

TEKNIK MODULASI UNTUK *INVERTER* MULTILEVEL *CASCADED H-BRIDGE* (CHB) SATU FASA MENGGUNAKAN ARDUINO MEGA 2560 Modulation Techniques for Single-Phase Multilevel Cascaded H-Bridge (CHB) Inverter Using Arduino Mega 2560

Singgih Ramadhoni^[1], Ida Bagus Fery Citarsa^[1], I Nyoman Wahyu Satiawan^[1],

^[1]Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mataram

Jl. Majapahit 62, Mataram, Lombok NTB, INDONESIA

Email: ferycitarsa@unram.ac.id (Corresponding Author), nwahyus@yahoo.com

ABSTRAK

Inverter Cascaded H-bridge multilevel satu fasa terdiri dari beberapa sel inverter. Suatu sistem kombinasi tegangan DC terhubung ke setiap tegangan input pada setiap sel inverter untuk membentuk suatu gelombang tegangan output multilevel. Inverter menggunakan sakelar elektronik untuk membentuk setiap tegangan dari tegangan DC input. Dalam penelitian ini, suatu investigasi tentang rasio tegangan DC input yang bervariasi dilakukan pada inverter Cascaded H-bridge multilevel satu fasa dua sel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa inverter dapat menghasilkan tegangan 5 level dengan nilai THDv 14,8%, tegangan 7 level dengan nilai THDv 9,9%, dan tegangan 9 level dengan nilai THDv 9,6% masing-masing untuk rasio tegangan DC 1: 1, 1: 2, dan 1: 3.

Kata kunci: Inverter Cascaded H-bridge multilevel satu fasa, Arduino Mega 2560, rasio tegangan DC, THDv

ABSTRACT

Single-phase multilevel Cascaded H-bridge inverter composed of several inverter cells. A DC voltage combination system is connected to each input voltage on each inverter cell to form a multilevel output voltage waveform. The inverter uses an electronic switch to form each voltage from the input DC voltage. In this research, an investigation of varied input DC voltage ratios was performed on a two-cell single-phase Cascaded H-bridge inverter. The result shows that the inverter produces 5 level voltage with 14.8% THDv value, 7 level voltage with 9.9% THDv value, and 9 level voltage with 9.6% THDv value for 1:1, 1:2, and 1:3 DC voltage ratios respectively.

Key words: Single-phase multilevel Cascaded H-bridge inverter, Arduino Mega 2560, DC voltage ratios, THDV

I. PENDAHULUAN

Pada sistem pembangkitan dengan tenaga surya menghasilkan tegangan keluaran searah / Direct current (DC), karena pada umumnya beban listrik menggunakan sumber tegangan bolak balik / Alternating current (AC) maka dibutuhkan sebuah alat konversi yang merubah tegangan DC menjadi AC yaitu inverter. Inverter adalah sebuah peralatan yang dapat mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC, yang bekerja melewati tegangan DC dengan menggunakan sistem penyaklaran yang disusun sedemikian rupa sehingga menghasilkan keluaran tegangan AC. Namun demikian tegangan yang dihasilkan bukan tegangan AC murni seperti halnya generator AC, maka dari itu berbagai upaya dilakukan yaitu dengan

memperbaiki struktur dari sebuah inverter dan memperbaiki teknik modulasi yang digunakan pada inverter tersebut. Dalam perkembangannya, sudah banyak teknik modulasi yang digunakan untuk mengendalikan sakelar-sakelar pada inverter tersebut. Salah satu topologi inverter yang saat ini populer digunakan adalah inverter multilevel Cascaded H-bridge (CHB). Inverter multilevel Cascaded H- Bridge (CHB) adalah suatu inverter multilevel jenis jembatan yang disusun secara bertingkat. Kelebihan utama inverter jenis ini adalah menghasilkan bentuk gelombang tegangan yang baik, menghasilkan distorsi harmonisa yang kecil dan dapat menangani daya yang besar [1].

Pada penelitian ini dirancang inverter multilevel Cascaded H-Bridge (CHB) satu

fasa menggunakan 2 sel *inverter*. Pada Umumnya perbandingan tegangan DC pada tiap sel menggunakan perbandingan tegangan 1:1. Dengan menggunakan teknik modulasi yang tepat dan perbandingan tegangan DC yang berbeda misalnya 1:2 atau 1:3 maka akan diperoleh kombinasi tegangan DC yang lebih banyak pada tegangan keluaran inverter.

