

SKRIPSI

**FILTER LC PASIF UNTUK RANGKAIAN INVERTER SATU-FASA
PADA APLIKASI SISTEM LISTRIK ENERGI BARU TERBARUKAN
SKALA RUMAH**



Disusun dan diajukan oleh

NURWANTI APRILIA NINGRUM

D041 17 1317

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**FILTER LC PASIF UNTUK RANGKAIAN INVERTER SATU-FASA PADA
APLIKASI SISTEM LISTRIK ENERGI BARU TERBARUKAN SKALA RUMAH**

Disusun dan diajukan oleh :

NURWANTI APRILIA NINGRUM

D041 17 1317

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi
Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 31 Januari 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

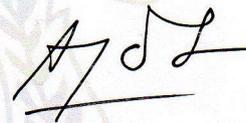
Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

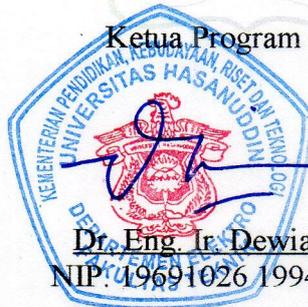


Prof. Dr-Ing. Faizal Arya Samman, S.T., M.T.
NIP. 19750605 200212 1 004



Dr. Hj. A. Ejah Umraeni Salam, S.T., M.T.
NIP. 19720908 199702 2 001

Ketua Program Studi



Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Nurwanti Aprilia Ningrum

NIM : D041171317

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**FILTER LC PASIF UNTUK RANGKAIAN INVERTER SATU-FASA
PADA APLIKASI SISTEM LISTRIK ENERGI BARU TERBARUKAN
SKALA RUMAH**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 31 Januari 2022

Yang Menyatakan



Nurwanti Aprilia Ningrum

ABSTRAK

Tugas akhir ini memaparkan tentang metode baru untuk menetapkan parameter filter LC yang digunakan untuk menapis distorsi tegangan luaran inverter DC-AC agar menghasilkan luaran yang mendekati bentuk gelombang sinusoidal. Metode ini mentransformasikan persamaan spesifikasi domain waktu sistem orde dua melalui pemetaan fungsi alih filter LC sehingga membentuk persamaan simultan tidak linear. Persamaan simultan tersebut dipecahkan menggunakan metode iterasi Jacobi hingga diperoleh nilai parameter filter yang dicari. Melalui simulasi PSpice, metode ini memberikan hasil yang sedikit lebih baik dibandingkan metode-metode yang sudah ada, ditinjau dari sisi THD tegangan, dan arus luaran. Hasil simulasi menunjukkan nilai THD tegangan dan arus yang sama yaitu sebesar 0.016% pada rangkaian filter yang dilengkapi dengan damper. Nilai parameter yang diperoleh divalidasi melalui percobaan (*hardware testing*) untuk mengukur THD dan nilai tegangan luaran dengan beban 5 Watt, dengan nilai impedansi $+50\Omega$. Namun hasil pengujian memberikan nilai deviasi yang berbeda yaitu untuk THD tegangan sebesar 11.1% pada kondisi berbeban dan 10.4% dengan kondisi tanpa beban. Deviasi tersebut kemungkinan disebabkan oleh pemilihan jenis komponen pasif yang kurang sesuai dengan aplikasi filter daya. Selain itu, dampak penggunaan damper juga dianalisis. Melalui simulasi, didapatkan bahwa damper menyebabkan efisiensi daya berkurang menjadi $\sim 89\%$ akibat daya yang terdisipasi pada damper.

Kata kunci: Filter daya pasif, THD, energi terbarukan, skala perumahan, inverter satu fasa, LC low pass filter, efisiensi daya, damper

ABSTRACT

This thesis illustrates a new method to tune LC filter parameters that will be utilized to attenuate the undesirable harmonic output voltage of DC-AC inverter to generate output waveform approaching pure sinusoidal. This method transforms two-order time-domain equation specification through LC filter transfer function mapping, thus forming simultaneous non-linear equations. This simultaneous equation is solved by applying the Jacobian iteration method until obtaining the required filter parameters. This method offers better results than the existing related methods through Spice simulation in voltage and current THD. The simulation results show the identical voltage and current THD value, which is 0.016%. The parameter values obtained are validated through experiments (hardware testing) to measure THD and the output voltage value with a 5 Watt load, having an impedance of $\pm 50\Omega$. However, the test results provide a deviation value, specifically for the THD voltage of 11.1% under load conditions and 10.4% under no-load conditions. The deviation is presumably induced by selection of the passive component types that are unsuitable for the power filter application. Other than that, the impact of the utilization of damper resistor is also analyzed. Through simulation, damper causing the decreasing of power efficiency into $\sim 89\%$. It is generated by dissipated power from the damper.

Keywords: Passive power filter, THD, residential scale, single-phase inverter, LC low-pass filter, power efficiency, damper

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas seluruh rahmat-Nya yang tidak pernah berhenti, begitupun selama penyusunan tugas akhir ini. Tujuan utama dari penulisan tugas akhir ini tentu sebagai syarat menutup Program Strata-1 Departemen Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin; tetapi hal tersebut tidak menjadi alasan untuk mengkompromi kualitas dari tugas akhir ini. Kendati demikian, tidak menutup kemungkinan masih terdapat banyak kekeliruan dari tugas akhir, semoga seluruh pembaca dapat memaklumi dan mengambil pelajaran dari kesalahan tersebut. Penulis juga berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan hal yang bermanfaat dan menambah wawasan bagi pembaca sekalian.

Secara singkat, tugas akhir ini mendemonstrasikan pemanfaatan *low pass filter* dalam implementasi rangkaian filter daya sebagai antarmuka dari sistem pengontrolan jaringan listrik dari tenaga surya atau *solar grid electric controller* dengan beban. Tugas akhir ini memuat beberapa langkah investigasi nilai parameter komponen dari topologi filter LC, dimulai dengan analisis matematis, simulasi analitik, kalkulasi dengan metode iterasi Jacobi, hingga validasi perangkat filter kit yang dilakukan untuk menghasilkan tegangan AC tunak (mendekati gelombang sinusoidal murni) yang akan menyuplai beban elektronika yang ada di rumah. Pengujian dilakukan untuk memvalidasi kinerja keluaran dari parameter komponen filter yang diperoleh dan untuk memastikan bahwa jaringan yang dibentuk telah memenuhi spesifikasi yang ditargetkan sebagaimana mestinya.

Terselesaikannya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan tugas akhir ini hingga selesai terkhusus kepada:

1. Bapak Ir. Ridwan Syafei, S.T., Ms.Is dan Ibu Ir. Suryati Lesvira selaku orang tua saya yang tiada hentinya memberikan doa, dukungan, ilmu, dan kasih sayang terdalam kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini;

2. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin;
3. Bapak Prof. Dr-Ing. Faizal Arya Samman, S.T., M.T. selaku pembimbing I dan Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T., M.T. selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, gagasan, serta ide-ide dalam penyelesaian tugas akhir ini;
4. Bapak Dr. Ir. Rhiza S. Sadjad, MSEE dan Ibu Ida Rachmaniar Sahali, S.T., M.T. selaku dosen penguji skripsi saya yang telah memberikan saran dan kritik dalam penyelesaian tugas akhir ini;
5. Seluruh dosen pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin atas bimbingan, didikan, kemudahan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh perkuliahan;
6. Segenap keluarga besar tercinta yang selalu memberi motivasi dan dorongan yang tidak ternilai harganya;
7. Rekan-rekan Lab Riset Elektronika dan Divais (Muh Aqsha Mangkona, S.T.; Muhammad Aswan, S.T.; Ira Kala, S.T.; Muh Fajri Sachruddin, S.T.; Nurul Hidayat; M. Rafli Nur Ihsan; Ahmad Fajar Nur Arifai; dan Askar Annadwi) yang selalu memberikan bantuan, dorongan, inspirasi, dan motivasi dalam mengerjakan tugas akhir ini;
8. Teman dan sahabat seperjuangan “EQUALIZER 17” yang telah menemani penulis dalam berbagai rentetan peristiwa di Fakultas Teknik Universitas;
9. Seluruh jajaran kepengurusan “SRE UNHAS” yang telah memberikan doa, dukungan, dan motivasi dalam menyelesaikan perjalanan kuliah penulis; dan
10. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini namun tidak bisa disebutkan satu persatu pada kesempatan ini.

Akhir kata, penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Untuk itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan dalam penyempurnaan tugas akhir ini. Alhamdulillah Selesai.

Nurwanti Aprilia Ningrum

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Deskripsi atau Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Metode Penelitian	4
1.7 Sistematika Penulisan	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	10
2.1 Inverter Satu Fasa	10
2.2 Pengontrolan dengan SPWM pada Inverter Satu-Fasa	13
2.3 Filter Daya Pasif	15
2.3.1 Induktor Sebagai Komponen Filter.....	17
2.3.2 Kapasitor Sebagai Komponen Filter.....	18
2.3.3 Kombinasi Induktor dan Kapasitor.....	18
2.4 Transformasi Fourier	20
2.5 Distorsi Harmonik.....	21
2.6 Parameter Daya.....	23
2.6.1 Efisiensi Daya.....	23
2.6.2 Disipasi Daya.....	24

2.7	Sistem Orde Dua	25
2.8	Iterasi Jacobi	27
2.9	Penelitian Terkait	28
BAB 3	PEMODELAN DAN ANALISIS MATEMATIS	33
3.1	Pemodelan Matematis	34
3.1.1	Analisis Tegangan dengan Persamaan Fungsi Alih.....	34
3.1.2	Validasi Pemodelan dengan Ruang Keadaan	35
3.2	Deskripsi Sistem	37
3.3	Penentuan Spesifikasi Domain Waktu.....	38
3.4	Pemetaan Parameter Matematis dengan Iterasi Jacobi	40
BAB 4	PEMODELAN, SIMULASI, DAN ANALISIS RANGKAIAN	44
4.1	Pemodelan dengan MATLAB	44
4.2	Pemodelan dengan PSpice AD	46
4.3	Analisis Parameter Tegangan Keluaran.....	48
4.3.1	Tanggapan Waktu	49
4.3.2	Tanggapan Frekuensi	50
4.3.3	Orde Harmonisa	51
4.4	Analisis Parameter Arus Keluaran.....	52
4.4.1	Tanggapan Waktu	52
4.4.2	Orde Harmonisa	53
4.5	Analisis Parameter Efisiensi Daya.....	54
4.6	Analisis Pengaruh Damper pada Skenario Satu dan Dua	55
4.6.1	Tanggapan Waktu	56
4.6.2	Tanggapan Frekuensi	64
BAB 5	PENGUJIAN PERANGKAT KERAS	68
5.1	Deskripsi Skema Pengujian	68
5.2	Analisis Hasil Pengujian	70
5.2.1	Keluaran dari Parameter [39].....	70
5.2.2	Keluaran dari Parameter Skenario Satu (S1+Damp)	71
5.2.3	Keluaran dari Parameter Skenario Dua (S2+Damp).....	72

BAB 6 PENUTUP.....	74
6.1 Kesimpulan	74
6.2 Saran	75
DAFTAR PUSTAKA.....	76
LAMPIRAN.....	80

