

Rancang Bangun Inverter Satu Fasa 7-Tingkat Menggunakan Filter Pasif L-C

Abdul Rosyid Al-Ubaedah Lubis[1], Ayong Hiendro[2], Syaifurrahman[3], Dedy Suryadi[4], Managam Rajagukguk[5]
Program Studi Teknik Elektro Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura
Email : ar.rosyid00@gmail.com

ABSTRAK

Energi listrik merupakan salah satu komponen terpenting dalam perkembangan ekonomi suatu daerah. banyak penelitian menciptakan inovasi baru tentang energi terbarukan, sebagian besar energi terbarukan memiliki hasil energi listrik yang sifatnya variabel, sehingga diperlukan peralatan penyimpanan energi listrik. Penyimpanan energi listrik di dalam reaksi kimia baterai berbentuk tegangan DC, sehingga perlu alat untuk mengonversi tegangan DC menjadi tegangan AC. Inverter adalah salah satu komponen penting catu daya yang berfungsi mengubah sumber tegangan masukan DC ke bentuk sumber tegangan keluaran AC. Oleh karena itu, dirancang suatu multilevel inverter Satu Fasa 7-Tingkat Menggunakan Filter Pasif L-C pada sisi keluaran inverter yang menggunakan Teknik *Selektif Harmonik Elimination* PWM (SHEPWM) untuk merancang *switching* yang digunakan untuk mengontrol sakelar di inverter. Pengontrolan sakelar menggunakan mikrokontroler Arduino dengan menggunakan 10 pin out ada di dalam mikrokontroler, Hasil pengukuran menunjukkan bahwa persentase galat pada frekuensi 16,66% dan mengalami drop tegangan sebesar 63,9% .

Kata kunci: inverter, multilevel inverter, filter pasif L-C, SHEPWM

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan komponen penting dalam perkembangan ekonomi suatu daerah [1]. Permintaan energi listrik semakin meningkat seiring dengan perkembangan teknologi yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari, baik untuk kepentingan pribadi maupun industri. Namun, sumber bahan baku energi fosil yang terbatas menjadi masalah yang harus diatasi. Solusi yang saat ini banyak digunakan adalah sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan [2]. Dalam konversi energi, keluaran dari sistem harus sesuai dengan aplikasi standar, baik untuk masalah ekonomi maupun keluaran sistem yang sesuai dengan standar internasional. Paket baterai dan transformator sering digunakan untuk menyimpan energi [3]. Oleh karena itu, banyak penelitian yang dilakukan untuk menciptakan inovasi dalam energi terbarukan, karena sebagian besar energi terbarukan memiliki hasil energi listrik yang sifatnya variabel dan memerlukan peralatan penyimpanan energi. Baterai adalah alat yang mengandung reaksi kimia yang memungkinkan untuk menyimpan energi listrik dan dapat diubah kembali menjadi energi listrik saat diberi beban pada terminal baterai. Penyimpanan energi listrik dalam reaksi kimia baterai berbentuk tegangan DC (Direct Current), sehingga perlu alat untuk mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC (Alternating Current) [4].

Inverter adalah salah satu komponen penting dalam catu daya yang berfungsi untuk mengubah sumber tegangan masukan DC menjadi sumber tegangan keluaran AC. Secara definisi, rangkaian inverter yang ideal adalah rangkaian yang tidak menghasilkan riak di sisi masukan dan menghasilkan sinyal sinusoidal murni di sisi keluaran, baik yang terkontrol arus/tegangan, terkontrol frekuensinya, atau keduanya [5].

Multilevel inverter adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC menjadi tegangan AC dengan menghasilkan output yang mirip dengan tangga sinusoidal dari beberapa input DC. Inverter multilevel digunakan terutama di daerah pembangkitan terdistribusi dan sangat berguna dalam menghasilkan sinyal keluaran AC dengan frekuensi operasi yang lebih rendah dibandingkan dengan inverter jembatan konvensional. Keuntungan utama dari multilevel inverter

adalah kerugian *switching* yang lebih rendah dan dapat dikontrol dalam hal komponen harmonik dari tegangan keluaran dan arus beban. Hal ini membuat inverter multilevel lebih disukai dalam aplikasi industri seperti penggerak motor, catu daya tak terputus, dan sistem transmisi AC yang fleksibel [6]. Multilevel Inverter adalah jenis inverter yang memiliki tegangan keluaran bertingkat berdasarkan jumlah levelnya. Multilevel Inverter diperkenalkan pada awal tahun 1975 dengan konverter tiga tingkat, yang menghasilkan gelombang keluaran yang mendekati sinusoidal murni sehingga memiliki jumlah harmonisa yang lebih rendah dibandingkan dengan inverter konvensional. Multilevel Inverter semakin populer dalam berbagai aplikasi daya, seperti filter aktif, penggerak kendaraan listrik, sumber daya DC, sistem tautan frekuensi, antarmuka utilitas sumber daya energi terbarukan, pengaturan tegangan, kontrol motor induksi, dan lain-lain [7]. Berdasarkan referensi [8]-[10], terdapat tiga topologi dasar multilevel inverter yang banyak digunakan saat ini, yaitu *Neutral Point Clamped Multilevel Inverter*, *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter*, dan *Flying Capacitor Multilevel Inverter*. Keuntungan dari Multilevel Inverter dapat dilihat dari referensi [11]-[12], diantaranya tegangan rendah pada komponen saklar daya, pengurangan *Total Harmonic Distortion* (THD) pada tegangan keluaran, *Interferensi Elektromagnetik* (EMI) rendah, operasi pada frekuensi penyaklaran yang lebih tinggi dan frekuensi fundamental, serta pengurangan ukuran filter. Meskipun lebih baik dibandingkan inverter konvensional, MLI yang beroperasi pada frekuensi rendah masih mengandung harmonisa orde rendah pada tegangan dan arus keluaran yang berdampak negatif pada sistem kelistrikan. Harmonisa orde rendah lebih berbahaya daripada harmonisa orde tinggi karena berada dekat dengan frekuensi dasar dan memiliki amplitudo yang tinggi. Harmonisa yang dihasilkan dapat menimbulkan rugi-rugi daya pada proses penyaklaran dan menurunkan kualitas daya, sehingga peralatan listrik dan mekanik cepat rusak.

