

SKRIPSI

**INVERTER MULTILEVEL MULTI SUMBER TEGANGAN
DENGAN MINIMUM SAKLAR ELEKTRONIK**

Disusun oleh:

SUL JANWAR

D041 20 1068



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**INVERTER MULTILEVEL MULTISUMBER TEGANGAN
DENGAN MINIMUM SAKLAR ELEKTRONIK**

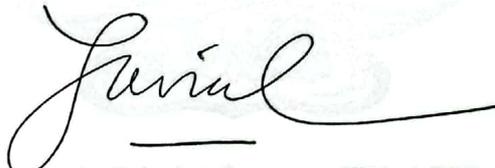
Disusun dan diajukan oleh

Sul Janwar

D041201068

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 16 Oktober 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,



Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.

NIP. 19750605 200212 1 004



Ketua Program Studi,

Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.

NIP. 19750605 200212 1 004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Sul Janwar

NIM : D041201068

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

INVERTER MULTILEVEL MULTI SUMBER TEGANGAN DENGAN MINIMUM SAKLAR ELEKTRONIK

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.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

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

Gowa, 16 Oktober 2024

Yang Menyatakan

 Sul Janwar

ABSTRAK

SUL JANWAR. *Inverter Multilevel Multi Sumber Tegangan dengan Minimum Saklar Elektronik* (dibimbing oleh Faizal Arya Samman)

Penelitian ini berfokus pada inverter multilevel 15 level dan 31 level minimum *switch*. Inverter 15 level menggunakan 3 sumber DC asimetris dan 7 buah MOSFET. Sedangkan, inverter 31 level menggunakan 4 sumber DC asimetris dan 8 buah MOSFET. Tujuan penelitian ini adalah untuk meminimalkan penggunaan saklar pada inverter multilevel 15 level dan 31 level serta membandingkan pengaruh bentuk gelombang terhadap nilai THD, daya, dan efisiensi inverter. Metode yang digunakan adalah topologi *Cascaded H-Bridge* (CHB) yang dimodifikasi, sumber DC asimetris dengan menggunakan strategi modulasi *Nearest Level Control Pulse Width Modulation* (NLCPWM) metode *half height* dan strategi modulasi konvensional. Metode pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan aplikasi PSIM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanpa menggunakan filter, inverter minimum *switch* 15 level ini dapat menghasilkan nilai THD 5,6 % dan efisiensi 93,53%. Sedangkan inverter 31 level dapat menghasilkan nilai THD 2,94% dan efisiensi 96,55%. Penerapan inverter ini cukup baik untuk meredam THD serta efisiensi yang cukup baik dengan saklar yang lebih sedikit.

Kata Kunci: Inverter Multilevel, Inverter Minimum *Switch*, *Total Harmonic Distortion* (THD).

ABSTRACT

SUL JANWAR. *Multi Voltage Source Multilevel Inverter with Minimum Electronic Switches* (supervised by Faizal Arya Samman)

This research focuses on a 15-level multilevel inverter and a 31-level minimum switch. The 15-level inverter uses 3 asymmetric DC sources and 7 MOSFETs. Meanwhile, the 31-level inverter uses 4 asymmetric DC sources and 8 MOSFETs. The purpose of this research is to minimize the use of switches in 15-level and 31-level multilevel inverters and compare the effect of waveforms on THD values, power, and inverter efficiency. The method used is a modified Cascaded H-Bridge (CHB) topology, asymmetric DC source using Nearest Level Control Pulse Width Modulation (NLCPWM) modulation strategy half height method and conventional modulation strategy. The data collection method was carried out using the PSIM application. The results showed that without using a filter, this 15-level minimum switch inverter can produce a THD value of 5% and an efficiency of 93.53%. While the 31-level inverter can produce a THD value of 2.94% and an efficiency of 96.55%. The application of this inverter is good enough to reduce THD and efficiency is quite good with fewer switches.

Keywords: Multilevel Inverter, Minimum Switch Inverter, Total Harmonic Distortion (THD)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
KATA PENGANTAR.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Inverter	6
2.2 Inverter Multilevel	7
2.2.1 Inverter Multilevel <i>Cascaded H-Bridge</i>	7
2.2.2 Inverter Multilevel <i>Diode Clamped</i>	8
2.2.3 Inverter Multilevel <i>Flying Capacitor</i>	9
2.3 <i>Nearest Level Control Pulse Width Modulation</i> (NLCPWM).....	10
2.4 <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM)	11
2.5 <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD).....	13
2.6 Analisis Daya	14
2.6.1 Faktor Daya	14
2.6.2 Efisiensi Daya.....	15
2.7 <i>Low Pass Filter</i>	15
2.8 Perbandingan Inverter Multilevel Penelitian Terdahulu dan Penelitian ini	16
BAB III METODE PENELITIAN	17
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	17
3.2 Alat dan bahan.....	17
3.3 Metode Pengumpulan Data.....	17
3.4 Diagram Alir Penelitian	18
3.5 Desain Sistem.....	18
3.5.1 Pemodelan Sirkuit	18
3.5.2 Penentuan Nilai Sumber DC	21
3.5.3 <i>Switching</i> MOSFET.....	23
3.5.4 Teknik Modulasi Konvensional	34
3.5.5 Teknik Modulasi <i>Nearest Level Control Pulse Width Modulation</i> (NLCPWM) Tanpa Level Nol	35
3.5.6 Teknik Modulasi <i>Nearest Level Control Pulse Width Modulation</i> (NLCPWM) dengan Level Nol.....	38
3.5.7 Penentuan Nilai Filter LC.....	45
3.6 Skenario Percobaan.....	46