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Alur Penelitian.....	6
Gambar 2.1 Konfigurasi Inverter Jembatan Penuh Satu-Fasa.....	12
Gambar 2.2 Skematik Aliran Arus pada Inverter Satu Fasa.....	13
Gambar 2.3 Pembangkitan Sinyal SPWM	14
Gambar 2.4 Topologi Filter Konvensional dengan Resistor Damper Seri.....	16
Gambar 2.5 Sinyal Keluaran dengan Performa Filter	16
Gambar 2.6 Grafik Representasi Domain (a) Waktu dan (b) Frekuensi	21
Gambar 2.7 Distorsi Gelombang Akibat Harmonisa.....	22
Gambar 2.8 Skematik Analisis Parameter Daya	24
Gambar 2.9 Kurva Tanggapan Waktu.....	26
Gambar 3.1 Topologi Filter LC (a) dengan Damper dan (b) tanpa Damper	33
Gambar 3.2 Diagram <i>Solar-Grid Electric Controller</i>	37
Gambar 3.3 Keluaran Filter jika Nilai ωn berubah dan $\zeta = 0,07$	39
Gambar 3.4 Keluaran Filter jika Nilai ζ berubah dan $\omega n = 100\pi$	39
Gambar 3.5 Grafik Bode dengan nilai $\zeta = 0,07$ dan $\omega n = 100\pi$	40
Gambar 4.1 Hasil iterasi Jacobi saat $RL = 50 \Omega$ (Skenario Satu).....	45
Gambar 4.2 Hasil iterasi Jacobi saat $RL = 100 \Omega$ (Skenario Dua).....	45
Gambar 4.3 Rangkaian Inverter Satu-Fasa dan Filter	47
Gambar 4.4 Pembangkit sinyal SPWM.....	48
Gambar 4.5 Rangkaian Filter LC (a) dengan damper, (b) tanpa damper	48
Gambar 4.6 Tegangan Keluaran Simulasi PSpice.....	49
Gambar 4.7 Plot Bode	50
Gambar 4.8 Kurva Komponen Fourier v. Orde Harmonisa	52
Gambar 4.9 Arus Keluaran Simulasi PSpice dengan SPWM	53
Gambar 4.10 Kurva Komponen Fourier v. Orde Harmonisa dengan SPWM.....	54
Gambar 4.12 Simulasi Tanggapan Waktu Tegangan.....	61
Gambar 4.13 Simulasi Tanggapan Waktu Arus	62
Gambar 4.14 Simulasi Tanggapan Waktu Daya	63
Gambar 4.15 Simulasi Tanggapan Frekuensi Tegangan	65

Gambar 4.16 Simulasi Tanggapan Frekuensi Arus	66
Gambar 4.17 Simulasi Tanggapan Frekuensi Daya	67
Gambar 5.1 Skematika Pengujian dan Validasi Perangkat Keras	68
Gambar 5.2 Set Kit Eksperimen	68
Gambar 5.5 Kurva Tanggapan Waktu Tegangan Keluaran	70
Gambar 5.6 Kurva Tanggapan Frekuensi Tegangan Keluaran	71
Gambar 5.7 Kurva Tanggapan Waktu Tegangan Keluaran	71
Gambar 5.8 Kurva Tanggapan Frekuensi Tegangan Keluaran	72
Gambar 5.9 Kurva Tanggapan Waktu Tegangan Keluaran	72
Gambar 5.10 Kurva Tanggapan Frekuensi Tegangan Keluaran	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Jenis Kapasitor	19
Tabel 2.2 Batas Distorsi Tegangan Berdasarkan IEEE-519.....	22
Tabel 2.3 Batas Distorsi Arus untuk Sistem Berdasarkan IEEE-519.....	23
Tabel 2.4 Penelitian Terkait	30
Tabel 2.5 (Lanjutan) Penelitian Terkait.....	31
Tabel 2.6 (Lanjutan) Penelitian Terkait.....	32
Tabel 3.1 Spesifikasi Filter yang Ditargetkan	38
Tabel 3.2 Parameter MOSFET IRF460 untuk Inverter Satu-Fasa	38
Tabel 4.1 Nilai Komponen pada Sistem Filter LC	46
Tabel 4.2 Konfigurasi Nilai sebagai Pembanding.....	47
Tabel 4.3 Tegangan Keluaran Simulasi PSpice dengan SPWM.....	50
Tabel 4.4 THD Tegangan Keluaran Simulasi PSpice	51
Tabel 4.5 Arus Keluaran Simulasi PSpice	53
Tabel 4.6 THD Arus Keluaran Simulasi PSpice	54
Tabel 4.7 Efisiensi Daya (dari titik 10s).....	55
Tabel 4.8 Hasil Simulasi Tanggapan Waktu Parameter Tegangan	56
Tabel 4.9 Hasil Simulasi Tanggapan Waktu Parameter Arus	58
Tabel 4.10 Hasil Simulasi Tanggapan Waktu Parameter Daya	59
Tabel 4.11 THD Keluaran Simulasi PSpice	60
Tabel 5.1 Nilai Parameter Aktual untuk Pengujian.....	69
Tabel 5.2 Hasil Pengujian dengan SPWM sebagai Sinyal Kendali	70

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang / Singkatan	Arti dan Keterangan
LC	Komponen pasif pada rangkaian berupa induktor (L) dan kapasitor (C)
THD_V	<i>Total Harmonic Distortion</i> (distorsi harmonisa total) tegangan (V)
TDD_I	<i>Total Demand Distortion</i> (distorsi permintaan total) arus (I)
η (Eta)	Efisiensi daya
RMS	<i>Root Mean Square</i> (akar dari nilai rata-rata dari suatu fungsi yang dikuadratkan)
ζ (Zeta)	Rasio redaman
ω_n (Omega n)	Frekuensi alamiah tidak terredam
f_g	Frekuensi dasar utilitas
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i> (modulasi lebar pulsa sinusoidal)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan energi dunia modern telah meningkat pesat karena inovasi teknologi, urbanisasi yang cepat, perubahan iklim, dan populasi yang terus bertambah. Tertuang pula dalam Perjanjian Paris yang telah diratifikasi oleh Indonesia sebagai komitmen untuk menurunkan emisi gas rumah kaca. Sektor energi ditargetkan menjadi kontributor terbesar kedua dalam menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) yaitu 314 juta ton CO₂ dari total target penurunan emisi GRK 834 juta ton CO₂ [1]. Komitmen sektor energi dalam menurunkan emisi GRK dilakukan dengan menargetkan bauran energi baru terbarukan (EBT) sebesar 23% dari bauran energi primer dan 17% efisiensi energi dari *Business As Usual* (BAU) energi final. Komitmen ini dituangkan pada Kebijakan Energi Nasional dan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) [2]. Target bauran EBT 23% pada tahun 2025 dituangkan dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030 [3]. Pemerintah dan PT. PLN (Persero) menargetkan keterlibatan masyarakat dalam peningkatan penggunaan pembangkit listrik dengan tenaga EBT skala rumah yaitu dengan utilisasi PLTS Atap (*photovoltaic rooftop*) dengan disahkannya Peraturan Menteri ESDM No. 16 Tahun 2019 tentang penggunaan sistem PLTS atap oleh konsumen PT. PLN (Persero) [4]. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan bauran EBT secara nasional.

Dengan demikian akumulasi dari adanya kebijakan yang semakin menguntungkan bagi pelanggan rumah tangga, proyeksi pertumbuhan kebutuhan listrik [5], peningkatan kualitas sel surya [6], dan penurunan harga jual sel surya [7] dapat mengimplikasikan bahwa ke depannya akan terjadi realisasi peningkatan utilisasi PLTS atap oleh pelanggan rumah tangga secara signifikan. Di mana penambahan utilisasi PLTS Atap akan berdampak langsung pada peningkatan penggunaan dan kebutuhan atas instrumen elektronika daya. Sebagai konsekuensi bagi penetrasi pembangkitan energi listrik dari sumber EBT ke dalam jaringan

sistem tenaga terutama PLTS Atap, penggunaan peralatan listrik berbasis elektronika daya sudah mulai dimanfaatkan secara lebih luas di sisi beban. Teknologi semikonduktor pada industri elektronika daya menjadi dominan pada pasar peralatan rumah tangga [8]. Pemenuhan energi listrik arus bolak-balik (AC) pada beban ketika sebagian besar keluaran pembangkitan listrik dari sumber EBT merupakan tegangan arus searah (DC) menyebabkan penggunaan peralatan listrik berbasis elektronika daya sebagai pengonversi daya menjadi bagian yang sangat fundamental. Namun, penggunaan semikonduktor daya memunculkan kekhawatiran yang besar terhadap isu kualitas daya pada sistem distribusi. Di mana penggunaan semikonduktor daya sebagai komponen penyaklaran pada proses konversi merupakan sumber utama harmonisa dalam sistem tenaga listrik modern [9].

Harmonisa daya dipertimbangkan merupakan isu yang serius untuk kualitas daya sebagaimana harmonisa ini memberikan efek pada jaringan (utilitas) dan pelanggan [10]. Harmonisa pada sistem tenaga memiliki efek buruk pada sistem dan peralatan tenaga seperti kelebihan beban, pemanasan, pengurangan umur, penuaan isolator, dan banyak efek lainnya [9]. Maka dari itu, teknisi sistem tenaga harus merencanakan suatu sistem yang dapat memitigasi harmonisa yang diciptakan secara efisien untuk memenuhi standar nasional dan internasional dari level harmonisa yang telah direkomendasikan masing-masing SPLN D5.004-1: 2012 [11] dan standar IEEE-519: 2014 [12]. Salah satu pendekatan untuk memitigasi permasalahan harmonisa untuk meningkatkan kualitas daya yaitu dengan memasang rangkaian filter daya pasif. Rangkaian filter daya pasif merupakan rangkaian yang paling umum digunakan sebagai solusi dikarenakan keuntungannya dari segi harga komponen yang lebih ekonomis, konfigurasi yang lebih sederhana, lebih handal, dan efisien. Namun kekurangannya adalah kemunculan frekuensi resonansi pada suplai AC [13].

Dari permasalahan tersebut maka dilakukan penelitian tugas akhir yang akan berfokus kepada penggunaan rangkaian filter daya pasif sebagai solusi mitigasi harmonisa pada keluaran inverter DC-AC, dengan judul **“FILTER LC PASIF UNTUK RANGKAIAN INVERTER SATU-FASA PADA APLIKASI SISTEM LISTRIK ENERGI BARU TERBARUKAN SKALA RUMAH”**.

1.2 Deskripsi atau Perumusan Masalah

Permasalahan pada sinyal keluaran rangkaian inverter satu-fasa merupakan harmonisa yang muncul akibat penggunaan komponen penyaklaran yang dikendalikan oleh sinyal gerbang SPWM. Harmonisa diketahui memberikan efek buruk pada jaringan (utilitas) dan pelanggan. Oleh karena itu dibutuhkan perangkat yang dapat memitigasi permasalahan harmonisa untuk meningkatkan kualitas daya yaitu dengan memasang rangkaian filter daya pasif dengan topologi LC. Rangkaian filter LC daya pasif tersebut lebih lanjut disebut sebagai objek penelitian.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mencapai tujuan yang secara garis besar yaitu menemukan konfigurasi nilai komponen pasif pada topologi filter LC yang dapat memenuhi spesifikasi sebagai kriteria keberhasilan kinerja filter LC daya pasif yang merupakan bentuk implementasi pemenuhan beban skala rumah. Selanjutnya spesifikasi tersebut dijabarkan lebih detail, sebagai berikut:

1. Nilai THD tegangan di bawah 5% dan nilai TDD arus di bawah 3% yang sesuai dengan standar industri IEEE-519 tahun 2014
2. Efisiensi daya (η) tinggi mendekati 90%

1.4 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil akhir yang lebih terperinci dan terfokus, maka permasalahan yang akan dibahas akan dibatasi dengan ketentuan berikut:

1. Kegiatan utama dari penelitian ini berfokus pada pemodelan matematis dan pemodelan pada level simulasi dengan *software* PSpice [14] dan MATLAB.
2. Pemodelan dan simulasi PSpice terhadap beban dilakukan dengan mengambil beberapa resistansi beban sebagai sampel dari beban lainnya. Dalam hal ini dilakukan analisis kecendrungan beban terhadap filter.
3. Tegangan luaran pada penelitian ini tidak dipertahankan sehingga terdapat kemungkinan nilai tegangan menjadi berubah-ubah pada setiap komponen

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat yang diharapkan dapat dicapai yang diuraikan di bawah ini:

1. Bagi masyarakat, mahasiswa, dan staf akademik penelitian ini diharapkan kedepannya bermanfaat dalam hal pembelajaran dan sebagai bahan pra-penelitian bagi mahasiswa yang ingin melanjutkan penelitian mengenai rangkaian filter daya pasif atau elektronika daya secara keseluruhan
2. Bagi institusi Universitas Hasanuddin, penelitian ini dapat berguna sebagai referensi ilmiah dalam pengembangan perancangan dan analisis rangkaian filter daya pasif atau elektronika daya secara keseluruhan
3. Bagi peneliti terkhusus di bidang elektronika daya untuk pengolahan energi terbarukan, penelitian ini memiliki manfaat untuk menambah wawasan dan menjadi sumber acuan dalam mengembangkan rangkaian filter daya pasif dengan spesifikasi yang sesuai dengan standar industri.