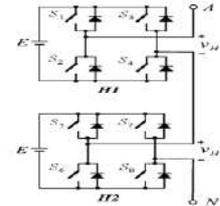
Penelitian ini bertujuan menyelidiki pengaruh perbandingan tegangan masukan yang diberikan pada tiap sel *inverter* terhadap keluaran dari inverter *Cascaded H-Bridge* (CHB). Penelitian ini direalisasikan menggunakan mikrokontroler (MK) Arduino MEGA 2560 dengan teknik pemrograman yang digunakan adalah *software* Simulink Matlab dan bahasa pemrograman pada Arduino IDE (*Integrated Development Environment*).

Inverter merupakan peralatan elektronika daya yang dapat mengkonversi besaran listrik DC (searah) menjadi besaran listrik AC (bolak-balik). Tegangan *output* yang dihasilkan inverter dapat bernilai tetap ataupun berubah-ubah dan dengan frekuensi yang tetap maupun dengan frekuensi yang berubah-ubah. Sumber tegangan *input* inverter dapat menggunakan sumber tegangan DC seperti baterai / aki, penyearah (*rectifier*), tenaga surya, atau sumber tegangan DC yang lainnya. Selain itu Inverter multilevel *cascaded H-bridge* juga dapat menggunakan catu daya terpisah dan catu daya DC tunggal [2].

Bentuk gelombang tegangan *output* yang dihasilkan inverter yang ideal adalah sinusoidal. Tetapi pada kenyataannya bentuk gelombang tegangan *output* mengandung harmonisa tertentu sehingga bentuk gelombang yang dihasilkan tidak sinus murni. Pada penerapan inverter dengan daya rendah dan menengah, gelombang kotak simetri ataupun tidak simetri bisa digunakan, sedangkan untuk penerapan inverter dengan tegangan tinggi dibutuhkan gelombang sinus dengan sedikit distorsi. Dengan teknik pensaklaran melalui piranti Semikonduktor daya kecepatan tinggi yang tersedia kandungan harmonisa dalam bentuk gelombang *output* bisa dikurangi [3].

Inverter multilevel *Cascaded H- Bridge* (CHB) dapat dibedakan menjadi dua yaitu : Inverter CHB dengan sumber tegangan DC yang sama adalah inverter *cascaded* yang disusun dengan masukan sumber tegangan

yang bernilai sama pada tiap selnya. Skema rangkaian inverter multilevel *Cascaded H-Bridge* (CHB) 2 sel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Inverter multilevel *Cascaded H-Bridge* [4]

Gambar 1 memperlihatkan nilai tegangan (E) sumber tiap sel bernilai sama. Ketika sakelar S_1 , S_4 dan S_5 , S_8 terhubung atau dalam kondisi on maka tegangan keluaran sel jembatan (*H-bridge*) *Inverter*₁ dan *Inverter*₂ adalah $V_{H1} = V_{H2} = V_{load}$, dan resultan tegangan fasa inverter adalah $V_{load} = V_{H1} + V_{H2} = 2E$. Sama halnya dengan sakelar S_3 , S_2 dan S_7 , S_6 dalam kondisi on, maka $V_{load} = -2E$. Tiga tingkat tegangan yang lain adalah E , 0 , dan $-E$, sehingga didapatkan 5 tingkat tegangan keluaran sesuai dengan berbagai kondisi switching yang dijumlahkan.

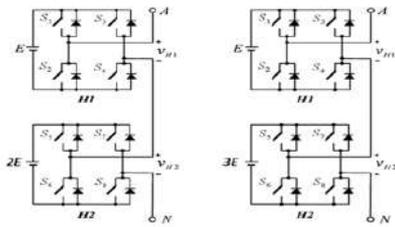
Inverter CHB dengan sumber tegangan DC yang berbeda adalah inverter *cascaded* yang disusun dengan masukan sumber tegangan yang bernilai berbeda antara tiap selnya yang bertujuan untuk meningkatkan tingkatan tegangan keluaran pada gelombang tegangan inverter untuk jumlah sel tertentu.

Beberapa kekurangan yang terkait dengan inverter CHB menggunakan tegangan DC yang berbeda ini yaitu fungsi struktur utama inverter *cascaded* akan berubah. Sebagai tambahan, perancangan pola pensaklaran menjadi jauh lebih sulit karena berkurangnya keadaan pensaklaran yang berlebihan oleh karena itu topologi inverter ini hanya sebatas pada perancangan aplikasi [6 jadi 4].