Satu rangkaian *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter dihubungkan secara seri dengan beberapa suplai DC terisolasi untuk menghasilkan bentuk gelombang bertingkat. Tegangan output adalah jumlah dari semua level tegangan yang dihasilkan oleh setiap rangkaian.

Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter memiliki banyak keunggulan seperti modularitas, frekuensi switching yang rendah, jumlah komponen per fase yang lebih sedikit, dll. Namun, *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter membutuhkan lebih banyak sumber daya DC individual. *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan nilai sumber DC, simetris dan asimetris. *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter simetris memiliki tegangan yang sama pada setiap sumber sedangkan *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter asimetris memiliki nilai tegangan yang berbeda[13] Banyak penelitian telah dilakukan terkait dengan topologi, aplikasi, dan teknik kontrol *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter. Studi *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter satu fasa 3 tingkat, 5 tingkat, dan 7 tingkat dibahas dalam [14]. Simulasi dilakukan dengan menggunakan MATLAB dengan menggunakan metode PD-PWM untuk mendapatkan analisis THD dari masing-masing level. Dalam [13], *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter satu fasa dirancang dengan komponen penyaklaran yang dikurangi. Konfigurasi *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter yang dirancang menghasilkan keluaran 7 tingkat menggunakan tiga sumber DC bersama dengan tiga inverter H-bridge. Hasilnya, inverter dapat bekerja dengan baik dan mengurangi THD dan rugi-rugi daya yang dihasilkan oleh komponen switching [15].

Pemasangan filter pasif dianggap sebagai cara yang tepat untuk mengurangi sinyal harmonisa. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ma'arif Hasan [16], diketahui bahwa filter pasif mampu mereduksi harmonisa dan meredam ripple pada keluaran inverter satu fasa. Harmonisa dapat menyebabkan masalah-masalah seperti kualitas daya, degradasi peralatan, dan kualitas bentuk gelombang sinusoidal pada keluaran inverter. Selain itu, sinyal keluaran inverter harus memiliki karakteristik yang baik dan sesuai dengan grid. Penapisan filter pasif adalah solusi yang paling sederhana, dengan menggunakan elemen pasif seperti resistansi, induktansi, dan kapasitansi. Dalam penelitian ini, multilevel inverter satu fasa 7-tingkat model *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter akan dikombinasikan dengan filter pasif L-C. *Cascaded H-Bridge* Multilevel Inverter dipilih karena memiliki modularitas, frekuensi switching yang rendah, dan jumlah komponen per fase yang lebih sedikit.

2. METODOLOGI PENELITIAN

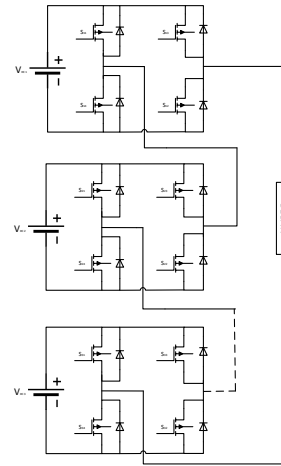
A. Multilevel Inverter

Multilevel Inverter adalah konverter yang mengubah besaran DC menjadi besaran AC dimana keluaran (*output*) yang dihasilkan mempunyai beberapa (lebih dari dua) level tegangan. Tegangan *output* multilevel inverter kualitasnya lebih baik dan multilevel inverter dapat mengurangi kandungan harmonik. Multilevel inverter digunakan pada aplikasi seperti *adjustable speed AC motor drives*, *uninterruptible power supplies* (UPS), dan menghubungkan sumber *renewable energy photovoltaics* ke *power grid*.

Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter merupakan inverter yang menggunakan beberapa rangkaian H-Bridge untuk mengubah tegangan DC menjadi AC. H-Bridge adalah sebuah rangkaian elektronik yang digunakan untuk mengendalikan dan memutar arah arus DC. Dalam *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter*, beberapa rangkaian H-Bridge digabungkan bersama untuk

menghasilkan output AC dengan level tegangan yang lebih tinggi dari inverter biasa.

Multilevel inverter *cascaded* tersusun dari N unit inverter satu-fasa dan N unit sumber tegangan DC. Inverter satu-fasa tersebut tersambung secara seri sehingga membentuk multilevel inverter sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 1 Setiap inverter satu-fasa membangkitkan tegangan AC. Selanjutnya penjumlahan tegangan AC yang dibangkitkan oleh masing-masing inverter satu-fasa ($V_{AC1} + V_{AC2} + \dots + V_{ACN}$) akan menghasilkan tegangan AC bertingkat seperti ditunjukkan dalam gambar 2. Dengan melalui proses pensaklaran yang tepat maka multilevel inverter mampu membangkitkan tegangan AC menengah hingga tinggi dari sumber tegangan DC rendah[20].