1.6 Metode Penelitian

Untuk menghasilkan tugas akhir yang komprehensif, maka dalam penelitian ini digunakan metode penelitian yang secara berurutan dilakukan sebagai berikut:

1. Studi pustaka
Studi pustaka dilakukan untuk membangun dan membentuk landasan teori yang konkrit berdasarkan teori dasar elektronika daya dan penelitian terkait sebelum melakukan penelitian. Studi pustaka menghasilkan pemahaman terhadap teori-teori yang berkaitan dengan objek penelitian yang diuraikan pada **Bab 2**. Terkhusus pada **Subbab 2.9** mengenai penelitian yang berkaitan dengan penelitian ini. Studi pustaka dalam hal ini dikhususkan untuk menemukan unsur kebaruan dan inovasi dari penelitian ini.
2. Pemodelan dan analisis matematis
Kegiatan penelitian dilanjutkan dengan melakukan penerapan teori yang telah diperoleh dalam bentuk representasi objek penelitian berupa rangkaian menjadi pernyataan matematis. Pemodelan ini dilakukan secara konvensional

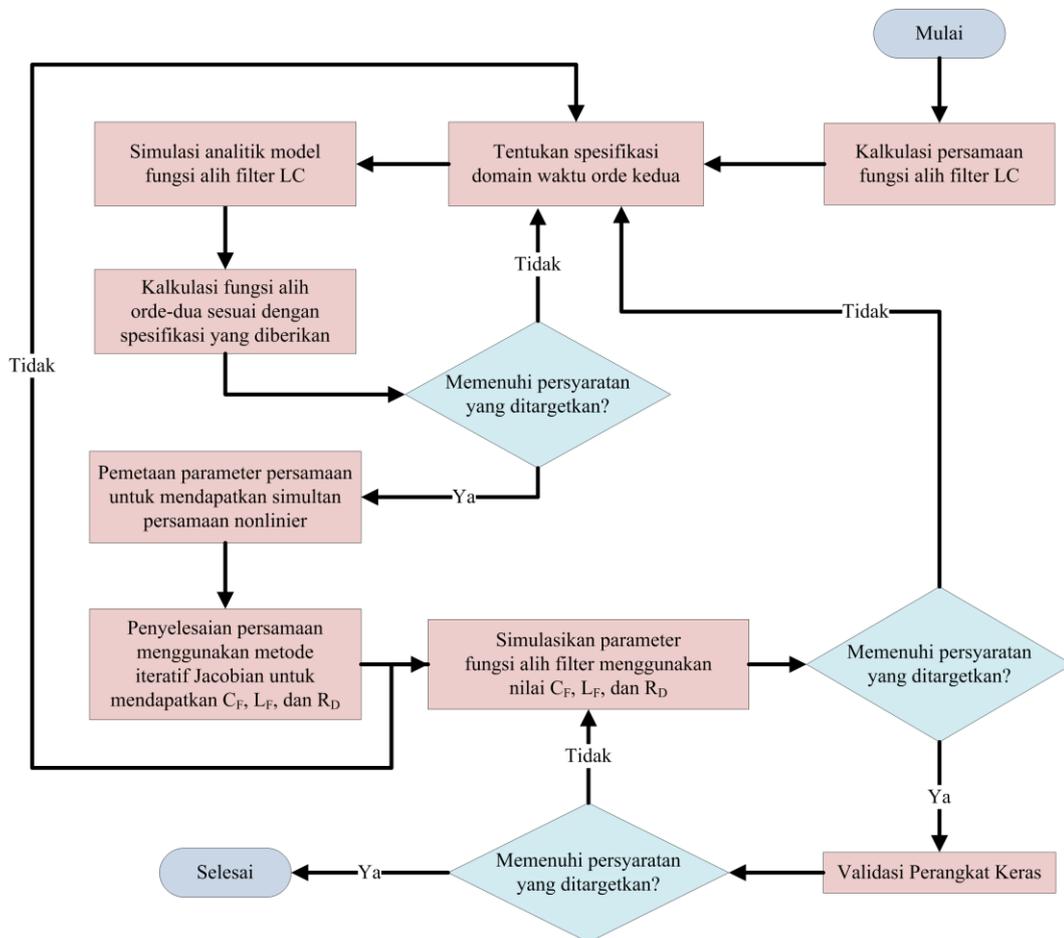
yang dimaksudkan untuk memahami karakteristik dari objek penelitian dan lebih lanjut diuraikan pada **Bab 3**.

3. **Pemodelan, simulasi, dan analisis rangkaian dengan perangkat lunak**
Kemudian dilanjutkan dengan melakukan penelitian dengan menggunakan bantuan perangkat lunak. Kegiatan ini dimaksudkan untuk melakukan pemodelan rangkaian yang telah dianalisis matematis sebelumnya ke dalam simulasi perangkat lunak untuk memverifikasi karakteristik, melakukan pemetaan melalui simulasi analitik, dan memperoleh serta memahami data-data aktual yang berkaitan dengan keluaran dari objek penelitian. Selanjutnya bagian ini diuraikan pada **Bab 4**.
4. **Pengujian dengan perangkat keras**
Kegiatan pengujian dengan perangkat keras dilakukan sebagai kegiatan tambahan untuk menyempurnakan penelitian. Kegiatan ini merupakan bentuk implementasi kegiatan sebelumnya secara langsung pada perangkat keras untuk selanjutnya dilakukan pengujian, observasi, dan validasi terhadap objek penelitian. Selanjutnya bagian ini diuraikan pada **Bab 5**.
5. **Diskusi dan konsultasi**
Dengan serangkaian kegiatan penelitian sebelumnya, secara beriringan dilakukan dialog secara langsung dengan pembimbing dan pihak-pihak yang berkompeten pada bidang terkait untuk melengkapi kegiatan penelitian.

Dari susunan metode penelitian tersebut, lebih lanjut kegiatan utama atau inti dari penelitian ini digambarkan dalam kerangka kerja penelitian pada **Gambar 1.1**. Kerangka kerja ini menguraikan runtutan langkah-langkah kegiatan utama dari penelitian untuk mencapai tujuan dari penelitian itu sendiri. Kemudian **Gambar 1.1** dijabarkan lebih detail sebagai berikut:

1. **Kalkulasi persamaan fungsi alih filter LC**
Kegiatan utama penelitian dimulai dengan melakukan kalkulasi dari persamaan fungsi alih dari filter LC secara konvensional. Kalkulasi ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik waktu dari filter LC yang menjadi objek penelitian. Persamaan fungsi alih yang dianalisis adalah dari parameter

tegangan. Topologi filter LC terdiri dari masing-masing sebuah induktor filter L_F , kapasitor filter C_F , resistor damper R_D , dan resistor beban R_L . Secara rangkaian, lebih detail masing-masing komponen pasif terhubung sebagai berikut, L_F dihubung-seri dengan C_F dan R_L yang saling terhubung secara paralel, dan R_D dihubung-seri dengan C_F .



Gambar 1.1 Alur Penelitian

2. Penentuan spesifikasi domain waktu orde-dua

Spesifikasi domain waktu ditentukan berdasarkan persamaan fungsi alih tegangan yang telah dianalisis sebelumnya. Dimana respon sistem orde dua dinyatakan dengan bentuk fungsi alih orde-dua dengan parameter rasio redaman ζ , dan frekuensi alami tidak teredam ω_n . Dari bentuk persamaan fungsi alih tersebut, dapat dianalisis perilaku dinamika dari konfigurasi

topologi filter LC yang ditentukan, dengan tujuan mencapai sistem yang teredam kurang, dan berosilasi hingga pada keadaan tunak (*steady state*).

3. Simulasi analitik model fungsi alih filter LC

Simulasi analitik dilakukan untuk menentukan penentuan nilai dalam persamaan sistem orde-dua yang sesuai dan menyesuaikan dengan persamaan fungsi alih yang telah didapatkan melalui proses kalkulasi persamaan.

4. Kalkulasi fungsi alih orde dua sesuai dengan spesifikasi yang diberikan

Selanjutnya dilakukan kalkulasi untuk membantu pencarian pasangan nilai ζ dan ω_n . Kalkulasi ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB.

5. Pemetaan parameter persamaan untuk mendapatkan sistem persamaan linear

Pasangan nilai ζ dan ω_n kemudian dipetakan untuk disesuaikan dengan persamaan fungsi alih yang telah diperoleh.

6. Penyelesaian persamaan menggunakan metode iterasi Jacobi untuk mendapatkan C_F , L_F , dan R_D

Hasil pemetaan persamaan kemudian diselesaikan dengan metode iterasi Jacobi setelah mengintegrasikan spesifikasi domain waktu dengan hasil pemodelan matematis dengan fungsi alih. Penyelesaian dilakukan dengan menggunakan MATLAB untuk mencapai hasil yang akurat dengan jumlah iterasi yang dapat diubah-ubah dan disesuaikan.

7. Simulasikan parameter fungsi alih filter menggunakan nilai C_F , L_F , dan R_D

Masing-masing konfigurasi nilai C_F , L_F , dan R_D yang telah diperoleh kemudian disimulasikan sesuai dengan pemodelan yang juga dilakukan pada tahap ini. Dalam tahapan ini simulasi dilakukan untuk mengetahui implementasi dari hasil pemodelan matematis yang telah dilakukan. Selain itu, dilakukan pula perbandingan terhadap konfigurasi nilai parameter dari penelitian terkait yang memiliki sistem yang serupa dengan penelitian ini.

8. Validasi perangkat keras

Pengujian dilakukan dengan menggunakan prototipe inverter dan rangkaian kit filter yang telah dirancang. Kedua rangkaian tersebut diintegrasikan. Pengujian ini dilakukan sebagai bentuk validasi dari proses simulasi yang dilakukan sebelumnya. Diharapkan keluaran dari proses ini tidak terjadi

penyimpangan yang begitu signifikan sehingga tidak dapat menjustifikasi proses penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

1.7 Sistematika Penulisan

Untuk menghasilkan penelitian yang terstruktur sehingga dapat dipahami dengan jelas, maka penulisan dari penelitian ini menggunakan ketentuan berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Sebagai bagian awal dari penelitian, bab ini menjelaskan terkait awal mula penelitian seperti, latar belakang, deskripsi atau perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan. Bab ini bertujuan untuk memperkenalkan dan memberikan konteks yang jelas terhadap penelitian.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini bertujuan untuk menjelaskan teori penunjang penelitian dan penelitian lain yang berkaitan dengan penelitian ini. Terdiri atas sembilan teori penunjang yang diharapkan dapat memberikan pemahaman awal sebelum melangkah ke tahapan utama dari penelitian, yaitu analisis dan pengambilan data. Adapun penelitian terkait yang dipaparkan dalam bab ini juga terdiri atas sembilan penelitian yang selanjutnya dijadikan sebagai referensi dan pembanding hasil.