Gambar 2 dibawah ini memperlihatkan skema rangkaian inverter multilevel *Cascaded H-Bridge* (CHB) dengan menggunakan sumber tegangan yang berbeda.

Gambar 2 menunjukkan dua topologi inverter, di mana tegangan DC pada sel jembatan tidak sama. Pada Gambar 2(a) topologi tujuh tingkat, tegangan dc untuk H1 bernilai E dan H2 bernilai $2E$. Pada kedua lengan inverter dua sel ini mampu menghasilkan tujuh tingkat tegangan yaitu :

3E, 2E, E, 0, -E, -2E dan -3E. Pada Gambar 2(b) topologi sembilan tingkat, tegangan DC H2 bernilai tiga kali lipat dari H1.

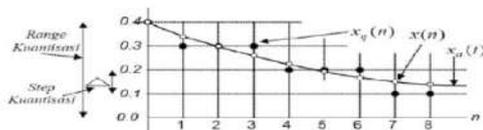


Gambar 2. Rangkaian Inverter multilevel Cascaded H-Bridge (a). 2 sel tujuh tingkat, (b). 2 sel sembilan tingkat. [4]

A. Prinsip Kuantisasi.

Prinsip kuantisasi adalah perubahan sinyal dari sinyal waktu diskrit nilai kontinyu menjadi sinyal digital (waktu diskrit bernilai diskrit). Dimana sinyal digital didapatkan dari perbandingan tingkat-tingkat tiap diskrit sinyal hasil sampling dengan tetapan tingkat tertentu.

Proses kuantisasi mengubah sinyal *continuous valued* $x(n)$ menjadi sinyal *discrete valued* $xq(n)$, yang digunakan untuk merepresentasikan $x(n)$. Salah satu proses kuantisasi yang sering digunakan berbentuk $xq(n) = Q[x(n)]$. Kuantisasi ini menghasilkan kesalahan (*error*) kuantisasi sebesar $eq(n) = xq(n) - x(n)$. Besar kesalahan ini diilustrasikan pada Gambar berikut. Misalnya sinyal analog $xa(t)$ ternyata memiliki nilai antara $0.1 \leq xa(t) \leq 0.4$.



Gambar 3. Kuantisasi sinyal [5]

Sinyal ini disampling pada sebuah frekuensi sampling tertentu menghasilkan $x(n)$. Pada titik-titik sampling, nilai $x(n)$ persis sama dengan $xa(t)$. Namun ketika dikuantisasi, maka hasilnya $xq(n)$ memiliki perbedaan dengan $x(n)$ (dan $xa(t)$ pada titik sampling) sebesar $eq(n)$. Hal ini disebabkan oleh adanya pembatasan nilai yang bisa dimiliki oleh $xq(n)$. Dalam contoh ini, $xq(n)$ hanya diberi kesempatan untuk mempunyai satu dari L buah nilai dari daftar yang terbatas $\{0.0, 0.1, 0.2, \text{dst}\}$. Nilai-nilai sebanyak L itu disebut sebagai *tingkat kuantisasi* dan untuk *Step kuantisasi* (Δ) adalah selisih antara satu tingkat dengan tingkat terdekat berikutnya, yang dalam

contoh ini sebesar 0.1. Tingkat kuantisasi dapat ditentukan dengan persamaan 1 berikut.

$$L = \frac{A}{\Delta} + 1 \tag{1}$$

L adalah jumlah tingkat kuantisasi, Δ adalah step kuantisasi atau resolusi, dan A adalah amplitudo sinyal.

B. Total Harmonic Distortion (THD).

THD adalah Nilai prosentase antara total komponen gelombang harmonik dengan komponen fundamentalnya. Semakin besar prosentase THD menyebabkan semakin besarnya resiko kerusakan peralatan akibat gelombang harmonik yang terjadi pada arus maupun tegangan. Untuk *Total Harmonics Distortion* arus nilainya bervariasi dari beberapa persen sampai dengan lebih dari 100%, sedangkan untuk THD tegangan biasanya nilainya kurang dari 5%. Untuk nilai THD yang nilainya dibawah 5% masih dapat ditoleransi, sedangkan jika nilai THD lebih dari 10% sudah tidak dapat diterima karena dapat mengakibatkan masalah untuk beban-beban dan peralatan yang sensitif. Untuk menentukan besarnya THD digunakan persamaan sebagai berikut. Untuk arus harmonik nilai THD nya :

$$THDi = \frac{\sqrt{i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 + \dots}}{i_1} \tag{2}$$

i_n adalah nilai arus rms harmonik ke- n .

