150° Pada Perangkat Lunak *PSCAD/EMTDC*

Hasil luaran gelombang arus dan tegangan pada simulasi *thyristor* sudut 150° yaitu sekitar $4,37 \times 10^{-6} \text{ kA} \approx 0$ dan $0,29 \text{ kV}$ seperti yang dilihat pada Gambar 4.48 di atas. Selain gelombang arus dan tegangan, simulasi ini juga menghasilkan THD arus dan spektrum harmonik arus.



(a) THD Arus Fase-A



(b) Spektrum Harmonik Arus Fase-A

Gambar 4.47 Grafik THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus Fase-A Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* Sudut 150°

Gambar grafik 4.47 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus fase di komponen *thyristor* dalam modus *inverter* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai luaran sebesar 0 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi telah

melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.16

Tabel 4.16 Luaran Spektrum Harmonik Arus Fase-A Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* Dengan Sudut 150°

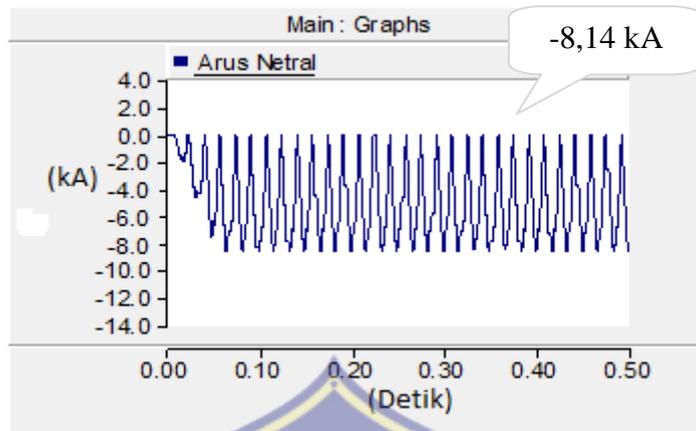
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	0.003	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001

Tabel 4.14 memperlihatkan nilai spektrum harmonik arus fase pada komponen *thyristor* dalam modus *inverter* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan.

Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H2, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada tabel 4.14

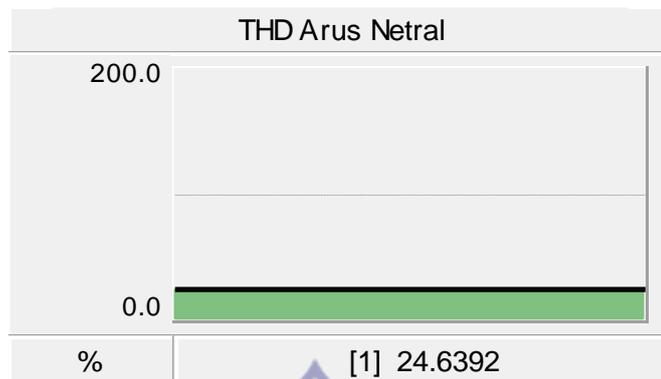
b. Arus Netral Pada Sudut Picu 150°

Permodelan hasil simulasi komponen *thyristor* dalam modus *inverter* yang telah dilakukan, menghasilkan sebuah arus netral. Adapun arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.61:

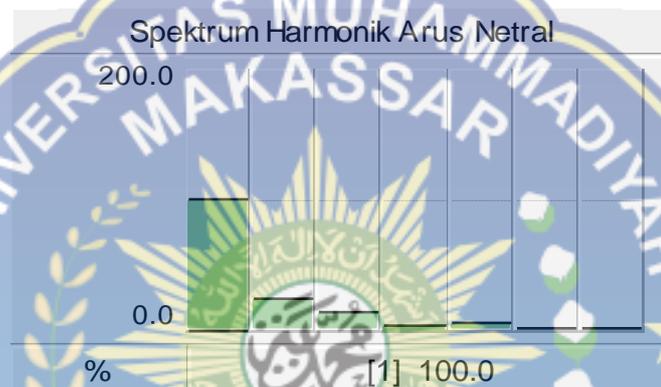


Gambar 4.48 Grafik Arus Netral Sudut 150°

Gambar 4.48 grafik arus netral komponen *thyristor* terhubung Y pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, menghasilkan arus netral yang melalui komponen *thyristor* sebesar -8,14 kA. Hal ini membuktikan, bahwa pada prinsipnya arus yang melalui penghantar arus netral adalah -8,14 kA. Sedangkan untuk grafik THD dan spektrum harmonik arus netral dapat dilihat pada Gambar 4.49:



(a) THD Arus Netral



(b) Spektrum Harmonik Arus Netral

Gambar 4.49 THD Arus dan Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter* sudut 150°

Gambar 4.49 memperlihatkan hasil simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC pada luaran THD dan spektrum harmonik arus netral di komponen *thyristor* dalam modus *inverter* tiga fase.

Nilai THD arus yang melalui arus netral menghasilkan nilai luaran sebesar 24,64 %. Hal ini membuktikan bahwa komponen *thyristor* masih tidak memiliki kualitas daya yang baik sesuai standar IEEE 519-1992 dimana batas distorsi menurut standar IEEE 519-1992 tentang batas THD arus berdasarkan rasio I_{SC}/I_L adalah 20% ini membuktikan bahwa arus netral yang dikeluarkan pada simulasi

telah melewati batas ketentuan dari standar IEEE 519-1992. Adapun nilai spektrum harmonik dapat dilihat pada Tabel 4.17

**Tabel 4.17 Luaran Spektrum Harmonik Arus Netral Komponen *Thyristor*
Dalam Modus *Inverter* Dengan Sudut 150°**

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	21.2	11.62	2.38	3.91	0.84	0.93

Tabel 4.17 memperlihatkan grafik spektrum harmonik arus fase pada komponen *thyristor* dalam modus *inverter* dimana H1 adalah fundamental dan H2 adalah dominan.

Hal ini membuktikan bahwa H2 dominan yaitu dengan nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai H3, H4, H5, H6 dan H7 seperti yang terlihat pada Tabel 4.17.

Dari hasil simulasi yang dilakukan pada komponen *thyristor* dengan menggunakan perangkat lunak *PSCAD/EMTDC*, dapat dilihat bahwa nilai THD dan spektrum harmonik hampir sama dengan nilai hasil perhitungan secara manual. Dapat dilihat pada Tabel 4.18

Tabel 4.18 Simulasi PSCAD/EMTDC Pada Komponen Thyristor Dalam Modus Inverter Dengan sudut 110°, 130°, dan 150°

THD	Sudut 110°	sudut 130°	Sudut 150°
Arus Fase-A	118.32	166.59	0.005
Arus Netral	13.08	19.91	24.64

Untuk mencari nilai THD dengan cara manual dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$I_H = \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}$$

$$THD = \frac{I_H}{I_F} \times 100 \%$$

dimana:

THD : Total Harmonisa Distrotion (%)

I_H : Arus harmonisa

I_F : Arus fundamental

❖ Analisis Data

Rumus yang digunakan untuk mencari THD :

➤ Mencari THD pada Arus Fase

➤ Sudut 110°

$$\begin{aligned}
 I_H &= \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_7^2} \\
 &= \sqrt{85,29^2 + 64,71^2 + 42,83^2 + 23,89^2 + 10,66^2 + 4,31^2} \\
 &= \sqrt{13999,1209} \\
 &= 118,32
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{THD} &= \frac{I_H}{I_F} \times 100 \% \\ &= \frac{118,32}{100} \times 100 \% \\ &= 118,32 \% \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan THD untuk arus fase A pada sudut 110° hampir sama dengan hasil luaran pada simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak PSCAD/EMTDC untuk THD arus fase A sudut 110° .

➤ **Mencari THD pada Arus Netral**

b. Sudut 110°

$$\begin{aligned} I_H &= \sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_7^2} \\ &= \sqrt{5,83^2 + 10,08^2 + 5,53^2 + 1,13^2 + 1,19^2 + 1,49^2} \\ &= \sqrt{171,0893} \\ &= 13,08 \\ \text{THD} &= \frac{I_H}{I_F} \times 100 \% \\ &= \frac{13,08}{100} \times 100 \% \\ &= 13,08 \% \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan THD untuk arus netral pada sudut 110° hampir sama dengan hasil luaran pada simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak PSCAD/EMTDC untuk THD arus netral sudut 110° .