BAB 3 PEMODELAN MATEMATIS

Bab ini merupakan bagian awal dari analisis yang dilakukan agar dapat memperoleh hasil penelitian yang diinginkan. Terdiri atas pemodelan matematis berupa analisis rangkaian dengan persamaan fungsi alih dan ruang keadaan, deskripsi sistem secara keseluruhan, dilanjutkan dengan langkah penentuan spesifikasi domain waktu yang akan membantu proses penyelesaian pemodelan matematis, lalu diakhiri dengan pemetaan parameter matematis menggunakan persamaan matematis iterasi Jacobi.

BAB 4 PEMODELAN, SIMULASI, DAN ANALISIS RANGKAIAN

Sebagai lanjutan dari pemodelan matematis, bab ini menyajikan metode yang digunakan dengan menggunakan perangkat lunak untuk menyelesaikan persamaan

matematis yang didapatkan dari bab sebelumnya. Terdiri atas pemodelan dengan MATLAB, pemodelan dengan PSpice, analisis hasil simulasi mulai dari amplitudo tegangan, arus, dan daya, hingga distorsi harmonisa total (THD), serta analisis terkait pengaruh penggunaan damper dalam sistem filter.

BAB 5 PENGUJIAN PERANGKAT KERAS

Bab ini bertujuan untuk memaparkan proses validasi dari analisis yang telah dilakukan pada bab sebelumnya dengan menggunakan perangkat keras. Terdiri atas deskripsi skema pengujian dan analisis hasil pengujian.

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

Sebagai bab penutup, bab ini berisikan kesimpulan dari bab sebelumnya yang menjelaskan terkait analisis dari hasil penelitian dan saran perbaikan untuk peneliti selanjutnya yang akan meneliti lebih lanjut terkait topik penelitian yang serupa.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Inverter Satu Fasa

Inverter adalah elemen sistem kunci yang digunakan untuk pengkondisian daya. Hampir semua sistem panel surya dalam skala apa pun menyertakan inverter dari beberapa jenis untuk memungkinkan daya digunakan di lokasi untuk peralatan bertenaga AC atau jaringan. Model inverter yang tersedia sekarang sangat efisien (efisiensi konversi daya lebih dari 95%), andal, dan ekonomis. Pada skala utilitas, tantangan utama terkait dengan konfigurasi sistem untuk mencapai operasi yang aman dan meminimalkan kerugian konversi [15].

Inverter pada pengaplikasian elektronika daya berkaitan dengan kelas rangkaian transisi daya yang dijalankan dari sumber tegangan DC atau sumber arus DC dan mengubahnya menjadi tegangan atau arus AC. Ini adalah kebalikan dari konverter AC-DC. Masukan dari inverter adalah sumber DC. Sumber utama daya masukan kemungkinan adalah sumber tegangan AC dari utilitas yang dialihkan ke DC oleh penyearah AC-DC dengan filter kapasitor dan kemudian diubah menjadi suplai AC menggunakan inverter [16]. Dengan cara ini, tegangan AC keluaran akhir memiliki perubahan amplitudo dan frekuensi daripada tegangan DC masukan.

Dalam inverter sumber tegangan (*Voltage Source Inverter – VSI*), sumber tegangan merupakan suplai untuk inverter dan pada inverter sumber arus (*Current Source Inverter – CSI*), suplai ke inverter adalah sumber arus. Dalam VSI dimiliki kendali atas 'tegangan keluaran' dan dalam CSI dimiliki kendali langsung atas 'arus keluaran'. Bentuk gelombang tegangan keluaran VSI yang ideal harus tidak bergantung pada beban yang terhubung ke inverter. Inverter DC ke AC menghasilkan bentuk gelombang keluaran AC dari sumber DC. Aplikasi VSI termasuk penggerak kecepatan yang dapat disesuaikan (*Adjustable Speed Driver – ASD*), catu daya tak terputus (*Uninterruptable Power Supplies – UPS*), filter aktif, sistem transmisi AC fleksibel (*Flexible AC Transmission System – FACTS*), kompensator tegangan, dan generator fotovoltaik [17].

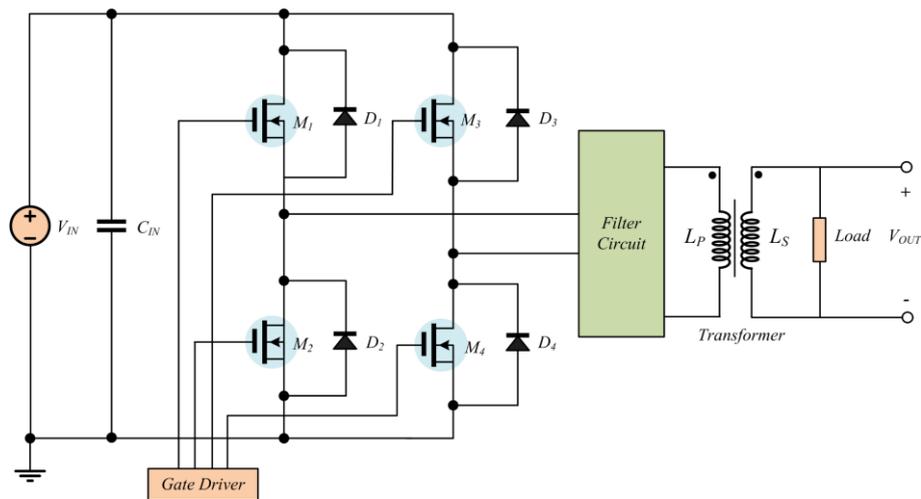
Keluaran dari inverter dapat berupa tegangan AC dengan bentuk gelombang sinus, gelombang persegi, atau modifikasi sinus. Perangkat semikonduktor yang banyak digunakan pada power inverter adalah MOSFET, IGBT, atau Thyristor. Ada dua jenis sinyal keluaran yang dapat dihasilkan oleh inverter untuk pembangkit listrik tenaga surya. Pertama, aplikasi daya rendah dan sedang dapat digunakan sinyal keluaran gelombang persegi. Kedua, aplikasi daya tinggi digunakan sinyal keluaran gelombang sinus. Keluaran dari inverter adalah tegangan AC dengan komponen nol DC. Karena itu, masih mengandung harmonik. Otak dari inverter adalah mikrokontroler sebagai pengontrol utama dengan teknik tertentu [18].

Terdapat tiga jenis rangkaian VSI yang dikelompokkan berdasarkan keluaran tegangannya. Yaitu, inverter setengah jembatan (*half bridge*) satu-fasa, inverter jembatan penuh (*full-bridge*) satu fasa, dan inverter sumber tegangan tiga-fasa. Dalam penelitian ini, akan difokuskan untuk menggunakan inverter jembatan penuh (*full-bridge*) satu fasa. VSI jembatan penuh satu fasa ini mencakup dua konfigurasi inverter dasar, yaitu dua inverter setengah jembatan. Bentuk gelombang keluaran ini mirip dengan bentuk gelombang keluaran dari setengah jembatan VSI. Satu-satunya perbedaan adalah tegangan keluaran. Seperti pada setengah jembatan VSI, bentuk gelombang keluaran dari jembatan penuh VSI terdiri dari harmonisa [17].

Desain dasar inverter dapat dilihat pada **Gambar 2.1**. Dalam rangkaian inverter, terdapat beberapa komponen yaitu komponen semikonduktor, komponen driver (MOSFET *driver*), dan unit pengontrolan elektronika (*electronic control unit*). M_1 - M_4 merupakan komponen semikonduktor yaitu MOSFET yang bertindak seperti perangkat penyaklaran. Penggunaan MOSFET *driver* dan *electronic control unit* dalam aplikasi elektronika daya pada inverter jembatan penuh satu-fasa digunakan sebagai rangkaian penggerak gerbang (*gate driver*) untuk menerjemahkan sinyal ON/OFF dari kontroler analog atau digital menjadi sinyal daya yang diperlukan untuk mengontrol MOSFET pada inverter [19].

Electronic control unit (ECU) berperan sebagai generator pulsa. Dilanjutkan dengan MOSFET *driver* yang berperan sebagai penguat tegangan dari ECU untuk tegangan pada gate MOSFET, sekaligus sebagai isolasi rangkaian arus lemah dan

kuat. MOSFET dipilih sebagai komponen transistor yang digunakan pada rangkaian inverter dikarenakan keunggulan yang dimilikinya untuk beroperasi pada frekuensi penyaklaran yang tinggi, memiliki rugi-rugi penyaklaran dan konduksi yang cukup rendah jika dibandingkan dengan transistor lain contohnya pada IGBT, serta memiliki koefisien suhu negatif yang membuatnya semakin stabil secara termal [20]. Pada **Gambar 2.1**, konfigurasi inverter jembatan penuh dengan menggunakan teknik SPWM untuk mengendalikan komponen semikonduktor.

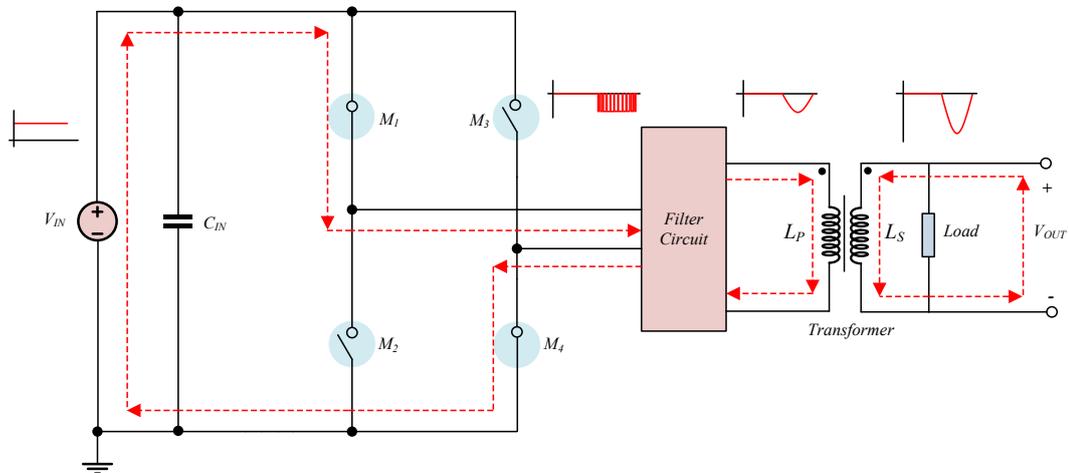


Gambar 2.1 Konfigurasi Inverter Jembatan Penuh Satu-Fasa

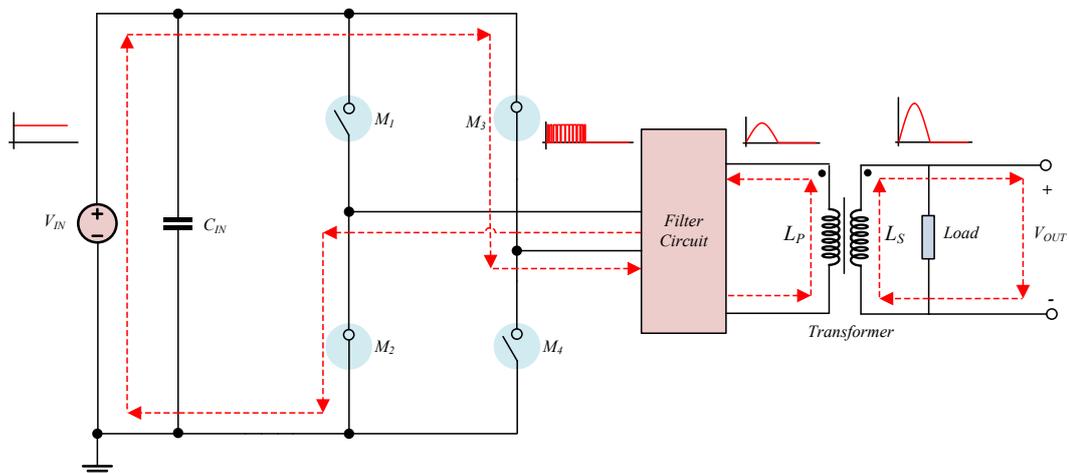
Gambar 2.2 menunjukkan aliran arus pada inverter jembatan penuh yang menyebabkan sumber tegangan DC dapat diubah menjadi tegangan AC. Saklar daya M_1 dan M_3 pada lengan yang sama harus memiliki keadaan yang berbeda, yaitu saat M_1 ON maka M_3 OFF. Begitu pula keadaan pada saklar daya M_2 dan M_4 . Pada **Gambar 2.2 (a)** ditunjukkan siklus arus dari sumber tegangan DC di mana saklar daya M_1 dan M_4 ON, M_2 dan M_3 OFF, dan mengonversi tegangan DC menjadi tegangan dengan polaritas negatif. Sementara pada **Gambar 2.2 (b)**, ditunjukkan kondisi sebaliknya, di mana saklar daya M_2 dan M_3 ON, M_1 dan M_4 OFF, dan mengonversi tegangan DC menjadi tegangan dengan polaritas positif.