3.6.1 Perbandingan THD Inverter Menggunakan Teknik Modulasi Konvensional dan NLCPWM.	47
3.6.2 Perbandingan Daya dan Efisiensi Inverter Menggunakan Teknik Modulasi Konvensional dan NLCPWM.....	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1 Inverter 15 Level.....	48
4.1.1 Teknik Modulasi Konvensional	48
4.1.2 Teknik Modulasi NLCPWM Tanpa Level Nol.....	49
4.1.3 Teknik Modulasi NLCPWM Dengan Menggunakan Level Nol.....	50
4.2 Inverter 31 Level Menggunakan Teknik Modulasi NLCPWM Dengan Level Nol.....	52
4.3 Hasil Simulasi Beban R, RL, dan RC	52
4.3.1 Hasil Simulasi Beban Resistif (R) yang berbeda	53
4.3.2 Hasil Simulasi Beban Resistif dan Induktif (RL) Yang Berbeda.....	58
4.3.3 Hasil Simulasi Beban Resistif dan Kapasitif (RC) Yang Berbeda.....	62
4.3.4 Hasil Simulasi Beban Resistif dan Induktif (RL) Yang Berbeda Pada Inverter 31 Level.....	67
4.3.5 Hasil Simulasi Beban Resistif dan Kapasitif (RC) Yang Berbeda Pada Inverter 31 Level.....	69
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	72
5.1 Kesimpulan	72
5.2 Saran.....	72
DAFTAR PUSTAKA	74
LAMPIRAN.....	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Inverter <i>H-Bridge</i>	6
Gambar 2 Bentuk gelombang inverter multilevel	7
Gambar 3 Inverter multilevel <i>Cascaded H-Bridge (CHB)</i>	8
Gambar 4 Inverter multilevel <i>Diode Clamped</i>	9
Gambar 5 Inverter multilevel <i>Flying Capacitor</i>	10
Gambar 6 <i>Nearest Level Control Pulse Width Modulation (NLCPWM)</i>	11
Gambar 7 <i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	12
Gambar 8 <i>Duty cycle</i>	12
Gambar 9 Rangkaian <i>low pass filter</i>	16
Gambar 10 Digram alir penelitian	18
Gambar 11 (a) Inverter 3 sumber DC 15 level dan (b) inverter 4 sumber DC 17 level	19
Gambar 12 (a) Inverter 3 sumber DC 15 level dan (b) inverter 4 sumber tegangan DC 31 level	20
Gambar 13 Rangkaian Sumber DC	21
Gambar 14 Konfigurasi saklar 15 level minimum saklar	24
Gambar 15 Sinyal <i>switching</i> MOSFET inverter 15 level dengan teknik modulasi konvensional	26
Gambar 16 Sinyal <i>switching</i> MOSFET inverter 15 level dengan teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol	27
Gambar 17 Sinyal <i>switching</i> MOSFET inverter 15 level dengan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol	27
Gambar 18 Konfigurasi saklar 31 level minimum saklar	30
Gambar 19 Sinyal <i>switching</i> MOSFET inverter 31 level dengan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol	34
Gambar 20 Sinyal inverter 15 level menggunakan teknik modulasi konvensional	35
Gambar 21 Sinyal inverter 15 level menggunakan teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol	36
Gambar 22 Sinyal inverter 15 level menggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol	38
Gambar 23 Sinyal inverter 31 level menggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol	44
Gambar 24 Grafik nilai THD dan amplitudo puncak berdasarkan nilai induktor dan kapasitor NLCPWM tanpa level nol	45
Gambar 25 Grafik nilai THD dan amplitudo puncak berdasarkan nilai induktor dan kapasitor NLCPWM dengan level nol	46
Gambar 26 Gelombang teknik modulasi konvensional tanpa filter	48
Gambar 27 Gelombang teknik modulasi konvensional menggunakan filter	49
Gambar 28 Gelombang teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol dan tanpa filter	49
Gambar 29 Gelombang teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol menggunakan filter LC	50
Gambar 30 Gelombang teknik modulasi NLCPWM dengan level nol tanpa filter	51

