

**REDUKSI NILAI *TOTAL HARMONIC DISTORTION* PADA
INVERTER MULTILEVEL *CASCADED H-BRIDGE* 5 TINGKAT
MENGUNAKAN RANGKAIAN *SHUNT ACTIVE POWER FILTER***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



KHAIRIL ANWAR

NIM : 175060300111044

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2021



LEMBAR PENGESAHAN
REDUKSI NILAI TOTAL HARMONIC DISTORTION PADA
INVERTER MULTILEVEL CASCADED H-BRIDGE 5 TINGKAT
MENGGUNAKAN RANGKAIAN SHUNT ACTIVE POWER FILTER

SKRIPSI
TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



KHAIRIL ANWAR

NIM : 175060300111044

Skrripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 4 Mei 2021

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Wijono, M.T., Ph.D.

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc., IPM.

NIP. 19621111 198903 1 003

NIP. 19630106 198802 1 001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Prof. Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPU, ASEAN Eng.

NIP. 09130520 200801 1 013



JUDUL SKRIPSI:

REDUKSI NILAI TOTAL HARMONIC DISTORTION PADA INVERTER
MULTILEVEL CASCADED H-BRIDGE 5 TINGKAT MENGGUNAKAN RANGKAIAN
SHUNT ACTIVE POWER FILTER

Nama Mahasiswa : Khairil Anwar
NIM : 175060300111044
Program Studi : Teknik Elektro
Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

Tim Dosen Pembimbing :
Dosen Pembimbing I : Ir. Wijono, M.T., Ph.D.

Dosen Pembimbing II : Ir. Unggul Wibawa, M.Sc., IPM.

Tim Dosen Penguji :
Dosen Penguji 1 : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.

Dosen Penguji 2 : Dr. Ir. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc., IPM.

Tanggal Ujian : 22 April 2021

SK Penguji : No. 650 Tahun 2021

Disetujui tanggal 4 Mei 2021

Disetujui tanggal 4 Mei 2021



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Mei 2021

Mahasiswa,

Khairil Anwar

NIM. 175060300111044

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





RINGKASAN

Khairil Anwar, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, April 2021, **Reduksi Nilai *Total Harmonic Distortion* Pada Inverter Multilevel *Cascaded H-Bridge* 5 Tingkat Menggunakan Rangkaian *Shunt Active Power Filter***, Dosen Pembimbing: Ir. Wijono, M.T., Ph.D. dan Ir. Unggul Wibawa, M.Sc., IPM.

Saat ini masyarakat sudah mulai beralih menggunakan panel surya sebagai suplai listrik untuk kebutuhan baik rumah tangga, industri maupun penerangan jalan umum. Panel surya membutuhkan inverter untuk mengubah sumber daya DC yang dihasilkan oleh panel surya menjadi sumber daya AC untuk mencatu beban-beban AC. Dalam praktiknya, panel surya mensuplai listrik tidak hanya pada beban-beban linier saja melainkan juga pada beban-beban non-linier. Beban-beban non-linier adalah beban yang nilainya berubah-ubah tiap waktunya. Beban-beban non-linier itu dapat berupa motor listrik, *charger handphone* dan jenis konverter daya lainnya. Beban non-linier yang terhubung dengan sistem tenaga listrik dapat membuat gelombang arus menjadi cacat. Cacat gelombang ini dihitung dengan istilah *Total Harmonic Distortion* atau THD. Untuk mengatasi hal ini dalam penelitian ini *Shunt Active Power Filter* (SAPF) dipilih untuk mereduksi nilai THD yang terkandung dalam arus sistem. Pada penelitian ini didesain inverter multilevel 3 fasa dengan susunan *cascaded h-bridge* 5 tingkat yang menggunakan teknik *multicarrier* SPWM sebagai pembangkitan pulsa gate MOSFET pada inverter, serta dilengkapi dengan rangkaian *shunt active power filter* sebagai filter aktif yang berfungsi untuk mereduksi nilai THD arus sistem. Dengan memvariasikan nilai RL pada beban non-linier, akan dianalisis pengaruh perubahan nilai beban terhadap THD arus saat sistem tanpa dilengkapi rangkaian SAPF dan saat sistem dilengkapi rangkaian SAPF. Kemudian akan dilihat perbedaan nilai THD saat sistem sebelum dipasang rangkaian SAPF dan saat sistem setelah dipasang rangkaian SAPF.

Penelitian ini dilakukan dengan mensimulasikan inverter multilevel *cascaded h-bridge* 5 tingkat dengan rangkaian SAPF pada *Simulink* MATLAB. Pertama-tama dilakukan perhitungan parameter rangkaian yang diperlukan untuk menjalankan simulasi. Setelah nilai-nilai parameter didapatkan, nilai RL beban non-linier akan divariasikan mulai dari $R=10\Omega$ dan $L=0mH$ hingga $R=100\Omega$ dan $L=1H$ kemudian nilai arus dan THD akan dicatat. Simulasi dijalankan pada 2 kondisi yaitu saat sistem tanpa rangkaian SAPF dan saat sistem dipasang rangkaian SAPF. Hal ini dilakukan untuk melihat seberapa besar nilai THD dapat diturunkan oleh rangkaian SAPF.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah bahwa nilai THD arus dipengaruhi oleh besarnya nilai R dan L beban non-linier. Pada simulasi rangkaian dengan SAPF, terdapat lonjakan gelombang arus sistem di awal, oleh karenanya untuk menghindari perhitungan nilai THD saat lonjakan terjadi, maka perhitungan nilai THD dilakukan dengan *start time* detik ke 0,022 sekon. Dalam simulasi ini, rangkaian SAPF terbukti mampu menurunkan nilai THD arus sistem.

Kata Kunci – Inverter, Filter Aktif Shunt, Beban Non-Linier.

SUMMARY

Khairil Anwar, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, April 2021, Reduction Of Total Harmonic Distortion Value On Multilevel Cascaded H-Bridge Inverter 5 Level Using Shunt Active Power Filter Circuit*, Academic Supervisor: Ir. Wijono, M.T., Ph.D. and Ir. Unggul Wibawa, M.Sc., IPM.

Currently, people have started to switch to using solar panels as electricity supply for household, industrial and public street lighting needs. Solar panels require an inverter to convert the DC power source generated by the solar panels into an AC power source to supply AC loads. In practice, solar panels supply electricity not only to linear loads but also to non-linear loads. Non-linear loads are loads whose value varies over time. These non-linear loads can be in the form of electric motors, cellphone chargers and other types of power converters. Non-linear loads connected to the electric power system can deform current waves. This wave defect is calculated in terms of Total Harmonic Distortion or THD. To overcome this problem, in this study the Shunt Active Power Filter (SAPF) was chosen to reduce the THD value contained in the system flow. In this study, a 3-phase multilevel inverter is designed with a 5-level cascaded h-bridge arrangement that uses the SPWM multicarrier technique as a MOSFET gate pulse generator on the inverter, and is equipped with a series of shunt active power filters as an active filter that functions to reduce the THD value of the system current. By varying the RL value for the non-linear load, the effect of changing the load value on the current THD will be analyzed when the system is not equipped with the SAPF circuit and when the system is equipped with the SAPF circuit. Then it will be seen the difference in the THD value when the system is installed before the SAPF and when the system is installed after the SAPF.

This research was conducted by simulating a 5-level cascaded h-bridge multilevel inverter with a SAPF circuit on the MATLAB Simulink. First of all, the calculation of the circuit parameters needed to run the simulation. After the parameter values are obtained, the RL value of the non-linear load will be varied from $R = 10\Omega$ and $L = 0mH$ to $R = 100\Omega$ and $L = 1H$ then the current and THD values will be recorded. The simulation is run in 2 conditions, namely when the system is without the SAPF and when the system is installed the SAPF. This is done to see how much the THD value can be derived by the SAPF series.

The results obtained from this study are that the current THD value is influenced by the magnitude of the R and L values of the non-linear load. In the simulation circuit with SAPF, there is a surge in the system's current wave at the beginning, therefore to avoid calculating the THD value when the surge occurs, the calculation of the THD value is carried out with a start time of seconds to 0.022 seconds. In this simulation, the SAPF circuit is proven to be able to reduce the THD value of the system current.

Keywords – Inverter, Shunt Active Power Filter, Non-Linear Load.

RIWAYAT HIDUP

Khairil Anwar, lahir di Jember, 7 Agustus 1998 anak keempat dari bapak Syarifuddin dan ibu Wilis Pusparini, SD di Kabupaten Jember, SMP di Kabupaten Probolinggo, SMK di Kabupaten Jember dan lulus SMK tahun 2017, menempuh atau masuk program sarjana Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Tahun 2017. Pengalaman organisasi sebagai asisten laboratorium di Laboratorium Mesin Elektrik Teknik Elektro Universitas Brawijaya tahun 2019 hingga 2021 dan sebagai manajer sub-divisi mekanik, divisi Mobil Listrik, Workshop Teknik Elektro Universitas Brawijaya.



Malang, Mei 2021

Penulis





KATA PENGANTAR

Bismillah, Alhamdulillah. Puji syukur kehadiran Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Reduksi Nilai *Total Harmonic Distortion* Pada Inverter Multilevel *Cascaded H-Bridge* 5 Tingkat Menggunakan Rangkaian *Shunt Active Power Filter*” dapat terselesaikan dengan baik meskipun jauh dari kata sempurna. Penulis menyadari, terselesaikannya masa studi dan pengerjaan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, semangat, serta motivasi baik langsung maupun tidak langsung dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis sampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM. dan Ibu Ir. Nurussa’adah, MT selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Ibu Rahmadwati S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
3. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
4. Bapak Ir. Wijono, M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing skripsi I yang telah memberikan bimbingan, kritik, saran dan motivasi dalam pengerjaan dan penyusunan skripsi.
5. Bapak Ir. Unggul Wibawa, M.Sc., IPM. selaku dosen pembimbing skripsi II yang selalu memberi saran dan motivasi serta memberi bimbingan dalam pengerjaan skripsi ini.
6. Bapak, Ibu dosen serta segenap staf dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang telah membantu perkuliahan penulis selama masa studi.
7. Kedua orang tua saya yang selalu memberikan kasih sayang, semangat, serta doa yang tidak akan pernah mampu terbalaskan, serta saudara saya Mbak Novi yang telah membantu saya dalam pengerjaan skripsi saya dengan meminjamkan laptopnya kepada saya beserta seluruh keluarga besar atas segala dukungan dan semangat yang telah diberikan.
8. Segenap teman-teman Asisten Labolatorium Mesin Elektrik juga mas Indra Setyawan sebagai pranata yang telah banyak membantu dan memberikan inspirasi kepada penulis dalam menyusun skripsi.

9. Rekan-rekan anggota Workshop Elektro Autoforschung Team atau Tim Mobil Listrik HME-FTUB yang telah memberikan pengalaman dan arahan baik dalam Hardskill maupun Softskill.
10. Sahabat kos dewandaru ceria yang menjadi tempat saya menghibur diri dan wisata kuliner malam di depan pizza hut suhat yang selalu menjadi tempat pengisian energi yang baik untuk kesehatan jasmani dan rohani saya.
11. Seratus tiga puluh tujuh teman-teman ELCO angkatan 2017 atas kerjasama dan momen baik semasa menjalani masa perkuliahan.
12. Semua pihak yang telah membantu dan tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih banyak atas semua bantuannya. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dan diharapkan agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta bagi masyarakat.

Malang, Mei 2021

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR i

DAFTAR ISI iii

DAFTAR GAMBAR iv

DAFTAR TABEL vii

BAB I PENDAHULUAN 1

 1.1 Latar Belakang 1

 1.2 Problem Riset 1

 1.3 Solusi 1

 1.4 Rumusan Masalah 2

 1.5 Tujuan Penelitian 2

 1.6 Hipotesa 2

 1.7 Sistematika Penulisan 2

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 3

 2.1 Inverter 3

 2.2 Inverter Multilevel *Cascaded H-Bridge* 4

 2.3 *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) 5

 2.3.1 *Multicarrier Sinusoidal PWM* 6

 2.4 Harmonik 9

 2.5 *Total Harmonic Distortion* (THD) 11

 2.6 Beban Non-Linier 11

 2.7 Teori Daya Sesaat 12

 2.7.1 *Clarke Transformation* 12

 2.7.2 Daya Sesaat Tiga Fasa dalam Terminologi Komponen Clarke 14

 2.7.3 Daya Sesaat *p-q Theory* 14

 2.8 *Hysteresis Current Control* 17

 2.9 Filter Pasif 18

 2.10 *Active power Filter* 18

 2.10.1 *Shunt Active Power Filter* (SAPF) 19

 2.10.2 *DC Link Voltage Regulator* 20

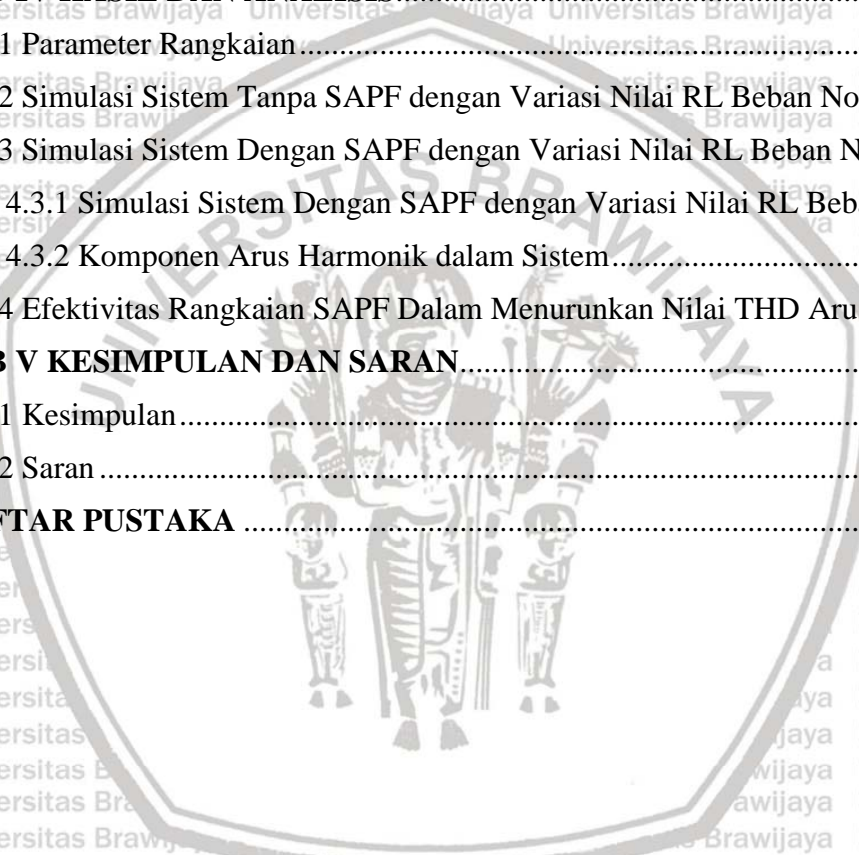
 2.10.3 *Coupling Inductor* 20

 2.11 Efektivitas SAPF 21

BAB III METODE PENELITIAN 22

 3.1 Diagram Alir Penelitian 22

3.2 Diagram Alir Simulasi.....	22
3.3 Rangkaian Simulasi pada MATLAB Simulink.....	23
3.3.1 Rangkaian <i>Multicarrier</i> PD-SPWM.....	24
3.3.2 Rangkaian Inverter 3 Fasa 5 tingkat <i>Cascaded H-Bridge</i>	25
3.3.3 Rangkaian <i>Shunt Active Power Filter</i>	26
3.4 Pengujian.....	27
3.4.1 Sistem Tanpa <i>Shunt Active Power Filter</i>	27
3.4.2 Sistem Dengan <i>Shunt Active Power Filter</i>	27
3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran.....	27
BAB IV HASIL DAN ANALISIS.....	28
4.1 Parameter Rangkaian.....	28
4.2 Simulasi Sistem Tanpa SAPF dengan Variasi Nilai RL Beban Non-Linier.....	32
4.3 Simulasi Sistem Dengan SAPF dengan Variasi Nilai RL Beban Non-Linier.....	41
4.3.1 Simulasi Sistem Dengan SAPF dengan Variasi Nilai RL Beban Non-Linier.....	42
4.3.2 Komponen Arus Harmonik dalam Sistem.....	51
4.4 Efektivitas Rangkaian SAPF Dalam Menurunkan Nilai THD Arus.....	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA.....	60



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Inverter satu fasa..... 3

Gambar 2. 2 Inverter 3 fasa 5 tingkat..... 5

Gambar 2. 3 Teknik SPWM..... 6

Gambar 2. 4 PD-SPWM..... 7

Gambar 2. 5 POD-SPWM..... 8

Gambar 2. 6 APOD-SPWM..... 8

Gambar 2. 7 Multicarrier PD-SPWM..... 9

Gambar 2. 8 Gelombang terdistorsi..... 10

Gambar 2. 9 Jenis Beban Non-Linear..... 12

Gambar 2. 10 Daya aktif sesaat 3 fasa..... 15

Gambar 2. 11 Hysteresis Current Control..... 17

Gambar 2. 12 Rangkaian SAPF dalam sistem..... 20

Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian..... 22

Gambar 3. 2 Diagram alir simulasi..... 23

Gambar 3. 3 Rangkaian simulasi keseluruhan..... 24

Gambar 3. 4 Rangkaian simulasi pembangkit pulsa..... 25

Gambar 3. 5 Rangkaian simulasi Multilevel Inverter..... 25

Gambar 3. 6 Rangkaian simulasi *Shunt Active Power filter*..... 26

Gambar 3. 7 Rangkaian simulasi perhitungan nilai p-q..... 26

Gambar 3. 8 Rangkaian simulasi perhitungan nilai arus referensi pada sumbu $\alpha\beta$ 26

Gambar 3. 9 Rangkaian simulasi perhitungan nilai arus referensi pada sumbu abc..... 27

Gambar 3. 10 Rangkaian simulasi Hysteresis Current Control..... 27

Gambar 4. 1 Tegangan inverter..... 30

Gambar 4. 2 Gelombang arus sistem tanpa SAPF dengan beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$ 33

Gambar 4. 3 Spektrum arus sistem beserta nilai THD tanpa SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$ 34

Gambar 4. 4 Gelombang arus sistem tanpa SAPF dengan beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=200mH$ 34

Gambar 4. 5 Spektrum arus sistem beserta nilai THD tanpa SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=200mH$ 35

Gambar 4. 6 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa a saat sistem tanpa SAPF..... 37

Gambar 4. 7 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa b saat sistem tanpa SAPF	39
Gambar 4. 8 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa c saat sistem tanpa SAPF.....	41
Gambar 4. 9 Gelombang arus sistem dengan SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$	42
Gambar 4. 10 Spektrum arus sistem beserta nilai THD dengan SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$	43
Gambar 4. 11 Gelombang arus sistem dengan SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=200mH$	43
Gambar 4. 12 Spektrum arus sistem beserta nilai THD dengan SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=200mH$	44
Gambar 4. 13 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa a saat sistem dengan SAPF.....	46
Gambar 4. 14 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa b saat sistem dengan SAPF.....	48
Gambar 4. 15 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa c saat sistem dengan SAPF.....	50
Gambar 4. 16 Gelombang arus harmonik sistem pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$	51
Gambar 4. 17 Gelombang arus harmonik sistem pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=200mH$	52
Gambar 4. 18 Grafik tingkat efektivitas rangkaian SAPF pada fasa a.....	54
Gambar 4. 19 Grafik tingkat efektivitas rangkaian SAPF pada fasa b.....	55
Gambar 4. 20 Grafik tingkat efektivitas rangkaian SAPF pada fasa c.....	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 *Pensakelaran inverter 3 fasa 5 tingkat pada fasa a* 5

Tabel 4. 1 Parameter rangkaian simulasi yang ditetapkan 29

Tabel 4. 2 *Parameter rangkaian simulasi yang telah didapatkan* 32

Tabel 4. 3 Nilai arus pada fasa a hasil simulasi tanpa SAPF 36

Tabel 4. 4 Nilai THD arus pada fasa a hasil simulasi tanpa SAPF 36

Tabel 4. 5 Nilai arus pada fasa b hasil simulasi tanpa SAPF 38

Tabel 4. 6 Nilai THD arus pada fasa b hasil simulasi tanpa SAPF 38

Tabel 4. 7 Nilai arus pada fasa c hasil simulasi tanpa SAPF 40

Tabel 4. 8 Nilai THD arus pada fasa c hasil simulasi tanpa SAPF 40

Tabel 4. 9 Nilai arus pada fasa a hasil simulasi dengan SAPF 45

Tabel 4. 10 Nilai THD arus pada fasa a hasil simulasi dengan SAPF 45

Tabel 4. 11 Nilai arus pada fasa b hasil simulasi dengan SAPF 47

Tabel 4. 12 Nilai THD arus pada fasa b hasil simulasi dengan SAPF 47

Tabel 4. 13 Nilai arus pada fasa c hasil simulasi dengan SAPF 49

Tabel 4. 14 Nilai THD arus pada fasa c hasil simulasi dengan SAPF 49

Tabel 4. 15 Efektifitas rangkaian SAPF pada fasa a 53

Tabel 4. 16 Efektifitas rangkaian SAPF pada fasa b 55

Tabel 4. 17 Efektifitas rangkaian SAPF pada fasa c 56

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berkembangnya zaman, teknologi juga semakin berkembang. Penggunaan konverter daya semakin banyak. Konverter daya digunakan hampir dalam segala aspek kelistrikan, seperti pada penggunaan panel surya. Panel surya sudah banyak digunakan pada rumah-rumah, ruko, dan gedung-gedung besar. Banyaknya penggunaan panel surya adalah karena panel surya sangat ramah lingkungan dalam mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Konverter daya dibutuhkan untuk mengubah sumber tegangan dan arus DC menjadi AC. Salah satu jenis konverter daya adalah inverter. Daya AC yang dihasilkan oleh inverter digunakan untuk mensuplai beban.

Beban non-linier banyak ditemukan pada beban berat di dalam industri seperti busur *furnace*, *variable frequency drive* (VFD) dan lain-lain. Dengan perubahan kondisi operasi dan pertumbuhan yang pesat, perangkat konversi daya banyak digunakan pada kebutuhan harian. Menurut *Electric Power Research* (EPR) pada tahun 1995, 35-40% dari semua tenaga listrik mengalir melalui konverter elektronik. Semua alat ini dinamakan beban non-linier yang menjadi sumber harmonik (Patil & Pawar, 2017:3245).

Harmonik dapat mendistorsi gelombang arus pada sistem. Distorsi ini dapat mengakibatkan beban lain yang terhubung pada sistem yang sama akan mengalami gangguan yang berlebihan. Selain itu, distorsi arus juga berpengaruh terhadap inverter panel surya.