Skema aliran arus pada inverter ini berlangsung secara bergantian dan kontinu dalam satuan waktu sehingga terakumulasi menjadi tegangan dengan arus bolak-balik yang disebut dengan tegangan AC. Sinyal kontrol yang dihasilkan

menyebabkan saklar daya dapat berubah kondisi secara kontinu dari ON ke OFF dan sebaliknya OFF ke ON agar dapat merekayasa tegangan suplai DC menjadi tegangan AC yang dibutuhkan, dalam hal ini pada aplikasi beban rumah tangga



(a)



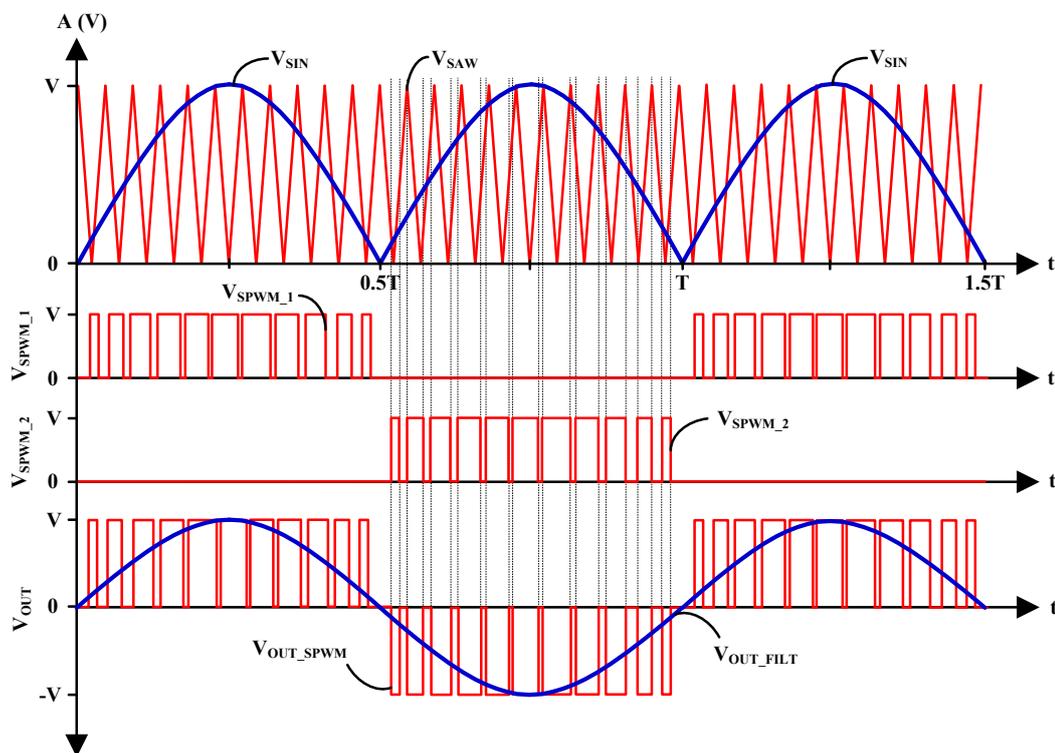
(b)

Gambar 2.2 Skematik Aliran Arus pada Inverter Satu Fasa yang menghasilkan (a) tegangan dengan polaritas negatif dan (b) tegangan dengan polaritas positif

2.2 Pengontrolan dengan SPWM pada Inverter Satu-Fasa

Teknik PWM (*Pulse Width Modulation*) diadopsi dalam inverter untuk mengatur komponen semikonduktor sebagai saklar daya pada inverter dan menjaga tegangan keluaran konstan terlepas dari beban. PWM adalah proses memodifikasi lebar pulsa sehubungan dengan gelombang pembawa atau gelombang kontrol.

Namun, untuk mengurangi kandungan harmonisa dari keluaran inverter, berbagai jenis PWM diuji dan diadopsi. Dalam PWM sinusoidal (SPWM), ketika inverter sumber tegangan dinyalakan dalam mode operasi 120° atau 180° , bentuk gelombang keluaran yang diperoleh akan menjadi gelombang persegi. Oleh karena itu, untuk memperoleh gelombang sinus, SPWM merupakan metode yang sederhana dan efisien [21]. Dalam metode ini, gelombang sinus berperan sebagai sinyal referensi v_{SIN} dan gelombang segitiga berperan sebagai sinyal pembawa v_{SAW} dibandingkan untuk menghasilkan pulsa keluaran yang dibutuhkan *gate* pada MOSFET. Prinsip dasar SPWM ditunjukkan pada **Gambar 2.3** [22].



Gambar 2.3 Pembangkitan Sinyal SPWM [22]

Dengan menggunakan kendali dimana jika sinyal referensi bernilai lebih besar daripada sinyal pembawa, maka sesuai dengan **Gambar 2.1.**, saklar daya M_1 dan M_4 ON, M_2 dan M_3 OFF, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2 (a)**, serta siklus kebalikannya yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2 (b)**. Dimana amplitudo rasio modulasi ditentukan oleh indeks modulasi m_a dengan syarat indeks modulasi m_a lebih besar atau sama dengan satu [14].

$$m_a = \frac{v_{SIN}}{v_{SAW}} \quad (2.2.1)$$

Ada beberapa pertimbangan yang harus dikonsiderasikan, sebelum beralih ke SPWM. Misalkan amplitudo gelombang sinus yang dimodulasi adalah A_{SIN} dan pembawa segitiga menjadi A_{SAW} . Indeks modulasi (A_{SAW}/A_{SIN}) memiliki pengaruh yang lebih besar pada tegangan keluaran. Frekuensi pembawa yang sangat tinggi memiliki keuntungan dalam mengurangi komponen harmonik karena sifatnya yang induktif. Peralihan frekuensi tinggi juga meningkatkan kerugian peralihan pada saklar elektronik daya yang digunakan inverter. Untuk alasan ini, frekuensi pembawa optimal yang digunakan dipilih antara 2 kHz hingga 15 kHz [21].

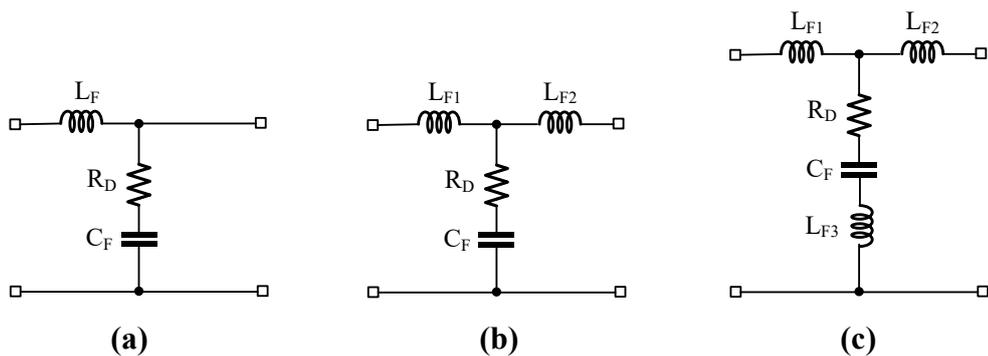
2.3 Filter Daya Pasif

Filter *low pass* dipasang pada keluaran inverter untuk menapis harmonisa frekuensi tinggi. Harmonisa dapat menyebabkan beberapa masalah dalam keluaran inverter seperti kualitas daya, degradasi peralatan, dan kualitas bentuk gelombang sinusoidal. Ditambah lagi, sinyal keluaran inverter harus memiliki karakteristik yang baik dan dapat cocok dengan *grid*. Penapisan pasif adalah solusi konvensional yang paling sederhana. Elemen pasif seperti resistansi, induktansi dan kapasitansi digunakan sebagai filter pasif untuk menapis harmonisa [23].

Berbagai jenis topologi filter pasif konvensional yang digunakan dalam berbagai aplikasi dengan distorsi harmonik, ukuran, biaya desain, dan karakteristik yang berbeda [24] digambarkan pada **Gambar 2.4**. Penelitian ini menggunakan rangkaian filter daya pasif (*Power Passive Filter – PPF*). Analisis terhadap filter daya pasif ini dilakukan untuk mencapai filter dengan performa baik yaitu, filter yang dapat menghasilkan sinyal keluaran berupa gelombang sinusoidal yang mendekati murni seperti pada **Gambar 2.5(a)** sedangkan filter dengan performa kurang baik dapat menghasilkan sinyal keluaran berupa gelombang sinusoidal yang masih memiliki distorsi harmonisa seperti pada **Gambar 2.5(b)**.

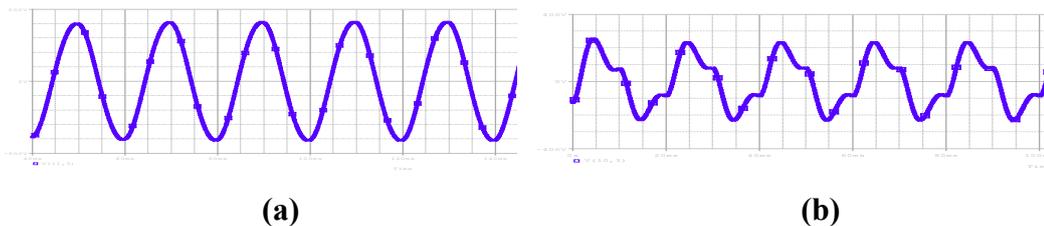
Terdapat dua parameter pada filter yang biasanya berhubungan terbalik antar satu sama lain yaitu tingkat *Total Harmonic Distortion* (THD), dan tingkat efisiensi. Jika tingkat THD rendah, tingkat efisiensinya juga rendah begitupun sebaliknya. Di

mana yang diinginkan pada keluaran modul inverter adalah tingkat THD rendah dan efisiensi yang tinggi. *Total Harmonic Distortion* (THD) adalah angka penting yang digunakan untuk mengukur tingkat harmonisa dalam bentuk gelombang tegangan atau arus. Sedangkan tingkat efisiensi merupakan nilai perbandingan antara daya keluaran dan daya masukan dari filter tersebut. Apabila nilai daya keluaran suatu filter semakin mendekati nilai daya masukannya berarti tingkat efisiensinya akan semakin tinggi. Nilai distorsi harmonisa total dan efisiensi dihitung dengan menggunakan skala persentasi (%).



