

TESIS

**DC-AC TIGA FASA INVERTER DENGAN FILTER DISIPASI
DAYA RENDAH UNTUK SISTEM TENAGA LISTRIK SKALA
MIKRO-GRID BERBASIS FOTOVOLTAIK**

Disusun dan diajukan oleh

VINSENSIUS LETSOIN
P2700216407



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2018



TESIS

**DC-AC TIGA FASA INVERTER DENGAN FILTER DISIPASI
DAYA RENDAH UNTUK SISTEM TENAGA LISTRIK SKALA
MIKRO-GRID BERBASIS FOTOVOLTAIK**

***THREE-PHASE DC-AC INVERTER WITH LOW POWER
DISSIPATION FILTER FOR PHOTOVOLTAIC-BASED
MICRO-GRID SCALE ELECTRIC POWER SYSTEM***

sebagai persyaratan untuk memperoleh Magister Teknik

Disusun dan diajukan oleh

**VINSENSIUS LETSOIN
P2700216407**



kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2018



TESIS

**DC-AC TIGA FASA INVERTER DENGAN FILTER DISIPASI
DAYA RENDAH UNTUK SISTEM TENAGA LISTRIK SKALA
MIKRO-GRID BERBASIS FOTOVOLTAIK**

Disusun dan diajukan oleh

**VINSENSIUS LETSOIN
P2700216407**telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis
pada tanggal 27 Desember 2018
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Komisi Penasehat,

Ketua



Dr.-Ing. Faizal Arya Samman, ST., MT.

Sekretaris



Dr. Hj. A. Ejah Umraeni Salam, ST., M.T.



Prof. Dr.

M.Eng.

Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan, karena berkat dan anugerahnya sehingga dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar. Dalam penyusunan ini penulis merasa masih sangat jauh dan bahkan awam bagi orang yang baru mulai belajar menulis.

Penulis berharap bahwa *DC-AC Tiga Fasa Inverter dengan Filter Disipasi Daya Rendah Untuk Sistem Tenaga Listrik Skala Mikro-Grid Berbasis Fotovoltaik* ini dapat memberikan manfaat kepada para mahasiswa, dosen, peneliti dan praktisi industri, terutama agar mereka dapat termotivasi untuk belajar lebih keras dalam memajukan bangsa dalam hal penguasaan ilmu dan teknologi PV mikro-grid masa depan. Tentu saja Tesis ini masih sangat jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik, saran perbaikan dan komentar dari pembaca akan kami terima dengan tangan terbuka.

Masih banyak kurangnya dan terbatasnya pengetahuan akan menulis. Akan tetapi karena dorongan dari Istri (Rufina), ketiga anakku” dan ”saudara-saudaraku serta punya semangat yang tinggi akhirnya tesis ini dapat diselesaikan hingga dapat menyandang gelar Magister Teknik.

Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang membantu dalam proses penyelesaian Tesis Magister ini yaitu.

1. Ibu Prof. Dr. Dwi Aries Tina Pulubuhu, MA. selaku Rektor Universitas Hasanuddin beserta staf dan jajarannya.

...k Dr. Philipus Betaubun, ST.,M.T selaku Rektor Universitas Musas Merauke sebagai atasan kerja.



3. Bapak Prof. Dr. Syamsul Bachri, MS., selaku Direktur Pasca Sarjana Universitas Hasanuddin beserta jajarannya.
4. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT. selaku Dekan dan Wakil Dekan I, II, III Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin beserta jajarannya.
5. Prof. Dr. Eng. Syafaruddin, ST., M.Eng selaku Program Studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin beserta jajarannya.
6. Dr. Ing. Faisal Arya Samman, ST., MT. selaku pembimbing I atau ketua penasehat telah mengarahkan penulis dengan baik sehingga tesis ini dapat terselesaikan.
7. Dr. Hj. A. Ejah umraeni salam, S.T., M.T selaku pembimbing II yang telah mengarahkan penulis dengan baik sehingga proposal tesis ini dapat terselesaikan.
8. Teman-teman Pasca Sarjana Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya bagian Teknik Komputer, Kendali dan Elektronika angkatan 2016.
9. Semua pihak baik secara langsung maupun tidak langsung telah banyak membantu hingga terselesaikannya tesis.

Akhir kata **"Kegagalan Bukan Sebagai Akhir Namun Awal Dari Keberhasilan"**

Gowa, 27 Desember 2018

Penulis,



ius Letsoin

ABSTRAK

Vinsensius Letsoin. DC-AC Tiga Fasa Inverter dengan Filter Disipasi Daya Rendah Untuk Sistem Tenaga Listrik Skala Mikro-Grid Berbasis Fotovoltaik (dibimbing oleh **Faizal Arya Samman** dan **A. Ejah Umraeni Salam**)

Penelitian ini menyajikan tiga fase DC-AC inverter dengan menggunakan filter disipasi daya rendah untuk sistem tenaga listrik skala mikro-grid berbasis fotovoltaik. Filter LCL dan LLCL tradisional dapat mengurangi gangguan harmonik, tetapi mereka menciptakan masalah baru dalam hal resonansi yang cukup besar dalam frekuensi fundamental mereka. Mereka juga menghasilkan output yang rendah. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan konfigurasi filter baru yang dapat meningkatkan output daya tetapi tidak meningkatkan THD. Penelitian ini menyajikan studi perbandingan dan menunjukkan juga beberapa filter pasif, termasuk filter LCL dan LLCL. Hasil simulasi menunjukkan filter damper H-bridge memberikan THD tegangan output sekitar 0,39% dan THD arus keluaran sekitar 1,98%. Tegangan output rata-rata dari filter adalah sekitar 220V-380V, yang hampir mirip dengan input domain tegangannya. Dengan domain tegangan input tersebut, filter yang diusulkan dapat menghasilkan output daya sekitar 6.8-7.1kW dengan efisiensi daya yang sangat mengesankan sekitar 95%.

Kata Kunci: Power Electronics, 3-Phase Inverter, Passive Filter, Passive Damping Method



ABSTRACT

Vinsensius Letsoin. Three-Phase DC-AC Inverter with Low Power Dissipation Filter For Photovoltaic-Based Micro-Grid Scale Electric Power System (guided by **Faizal Arya Samman** and **A. Ejah Umraeni Salam**)

This research aimed to investigate the three-phase DC-AC inverter with low power dissipation filter for a photovoltaic-based micro-grid power system. The traditional LCL and LLCL filters can reduce harmonic distortions, but they create new problems in terms of a considerable resonance in their fundamental frequency. They also results in lower power output. Therefore, this study proposes a new filter configuration that can improve power output but do not increase the THD. This study presents a comparative study and shows also several filter topologies of passive filters, including the LCL, LLCL filters and Our proposod H-bridge damper filter. The simulation results show that the proposed H-bridge damper filter gives THD of about 0.39% for the output voltage and about 1.98% for output current. The average output voltage amplitude of the filter is about 220V-380V, which is almost similar to its input voltage domain. With those input voltage domain, the proposed filter can deliver about 17-19kW output power with very impressive power efficiency of about 95%.

Keywords: Power Electronics, 3-Phase Inverter, Passive Filter, Passive Damping Method.



DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Deskripsi Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Sistem Micro-grid Berbasis Fotovoltaik Terhubung Jaringan	7
2.2 Daya Tiga Fasa	9
2.3 Konsep Dasar Inverter 3 Fasa	10
2.4 Metode Switching	12
2.4.1 Pulse width modulation(PWM)	12
2.4.2 Signal pulse width modulation (SPWM)	14
2.5 Filter Pasif	15
2.6 Perancangan Filter LCL	17
2.7 Konsep Kualitas Daya Listrik	19
2.8 Harmonisa	20
2.8.1 Konsep daya	22
2.9 State Space	24
2.10 Beban	26
2.11 Penelitian Yang Relevan	27
3 METODE PENELITIAN	29
3.1 Jenis Penelitian	29
3.2 Kerangka Pikir	30
3.2.1 Tahapan penelitian	30
3.3 Diagram Usulan	32
3.4 Waktu dan Tempat Penelitian	33
3.4.1 Waktu	33
3.5 Tempat Penelitian	33
3.6 Instrumentasi dan Materi Penelitian	34
Posisi Penelitian	34
4 RANCANGAN DAN MODEL SIMULASI	35
Model Rancangan	35
4.1.1 Model I	36



4.1.2	Model II	38
4.1.3	Model III	39
4.2	Model Simulasi	40
4.2.1	Simulasi dengan sumber tegangan jala-jala/langsung	40
4.2.2	Simulasi dengan inverter sebagai sumber tegangan	43
5	HASIL DAN PERBANDINGAN	46
5.1	Hasil Rancangan Pertama (LCL 2-leg)	46
5.2	Hasil Rancangan Kedua (LCL 3-leg)	49
5.2.1	Hasil simulasi	49
5.3	Hasil Rancangan Ketiga (LCL H-bridge)	52
5.3.1	Hasil simulasi	52
5.4	Hasil Perbandingan Simulasi	54
5.4.1	Karakteristik respon frekuensi	54
5.4.2	Total distorsi harmonik	56
5.4.3	Amplitudo tegangan keluaran domain waktu	56
5.4.4	Daya keluaran	58
5.4.5	Efisiensi daya	60
5.5	Statistik Komparatif	62
5.6	Analisis Model Ruang Keadaan	63
6	PENUTUP	72
6.1	Kesimpulan	72
6.2	Saran	73
	DAFTAR PUSTAKA	74



DAFTAR GAMBAR

1	Sistem Tenaga tiga fasa DC/AC	8
2	Model inverter tipe VSI 3 fasa	11
3	Modified Sine Wave	13
4	Sinyal referensi sinusoidal yang dihasilkan	14
5	Filter pasif tunggal	16
6	Kurva Respon Low Pass Filter	16
7	Beban listrik rumah tangga (a)R, (b)R+C, (c)R+L, dan (d)R+L+C	26
8	Kerangka pikir	31
9	Diagram keseluruhan sistem pembangkit tenaga mikro ber- basis tenaga surya	32
10	Diagram sistem penelitian	33
11	Diagram Pelaksanaan penelitian	34
12	Rangkaian filter LCL 2-leg's	36
13	Rangkaian filter LCL 3-leg's	39
14	Rangkaian filter LCL H-type bridge	40
15	Rangkaian terhubung inverter dengan tidak melibatkan beban	44
16	Rangkaian terhubung inverter dengan melibatkan beban . . .	45
17	Pengukuran karakteristik Respon Frekuensi dari Filter	55
18	Pengukuran amplitude tegangan keluaran kondisi teknik mo- dulasi PWM	58
19	Pengukuran amplitude tegangan keluaran kondisi teknik mo- dulasi SPWM	59
20	Pengukuran daya keluaran dengan teknik PWM	60
21	Pengukuran daya keluaran dengan teknik SPWM	61
22	Rangkaian Lup LCL H-bridge	65
23	Hasil tanggapan frekuensi Spice	71
24	Hasil tanggapan frekuensi Matematik	71



DAFTAR TABEL

1	Spesifikasi inverter	10
2	Konfigurasi Pensakelaran	11
3	Batas distorsi tegangan yang diakibatkan harmonisa menurut IEEE 519-1992	19
4	State of the art	28
5	Parameter simulation rangkaian	38
6	Pengukuran amplitude tegangan pada rancangan pertama	48
7	Hasil pengukuran daya pada rancangan pertama	48
8	Hasil pengukuran efisiensi daya pada rancangan pertama	49
9	Pengukuran amplitude tegangan pada rancangan kedua	50
10	Hasil pengukuran daya pada rancangan kedua	51
11	Hasil pengukuran efisiensi daya pada rancangan kedua	51
12	Pengukuran amplitude tegangan pada rancangan ketiga	53
13	Hasil pengukuran daya pada rancangan ketiga	53
14	Hasil pengukuran efisiensi daya pada rancangan ketiga	54
15	Data pengukuran THD dengan teknik modulasi PWM	56
16	Data pengukuran THD dengan teknik modulasi SPWM	57
17	Data efisiensi keadaan PWM	62
18	Data efisiensi keadaan SPWM	62
19	Amplitudo Tegangan keluaran Domain Waktu	63
20	Hasil pengukuran daya	64
21	Data pengukuran filter LCL 2-leg PWM	81
22	Data pengukuran filter LCL 2-leg SPWM	82
23	Data pengukuran filter LCL 3-leg	83
24	Data pengukuran filter LCL 3-leg SPWM	84
25	Data pengukuran filter LCL H-bridge	85
26	Data pengukuran filter LCL H-bridge SPWM	86



Daftar Singkatan dan Simbol

PWM	–	<i>Pulse Width Modulation</i>
SPWM	–	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
THD	–	<i>Total Harmonic Distortion</i>
DC	–	<i>Direct Current</i>
AC	–	<i>Alternating Current</i>
PV	–	<i>Photo Voltaic</i>
VSI	–	<i>Voltage Source Inverter</i>
PPF	–	<i>Passive power filter</i>
L_{in}	–	<i>Induktor sisi inverter</i>
L_{out}	–	<i>Induktor sisi load</i>
L_{f1}	–	<i>Induktor sisi rendaman</i>
C_{f1}	–	<i>Kapasitor sisi rendaman</i>
R_d	–	<i>Resistor damper</i>
I	–	<i>Arus</i>
P	–	<i>Daya aktif</i>
f	–	<i>Frekuensi</i>
P_{in}	–	<i>Daya masukan</i>
P_{out}	–	<i>Daya keluaran</i>
η	–	<i>Efisiensi daya</i>



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beberapa tahun terakhir, peningkatan populasi dan perkembangan teknologi menuntut lebih banyak pasokan tenaga listrik dalam jumlah besar. Semua sektor industri, transportasi, kantor, rumah tangga dan lainnya membutuhkan energi listrik yang lebih dapat diandalkan di masa depan. Sementara itu, ketersediaan pasokan energi fosil saat ini terbatas dan harga yang ditawarkan setiap tahun juga naik. Oleh karena itu, energi terbarukan dianggap sebagai sumber energi alternatif terbaik. Micro-grid berbasis fotovoltaik mengubah emisi radiasi matahari, sebagai salah satu sumber energi tak terbatas, menjadi energi listrik. Microgrid adalah jaringan listrik lokal dengan kemampuan kendali, yang berarti dapat memisahkan diri dari jaringan listrik tradisional dan bekerja secara mandiri atau terpisah. Di sinilah peran micro-grid secara umum, microgrid beroperasi ketika terhubung dengan jaringan listrik, tetapi dapat memisahkan diri dan bekerja secara mandiri menggunakan energi lokal, misalnya ketika badai, mati lampu, atau alasan-alasan lainnya. Sumber energi ini adalah salah satu energi terbarukan yang men-

di masa depan. Maka energi ini perlu ditelusuri dan dikembangkan, dapat memberikan manfaat dalam menghadapi kebutuhan khusus rumah tangga [20].