1.2 Problem Riset

Problem yang timbul dari pembebanan non-linier pada inverter adalah munculnya harmonik yang mendistorsi arus sistem. Tingkat distorsi yang dihasilkan oleh komponen arus harmonik disebut dengan THD (*Total Harmonic Distortion*). Semakin besar nilai harmonik, maka nilai THD akan semakin besar.

1.3 Solusi

Untuk mengatasi masalah tersebut pada penelitian ini ditawarkan pemasangan *Shunt Active Power Filter* (SAPF). Tujuan pemasangan ini adalah untuk mereduksi komponen harmonik yang terkandung dalam arus. Diharapkan dengan pemasangan filter ini akan mampu memperbaiki gelombang arus yang terdistorsi.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana gelombang arus sistem dan besar nilai THD saat pembebanan non-linier tanpa pemasangan SAPF.
2. Bagaimana gelombang arus sistem dan besar nilai THD saat pembebanan non-linier dengan pemasangan SAPF.
3. Bagaimana efektivitas rangkaian SAPF dalam menurunkan THD pada inverter.

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh pemasangan SAPF dalam mereduksi harmonik arus pada sistem inverter multilevel *cascaded h-bridge* 5 tingkat.

1.6 Hipotesa

Dengan pemasangan filter aktif shunt atau *Shunt Active Power Filter* (SAPF) pada inverter, nilai THD arus akibat beban non-linier dapat dikurangi.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan yang akan digunakan pada penelitian ini adalah:

BAB I : PENDAHULUAN Bab ini memuat tentang latar belakang, problem riset, solusi, rumusan masalah, tujuan dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA Bab ini menguraikan tentang dasar teori yang mendukung terhadap penelitian yang akan dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini.

BAB III : METODE PENELITIAN Bab ini menguraikan tentang metode dan langkah kerja yang terdiri dari studi literatur, pengambilan data, perhitungan dan analisis, serta pengambilan kesimpulan dan saran.

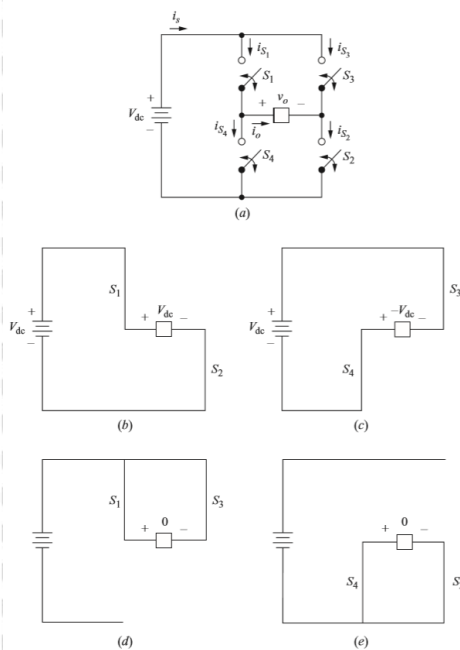
BAB IV : HASIL DAN ANALISIS Bab ini menguraikan tentang data-data yang diperlukan, dengan analisis terhadap masalah yang akan diajukan sehingga diperoleh hasil dalam penelitian ini.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN Bab ini memuat kesimpulan dan saran.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Inverter

Inverter adalah sebuah kontroler yang berfungsi sebagai pengubah gelombang searah (DC) menjadi gelombang bolak-balik (AC). Inverter mengirim daya dari sumber daya DC ke beban AC. Inverter dirancang untuk mensuplai beban AC ketika hanya ada sumber DC yang tersedia dan juga biasa digunakan untuk mengatur kecepatan motor AC (Hart, 2011:331).



Gambar 2. 1 Inverter satu fasa

Sumber: Hart, 2011:332

Dari Gambar 2.1 dapat dilihat bahwa pada inverter 1 fasa memiliki 4 buah saklar elektronik. Saklar ini bisa menggunakan MOSFET atau IGBT. Tiap saklar pada inverter bekerja berpasangan, S1 berpasangan dengan S2 dan S3 berpasangan dengan S4. Saklar S1 tidak boleh aktif bersamaan dengan S4, karena bila S1 dan S4 aktif dalam waktu bersamaan, maka arus tidak akan melewati beban melainkan arus akan mengalir langsung ke kutub negatif dari sumber DC dan ini akan menimbulkan *short circuit* yang bisa membakar saklar elektronik.

Pensaklaran paling sederhana dalam inverter adalah menghasilkan gelombang tegangan kotak. Beban bertegangan positif bila S1 dan S2 tertutup atau beban bertegangan negatif saat S3 dan S4 tertutup. Periode pensaklaran tegangan beban di antara $+V_{dc}$ dan $-V_{dc}$ menghasilkan gelombang tegangan kotak pada beban. Meskipun keluaran tegangan

tidak sinusoidal, namun gelombang AC ini cukup memadai untuk beberapa aplikasi tertentu (Hart, 2011:333).

Gelombang arus pada beban tergantung komponen yang terdapat pada beban. Untuk beban resistif, gelombang arusnya menyamai bentuk gelombang tegangannya. Untuk beban induktif, gelombang arus memiliki bentuk yang lebih sinusoidal dibanding bentuk gelombang tegangannya karena sifat filter dari induktansi (Hart, 2011:333).

2.2 Inverter Multilevel Cascaded H-Bridge

Inverter multilevel *cascaded h-bridge* adalah inverter *full-bridge* yang disusun seri secara kaskade. Sumber yang digunakan dalam inverter ini adalah sumber DC. Di setiap inverter *full-bridge* dihubungkan dengan sumber DC. Tegangan keluaran dari inverter multilevel adalah penjumlahan tegangan keluaran di setiap inverter *full-bridge*. Semakin banyak tingkatan atau level inverter, maka bentuk gelombang tegangan keluaran semakin mendekati sinusoidal. Gelombang tegangan keluaran yang semakin mendekati gelombang sinusoidal maka THD (*Total Harmonic Distortion*) tegangan akan semakin kecil. Inverter kaskade hanya membutuhkan komponen yang lebih sedikit dibanding inverter *flying capacitors* dan inverter *diode clamped*. Sehingga rugi-rugi di setiap komponennya lebih kecil. Inverter multilevel *cascaded h-bridge* menggunakan saklar elektronik berupa MOSFET atau IGBT untuk mengubah sumber DC menjadi AC. Untuk menghitung jumlah saklar elektronik yang diperlukan dalam merangkai inverter multilevel *cascaded h-bridge* dapat menggunakan persamaan 2-1.

$$p = 2(m - 1) \quad (2-1)$$

Untuk rangkaian 3 fasa maka menggunakan persamaan 2-2.

$$p = 3 \times 2(m - 1) \quad (2-2)$$

Dimana m adalah level inverter

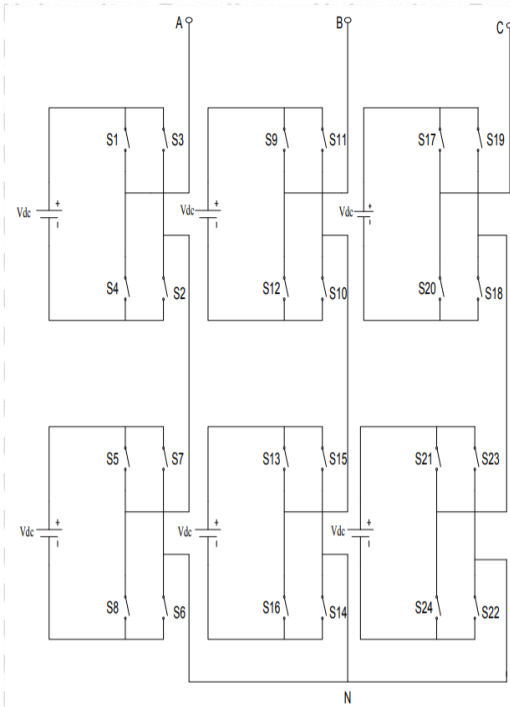
Sedangkan untuk menentukan level inverter dapat menggunakan persamaan 2-3:

$$m = 2N_s + 1 \quad (2-3)$$

Untuk rangkaian 3 fasa maka menggunakan persamaan 2-4.

$$m = \frac{2N_s + 3}{3} \quad (2-4)$$

Dimana N_s adalah jumlah sumber DC pada masing-masing inverter.



Gambar 2. 2 Inverter 3 fasa 5 tingkat

Sumber: Bharatkar *et al.*, 2014:2

Tabel 2. 1 Pensakelaran inverter 3 fasa 5 tingkat pada fasa a

MOSFET Sakelar Elektronik								Vout
s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	0
ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	+Vdc
ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	+2Vdc
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	0
OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	-Vdc
OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	-2Vdc

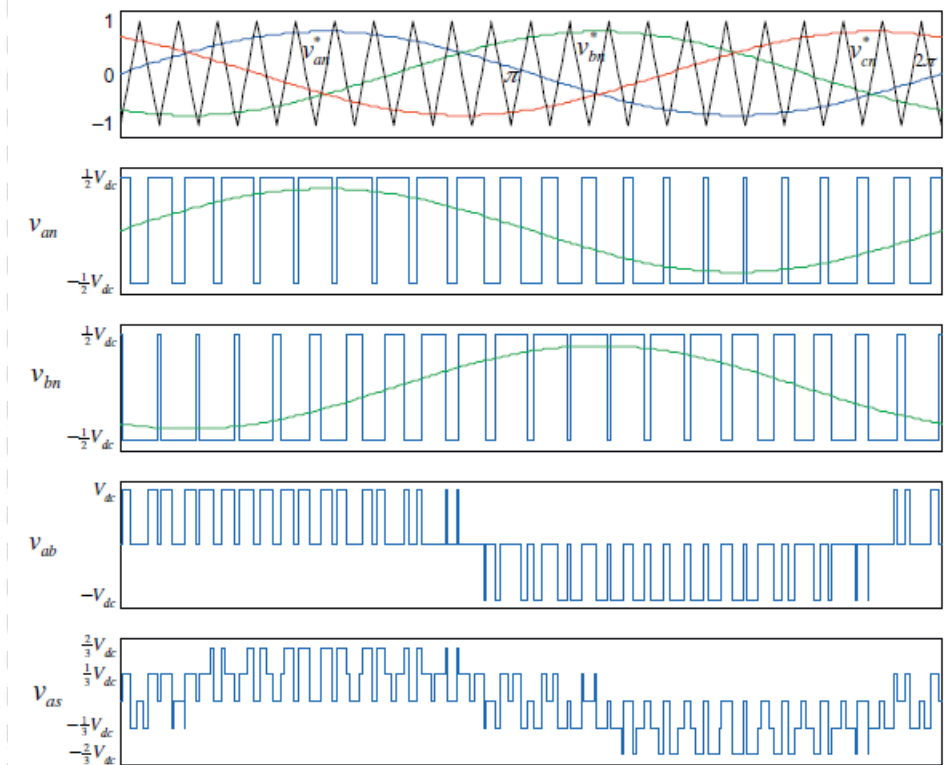
Pada Gambar 2.2 terlihat rangkaian inverter 3 fasa multilevel *cascaded h-bridge* 5 tingkat. Rangkaian tersebut tersusun atas 24 sakelar elektronik. Kondisi *on/off* sakelar elektronik pada fasa a dapat dilihat melalui Tabel 2.1.

2.3 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

Sinusoidal PWM adalah teknik PWM yang khas. Dalam teknik PWM ini, referensi tegangan AC v_{ref} dibandingkan dengan gelombang pembawa segitiga frekuensi tinggi v_c secara *real time* untuk menentukan status *switching* untuk setiap kutub di inverter. Hal yang perlu diperhatikan juga adalah bahwa puncak tegangan AC referensi tidak boleh melebihi tegangan puncak gelombang pembawa. (Kim, 2017:292).

Dalam teknik SPWM, frekuensi *switching* dari inverter sama dengan frekuensi gelombang pembawa. Saklar dinyalakan / dimatikan sekali setiap periode gelombang pembawa segitiga. Demikianlah teknik SPWM memiliki keuntungan karena frekuensi

switching yang konstan. Konstanta frekuensi switching memungkinkan untuk menghitung kerugian dari perangkat *switching*. Selain itu, karena karakteristik harmonik akan didefinisikan dengan baik, desain filter *low-pass* untuk menghilangkan harmonik akan menjadi lebih mudah (Kim, 2017:294).



Gambar 2. 3 Teknik SPWM
 Sumber: Kim, 2017:294

Pada Gambar 2.3 terlihat gelombang teknik SPWM. Ketika frekuensi *switching* yang lebih tinggi digunakan, kualitas gelombang tegangan dapat ditingkatkan dan penyaringan dapat dibuat lebih mudah. Namun, ini menyebabkan kerugian *switching* yang lebih besar. Karena itu penting untuk mempertimbangkan kinerja keseluruhan sistem ketika memilih frekuensi *switching* (Kim, 2017:296).

2.3.1 Multicarrier Sinusoidal PWM

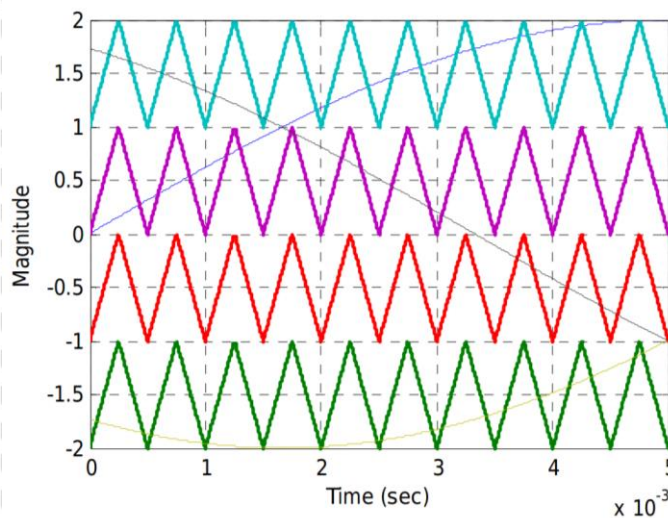
Multicarrier Sinusoidal PWM adalah teknik pensakelaran dengan menggunakan gelombang pembawa lebih dari satu tingkat. Pada inverter 5 tingkat menggunakan 4 tingkat gelombang pembawa. Setiap gelombang pembawa harus memiliki frekuensi yang sama antara satu dengan yang lainnya. Pada inverter multilevel, index modulasi amplitudo m_a dan index modulasi frekuensi m_f dapat didefinisikan melalui persamaan 2-5 dan 2-6.

$$m_f = \frac{f_c}{f_m} \quad (2-5)$$

$$m_a = \frac{A_m}{(m-1) \times A_c} \quad (2-6)$$

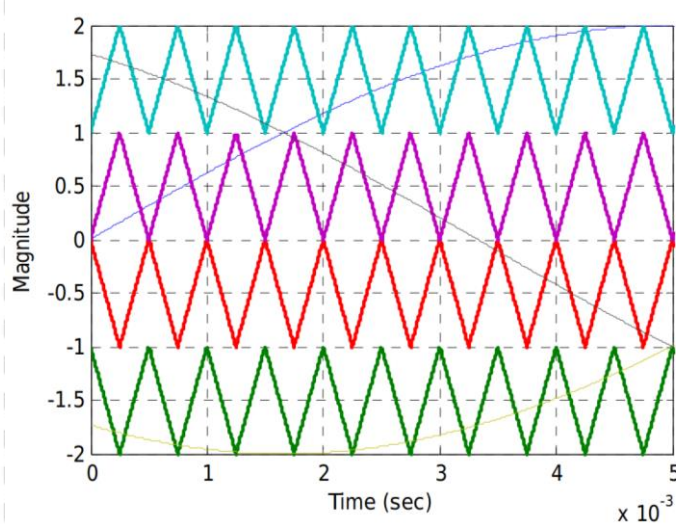
Dimana A_m dan A_c adalah amplitudo gelombang modulasi dan gelombang pembawa, sedangkan f_m dan f_c adalah frekuensi gelombang modulasi dan gelombang pembawa. Pada aplikasi inverter multilevel, teknik PWM multicarrier digunakan. Teknik modulasi multicarrier dibagi menjadi beberapa katagori, yaitu

1. *Phase Disposition* (PD) dimana semua gelombang pembawa sefasa antara satu dengan yang lainnya.
2. *Phase Opposition Disposition* (POD) dimana semua gelombang pembawa di atas 0 sefasa, dan semua gelombang pembawa di bawah 0 memiliki beda fasa sebesar 180 derajat dari gelombang pembawa di atas 0.
3. *Alternative Phase Opposition Disposition* (APOD) dimana setiap gelombang pembawa yang berdekatan memiliki beda fasa sebesar 180 derajat (Paikray & Mohanty, 2014:2).

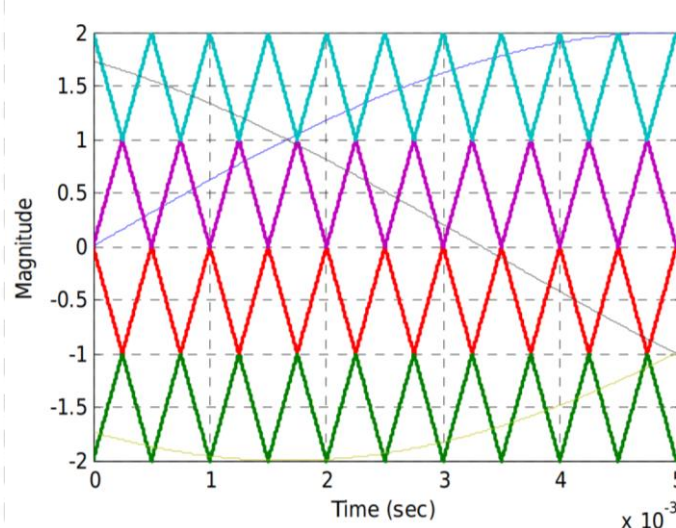


Gambar 2. 4 PD-SPWM

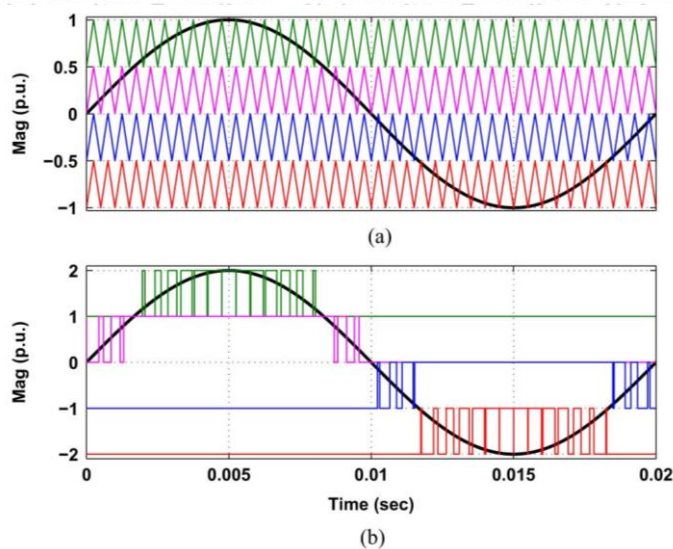
Sumber: Paikray & Mohanty, 2014:3



Gambar 2. 5 POD-SPWM
Sumber: Paikray & Mohanty, 2014:3



Gambar 2. 6 APOD-SPWM
Sumber: Paikray & Mohanty, 2014:3



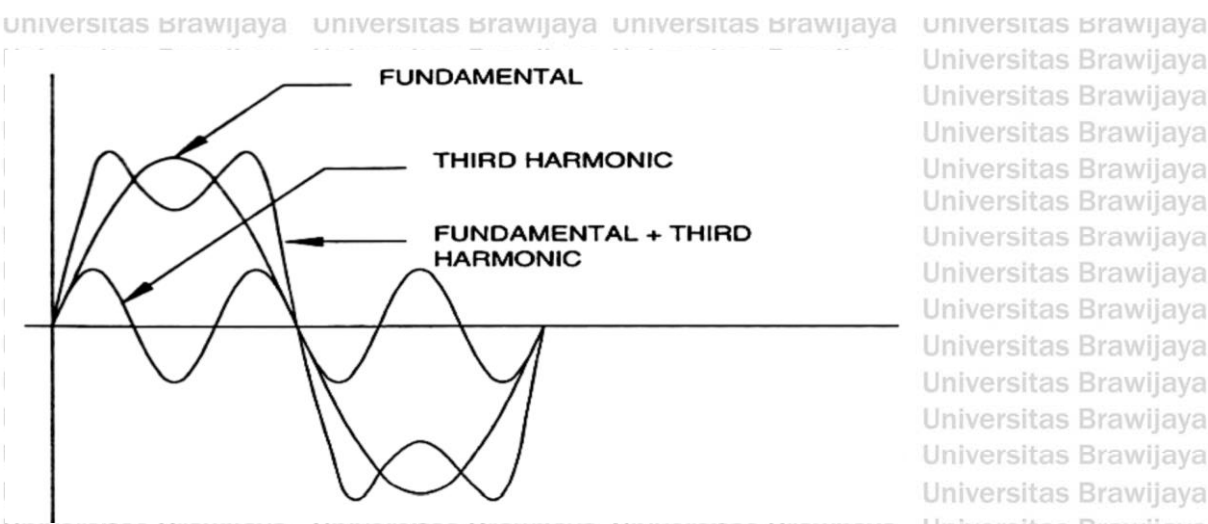
Gambar 2.7 Multicarrier PD-SPWM

Sumber: Ghazanfari *et al.*, 2012:2151

Pada gambar 2.4, 2.5, dan 2.6 berturut-turut diperlihatkan gelombang pembawa dan gelombang referensi PD-SPWM, POD-SPWM, dan APOD-SPWM. Sedangkan pada gambar 2.7 memperlihatkan bentuk gelombang PD-SPWM sekaligus gelombang tegangan keluarannya.

2.4 Harmonik

Harmonik pada sistem tenaga listrik adalah cacat gelombang akibat adanya interferensi gelombang lain yang memiliki frekuensi kelipatan bilangan *integer* dari frekuensi fundamentalnya. Harmonik biasanya disebabkan oleh beban non-linier. Seperti yang diketahui, harmonik arus dapat menyebabkan komponen elektronik menjadi panas berlebihan dan turunnya performa kerja. Orde harmonik yang tinggi mengakibatkan gangguan pada komunikasi atau pada sistem kontrol elektronik. Sedangkan pada harmonik orde rendah mengakibatkan meningkatnya rugi-rugi panas peralatan. Beberapa masalah panas tersebut sebanding dengan frekuensi dan beberapa sebanding dengan kuadrat frekuensi yang mana dapat memperpendek usia pemakaian dari peralatan (Varjani, 1998:2).



Gambar 2. 8 Gelombang terdistorsi
 Sumber: Efandi *et al.*, 2015:10

Pada Gambar 2.8 diperlihatkan gelombang terdistorsi akibat komponen harmonik. Gelombang terdistorsi tersebut terdiri atas gelombang fundamental dan gelombang harmonik.