Gambar 1. Topologi Multilevel Inverter H-Bridge

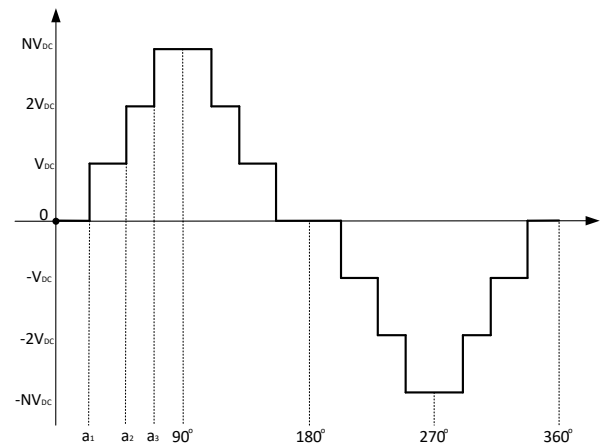
Untuk mengetahui level tegangan dari multilevel inverter dapat dihitung melalui persamaan (1).[20].

$$m = 2H + 1 \quad (1)$$

Dimana : H adalah jumlah H-bridge pada setiap cell.

m adalah jumlah tingkatan level output

Tegangan *output* dari setiap inverter H-bridge adalah $+V_{dc}$, $-V_{dc}$, dan 0. Untuk tegangan *output* multilevel inverter adalah kombinasi dari masing-masing inverter H-bridge. Jika H sumber inverter maka akan memiliki m level *output* yaitu $+NV_{dc}$, $+2V_{dc}$, $+V_{dc}$, $-V_{dc}$, $-2V_{dc}$, $-NV_{dc}$ dan 0. Berikut gambar 2 tegangan multilevel inverter.



Gambar 2. Tegangan Multilevel Inverter

Setiap H-bridge dapat yang digunakan untuk amplitudo atau mengontrol harmonik. Setiap H-bridge beroperasi pada sudut fase yang berbeda α , maka

penjumlahan dari tiga sumber terpisah dapat dilihat pada Gambar 2.

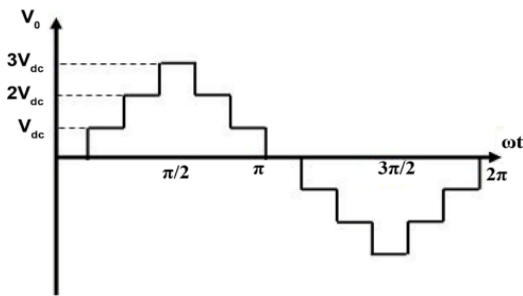
B. Selective Harmonic Elimination PWM

Teknik *Selective Harmonic Elimination* PWM didasarkan pada teori frekuensi *switching* dasar dan bergantung pada eliminasi urutan *harmonic* yang ditentukan. Pemikiran utama dari Teknik ini tergantung pada karakteristik sudut pensaklaran dari orde *harmonic* untuk menghilangkan dan mendapatkan ekspansi deret *fourier* dari tegangan luluh. Ini memungkinkan frekuensi *switching* yang lebih rendah untuk digunakan yang menyebabkan kerugian *switching* yang lebih rendah dan efektivitas yang lebih tinggi, ketika semua dikatakan dalam deret *fourier*, diberikan persamaan (2). [24].

$$V(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2)$$

Untuk situasi ini, perpanjangan deret *fourier* dari bentuk gelombang tegangan luluh diberikan pada persamaan (3) seperti yang diambil setelahnya.

$$V(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \sin n\omega t) \quad (3)$$



Gambar 3. Bentuk Gelombang tegangan hasil dari inverter 7-tingkat

Dimana $a_n = a_0 = 0$ (dimana gelombang seperempat simetris)

Dari gambar 3. didapatkan persamaan (4) [24].

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} V_{dc} \sin n\omega t d\omega t \quad (4)$$

Kita mendapatkan persamaan penyelesaian yaitu.

$$b_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos na \quad (5)$$

Untuk MLI -7 level untuk tiga sumber DC maka persamaan diberikan [24].

$$b_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sum_{i=1}^S \cos na_i \quad (6)$$

Dimana $n = 1, 3, 5$ dan $S = 5$ yang menunjukkan jumlah sumber DC. Tujuan SHEPWM adalah untuk menghapus harmonik orde rendah. Dalam jumlah harmonik yang dapat dihapus ini setara dengan $s-1$ *i.e.*, 2 diambil dari harmonik 3 dan 5. Sepanjang garis ini untuk memenuhi komponen harmonik dasar dan untuk menghilangkan harmonik 3 dan 5. Persamaan (6) diperpanjang sebagai tiga pernyataan matematika non linier dengan tiga sudut seperti yang diberikan dalam persamaan berikut: [24].

$$b_1 = V_1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} = [\cos(a_1) + \cos(a_2) + \cos(a_3)] \quad (7)$$

$$b_3 = V_3 = \frac{4V_{dc}}{3\pi} = [\cos(3a_1) + \cos(3a_2) + \cos(3a_3)] \quad (8)$$

$$b_5 = V_5 = \frac{4V_{dc}}{5\pi} = [\cos(5a_1) + \cos(5a_2) + \cos(5a_3)] \quad (9)$$