Gambar 31 Gelombang teknik modulasi NLCPWM dengan level nol menggunakan filter.....	51
Gambar 32 Gambar gelombang 31 level teknik modulasi NLCPWM dengan level nol tanpa filter	52
Gambar 33 Gelombang teknik modulasi konvensional dengan beban resistor menggunakan filter.....	54
Gambar 34 Gelombang teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol dengan beban resistor menggunakan filter.....	54
Gambar 35 Gelombang teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor menggunakan filter.....	55
Gambar 36 Gelombang teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor tanpa filter 31 level.....	56
Gambar 37 Gelombang tegangan menggunakan teknik modulasi konvensional beban resistor dan induktor dengan filter.....	59
Gambar 38 Gelombang arus menggunakan teknik modulasi konvensional beban resistor dan induktor dengan filter	59
Gambar 39 Gelombang tegangan menggunakan teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol beban resistor dan induktor dengan filter.....	60
Gambar 40 Gelombang arus menggunakan teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol beban resistor dan induktor dengan filter.....	60
Gambar 41 Gelombang tegangan menggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor dan induktor dengan filter.....	61
Gambar 42 Gelombang arus menggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor dan induktor dengan filter.....	61
Gambar 43 Gelombang tegangan menggunakan teknik modulasi konvensional beban resistor dan kapasitor dengan filter.....	63
Gambar 44 Gelombang arus menggunakan teknik modulasi konvensional beban resistor dan kapasitor dengan filter	63
Gambar 45 Gelombang tegangan menggunakan teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol beban resistor dan kapasitor dengan filter.....	64
Gambar 46 Gelombang arus menggunakan teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol beban resistor dan kapasitor dengan filter.....	64
Gambar 47 Gelombang tegangan menggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor dan kapasitor dengan filter.....	65
Gambar 48 Gelombang arus menggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor dan kapasitor dengan filter.....	65
Gambar 49 Gelombang tegangan 31 level teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor dan induktor.....	68
Gambar 50 Gelombang arus 31 level teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor dan induktor	68
Gambar 51 Gelombang tegangan 31 level teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor dan kapasitor	70
Gambar 52 Gelombang arus 31 level teknik modulasi NLCPWM dengan level nol beban resistor dan kapasitor	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Standar THD IEEE 519: 2022	13
Tabel 2 Perbandingan penelitian terdahulu dan penelitian ini	16
Tabel 3 <i>Switching</i> inverter 15 level.....	23
Tabel 4 <i>Switching</i> inverter 31 level.....	28
Tabel 5 Hasil perhitungan konversi nilai sudut ke waktu inverter 15 level meggunakan teknik mosulasi NLCPWM tanpa level nol.....	38
Tabel 6 Hasil perhitungan konversi nilai sudut ke waktu inverter 15 level meggunakan teknik mosulasi NLCPWM dengan level nol	40
Tabel 7 Hasil perhitungan konversi nilai sudut ke waktu inverter 31 level meggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol.....	44
Tabel 8 Nilai hasil simulasi teknik modulasi konvensional.....	49
Tabel 9 Hasil simulasi teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol	50
Tabel 10 Hasil simulasi teknik modulasi NLCPWM dengan level nol	51
Tabel 11 Hasil simulasi 31 level teknik modulasi NLCPWM dengan level nol tanpa filter	52
Tabel 12 Hasil simulasi beban resistor yang berubah-ubah menggunakan teknik modulasi konvensional dengan filter LC	53
Tabel 13 Hasil simulasi beban resistor yang berubah-ubah menggunakan teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol dengan filter.....	54
Tabel 14 Hasil simulasi beban resistor yang berubah-ubah menggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol dengan filter.....	55
Tabel 15 Hasil simulasi beban resistor yang berubah-ubah menggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol tanpa filter 31 level.....	55
Tabel 16 Tabel hasil simulasi beban resistor dengan induktor yang berubah-ubah meggunakan teknik modulasi konvensional dengan filter	58
Tabel 17 Tabel hasil simulasi beban resistor dengan induktor yang berubah-ubah meggunakan teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol dengan filter	59
Tabel 18 Tabel hasil simulasi beban resistor dengan induktor yang berubah-ubah meggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol dengan filter	60
Tabel 19 Tabel hasil simulasi beban resistor dengan kapasitor yang berubah-ubah meggunakan teknik modulasi konvensional dengan filter	63
Tabel 20 Tabel hasil simulasi beban resistor dengan kapasitor yang berubah-ubah meggunakan teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol dengan filter	64
Tabel 21 Tabel hasil simulasi beban resistor dengan kapasitor yang berubah-ubah meggunakan teknik modulasi NLCPWM dengan level nol dengan filter	65
Tabel 22 Tabel hasil simulasi 31 level beban resistor dengan induktor yang berubah-ubah teknik modulasi NLCPWM dengan level nol	68
Tabel 23 Tabel hasil simulasi 31 level beban resistor dengan kapasitor yang berubah-ubah teknik modulasi NLCPWM dengan level nol	70

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Rangkaian inverter 15 level di aplikasi PSIM	77
Lampiran 2 Rangkaian pembangkit PWM 15 level teknik modulasi konvensional	77
Lampiran 3 Rangkaian pembangkit PWM 15 level teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol	78
Lampiran 4 Rangkaian pembangkit PWM 15 level teknik modulasi NLCPWM dengan level nol	78
Lampiran 5 Rangkaian inverter 31 level di aplikasi PSIM	79
Lampiran 6 Rangkaian pembangkit PWM inverter 31 level teknik modulasi NLCPWM dengan level nol.....	79

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT., karena atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“INVERTER MULTILEVEL MULTISUMBER TEGANGAN DENGAN MINIMUM SAKLAR ELEKTRONIK”**.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk dapat menyelesaikan pendidikan tahap sarjana di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa selama penyusunan skripsi ini, penulis banyak dihadapi dengan berbagai hambatan, namun berkat adanya bimbingan, dukungan, dan bantuan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Orang tua serta saudara penulis yang telah memberikan doa dan dukungan selama penyelesaian tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr.-ing. Ir. Faizal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng selaku dosen pembimbing penulis yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga, dan pikirannya selama membimbing dan mengarahkan penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T., M.T. dan ibu Ida Rachmaniar Sahali, S.T., M.T. selaku dosen penguji telah meluangkan waktunya untuk memberikan saran, koreksi, dan arahan dalam penyelesaian tugas akhir penulis.
4. Segenap Dosen dan Staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah banyak memberikan ilmu selama perkuliahan dan membantu kelancaran proses penyusunan tugas akhir ini.
5. Teman-teman PROCEZ20R yang telah kebersamai penulis dalam menjalani kehidupan bermahasiswa.
6. Teman lab riset Elektronika dan Divais yang telah memberikan dukungan kepada penulis.

7. Dan untuk semua pihak yang tak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah memberikan dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit listrik energi terbarukan semakin banyak digunakan untuk menahan peningkatan suhu bumi. Energi terbarukan adalah sumber energi yang tersedia oleh alam dan bisa dimanfaatkan secara terus-menerus. Energi terbarukan di anggap sebagai solusi atas potensi keterbatasan sumber energi tak terbarukan yang banyak digunakan saat ini. Selain itu, pemanfaatan energi tak terbarukan atau biasa kita kenal dengan sebutan energi fosil secara berkepanjangan memiliki dampak negatif seperti CO₂, SO₂, dan NO₂. Dimana gas CO₂ merupakan salah satu golongan gas rumah kaca yang memicu pemanasan global.

Sebagian besar output yang dihasilkan dari energi terbarukan berupa arus searah (DC). Seperti yang kita ketahui, salah satu sumber energi terbarukan yang paling banyak digunakan adalah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Namun PLTS tidak dapat dihubungkan langsung dengan beban karena keluarannya berupa arus searah (DC). Oleh karena itu, diperlukan inverter untuk mengubah arus DC menjadi arus AC agar dapat digunakan oleh peralatan listrik yang ada di rumah atau jaringan listrik.