Inverter sebagai salah satu pusat energi listrik, menghasilkan daya yang sangat besar pada sistem mikro-grid. Arus-tegangan searah (DC) dikonversikan menjadi arus-tegangan bolak-balik sinus (AC) dipandu menggunakan teknik modulasi. Daya yang dihasilkan oleh inverter mengandung harmonisa, adanya harmonisa dalam saluran tenaga listrik akan memberi efek pada peralatan terpasang. Untuk mengurangi harmonisa Sejumlah penelitian telah memperkenalkan beberapa penemuan baru, untuk menangani permasalahan harmonisa.

Topologi PPF yang banyak digunakan dalam literatur, yaitu filter LCL Single-Tuned dan filter LLCL Single-Tuned [5] [6]. Hal ini disebabkan harganya yang relatif murah dan konfigurasinya yang sederhana. Keuntungan dari kedua filter ini sama-sama unggul dalam hal mengurangi harmonik di bawah standar IEEE [4] sebesar 1,8% dan 3,4% tetapi permasalahan baru muncul, dalam hal resonansi terhadap respon frekuensi dasar dan penurunan efisiensi daya. Timbulnya efek resonansi disebabkan oleh ketidak mampuan dalam pencegahan frekuensi diatas cut-off, mengakibatkan frekuensi yang tidak diinginkan dapat lolos dan terjadi penumpukan disebut puncak resonansi. Dengan adanya puncak resonansi, daya listrik yang disalurkan mengalami terganggu yakni rugi-rugi daya sebesar 66% dan bahkan sampai dengan 82%. Rugi-rugi daya yang dihasilkan oleh kedua filter tersebut sangat merugikan.

sebab itu, tantangan terbesar peneliti menganalisis dan merancang sistem sederhana, dan berkualitas. Rancang sistem sederhana se-



perti filter pasif adalah tugas yang cukup rumit [4], bahkan jika rangkaiannya lebih sederhana. Meski kemampuan dari PPF juga mampu menjaga integrasi dan koneksi antara grid dan inverter tanpa trafo [2]. Perlu mempertimbangkan prosedur desain konverter daya yang akan digunakan dan perlu memperhatikan masalah THD, tanggapan frekuensi, Amplitude tegangan, daya keluaran, efisiensi daya, dan serta beban.

Perbedaan penelitian yang sudah dilakukan dengan yang akan dilakukan adalah penggunaan filter terbaru dengan melibatkan beban, serta menggunakan teknik PWM dan SPWM, sementara penelitian yang sudah dilakukan penggunaan filter LCL dan LLCL.

Dalam tesis ini penulis akan mencoba melakukan penelitian pada tiga fase DC-AC inverter dengan menggunakan filter disipasi daya rendah untuk sistem tenaga listrik skala mikro-grid berbasis fotovoltaik menggunakan aplikasi simulasi PSpice A/D Lite.

1.2 Deskripsi Masalah

Penambahan filter LCL dapat mengurangi gangguan harmonis sampai dibawah standar IEEE, namun menimbulkan permasalahan baru berupa naiknya nilai resonansi yang cukup besar pada frekuensi dasar dalam diagram tanggapan frekuensinya serta efisiensi daya ikut menurun. Dalam kriteria rancangan damping Filter DC/AC sistem pembangkit tenaga surya

dimana pada saat resonansinya berkurang nilai THD tidak melebihi 5% sebelum dan setelah beban, dan daya keluaran tidak menurun.



Oleh sebab itu perlu menemukan damper baru yang dapat menurunkan resonansi dan tidak menaikkan nilai THD, efisiensi daya naik.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang telah dijabarkan diatas yaitu: Menganalisa kinerja filter melibatkan beban, dengan menggunakan fungsi obyektif THD, Daya keluaran, efisiensi daya dan amplitudo tegangan.

1.4 Batasan Masalah

Mengingat banyaknya variable yang dapat digunakan, maka perlu dibuat batasan masalah yang akan diteliti, yaitu:

1. Menggunakan teknik PWM dan SPWM pada inverter untuk menghasilkan gelombang keluaran inverter berbentuk sinusoidal.
2. Beban yang digunakan adalah beban R, R+L, R+C, dan R+L+C.
3. Pengujian menggunakan program PSpice A/D lite, untuk simulasi inverter DC/AC 3 fasa.

1.5 Manfaat Penelitian

Energi listrik sebagai sumber terpenting dalam segala aktifitas manusia.

adanya penggunaan peralatan-peralatan elektronik yang dapat menghasilkan distorsi harmonisa yang besar pada sistem tenaga listrik. Untuk



sistem yang banyak melayani beban maka sangat sulit untuk mengurangi harmonisa dan mempertahankan daya kuluaran yang ada, yang dipengaruhi jenis beban. Oleh karena itu penelitian diharapkan dapat bermanfaat untuk:

1. Sebagai acuan pemilihan metode pengendalian.
2. Mendapatkan sistem sederhana terjangkau, dan kualitas daya listrik yang lebih baik dengan menjamin kinerja peralatan lain tidak terganggu akibat hamonisa.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada peneltianInverterDc/Ac Tiga Fasa Untuk Sistem Tenaga Listrik Bersasis Tenaga Surya adalah:

- Bab 1 berisi penjelasan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, hasil penelitian, Metodologi penelitian serta sistematika penulisan.
- Bab 2 berisi penjelasan tentang landasan teori yang digunakan dalam penelitian. Diuraikan pula tentang tinjauan pustaka yang merupakan penjelasan tentang hasil-hasil penelitian lainnya yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan kemudian state of the art dari pene-

an ini. Landasan teori merupakan suatu penjelasan tentang sumber dan tinjauan terbaru dari pustaka primer seperti buku, artikel, jurnal, prosiding dan tulisan asli lainnya untuk mengetahui perkembangan pene-



litan yang relevan dengan judul atau tema penelitian yang dilakukan dan juga sebagai arahan dalam memecahkan masalah yang diteliti.

- Bab 3 ini merupakan penjelasan tentang tahapan-tahapan yang dilakukan dalam proses perancangan filter dan metode yang akan digunakan.
- Bab 4 ini merupakan penjelasan tentang model rancangan filter dan model simulasi dalam bentuk program PSpice dimana rangkaian elektronika didesain menggunakan bahasa pemrograman. Simulasi pspice ini, akan menampilkan hasil keluaran berupa grafik dan angka.
- Bab 5 ini akan dibahas tentang hasil simulasi sistem pada Bab 4. Setelah dilakukan simulasi kemudian mendeskripsikan tiap data pada hasil simulasi apakah semua yang dilakukan sesuai dengan tujuan pada penelitian. Tahapan ini akan membahas perbandingan hasil keluaran berupa kurva setiap variabel dari dua buah pengendalian berbeda.
- Bab 6 berisi tentang kesimpulan dan saran. Dimana menyimpulkan pembahasan pada Bab 5 memberikan penjelasan hasil keseluruhan pengujian dari beberapa variabel rancangan. Saran berisi narasi yang belum atau perlu dikembangkan.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Micro-grid Berbasis Fotovoltaik Terhubung Jaringan

Microgrid bisa disebut juga jaringan mikro, tentu yang dimaksud disini adalah jaringan mikro pada sistem tenaga listrik. Microgrid sangat berkaitan dengan *Distributed Energy Resources* (DER) yang didalamnya terdapat pembangkit terdistribusi, penyimpanan energi (*energy storage*) yang lokasinya dekat dengan beban lokal. Salah satu keuntungan microgrid adalah meningkatkan ketahanan sistem.