Dari persamaan (7)-(9) maka diperoleh persamaan berikut:

$$\frac{4}{\pi M} [\cos(a_1) + \cos(a_2) + \cos(a_3)] = 1 \quad (10)$$

$$\frac{4}{3\pi M} [\cos(3a_1) + \cos(3a_2) + \cos(3a_3)] = 0 \quad (11)$$

$$\frac{4}{5\pi M} [\cos(5a_1) + \cos(5a_2) + \cos(5a_3)] = 0 \quad (12)$$

Dalam pernyataan matematika (10)-(12), untuk menghilangkan harmonik ketiga dan ketujuh V_3 dan V_5 diatur ke nol sehingga diperoleh perbandingan (13)-(15). Untuk menentukan sudut perpindahan, persamaan matematika yang menyertainya yaitu [25]:

$$[\cos(3a_1) + \cos(3a_2) + \cos(3a_3)] = 3M \quad (13)$$

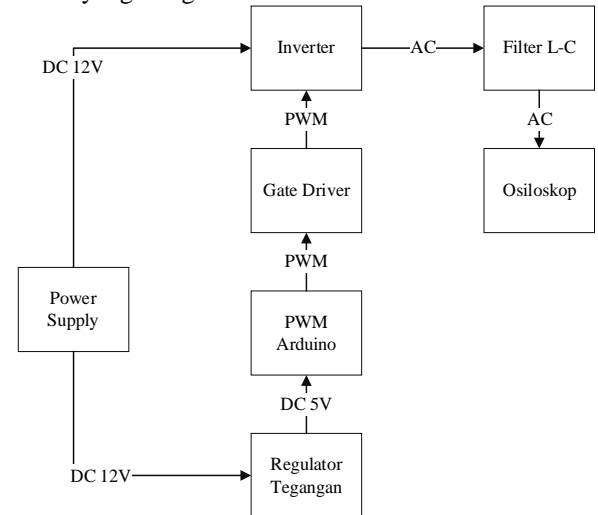
$$[\cos(3a_1) + \cos(3a_2) + \cos(3a_3)] = 0 \quad (14)$$

$$[\cos(5a_1) + \cos(5a_2) + \cos(5a_3)] = 0 \quad (15)$$

Dimana M berbicara tentang perubahan indeks modulasi dari 0 ke 1. Sudut *switching* $a_1, a_2,$ dan a_3 tidak boleh bernilai $\frac{\pi}{2}$. Perbandingan tersebut dipahami oleh Newton Raphson.

C. Perancangan Sistem

Penelitian ini memiliki tujuan untuk menghasilkan sebuah alat inverter satu fasa 7-tingkat dengan filter L-C yang efisien dan memenuhi standar yang diharapkan. Dalam penelitian ini, mikrokontroler Arduino digunakan sebagai pengendali utama dalam proses pembuatan dan pengujian alat. Fungsi dari 10 pin pada mikrokontroler Arduino adalah sebagai output dalam proses pensaklaran yang menentukan bentuk gelombang yang dihasilkan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil dari penelitian ini akan memberikan solusi dalam hal pembuatan alat inverter satu fasa 7-tingkat yang efisien dan memenuhi standar yang diinginkan.



Gambar 4. Skema rangkaian sistem inverter

a. Perancangan dan Pembuatan Program Arduino

Supaya menghasilkan bentuk gelombang tegangan yang optimal, maka untuk inverter 7-level memerlukan 3 sudut pensaklaran optimum agar harmonisa ke-3 dan ke-5 tereliminasi, maka tiga persamaan matematik non linier dengan tiga sudut seperti yang diberikan dalam persamaan (7)-(9):

$$\frac{4}{\pi M} [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3)] = 1$$

$$\frac{4}{3\pi M} [\cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) + \cos(3\theta_3)] = 0$$

$$\frac{4}{5\pi M} [\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3)] = 0$$

Hasil dari perhitungan sudut-sudut optimum [28] disajikan dalam tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Dengan Metode SHEPWM

M	θ_1	θ_2	θ_3
2.25000	11.7938	43.2113	86.59320
2.30000	12.0709	41.5484	85.40390
2.35000	12.5437	39.8180	84.17600
2.40000	13.2300	37.9980	82.90800
2.45000	14.1397	36.0643	81.59510

Untuk menghasilkan gelombang yang berbeda pada setiap level tingkat inverter, maka diperlukan sudut penyalan yang berbeda pula. Dalam perhitungan sudut penyalan, kita akan menggunakan data M yang bernilai 2.4 dan tiga buah sudut yang masing-masing bernilai dengan $\theta_1=13.23$, $\theta_2=37.998$, $\theta_3=81.908$. Selain itu, kita juga akan menggunakan tegangan $V_{DC}=12$ Volt. Dengan menggunakan data tersebut, kita dapat menghitung sudut penyalan pada inverter dengan menggunakan rumus yang telah ditentukan.