Inverter konvensional mempunyai output berupa gelombang kotak, biasanya menggunakan teknik SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) sebagai kontrol *switching* MOSFET. Penggunaan inverter konvensional maupun menggunakan teknik SPWM pada pengontrolan *switching* menghasilkan bentuk gelombang yang kurang baik dan tidak efisien karena rugi-rugi *switching* yang tinggi sehingga mempunyai distorsi harmonisa yang cukup besar. Pada inverter jenis SPWM bentuk gelombang keluarannya sangat dipengaruhi oleh frekuensi *switching* (Yarlagadda & Verma, 2022).

Inverter multilevel (MLI) merupakan sistem penghubung beberapa laju masukan DC (diperoleh dari sumber DC dan atau kapasitor) dan perangkat kontrol semikonduktor untuk menggabungkan bentuk gelombang tangga (Devadoss et al., 2023). Inverter multilevel menghasilkan bentuk gelombang tangga atau *staircase*. Sehingga diperoleh bentuk gelombang yang baik, semakin banyak level tegangan

yang dihasilkan, maka semakin baik bentuk gelombang keluarannya. Pada inverter multilevel tidak memerlukan frekuensi *switching* yang tinggi sehingga dapat menawarkan berbagai manfaat dalam tegangan mulai dari menengah hingga tinggi dengan distorsi harmonik yang lebih rendah dan memberikan efisiensi yang lebih tinggi (Avanaki et al., 2019); (Ramu et al., 2022). Inverter multilevel *cascaded H-Bridge* (CHB) dikembangkan pada tahap awal. Kemudian, *diode-clamped* MLI dikembangkan diikuti oleh *flying capacitor* MLI (Umashankar et al., 2013); (Avanaki et al., 2019); (Bektaş, 2024).

Inverter multilevel (MLI) dapat menghasilkan bentuk gelombang keluaran tunggal dengan mensintesis beberapa level tegangan, sehingga membentuk gelombang bertahap yang mendekati sinyal sinusoidal. Ketika jumlah sumber pada input inverter meningkat, maka meningkat pula jumlah level bentuk gelombang keluarannya (Sánchez Vargas et al., 2022); (Vijayakumar et al., 2022). Oleh karena itu *Total Harmonic Distortion* (THD) akan semakin rendah. *Total Harmonic Distortion* atau disingkat THD didefinisikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamental.

Untuk mendapatkan jumlah level tegangan yang lebih tinggi menggunakan inverter multilevel dan pengurangan jumlah saklar yaitu dengan menggunakan sumber DC simetris dan sumber DC asimetris. Inverter multilevel dengan sumber DC asimetris akan menggunakan tegangan yang berbeda-beda di masing-masing sumbernya. Topologi inverter multilevel dengan sumber DC simetris akan memiliki jumlah saklar yang lebih banyak dibandingkan topologi inverter multilevel dengan sumber DC asimetris (Ramu et al., 2022); (Vijayakumar et al., 2022); (Devadoss et al., 2023).

Adapun strategi modulasi yang mungkin digunakan MLI dengan jumlah saklar yang berkurang seperti *Phase Shift Pulse Width Modulation* (PS-PWM) dimana setiap modul inverter diberikan sinyal pembawa berbentuk gelombang segitiga yang memiliki pergeseran fasa yang berbeda antar modul, *Level Shift Pulse Width Modulation* (LS-PWM) pada LS-PWM, terdapat beberapa sinyal pembawa (gelombang segitiga) dan setiap sinyal pembawa ini digeser ke level tegangan yang berbeda kemudian sinyal referensi (gelombang sinus) dibandingkan dengan sinyal-sinyal pembawa untuk menghasilkan PWM, *Phase Opposition Disposition Level*

Shifted Pulse Width Modulation (PODLS-PWM) bekerja dengan mengatur sinyal-sinyal pembawa yang berada di atas sumbu nol yang memiliki fase yang sama dan sinyal pembawa yang di bawah sumbu nol yang memiliki fase yang berlawanan (180 derajat) dengan fase yang di atas sumbu nol kemudian, di bandingkan dengan sinyal referensi (gelombang sinus), dan *Alternate Phase Opposition Disposition Level Shifted Pulse Width Modulation* (APODLS-PWM) bekerja dengan menyusun sinyal-sinyal pembawa (gelombang segitiga) dalam fase bergantian dimana sinyal pembawa pertama dalam fase normal kemudian sinyal pembawa kedua dalam fase berlawanan (180 derajat) dan sinyal pembawa ketiga kembali ke fase normal kemudian, setiap sinyal segitiga dibandingkan dengan gelombang referensi. Strategi PWM ini akan memiliki frekuensi *switching* yang tinggi sehingga dapat kehilangan daya lebih banyak yang dapat mengakibatkan efisiensi akan lebih rendah. Hal tersebut dapat di perbaiki dengan mengurangi frekuensi peralihan, *Space Vector Modulation* (SVM), *Selective Harmonic Elimination* (SHE), *Optimal Switching Angle* (OSA), dan *Nearest Level Control* (NLC) dalam strategi ini frekuensi *switching* lebih rendah sehingga rugi daya akan lebih kecil dan meningkatkan efisiensi serta dapat mengurangi THD (Ramu et al., 2022); (Umashankar et al., 2013).