Dari hasil simulasi yang dilakukan pada komponen *thyristor* sebagai *inverter* dengan menggunakan perangkat lunak PSCAD/EMTDC, dapat dilihat

bahwa nilai THD dan Spektrum harmonik hampir sama dengan nilai hasil perhitungan secara manual. Dapat dilihat pada Tabel 4.19 di bawah :

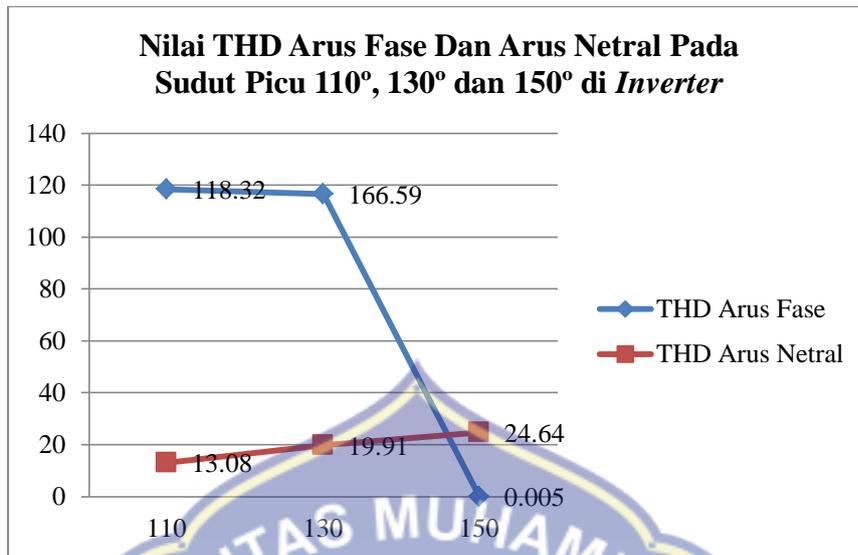
Tabel 4.19 Perhitungan Manual Pada Komponen *Thyristor* Dalam Modus

Inverter Dengan Sudut 110°, 130°, dan 150°

THD	Sudut 110°	sudut 130°	Sudut 150°
Arus Fase-A	118.32	166.59	0.005
Arus Netral	13.08	19.91	24.64

Berdasarkan standar IEEE 519-1992 tentang batas THD berdasarkan rasio I_{sc}/I_L , maka pada sistem ini batas THD arus adalah 20 % , ini dapat disebut bahwa harmonisa belum mengganggu kualitas daya.

Tapi seperti yang kita lihat pada Table 4.16 dan 4.17 Nilai THD aru fase-A dan THD arus netral mendapatkan nilai lebih dari standar IEEE 519-1992, sehingga ini membuktikan bahwa THD pada sudut 110°, 130, dan 150° mengalami gangguan kualitas daya. Dapat dilihat nilai THD setiap sudut pada grafik perbandingan Gambar 4.52



Gambar 4.50 Grafik Nilai THD Arus Fase Dan Arus Netral Pada Sudut Picu 110°, 130° dan 150° Untuk Komponen *Thyristor* Dalam Modus *Inverter*

Gambar 4.50 memperlihatkan nilai THD arus fase dan arus netral pada sudut 110°, 130° dan 150°, dimana nilai THD arus netral mengalami kenaikan dan nilai THD arus fase mengalami penurunan.

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

Dari hasil simulasi dan pengujian yang dilakukan dalam tugas akhir ini, maka dapat diambil kesimpulan :

1. Hasil simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* mengenai arus netral pada beban linear, pada prinsipnya menghasilkan arus netral, akan tetap nilai arus netral yang dikeluarkan sangat kecil atau bisa dikatakan nol, sehingga, ini tidak mempengaruhi kualitas daya. Dan simulasi ini sesuai dengan standar IEEE 519-1992 bahwa nilai arus netral dibawah batas maksimum yang telah ditentukan memiliki kualitas daya yang baik.
2. Untuk spektrum harmonik arus pada beban linear sesuai hasil simulasi yang dilakukan, memiliki keluaran hasil yang simetris.
3. Hasil simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* mengenai arus netral pada beban nonlinear, menghasilkan nilai arus netral yang tinggi sehingga ini mempengaruhi kualitas daya. Dan sesuai standar IEEE 519-1992 tentang batasan arus netral, apa bila nilai yang dikeluarkan melebihi batas maksimum maka akan mempengaruhi kualitas daya yang buruk.
4. Untuk spektrum harmonik arus pada beban nonlinear sesuai hasil simulasi yang dilakukan, tidak memiliki keluaran hasil yang simetris.

B. Saran

1. Penelitian selanjutnya, dapat di lakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan perangkat lunak *PSCAD/EMTDC* dengan kemampuan dan peralatan yang lebih baik dan lebih lengkap (*PSCAD Education Verson*).
2. Pada penelitian yang telah di lakukan hanya membahas mengenai arus netral dan spektrum harmonik pada beban linear dan nonlinear. Disarankan pada penelitian selanjutnya, untuk dapat menghitung harmonisa yang di sebabkan oleh beban yang berlebihan.



DAFTAR PUSTAKA

- Agustinus. Andrias Ade. “ *Penggunaan Filter Pasif Untuk Mereduksi Harmonisa Akibat Pemakaian Beban Non Linear*”. Institut Teknologi Sepuluh November. 2011.
- Amalia. Rizka & Refdinal Nazir. September 2015 “ *Pemodelan Dan Simulasi Beban Non-Linier 3-Fasa Dengan Metoda Sumber Arus Harmonik*”. Jurnal. Volume 4, No.2
- Badaruddin. 2012. “*Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon*”. Laporan Penelitian. Universitas Marcu Buana. Jakarta.
- Faharuddin. Andi & Kurnia Putra. “*Analisis Pengaruh Elemen Linear dan Nonlinear Terhadap Distorsi Harmonik Menggunakan PSCAD*”. Universitas Muhammadiyah Makasara & Universitas Andalas Padang.
- Faharuddin. Andi & Gunawan Wibisana. 2012. “*Simulasi Kualitas Daya Saluran Distribusi Sekunder Perumahan*”. Jurnal. Volume 1. No. 1. Universitas Muhammadiyah Makasara & Universitas Andalas Padang.
- Fahdi. Rumata Sebayang & A.Rachman Hasibuan, Agustus 2013. “*Analisis Perbaikan Faktor Daya Beban Resistif, Insuktif, Kapasitif Generator Singron 3 Fasa Menggunakan Metode Pottier*”, Jurnal. Volume 3, No.2 Universitas Sumatra Utara.
- Irianto. Chairul Gagarin, Maulana Sukmawidjaja, Aditya Wisnu. Februari 2008. “*Mengurangi Harmonisa Pada Transformator 3 Fase*”. JETri, Jurnal. Volume 7. No 2. Universitas Trisakti.
- Keysight. Technologies “*Detecting Harmonics in an AC Signal*”. Published in USA 5989-7687EN. August 1, 2014. www.keysight.com
- Muller. Craig, P. Eng. “*PSCAD (Power Systems Computer Aided Design)*”. Software Development Manager. September 2005
- Rodríguez. Pedro, J. Ingancio Candela, Alvaro Luna, Lucian Asiminoaei, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg. Agustus 2009. “*Current Harmonics Cancellation In Three-Phase Four-Wire Systems By Using a Four-Branch Star Filtering Topology*”. Jurnal. IEEE Transactions On Power Electronics, Volume 24, NO. 8.
- Salu. Denny S. Tandil, Ir Fielman Lisi, MT, Ir. Hans Tumaliang, MT, Lyli S. Patras, ST., MT. 2013. “*Sistem Pengaturan Kecepatan motor Ac Satu Fase*”

Dengan Menggunakan Thyristor". Jurnal Teknik Elektro-FT UNSRAT. Manado.

Setiawan. Awan, Oktober 2007. "*Kajian Pengaruh Harmonisa Terhadap Sistem Tenaga Listrik*". Jurnal. Volume 05, No. 02.

Setiadji. Julius Sentosa, Tabrani Machmudsyah, & Yanuar Isnanto. "*Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi*". Universitas Kristen Petra. 2006.

Sunyoto. "*Sambungan Transformator Tiga-Fase*". UDIKLAT PLN. Semarang. 2002.

Tanoto. Yusak, Limboto Limantara, Christian Khandy Lestanto. Maret 2005. "*Simulasi Active Filter dan Sistem Kerja Rangkaian Dalam Meredam Harmonisa pada Vacuum Casting Induction Furnace Dengan Daya 9 kW, 13.8 kVA, 200 V, 3 Fasa, 50/60 Hz*". Jurnal. Volume 5, No 1. Universitas Kristen Petra.