Microgrid merupakan sistem yang terdiri dari minimal satu sumber energi yang terkoneksi dengan beban pada daerah yang relatif kecil. Dalam microgrid, sumber energi dan beban bisa terhubung maupun terputus ke jaringan distribusi (grid), tentu dengan gangguan pada beban yang seminimal mungkin, sehingga perlu perencanaan yang bagus untuk menghindari masalah tersebut.

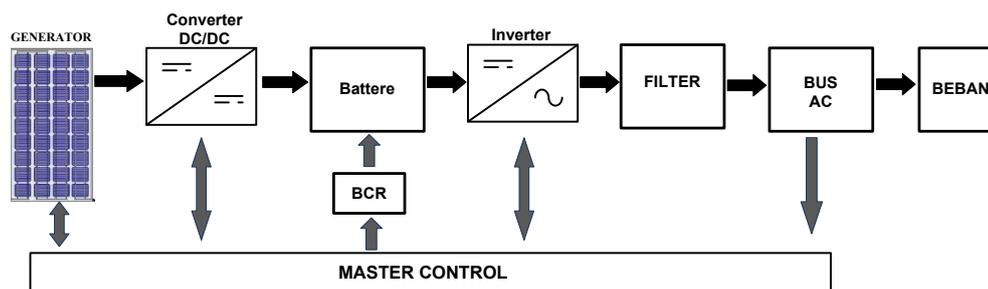
Pada saat microgrid terputus dengan jaringan distribusi (grid) dimana interconnection switch dalam keadaan terbuka, microgrid harus mampu men-supply beban local dengan pembangkitnya sendiri karena pada kondisi ini

listrik tidak bisa membantu men-supply listrik ke beban, kondisi ini islated mode. Selain microgrid harus dapat memenuhi kebutuhan microgrid juga harus bisa menjamin kualitas frekuensi dan tegang-



an, karena pada umumnya akan terjadi gangguan sesaat pada saat proses pergantian dari kondisi terkoneksi grid ke kondisi islanded mode. Besar dan lama gangguan sangat ditentukan kualitas teknologi switch-nya. Pada dasarnya ada empat teknologi yang sangat penting dalam microgrid yaitu Distributed generation (DG), Distributed Storage (DS), interconnection switches dan sistem control, dimana semuanya harus bekerja dengan baik dan sesuai harapan sehingga perlu desain yang bagus dan harga yang seminim mungkin tentunya. Topologi microgrid power system dapat dilihat pada gambar.

Sistem tenaga listrik mikro berbasis fotovoltaik pada gambar. 1.



Gambar 1: Sistem Tenaga tiga fasa DC/AC

Sistem PV terhubung jaringan dikategorikan berdasarkan jumlah tahap daya. Teknologi masa lalu menggunakan konfigurasi inverter terpusat satu tahap. Fokus teknologi saat ini dan masa depan terutama pada keluaran inverter enam tahap di mana konverter DC ke DC terhubung antara modul PV [22] dan inverter DC ke AC [7].



2.2 Daya Tiga Fasa

Daya tiga fasa terdiri dari tiga tegangan sinusoidal dan/atau arus, masing-masing memiliki magnitudo yang sama dan tiga fasa hanya berbeda dalam sudut fasa dari gelombang sinusoidal. Sudut fase dari tiga gelombang sinus adalah dari 0° , 120° , 240° dan 360° masing-masing. Bentuk gelombang tegangan output inverter ideal adalah sinus.

Keuntungan dari Power Supply Tiga Fase:

1. Tegangan dan arus sinusoidal yang dihasilkan dapat ditingkatkan menggunakan transformator sementara tegangan DC dan arus tidak bisa.
2. Daya yang dikirimkan ke beban tiga fase adalah konstan.

Sinyal AC berbentuk gelombang sinusoidal, dimana untuk menempuh satu gelombang sinyal dibutuhkan waktu tertentu. Banyaknya satu gelombang dalam satu detik itulah yang dinamakan frekuensi. Ada dua frekuensi yang digunakan untuk mentransmisikan daya tiga fasa.

1. 60 Hz (digunakan di negara-negara seperti Amerika Serikat, Kanada, Brasil, dll.)
2. 50 Hz (digunakan di negara-negara seperti Indonesia, Inggris, India, China, dll.)



listrik dirumah kita adalah AC, dengan tegangan 220V-380V dan frekuensi 50Hz. Sinyal AC berbentuk gelombang sinusoidal, dimana untuk menempuh satu gelombang sinyal dibutuhkan waktu 20ms (0.02s).

2.3 Konsep Dasar Inverter 3 Fasa

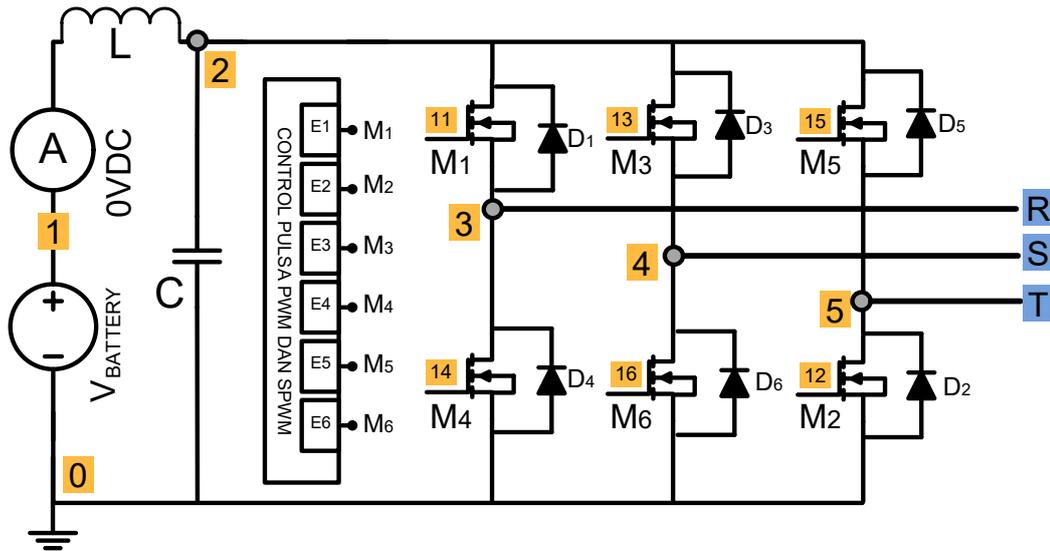
Inverter 3 fasa adalah rangkaian elektronika yang berfungsi untuk mengubah arus-tegangan DC satu masukan (searah) menjadi tiga arus-tegangan sinusoidal AC (bolak-balik). Biasanya, sumber energi terbarukan seperti sel fotovoltaik (PV) menghasilkan arus dan daya DC yang perlu diubah menjadi AC melalui VSI [9] Gambar 2 agar dapat dipasok ke beban lokal atau jaringan utilitas lihat pada Tabel 1 spesifikasi inverter. Selain untuk mengubah arus-tegangan, rangkaian Inverter juga berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan [10] yang artinya tegangan output yang di hasilkan akan naik sesuai dengan tegangan input yang diberikan. Inverter ini memiliki tiga keluaran, pada masing masing keluaran perlu dijaga keseimbangan kapasitasnya. Disisi lain, tegangan input DC adalah tertentu dan tidak bisa diubah-ubah, biasa tegangan output berubah-ubah dengan gain dari inverter yang biasanya dilakukan dengan kontrol PWM atau SPWM [28]. Gain inverter didefinisikan sebagai rasio tegangan output AC terhadap tegangan input DC.