Diket $M = 2.4$ $\theta_3 = 81.908$ $T = 20 \text{ ms}$

$\theta_1 = 13.23$ $f = 50 \text{ Hz}$

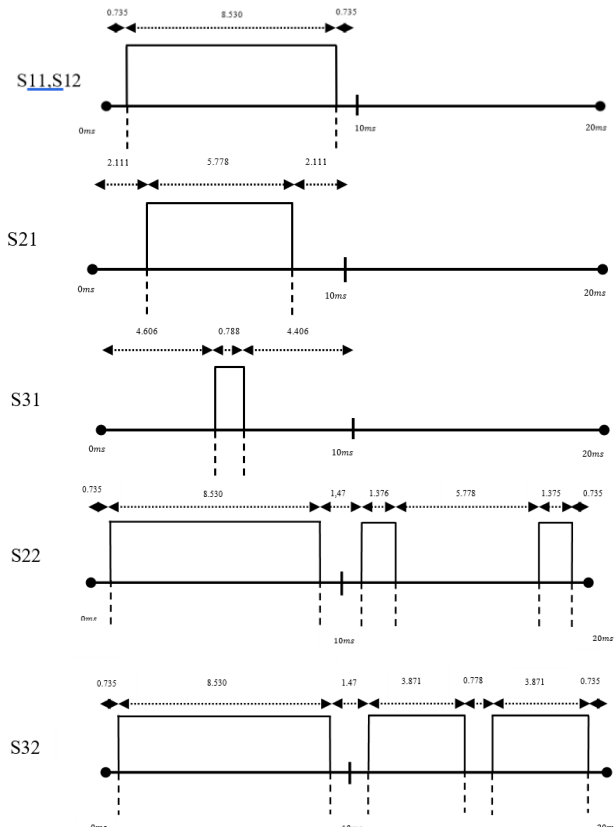
$\theta_2 = 37.998$ $V_{DC}: 12V$

Dit $t_1 = \dots ?$ $t_2 = \dots ?$ $t_3 = \dots ?$

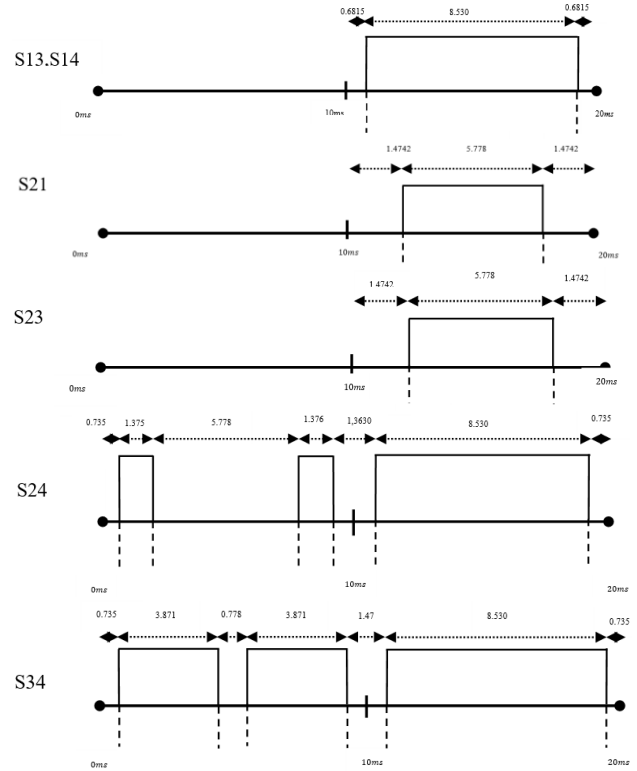
$t_n = \frac{\theta_n}{360} \times T$ $t_1 = \frac{13.23}{360} \times 20 = 0.735 \text{ ms}$

$t_2 = \frac{37.998}{360} \times 20 = 2.111 \text{ ms}$ $t_3 = \frac{81.908}{360} \times 2 = 4.606 \text{ ms}$

Dari perhitungan waktu pensaklaran, maka rancangan pulsa pensaklaran inverter 7-level sebagai berikut:

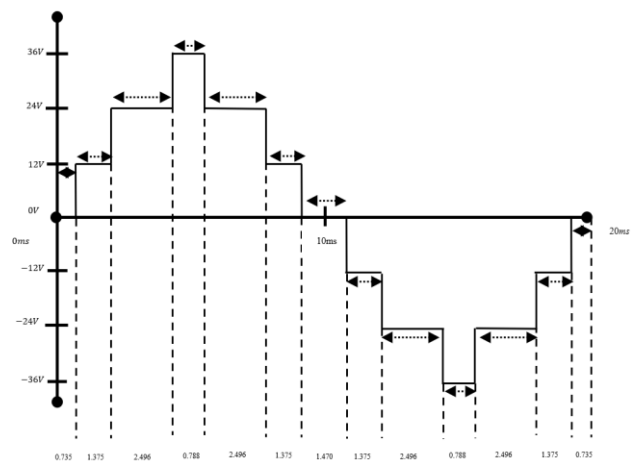


Gambar 5. Sinyal pulsa Pensaklaran S11, S12, S31, S22, dan S32



Gambar 6. Sinyal pulsa Pensaklaran S13, S14, S23, S24, dan S34

Berdasarkan rancangan pulsa pensaklaran inverter 7-level, diharapkan dapat memperoleh hasil gelombang inverter 7-level yang sesuai dengan yang direncanakan. Dengan mempertimbangkan hasil dari rancangan pulsa pensaklaran, diprediksikan bahwa gambar 7 akan menunjukkan hasil gelombang inverter 7-level yang diinginkan. Ini berarti bahwa gelombang yang dihasilkan akan sesuai dengan yang direncanakan dan memenuhi kriteria yang diinginkan seperti frekuensi, amplitudo, dan bentuk gelombang.



Gambar 7. Keluaran Inverter 7-level

Dari hasil pengamatan pada gambar 7, keluaran inverter 7-level memiliki bentuk gelombang yang unik dan khas. Oleh karena itu, dapat dibuat tabel pensaklaran sebagai acuan dalam proses pembuatan program pada software Arduino. Tabel 2 menyajikan data yang berkaitan dengan pensaklaran inverter 7-tingkat, sehingga dapat digunakan sebagai panduan dalam membuat program pada software Arduino. Keterangan lebih lanjut tentang tabel pensaklaran dapat ditemukan pada gambar 7 dan tabel 2 yang memperlihatkan bagaimana keluaran inverter 7-level

dapat digunakan sebagai acuan dalam membuat program pada software Arduino.