Berdasarkan metode Fourier, suatu fungsi periodik dapat diuraikan menjadi fungsi sinusoidal dengan frekuensi, amplitudo, dan sudut fasa tertentu apabila memenuhi syarat-syarat berikut:

1. Merupakan fungsi periodic $f(\omega t) = f(\omega t + T)$ dimana T =periode
2. Merupakan fungsi kontinu atau fungsi tak kontinu dengan jumlah ketidak-kontinyuan yang tertentu selama satu periode.
3. Selama selang periode, fungsi harus mempunyai harga rata-rata tertentu.
4. Dalam satu periode T , fungsi harus mempunyai harga maksimum atau minimum yang jumlahnya tertentu (Efandi *et al.*, 2015:11).

Apabila syarat-syarat sudah terpenuhi, maka fungsi dapat diuraikan menjadi deret Fourier dengan persamaan 2-7 yang terdiri dari persamaan 2-8, 2-9, dan 2-10.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \tag{2-7}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \tag{2-8}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \tag{2-9}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \tag{2-10}$$

2.5 Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) adalah perbandingan nilai distorsi akibat komponen harmonik yang terkandung dalam sistem dengan nilai fundamental sistem. Nilai THD menyatakan jumlah atau besarnya distorsi tegangan atau arus dalam bentuk persentase terhadap nilai fundamentalnya. Besar nilai THD dapat dirumuskan dengan persamaan 2-11:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_{n,rms})^2}}{I_{1,rms}} \times 100\% \quad (2-11)$$

Dengan: $I_{1,rms}$: komponen fundamental

$I_{n,rms}$: komponen harmonik ke-n

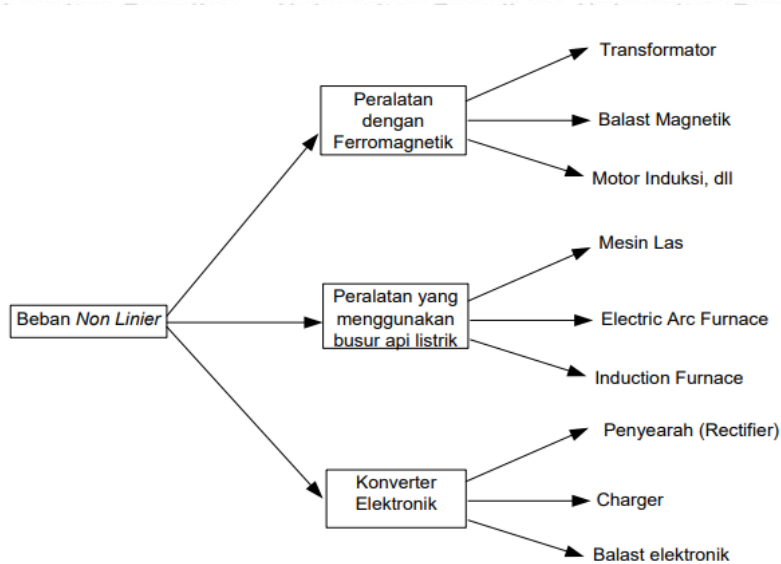
n : urutan harmonik

2.6 Beban Non-Linier

Suatu beban dianggap non-linier jika impedansinya berubah dengan tegangan yang diberikan. Impedansi yang berubah menyebabkan arus yang ditarik oleh beban non-linier tidak sinusoidal walaupun tegangannya sinusoidal. Arus non-sinusoidal ini mengandung arus harmonik yang mendistorsi sistem sehingga beban-beban yang terhubung pada sistem ini akan terkena pengaruhnya.

Salah satu beban non-linier yang sering ditemui pada saat ini adalah konverter daya elektronik. Konverter daya elektronik itu misalnya stasiun *High Voltage* DC (HVDC), AC dan DC *variable speed drive*, dan *diode rectifier* yang biasa ditemui dalam aplikasi elektronik seperti televisi dan komputer (Varjani, 1998:2).

Beberapa macam beban non-linier dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Jenis Beban Non-Linear
 Sumber: Widiantara *et al.*, 2016:56

2.7 Teori Daya Sesaat

Teori daya sesaat atau biasa disebut *p-q theory* adalah daya sesaat yang ditentukan dalam domain waktu. Tidak ada batasan yang diberlakukan pada bentuk gelombang tegangan dan arus, dan dapat diterapkan pada sistem tiga fasa dengan atau tanpa kabel netral untuk tegangan generik tiga fasa dan bentuk gelombang arus. Dengan demikian, pengukuran akan valid tidak hanya dalam kondisi mapan melainkan juga pada kondisi transien. Konsep daya tradisional lainnya dicirikan dengan memperlakukan sistem tiga fasa sebagai tiga rangkaian fasa tunggal. Teori daya sesaat pertama-tama mengubah tegangan dan arus dari koordinat abc ke koordinat $\alpha\beta 0$ kemudian menentukan daya sesaat pada koordinat ini. Oleh karena itu, teori ini selalu menganggap sistem tiga fasa sebagai satu kesatuan, bukan superposisi atau penjumlahan dari tiga rangkaian fasa tunggal (Akagi *et al.*, 2007:42).

2.7.1 Clarke Transformation

Untuk mengubah koordinat abc ke koordinat $\alpha\beta 0$ digunakan transformasi *Clarke*. Transformasi *Clarke* memetakan tegangan sesaat tiga fasa dalam fasa abc $v_a, v_b,$ dan v_c menjadi tegangan sesaat pada koordinat $\alpha\beta 0$ $v_\alpha, v_\beta,$ dan v_0 . Transformasi *Clarke* dihitung menggunakan persamaan 2-12 dan transformasi kebalikannya diberikan dengan persamaan 2-13.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

Begitupun juga halnya mentransformasikan arus menggunakan persamaan 2-14 dan transformasi kebalikannya diberikan dengan persamaan 2-15.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

Salah satu keuntungan menerapkan transformasi $\alpha\beta 0$ adalah dapat memisahkan komponen urutan-nol dari komponen fasa abc. Sumbu α dan β tidak memberikan kontribusi pada komponen urutan-nol. Tidak ada arus urutan-nol dalam sistem tiga fasa tiga kabel, sehingga i_0 dapat dihilangkan dari persamaan di atas, sehingga menghasilkan penyederhanaan persamaan. Jika tegangan tiga fasa diseimbangkan dalam sistem empat kabel, tidak ada tegangan urutan-nol yang ada, sehingga v_0 dapat dihilangkan. Namun, jika tegangan dan arus urutan-nol ada, transformasi lengkap harus dipertimbangkan (Akagi *et al.*, 2007:44).

Jika v_0 dihilangkan dari matriks transformasi, maka transformasi *Clarke* dan invers transformasi *Clarke* dihitung menggunakan persamaan 2-16 dan 2-17.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

Jika i_0 dihilangkan dari matriks transformasi, maka transformasi *Clarke* dan invers transformasi *Clarke* akan menjadi persamaan 2-18 dan 2-19.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

Dengan diabaikannya tegangan dan arus urutan-nol, maka dapat ditentukan vektor tegangan sesaat pada persamaan 2-20 dan vektor arus sesaat pada persamaan 2-21.

$$\mathbf{e} = v_\alpha + jv_\beta \quad (2-20)$$

$$\mathbf{i} = i_\alpha + ji_\beta \quad (2-21)$$

2.7.2 Daya Sesaat Tiga Fasa dalam Terminologi Komponen Clarke

Daya aktif tiga fasa dalam koordinat abc dapat didefinisikan dengan menggunakan persamaan 2-22 dan 2-23:

$$P_{3\phi}(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (2-22)$$

$$P_{3\phi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (2-23)$$

Dari persamaan di atas, maka daya aktif tiga fasa dalam koordinat $\alpha\beta 0$ dapat ditentukan dengan persamaan 2-24:

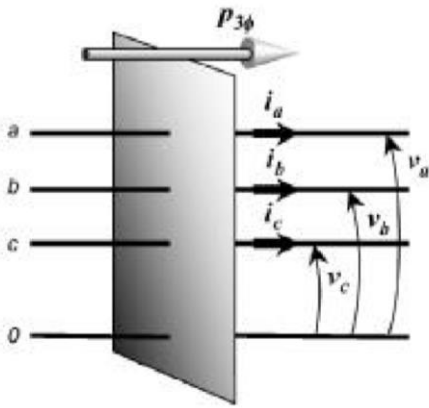
$$P_{3\phi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (2-24)$$

2.7.3 Daya Sesaat p-q Theory

Daya sesaat p-q theory pada koordinat $\alpha\beta 0$ dibagi menjadi daya sesaat urutan-nol p_0 , daya aktif sesaat p , dan daya imajiner sesaat q . Daya aktif sesaat 3 fasa dapat dilihat pada

Gambar 2.10. Daya sesaat p-q theory ditentukan dengan tegangan sesaat dan arus sesaat pada koordinat $\alpha\beta$ dengan persamaan 2-25.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-25)$$



Gambar 2. 10 Daya aktif sesaat 3 fasa

Sumber: Akagi *et al.*, 2007:48

Pada sistem tiga fasa tiga kabel, tidak ada i_0 atau $i_0 = 0$, maka $p_0 = 0$, sehingga untuk menentukan daya kompleks dan penjabarannya pada sistem menggunakan persamaan 2-26, 2-27, dan 2-28.

$$s = e \cdot i^* \quad (2-26)$$

$$s = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) \quad (2-27)$$

$$s = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (2-28)$$

Dimana p didefinisikan dengan persamaan 2-29 dan q didefinisikan dengan persamaan 2-30.

$$p = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (2-29)$$

$$q = j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (2-30)$$

Definisi asli dari p dan q didefinisikan dengan persamaan 2-31.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

Pada penjelasan berikut ini, tegangan pada sumbu $\alpha\beta$, daya aktif sesaat dan daya imajiner sesaat akan digunakan sebagai fungsi untuk mencari arus pada sumbu $\alpha\beta$ dengan persamaan 2-32.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} + P_{loss} \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2-33)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2-34)$$

Pada persamaan 2-33, komponen daya p terdiri dari daya \bar{p} & \tilde{p} , dimana \bar{p} adalah komponen daya aktif DC dan \tilde{p} adalah komponen daya aktif AC, begitupun juga dengan persamaan 2-34, \bar{q} dan \tilde{q} . Sedangkan P_{loss} adalah rugi-rugi daya pada inverter SAPF.

Kemudian dipisahkan antara komponen p dan komponen q menggunakan persamaan 2-35 sehingga masing-masing komponen p dan komponen q menjadi persamaan 2-36 dan 2-37.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

Dari persamaan di atas, maka akan didapatkan:

Persamaan 2-38 yaitu arus aktif sesaat pada sumbu α

$$i_{\alpha p} = \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p \quad (2-38)$$

Persamaan 2-39 yaitu arus reaktif sesaat pada sumbu α

$$i_{\alpha q} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \quad (2-39)$$

Persamaan 2-40 yaitu arus aktif sesaat pada sumbu β

$$i_{\beta p} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p \quad (2-40)$$

Persamaan 2-41 yaitu arus reaktif sesaat pada sumbu β

$$i_{\beta q} = -\frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} q \quad (2-41)$$

Ketika sudah menemukan arus referensi dalam sumbu $\alpha\beta$, maka transformasi arus ke dalam koordinat abc dengan persamaan 2-42 dan 2-43 kemudian jumlahkan kedua persamaan tersebut menggunakan persamaan 2-44.

$$\begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

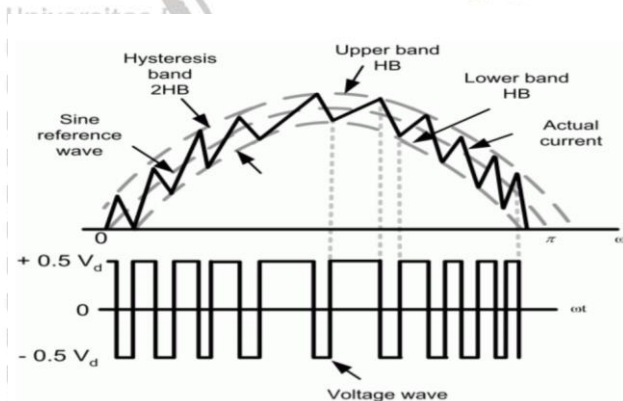
$$\begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

Arus referensi konjugat $\begin{bmatrix} i_{a-ref}^* \\ i_{b-ref}^* \\ i_{c-ref}^* \end{bmatrix}$ adalah komponen arus harmonik dalam sistem yang harus dieliminasi agar nilai THD arus berkurang.

2.8 Hysteresis Current Control

Teknik control arus histerisis adalah metode control arus yang paling umum. Prinsip kerja dari metode ini adalah dengan memaksa arus yang sebenarnya mengikuti arus referensi. Secara teknis, metode ini membatasi arus sebenarnya antara dua batas yang biasanya bergeser dari referensi. Arus sebenarnya tidak dibiarkan untuk melewati batas-batas dengan menyalakan atau mematikan sakelar inverter, hal ini bisa dilihat pada Gambar 2.11. Kelemahan metode ini adalah frekuensi sakelar yang tinggi yang menyebabkan rugi-rugi pensaklaran yang tinggi. Jenis kontrol ini dapat diterapkan pada aplikasi daya rendah (Qutaina, 2019:18-19).



Gambar 2. 11 Hysteresis Current Control

Sumber: Qutaina, 2019:19

2.9 Filter Pasif

Filter pasif adalah filter yang beroperasi secara pasif tanpa adanya pengaturan elektronik. Proses *filtering* terjadi secara alami dan terus menerus. Ada beberapa jenis filter pasif yang biasa digunakan, yaitu:

1. *Low-Pass Filter*: filter yang meloloskan frekuensi di bawah frekuensi cut-off.
2. *Band-Pass Filter* : filter yang meloloskan frekuensi dengan rentang yang ditentukan.
3. *Band-Stop Filter*: filter yang memberhentikan frekuensi dengan rentang yang ditentukan.
4. *High-Pass Filter*: filter yang meloloskan frekuensi di atas frekuensi cut-off.

Dalam penelitian ini, digunakan *low-pass* filter untuk menyaring frekuensi tegangan pada inverter agar dihasilkan bentuk gelombang tegangan yang sinusoidal. Konfigurasi *low-pass* filter yang digunakan adalah menggunakan RC *low-pass filter*. Untuk menentukan nilai R dan C filter, digunakan persamaan 2-45 yang dapat diubah menjadi persamaan 2-46.

$$f_{c-o} = \frac{1}{2\pi RC_{filter-pasif}} \quad (2-45)$$

$$C_{filter-pasif} = \frac{1}{2\pi X_c f} \quad (2-46)$$

Karena $X_c = R$, dan $f_c = f$, maka C dapat dicari dengan persamaan 2-47.

$$C_{filter-pasif} = \frac{1}{2\pi R f_{c-o}} \quad (2-47)$$

Keterangan:

$C_{filter-pasif}$ = Kapasitansi kapasitor (F)

R = Resistansi filter (Ω)

f_{c-o} = Frekuensi Cut-Off (Hz)

Frekuensi fundamental gelombang tegangan adalah 50 Hz, maka $f_{c-o} = 50$ Hz. Dengan memasukkan nilai R dan f_{c-o} didapat nilai kapasitansi filter yang dibutuhkan untuk menghasilkan gelombang tegangan sinusoidal dengan frekuensi 50 Hz.

2.10 Active power Filter

Active Power Filter adalah filter yang dikendalikan secara elektronik agar dicapai proses dan hasil filtering yang diinginkan sesuai dengan perubahan kondisi beban. *Active*

power filter hanya mengeliminasi konten harmonik pada arus beban. Harmonik arus pada umumnya dapat disebabkan dari:

1. Beban non-linier.
2. Harmonik tegangan sumber (Akagi *et al.*, 2007:109).

Ada beberapa jenis *active power filter* yang biasa digunakan untuk meredam harmonik pada arus, yaitu:

1. *Shunt active power filter*.
2. *Series active power filter*.
3. *Hybrid active power filter*.

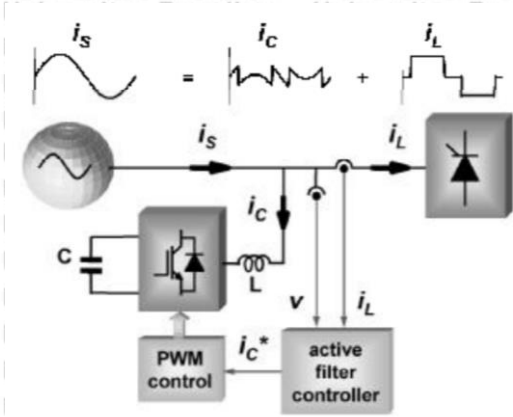
Dalam penelitian ini, topologi yang digunakan untuk proses filtering arus harmonik adalah menggunakan *shunt active power filter*.

2.10.1 *Shunt Active Power Filter* (SAPF)

Shunt active power filter adalah filter aktif yang terhubung dengan sistem secara paralel. Pada umumnya, filter aktif shunt terdiri dari dua blok utama, yaitu:

1. Konverter PWM (pemrosesan daya).
2. Pengontrol filter aktif (pemrosesan sinyal).

Konverter PWM bertanggung jawab untuk pemrosesan daya dalam mensintesis arus kompensasi yang harus diambil dari sistem. Kontroler filter aktif bertanggung jawab untuk pemrosesan sinyal dalam menentukan secara *real time* referensi kompensasi arus yang terus menerus diteruskan ke konverter PWM. Pada Gambar 2.12 menunjukkan konfigurasi dasar filter aktif shunt untuk kompensasi arus harmonik dari beban tertentu. Konfigurasi ini menghasilkan algoritma control yang hampir seketika. Pengontrol filter aktif shunt bekerja pada sistem loop tertutup secara kontinyu merasakan arus beban i_L , dan menghitung nilai kompensasi arus referensi i_c^* secara seketika untuk konverter PWM (Akagi *et al.*, 2007:111).



Gambar 2.12 Rangkaian SAPF dalam sistem
 Sumber: Akagi *et al.*, 2007:111

2.10.2 DC Link Voltage Regulator

DC link voltage regulator adalah regulasi dalam menentukan besarnya tegangan dc pada kapasitor shunt active power filter. Besarnya tegangan dc referensi (v_{dc-ref}) dapat ditentukan melalui persamaan 2-48 dan 2-49.

$$v_{dc-min} \geq \frac{v_s}{\sqrt{2}m_a} \quad (2-48)$$

$$v_{dc-max} \geq 2\sqrt{2}v_s \quad (2-49)$$

Dimana v_s adalah rms tegangan sumber dan m_a adalah indeks modulasi amplitude, dalam penelitian ini m_a bernilai 1 karena amplitude tegangan dc link dan puncak tegangan sumber sama. v_{dc-ref} harus bernilai lebih besar dibanding tegangan puncak pada grid inverter agar mendapat control yang baik dalam kompensasi nilai harmonik (Qutaina, 2019:25).

Dengan menggunakan persamaan di atas, maka dapat dihitung besar kapasitor yang diperlukan menggunakan persamaan persamaan 2-50.

$$C_{dc} = \frac{v_m(\Delta I_f)T}{[v_{dc-max}^2 - v_{dc-min}^2]} \quad (2-50)$$

Dimana ΔI_f adalah arus pada filter dengan 180% arus rating filter, sedangkan v_m adalah tegangan maksimum line to line sumber.

2.10.3 Coupling Inductor

Coupling inductor adalah inductor yang digunakan pada shunt active power filter untuk menyaring arus kompensasi. Nilai L_f yang kecil dapat memberikan distorsi arus pada

sistem. Maka perlu dihitung nilai minimum dari L_f agar sistem tidak terdistorsi menggunakan persamaan 2-51.

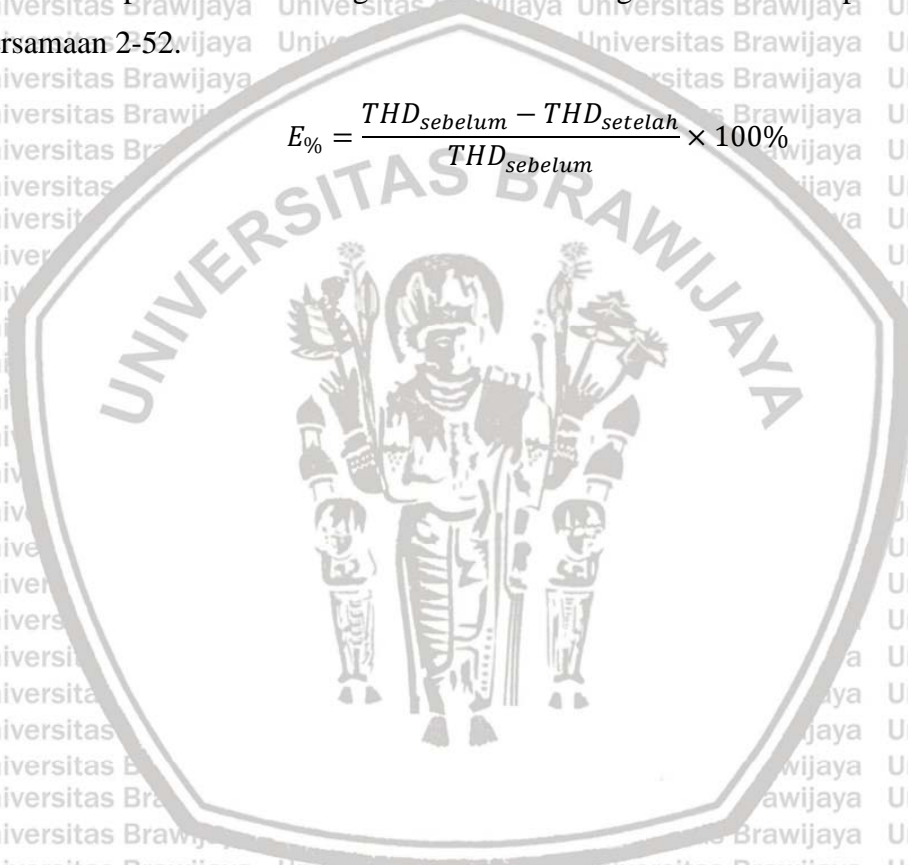
$$L_{f-min} = \frac{T_s \times v_{dc-ref}}{8 \times \Delta I_{f-max}} \quad (2-51)$$

Dimana ΔI_{f-max} adalah arus *ripple* maksimum yang diperbolehkan yaitu sebesar 15% dari arus *rating* filter.

2.11 Efektivitas SAPF

Efektivitas SAPF adalah tingkat keefektifan rangkaian SAPF dalam menurunkan nilai THD arus pada sistem. Tingkat efektivitas rangkaian SAPF dapat ditentukan dengan persamaan 2-52.

$$E\% = \frac{THD_{sebelum} - THD_{setelah}}{THD_{sebelum}} \times 100\% \quad (2-52)$$

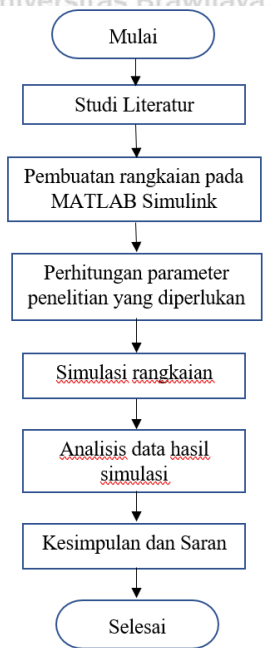




BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian adalah diagram yang menceritakan runtutan kegiatan penelitian yang dilakukan dari awal penelitian sampai akhir. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat melalui Gambar 3.1.