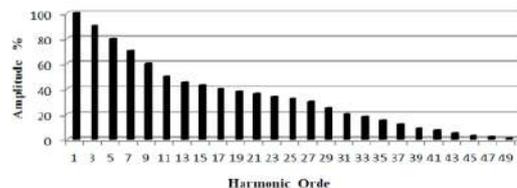
Sedangkan untuk tegangan harmonik nilai THD nya adalah:

$$THDv = \frac{\sqrt{v_2^2 + v_3^2 + v_4^2 + \dots}}{v_1} \tag{3}$$

V_n adalah nilai tegangan rms harmonik ke- n .

Tabel 1. Standar IEEE 519-1992 THDv

Tegangan Buss PCC	Individual Voltage Distorsion (%)	Total Voltage Distorsion THD (%)
< 69 kV	3,0	5,0
69.001 kV-161 kV	1,5	2,5
>161.001 kV	1,0	1,5



Gambar 4. Spektrum harmonisa

Spektrum adalah distribusi dari semua amplitudo komponen harmonik sebagai fungsi dari orde harmoniknya yang

merupakan perbandingan tegangan atau arus frekuensi harmonik terhadap tegangan atau arus frekuensi dasar. Spektrum ini digunakan sebagai dasar merencanakan filter yang akan digunakan untuk mereduksi harmonik

C. Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 adalah papan mikrokontroler berbasis ATmega 2560. Arduino Mega 2560 memiliki 54 pin digital *input/output*, dimana 15 pin dapat digunakan sebagai *output* PWM, 16 pin sebagai *input* analog, dan 4 pin sebagai UART (*port serial hardware*), 16 MHz kristal osilator, koneksi USB, *jack power*, *header ICSP*, dan tombol *reset*. Ini semua yang diperlukan untuk mendukung mikrokontroler.

Arduino Mega dapat diaktifkan melalui koneksi USB atau dengan catu daya eksternal. Sumber daya dipilih secara otomatis. Sumber daya eksternal (*non-USB*) dapat berasal baik dari adaptor AC-DC atau baterai. Adaptor dapat dihubungkan dengan mencolokkan steker 2,1 mm yang bagian tengahnya terminal positif ke *jack* sumber tegangan pada papan. Jika tegangan berasal dari baterai dapat langsung dihubungkan melalui *header* pin *Gnd* dan pin *Vin* dari konektor POWER.

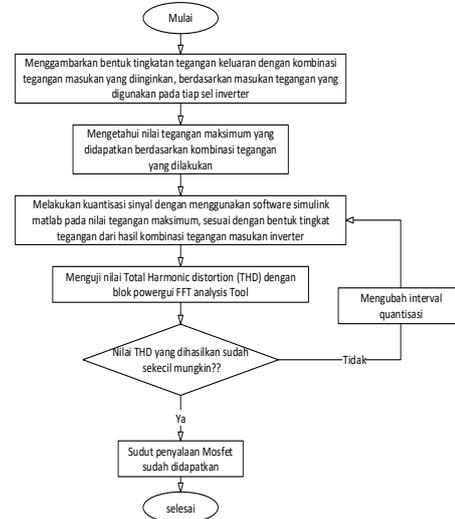
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merealisasikan inverter multilevel *Cascaded H-Bridge* (CHB) satu fasa dengan menggunakan 2 sel inverter jembatan gelombang penuh dengan mengubah perbandingan tegangan masukan DC pada inverter serta teknik pensaklaran yang digunakan. Unjuk kerja dari inverter ini akan dibandingkan dengan berbagai varian perbandingan sumber tegangan masukan DC inverter yang dilakukan. Adapun diagram alir dari penentuan sudut dan pembangkitan sinyal pulsa dengan sudut penyalan yang tepat pada pemacu Mosfet dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7 berikut.