Tabel 1: Spesifikasi inverter

Tegangan sumber V_{in}	275V
Tegangan Keluaran V_{RST}	380V-400V
Arus sumber I_{RST}	0-60A
Frekuensi keluaran	50Hz

Rangkaian diatas terdapat komponen inductor dan kapasitor, fungsi inductor (L_{dc}) dan kapasitor (C_{dc}) tersebut adalah untuk menghambat/mencegah terjadinya triple arus yang tinggi, sebelum disalurkan ke sistem penyea-





Gambar 2: Model inverter tipe VSI 3 fasa

rah inverter. Inverter mempunyai 6 pasang mosfet M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , M_5 , dan M_6 . Mosfet bertugas sebagai saklar yang mengatur bentuk gelombang frekuensi dengan cara membuka dan menutup saklar dalam kecepatan waktu tertentu. Kecepatan saklar diatur menggunakan kendali PWM dan atau SPWM. Tegangan keluaran V_{RST} berupa $+V_{dc}$, dan $-V_{dc}$ tergantung pada saklar yang on-off terlihat pada tabel. 2. Dioda penyearah D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 , dan D_6 sebagai konversi arus-tegangan masukan V_{DC} menjadi keluaran AC V_R , V_S dan V_T . Proses kerja dalam mengatur mode konduksi penyalan saklar, yaitu mode konduksi pada Tabel 2 [29].

Tabel 2: Konfigurasi Pensakelaran

Waktu	$0-60^0$	60^0-120^0	120^0-180^0	180^0-240^0	240^0-300^0	300^0-360^0
Mosfer	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
	M_5	M_6	M_1	M_2	M_3	M_4
	M_6	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5



2.4 Metode Switching

Pada penyaklaran inverter terdapat beberapa jenis teknik modulasi yang digunakan. Pada penelitian kali ini digunakan teknik modulasi Pulse width modulation (PWM) dan signal pulse width modulation (SPWM).

2.4.1 Pulse width modulation(PWM)

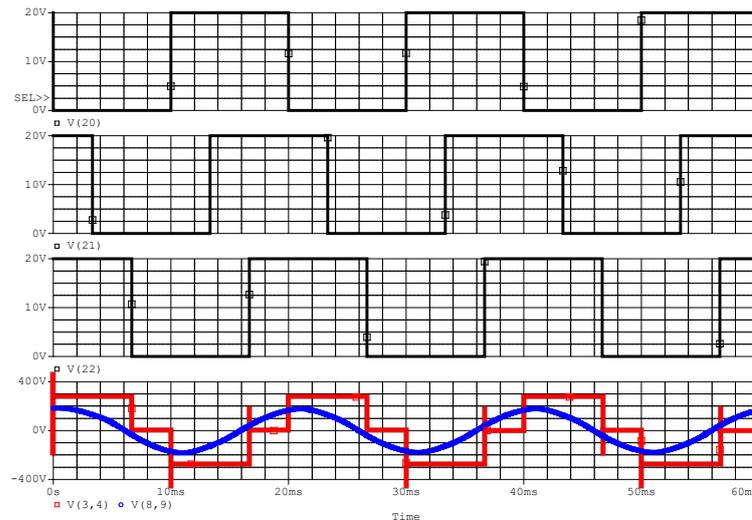
Pada konverter dan motor tenaga elektronik, PWM digunakan secara luas sebagai alat untuk menyalakan perangkat arus bolak (AC) [12] dengan sumber arus searah (DC) langsung atau untuk konversi DC/AC lanjutan. Variasi duty cycle pada sinyal PWM untuk memberikan tegangan DC pada beban pada pola tertentu akan tampak pada beban sebagai sinyal AC atau dapat mengendalikan kecepatan motor yang jika tidak akan berjalan dengan kecepatan tinggi atau mati. Ini dijelaskan lebih lanjut di bagian ini. Pola di mana siklus sinyal PWM bervariasi dapat dibuat melalui komponen analog sederhana, mikrokontroler digital, atau rangkaian terpadu PWM yang spesifik.

Inverter modified sine wave hampir sama dengan inverter square wave tetapi menggunakan tahap lain untuk terlihat lebih mirip ke bentuk gelombang sinusoidal. Pada inverter modified sine wave, ada tiga level tegangan pada bentuk gelombang output : high,low dan zero seperti terlihat pada gambar

ini dengan dead zone diantara high dan low pulsa :



ontrol PWM analog memerlukan pembangkitan sinyal referensi dan a yang memberi umpan ke komparator yang menghasilkan sinyal



Gambar 3: Modified Sine Wave

keluaran berdasarkan perbedaan antara sinyal. Sinyal referensi adalah sinusoidal dan pada frekuensi sinyal keluaran yang diinginkan, sedangkan sinyal pembawa sering berupa gigi gergaji atau gelombang segitiga pada frekuensi yang secara signifikan lebih besar daripada referensi.

Bila sinyal pembawa melebihi rujukan, sinyal keluaran komparator berada pada satu keadaan, dan bila referensi berada pada tegangan yang lebih tinggi, output berada pada keadaan kedua. Proses ini ditunjukkan pada Gambar 3 dengan gelombang pembawa triangular dalam red, gelombang referensi sinusoidal dengan warna biru, dan pulsa sinus termodulasi dan tidak dimodulasi. Untuk menghasilkan output dengan sinyal PWM, transistor atau teknologi switching lainnya digunakan untuk menghubungkan sumber ke beban saat sinyal tinggi atau rendah. Konfigurasi full atau half bridge ada-

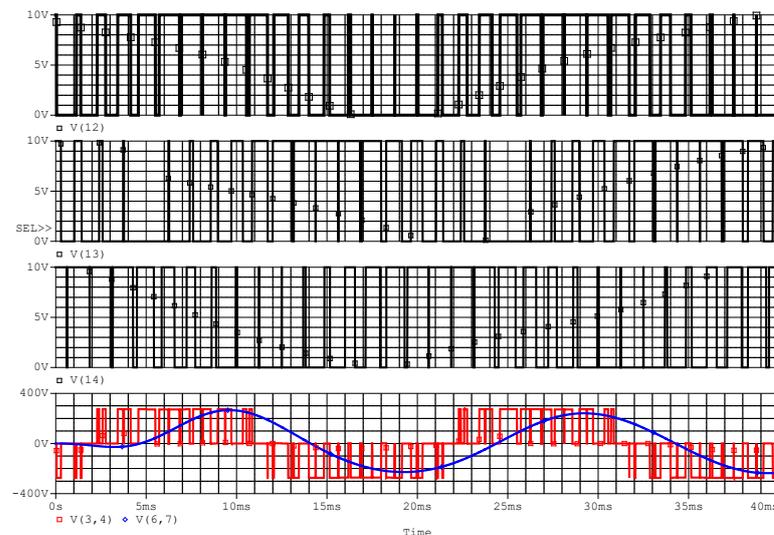
na switching yang umum digunakan pada elektronika daya. Konfigurasi penuh memerlukan penggunaan empat perangkat switching yang disebut sebagai HBridges karena orientasinya terkait dengan



beban.