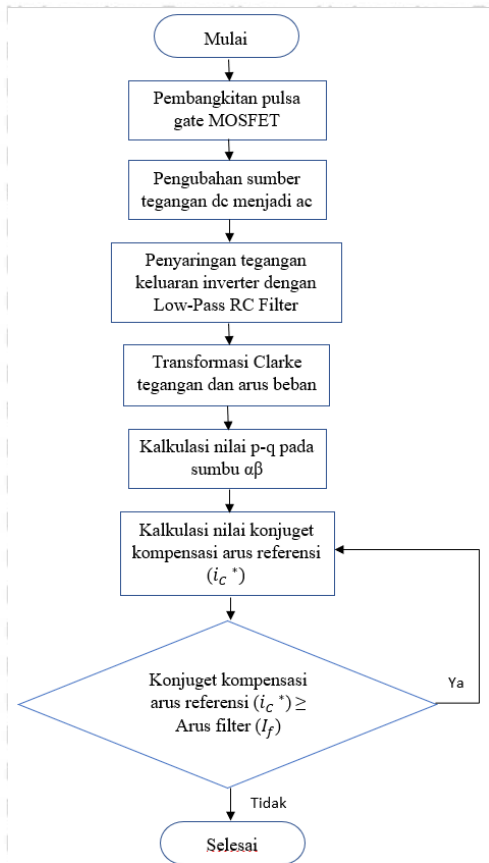


Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

Penelitian ini dimulai dengan beberapa tahapan, tahapan pertama studi literatur yaitu dengan mempelajari materi yang dibutuhkan sebagai teori penunjang penelitian. Setelah studi literatur selesai, kemudian pembuatan rangkaian simulasi menggunakan MATLAB Simulink yang akan digunakan untuk menjalankan simulasi. Setelah rangkaian simulasi dibuat, dilakukan perhitungan parameter penelitian yang diperlukan agar simulasi berjalan sesuai dengan teori. Kemudian simulasi rangkaian dijalankan untuk mencatat hasil simulasi. Setelah didapatkan hasil simulasi, dilakukan analisis data hasil simulasi yang bertujuan untuk merangkum apa yang terjadi selama simulasi dijalankan. Setelah analisis data didapatkan, kesimpulan dan saran dapat dibuat.

3.2 Diagram Alir Simulasi

Diagram alir simulasi adalah diagram yang menceritakan runtutan jalannya simulasi yang terjadi dari awal sampai akhir. Diagram alir simulasi ini dapat dilihat melalui Gambar 3.2.

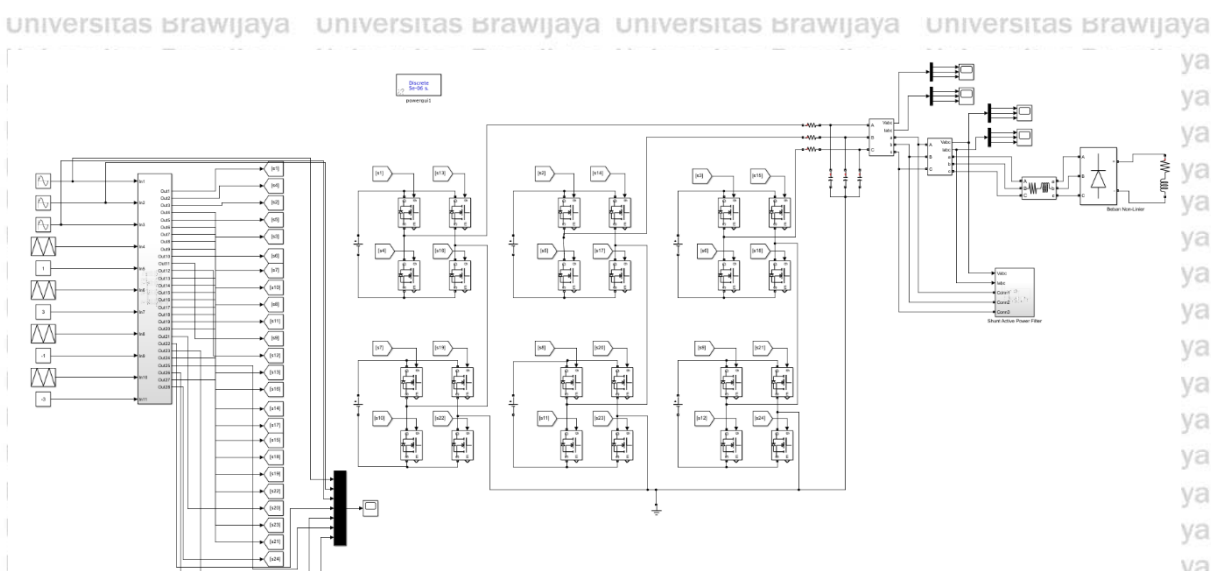


Gambar 3. 2 Diagram alir simulasi

Simulasi ini dimulai dengan membangkitkan pulsa gate MOSFET dengan teknik *Multicarrier SPWM*. Kemudian pengubahan sumber tegangan DC menjadi AC pada inverter dengan cara mengatur pulsa gate MOSFET. Kemudian penyaringan tegangan keluaran inverter yang tidak sinusoidal menggunakan filter pasif *Low-Pass RC* agar bentuk gelombang tegangan mendekati sinusoidal murni. Kemudian transformasi tegangan dan arus inverter ke koordinat $\alpha\beta 0$ menggunakan transformasi *Clarke* dengan meniadakan komponen pada sumbu 0 sebagaimana yang telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya. Kemudian kalkulasi nilai p dan q dapat dilakukan. Setelah nilai p dan q ditemukan, barulah dapat dikalkulasi nilai arus referensi. Nilai konjugat arus referensi ini yang nantinya akan dijadikan untuk mengatur pembangkitan pulsa pemicu gate pada filter aktif *shunt* dengan cara membandingkannya dengan arus yang mengalir menuju filter aktif *shunt*.

3.3 Rangkaian Simulasi pada MATLAB Simulink

Penelitian ini menggunakan *software* MATLAB Simulink untuk menjalankan simulasi dengan landasan teori yang telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya. Rangkaian keseluruhan sistem simulasi terdapat pada Gambar 3.3.



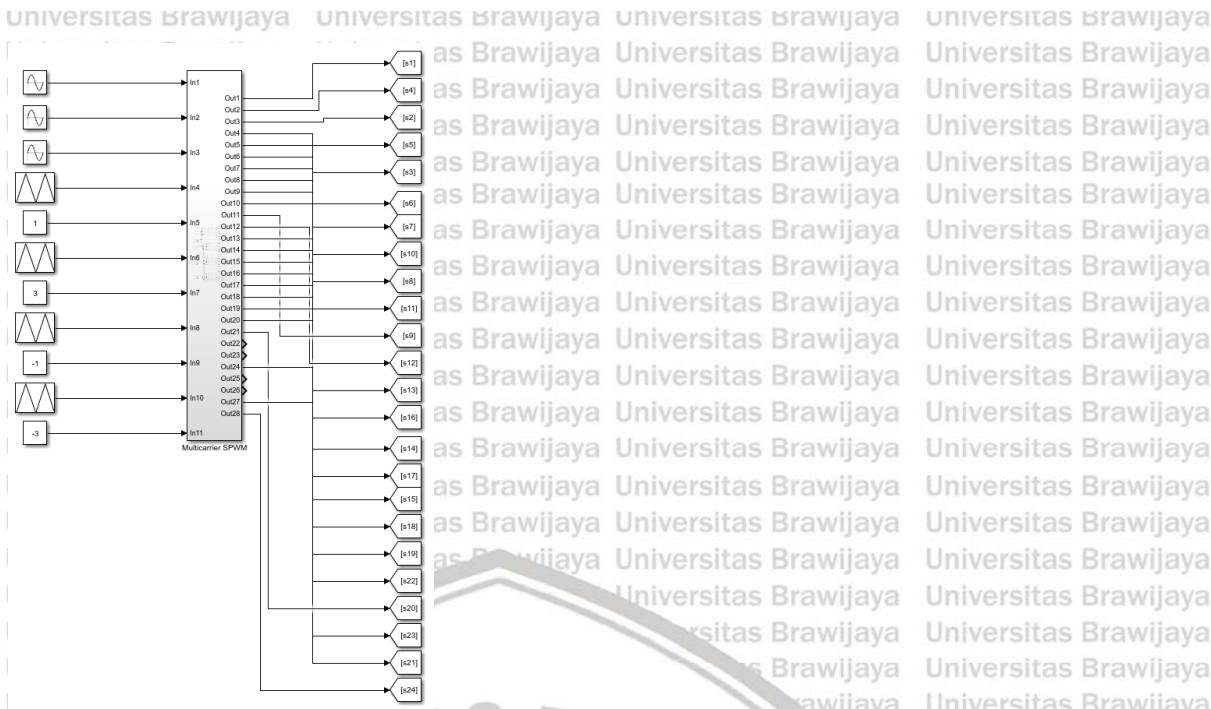
Gambar 3. 3 Rangkaian simulasi keseluruhan

Pada rangkaian Gambar 3.3 dapat dilihat bahwa inverter yang digunakan adalah inverter 3 fasa 5 tingkat dengan susunan *cascaded h-bridge*. Teknik PWM yang digunakan untuk memicu gate MOSFET adalah dengan menggunakan teknik *Multicarrier PD-SPWM* sebagaimana yang telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya.

3.3.1 Rangkaian *Multicarrier PD-SPWM*

Modulasi di dalam rangkaian pembangkit pulsa gate MOSFET menggunakan teknik *multicarrier PD-SPWM*. Di dalam teknik ini, gelombang pembawa segitiga disusun bertingkat 4 dengan frekuensi yang sama dan beda fasa tiap gelombang adalah nol, kemudian gelombang referensi 3 fasa diberikan dengan amplitudo sebesar 4 kali amplitudo gelombang pembawa sehingga nilai indeks modulasi amplitudonya bernilai satu.

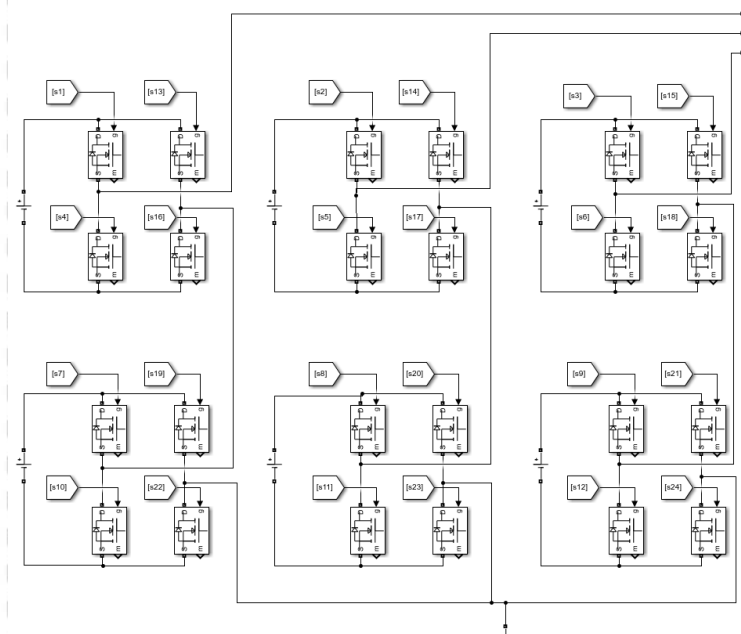
Gelombang pembawa disusun bertingkat 4 agar tegangan keluaran pada inverter memiliki 5 tingkatan, yaitu $+2V_{dc}$, $+V_{dc}$, 0 , $-V_{dc}$, $-2V_{dc}$. Frekuensi gelombang pembawa yang digunakan adalah sebesar 5000 Hz. Rangkaian simulasi pembangkit pulsa gate MOSFET dapat dilihat dari Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Rangkaian simulasi pembangkit pulsa

3.3.2 Rangkaian Inverter 3 Fasa 5 tingkat Cascaded H-Bridge

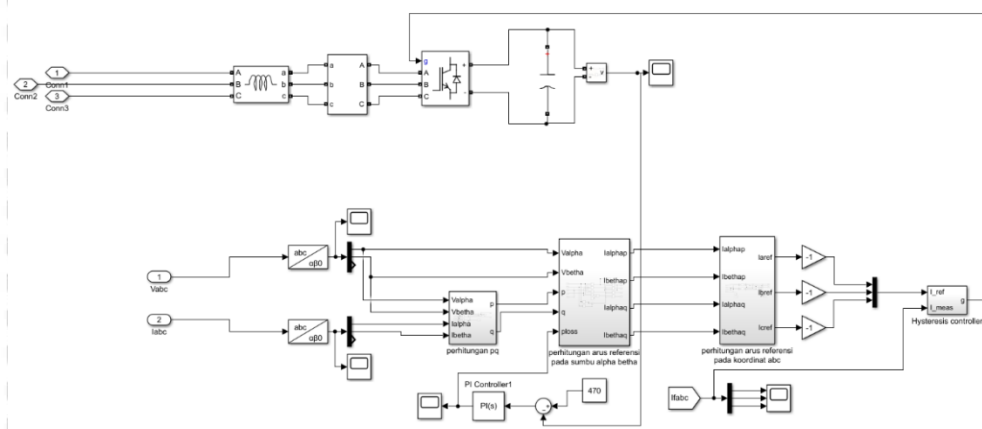
Inverter ini menggunakan 24 MOSFET dan 6 sumber tegangan DC. Tiap fasa tersusun dari 8 buah MOSFET dan 2 sumber tegangan DC. Keluaran dari inverter ini akan menjumlahkan tegangan keluaran tiap sumber. Pada perancangan simulasi ini, tiap sumber tegangan DC memiliki tegangan sebesar 200 volt. Rangkaian simulasi inverter pada penelitian ini terdapat pada Gambar 3.5.



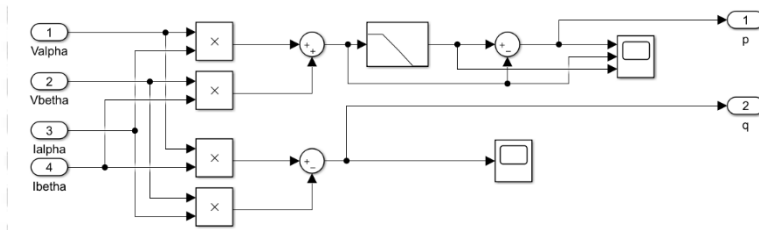
Gambar 3.5 Rangkaian simulasi Multilevel Inverter

3.3.3 Rangkaian *Shunt Active Power Filter*

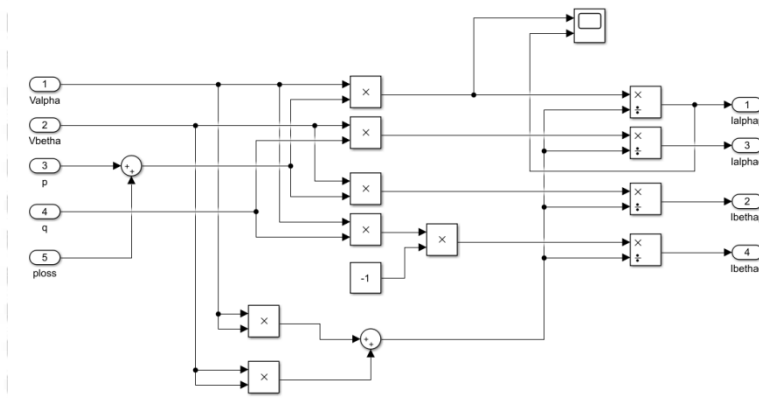
Dalam penelitian ini arus harmonik akibat beban non-linier dihilangkan dengan menggunakan filter aktif shunt. Masukan filter aktif shunt merupakan tegangan dan arus beban yang akan ditransformasikan ke dalam sumbu $\alpha\beta$ menggunakan transformasi Clarke. Hasil transformasi tegangan dan arus beban akan digunakan untuk mencari kompensasi arus referensi. Besar nilai kompensasi arus referensi dapat dicari menggunakan teori daya sesaat atau *p-q theory*. Rangkaian *shunt active power filter* pada simulasi penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.6 sedangkan rangkaian-rangkaian penyusun *shunt active power filter* dapat dilihat pada Gambar 3.7, 3.8, 3.9, dan 3.10.



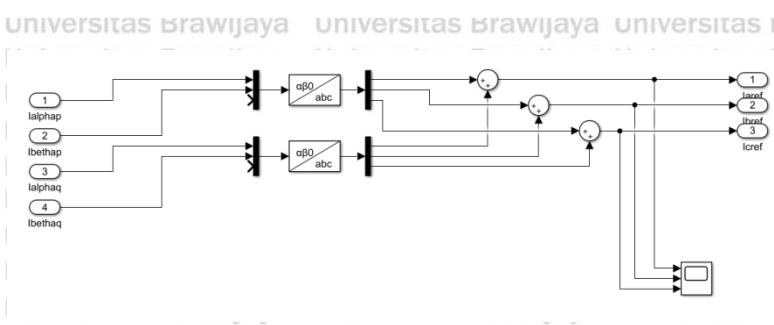
Gambar 3. 6 Rangkaian simulasi *Shunt Active Power filter*



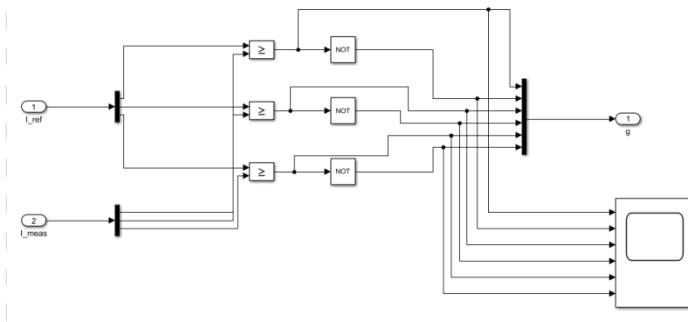
Gambar 3. 7 Rangkaian simulasi perhitungan nilai p-q



Gambar 3. 8 Rangkaian simulasi perhitungan nilai arus referensi pada sumbu $\alpha\beta$



Gambar 3. 9 Rangkaian simulasi perhitungan nilai arus referensi pada sumbu abc



Gambar 3. 10 Rangkaian simulasi Hysteresis Current Control

3.4 Pengujian

Pengujian dilakukan dua kali yaitu saat kondisi sistem tanpa dipasang dan saat sistem dipasang *shunt active power filter*. Beban RL akan divariasikan nilainya kemudian tiap nilai beban RL akan diambil dua data, yaitu data arus sumber saat tanpa dipasang dan data arus sumber saat dipasang *shunt active power filter*.

3.4.1 Sistem Tanpa *Shunt Active Power Filter*

Inverter dihubungkan dengan beban non-linier RL kemudian nilai R dan L divariasikan. Rangkaian SAPF tidak dipasang pada inverter untuk melihat seberapa besar variasi beban non-linier dapat mendistorsi arus sistem.

3.4.2 Sistem Dengan *Shunt Active Power Filter*

Inverter dihubungkan dengan beban non-linier RL kemudian nilai R dan L divariasikan. Rangkaian SAPF dipasang pada inverter untuk melihat pengaruh rangkaian SAPF untuk menurunkan nilai THD. Dari simulasi ini akan didapatkan bentuk gelombang arus harmonik.

3.5 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Pengambilan kesimpulan dilakukan setelah menganalisis hasil dari pengujian simulasi sistem saat tanpa dipasang SAPF dan saat sistem terpasang SAPF. Kekurangan dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi saran untuk penelitian selanjutnya demi mengembangkan penelitian ini.

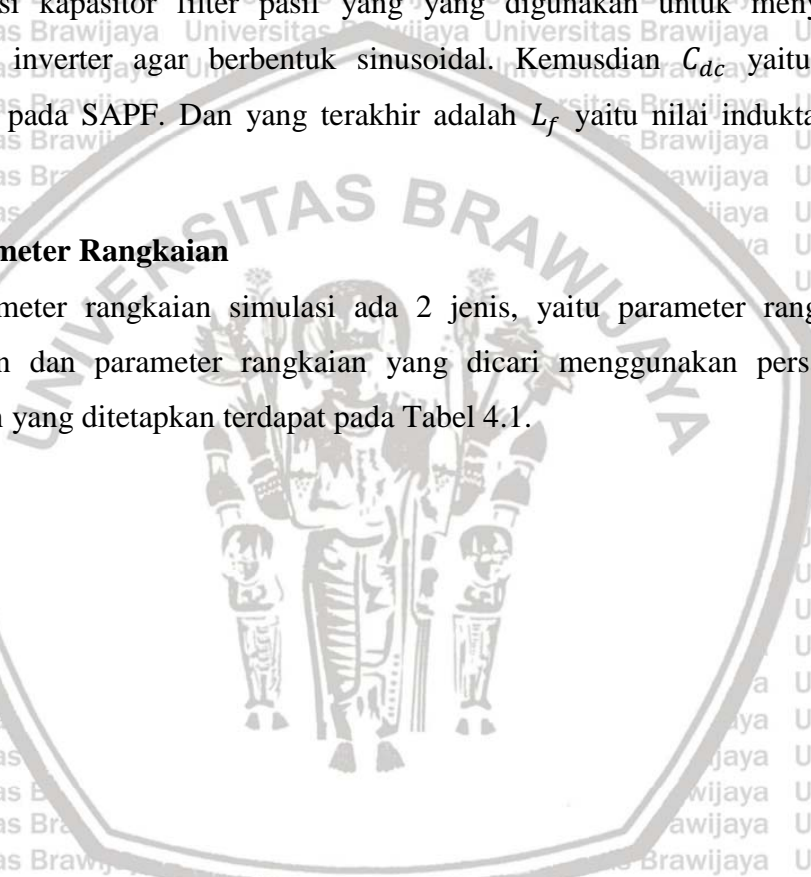
BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dibahas hasil dari simulasi yang dilakukan dan analisis dari hasil simulasi yang didapatkan. Simulasi dilakukan 60 kali dengan memvariasikan nilai R dan L pada beban non-linier saat sistem tanpa dipasang rangkaian SAPF dan saat sistem dipasang rangkaian SAPF. Untuk menjalankan simulasi, perlu dicari beberapa parameter rangkaian simulasi. Parameter-parameter itu adalah v_{dc-ref} yaitu tegangan DC referensi yang digunakan sebagai tegangan referensi pada SAPF. Kemudian $C_{filter-pasif}$ yaitu nilai kapasitansi kapasitor filter pasif yang digunakan untuk menyaring gelombang tegangan inverter agar berbentuk sinusoidal. Kemudian C_{dc} yaitu nilai kapasitansi kapasitor pada SAPF. Dan yang terakhir adalah L_f yaitu nilai induktansi induktor pada SAPF.