Pengaplikasian inverter multilevel multisumber tegangan yakni pada sistem penyimpanan energi terdistribusi dimana inverter multilevel multisumber tegangan digunakan untuk menggabungkan beberapa sumber penyimpanan energi, seperti baterai dengan tegangan yang berbeda, ke dalam sistem distribusi listrik. Ini memungkinkan penyimpanan dan penggunaan energi dari berbagai sumber secara efisien, seperti pada *smart grid* atau *microgrid* yang menggabungkan energi dari panel surya, baterai, dan sumber lainnya. Penggabungan energi terbarukan dimana inverter multilevel multisumber tegangan ini digunakan untuk menghubungkan berbagai sumber energi seperti panel surya, turbin angin, dan generator mikro-hidro yang memiliki tegangan output yang berbeda-beda. Inverter ini mampu menggabungkan semua sumber ini dan mengonversi energinya menjadi tegangan AC.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini menyajikan topologi baru untuk inverter multilevel multi sumber tegangan menggunakan sumber DC asimetris

dengan strategi modulasi *Nearest Level Control Pulse Width Modulation* (NLCPWM). Kami juga membandingkan pengaruh bentuk gelombang terhadap nilai THD, daya dan efisiensi sebelum dan sesudah di filter. Hal ini menjadi dasar dalam penulisan tugas akhir yang berjudul **“Inverter Multilevel Multi Sumber Tegangan dengan Minimum Saklar Elektronik”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang inverter multilevel dengan saklar yang lebih sedikit dan memiliki jumlah level yang lebih banyak?
2. Bagaimana pengaruh bentuk gelombang terhadap nilai THD, daya, dan efisiensi inverter?
3. Bagaimana menentukan nilai sumber DC asimetris untuk mendapatkan level yang lebih banyak?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Untuk merancang inverter multilevel dengan saklar yang lebih sedikit dan memiliki jumlah level yang lebih banyak.
2. Untuk mengetahui pengaruh bentuk gelombang terhadap nilai THD, daya dan efisiensi inverter.
3. Untuk mengetahui cara mendapatkan nilai sumber DC asimetris agar mendapatkan level yang lebih banyak.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Untuk menghasilkan topologi inverter multilevel baru yang memiliki jumlah level yang lebih banyak, saklar yang lebih sedikit serta sumber DC asimetris yang lebih sedikit.
2. Dapat menjadi sumber referensi ilmiah dalam pengembangan inverter multilevel yang lebih baik.

3. Penelitian ini diharapkan menjadi tolak ukur kemampuan dan potensi sebagai disiplin ilmu yang telah diperoleh di bangku perkuliahan.

1.5 Batasan Masalah

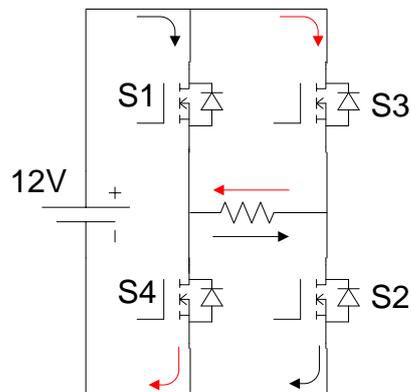
Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Jumlah level yang digunakan adalah 15 level dan 31 level.
2. Menggunakan sumber DC asimetris.
3. Teknik modulasi yang digunakan adalah NLCPWM (*Nearest Level Control Pulse Width Modulation*) menggunakan metode perhitungan *Half Height* dan metode konvensional.
4. Ada 3 jenis gelombang yang akan di bandingkan yaitu teknik modulasi konvensional, teknik modulasi NLCPWM tanpa level nol dan NLCPWM dengan level nol.
5. Filter yang digunakan yaitu filter LC.
6. Penelitian ini tidak berfokus pada filter.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Inverter

Inverter merupakan rangkaian elektronik yang dapat mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) dengan bentuk gelombang sinus maupun bentuk gelombang kotak.



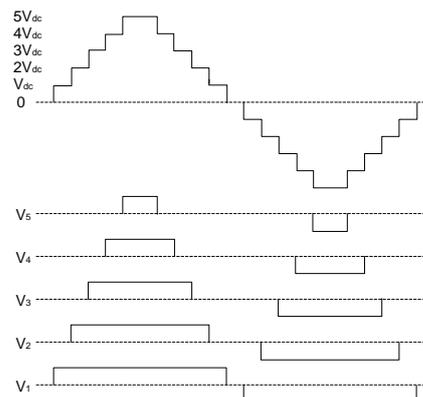
Gambar 1 Inverter H-Bridge

Inverter *H-Bridge* yang terdiri dari 4 saklar yaitu S1, S2, S3, dan S4. Masing-masing saklar ini mengatur polaritas dari tegangan dan arus. Ketika S1 dan S2 diaktifkan maka arus dapat mengalir ke beban R dari kiri ke kanan, sedangkan jika S3 dan S4 yang diaktifkan maka arus dapat mengalir ke beban R dari kanan ke kiri dari perbedaan arah arus inilah sehingga di dapatkan arus bolak-balik (AC) dari sumber DC.

Inverter mempunyai output berupa gelombang kotak, biasanya menggunakan teknik SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) untuk mengontrol MOSFET. Tanpa menggunakan teknik SPWM output yang dihasilkan oleh inverter berupa gelombang kotak yang memiliki distorsi harmonisa yang sangat tinggi yang dapat merusak peralatan-peralatan listrik. Inverter yang menggunakan teknik SPWM juga akan menghasilkan gelombang kotak dengan *duty cycle* yang bervariasi sehingga dapat menghasilkan output yang mendekati sinusoidal, tetapi teknik ini memiliki rugi-rugi *switching* yang tinggi, dapat mempengaruhi kualitas daya dan efisiensi inverter (Yarlagadda & Verma, 2022).

2.2 Inverter Multilevel

Inverter multilevel merupakan sistem penghubung beberapa laju masukan DC (diperoleh dari sumber DC dan atau kapasitor) menggunakan kontrol semikonduktor seperti MOSFET untuk menggabungkan bentuk gelombang tangga (Devadoss et al., 2023). Inverter multilevel menghasilkan output berupa gelombang tangga sehingga, diperoleh bentuk gelombang yang lebih baik. Semakin banyak level tegangan yang dihasilkan maka semakin baik bentuk gelombang keluarannya yang dapat di lihat pada Gambar 2.