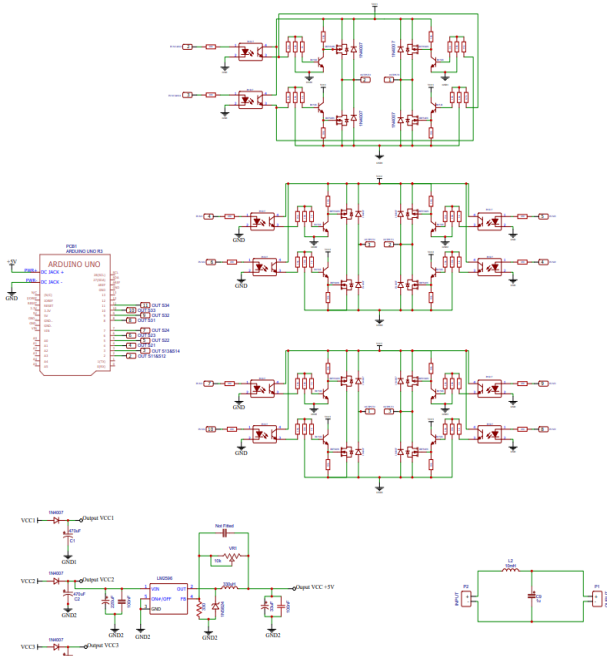
Tabel 2. Pensaklaran Inverter 7-level

SW/Pin	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.735	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.375	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1
2.496	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
0.788	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
2.496	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
1.375	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1
1.470	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.375	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
2.496	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1
0.788	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
2.496	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1
1.375	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
0.735	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

b. Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras inverter satu fasa 7-tingkat menggunakan filter L-C dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu : 1. Rangkaian power supply, 2. Rangkaian driver dan Rangkaian inverter, 3. Rangkaian Filter L-C. Perancangan Layout PCB. Secara umum skema rangkaian sistem inverter ditunjukkan pada gambar 4.

Proses pembuatan desain PCB dikerjakan menggunakan aplikasi EasyEDA versi (6.4.32). Perancangan dimulai dengan membuat desain skema rangkaian dengan menempatkan beberapa komponen elektronika yang tersedia di dalamnya. Namun dalam beberapa kasus saat merancang skema, ada komponen yang tidak tersedia di daftar komponen pada aplikasi EasyEDA sehingga mengharuskan pengguna untuk mencari di *library* di internet ataupun membuat desain *library* sendiri.



Gambar 8. Desain Skema multilevel inverter 7-Level

3. PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian terhadap alat dilakukan untuk mengetahui Pengujian yang dilakukan merupakan bagian penting dalam proses pengembangan dan pembuatan alat, karena dengan melakukan pengujian maka dapat memastikan kinerja dari setiap komponen maupun alat secara keseluruhan. Hasil dari pengujian ini sangat penting untuk mengetahui kinerja dari alat dan memastikan bahwa alat tersebut bekerja sesuai dengan spesifikasi dan harapan. Oleh karena itu, pengujian ini memegang peran penting dalam menentukan kualitas dan efektivitas dari alat yang dibuat.

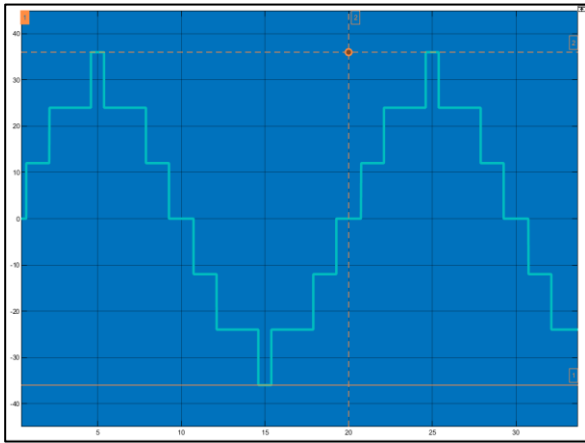
A. Hasil sudut Penyalaan pulsa tegangan dari Arduino. Tabel 3. Hasil keluaran pulsa tegangan Arduino Uno

Pin	Hasil Pengukuran	Pin	Hasil Pengukuran
S11,S12		S22	
S21		S32	
S31		S13,S14	
S23		S24	
S33		S34	

Dari hasil gambar pulsa sudut tegangan menggunakan osiloskop mendapatkan hasil tegangan keluaran dari pulsa Arduino sebesar 5V dan pewaktu pulsa tegangan keluaran Arduino sudah sesuai dengan peneliti rencanakan sebelumnya. Dengan demikian menggunakan mikrokontroler Arduino dapat mengakomodir pensaklaran dengan baik. Selanjutnya masing-masing pin Arduino akan disambungkan ke-rangkaian multilevel inverter sehingga dapat dilihat hasil keluaran tegangan multilevel inverter satu fasa 7-tingkat .

B. Pengukuran tegangan keluaran Multilevel Inverter satu fasa 7 tingkat dengan filter L-C

Pengukuran dilakukan untuk mengetahui kualitas sinyal dari tegangan yang dihasilkan oleh multilevel inverter satu fasa 7 tingkat, pengukuran dilakukan dengan menggunakan osiloskop. Gambar 9 memperlihatkan hasil pengukuran multilevel inverter 7-tingkat.



Gambar 9. Gelombang tegangan keluaran Multilevel Inverter satu fasa 7 tingkat.