2.4.2 Signal pulse width modulation (SPWM)

Cara mendapatkan sinyal SPWM dengan cara sampling alamiah yaitu membandingkan amplitudo gelombang segitiga sebagai sinyal carrier dan gelombang sinus sebagai sinyal reference.



Gambar 4: Sinyal referensi sinusoidal yang dihasilkan

Prinsip kerja SPWM adalah mengatur lebar pulsa mengikuti pola gelombang sinusoidal. Sinyal sinus dengan frekuensi dan amplitudo maksimum sebagai referensi digunakan untuk memodulasi sinyal carrier yaitu sinyal segitiga dengan frekuensi dan amplitudo maksimum. Sebagai gelombang carrier, frekuensi sinyal segitiga harus lebih tinggi dari pada gelombang pemodulasi (sinyal sinus). Perbandingan antara amplitudo gelombang sinusoidal

dan gelombang segitiga disebut indeks modulasi amplitudo.

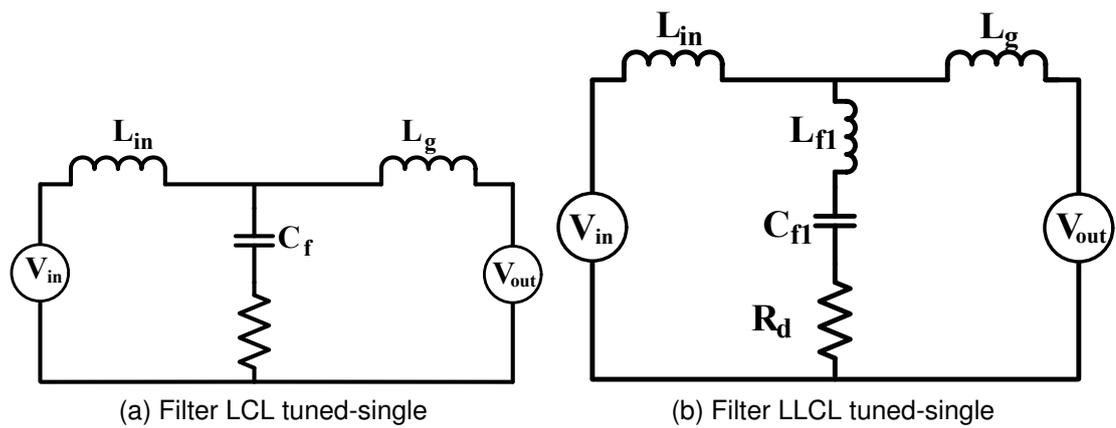


2.5 Filter Pasif

Filter pasif dipasang pada sistem dengan tujuan utama untuk meredam harmonisa dan tujuan lain yaitu untuk memperbaiki faktor daya, berupa komponen C, R dan komponen L, C, R yang dapat ditala untuk satu atau dua frekuensi. Filter dengan penalaan tunggal ditala pada salah satu orde harmonisa (biasanya pada orde harmonisa rendah). Dalam kasus harmonis filter LCL tuned-single dan filter LLCL tuned-single sangat efektif dalam perendaman harmonisa dibawah standar yang telah ditentukan yakni 5%. Namun kedua filter memiliki masalah pada rugi-rugi frekuensi dasar dan juga memiliki efisiensi daya sangat rendah. Filter LCL tuned-single dan LCL tuned-single sebagai filter yang sangat sederhana memiliki rangkaian tunggal seri. Dimana rangkaian rendaman harmonic LCL tuned-single terdiri dari dua komponen yaitu kapasitor dengan resistor sebagai damper terhubung seri, sedangkan LLCL tuned-single memiliki 3 komponen yaitu induktor, kapasitor dengan resistor sebagai damper masing-masing terhubung seri terlihat pada Gambar 5. Solusi ini tidak praktis karena arus riak yang tinggi akan mengalir ke resistor [9]. Daya yang dihasilkan mengalami penurunan sehingga tidak efektif pada saat dibebani. Dalam kasus ini sangat diperlukan filter yang mampu menghilangkan rugi-rugi sehingga daya yang dihasilkan dapat diperbaiki [20].

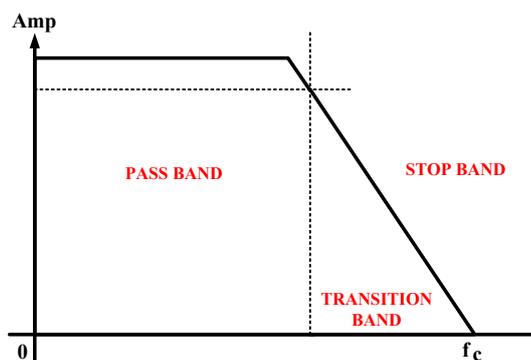


Rangkaian LCL dan LLCL memiliki bentuk karakteristik Low Pass. Low Pass filter merupakan jenis filter yang melewatkan frekuensi rendah serta menahan/menahan frekuensi tinggi. Bentuk respon LPF seperti ditunjukkan



Gambar 5: Filter pasif tunggal

pada gambar dibawah ini. Gambar 6 merupakan gambar besarnya tegang-



Gambar 6: Kurva Respon Low Pass Filter

an keluaran dari sebuah low pass filter dan frekuensi. Garis yang penuh adalah gambar untuk filter ideal, sedangkan garis putus-putus menunjukkan kurva-kurva untuk filter low pass [25] yang praktis. Jangkauan frekuensi yang dipancarkan dikenal sebagai pita lewat. Jangkauan frekuensi yang diperlemah dikenal sebagai pita stop. Frekuensi cut-off (f_c) juga disebut

di frekuensi dB, frekuensi pojok, atau frekuensi putus.



2.6 Perancangan Filter LCL

Nilai komponen filter merupakan hal yang sangat perlu dihitung untuk mendapatkan hasil yang tepat untuk mereduksi harmonisa. Filter harmonisa LCL ini terdiri atas empat buah komponen, yaitu berupa dua buah komponen induktor dan dua buah komponen kapasitor.