Gambar 2.4 Topologi Filter Konvensional dengan Resistor Damper Seri

(a) LC, (b) *Single-tuned* LCL, dan (c) LLCL



Gambar 2.5 Sinyal Keluaran dengan Performa Filter yang

(a) Baik; dan (b) Kurang Baik

Filter daya pasif merupakan divais yang tersusun atas kombinasi komponen seperti kapasitor, induktor, dan resistor. Atas karakteristik masing-masing komponen pasif tersebut, rangkaian ini dapat menapis riak atau harmonisa pada keluaran inverter akibat penyaklaran dari komponen semikonduktor. Kapasitor digunakan untuk menahan atau memblokir sinyal DC dan melewatkan sinyal AC. Induktor digunakan karena kemampuannya dalam melewatkan komponen sinyal

DC dan memblokir sinyal AC. Kombinasi filter LC merupakan kombinasi dari induktor yang dihubung-seri dan kapasitor yang di-*shunt* dengan keluaran inverter.

2.3.1 Induktor Sebagai Komponen Filter

Induktor dihubungkan secara seri dengan keluaran inverter. Induktor memiliki karakteristik dapat menahan perubahan pada arus yang mengalir melaluinya. Induktor mampu memberikan impedansi yang besar pada riak dan impedansi yang hampir tidak ada pada komponen DC. Sehingga, komponen riak dapat dieliminasi. Ketika arus keluaran inverter meningkat melampaui nilai tertentu, energi akan disimpan dalam bentuk medan magnet dan energi ini akan dilepaskan ketika arus keluaran menurun dan lebih kecil dari nilai rata-ratanya. Maka perubahan seketika pada arus yang terjadi pada rangkaian dapat dihaluskan dengan meletakkan induktor dengan seri di antara inverter dan beban [25].

Terdapat banyak jenis induktor pada praktisnya. Adapun pembagian induktor yang nilainya konstan (*fixed*) tersedia berdasarkan material spesifik dan metode konstruksi dari induktor itu sendiri. Setiap jenis induktor memiliki keuntungan dan *trade-off*-nya yang perlu dikonsiderasikan ketika melakukan perancangan untuk spesifikasi yang diinginkan. Berdasarkan tipe materialnya, induktor dibagi menjadi tiga yaitu, 1) *Air Core Inductor* (induktor inti udara), 2) *Iron Core Inductor* (induktor inti besi), dan 3) *Ferrite Core Inductor* (induktor inti ferit).

Sedangkan berdasarkan tipe konstruksinya, induktor dibagi atas tujuh induktor yaitu, 1) *Bobbin-based Inductor*, 2) *Inductor with Litz-wire coils*, 3) *Toroidal Core Inductor*, 4) *Gapped Core Inductor*, 5) *Cut Core Inductor*, 6) *Multi-core Inductor*, dan 7) *Planar Inductor*. Jika ditinjau dari tipe materialnya, jenis induktor yang tepat digunakan untuk aplikasi daya rendah adalah induktor inti udara dan inti ferit. Induktor inti udara baik digunakan pada aplikasi dengan inverter yang merupakan aplikasi penyaklaran dengan frekuensi tinggi karena memberikan linearitas yang tinggi, tidak mengalami saturasi inti, dan tidak memiliki disipasi akibat besi. Namun terdapat kekurangan akibat tidak adanya inti ferit yang memlimitasi penggunaan induktor inti udara dan lebih dipilih pada penggunaan

aplikasi daya rendah. Adapun induktor inti ferit merupakan induktor ideal untuk aplikasi frekuensi tinggi akibat terjadi pengurangan disipasi akibat arus *eddy* yang diasosiasikan dengan material seperti besi. Maka untuk implementasi validasi alat pada penelitian ini, dipilih induktor dengan metode konstruksi dengan inti toroidal dan dengan material inti udara dan inti ferit [26].

2.3.2 Kapasitor Sebagai Komponen Filter

Kapasitor dihubungkan secara paralel (*shunt*), dan nilai kapasitansi tersebut diletakkan bersebrangan dengan impedansi beban. Kapasitor ini di-*shunt* pula dengan inverter dan mengisi muatan serta menyimpan energi pada saat periode konduksi. Pada saat inverter tidak berkonduksi, energi dilepaskan oleh kapasitor ke beban. Melalui penyimpanan energi dan penyalurannya, durasi waktu mengalirnya arus melalui impedansi beban mengalami peningkatan dan riak menjadi menurun dalam jumlah yang besar. Maka komponen riak dengan frekuensi megahertz, kapasitor akan memberikan impedansi yang rendah [26]. Terdapat banyak jenis teknologi kapasitor pada praktisnya. Adapun pembagian induktor yang nilainya konstan (*fixed*) tersedia berdasarkan polaritasnya, yaitu kapasitor non-polar dan kapasitor polar. Dimana terdapat pembagian lebih lanjut lagi dari setiap kapasitor tersebut. Setiap jenis kapasitor memiliki keuntungan dan *trade-off*-nya yang perlu dikonsiderasikan ketika melakukan perancangan untuk spesifikasi yang diinginkan [27]. Untuk aplikasi daya rendah dan frekuensi tinggi, kapasitor non-polar yang baik digunakan adalah dengan material *ceramic disc* dan MLCCs, serta *film/foil* dan *metallized film*. Sedangkan kapasitor polar yang baik digunakan adalah *aluminium* (ELCO), dan tantalum. Dari kelima jenis kapasitor tersebut, masing-masing menyediakan kelebihanannya. Deskripsi lebih detail terkait perbandingan jenis-jenis kapasitor sesuai dengan aplikasinya disajikan pada **Tabel 2.1**.

2.3.3 Kombinasi Induktor dan Kapasitor

Kapasitor *shunt* dapat menurunkan tegangan riak, namun menyebabkan arus dioda menjadi meningkat. Arus besar ini dapat menyebabkan kerusakan pada dioda dan akan selanjutnya menyebabkan permasalahan panas berlebih dan menurunkan

efisiensi dari arus dan tegangan keluaran. Sehingga selanjutnya induktor dan kapasitor dikombinasikan dan filter LC dirancang. Filter LC memiliki efisiensi yang lebih baik dengan membatasi arus dioda dan menghilangkan cukup faktor riak. Tegangan distabilkan oleh kapasitor yang di-*shunt* dan arus dihaluskan oleh induktor yang dihubung-serikan sehingga dapat menjadi kombinasi yang baik untuk rangkaian filter yang sederhana [26].

Tabel 2.1 Perbandingan Jenis Kapasitor

Kapasitor (Jenis) Variabel	Aluminium Electrolytic (ELCO)	Tantalum	Ceramic Disc dan MLCCs	Film/Foil dan Metallized Film
Nilai ESR (Equivalent Series Resistance)	Tinggi	Sangat Tinggi	Lebih Rendah; ESR MLCCs lebih baik	Lebih tinggi dari ceramic
Kepadatan CV	Tinggi	Sangat Tinggi	Lebih Rendah	-
Harga Komponen	Murah	Lebih mahal daripada ELCO	-	Ringan, Ukuran Kecil, Murah
Karakteristik Frekuensi	Performanya akan berkurang pada aplikasi frekuensi tinggi	Frekuensi tinggi, nilai kapasitansi secara signifikan hilang	-	Lebih stabil dalam kondisi frekuensi tinggi
Karakteristik Tegangan	ELCO akan meledak pada kondisi <i>over-voltage</i>	Kurang efektif dalam aplikasi tegangan tinggi	Performa lebih stabil pada sistem dengan rating tegangan dan temperatur tinggi	Pada aplikasi AC, <i>over-voltage</i> menyebabkan kapasitor ini gagal
Karakteristik Lain	-	Arus bocor yang tinggi dan mungkin mengandung bahan beracun	Kegagalan pada komponen terjadi saat ada tekanan mekanis	-

2.4 Transformasi Fourier

Suatu sinyal $x(t)$ dikatakan periodik jika terdapat sebuah properti T pada seluruh variabel t seperti yang ditunjukkan pada **Pers. 2.4.1**. Di mana T dikenal sebagai periode dari suatu sinyal. Nilai T terkecil pada **Pers. 2.4.1** merupakan periode fundamental. Sinyal sinusoidal yang berarti sinyal sinus, memiliki fungsi waktu seperti yang ditunjukkan pada **Pers. 2.4.2**. Untuk A berupa amplitudo, f berupa frekuensi, dan ϕ berupa fasa [28].

$$x(t) = x(t + T) \quad (2.4.1)$$

$$x(t) = A \sin(2\pi ft + \phi) \quad (2.4.2)$$

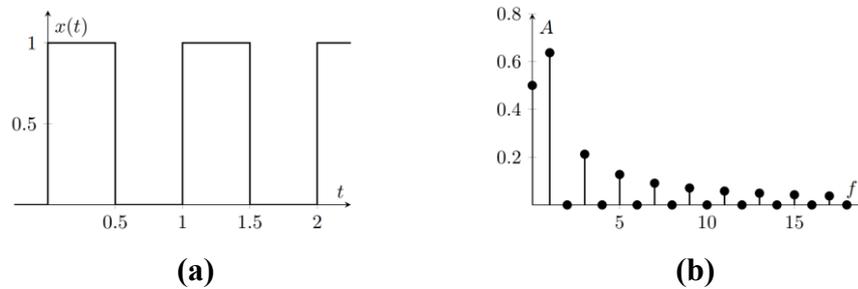
Metode transformasi digunakan untuk menyatukan pendekatan matematika dalam penelitian yang dilakukan dalam jaringan elektronika. Dengan transformasi Fourier, suatu sinyal periodik dinyatakan sebagai penjumlahan dari sinusoidal (atau yang disebut dengan total persamaan harmonisanya). Ketika $x(t)$ merupakan sinyal periodik dengan periode T , maka dapat dituliskan dalam bentuk **Pers. 2.4.3**. Ketika $f = 1/T$, dan untuk beberapa A_0, A_1, A_2, \dots (yang disebut dengan magnitudo), dan ϕ_1, ϕ_2, \dots (yang disebut dengan fasa). **Pers 2.4.3** disebut sebagai penjumlahan dari seri Fourier dari fungsi $x(t)$ [28], dan **Pers 2.4.4** menunjukkan penjabaran seri Fourier pada sistem dengan frekuensi 50 Hz dan mengabaikan perubahan fasa.

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(2\pi nft + \phi_n) \quad (2.4.3)$$

$$x(t) = A_0 + A_1 \sin(100\pi t) + A_2 \sin(200\pi t) + \dots + A_n \sin(2\pi nft) \quad (2.4.4)$$

Diketahui bahwa respon dari suatu sistem pada harmonisa masukan itu sendiri merupakan harmonisa, pada frekuensi yang sama, pada dua kondisi: yaitu linieritas dan waktu yang berbeda-beda pada suatu karakteristik sistem. Kondisi seperti itu, tentunya sering ditemui. Oleh karena itu analisis Fourier dianggap penting, untuk menentukan penjelasan bagaimana variasi harmonisa terjadi di mana-mana. Transformasi Fourier digunakan untuk menerjemahkan suatu fungsi domain waktu menjadi fungsi domain frekuensi [29]. Ketika sinyal periodik direpresentasikan menjadi sebuah deret Fourier menggunakan magnitudo dan fasa, maka selanjutnya

disebut dengan sinyal domain frekuensi. Deret Fourier digambarkan dalam grafik stem, dengan frekuensi sebagai sumbu x, dengan hal tersebut direpresentasikan sebagai fungsi frekuensi. Ditunjukkan pada **Gambar 2.6 (a)** merupakan representasi domain waktu yang ekuivalen terhadap **Gambar 2.6 (b)** merupakan representasi domain frekuensi setelah melalui transformasi Fourier [28].