Wibisana. Boromeus Sakti. 2008. "*Analisis Perbandingan Pembacaan Sistem Tenaga Listrik Tiga-Fase*". Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Wildi. Theodore. 2006. "*Electrical Machines, Driver and Power Systems*". By Sperika Enterprises Ltd. Published by Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458.

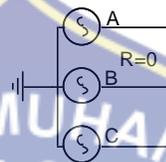


LAMPIRAN

LAMPIRAN A

Komponen-komponen yang digunakan dalam permodelan rangkaian simulasi penggunaan pada *PSCAD/EMTDC*, antara lain :

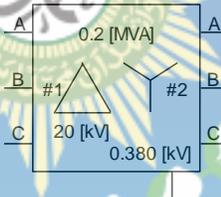
1. Sumber/Generator



Gambar A.1. Bentuk Komponen Generator

Generator adalah komponen yang menghasilkan energy listrik dari sumber energy mekanik, biasanya menggunakan induksi elektromagnetik.

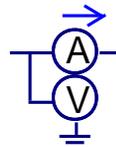
2. Transformtor



Gambar A.2. Bentuk Komponen Transformtor

Transformator adalah komponen untuk menyalurkan energy listrik ke tegangan rendah maupun ketegangan tinggi

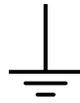
3. Multimeter



Gambar A.3 Bentuk Komponen Multimeter

Multimeter adalah kompoen yang berfungsi untuk mengukur nilai arus (kA), tegangan (kV), tegangan RMS (kV) dan sudut fase (Derjat/radians).

4. Groun



Gambar A.4. Bentuk Komponen Ground

Ground adalah suatu komponen yang digunakan sebagai pentanahan.

5. Three-Phase Resistif Load



Gambar A.5. Bentuk Komponen Resistif Load

Three-Phase Resistif Load adalah kompoen yang digunakan dalam bentuk beban resistif pada sebuah sistem daya tiga-fase

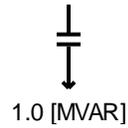
6. Three-Phase Induktif Load



Gambar A.6. Bentuk Komponen Induktif Load

Three-Phase Induktif Load adalah suatu komponen yang digunakan dalam bentuk beban induktif pada sebuah sistem tiga-fase

7. Three-Phase Capasitif Load



Gambar A.7. Bentuk komponen kapasitif Load

Three-Phase Capasitif Load adalah suatu bkomponen yang digunakan dalam bentuk kapasitif pada sebuah sistem daya tiga fase.

8. Three-Phase Dioda Load



Gambar A.8. Bentuk kompoen Dioda Load

Three-Phase Dioda Load adalah suatu komponen yang digunakan dalam beban diode pada sebuah sistem daya tiga-fase

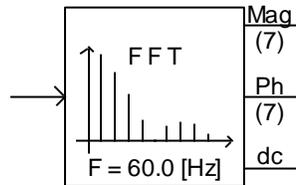
9. Three-Phase Thyristor Load



Gambar A.9. Bentuk Komponen Thyristor Load

Three-Phase Thyristor Load adalah suatu komponen yang digunakan dalam bentuk beban thyristor pada sebuah sistem daya tiga-fase.

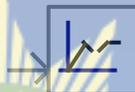
10. On-Line Frequency Scanner



Gambar A.10. Bentuk Komponen FFT

FFT (Fast Four Transform) adalah sebuah komponen yang dapat memproses nilai arus atau tegangan untuk menghasilkan nilai magnitude dan sudut fase.

11. Output Channel



Gambar A.11. Bentuk Komponen Output Channel

Output Channel adalah suatu komponen yang berfungsi keluaran sinyal dari suatu simulasi, keluaran dapat berupa kurva atau grafik, polimeter, meter dan lain-lain.

12. Harmonic Distortion



Gambar A.12. Bentuk komponen Harmonic Distortional

Harmonic Distortion adalah suatu komponen yang dapat memproses nilai arus atau tegangan untuk mengetahui distorsi yang terjadi.



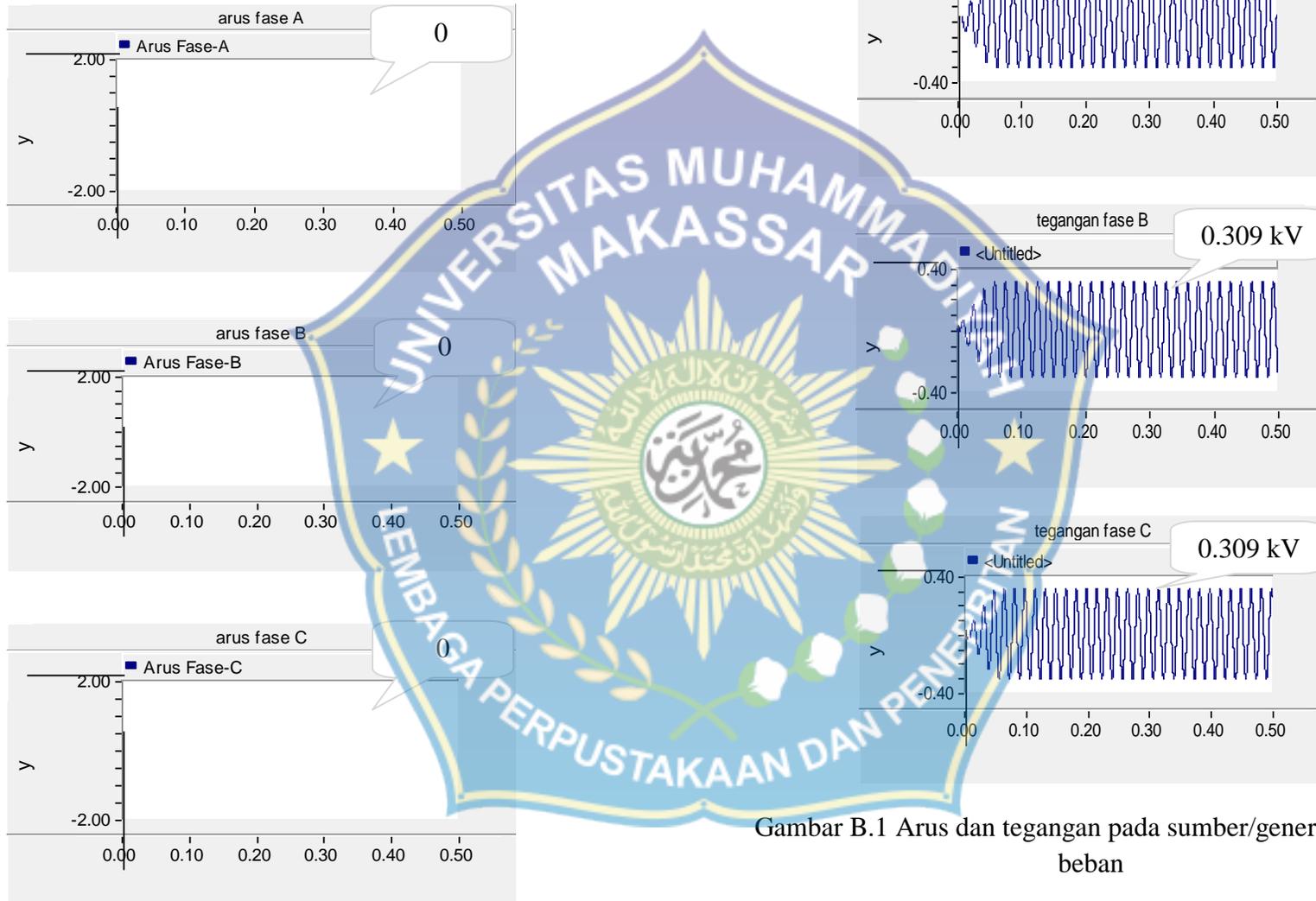
LAMPIRAN B
GRAFIK KELUARAN SIMULASI
PADA BEBAN LINEAR DAN NON LINEAR



LAMPIRAN A
BENTUK DAN KEGUNAAN
KOMPONEN YANG DIGUNAKAN

LAMPIRAN B

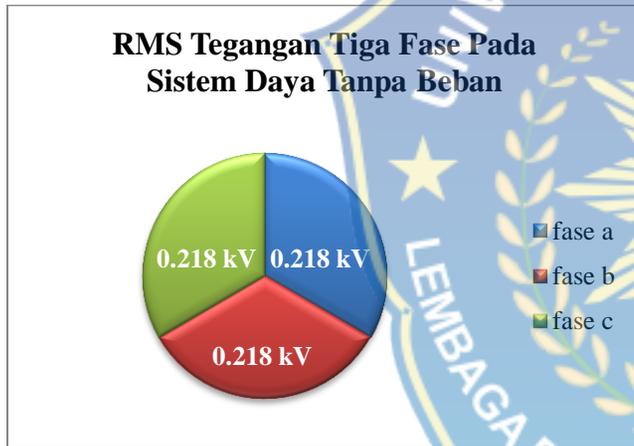
B.1 Simulasi sumber/generator tanpa beban