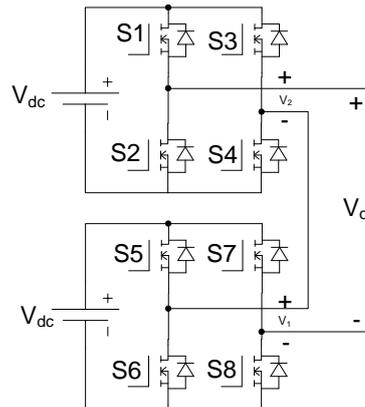


Gambar 2 Bentuk gelombang inverter multilevel

Inverter multilevel tidak memerlukan frekuensi *switching* yang tinggi sehingga dapat menawarkan berbagai manfaat dalam tegangan menengah hingga tinggi dengan distorsi harmonisa yang lebih rendah (Avanaki et al., 2019).

2.2.1 Inverter Multilevel *Cascaded H-Bridge*

Inverter *Cascaded H-Bridge* (CHB) adalah salah satu jenis topologi inverter yang terdiri dari beberapa rangkaian inverter *H-Bridge* yang dihubung secara seri. Setiap rangkaian *H-Bridge* memiliki sumber tegangan DC yang terpisah, dapat memiliki nilai tegangan yang sama (simetris) atau berbeda-beda (asimetris).

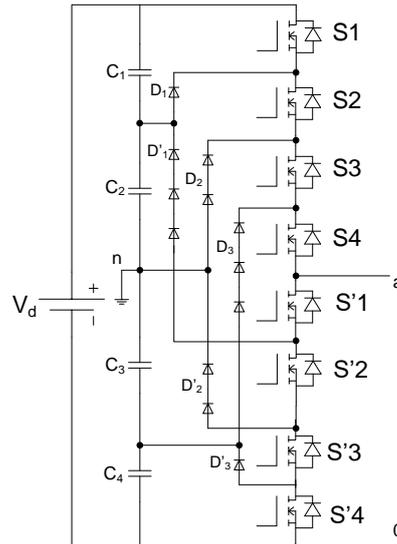


Gambar 3 Inverter multilevel *Cascaded H-Bridge* (CHB)

Setiap rangkaian *H-Bridge* dalam CHB menghasilkan tiga level tegangan output yaitu positif, nol, dan negatif dari sumber DC. Dengan menggabungkan output dari beberapa rangkaian *H-Bridge* yang dihubungkan seri, maka dapat menghasilkan bentuk gelombang yang memiliki level yang lebih banyak sehingga, semakin tinggi level yang dihasilkan maka akan memiliki output yang mendekati sinusoidal (Sánchez Vargas et al., 2022).

2.2.2 Inverter Multilevel *Diode Clamped*

Pada Inverter Multilevel *diode clamped*, dioda digunakan sebagai perangkat *clamping* untuk menjaga tegangan bus DC sehingga dapat mencapai langkah-langkah dalam tegangan outputnya. Inverter ini menggunakan dioda untuk membatasi tegangan. Pada Gambar 4 inverter ini memiliki empat buah kapasitor seri dan terhubung pada bus tegangan DC dengan nilai V_{dc} . Oleh karena itu, tegangan pada masing-masing kapasitor adalah $1/4 V_{dc}$. Dengan dioda *clamping* D1, D1', D2, D2', D3, dan D3', tegangan pada saklar statis dijaga agar selalu sama dengan tegangan kapasitor yaitu $1/4 V_{dc}$. Titik tengah dari keempat buah kapasitor ini merupakan titik netral (n) dan dijadikan referensi untuk keluaran inverter.



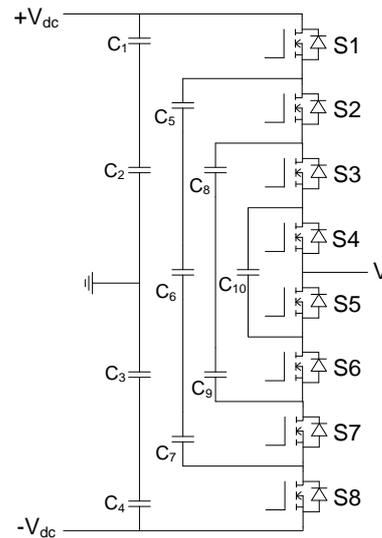
Gambar 4 Inverter multilevel *Diode Clamped*

Proses pembentukan lima level tegangan keluaran inverter ini dapat dijelaskan sebagai berikut: (Sharna, 2017)

1. Jika S1, S2, S3, dan S4 ON maka $V_{an} = \frac{V_{dc}}{2}$.
2. Jika S2, S3, S4 dan S1' ON maka $V_{an} = \frac{V_{dc}}{4}$.
3. Jika S3, S4, S1', dan S2' maka $V_{an} = 0$.
4. Jika S4, S1', S2' dan S3' ON maka $V_{an} = -\frac{V_{dc}}{4}$.
5. Jika S1', S2', S3', dan S4' ON maka $V_{an} = -\frac{V_{dc}}{2}$.

2.2.3 Inverter Multilevel *Flying Capacitor*

Inverter ini merupakan rangkaian seri sel *switching* yang di *clamped* kapasitor. Kapasitor mentransfer sejumlah tegangan terbatas ke perangkat listrik. Inverter ini memiliki *switching* seperti pada *diode clamped*.



Gambar 5 Inverter multilevel *Flying Capacitor*

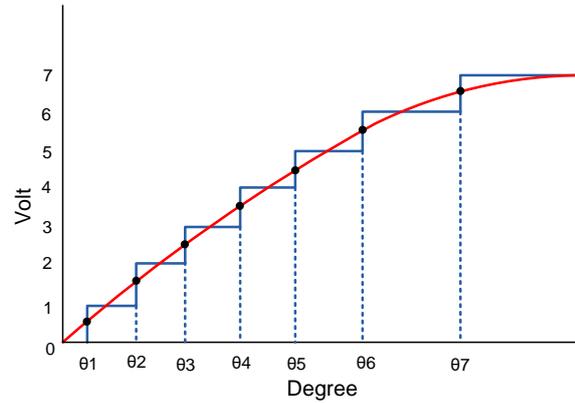
Kapasitor *clamping* C1, C2, C3, dan C4 masing-masing akan mempertahankan agar tegangan pada setiap saklar statis inverter selalu sama dengan tegangan sebuah kapasitor.