Gambar 2.6 Grafik Representasi Domain (a) Waktu dan (b) Frekuensi [28]

2.5 Distorsi Harmonik

Harmonisa adalah pembentukan gelombang-gelombang yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya. Gelombang tegangan maupun arus yang awalnya berupa sinusoidal murni terdistorsi dan menjadi sinusoidal tidak murni lagi. **Gambar 2.7**. Distorsi gelombang akibat harmonisa. Harmonisa tegangan dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan *core-loss* (rugi besi). Sedangkan harmonisa arus dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan rugi-rugi tembaga. Secara keseluruhan rugi-rugi yang timbul akibat harmonisa merujuk pada terjadinya pemanasan berlebih (*overheating*) pada transformator [30]. Distorsi harmonik total, atau THD, adalah penjumlahan dari semua komponen harmonik dari bentuk gelombang tegangan atau arus dibandingkan dengan komponen dasar gelombang tegangan atau arus seperti yang ditunjukkan pada **Pers. 2.5.1**.

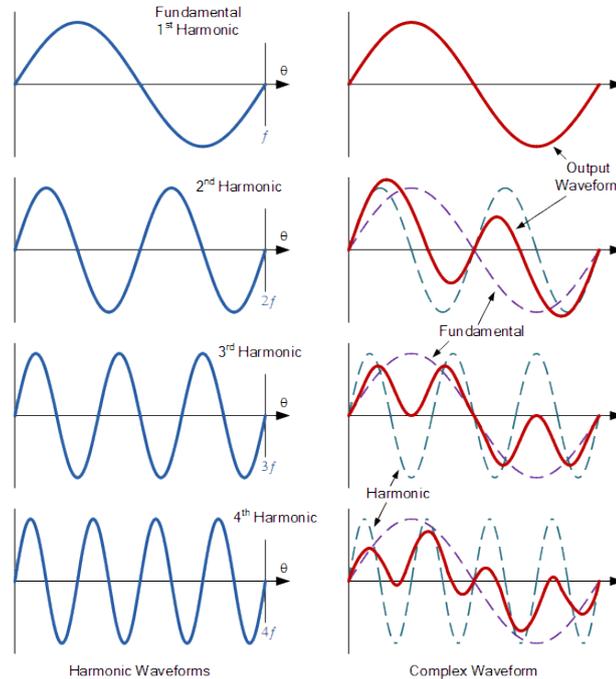
$$THD_A = \frac{\sqrt{(A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2)}}{A_0} \times 100\% \quad (2.5.1)$$

Keterangan:

$A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ = Harmonisa amplitudo tegangan atau arus (V atau I)

A_0 = Komponen dasar amplitudo tegangan atau arus (V atau I)

Hasil akhir dari **Pers. 2.5.1** adalah persentase yang membandingkan komponen harmonik dengan komponen dasar sinyal. Semakin tinggi persentasenya, semakin banyak distorsi yang muncul pada sinyal listrik.



Gambar 2.7 Distorsi Gelombang Akibat Harmonisa [31]

Berdasarkan standar oleh IEEE 519: 2014 [12], distorsi harmonik tegangan dan arus pada suatu sistem memiliki batasannya, yang bergantung pada setiap standar yang dipakai setiap negara. **Tabel 2.1** menunjukkan batas distorsi tegangan yang lebih detail sesuai dengan standar IEEE 519: 2014 [12]. Dalam hal ini batasan harmonik tegangan yang berlaku adalah nilai THD di bawah 5% dan batas harmonik individu yang bernilai 3% dikarenakan sistem tenaga beban yang digunakan di bawah 69kV yaitu berkisar 220-230VAC.

Tabel 2.2 Batas Distorsi Tegangan Berdasarkan IEEE-519 [12]

Tegangan Sistem	Distorsi Harmonik Individu (IHD) (%)	Distorsi Harmonik Total (THD) (%)
< 69 kV	3,0	5,0
69,001 kV sampai 161 kV	1,5	2,5
> 161,00 kV	1,0	1,5

Tabel 2.3 Batas Distorsi Arus untuk Sistem dengan
Tegangan 120 V hingga 69 kV Berdasarkan IEEE-519 [12]

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) in percent (%)						
I_{SC} / I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonics.						
Current distortions that result in a DC offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.						
*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{SC} / I_L where:						

I_{SC} = maximum short-circuit current at PCC (Point Common Coupling)

I_g = maximum demand load current (fundamental frequency component) at the PCC under normal load operating conditions

2.6 Parameter Daya

Meskipun beban elektronika rumah tergolong membutuhkan daya yang rendah (berkisar 800-1300 Watt), parameter daya tetap merupakan parameter yang sangat krusial dalam aplikasi skala rumah. Terdapat dua parameter daya yang diperhatikan dalam aplikasi pada skala rumah yaitu, efisiensi daya dan disipasi daya. Kedua parameter tersebut perlu dianalisis sebagai penentu kestabilan sistem.

2.6.1 Efisiensi Daya

Efisiensi daya merupakan salah satu kriteria keberhasilan suatu filter. Dengan mempertimbangkan nilai daya keluaran dan masukan. Dalam penelitian ini, efisiensi dianggap parameter yang penting untuk implementasi sistem listrik energi terbarukan skala rumah tangga. Dalam hal ini, daya keluaran dari filter akan menjadi daya yang disalurkan kepada beban elektronika rumah. Maka akan menjadi

sangat merugikan apabila pada sistem filter, daya terdissipasi atau terbuang sehingga tersalurkan secara tidak efisien. Adapun persamaan dari efisiensi daya yang dimaksudkan ditunjukkan pada **Pers. 2.6.1** dimana daya keluaran sistem didapatkan dengan menganalisis rangkaian seperti yang ditunjukkan pada **Pers. 2.6.2** dan **2.6.3**.

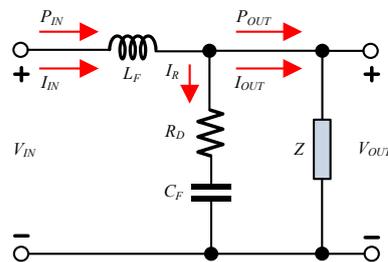
$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \times 100\% \quad (2.6.1)$$

Keterangan:

η = Efisiensi daya (%)

P_{OUT} = Daya keluaran sistem (Watt)

P_{IN} = Daya masukan sistem (Watt)



Gambar 2.8 Skematik Analisis Parameter Daya

$$P_{OUT} = I_{OUT}^2 \times Z \quad (2.6.2)$$

$$P_{OUT} = V_{OUT}^2 / Z \quad (2.6.3)$$

Keterangan:

I_{OUT} = Arus yang mengalir pada beban (A)

V_{OUT} = Tegangan pada beban (V)

Z = Impedansi beban (Ω)

2.6.2 Disipasi Daya

Disipasi daya merupakan parameter daya yang juga sangat signifikan dalam analisis rangkaian filter yang menggunakan damper berupa resistor. Pada rangkaian filter, resistor damper digunakan untuk meredam permasalahan resonansi. Namun untuk komponen pasif berupa resistor, ketika arus mengalir pada resistor, panas diproduksi dari gesekan antara elektron bebas yang bergerak dan atom yang menghambat jalannya. Panas yang dihasilkan tersebut merupakan bukti dari daya

yang digunakan menghasilkan arus. Disipasi daya pada resistor damper dapat dianalisis secara matematis dengan menggunakan **Pers 2.6.4**.

$$P_{disp} = I_R^2 \times R_D \quad (2.6.4)$$

Keterangan:

P_{disp} = Disipasi daya pada resistor damper (Watt)

I_R = Arus yang mengalir pada damper (A)

R_D = Resistansi damper (Ω)

2.7 Sistem Orde Dua

Suatu sistem memiliki karakteristik yang penting diketahui untuk memahami performansi sistem baik dalam domain waktu maupun domain frekuensi. Karakteristik tersebut kemudian dianalisis dalam pernyataan matematis yang menyatakan hubungan antara masukan terhadap keluaran atau dikatakan dalam bentuk persamaan fungsi alih. Persamaan fungsi alih dan sistem *linear time-invariant* (LTI) dengan plot *pole-zero* dapat ditemukan dengan menggantikan seluruh komponen elektronika dengan nilai impedansinya yang diekspresikan dalam domain Laplace dan menyelesaikan rangkaian resultannya [32].

Penelitian ini digunakan rangkaian elektronik dengan komponen pasif sebagai rangkaian filter, damper, dan beban. Rangkaian RLC merupakan sistem orde dua yang memiliki karakteristik persamaan yang memiliki akar-akar konjugat kompleks. Sistem orde dua merupakan sistem dengan orde terkecil yang memiliki kemampuan untuk merespon masukan step dengan berosilasi. Sistem orde dua dengan potensi untuk berosilasi membutuhkan dua tipe penyimpanan energi yang berbeda, seperti induktor dan kapasitor [33] sesuai dengan topologi filter LC yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.

Sistem orde dua mempunyai fungsi alih dengan pangkat 's' tertinggi bernilai dua. Perilaku dinamika sistem orde dua dapat digambarkan dalam dua suku parameter yaitu rasio redaman (ζ) dan frekuensi natural tidak teredam (ω_n). Rasio redaman mendeskripsikan seberapa berosilasi (atau tidak) respon sistem dan seberapa berpuncak (atau tidak) respon frekuensi sistem. Frekuensi alamiah adalah

frekuensi osilasi jika tidak terjadi peredaman dan merupakan indikasi dari kecepatan relatif dari respon sebuah sistem [32]. Terdapat tiga kondisi peredaman bergantung dari nilai rasio redaman sistem yang dijabarkan sebagai berikut,

- 1) Kondisi teredam atau *underdamped* ($0 < \zeta < 1$);
- 2) Kondisi teredam kritis atau *critically damped* ($\zeta = 1$); dan
- 3) Kondisi atas redaman atau *overdamped* ($\zeta > 1$).

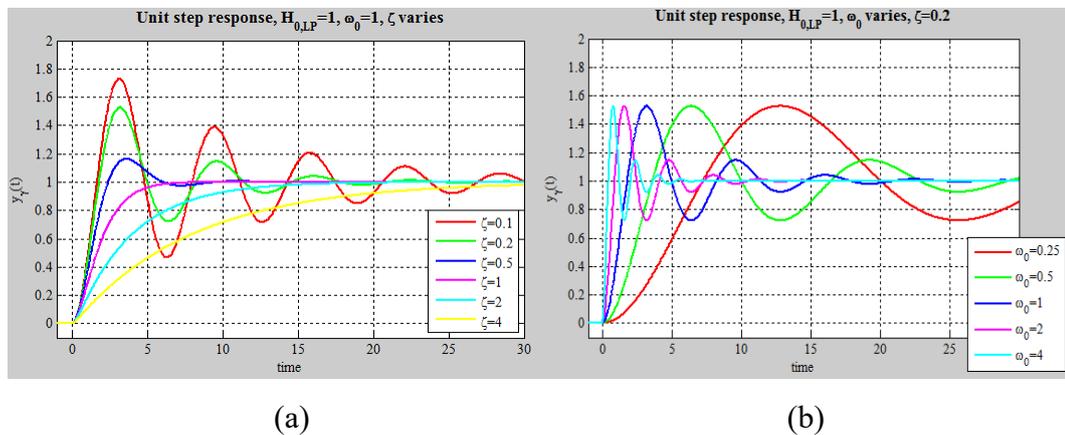
Rangkaian RLC mengalami peredaman dikarenakan keberadaan dari resistor. Resistansi R_D diberikan nilai yang cukup kecil, maka sistem ini disebut dengan sistem *underdamped*. Persamaan fungsi alih dari sistem orde dua ini diekspresikan sebagai fungsi frekuensi alamiah dan rasio peredaman ditunjukkan oleh **Pers. 2.7.1**.

$$H(s) = \frac{V_{OUT}(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{b_1s+b_0}{s^2+a_1s+a_0} = \frac{b_1s+\omega_n^2}{s^2+(2\zeta\omega_n)s+\omega_n^2} \quad (2.7.1)$$

$$\frac{V_{OUT}(s)}{V_{IN}(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2+(2\zeta\omega_n)s+\omega_n^2} \quad (2.7.2)$$

Keterangan:

- V_{OUT} = Tegangan keluaran sistem (V)
 V_{IN} = Tegangan masukan sistem (V)
 ω_n = Frekuensi alamiah tak teredam (Hz)
 ζ = Rasio redaman



Gambar 2.9 Kurva Tanggapan Waktu Akibat Perubahan:
 (a) Rasio Peredaman; (b) Frekuensi Alamiah [34]

Adapun perubahan frekuensi alamiah dan rasio peredaman akan berimpak bagi respon dari sistem, dampak tersebut dapat dilihat pada **Gambar 2.10**. Dari kurva tersebut diidentifikasi bahwa penurunan rasio redaman akan menurunkan peredaman yang terjadi pada sistem dan sistem akan semakin berosilasi. Sedangkan pada frekuensi alamiah diidentifikasi bahwa peningkatannya akan meningkatkan frekuensi osilasi dari sebuah sistem [32].