Pertama, perlu ditentukan nilai dari impedansi dasar dan kapasitansi dasar yang didefinisikan oleh Persamaan (2.2) dan Persamaan (2.3) untuk mewakili komponen filter sebagai dari nilai dasar.

$$Z_b = \frac{E_S^2}{P_n} \quad (2.1)$$

$$L_b = \frac{Z_b}{\omega_n} \quad (2.2)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_n \cdot Z_b} \quad (2.3)$$

dimana $\omega_g = 2\pi f_g$

Kedua, penyerapan reaktif (x) oleh kapasitansi filter C_f ditentukan mengenai tingkat daya dan target faktor daya dari rancangan. C_f umumnya terbatas pada $0,01\% \leq x \leq 0,05\%$ C_b untuk memberikan PF dalam 0,95-1.

menentukan nilai C_f kita dapat menentukan nilai L_f induktansi ren-



daman didefinisikan oleh Persamaan (2.4) dan Persamaan (2.5).

$$C_f = x.Z_b \quad (2.4)$$

$$L_f = \frac{1}{\omega_n C_b} \quad (2.5)$$

Untuk nilai maksimum arus ripple keluaran dari inverter, dapat dihitung dengan persamaan :

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}L_{in}}(1 - m)mT_{sw} \quad (2.6)$$

Dari persamaan di atas, dapat diketahui bahwa nilai arus ripple maksimum untuk $m = 0,9$ yaitu :

$$\Delta I_{Lmax} = \frac{0.18V_{DC}}{\sqrt{3}f_{sw}L_{in}} \quad (2.7)$$

Dan untuk mengetahui nilai L_1 yang merupakan nilai induktor pada sisi inverter, dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$L_{in} = \frac{1}{\omega L_b} \quad (2.8)$$



Tabel 3: Batas distorsi tegangan yang diakibatkan harmonisa menurut IEEE 519-1992

Distorsi tegangan harmoni dalam % fundamental			
Sistem tegangan	< 69kV	69-138kV	> 138kV
THD	5,0	2,5	1,5
Distorsi arus harmoni dalam % fundamental			
I_{hs}/IL	THD		
< 20	5,0		
20-50	8,0		
50-100	12,0		
100-1000	15,0		
> 1000	20,0		

IEEE Std 519-1992, p.85,1993¹

2.7 Konsep Kualitas Daya Listrik

Istilah kualitas daya listrik merupakan suatu konsep yang memberikan gambaran tentang baik atau buruknya mutu daya listrik akibat adanya gangguan yang terjadi pada sistem kelistrikan.[1] Pada kualitas daya listrik terdapat masalah tegangan atau terputusnya catudaya tetapi menyangkut karakteristik parameter kelistrikannya seperti arus dan frekuensi dan kaitannya dengan harmonisa, arus bocor, tegangan transien, sag/dips, surge,swell, ripple, noise, dan lain sebagainya yang dapat merusak peralatan dan mengurangi umur perangkat/device.[9]

Pada era elektronika modern saat ini, terdapat dua jenis beban yaitu beban linier dan non linier.

Standar harmonisa yang digunakan pada penelitian ini adalah standar dari IEEE 519-1992. Ada dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi

harmonisa yaitu batas harmonisa untuk arus (THD_I) dan tegangan



2.8 Harmonisa

Definisi harmonisa adalah gelombang terdistorsi secara periodik pada keadaan steady state yang disebabkan oleh interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem pada frekuensi fundamental dengan komponen gelombang lain yang merupakan frekuensi kelipatan interger dari frekuensi fundamental. Parameter pertama harmonisa adalah total harmonics distortion (THD). THD adalah perbandingan nilai rms komponen harmonisa terhadap nilai rms dari komponen fundamental dan umumnya dinyatakan dalam persen (%). Indeks ini digunakan untuk mengukur penyimpangan bentuk gelombang periodik mengandung harmonisa dari gelombang sinus sempurna. Pada gelombang sinus sempurna nilai THD adalah nol persen. Nilai THD tegangan dinyatakan dalam Persamaan (2.9) [14]. Parameter kedua adalah Individual Harmonic Distortion (THD) yaitu perbandingan nilai rms harmonisa individu terhadap nilai rms komponen fundamentalnya. Parameter ketiga adalah THD arus yaitu jumlah distorsi harmonisa arus dan didefinisikan dalam Persamaan (2.12) [15].

Prinsip dasar atau pengertian dasar deret Fourier adalah semua bentuk gelombang waktu atau sinyal waktu kontinyu $f(t)$ yang periodic (asalkan bukan gelombang sinus) dapat dinyatakan atau diuraikan kedalam beberapa komponen harmonisa atau komponen frekuensi, atau dengan kata lain da-

takan sebagai bentuk jumlahan fungsi-fungsi sinus atau cosines.

suatu sinyal waktu konyintu $f(t)$ yang periodic (distorsi karena ada harmonisa) diambil deret Fouriernya maka hasilnya berupa sinyal waktu



kontinyu pula, hanya saja memiliki beberapa komponen frekuensi dan amplitude harmonisa.

Variabel output dari analisis transien adalah dalam bentuk terpisah. Data sampel ini dapat digunakan untuk menghitung koefisien deret Fourier. Bentuk gelombang periodik dapat dinyatakan dalam deret Fourier sebagai.

Rumus arus

$$i_t = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n.\omega.t + \theta_n) \quad (2.9)$$

Dimana: V_0 = Komponen dc dari gelombang tegangan (V) Rumus tegangan

$$v_t = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n.\omega.t + \varphi_n) \quad (2.10)$$

Dimana: V_0 = Komponen dc dari gelombang tegangan (V) Dimana: I_0 = Arus dc (A)

Sebuah bentuk gelombang AC periodik biasanya memiliki berbagai urutan harmonik. Karena nilai sesaat secara periodik berulang dalam frekuensi dasar (fundamental frequency) f (atau $\omega = 2\pi f$), hubungan spektrum dalam domain frekuensi terdiri dari puncak-puncak diskrit pada frekuensi (atau $n\omega = 2\pi f$), di mana $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$. Komponen order-pertama ($n = 1$) beresesuaian dengan komponen fundamental V_1 . Distorsi harmonik total (THD) didefinisikan oleh perbandingan jumlah semua harmonik orde lebih tinggi

o harmonik mendasar V_1 :



$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \quad (2.11)$$

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \quad (2.12)$$

2.8.1 Konsep daya

Sebelum membahas tentang perbaikan faktor daya dengan menggunakan kapasitor, ada baiknya kita mengingat kembali tentang pengertian umum dari Daya Semu, Daya Aktif dan Daya Reaktif. Dalam sistem listrik AC/Arus Bolak-Balik ada tiga jenis daya yang dikenal, khususnya untuk beban yang memiliki impedansi (Z), yaitu:

1. Daya semu (S, VA, Volt Amper)
2. Daya aktif (P, W, Watt)
3. Daya reaktif (Q, VAR, Volt Amper Reaktif)

Untuk rangkaian listrik AC, bentuk gelombang tegangan dan arus sinusoidal, besarnya daya setiap saat tidak sama. Maka daya yang merupakan daya rata-rata diukur dengan satuan Watt, Daya ini membentuk energi aktif persatuan waktu dan dapat diukur dengan kwh meter dan juga merupakan

nyata atau daya aktif (daya poros, daya yang sebenarnya) yang
 an oleh beban untuk melakukan tugas tertentu.