Proses pembentukan lima level tegangan keluaran inverter ini dapat dijelaskan sebagai berikut: (Khadse et al., 2017)

1. Jika S1, S2, S3, dan S4 ON maka $V_{an} = V_{dc}$.
2. Jika S1, S2, S3, S5, S6, dan S7 ON maka $V_{an} = \frac{V_{dc}}{2}$.
3. Jika S1, S2, S5, S6 dan S7 ON maka $V_{an} = 0$.
4. Jika S1, S5, S6 dan S7, ON maka $V_{an} = -\frac{V_{dc}}{2}$
5. Jika S1, S5, S6, S7, dan S8 ON maka $V_{an} = -V_{dc}$

2.3 Nearest Level Control Pulse Width Modulation (NLCPWM)

Nearest Level Control PWM (NLCPWM) merupakan metode modulasi untuk menghasilkan bentuk gelombang yang mendekati sinusoidal. Tepi naik sinyal keluaran di masing-masing level dibagi menjadi dua bagian yang disebut tingkat atas dan tingkat bawah yang sama besar. Titik tengah ini merupakan jalur sinyal referensi.



Gambar 6 Nearest Level Control Pulse Width Modulation (NLCPWM)

Lebar pulsa pada masing-masing level berbeda-beda. Lebar pulsa masing-masing level mendekati sinyal referensi. NLCPWM ini menghasilkan nilai sudut perubahan level.

Sudut perubahan level dapat diperkirakan dengan menggunakan salah satu dari dua metode perhitungan yaitu:

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{i-0,5}{n} \right) \quad (1)$$

$$\theta_i = i \left(\frac{180}{2(n+1)} \right) \quad (2)$$

dimana,

$$n = \frac{N_{level}-1}{2}$$

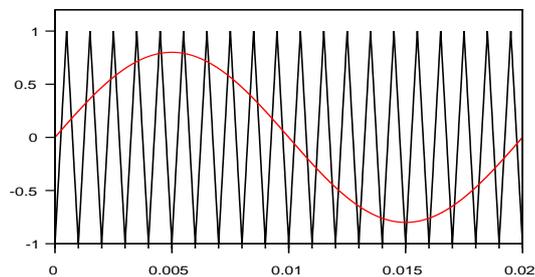
$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Persamaan 1 merupakan metode perhitungan *Half Height* dan Persamaan 2 merupakan metode perhitungan *Half Equal Phase* (Ramu et al., 2022a).

2.4 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan metode untuk mengatur lebar pulsa dalam suatu periode. PWM banyak digunakan untuk kontrol kecepatan motor, daya, regulator tegangan dan masih banyak lagi. PWM memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang berbeda-beda. Dalam teknik PWM tegangan diperoleh hanya dengan mengubah periode *on* dan *off* pulsa *switching*. Metode yang sering digunakan pada inverter adalah PWM berbasis pembawa untuk menghasilkan pulsa *switching*. Dengan membandingkan sinyal

referensi dengan sinyal pembawa (segitiga) dapat menghasilkan pulsa *switching* (Thiyagarajan & Somapasundaram, 2017).



Gambar 7 *Pulse Width Modulation (PWM)*

Jumlah pulsa per setengah siklus bergantung pada indeks modulasi frekuensi (mf) yang diperoleh dengan persamaan:

$$m_f = \frac{f_c}{f_{ref}} \quad (3)$$

dimana,

f_c = frekuensi sinyal pembawa

f_{ref} = frekuensi sinyal referensi

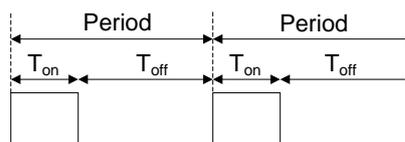
PWM tidak dapat terpisahkan dari *duty cycle*, dimana *Duty Cycle* adalah persentasi dari satu periode sinyal *high* dibanding dengan periode total yang berupa sinyal *high* dan *low*.

$$Duty Cycle = \frac{T_{on}}{T_{total}} \times 100\% \quad (4)$$

dimana,

T_{on} = waktu sinyal aktif

T_{total} = periode total berupa (waktu *high* + waktu *low*)



Gambar 8 *Duty cycle*

2.5 Total Harmonic Distortion (THD)

Harmonik adalah gelombang yang memiliki frekuensi kelipatan bulat dari gelombang referensinya misalnya, frekuensi fundamental adalah f , maka harmonik kedua adalah $2f$, harmonik ketiga adalah $3f$ dan seterusnya. Adanya harmonik dapat menyebabkan kerugian daya, kerusakan peralatan listrik, dapat menyebabkan panas berlebih pada trafo, motor, dan peralatan listrik lainnya. Hal ini di sebabkan karena gelombang sinyal akibat harmonik ini tidak lagi sinusoidal. Harmonik dihasilkan dari beban listrik *non-linear* seperti peralatan elektronik.

Total Harmonik Distortion adalah istilah yang digunakan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya (Rusdi et al., 2019).

$$THDv = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \quad (5)$$

$$THDi = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \quad (6)$$

dimana,

V_n = komponen harmonik tegangan

n = orde harmonik

V_1 = komponen fundamental tegangan

I_n = Komponen harmonik arus

I_1 = Komponen fundamental arus

Inverter yang kami rancang termasuk inverter tegangan rendah. Menurut standar IEEE 519: 2022, THD maksimum yang diizinkan pada tegangan rendah adalah 8% dengan harmonik individu 5% yang dapat di lihat pada Tabel 1 (IEEE Standards, 2022)

Tabel 1 Standar THD IEEE 519: 2022

Tegangan Sistem	Harmonik Individu	Total Harmonik Distorsi
	(%)	(%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV < $V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 Kv < $V \leq 161$ kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5

2.6 Analisis Daya

Daya adalah laju energi listrik yang dihantarkan dalam suatu rangkaian listrik. Satuan daya dalam Sistem Internasional (SI) adalah Watt (W). Daya listrik dalam rangkaian dapat hitung dengan menggunakan rumus.

$$P = V \times I \quad (7)$$

$$P = I^2 \times R \quad (8)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (9)$$

dimana,

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

R = Resistansi (Ω)

Persamaan 7 merupakan daya dalam arus dan tegangan, Persamaan 8 merupakan daya dalam resistansi dan arus, dan Persamaan 9 merupakan daya dalam tegangan dan resistansi.