Gambar B.1 Arus dan tegangan pada sumber/generator tanpa beban

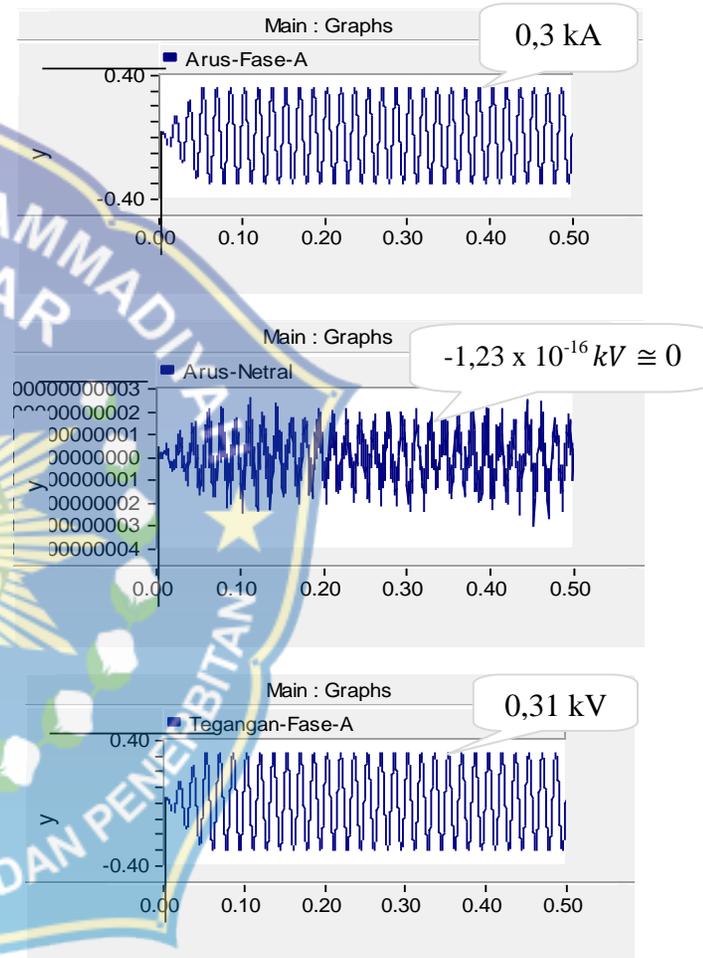
B.2 Tabel nilai maksimum dan Grafik RMS sumber tanpa beban

Tegangan fase (V_f)		
Fase A	Fase B	Fase C
0,309 kV	0,309 kV	0,309 Kv



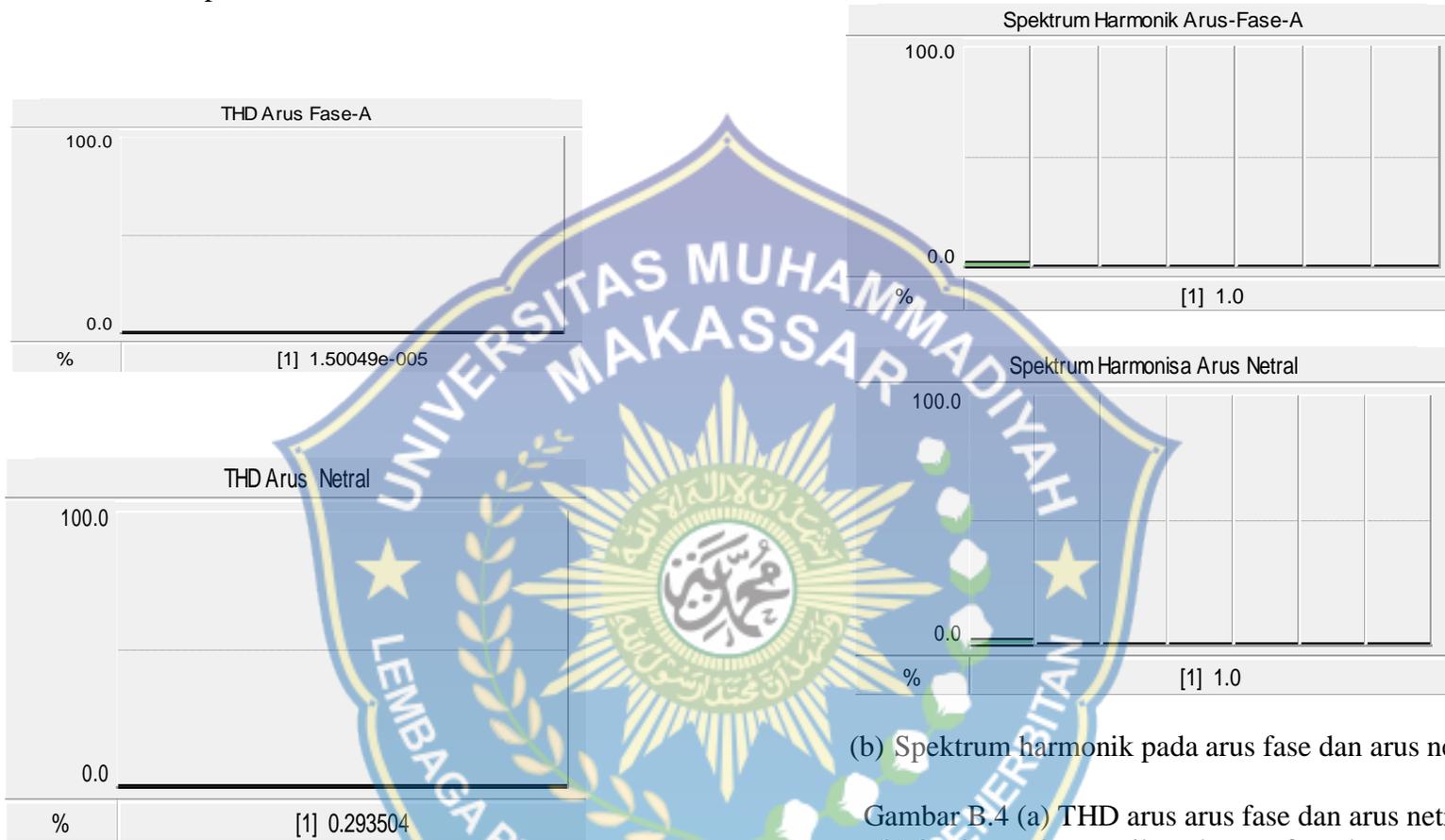
Gambar B.2 Tabel nilai maksimum dan RMS tegangan fase pada sumber Tanpa beban

B.3 Simulasi sumber/generator berbeban resistif



Gambar B.3 gelombang arus fase, arus netral dan tegangan pada sumber/generator berbeban resistif