Sedangkan daya semu dinyatakan dengan satuan VoltAmpere (disingkat, VA), menyatakan kapasitas peralatan listrik, seperti yang tertera pada peralatan generator dan transformator. Pada suatu instalasi, khususnya di pabrik atau industri juga terdapat beban tertentu seperti motor listrik, yang memerlukan bentuk lain dari daya, yaitu daya reaktif (VAR) untuk membuat medan magnet atau dengan kata lain daya reaktif adalah daya yang terpakai sebagai energi pembangkitan flux magnetik sehingga timbul magnetisasi dan daya ini dikembalikan ke sistem karena efek induksi elektromagnetik itu sendiri, sehingga daya ini sebenarnya merupakan beban (kebutuhan) pada suatu sistim tenaga listrik.

Selain itu filter pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya aktif dan dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem [?].

Daya keluar dapat dicari dengan rumus :

$$P = V.I \quad (2.13)$$

Sebuah pembangkit listrik daya keluaran ideal akan memiliki efisiensi sebesar 100%. Artinya daya masukan dengan daya keluaran sama besar. Namun daya yang tidak ideal memiliki efisiensi 75% dimana daya masukan lebih tinggi dari daya keluaran. Efisiensi daya dapat dinyatakan :

$$\eta = \frac{\text{Dayaoutput}}{\text{Dayainput}} \times 100\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.14)$$



2.9 State Space

Dalam beberapa literatur, keadaan (state) didefinisikan sebagai himpunan variabel terkecil dalam sistem yang bersamaan dengan inputnya menentukan perilaku sistem secara lengkap. Sementara itu, variabel keadaan adalah variabel yang membentuk keadaan sistem. Ada beberapa definisi lain yang berkaitan dengan pemodelan sistem yang melibatkan variabel keadaan ini, yaitu :

1. State (keadaan).
2. Variabel keadaan.
3. Vektor keadaan (state vector).
4. Ruang Keadaan.
5. Persamaan ruang keadaan (state space equation)

Secara umum persamaan ruang keadaan sistem dinyatakan dalam bentuk berikut :

$$\dot{x} = \frac{dx(t)}{dt} = f(x, u, t) \quad (2.15)$$

Persamaan keluaran sistem dinyatakan dalam bentuk berikut :

$$\dot{y} = g(x, u, t) \quad (2.16)$$



dengan x adalah variabel keadaan, u menandai input sistem, dan t menyatakan variabel waktu. Sebagai catatan, \dot{x} dibaca x dot - adalah simbol yang lazim digunakan untuk menandai turunan pertama dari variabel keadaan. Sementara itu, apabila dilibatkan pada hukum kirchoff sistem keluaran berikut

$$C \frac{dV_C}{dt} = i_C \quad (2.17)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_L \quad (2.18)$$

$$VR = i.R \quad (2.19)$$

$$IR = \frac{V}{R} \quad (2.20)$$

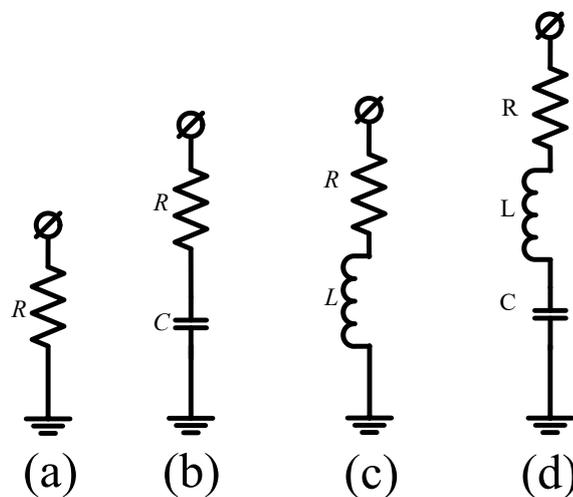
Untuk sistem linier tak bergantung waktu (linear time invariant), Persamaan (2.21) biasanya berbentuk :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.21)$$



2.10 Beban

Beban dalam kelistrikan adalah sebuah komponen elektrik atau bagian dari suatu rangkaian yang mengkonsumsi daya listrik. Dalam kehidupan sehari-hari, peralatan elektronik di sekitar kita adalah contoh beban. Beban tidak linear adalah sebuah beban yang resistansinya berubah-ubah dalam setiap periodenya. Bentuk gelombang, arus yang dihasilkan oleh beban tidak linier berbeda-beda yang di bandingkan dengan bentuk gelombang tegangan sehingga terjadi cacat atau harmonisa. Listrik AC memiliki tiga jenis beban listrik yang harus ditopang oleh pembangkit listrik. Ketiga beban tersebut yaitu beban resistif (R), beban induktif (L), dan beban kapasitif (C). Ketiganya memiliki karakteristik yang berbeda satu sama lainnya.



Gambar 7: Beban listrik rumah tangga (a)R, (b)R+C, (c)R+L, dan (d)R+L+C



2.11 Penelitian Yang Relevan

Pada Tabel 4 penelitian ini bukan merupakan topik baru yang mengang-
kat hal yang tidak pernah ada sebelumnya melainkan reka cipta dan inovasi
dari beberapa penelitian sebelumnya. Sehingga diharapkan mampu mem-
berikan hasil yang optimal dari yang telah ada sebelumnya.



Tabel 4: State of the art

Author	Nama	Year	Filter type	Result
[15]	Faizal A. Samman	2016	LC	Secara teoritis, peredam dapat mengurangi frekuensi resonansi puncaknya. Namun, dalam keadaan apa pun, itu dapat berpotensi mengurangi daya inverter, amplitudo output tegangan, dan tidak dapat meningkatkan pengurangan THD-nya.
[2]	Vincius A. Lacerda	2017	LCL	Karena fakta bahwa kualitas daya dari grid pasif sepenuhnya bergantung pada inverter, desain filter harus fokus pada kualitas tegangan output. Dengan demikian, pengaruh impedansi harmonik dari grid dalam respons filter tidak dapat diabaikan.
[7]	Faizal A. Samman	2017	LCL	THD bervariasi antara 1% hingga 13% tergantung pada jenis beban dan nilai resistif pada beban, Amplitudo tegangan keluaran inverter juga diukur, dan itu berubah karena perubahan beban.
[20]	Mehmet buyuka	2016	LLCL	Filter LLCL tampaknya digunakan secara substansial sebagai pengganti filter LCL di masa depan. Terlebih lagi, SRF kompleks dapat ditemukan jalannya ke berbagai aplikasi karena atenuasi mereka lebih baik dari harmonik frekuensi switching, jika sistem kontrol mereka disederhanakan dan ditingkatkan.
[13]	M. Huang	2015	LLCL	Variasi parameter juga mempengaruhi ketangguhan sistem dan akurasi desain. Sebuah sistem konverter yang terhubung dengan jaringan berkekuatan 5 kW diterapkan untuk memverifikasi analisis teoritis pada filter LLCL. Dapat ditemukan bahwa hasil eksperimen cocok dengan hasil analisis teoritis dengan baik.
[4]	Camilo Gomes	2017	LCL	Stabilitas sistem dalam strategi kontrol langsung berdasarkan umpan balik induktor sisi inverter menurun dengan penurunan tingkat sirkuit pendek jaringan.
[27]	Yu Zhang	2014	LCL	Kinerja kontrol yang baik yang ditawarkan oleh GCI tipe-L asli dan atenuasi harmonik tajam yang ditawarkan oleh filter LCL yang dirancang terakhir dapat terintegrasi dengan baik.