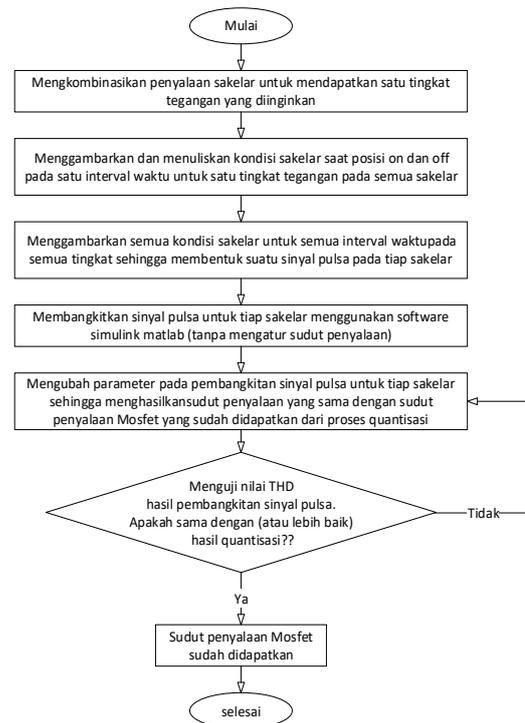
Gambar 5 menunjukkan diagram alir proses penentuan sudut penyalan MOSFET dimana untuk bisa mendapatkan sudut penyalan yang tepat dapat dimulai dengan melakukan kombinasi pensaklaran secara manual dan menggambarannya pada bidang x,y kemudian mengujinya dengan *software* simulink Matlab.

Gambar 6 menunjukkan diagram alir proses pembangkitan sinyal pemacu penyalan MOSFET dimana untuk dapat

membangkitkan sinyal pulsa pemacu yang tepat dimulai dengan melakukan kombinasi pensaklaran kemudian membangkitkan pulsa pemacu dengan menggunakan blok-blok pada simulink Matlab dan mengatur parameternya sehingga didapatkan bentuk yang diinginkan setelah itu menerapkan



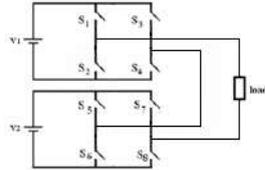
Gambar 5. Diagram alir penentuan sudut pulsa pemacu penyalan MOSFET



Gambar 6. Diagram alir pembangkitan sinyal pulsa pemacu penyalan MOSFET

logika pensaklaran tersebut pada bahasa pemrograman kemudian dibandingkan dengan hasil penentuan

sudut penyalan yang sudah didapatkan. Tahap awal yang dilakukan dalam perancangan ini adalah mengkombinasikan penyalan inverter untuk tiap perbandingan nilai tegangan masukan pada tiap sel.



Gambar 7. Inverter cascaded H-Bridge

Gambar 7 dapat diilustrasikan bahwa dengan memberikan tegangan masukan yang berbeda pada V_2 maka logika penyalan dari tiap sel inverter tersebut dapat dilihat pada Tabel 2, 3 dan 4 dimana logika ini dihasilkan oleh perbandingan masukan tegangan DC pada inverter bertingkat dengan menggunakan 2 sel inverter jembatan.

Tabel 2. Logika Penyalan antar sel inverter pada rasio tegangan masukan 1:1 (6 V : 6 V)

No	Kondisi Inverter		Tegangan masukan (volt)		Tegangan keluaran (volt)
	sel 1	sel 2	sel 1	sel 2	
1	off	off	0	0	0
2	on	off	6	0	± 6
3	off	on	0	6	± 6
4	on	on	6	6	± 12

Tabel 3. Logika Penyalan antar sel inverter pada rasio tegangan masukan 1:2 (6 V : 12 V)

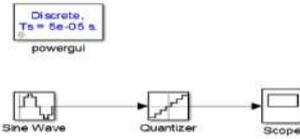
No	Kondisi Inverter		Tegangan masukan (volt)		Tegangan keluaran (volt)
	sel 1	sel 2	sel 1	sel 2	
1	off	off	0	0	0
2	on	off	6	0	± 6
3	off	on	0	12	± 12
4	on	on	6	12	± 18

Tabel 4. Logika Penyalan antar sel inverter pada rasio tegangan masukan 1:3 (6 V : 18 V)

No	Kondisi Inverter		Tegangan masukan (volt)		Tegangan keluaran (volt)
	sel 1	sel 2	sel 1	sel 2	
1	off	off	0	0	0
2	on	off	6	0	± 6
3	off	on	0	18	± 18
4	on	on	6	18	± 24
5	on	on	-6	18	± 12

A. Penentuan sudut pemacu penyalan sakelar Mosfet pada inverter.

Dengan mensimulasikan tegangan sinusoidal menjadi gelombang bertingkat dengan prinsip kuantisasi yaitu dilakukan dengan menggunakan blok quantizer pada simulink Matlab seperti pada gambar 8 berikut.