B.4 Simulasi THD dan spektrum harmonik bebam resistif



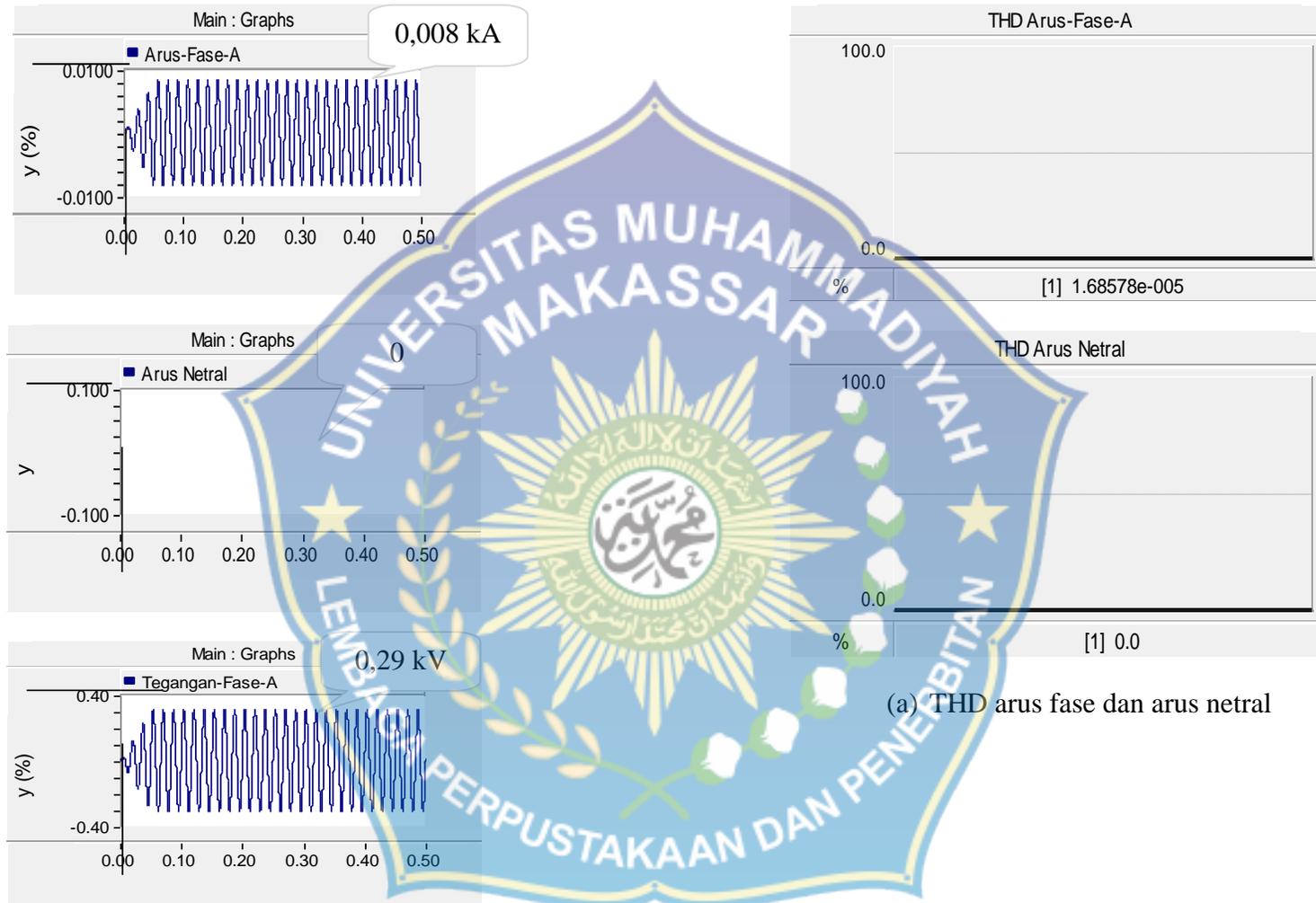
(a) THD arus arus fase dan arus netral

(b) Spektrum harmonik pada arus fase dan arus netral

Gambar B.4 (a) THD arus arus fase dan arus netral dan (b) Spektrum harmonik pada arus fase dan arus netral

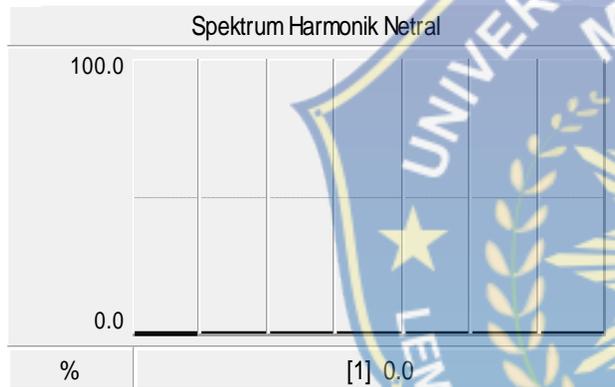
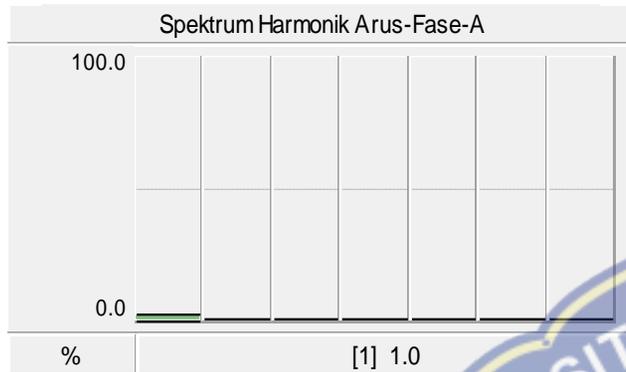
B.5 Simulasi sumber/generator beban induktif

B.6 THD dan spektrum harmonik beban induktif



(a) THD arus fase dan arus netral

Gambar B.5 gelombang arus fase dan arus netral pada beban induktif

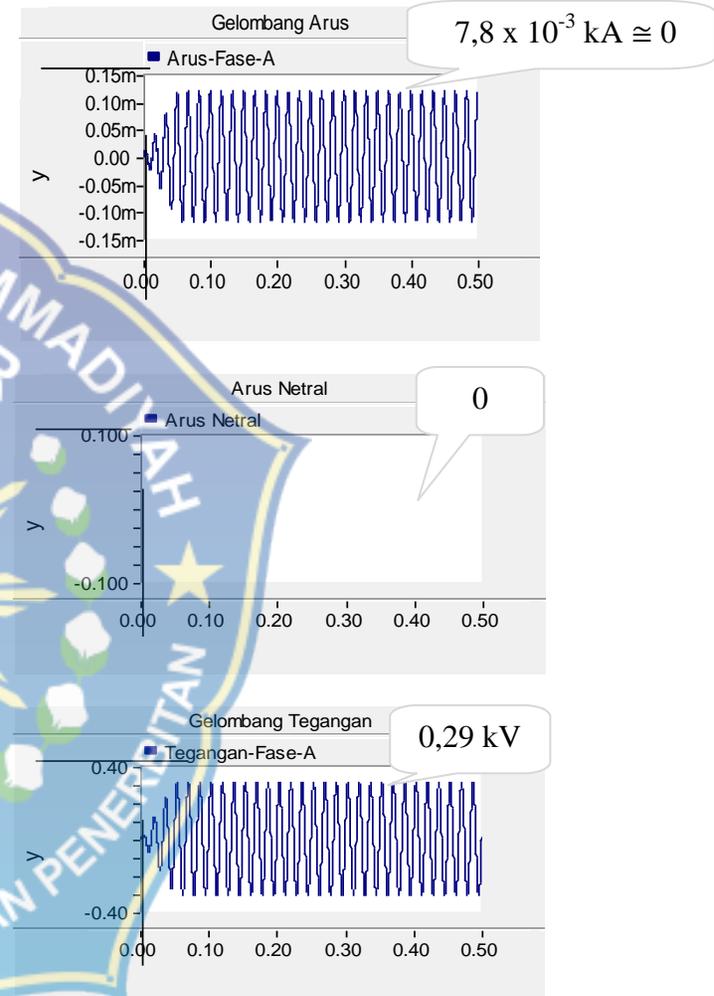


(a) Spektrum harmonik arus fase dan arus netral

(b)

Gambar B.6 (a) THD arus fase dan arus netral (b) spektrum harmonik arus fase dan arus netral pada beban induktif