Dari gambar 9 menghasilkan beberapa data sebagai berikut:

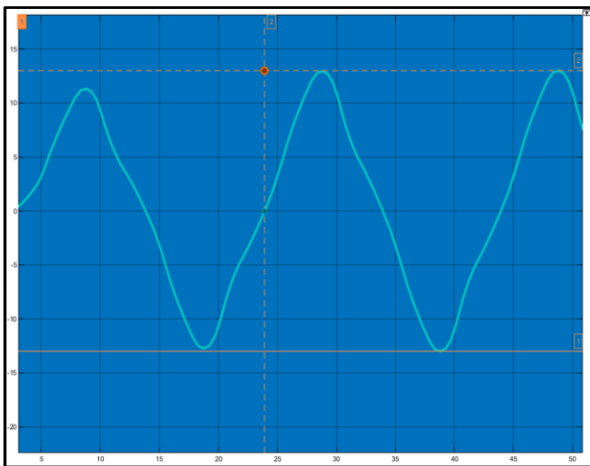
Tabel 4. Data Hasil pengukuran multilevel inverter satu fasa 7-tingkat

Tegangan	Periode	Frekuensi
36 V	20 ms	50Hz

Dalam hasil gambar dan data yang diperoleh melalui pengujian terhadap pengukuran tegangan keluaran multilevel inverter satu fasa 7-tingkat, dapat disimpulkan bahwa hasilnya sesuai dengan studi literatur dan rancangan yang telah dibuat sebelumnya oleh peneliti. Ini menunjukkan bahwa multilevel inverter satu fasa 7-tingkat telah berhasil diterapkan dan menghasilkan output yang sesuai dengan yang diharapkan. Pengukuran tegangan ini juga membantu dalam menilai kinerja dari multilevel inverter 7-tingkat menggunakan filter L-C.

C. Pengukuran tegangan keluaran *Multilevel* Inverter satu fasa 7 tingkat menggunakan filter L-C

Pengukuran dilakukan untuk mengetahui kualitas sinyal dari tegangan yang dihasilkan oleh multilevel inverter satu fasa 7 tingkat menggunakan filter L-C, pengukuran dilakukan dengan menggunakan osiloskop. Gambar 10 memperlihatkan hasil pengukuran multilevel inverter 7-tingkat menggunakan filter L-C.



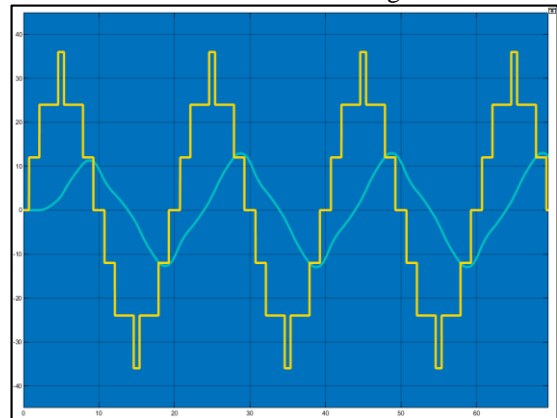
Gambar 10. Gelombang tegangan keluaran Multilevel Inverter satu fasa 7 tingkat dengan menggunakan filter L-C

Dari gambar 10 menghasilkan beberapa data sebagai berikut:

Tabel 5. Data Hasil pengukuran multilevel inverter satu fasa 7-tingkat dengan menggunakan filter L-C

Tegangan	Periode	Frekuensi
13 V	24 ms	41.667 Hz

Dari hasil pengukuran tegangan keluaran Multilevel Inverter satu fasa 7 tingkat dengan filter L-C menggunakan alat ukur osiloskop, dapat diketahui bahwa tegangan keluaran sebesar 13V dan periode dalam satu gelombang sebesar 24ms (41.667Hz). Bentuk gelombang yang dihasilkan oleh multilevel inverter 7 tingkat dengan menggunakan filter L-C cenderung mendekati gelombang sinusoidal, meskipun masih terdapat harmonisa pada gelombang. Terjadi penurunan tegangan dan frekuensi sebesar 23V dan 8,333Hz karena beban yang diterima oleh filter L-C. Perbandingan hasil pengukuran multilevel inverter satu fasa 7-tingkat tanpa menggunakan filter dan menggunakan filter L-C dapat dilihat pada gambar 11 Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa filter L-C berpengaruh pada tegangan dan frekuensi yang dihasilkan oleh Multilevel Inverter satu fasa 7-tingkat.



Gambar 11. Perbandingan hasil pengukuran multilevel inverter satu fasa 7-tingkat tanpa menggunakan filter dan menggunakan filter L-C

4. Kesimpulan

Multilevel inverter satu fasa 7-tingkat dengan menggunakan metode cascade H-bridge dapat menghasilkan tegangan tinggi (36V) dengan sumber yang rendah (12V). Kondisi gelombang keluaran pulsa pensaklaran menggunakan mikrokontroler arduino dapat dengan baik mengakomodir sudut pensaklaran dari hasil optimalisasi metode SHEPWM. Penggunaan Filter pasif L-C memberi pengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan oleh *multilevel* inverter 7-tingkat, menggunakan filter pasif L-C memberikan dampak drop tegangan dan frekuensi masing-masing sebesar 63,9% dari 36V menjadi 13V dan 16,66% dari 50Hz menjadi 41,667Hz.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Sivakumar, P. Saravanan, "A 7-level Diode-Clamped Multilevel Inverter Using L-C Filter and Space Vector Modulation." IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 10, pp. 5309-5318, Oct 2014.
- [2] H. T. Esfanjani and M. T. Hagh, "Harmonic Elimination of Cascade Multilevel Inverters with Non-Equal DC Sources using Particle Swarm Optimization," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 11, pp. 3678-3684, Nov. 2010.