2.8 Iterasi Jacobi

Metode iterasi Jacobi merupakan salah satu metode analisis numerik untuk menyelesaikan persamaan linear yang berukuran besar dan proporsi koefisien nolnya juga besar. Metode ini ditemukan oleh matematikawan Jerman, Carl Gustav Jakob Jacobi pada tahun 1800an. Iterasi dapat diartikan sebagai suatu proses atau metode yang menggunakan pengulangan dalam menyelesaikan suatu permasalahan matematis [35]. Metode iterasi menghasilkan urutan yang konvergen ke solusi dan iterasinya akan dilanjutkan hingga toleransi kesalahan diinginkan terpenuhi. Metode iterasi Jacobi dapat digunakan dalam menyelesaikan persamaan sistem linear yang besar terutama dalam implementasi analisis rangkaian listrik [36]. Diketahui sistem persamaan linear dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Ax = b \quad (2.8.1)$$

$$\text{Dimana, } A = D + (L + U) \quad (2.8.2)$$

Keterangan:

D = Matriks diagonal

L = Matriks segitiga bawah

U = Matriks segitiga atas

Jika **Pers. 2.8.1** disubstitusi ke **Pers. 2.8.2** sehingga menjadi

$$Dx + (L + U)x = b$$

Kemudian,

$$x = D^{-1}[b - (L + U)x] \quad (2.8.3)$$

Jika **Pers. 2.8.3** dijabarkan dalam aturan iteratif, maka metode Jacobi dapat diuraikan sebagai berikut,

$$x^{(k+1)} = D^{-1}[b - (L + U)x^k] \quad (2.8.4)$$

Dimana k merupakan jumlah iterasi yang dilakukan. Jika x^k menyatakan nilai ke- k dari penyelesaian sistem persamaan linear, maka x^0 menyatakan nilai penyelesaian awal. Pada penelitian ini, persamaan linear yang ditunjukkan oleh **Pers. 2.8.1** menjadi sistem kuadrat dari nilai n sehingga dijabarkan sebagai berikut.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (2.8.5)$$

Kemudian, **Pers. 2.8.2** diuraikan menjadi komponen sistem kuadrat pula menjadi

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad L + U = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8.6)$$

Selanjutnya penyelesaian dari persamaan linear pada **Pers. 2.8.5** dan **Pers. 2.8.6** dengan metode Jacobi dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$x_i^{(k)} = \frac{1}{a_{ii}} [b_i - (\sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} x_j^{(k-1)})] \quad (2.8.7)$$

Dimana, $i = 1, 2, \dots, n$; dan $k = 1, 2, 3, \dots, n$. Pada **Pers. 2.8.7**, variabel x merupakan vektor yang didapatkan selama iterasi. Untuk dapat membedakan banyaknya iterasi dan komponen dari vektor, digunakan notasi $x_i^{(k)}$, dimana k menunjukkan nomor iterasi dan i mengindikasikan pada komponen ke- i dari $x_i^{(k)}$ [36].

2.9 Penelitian Terkait

Bagian ini merupakan studi literatur untuk mengidentifikasi kebaruan dari penelitian dan pengembangan filter konvensional. Diharapkan peneliti dapat membuat suatu penelitian yang dapat memunculkan unsur kebaruan atau inovasi jika dibandingkan dengan penelitian lain. Penelitian terkait filter konvensional (topologi LC, LCL, dan LLCL) dan pengembangannya banyak bermunculan terkhusus terkait filter LCL yang memiliki kemungkinan pengembangan yang lebih besar di masa depan. Penelitian terkait filter LC di sisi lain juga menunjukkan perkembangan namun tidak sepesat topologi filter LC. Rancangan filter LC sistem tiga-fasa telah menjadi bagian paten industri. Filter LC untuk sistem satu-fasa, di

lain sisi, kurang mengalami pengembangan. Selanjutnya, dari sejumlah penelitian yang telah dibaca dan dipahami, **Tabel 2.3** menguraikan rangkuman hasil penelitian mengenai filter daya pasif dengan topologi LC dan LCL. Tabel tersebut menjabarkan lima penelitian berkaitan dengan topologi filter LC dan dua penelitian berkaitan dengan topologi filter LCL. Tujuh penelitian tersebut diuraikan dalam **Tabel 2.3** kemudian diurutkan berdasarkan tahun publikasi penelitian. Pada tabel tersebut dijabarkan nilai THD atau TDD dari hasil penelitian baik melalui simulasi dengan perangkat lunak maupun eksperimen dengan perangkat keras.

Sisi kebaruan penelitian ini didapatkan melalui metode analisis penentuan konfigurasi komponen dari filter LC daya pasif yang ditawarkan. Penelitian [37] dan [38] melakukan analisis filter LC dengan pemodelan matematis dengan model ruang keadaan. Penelitian [39], [40], [41], [42], [43], dan [44] melakukan analisis dengan pemodelan matematis dengan persamaan fungsi alih. Untuk selanjutnya divisualisasikan dalam diagram Bode dan atau transien sehingga dapat dilakukan analisis terhadap respon frekuensi dan atau waktu yang terjadi akibat filter yang ditawarkan atau diteliti. Dengan metode yang serupa, penelitian ini juga melakukan pemodelan matematis dengan persamaan fungsi alih seperti yang ditunjukkan pada **Bab 3**, untuk selanjutnya diselesaikan dengan metode iterasi Jacobi yang tidak digunakan oleh enam penelitian tersebut sebagai metode untuk menentukan konfigurasi komponen filter LC pasif dengan damper. Sedangkan pada [45] ditunjukkan paten topologi LC tanpa damper pada sistem inverter tiga fasa.

Analisis filter LC pada [41] disebutkan bahwa presensi rangkaian damping sangat disarankan dalam implementasi terutama pada saat beroperasi dengan mode *off-grid* yang memiliki tendensi ketidakstabilan yang cukup tinggi akibat kondisi riil yang tidak dapat diprediksi dan variatif, baik kondisi linear, tidak linear, penyaklaran, dsb. Dengan alasan tersebut, maka akan lebih aman bagi sistem jika pada keluaran filter tidak terjadi poin resonansi pada kondisi tanpa beban, atau paling tidak, resonansi dapat diredam dengan baik. Di mana untuk meredam permasalahan resonansi, digunakan komponen pasif damping. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis dan implementasi terhadap resistor yang dihubung-seri dengan kapasitor *shunt* sebagai damper (peredam resonansi) bagi sistem.

Tabel 2.4 Penelitian Terkait

No Ref	Thn	Metode	Jenis Filter	THD/ TDD
[37]	1999	Filter LC pada boost konverter DC-AC dengan konverter Cuk dan menggunakan teori kontrol mode sliding	LC tanpa damper	Nilai THD eksperimen saat: - tanpa beban = 0,8% - beban resistif = 1,24% - beban induktif = 0,8%
[39]	2010	Filter LC pada sistem inverter satu-fasa dengan kendali <i>loop</i> dan menggunakan teori kontrol mode sliding	LC tanpa damper	Nilai THD simulasi saat: - beban penuh linear = 0,4% - beban penuh nonlinear = 1,1%
[45]	2011	Paten pada sistem inverter tiga fasa Nilai THD untuk nilai tegangan line dengan frekuensi sistem 50 Hz	LC tanpa damper	THD saat: - $m_a 0,95 = 1,04\%$ - $m_a 0,85 = 1,01\%$
[40]	2014	Damping pasif dengan enam skenario damping Nilai TDD: hasil simulasi/ hasil eksperimen	LCL + R _D damping	0,8% / 2,8%
			LCL + R _D C _D damping	0,9% / 3,2%
			LCL + trap	0,9% / 2,7%
			LCL + 2 trap	0,9% / 2,65%
			LCL + 2 nd order damper	1,1% / 3,4%
			Selective resonant	1,2% / 3,1%

Tabel 2.5 (Lanjutan) Penelitian Terkait

No Ref	Thn	Metode	Jenis Filter	THD/ TDD
[41]	2015	<p>Topologi filter LC yang ditawarkan untuk keluaran pada inverter tiga fasa pada skenario <i>on-grid</i> dan <i>off-grid</i></p> <p>Nilai THD tidak ditunjukkan</p>	$LC + DMP_{LC} + TF_{F1} + DMP_{F1} + \dots + TF_{FN} + DMP_{FN}$	<p>Hasil eksperimen yang ditunjukkan disipasi daya dalam keadaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - tanpa beban = 0,14% - dengan beban penuh = 0,42%
[42]	2016	<p>Tinjauan penelitian/ makalah dengan metode damping pasif dan aktif</p> <p>Nilai THD: ditunjukkan dalam bentuk kualitatif (unggul/ baik/ rata-rata/ rendah)</p>	LCL tanpa damper	Unggul
			LCL + damping seri R_D	Baik
			LCL + damping seri $(R_D L_D)$	Baik
			LCL + damping seri $(R_D L_D C_D)$	Rata-rata
			LCL + damping paralel $(R_D + C_D)$	Rata-rata
			LCL + damping paralel $(C_D + R_D L_D)$	Rata-rata
			LCL + damping seri $((C_D + L_D) R_D)$	Rendah
[43]	2017	<p>Filter LCL untuk sistem VSC-HVDC dengan <i>Multi-Pair Calculation</i> dan <i>Selection Algorithm</i></p>	LCL + damping seri R_D	2,6 %

Tabel 2.6 (Lanjutan) Penelitian Terkait

No Ref	Thn	Metode	Jenis Filter	THD/ TDD
[44]	2018	Tinjauan inverter dengan kendali PI dan filter LCL dengan empat strategi kendali Nilai THD pada jala-jala yang diinjeksikan arus untuk empat strategi kontrol dalam kasus kondisi tegangan: jaringan sinusoidal/ jaringan non-sinusoidal	LCL dengan kendali langsung dengan arus balik induktor pada sisi grid	4,8% / 8,1%
			LCL dengan kendali langsung dengan arus balik induktor pada sisi inverter	3,3% / 5,9%
			LCL dengan kendali kaskade dengan arus balik induktor pada sisi inverter sebagai <i>inner loop</i>	1,6% / 3,45%
			LCL dengan kendali kaskade dengan arus balik kapasitor sebagai <i>inner loop</i>	2,1% / 4,65%
[38]	2018	Kendali digital tegangan loop tunggal pada VSI tiga fasa dengan kendali resonan	LC dengan damper	Nilai THD eksperimen saat: - beban RL = 0,845% - beban tidak seimbang = 1,16% - beban rectifier = 5,77% (<i>non-compensated</i>), 1,60% (<i>compensated</i>)