B.7 Simulasi sumber/generator beban kapasitif



Gambar B.7 gelombang arus fase, arus netral dan tegangan

fase pada beban kapasitif

B.8 THD dan spektrum harmonik beban kapasitif



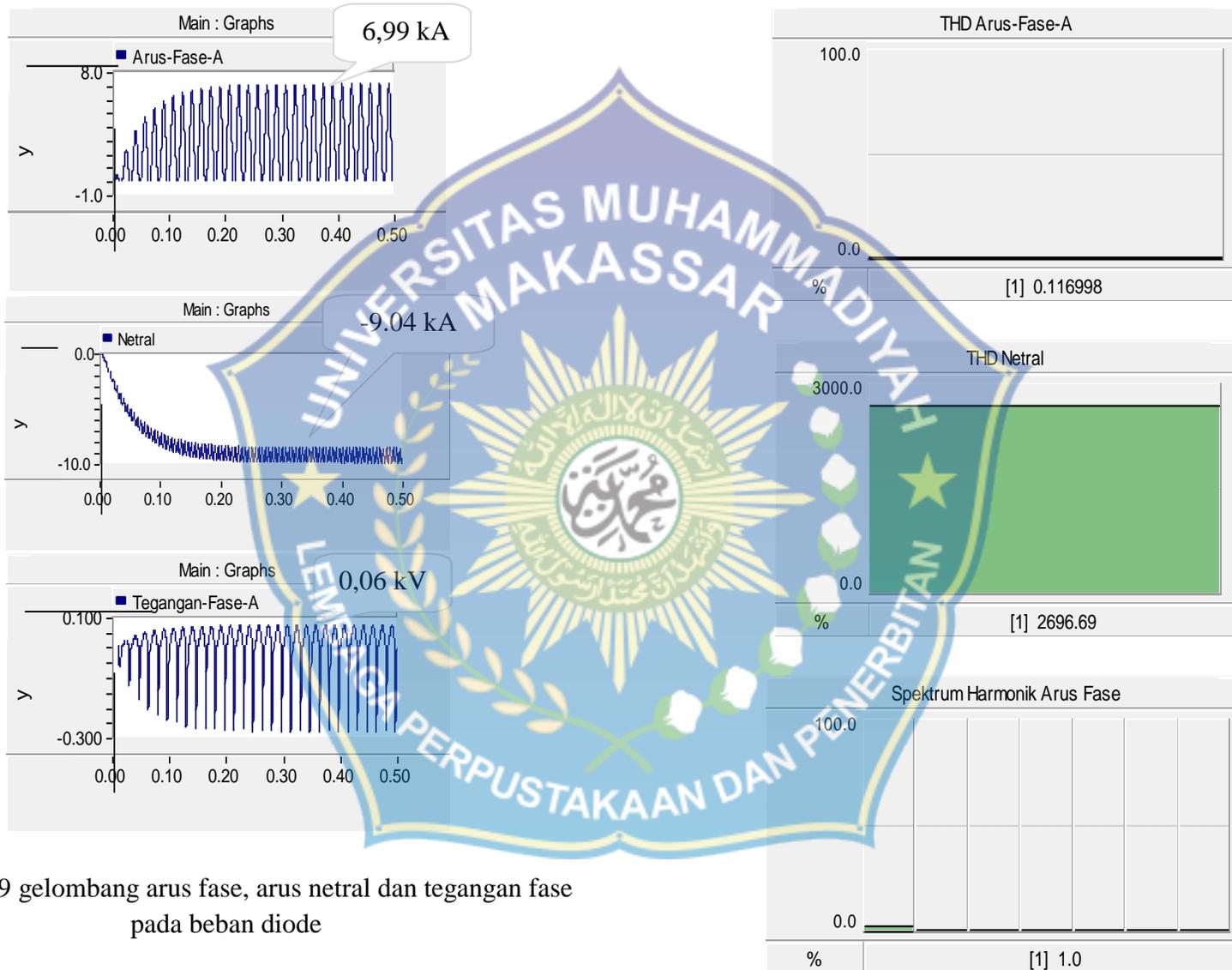
(a) THD arus fase dan arus netral

(b) Spektrum harmonik arus fase dan arus netral

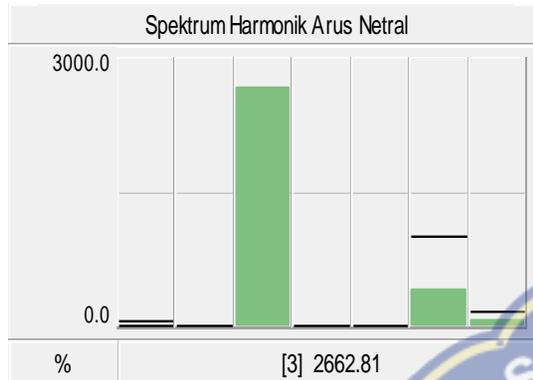
Gambar B.8 (a) THD arus fase dan arus netral, (b) spektrum harmonik arus fase dan arus netral pada beban kapasitif

B.9 Simulasi sumber/generator pada beban dioda

B.10 THD dan spektrum harmonik pada diode



Gambar B.9 gelombang arus fase, arus netral dan tegangan fase pada beban diode



Gambar B.10 THD (a) arus fase, arus netral dan (b) harmonisa arus fase dan arus netral

B.11 Tabel spektrum harmonik pada dioda

Spektrum Harmonik Arus fase-A pada Komponen Dioda

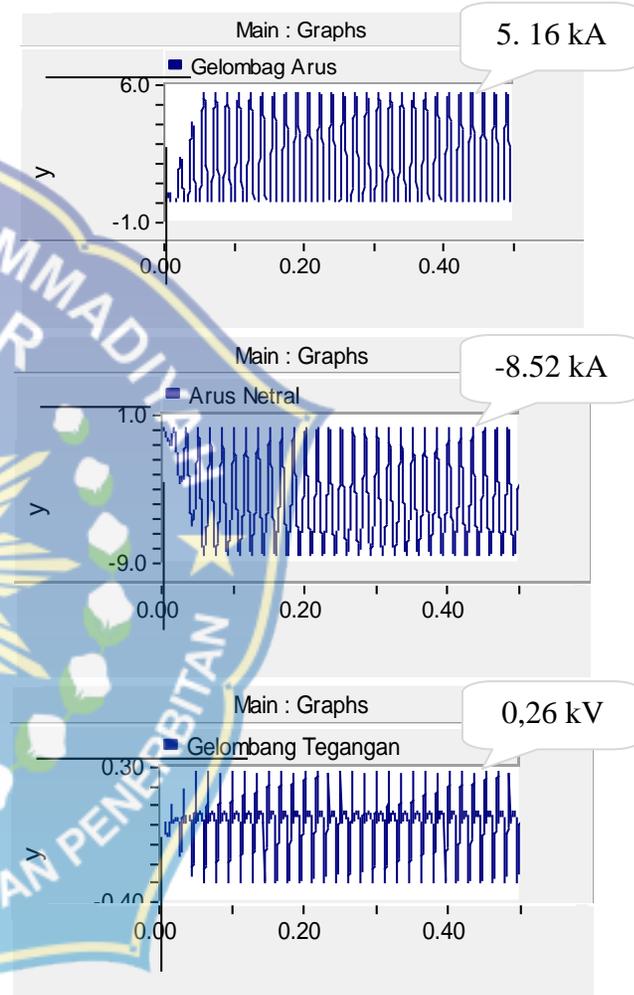
H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
1.00	0.098	0.053	0.029	0.015	0.0082	0.0055

Spektrum Harmonik Arus Netral Pada Komponen Dioda

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
1.00	0.35	2662.81	3.23	0.32	420.99	66.03

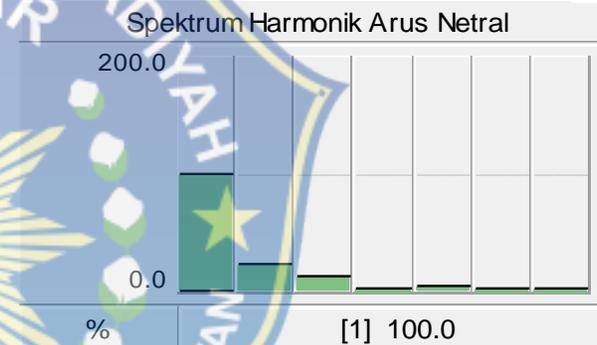
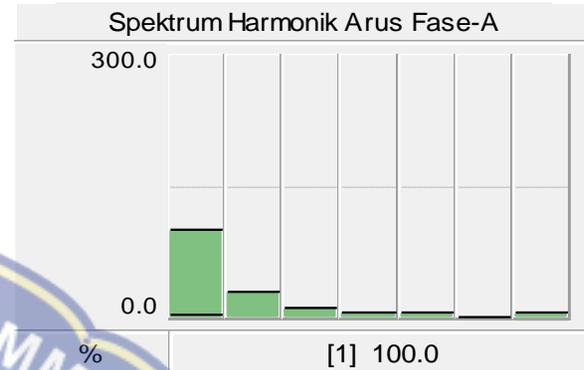
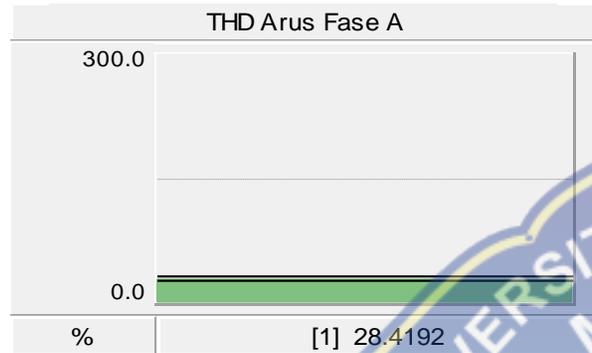
Gambar B.11 Tabel spektrum harmonik arus fase dan arus netral pada diode