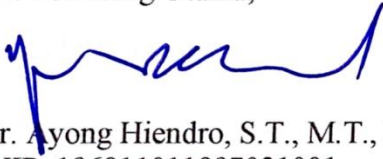
- [3] A. Aviyudi, "Perancangan Filter Lcl Untuk Aplikasi Pada Inverter Satu Fasa Keluaran Photovoltaic," Dissertation, UNIVERSITAS ANDALAS, 2014.
- [4] A. R. Lubis. "Effectiveness of Using LC Passive Filter in Reducing Harmonic Current." *Journal of Electrical Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 1-7, 2017.
- [5] B. Ismail, S. I. S. Hassan, R. C. Ismail, A. R. Haron, and A. Azmi, "Selective Harmonic Elimination of Five-Level Cascaded Inverter using Particle Swarm Optimization," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 6, pp. 5220-5232, 2014.
- [6] J. Rajaiah, V. R. Velmurugan, and V. Parasunath. "Harmonic Minimization in Seven-Level Cascaded Multilevel Inverter Using Evolutionary Algorithm." *Circuits and Systems*, vol. 7, no. 9, pp. 2309-2322, 2016.
- [7] K. Haghdar, "Optimal DC Source Influence on Selective Harmonic Elimination in Multilevel Inverters Using Teaching-Learning-Based Optimization," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 2, pp. 942– 949, Feb. 2020.
- [8] R. A. Rana, S. A. Patel, A. Muthusamy, C. W. Lee, and H. J. Kim, "Review of multilevel voltage source inverter topologies and analysis of harmonics distortions in FC-MLI," *Electron.*, vol. 8, no. 11, 2019.
- [9] A. K. Koshti and M. N. Rao, "A brief review on multilevel inverter topologies," *International Conference on Data Management, Analytics and Innovation*, pp. 187-193, 2017.
- [10] A. Prayag and S. Bodkhe, "A comparative analysis of classical three phase multilevel (five level) inverter topologies," in *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, pp. 1-5, 2016,
- [11] S. B. G. C. Srikanth, and V. Yatnalli, "Review on Multi Level Inverter Topologies and Control Strategies for Solar Power Conversion," *Emit. Int. J. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 295–315, 2020.
- [12] B. G. Babu and M. S. Kalavathi, "Hardware Implementation of Multilevel Inverter using NR, GA, Bee Algorithms," pp. 1-6, Jan. 2021, doi: 10.1109/SeFet48154.2021.9375750.
- [13] A. Anan, "A Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with Reduced Switching Devices and Harmonics," in *2018 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, pp. 222–225, 2018.
- [25] S. N. Dehedkar and A. G. Thosar, "Simulation of Single Phase Cascaded H-Bridge Inverters & THD analysis," in *2018 International Conference on Emerging Trends and Innovations In Engineering And Technological Research (ICETIETR)*, pp. 1– 6, 2018.
- [15] R. Jothi, R. Vasanthi., "Design and Analysis of a 7-level Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with L-C Filter". in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 11, pp. 7127-7136, Nov 2015.
- [16] M. T. D. Hasan, F. A. Samman, and Gassing. "Analysis and Design of Passive Filter for Single Phase Inverter Through Variable Resistive Load Testing." ISBN: 978-602-8509-22-0, pp. 29-35, 2016
- [17] T. Sarikurt, Türev, C. Sezenoğlu, and A. Bahkci, "A Multi-Level Inverter System Design with Multi-Winding Transformer," in *Proceedings of the International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference, IEEE*, pp. 605-610, Sept. 2011.
- [18] B. Ganesh Babu and M. Surya Kalavathi, "Hardware Implementation of Multilevel Inverter using NR, GA, Bee Algorithms," Jan. 2021, doi: 10.1109/SeFet48154.2021.9375750.
- [19] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, 2002.
- [20] M. Pamujula, A. Ohja, R. D. Kulkarni, and P. Swarnkar, "Cascaded 'H' bridge based multilevel inverter topologies: A review," in *2020 International Conference for Emerging Technology, INCET 2020*, pp. 4–10, 2020.
- [21] Schneider, M. Cherem, and C. G. Montoro. "CMOS analog design using all-region MOSFET modelling." Cambridge University Press, 2010.
- [22] M. Ali. "Aplikasi Elektronika Daya Pada Sistem Tenaga Listrik." (2018)
- [23] T. A. Ramadhana, M. Facta, and K. Karnoto. "Design of Full Bridge Inverter with High Frequency Series-Parallel Filter for LED Light Application." *Transient: Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 304-311, 2015.
- [24] V. R. Velmurugan, J. Rajaiah, and V. Parasunath. "Harmonic Minimization in Seven Level Cascaded Multilevel Inverter Using Selective Harmonic Elimination PWM Techniques." *Circuits and Systems*, vol. 7, no. 14, pp. 4322, 2016.
- [25] A. Hiendro and I. Yusuf. "Simulation Analysis of Cascade Multilevel Inverter with Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation Technique." *Journal of Educational and Research Informatics*, vol. 7, no. 1, pp. 18-24, 2021.
- [26] G. Wirsuyana, G. P. Margayasa, I. B. G. M. Linawati, and R. S. Hartati, "Literature Review Metode Reduksi Harmonisa Berbasis Kecerdasan Buatan pada Multilevel Inverter," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 21, no. 1, 2022.
- [28] A. Hiendro, I. Yusuf, Junaidi, T.P. Wigyarianto, and Y.M. Simanjuntak, "Optimization of SHEPWM cascaded multilevel inverter switching patterns," *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, vol. 11, no. 3, pp. 1570- 1578, 2020.

Biografi



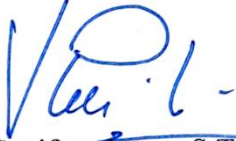
Abdul Rosyid Al-Ubaedah Lubis, Lahir di Kota Pontianak , Kalimantan Barat, Indonesia , pada tanggal 15 Januari 1998. Menempuh Pendidikan Strata 1 (S1) di Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura sejak tahun 2016. Penelitian ini diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro Konsentrasi Teknik Konversi Energi Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.

Mengetahui,
Pembimbing Utama,



Ir. Ayong Hiendro, S.T., M.T., IPM.
NIP. 196911011997021001

Pembimbing Pendamping,



Ir. Syaifurrahman, S.T., M.T., IPM.
NIP. 197009211995121001