Daya terdiri dari 3 jenis yaitu:

1. Daya Aktif (P) merupakan daya yang benar-benar dikonsumsi oleh perangkat. Dinyatakan dalam watt (W).

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad (10)$$

2. Daya Reaktif (Q) merupakan daya yang disimpan dan dilepaskan oleh komponen reaktif seperti induktor dan kapasitor dalam rangkaian AC. Dinyatakan dalam satuan Volt-Ampere Reaktif (VAR).

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad (11)$$

3. Daya Semu (S) merupakan kombinasi dari daya aktif dan daya reaktif dalam rangkain AC. Dinyatakan dalam satuan Volt-Ampere (VA).

$$S = V \times I \quad (12)$$

2.6.1 Faktor Daya

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif dan daya semu. Nilainya berkisar antara nol hingga 1. Semakin mendekati 1 maka faktor daya dapat di katakan baik.

$$PF = \frac{P}{S} \quad (13)$$

dimana,

PF = Faktor daya

P = Daya Aktif (Watt)

S = Daya Semu (VA)

2.6.2 Efisiensi Daya

Efisiensi daya adalah perbandingan antara daya keluaran yang berguna dengan daya masukan yang digunakan oleh sistem atau perangkat. Efisiensi daya dinyatakan dalam persen (%).

$$Efisiensi = \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \times 100\% \quad (14)$$

dimana,

V_{out} = tegangan output inverter

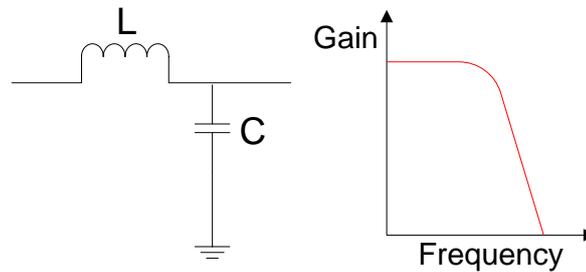
V_{in} = tegangan input inverter

2.7 Low Pass Filter

Filter LC adalah jenis filter elektronik yang terdiri dari induktor (L) dan kapasitor (C) yang digunakan untuk mengurangi *noise* atau sinyal yang tidak diinginkan dari suatu rangkaian listrik. Induktor (L) menyimpan energi dalam bentuk medan magnet ketika arus listrik mengalir melaluinya. Induktor memiliki reaktansi yang meningkat seiring dengan meningkatnya frekuensi sinyal yang melewatinya, sehingga efektif untuk menyaring frekuensi tinggi. Sedangkan, kapasitor (C) menyimpan energi dalam bentuk medan listrik ketika tegangan diterapkan padanya. Kapsitor memiliki reaktansi yang menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi sinyal yang melewatinya, sehingga efektif untuk menyaring frekuensi rendah.

Pada frekuensi rendah, reaktansi induktor kecil, sehingga arus dapat mengalir dengan mudah melalui induktor. Pada saat yang sama, reaktansi kapasitor besar, sehingga arus tidak mudah melewatinya. Dengan demikian, sinyal berfrekuensi rendah di lewatkan. Sedangkan, pada frekuensi tinggi, reaktansi induktor meningkat, sehingga induktor menghalangi aliran arus. Sebaliknya, kapasitor memiliki reaktansi kecil pada frekuensi tinggi, sehingga arus berfrekuensi

tinggi lebih mudah melewati kapasitor dan di buang ke *ground*. Hasilnya, sinyal berfrekuensi tinggi di saring keluar.



Gambar 9 Rangkain *low pass filter*

2.8 Perbandingan Inverter Multilevel Penelitian Terdahulu dan Penelitian ini

Inverter pada penelitian ini akan dibandingkan dengan penelitian terdahulu. Semua jenis inverter yang digunakan adalah inverter CHB yang dimodifikasi. Ini bertujuan untuk membandingkan penggunaan jumlah saklar, jumlah sumber DC, level inverter, dan THD yang dihasilkan dari masing-masing inverter.

Tabel 2 Perbandingan penelitian terdahulu dan penelitian ini

Referensi	Level inverter	N_{DC}	N_s	Komponen tambahan	THD (%)
(Yarlagadda & Verma, 2022)	13 level	2	8	1 Kapasitor	2,75
(Devadoss et al., 2023)	15 level	3	10	Tidak ada	Arus = 6,36 Tegangan = 10,38
(Ramu et al., 2022)	17 level	4	10	Tidak ada	Arus = 0,61 Tegangan = 4,84
(Umashankar et al., 2013)	7 level	4	5	Tidak ada	16,12
(Bektaş, 2024)	7 level	3	10	Tidak ada	6,66
(Sánchez Vargas et al., 2022)	7 level	3	12	Tidak ada	10,54
(Vijayakumar et al., 2022)	7 level	2	6	Tidak ada	5,4
(Kubendran et al., 2022)	9 level	2	16	6 Kapasitor dan 2 Induktor	Arus = 1,34 Tegangan = 5,44
(Abad et al., 2023)	19 level	3	12	Tidak ada	1,02
(Thakre et al., 2023)	11 level	5	8	4 Dioda	9,01
(Jayaraman & Sreedevi, 2017)	5 level	2	8	Tidak ada	Tanpa filter = 26,90 Filter = 0,82
Penelitian ini	15 level	3	7	4 Dioda	Tanpa filter = 5,6
	31 level	4	8	5 Dioda	Filter = 1,9 2,94