B.12 simulasi sumber/generator pada thyristor di sudut picu 30°



Gambar B.15 gelombang arus fase, arus netral dan tegang fase pada sudut 30° di modus *Rectifier*

B.13 THD dan spektrum harmonik pada sudut picu 30°



Gambar B.13 (a) THD arus fase dan arus netral, (b) spektrum harmonik arus fase dan arus netral pada sudut picu 30° di modus *Rectifier*

B.14 Tabel spektrum harmonik pada sudut picu 30°

Tabel 4.4 Keluaran Spektrum Harmonik Pada Arus Fase-A

Thyristor Rectifier Pada Sudut 30°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	26.76	8.22	2.31	3.81	1.23	1.57

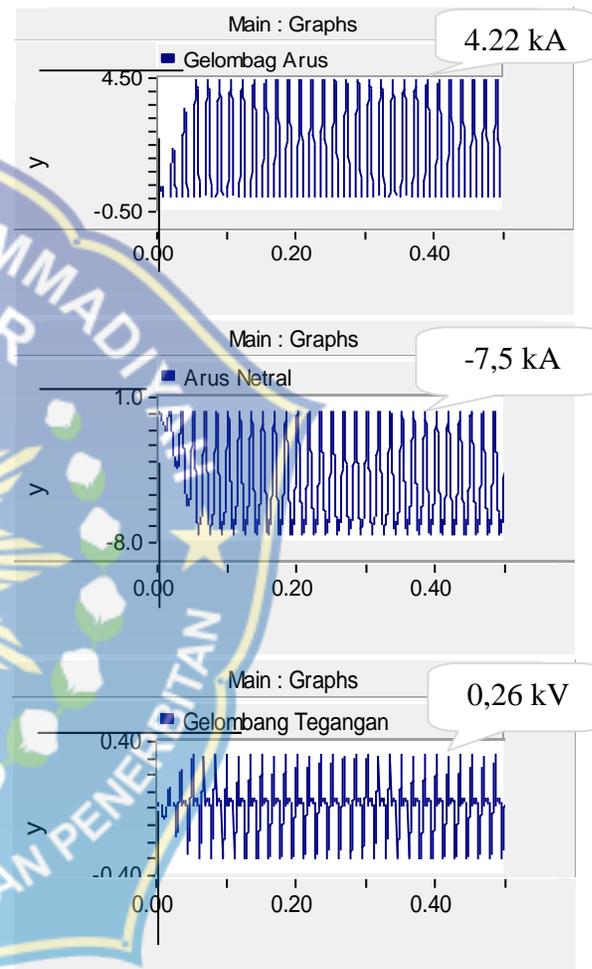
Tabel 4.5 Keluaran Spektrum Harmonik Arus Netral

Pada Thyristor Rectifier Pada Sudut 30°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	21.46	12.22	2.47	4.65	2.03	1.29

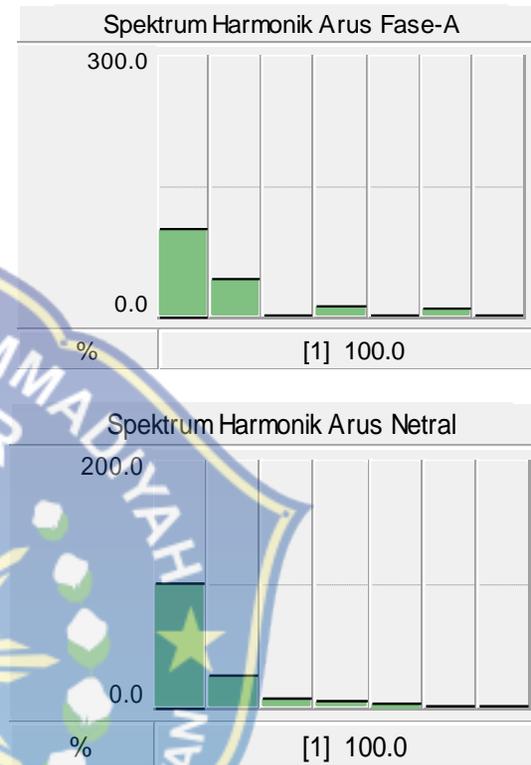
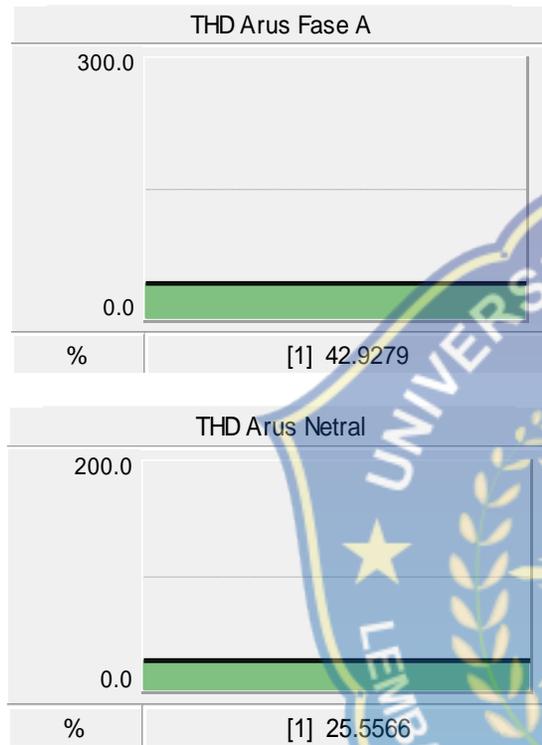
Gambar B.14 Tabel spektrum harmonik arus fase A dan arus netral pada sudut 30° di modus *rectifier*

B.15 simulasi sumber/generator pada thyristor di sudut picu 50°



Gambar B.15 gelombang arus fase, arus netral dan tegangan fase sudut 50° di modus *Rectifier*

B.16. THD arus dan spektrum harmonik sudut 50°



(a) THD arus fase dan THD arus netral

(b) Spektrum Harmonik arus fase dan arus netral

Gambar B.16 (a) THD arus fase dan arus netral, (b) spektrum harmonik arus fase dan arus netral pada sudut 50° dimodus *rectifier*

B.17 tabel spektrum harmonik pada sudut 50°

Tabel 4.6 Keluaran Spektrum Harmonik Pada Arus Fase-A

Thyristor Rectifier Pada Sudut 50°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	41.64	1.17	9.16	0.54	4.85	0.2

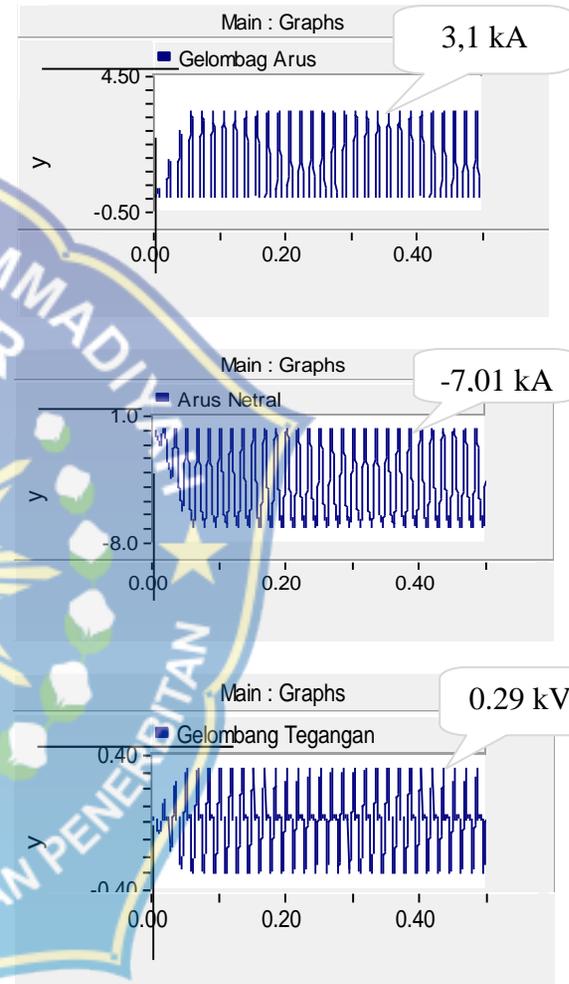
Tabel 4.7 Keluaran Spektrum Harmonik Pada arus Fase-A