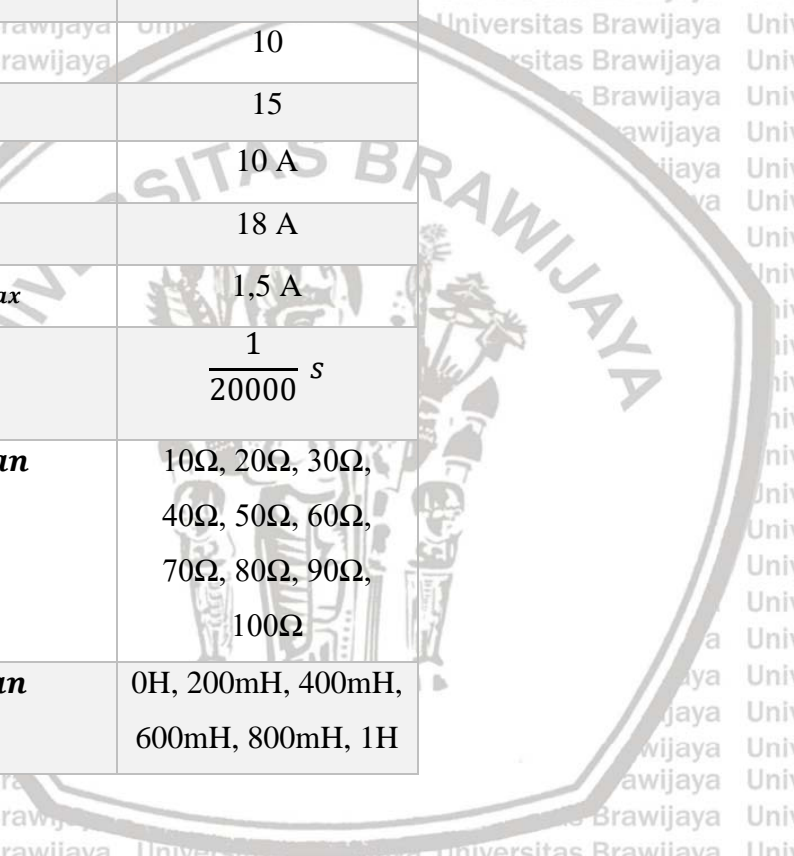
4.1 Parameter Rangkaian

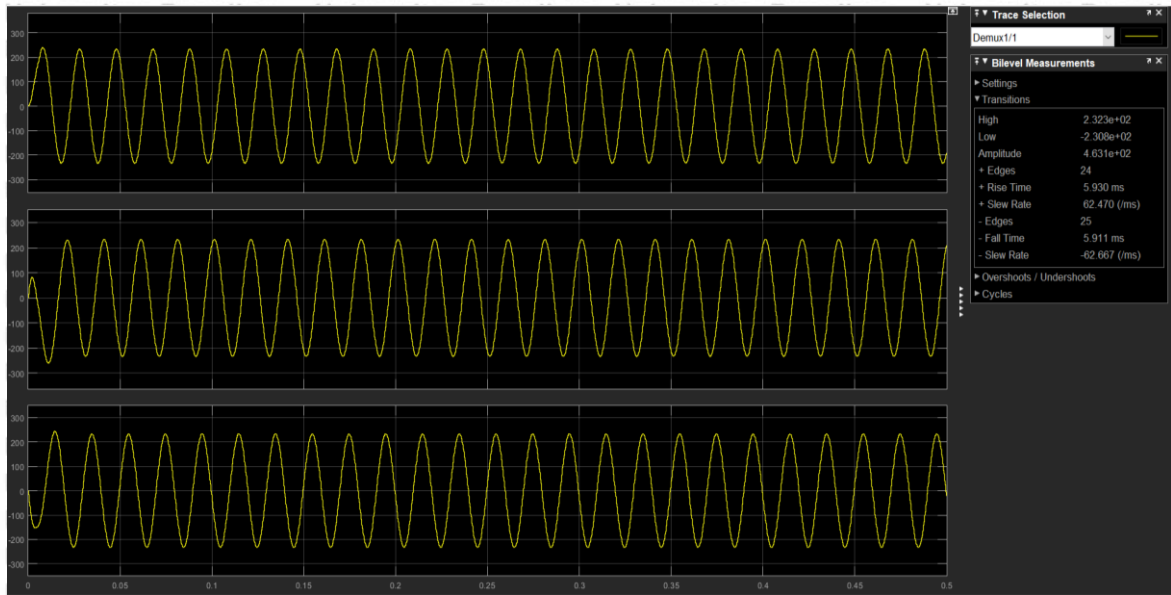
Parameter rangkaian simulasi ada 2 jenis, yaitu parameter rangkaian yang telah ditetapkan dan parameter rangkaian yang dicari menggunakan persamaan. Parameter rangkaian yang ditetapkan terdapat pada Tabel 4.1.



Tabel 4. 1 Parameter rangkaian simulasi yang ditetapkan

Parameter	Nilai
f_c	5000 Hz
f_m	50 Hz
A_c	1 V
A_m	4 V
$V_{dc-source}$	200 V
R	1 Ω
f_{c-o}	50 Hz
K_p	10
K_i	15
I_f	10 A
ΔI_f	18 A
ΔI_{f-max}	1,5 A
T_s	$\frac{1}{20000}$ s
R beban	10 Ω , 20 Ω , 30 Ω , 40 Ω , 50 Ω , 60 Ω , 70 Ω , 80 Ω , 90 Ω , 100 Ω
L beban	0H, 200mH, 400mH, 600mH, 800mH, 1H





Gambar 4. 1 Tegangan inverter

Dari Gambar 4.1 dapat dilihat nilai tegangan fasa puncak adalah 232,3V, maka

$$v_s = \frac{232,3}{\sqrt{2}} = 164,26V$$

Untuk menentukan nilai v_{dc-ref} digunakan Persamaan 2-49

$$v_{dc-max} \geq 2\sqrt{2}v_s$$

Maka

$$v_{dc-max} \geq 2\sqrt{2} \times 164,26 = 464,5974$$

Sesuai Persamaan 2-49 maka diambil

$$v_{dc-ref} = 465 V$$

Selanjutnya untuk menentukan nilai kapasitansi kapasitor pada filter pasif digunakan persamaan 2-47

$$C_{filter-pasif} = \frac{1}{2\pi R f_{c-o}}$$

Nilai resistansi dan frekuensi filter pasif dibuat sesuai pada Tabel 4.1

$$R = 1\Omega$$

$$f_{c-o} = 50 Hz$$

Maka

$$C_{\text{filter-pasif}} = \frac{1}{2\pi \times 1 \times 50} = 3,183099 \text{ mF}$$

Kemudian untuk menentukan nilai kapasitansi kapasitor pada filter aktif *shunt* digunakan persamaan 2-50

$$C_{dc} = \frac{v_m(\Delta I_f)T}{[v_{dc-max}^2 - v_{dc-min}^2]}$$

Tegangan puncak line to line dihitung menggunakan

$$v_m = \sqrt{3} \times \sqrt{2} \times v_s$$

Maka

$$v_m = 402,3532 \text{ V}$$

Nilai ΔI_f diambil dari Tabel 4.1, maka

$$\Delta I_f = 180\% \times 10 = 18 \text{ A}$$

Periode dihitung sebagai

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} \text{ s}$$

Tegangan dc minimum dihitung dengan persamaan 2-48.

$$v_{dc-min} = \frac{164,26}{\sqrt{2}} = 116,1494 \text{ V}$$

Nilai v_{dc-min} dibulatkan menjadi

$$v_{dc-min} = 117 \text{ V}$$

Maka kapasitansi filter aktif *shunt* menjadi

$$C_{dc} = \frac{402,3532 \times 18 \times \frac{1}{50}}{[465^2 - 117^2]} = 715,1674 \mu\text{F}$$

Nilai minimum kapasitansi kapasitor filter aktif yang diperbolehkan dalam sistem adalah sebesar 715,1674 μF , maka dalam penelitian ini digunakan kapasitor filter aktif *shunt* dengan kapasitansi sebesar 715,2 μF .

Untuk menentukan nilai induktansi induktor pada filter aktif dapat menggunakan persamaan 2-51

$$L_{f-min} = \frac{T_s \times v_{dc-ref}}{8 \times \Delta I_{f-max}}$$

Nilai T_s dan ΔI_{f-max} diambil dari Tabel 4.1

$$T_s = \frac{1}{20000} \text{ s}$$

$$\Delta I_{f-max} = 1,5 \text{ A}$$

Maka

$$L_{f-min} = \frac{1}{20000} \times \frac{465}{8 \times 1,5} = 1,9375 \text{ mH}$$

Nilai minimum L_{f-min} yang diperbolehkan pada filter aktif adalah sebesar 1,9375 mH, maka pada penelitian ini ditetapkan nilai $L_f = 1,94 \text{ mH}$

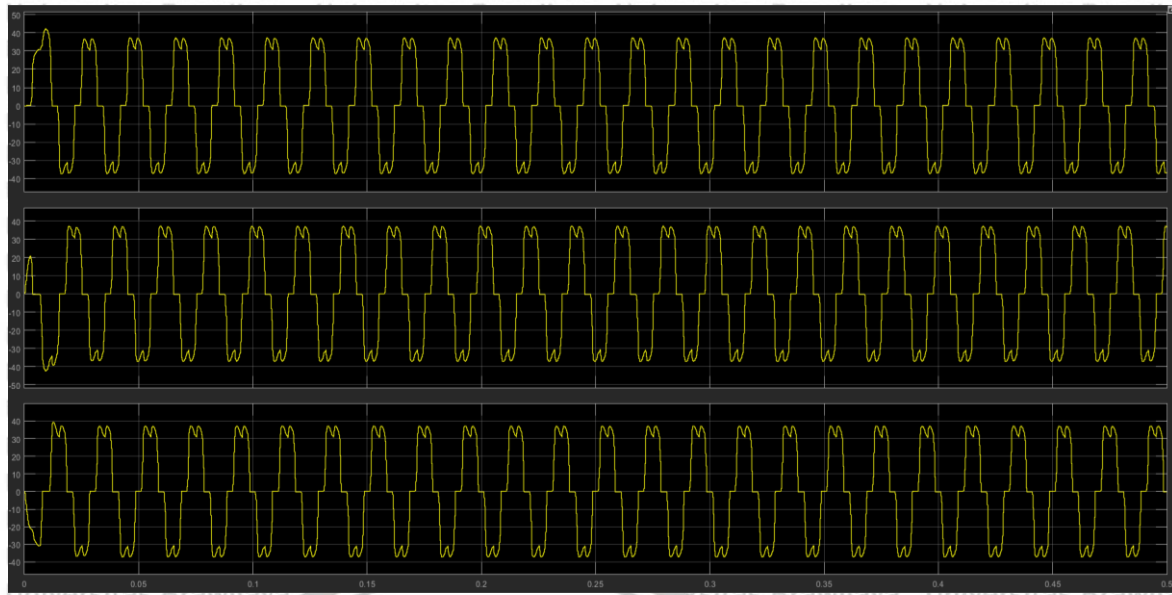
Berikut parameter rangkaian simulasi yang telah ditentukan terdapat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Parameter rangkaian simulasi yang telah didapatkan

Parameter	Nilai
v_{dc-ref}	465 V
$C_{filter-pasif}$	3,183099 mF
C_{dc}	715,2 μ F
L_f	1,94 mH

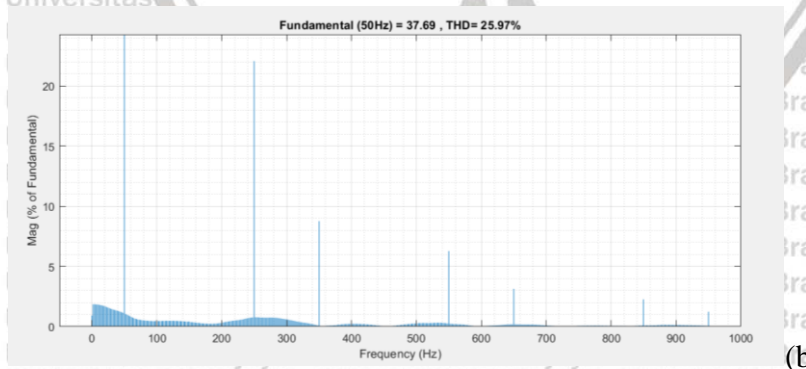
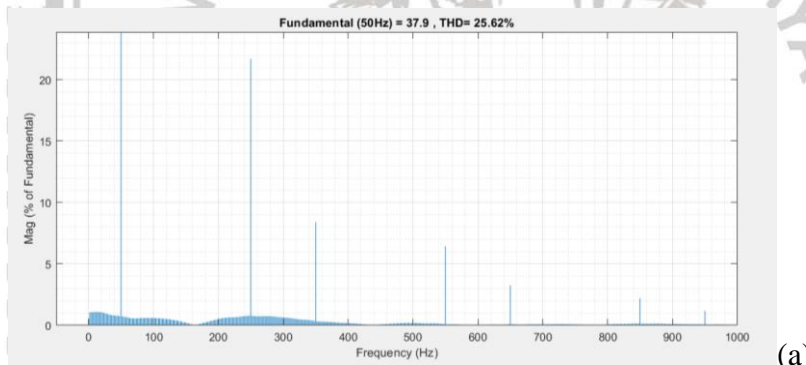
4.2 Simulasi Sistem Tanpa SAPF dengan Variasi Nilai RL Beban Non-Linier

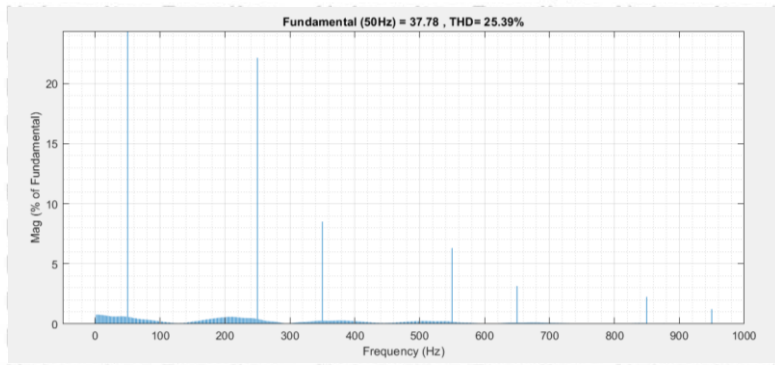
Pada simulasi ini, inverter dihubungkan dengan beban non-linier RL tanpa pemasangan filter aktif shunt. Kemudian nilai R dan L divariasikan, selanjutnya diamati nilai THD yang timbul pada arus sistem.



Gambar 4. 2 Gelombang arus sistem tanpa SAPF dengan beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$

Pada Gambar 4.2 terlihat gelombang arus sistem pada inverter ketika diberi beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$. Ketiga fasa gelombang arus sistem pada inverter mengalami distorsi sehingga bentuk gelombangnya tidak sinusoidal.

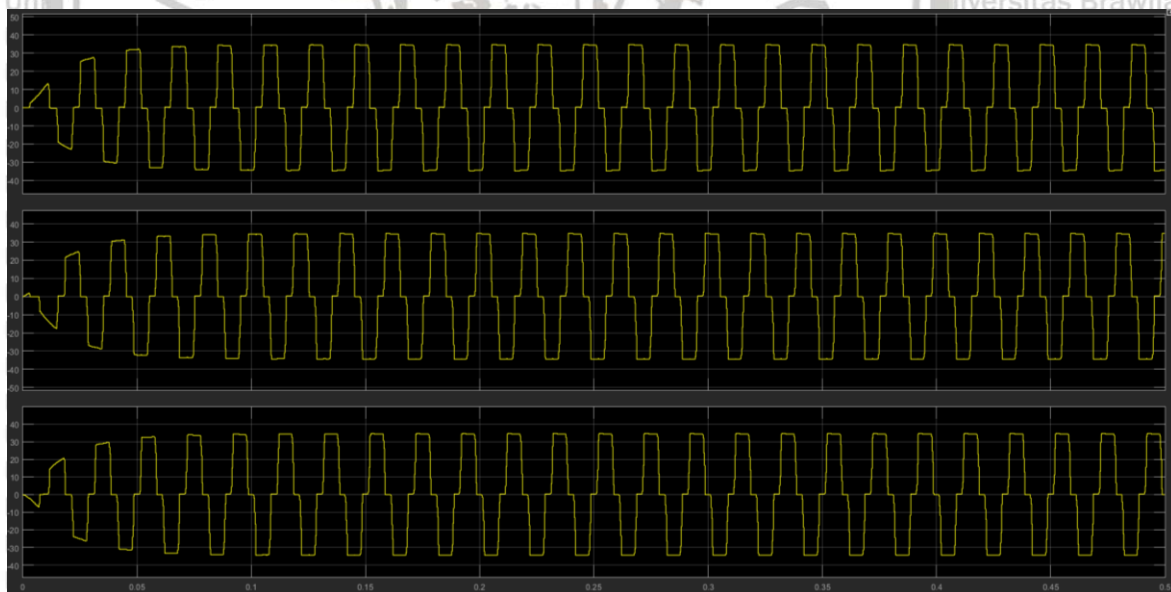




Gambar 4.3 Spektrum arus sistem beserta nilai THD tanpa SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$

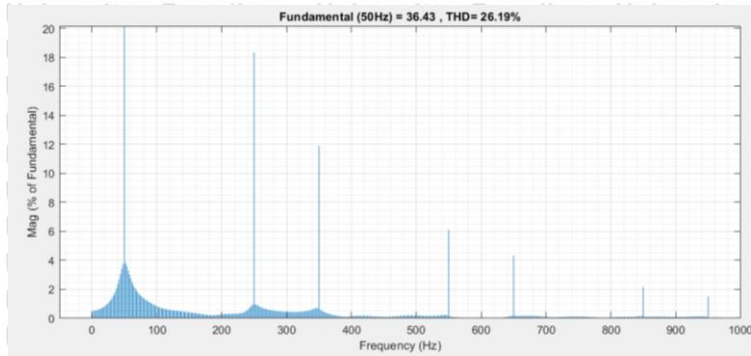
- (a) Fasa a
- (b) Fasa b
- (c) Fasa c

Pada Gambar 4.3 memperlihatkan besar nilai arus sistem dan nilai THD arus sistem. Pada fasa a, nilai arus sebesar 37,9 A dan THD sebesar 25,62%. Pada fasa b, nilai arus sebesar 37,69 A dan THD sebesar 25,97%. Dan pada fasa c nilai arus sebesar 37,78 A dan THD sebesar 25,39%.

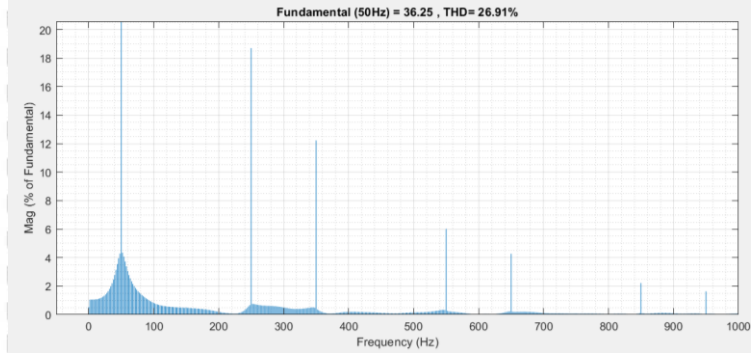


Gambar 4.4 Gelombang arus sistem tanpa SAPF dengan beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=200mH$

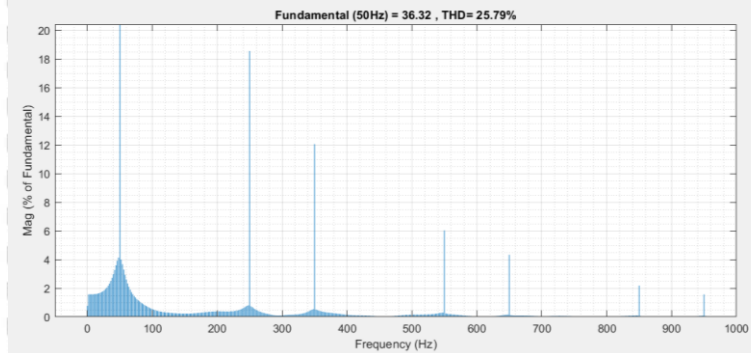
Pada Gambar 4.4 terlihat gelombang arus sistem pada inverter ketika diberi beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=200mH$. Ketiga fasa gelombang arus sistem pada inverter mengalami distorsi sehingga bentuk gelombangnya tidak sinusoidal.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 5 Spektrum arus sistem beserta nilai THD tanpa SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=200mH$

- (a) Fasa a
- (b) Fasa b
- (c) Fasa c

Pada Gambar 4.5 memperlihatkan besar nilai arus sistem dan nilai THD arus sistem. Pada fasa a, nilai arus sebesar 36,43 A dan THD sebesar 26,19%. Pada fasa b, nilai arus sebesar 36,25 A dan THD sebesar 26,91%. Dan pada fasa c nilai arus sebesar 36,32 A dan THD sebesar 25,79%.