Thyristor Rectifier Pada Sudut 50°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	24.23	6.56	4.16	2.12	0.85	0.76

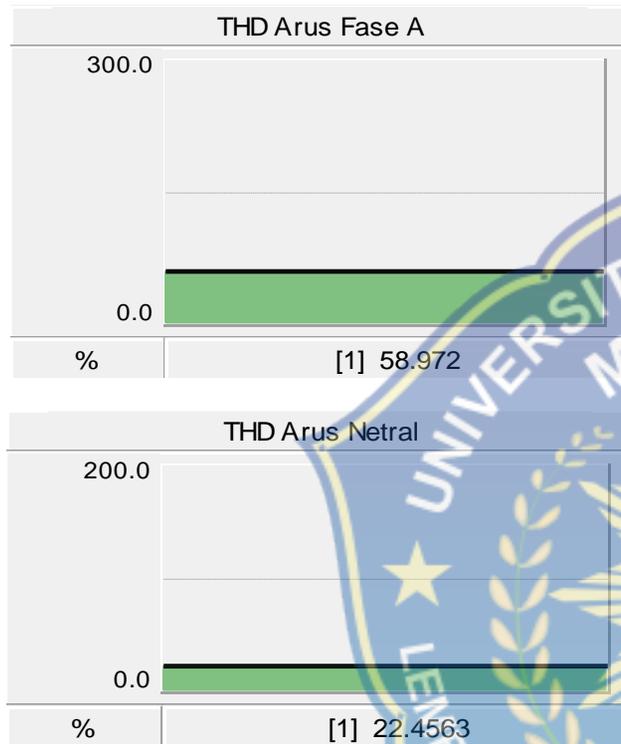
Gambar B.17 tabel spektrum harmonik arus fase dan arus netral pada sudut 50° di modus *Rectifier*

B.18 Simulasi sumber/generator pada sudut picu 70°

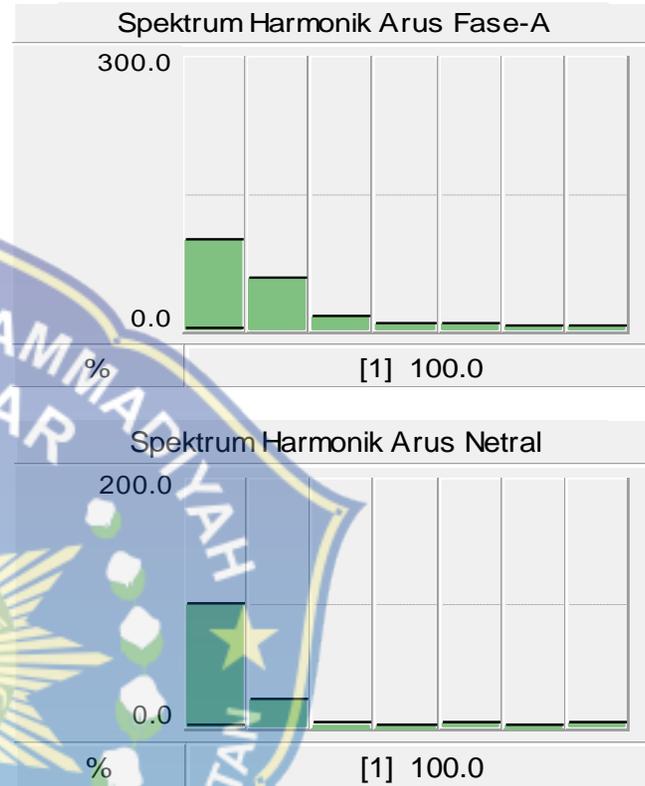


Gambar B.18 Gelombang arus fase, arus netral dan tegangan fase pada sudut 70° di modus *Rectifier*

B.19 THD arus dan spektrum harmonik



(a) THD arus fase dan THD arus netral



(b) Spektrum harmonisa arus fase dan arus netral
(c)

Gambar B.19 (a) THD arus fase dan arus netral, (b) spektrum harmonisa arus fase dan arus netral pada sudut picu 70° dimodus *Rectifier*

B.20. Tabel spektrum harmonik pada sudut picu 70°

Tabel 4.8 Keluaran Spektrum Harmonik Pada arus Fase-A Thyristor

Rectifier Pada Sudut 70°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	56.25	14.5	6.47	6.91	1.53	2.29

Tabel 4.9 Keluaran Spektrum Harmonik Pada Arus Netral Thyristor

Rectifier Pada Sudut 70°

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
100	21.69	2.97	1.98	3.08	1.05	3.18

Gambar B.20 Tabel spektrum harmonisa arus fase dan arus netral pada sudut picu 70° dimodus Rectifier

B.21 simulasi *PSCAD/EMTDC* pada komponen *Thyristor Rectifier*

Tabel 4.10 Hasil Simulasi *PSCAD/EMTDC* Pada Komponen *Thyristor*

Inverter Pada sudut 30°, 50°, dan 70°

THD	Sudut 30°	sudut 50°	Sudut 70°
Arus Fase-A	28.42	42.93	58.97
Arus Netral	25.37	25.56	22.46

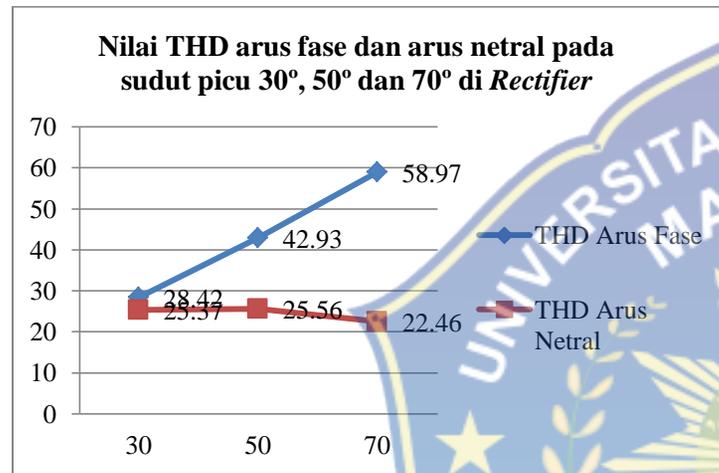
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Manual Pada Komponen *Thyristor*

Rectifier Pada sudut 30°, 50°, dan 70°

THD	Sudut 30°	sudut 50°	Sudut 70°
Arus Fase-A	28.42	42.93	58.97
Arus Netral	25.36	25.56	22.46

Gambar B.21 Tabel hasil simulasi *PSCAD/EMTDC* dan perhitungan manual pada komponen Thyristor dimodus *Rectifier*

B.22 Grafik perbandingan THD arus fase dan arus netral Pada Thyristor di modus *Rectifier*



Gambar B.22 Grafik perbandingan nilai THD arus fase dan arus netral pada Komponen *Thyristor* di modus *Rectifier*

BIODATA PENULIS



Nama : Mirnawati Dewi Sutiawati
TTL : Jenepono, 21 Juni 1993
Alamat : Jln. Andi Tonro II, Stp. 4 No.12
Makassar, Sul-Sel
No. Telp. : 085 299 929 372
Email : mhyrna.cancer@yahoo.com
dewi.mhyrna@gmail.com

Riwayat Pendidikan :

- SD No. 5 Center Tolo Jenepono, Lulus Tahun 2005
- SMP Negeri 1 Turatea Jenepono, Lulus Tahun 2008
- SMA Negeri 1 Kelara Jenepono, Lulus Tahun 2011
- S1 Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Makassar, Lulus Tahun 2016.



Nama : A. Nur Ishnaeni Choshari Paseloi
TTL : Waetu0, 04 Oktober 1993
Alamat : Perdos. Unhas Tamalanrea Blok AC
Lama No. 19 Makassar, Sul-Sel
No. Telp. : 085 340 509 779
Emai : cpaseloi@yahoo.co.id
noerishna@gmail.com

Riwayat Pendidikan :

- MI No. 5 Panyula Bone, Lulus Tahun 2005
- SMP Negeri 3 Watampone Bone, Lulus Tahun 2008
- SMK Negeri 2 Watampone Bone, Lulus Tahun 2011
- S1 Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Makassar, Lulus Tahun 2016.

Pada Tanggal 02 Maret 2016 kedua penulis mengikuti Seminar Akhir (Ujian Meja) sebagai salah satu persyaratan utama untuk mendapatkan gelar Serjana Teknik (S.T.) di Universitas Muhammadiyah Makassar (UNISMUH).