Simulasi dilakukan 60 kali dengan variasi nilai R sebesar 10 Ω , 20 Ω , 30 Ω , 40 Ω , 50 Ω , 60 Ω , 70 Ω , 80 Ω , 90 Ω , dan 100 Ω . Kemudian untuk nilai L sebesar 0H, 200mH, 400mH,

600mH, 800mH, dan 1H. Data nilai arus sistem fasa a hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan data nilai THD arus sistem fasa a hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.4

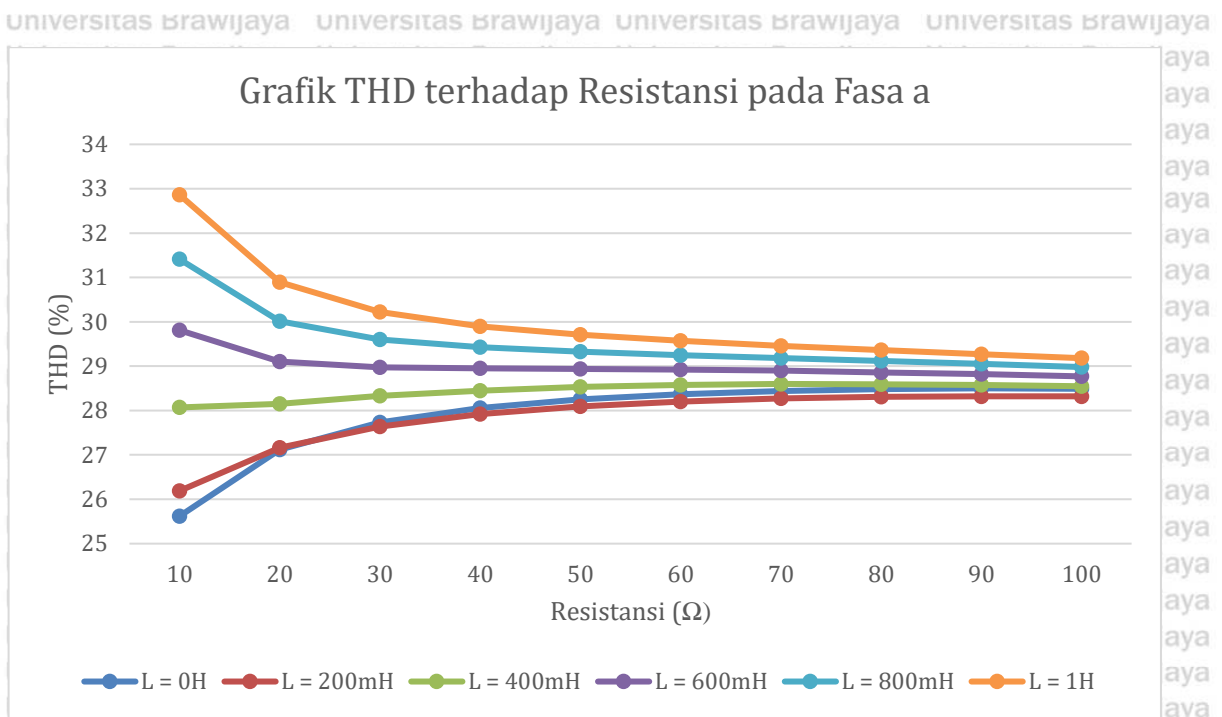
Tabel 4.3 Nilai arus pada fasa a hasil simulasi tanpa SAPF

R (Ω)	Arus (A)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	37,9	36,43	35,09	33,75	32,41	31,08
20	20,09	19,66	19,28	18,91	18,53	18,15
30	13,67	13,47	13,29	13,12	12,94	12,77
40	10,36	10,25	10,15	10,04	9,945	9,845
50	8,35	8,272	8,206	8,141	8,076	8,011
60	6,994	6,938	6,892	6,846	6,801	6,756
70	6,019	5,977	5,943	5,909	5,875	5,842
80	5,285	5,252	5,225	5,199	5,173	5,147
90	4,711	4,685	4,664	4,643	4,622	4,602
100	4,252	4,229	4,212	4,195	4,178	4,162

Tabel 4.4 Nilai THD arus pada fasa a hasil simulasi tanpa SAPF

R (Ω)	THD (%)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	25,62	26,19	28,07	29,81	31,41	32,86
20	27,12	27,16	28,15	29,1	30,01	30,89
30	27,73	27,64	28,33	28,97	29,6	30,22
40	28,06	27,92	28,45	28,95	29,43	29,9
50	28,25	28,09	28,53	28,94	29,33	29,71
60	28,37	28,2	28,58	28,92	29,25	29,57
70	28,44	28,27	28,6	28,9	29,18	29,46
80	28,48	28,31	28,59	28,86	29,12	29,36
90	28,5	28,32	28,58	28,82	29,05	29,27
100	28,49	28,32	28,55	28,77	28,98	29,18

Dari data nilai THD pada Tabel 4.4 dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 4.6



Gambar 4. 6 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa a saat sistem tanpa SAPF

Dari grafik pada Gambar 4.6 dapat dilihat pada fasa a bahwa saat $L=0H$, semakin besar nilai R , maka THD arus semakin besar. Pada $L=200mH$, semakin besar nilai R , maka THD arus semakin besar. Pada $L=400mH$ nilai THD semakin naik saat nilai R dinaikkan, hingga pada $R=80\Omega$ nilai THD semakin turun. Pada $L=600mH$ hingga $L=1H$ nilai THD semakin turun saat nilai R dinaikkan.

Kemudian untuk data nilai arus sistem fasa b hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan data nilai THD arus sistem fasa b hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.6

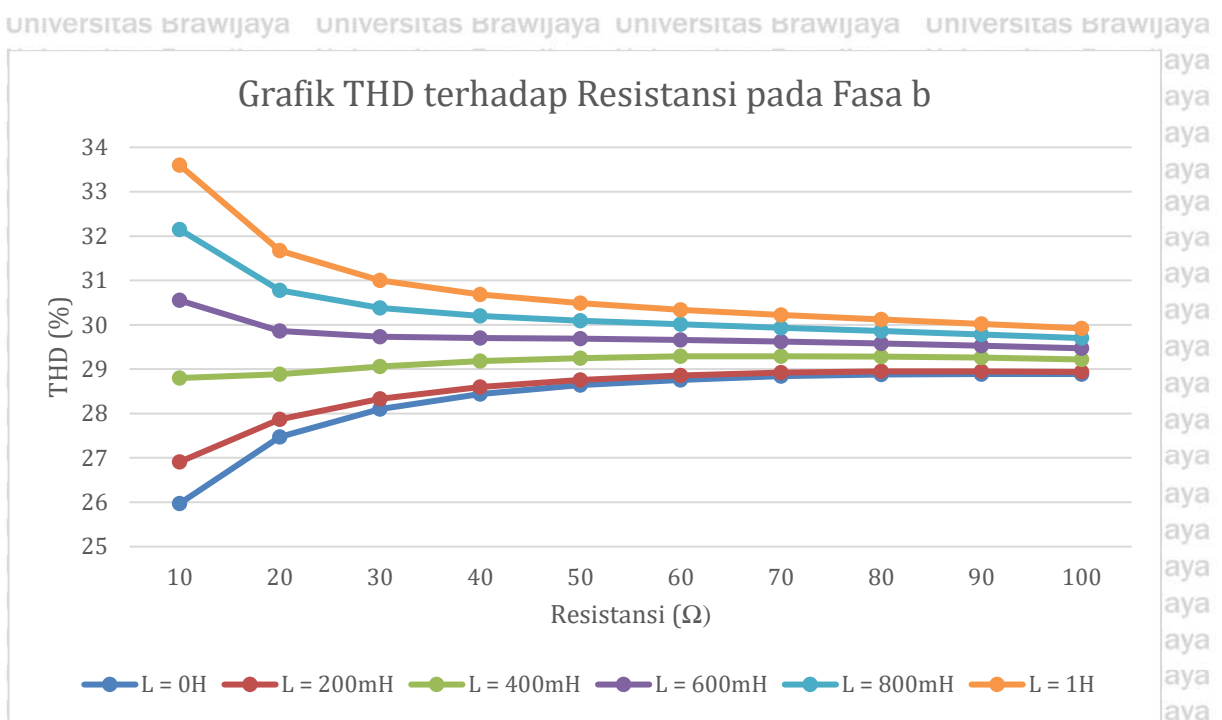
Tabel 4.5 Nilai arus pada fasa b hasil simulasi tanpa SAPF

R (Ω)	Arus (A)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	37,69	36,25	34,9	33,56	32,22	30,9
20	19,98	19,56	19,19	18,81	18,43	18,06
30	13,6	13,4	13,22	13,05	12,88	12,7
40	10,31	10,19	10,09	9,994	9,895	9,795
50	8,307	8,226	8,164	8,1	8,036	7,972
60	6,959	6,899	6,857	6,812	6,767	6,722
70	5,989	5,943	5,912	5,879	5,847	5,813
80	5,258	5,221	5,198	5,173	5,148	5,122
90	4,688	4,657	4,639	4,619	4,599	4,579
100	4,23	4,204	4,189	4,174	4,158	4,141

Tabel 4.6 Nilai THD arus pada fasa b hasil simulasi tanpa SAPF

R (Ω)	THD (%)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	25,97	26,91	28,8	30,55	32,15	33,6
20	27,47	27,87	28,89	29,86	30,78	31,67
30	28,1	28,33	29,06	29,73	30,38	31
40	28,44	28,6	29,18	29,7	30,2	30,68
50	28,64	28,76	29,25	29,69	30,09	30,49
60	28,76	28,86	29,29	29,66	30,01	30,34
70	28,84	28,92	29,29	29,62	29,93	30,22
80	28,88	28,95	29,28	29,58	29,86	30,12
90	28,89	28,95	29,26	29,53	29,78	30,02
100	28,89	28,94	29,22	29,47	29,7	29,92

Dari data nilai THD pada Tabel 4.6 dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 4.7



Gambar 4. 7 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa b saat sistem tanpa SAPF

Dari grafik pada Gambar 4.7 dapat dilihat pada fasa b bahwa saat $L=0H$, semakin besar nilai R , maka THD arus semakin besar. Pada $L=200mH$, semakin besar nilai R , maka THD arus semakin besar. Pada $L=400mH$ nilai THD semakin naik saat nilai R dinaikkan, hingga pada $R=80\Omega$ nilai THD semakin turun. Pada $L=600mH$ hingga $L=1H$ nilai THD semakin menurun saat nilai R dinaikkan.

Kemudian untuk data nilai arus sistem fasa c hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan data nilai THD arus sistem fasa c hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.8

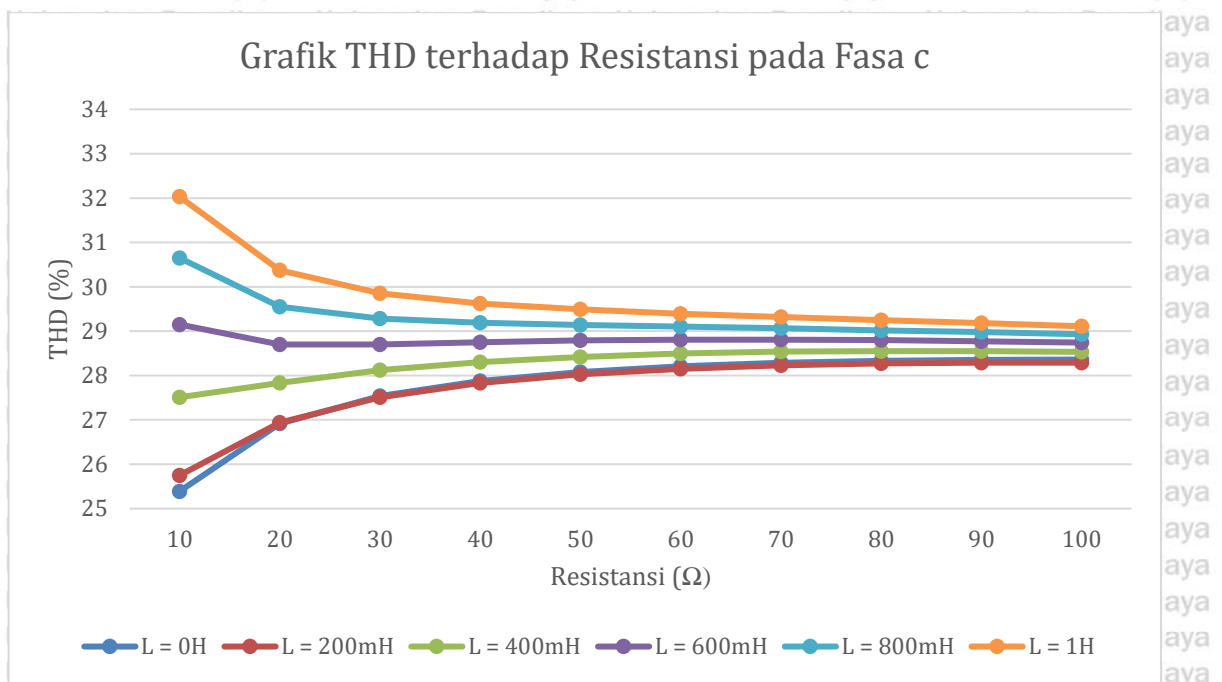
Tabel 4. 7 Nilai arus pada fasa c hasil simulasi tanpa SAPF

R (Ω)	Arus (A)					
	L = 0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	37,78	36,32	34,98	33,64	32,3	30,98
20	20,03	19,59	19,22	18,85	18,47	18,09
30	13,63	13,42	13,25	13,07	12,9	12,73
40	10,33	10,21	10,11	10,01	9,91	9,81
50	8,326	8,239	8,175	8,111	8,047	7,983
60	6,974	6,91	6,865	6,82	6,776	6,731
70	6,001	5,953	5,919	5,886	5,853	5,82
80	5,269	5,23	5,204	5,178	5,153	5,128
90	4,697	4,665	4,644	4,624	4,604	4,584
100	4,238	4,211	4,194	4,178	4,161	4,145

Tabel 4. 8 Nilai THD arus pada fasa c hasil simulasi tanpa SAPF

R (Ω)	THD (%)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	25,39	25,75	27,51	29,15	30,65	32,03
20	26,92	26,94	27,83	28,7	29,55	30,37
30	27,54	27,51	28,12	28,7	29,28	29,85
40	27,88	27,83	28,3	28,75	29,19	29,62
50	28,08	28,03	28,42	28,79	29,14	29,49
60	28,21	28,15	28,5	28,81	29,1	29,39
70	28,29	28,23	28,54	28,81	29,07	29,32
80	28,33	28,27	28,55	28,8	29,02	29,25
90	28,35	28,29	28,55	28,77	28,98	29,18
100	28,36	28,29	28,53	28,74	28,93	29,11

Dari data nilai THD pada Tabel 4.8 dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 4.8



Gambar 4. 8 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa c saat sistem tanpa SAPF

Dari grafik pada Gambar 4.8 dapat dilihat pada fasa c bahwa saat $L=0H$, semakin besar nilai R , maka THD arus semakin besar. Pada $L=200mH$, semakin besar nilai R , maka THD arus semakin besar. Pada $L=400mH$ nilai THD semakin besar saat nilai R dinaikkan, hingga pada $R=100\Omega$ nilai THD turun. Pada $L=600mH$ saat $R=20\Omega$ nilai THD turun, saat $R=40\Omega$ nilai THD naik sampai nilai $R=70\Omega$, kemudian nilai THD turun lagi hingga $R=100\Omega$. Saat $L=800mH$ dan $L=1H$ nilai THD semakin turun saat nilai R dinaikkan.

Dari Gambar 4.6, Gambar 4.7, dan Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa grafik ketiga fasa menunjukkan semakin besar nilai R dengan L yang semakin kecil atau bahkan $L=0H$, maka semakin besar nilai THD. Sebaliknya, semakin besar R dengan L yang semakin besar, maka nilai THD semakin kecil. Hal ini terjadi karena nilai L yang terlalu besar menghasilkan THD yang besar pula, namun juga dapat berfungsi sebagai filter yang menurunkan nilai THD saat nilai R semakin besar. Bila nilai R naik, faktor L terhadap impedansi total mengecil, sebaliknya saat nilai L naik, faktor L terhadap impedansi total naik.

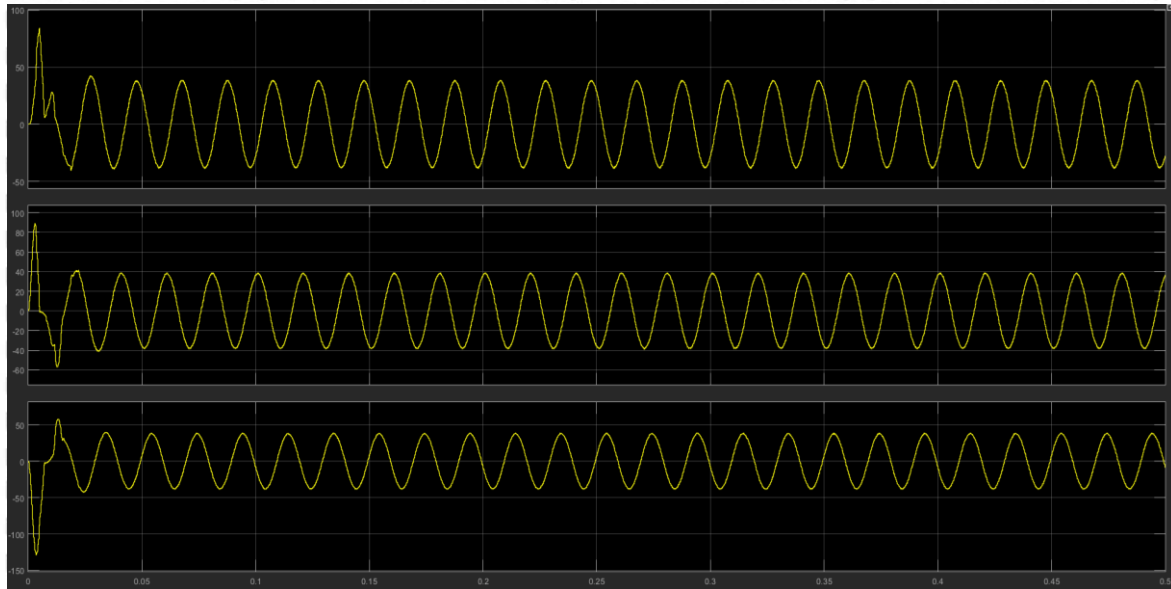
4.3 Simulasi Sistem Dengan SAPF dengan Variasi Nilai RL Beban Non-Linier

Semua perhitungan nilai THD arus dan arus pada simulasi berikut ditentukan dengan start time detik ke 0,022 yaitu pada saat gelombang sudah mulai mencapai kondisi *steady state*. Lonjakan arus di awal tidak disertakan karena gelombang dalam kondisi transien.

Jika disertakan dapat menyebabkan perhitungan nilai THD dan arus menjadi sangat besar.

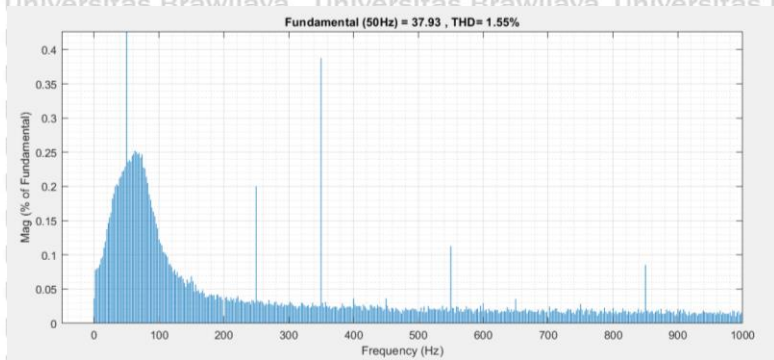
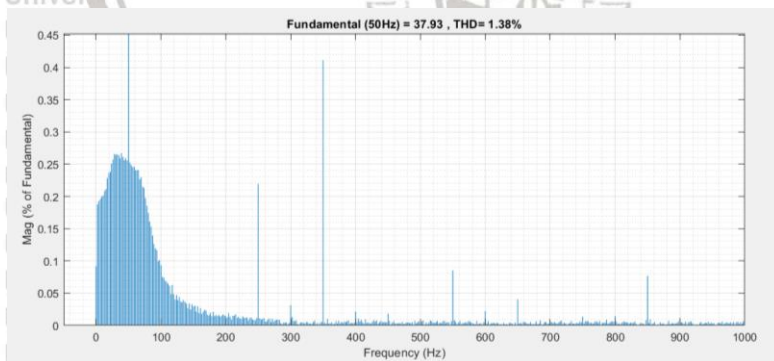
4.3.1 Simulasi Sistem Dengan SAPF dengan Variasi Nilai RL Beban Non-Linier

Pada simulasi ini, inverter dihubungkan dengan beban non-linier RL dengan pemasangan filter aktif shunt. Kemudian divariasikan nilai R dan L beban non-linier, selanjutnya diamati nilai THD arus yang timbul pada arus sistem.



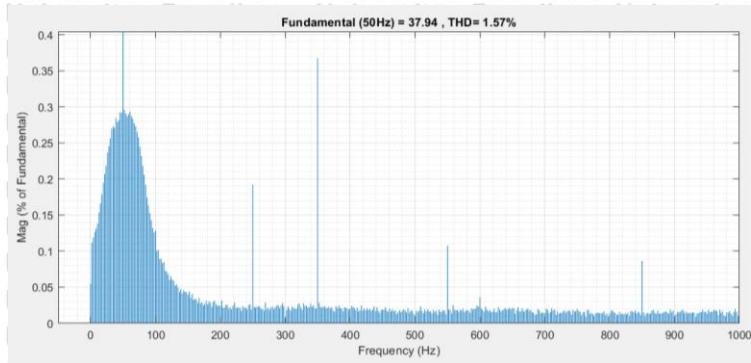
Gambar 4.9 Gelombang arus sistem dengan SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$

Pada Gambar 4.9 terlihat gelombang arus sistem pada inverter ketika diberi beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$. Ketiga fasa gelombang arus sistem pada inverter mendekati bentuk gelombang sinusoidal.



(a)

(b)



(c)

Gambar 4. 10 Spektrum arus sistem beserta nilai THD dengan SAPF pada beban non-linier R=10Ω dan L=0H

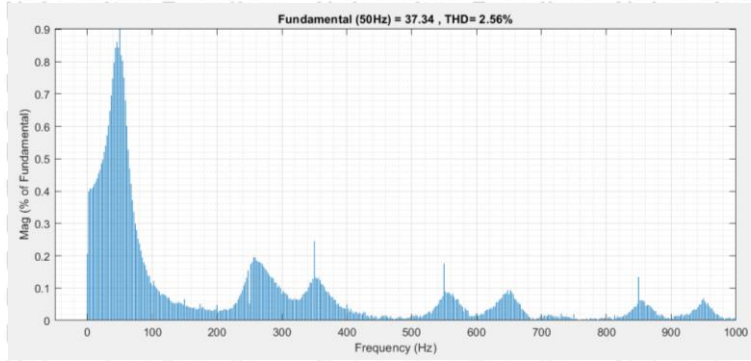
- (a) Fasa a
- (b) Fasa b
- (c) Fasa c

Pada Gambar 4.10 memperlihatkan besar nilai arus sistem dan nilai THD arus sistem. Nilai THD arus sistem setiap fasanya menurun dan nilai arus sistem setiap fasanya meningkat. Pada fasa a, nilai arus naik menjadi 37,93 A dan THD turun menjadi 1,38%. Pada fasa b, nilai arus naik menjadi 37,93 A dan THD turun menjadi 1,55%. Dan pada fasa c nilai arus naik menjadi 37,94 A dan THD turun menjadi 1,57%.

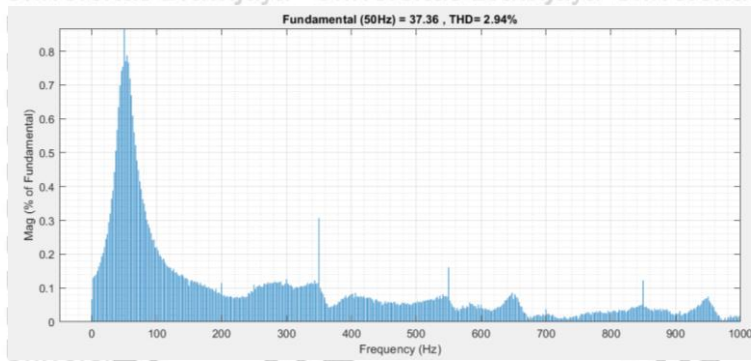


Gambar 4. 11 Gelombang arus sistem dengan SAPF pada beban non-linier R=10Ω dan L=200mH

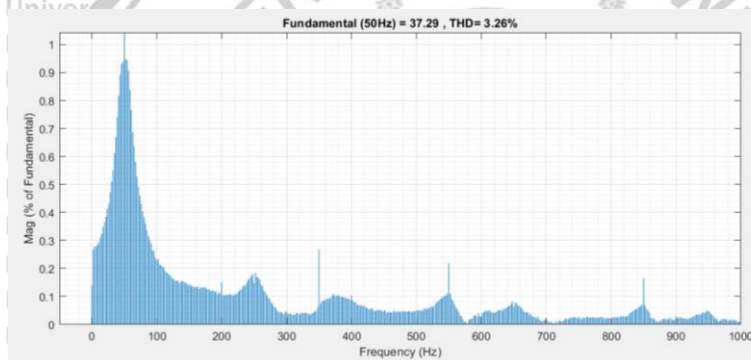
Pada Gambar 4.11 terlihat gelombang arus sistem pada inverter ketika diberi beban non-linier R=10Ω dan L=200mH. Ketiga fasa gelombang arus sistem pada inverter mendekati bentuk gelombang sinusoidal.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 12 Spektrum arus sistem beserta nilai THD dengan SAPF pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=200\text{mH}$

(a) Fasa a

(b) Fasa b

(c) Fasa c

Pada Gambar 4.12 memperlihatkan besar nilai arus sistem dan nilai THD arus sistem. Nilai THD arus sistem setiap fasanya menurun dan nilai arus sistem setiap fasanya meningkat. Pada fasa a, nilai arus naik menjadi 37,34 A dan THD turun menjadi 2,56%. Pada fasa b, nilai arus naik menjadi 37,36 A dan THD turun menjadi 2,94%. Dan pada fasa c nilai arus naik menjadi 37,29 A dan THD turun menjadi 3,26%.

Simulasi dilakukan 60 kali dengan variasi nilai R sebesar 10Ω , 20Ω , 30Ω , 40Ω , 50Ω , 60Ω , 70Ω , 80Ω , 90Ω , dan 100Ω . Kemudian untuk nilai L sebesar 0H , 200mH , 400mH ,

600mH, 800mH, dan 1H. Data nilai arus sistem fasa a hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan data nilai THD arus sistem fasa a hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.10

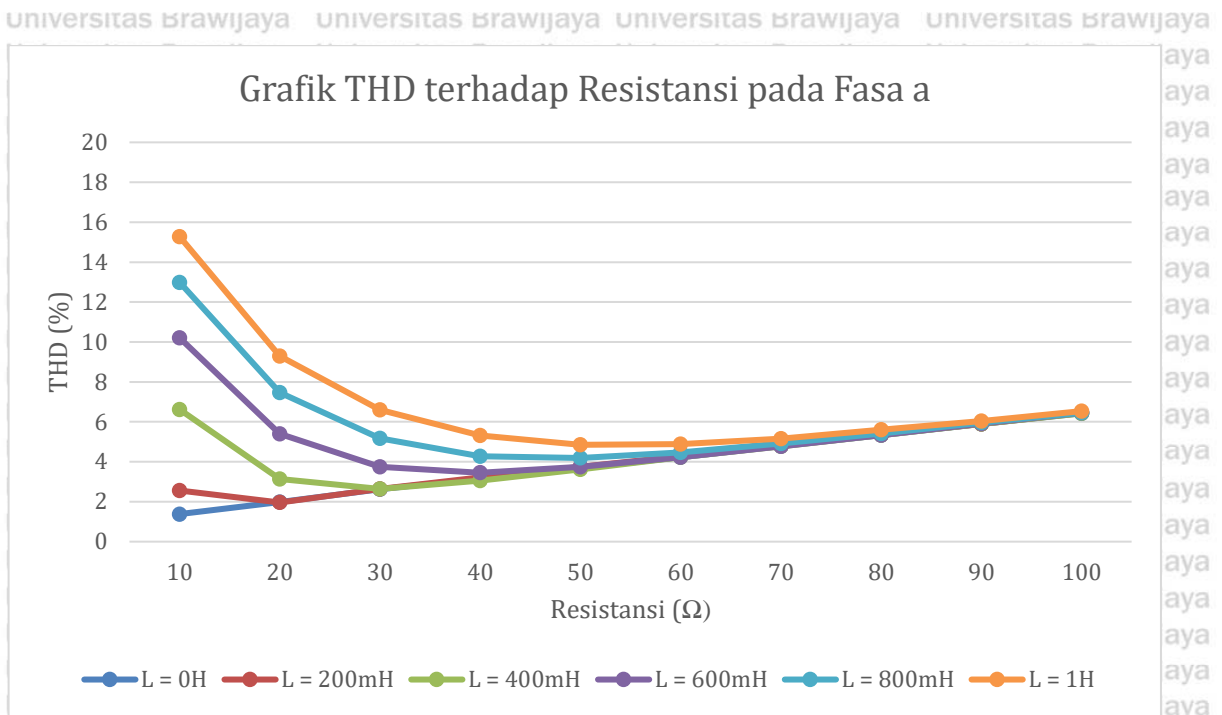
Tabel 4.9 Nilai arus pada fasa a hasil simulasi dengan SAPF

R (Ω)	Arus (A)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	37,93	37,34	36,17	34,82	33,45	32,09
20	20,67	20,59	20,32	19,97	19,6	19,22
30	14,33	14,29	14,2	14,06	13,9	13,73
40	11,03	11,01	10,97	10,9	10,81	10,73
50	9,005	8,988	8,973	8,937	8,887	8,832
60	7,638	7,625	7,619	7,599	7,569	7,534
70	6,654	6,643	6,642	6,629	6,611	6,587
80	5,911	5,902	5,903	5,895	5,883	5,866
90	5,33	5,323	5,324	5,321	5,312	5,299
100	4,866	4,859	4,86	4,859	4,851	4,843

Tabel 4.10 Nilai THD arus pada fasa a hasil simulasi dengan SAPF

R (Ω)	THD (%)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	1,38	2,56	6,62	10,21	12,99	15,28
20	1,98	1,96	3,14	5,4	7,47	9,3
30	2,62	2,64	2,64	3,75	5,18	6,6
40	3,17	3,21	3,05	3,45	4,28	5,32
50	3,69	3,75	3,62	3,75	4,19	4,85
60	4,23	4,27	4,22	4,23	4,47	4,89
70	4,79	4,83	4,78	4,77	4,92	5,16
80	5,34	5,37	5,34	5,33	5,41	5,6
90	5,89	5,89	5,89	5,91	5,96	6,04
100	6,43	6,45	6,43	6,45	6,45	6,54

Dari data nilai THD pada Tabel 4.10 dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 4.13



Gambar 4. 13 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa a saat sistem dengan SAPF

Grafik pada Gambar 4.13 menunjukkan bahwa pada fasa a saat $L=0H$ nilai THD meningkat seiring naiknya nilai R . Pada $L=200mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ kemudian terus meningkat saat $R=30\Omega$. Pada $L=400mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ hingga $R=30\Omega$ setelah itu nilai THD meningkat saat $R=40\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=600mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ hingga $R=40\Omega$ kemudian THD meningkat lagi saat $R=50\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=800mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian THD meningkat saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=1H$ THD menurun saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian THD meningkat saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$.

Kemudian untuk data nilai arus sistem fasa b hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.11 dan data nilai THD arus sistem fasa b hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.12

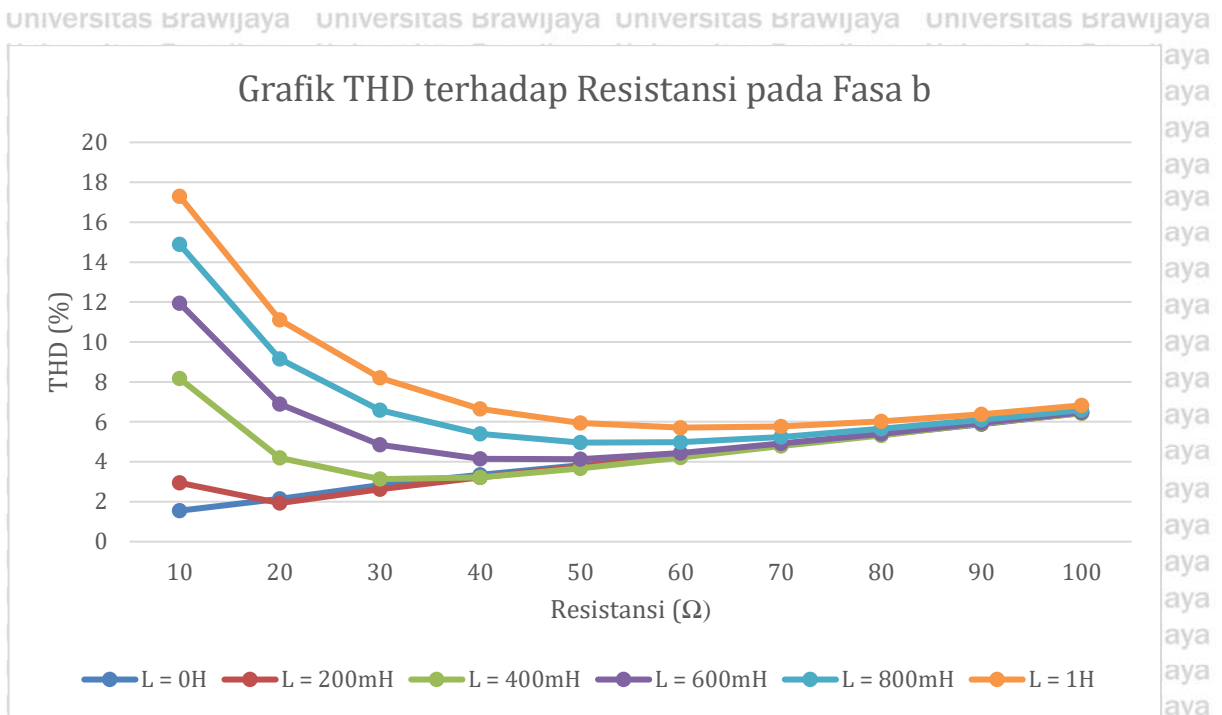
Tabel 4. 11 Nilai arus pada fasa b hasil simulasi dengan SAPF

R (Ω)	Arus (A)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	37,93	37,36	36,19	34,85	33,48	32,12
20	20,67	20,59	20,32	19,98	19,6	19,22
30	14,33	14,29	14,2	14,06	13,9	13,73
40	11,03	11	10,97	10,9	10,82	10,72
50	9,006	8,988	8,973	8,935	8,886	8,831
60	7,638	7,626	7,618	7,596	7,567	7,531
70	6,654	6,643	6,641	6,629	6,608	6,584
80	5,911	5,902	5,901	5,895	5,882	5,864
90	5,331	5,321	5,324	5,318	5,31	5,297
100	4,866	4,858	4,858	4,855	4,851	4,843

Tabel 4. 12 Nilai THD arus pada fasa b hasil simulasi dengan SAPF

R (Ω)	THD (%)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	1,55	2,94	8,17	11,94	14,89	17,3
20	2,15	1,93	4,2	6,89	9,15	11,11
30	2,84	2,62	3,13	4,85	6,59	8,2
40	3,35	3,22	3,22	4,14	5,4	6,65
50	3,83	3,76	3,66	4,13	4,96	5,95
60	4,31	4,3	4,21	4,43	4,98	5,71
70	4,84	4,84	4,79	4,91	5,24	5,77
80	5,36	5,36	5,31	5,39	5,65	6,03
90	5,88	5,91	5,91	5,94	6,1	6,38
100	6,45	6,45	6,43	6,48	6,58	6,82

Dari data nilai THD pada Tabel 4.12 dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 4.14



Gambar 4. 14 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa b saat sistem dengan SAPF

Grafik pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa pada fasa b saat $L=0H$ nilai THD meningkat seiring naiknya nilai R . Pada $L=200mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ kemudian terus meningkat saat $R=30\Omega$. Pada $L=400mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ hingga $R=30\Omega$ setelah itu nilai THD meningkat pada $R=40\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=600mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian THD meningkat saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=800mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian THD meningkat saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=1H$ THD menurun saat $R=20\Omega$ hingga $R=60\Omega$ kemudian THD meningkat saat $R=70\Omega$ hingga $R=100\Omega$.

Kemudian untuk data nilai arus sistem fasa c hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan data nilai THD arus sistem fasa c hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 4.14

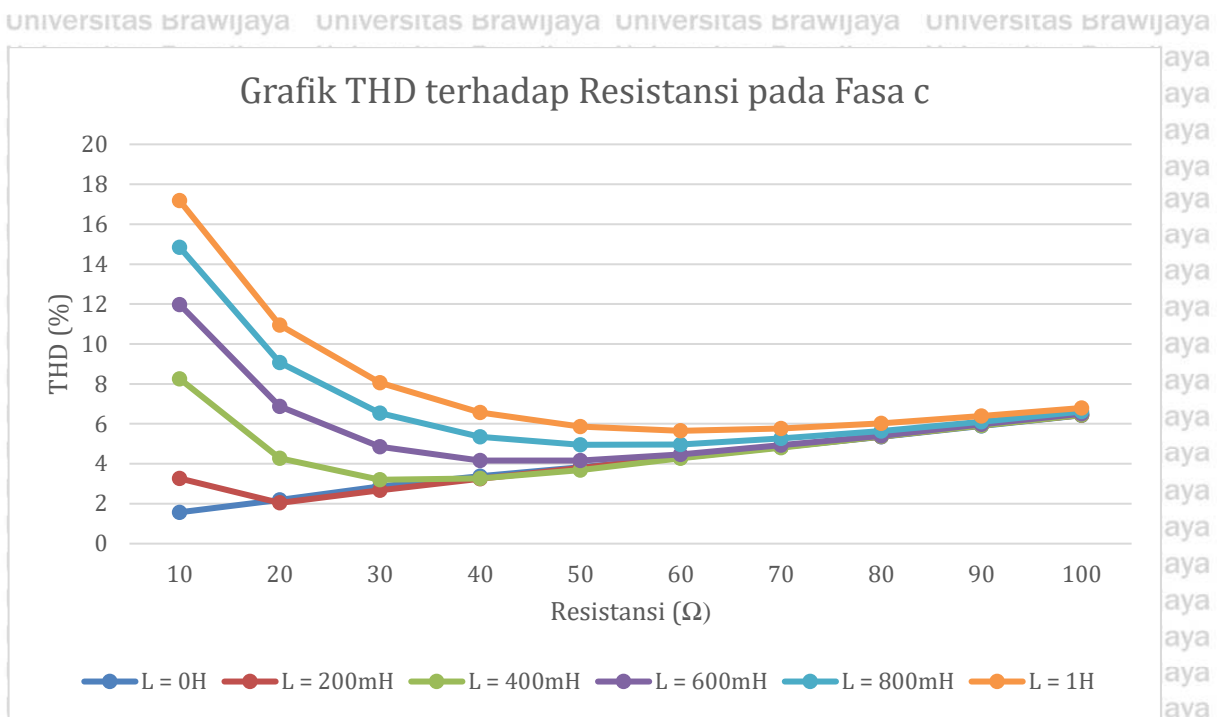
Tabel 4.13 Nilai arus pada fasa c hasil simulasi dengan SAPF

R (Ω)	Arus (A)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	37,94	37,29	36,04	34,69	33,31	31,94
20	20,68	20,57	20,27	19,91	19,53	19,14
30	14,34	14,29	14,18	14,02	13,86	13,68
40	11,04	11,01	10,95	10,88	10,79	10,69
50	9,009	8,99	8,964	8,92	8,867	8,808
60	7,642	7,628	7,614	7,588	7,553	7,514
70	6,657	6,645	6,637	6,621	6,599	6,571
80	5,914	5,904	5,9	5,89	5,873	5,853
90	5,332	5,324	5,323	5,315	5,303	5,291
100	4,866	4,858	4,858	4,853	4,845	4,834

Tabel 4.14 Nilai THD arus pada fasa c hasil simulasi dengan SAPF

R (Ω)	THD (%)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	1,57	3,26	8,26	11,98	14,85	17,18
20	2,19	2,04	4,28	6,87	9,07	10,95
30	2,87	2,67	3,2	4,85	6,53	8,06
40	3,37	3,25	3,26	4,16	5,35	6,57
50	3,82	3,79	3,69	4,16	4,95	5,87
60	4,3	4,32	4,27	4,47	4,97	5,65
70	4,83	4,85	4,81	4,93	5,27	5,76
80	5,35	5,37	5,36	5,4	5,64	6,03
90	5,9	5,92	5,91	5,98	6,11	6,4
100	6,43	6,44	6,44	6,5	6,61	6,8

Dari data nilai THD pada Tabel 4.14 dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 4.15



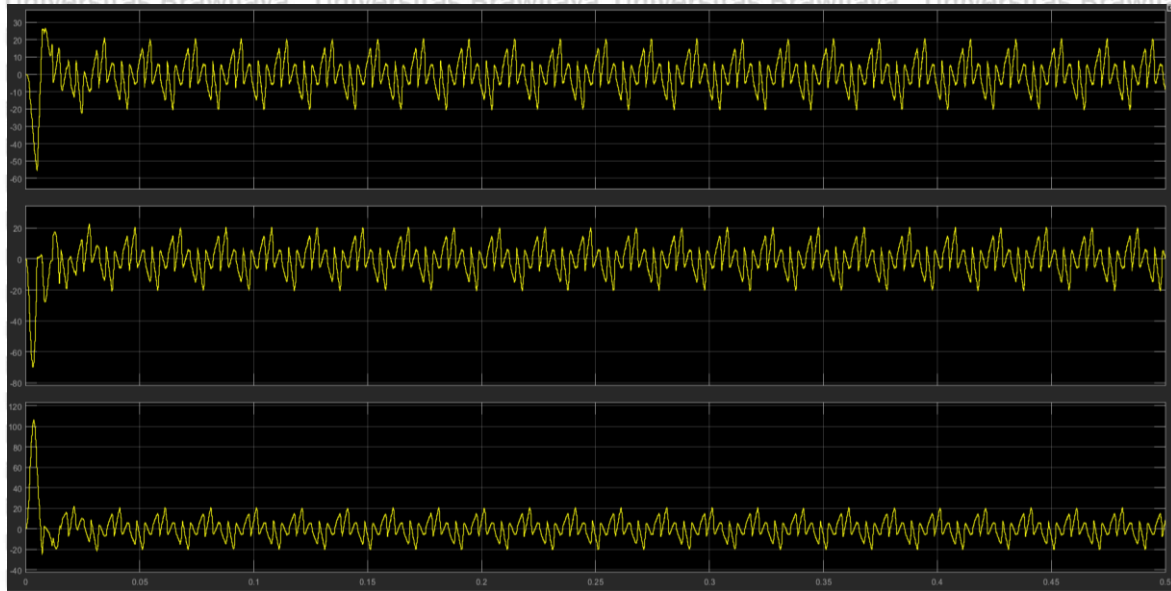
Gambar 4. 15 Grafik THD terhadap resistansi pada fasa c saat sistem dengan SAPF

Grafik pada Gambar 4.15 menunjukkan bahwa pada fasa c saat $L=0H$ nilai THD meningkat seiring naiknya nilai R . Pada $L=200mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ dan terus meningkat saat $R=30\Omega$. Pada $L=400mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ hingga $R=30\Omega$ setelah itu nilai THD meningkat saat $R=40\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=600mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian THD meningkat lagi saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=800mH$ THD turun saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian THD meningkat saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=1H$ THD menurun saat $R=20\Omega$ hingga $R=60\Omega$ kemudian THD meningkat saat $R=70\Omega$ hingga $R=100\Omega$.

Dari Gambar 4.13, Gambar 4.14, dan Gambar 4.15 dapat dilihat grafik ketiga fasa menunjukkan bahwa pada $L=0H$ semakin besar nilai R , maka THD arus setelah dipasang rangkaian SAPF juga semakin besar. Pada $L=200mH$ hingga $L=1H$, semakin besar nilai L dengan R yang kecil, nilai THD arus setelah dipasang rangkaian SAPF semakin besar dan akan menurun saat nilai R diperbesar hingga pada suatu titik nilai THD akan meningkat kembali saat nilai R semakin besar. Hal ini terjadi karena nilai L yang terlalu besar menghasilkan THD yang besar pula, namun juga dapat berfungsi sebagai filter yang menurunkan nilai THD saat nilai R semakin besar. Bila nilai R naik, faktor L terhadap impedansi total mengecil, sebaliknya saat nilai L naik, faktor L terhadap impedansi total naik.

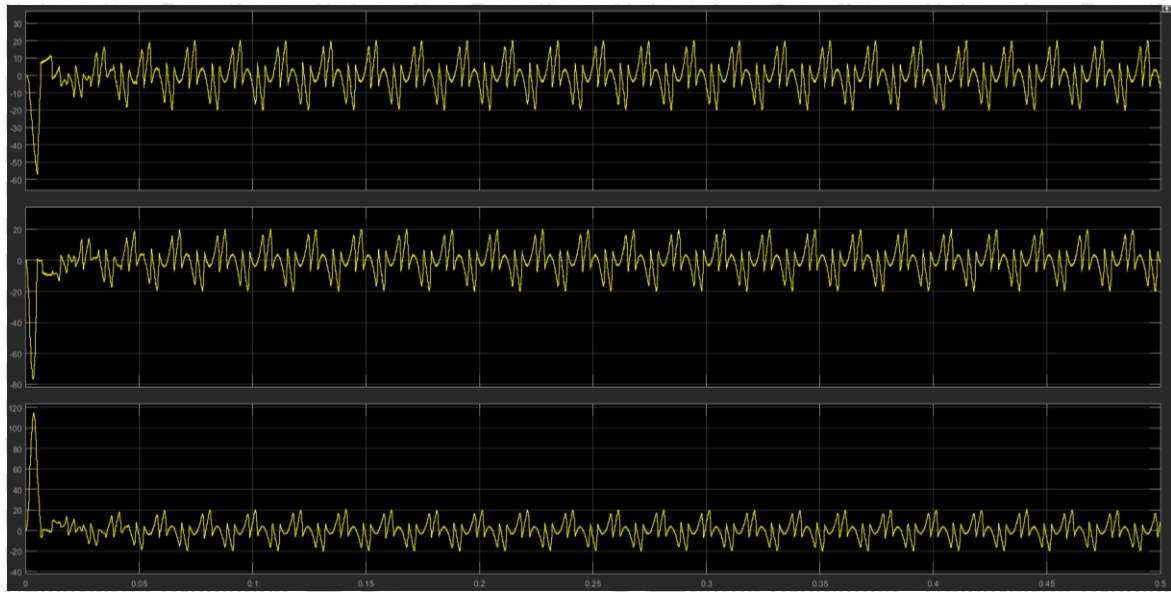
4.3.2 Komponen Arus Harmonik dalam Sistem

Total arus harmonik yang terkandung dalam sistem dapat dicari menggunakan persamaan 2-44 yang kemudian nilai konjugat persamaan tersebut adalah besar total arus harmonik pada sistem. Perhitungan matematis untuk mencari gelombang total arus harmonik ini dilakukan dengan menggunakan Matlab Simulink.



Gambar 4. 16 Gelombang arus harmonik sistem pada beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$

Pada Gambar 4.16 terlihat bentuk gelombang total arus harmonik yang terkandung dalam sistem ketika inverter diberi beban $R=10\Omega$ dan $L=0H$. Pada gambar grafik paling atas adalah arus harmonik pada fasa a, grafik yang berada di tengah adalah fasa b, dan grafik yang paling bawah adalah fasa c.



Gambar 4. 17 Gelombang arus harmonik sistem pada beban non-linier R=10Ω dan L=200mH

Pada Gambar 4.17 terlihat bentuk gelombang total arus harmonik yang terkandung dalam sistem ketika inverter diberi beban R=10Ω dan L=200mH. Pada gambar grafik paling atas adalah arus harmonik pada fasa a, grafik yang berada di tengah adalah fasa b, dan grafik yang paling bawah adalah fasa c.

Bentuk gelombang harmonik yang terkandung dalam arus sistem pada variasi nilai RL pada beban memiliki bentuk yang serupa. Gelombang arus pada gambar-gambar di atas inilah yang dihilangkan oleh rangkaian SAPF dari sistem.

4.4 Efektivitas Rangkaian SAPF Dalam Menurunkan Nilai THD Arus

Efektivitas merupakan tingkat keefektifan rangkaian SAPF dalam menurunkan THD arus. Besar tingkat efektivitas dijelaskan pada persamaan 2-52.

Pada beban R=10Ω dan L=0H, efektivitas rangkaian sebesar

$$\text{Fasa a} = \frac{25,62\% - 1,38\%}{25,62\%} \times 100\% = 94,61358\%$$

$$\text{Fasa b} = \frac{25,97\% - 1,55\%}{25,97\%} \times 100\% = 94,03157\%$$

$$\text{Fasa c} = \frac{25,39\% - 1,57\%}{25,39\%} \times 100\% = 93,81646\%$$

Pada beban R=10Ω dan L=200mH, efektivitas rangkaian sebesar

$$\text{Fasa a} = \frac{26,19\% - 2,56\%}{26,19\%} \times 100\% = 90,22528\%$$

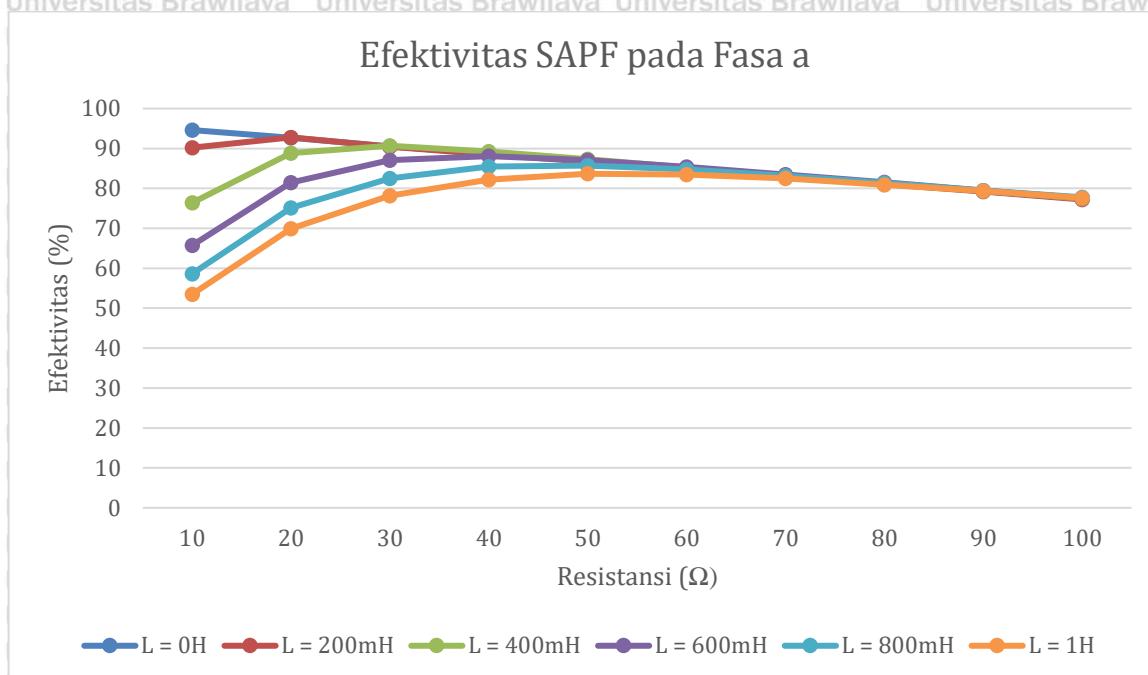
$$\text{Fasa b} = \frac{26,91\% - 2,94\%}{26,91\%} \times 100\% = 89,07469\%$$

$$\text{Fasa c} = \frac{25,75\% - 3,26\%}{25,75\%} \times 100\% = 87,33981\%$$

Perhitungan efektivitas rangkaian dilakukan menggunakan *Microsoft Excel* kemudian hasil perhitungannya dituliskan pada Tabel 4.15 untuk fasa a, Tabel 4.16 untuk fasa b, dan Tabel 4.17 untuk fasa c.

Tabel 4.15 Efektifitas rangkaian SAPF pada fasa a

R (Ω)	Efektivitas (%)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	94,61358	90,22528	76,4161	65,74975	58,64374	53,4997
20	92,69912	92,78351	88,84547	81,4433	75,1083	69,89317
30	90,55175	90,44863	90,68126	87,05557	82,5	78,16016
40	88,70278	88,50287	89,27944	88,0829	85,45702	82,20736
50	86,93805	86,65005	87,3116	87,04216	85,71429	83,67553
60	85,08988	84,85816	85,23443	85,37344	84,71795	83,46297
70	83,15752	82,91475	83,28671	83,49481	83,13914	82,48473
80	81,25	81,03144	81,32214	81,53153	81,4217	80,92643
90	79,33333	79,20198	79,39118	79,49341	79,48365	79,36454
100	77,43068	77,22458	77,47811	77,58081	77,74327	77,58739



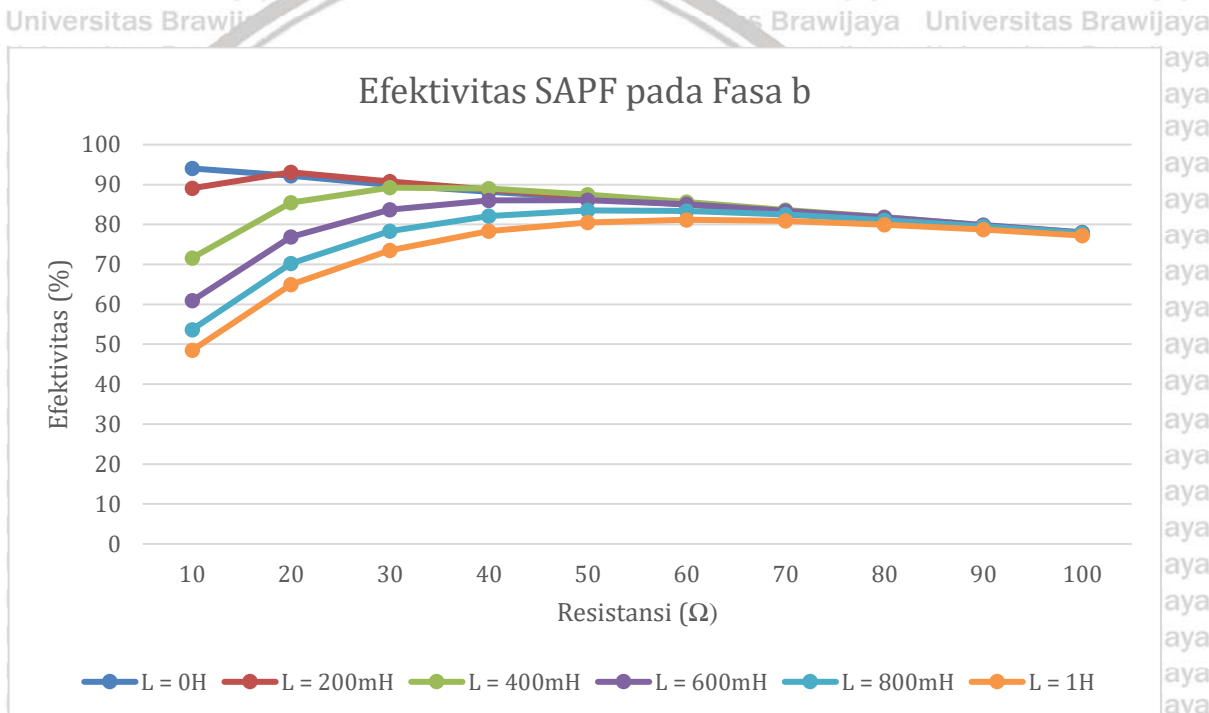
Gambar 4. 18 Grafik tingkat efektivitas rangkaian SAPF pada fasa a

Grafik pada Gambar 4.18 menunjukkan bahwa pada fasa a saat $L=0H$ efektivitas menurun seiring naiknya nilai R . Pada $L=200mH$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ kemudian menurun saat $R=30\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=400mH$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=30\Omega$ setelah itu efektivitas menurun saat $R=40\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=600mH$ efektivitas rangkaian SAPF meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=40\Omega$ kemudian efektivitasnya menurun saat $R=50\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=800mH$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian efektivitas menurun saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=1H$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian efektivitasnya menurun saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$.

Hasil perhitungan efektivitas rangkaian SAPF pada fasa b dapat dilihat pada Tabel 4.16 berikut.

Tabel 4. 16 Efektifitas rangkaian SAPF pada fasa b

R (Ω)	Efektivitas (%)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	94,03157	89,07469	71,63194	60,91653	53,68585	48,5119
20	92,17328	93,07499	85,4621	76,92565	70,2729	64,91948
30	89,89324	90,75185	89,22918	83,68651	78,3081	73,54839
40	88,22082	88,74126	88,96504	86,06061	82,11921	78,32464
50	86,62709	86,92629	87,48718	86,08959	83,51612	80,48541
60	85,01391	85,10049	85,62649	85,06406	83,40553	81,17996
70	83,21775	83,26418	83,6463	83,42336	82,49248	80,90668
80	81,44044	81,48532	81,86475	81,77823	81,07837	79,98008
90	79,64694	79,58549	79,80178	79,88486	79,51645	78,7475
100	77,67394	77,71251	77,99452	78,01154	77,84512	77,20588



Gambar 4. 19 Grafik tingkat efektivitas rangkaian SAPF pada fasa b

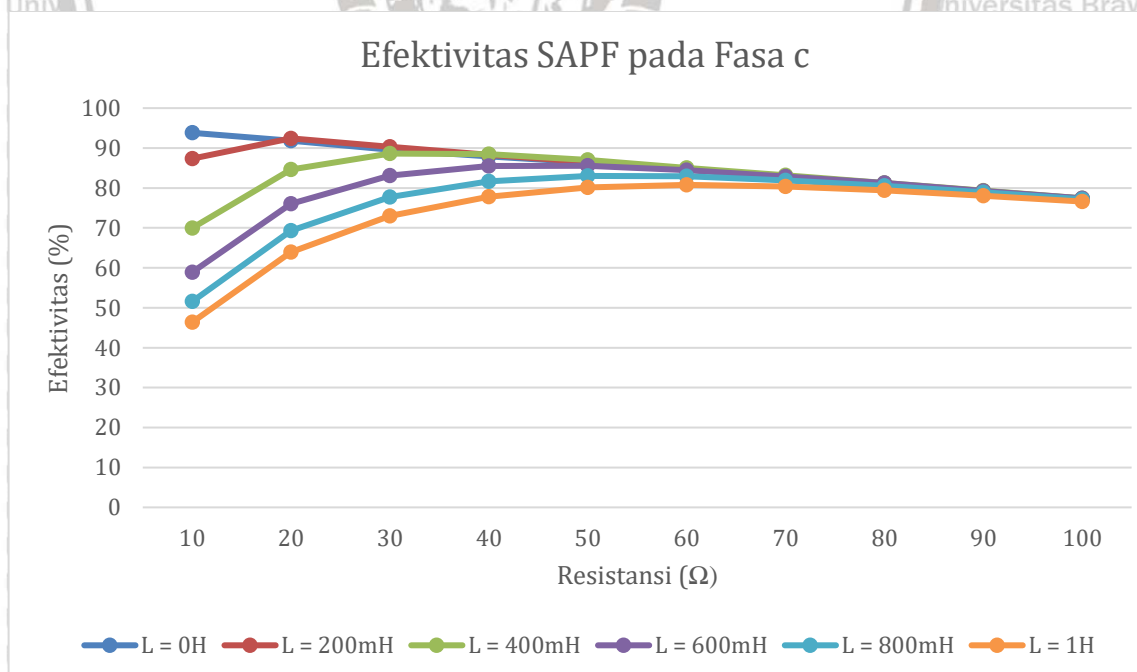
Grafik pada Gambar 4.19 menunjukkan bahwa pada fasa b, saat $L=0H$ efektivitas menurun seiring naiknya nilai R . Pada $L=200mH$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ kemudian menurun pada $R=30\Omega$. Pada $L=400mH$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=30\Omega$ setelah itu efektivitas menurun saat $R=40\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=600mH$ efektivitas rangkaian SAPF meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian efektivitasnya menurun saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=800mH$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian efektivitas menurun saat $R=60\Omega$ hingga

$R=100\Omega$. Pada $L=1H$ efektifitas meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=60\Omega$ kemudian efektifitasnya menurun saat $R=70\Omega$ hingga $R=100\Omega$.

Hasil perhitungan efektifitas rangkaian SAPF pada fasa c dapat dilihat pada Tabel 4.16 berikut.

Tabel 4.17 Efektifitas rangkaian SAPF pada fasa c

R (Ω)	Efektifitas (%)					
	L=0H	L=200mH	L=400mH	L=600mH	L=800mH	L=1H
10	93,81646	87,33981	69,97455	58,90223	51,54976	46,36278
20	91,86478	92,42762	84,62091	76,06272	69,30626	63,94468
30	89,57879	90,29444	88,6202	83,10105	77,69809	72,99832
40	87,91248	88,32195	88,48057	85,53043	81,67181	77,81904
50	86,39601	86,47877	87,01619	85,55054	83,01304	80,09495
60	84,75718	84,65364	85,01754	84,48455	82,92096	80,77577
70	82,92683	82,8197	83,14646	82,88789	81,87135	80,35471
80	81,11543	81,0046	81,22592	81,25	80,56513	79,38462
90	79,18871	79,07388	79,29947	79,21446	78,91649	78,06717
100	77,32722	77,23577	77,42727	77,38344	77,15175	76,64033



Gambar 4.20 Grafik tingkat efektifitas rangkaian SAPF pada fasa c

Grafik pada Gambar 4.20 menunjukkan bahwa pada fasa c saat $L=0H$ efektifitas menurun seiring naiknya nilai R . Pada $L=200mH$ efektifitas meningkat saat $R=20\Omega$

kemudian menurun pada $R=30\Omega$. Pada $L=400\text{mH}$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=30\Omega$ setelah itu efektivitas menurun saat $R=40\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=600\text{mH}$ efektivitas rangkaian SAPF meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian efektivitasnya menurun saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=800\text{mH}$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=50\Omega$ kemudian efektivitas menurun saat $R=60\Omega$ hingga $R=100\Omega$. Pada $L=1\text{H}$ efektivitas meningkat saat $R=20\Omega$ hingga $R=60\Omega$ kemudian efektivitasnya menurun saat $R=70\Omega$ hingga $R=100\Omega$.

Tingkat efektivitas rangkaian SAPF pada simulasi Simulink dengan variasi nilai beban non-linier RL dengan start time detik ke 0,022. Pada Tabel 4.15 efektivitas rangkaian SAPF dalam menurunkan THD arus pada inverter pada fasa a berkisar 53,4997% hingga 94,61358% dengan rentang beban $R=10-100\Omega$ dan $L=0-1\text{H}$. Pada Tabel 4.16 efektivitas rangkaian SAPF dalam menurunkan THD arus pada inverter pada fasa b berkisar 48,5119% hingga 94,03157% dengan rentang beban $R=10-100\Omega$ dan $L=0-1\text{H}$. Pada Tabel 4.17 efektivitas rangkaian SAPF dalam menurunkan THD arus pada inverter pada fasa c berkisar 46,36278% hingga 93,81646% dengan rentang beban $R=10-100\Omega$ dan $L=0-1\text{H}$. Efektivitas rangkaian SAPF tinggi pada nilai R yang rendah dengan $L=0\text{H}$. Pada beban RL, efektivitas rangkaian SAPF meningkat dengan nilai R yang sama dan L yang semakin kecil. Sedangkan pada L yang sama efektivitas rangkaian SAPF meningkat saat nilai R dinaikkan hingga pada suatu titik efektivitas rangkaian SAPF menurun saat R dinaikkan.

Dari simulasi yang telah dilakukan di atas dapat disimpulkan bahwa kombinasi nilai R dan L pada beban non-linier mempengaruhi efektivitas rangkaian SAPF. Semakin seimbang kombinasi nilai R dan L, semakin baik efektivitas rangkaian SAPF. Semakin besar nilai L dengan R yang terlalu kecil, maka efektivitas rangkaian SAPF memburuk.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis rangkaian pada Simulink, didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Pada saat inverter dihubungkan dengan beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$ hingga $R=100\Omega$ dan $L=1H$ dan sumber tegangan rms sebesar 164,26 V tanpa pemasangan SAPF, semakin besar nilai R dengan L yang semakin kecil atau bahkan $L=0H$, maka semakin besar nilai THD. Sebaliknya, semakin besar R dengan L yang semakin besar, maka nilai THD semakin kecil. Hal ini terjadi karena nilai L yang terlalu besar menghasilkan THD yang besar pula, namun juga dapat berfungsi sebagai filter yang menurunkan nilai THD saat nilai R semakin besar. Bila nilai R naik, faktor L terhadap impedansi total mengecil, sebaliknya saat nilai L naik, faktor L terhadap impedansi total naik.
2. Pada saat inverter dihubungkan dengan beban non-linier $R=10\Omega$ dan $L=0H$ hingga $R=100\Omega$ dan $L=1H$ dan sumber tegangan rms sebesar 164,26 V, saat $L=0H$ semakin besar nilai R, maka THD arus setelah dipasang rangkaian SAPF juga semakin besar. Pada L memiliki nilai, semakin besar nilai L dengan R yang kecil, nilai THD arus setelah dipasang rangkaian SAPF semakin besar dan akan menurun saat nilai R diperbesar hingga pada suatu titik nilai THD akan meningkat kembali saat nilai R semakin besar. Hal ini terjadi karena nilai L yang terlalu besar menghasilkan THD yang besar pula, namun juga dapat berfungsi sebagai filter yang menurunkan nilai THD saat nilai R semakin besar. Bila nilai R naik, faktor L terhadap impedansi total mengecil, sebaliknya saat nilai L naik, faktor L terhadap impedansi total naik.
3. Simulasi rangkaian SAPF pada inverter dengan variasi nilai beban non-linier RL $R=10\Omega$ dan $L=0H$ hingga $R=100\Omega$ dan $L=1H$ dan sumber tegangan rms sebesar 164,26 V memiliki efektivitas sebesar 46,36278% hingga 94,61358%. Kombinasi nilai R dan L pada beban non-linier mempengaruhi efektivitas rangkaian SAPF. Semakin seimbang kombinasi nilai R dan L, semakin baik efektivitas rangkaian SAPF. Semakin besar nilai L dengan R yang terlalu kecil, maka efektivitas rangkaian SAPF semakin buruk.

5.2 Saran

Dari penelitian ini terdapat beberapa saran yang perlu dilakukan untuk memperbaiki gelombang arus sistem agar menjadi lebih baik lagi, diantaranya:

1. Diberikan variasi beban seperti motor agar didapat hasil simulasi yang lebih detail.
2. Disarankan menggunakan teknik *Double-Band Hysteresis Current Control* untuk pembangkitan pulsa gate pada filter aktif *shunt* yang lebih optimal.



DAFTAR PUSTAKA

- Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2007). *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Canada: Wiley.
- Bharatkar, S. S., Bhojar, R. R., & Khadtare, S. A. (2014). Analysis of Three Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter For Symmetrical & Asymmetrical Configuration. *1st International Conference on Automation, Control, Energy and Systems - 2014, ACES 2014*. Hooghy: IEEE.
- Efandi, R., Pujiantara, M., & Wahyudi, R. (2015). Studi Perencanaan Filter Hybrid Untuk Mengurangi Harmonisa Pada Proyek Pakistan Deep Water Container Port. *Skripsi*. Tidak dipublikasikan. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ghazanfari, A., Mokhtari, H., & Firouzi, M. (2012). Simple Voltage Balancing Approach for CHB Multilevel Inverter Considering Low Harmonic Content Based on a Hybrid Optimal Modulation Strategy. Dalam León, F. D. (Editor). *IEEE Transactions on Power Delivery*: 27(4), 2150–2158. New York: IEEE.
- Hart D. W. (2011). *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill.
- Kim, S. (2017). *Electric Motor Control*. Elsevier.
- Paikray, A., & Mohanty, B. (2014). A New Multicarrier SPWM Technique For Five Level Cascaded H-Bridge Inverter. *Proceeding of the IEEE International Conference on Green Computing, Communication and Electrical Engineering, ICGCEE 2014*. Coimbatore: IEEE.
- Patil, B. S., & Pawar, V. S. (2017). Power Quality Effects on Nonlinear Loads. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(6), 3244–3247.
- Qutaina, W. I. S., & Khaizaran, M. A. (2019). Modeling and Control of Shunt Active Power Filter in Medium Voltage applications. *Thesis*. Unpublished. Birzeit: Birzeit University.
- Varjani, A. H. (1998). Harmonic control techniques for inverters and adaptive active power filters. *Thesis*. Unpublished. Wollongong: University of Wollongong.
- Widiantara, I. P. A. A., Rinas, I. W., Weking, A. I. (2016). Analisis Pengaruh Pengoperasian Beban-Beban Non-Linier Terhadap Distorsi Harmonisa Pada Blue Point Bay Villa & Spa. *Jurnal Ilmiah Spektrum*, 3(1), 54–59.