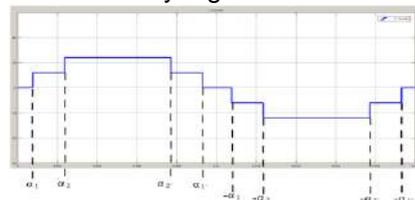
Gambar 8. Rangkaian pembentukan gelombang tegangan bertingkat

Pembentukan gelombang tegangan bertingkat ini dilakukan tiga percobaan nilai amplitudo tegangan sinus dengan frekuensi dan interval kuantisasi seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Variable Blok Simulink

No	Blok Sine wave		Blok Quantizer
	Amplitudo	Frekuensi	Interval kuantisasi
1	12 volt	50 Hz	5,3363897706
2	18 volt	50 Hz	5,4895860798
3	24 volt	50 Hz	5,6470806694

Tabel 5 nilai amplitudo yang digunakan mengacu pada nilai maksimum dari hasil keluaran kombinasi tegangan masukan dengan rasio perbandingan inverter yang dilakukan sebelumnya. Nilai interval kuantisasi merupakan nilai untuk pembentukan jumlah tingkat dan penentu pergeseran sudut dari tiap tingkat tegangan bertingkat yang diolah pada blok quantizer dimana nilai tersebut adalah kelipatan tiap tingkatan tegangan gelombang tegangan bertingkat. Gambar 10, 11 dan 12 berikut merupakan hasil dari pembentukan gelombang terkuantisasi dengan jumlah tingkat dan sudut yang berbeda.



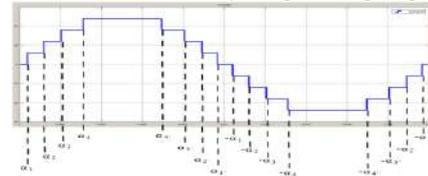
Gambar 9. Gelombang tegangan bertingkat 5 tingkat

Gambar 9 memperlihatkan bentuk gelombang tegangan bertingkat 5 tingkat dengan 8 titik sudut tiap tingkatan, nilai dari masing-masing sudut dapat dilihat pada Tabel 6 berikut, dimana pada tabel tersebut ditentukan juga kondisi dari masing-masing sakelar penyalan pada tiap durasi waktu dalam tiap tingkat tegangan dengan dengan

rasio tegangan pada sel inverter yang digunakan yaitu HIGH adalah kondisi sakelar ON dan LOW adalah kondisi sakelar OFF.

Gambar 10 memperlihatkan bentuk gelombang tegangan bertingkat 7 tingkat dengan 12 titik sudut tiap tingkatan, nilai dari masing-masing sudut dapat dilihat pada Tabel 7 berikut dimana pada tabel

tersebut ditentukan juga kondisi dari masing-masing sakelar penyalaan dari tiap durasi waktu dalam tiap tingkat tegangan.



Gambar 10. Gelombang tegangan bertingkat 9 tingkat

Table 6. Nilai Sudut Tiap Tigkatan dan Durasi Waktu Antar Sudut Gelombang 5 Tingkat

No	Sudut		Durasi waktu antar sudut		Kondisi sakelar			
	Alpa	Detik ke-	Alpa ke alpa	Durasi (detik)	S ₁	S ₃	S ₅	S ₇
1	α_1	0,00072	0 - α_1	0,00072	HIGH	HIGH	HIGH	HIGH
2	α_2	0,00233	$\alpha_1 - \alpha_2$	0,00161	HIGH	LOW	HIGH	HIGH
3	α_2'	0,00768	$\alpha_2' - \alpha_2$	0,00535	HIGH	LOW	HIGH	LOW
4	α_1'	0,00929	$\alpha_2' - \alpha_1'$	0,00161	HIGH	LOW	LOW	LOW
5	$-\alpha_1$	0,0107	$\alpha_1' - -\alpha_1$	0,00141	LOW	LOW	LOW	LOW
6	$-\alpha_2$	0,0123	$-\alpha_1 - -\alpha_2$	0,0016	LOW	HIGH	LOW	LOW
7	$-\alpha_2'$	0,0177	$-\alpha_2' - -\alpha_2'$	0,0054	LOW	HIGH	LOW	HIGH
8	$-\alpha_1'$	0,0193	$-\alpha_2' - -\alpha_1'$	0,0016	LOW	HIGH	HIGH	HIGH
9	0,02	0,02	$-\alpha_1' - 0$	0,0007	HIGH	HIGH	HIGH	HIGH

Table 7. Nilai Sudut Tiap Tigkatan dan Durasi Waktu Antar Sudut Gelombang 7 Tingkat

No	Sudut		Durasi waktu antar sudut		Kondisi sakelar			
	Alpa	Detik ke-	Alpa ke alpa	Durasi (detik)	S ₁	S ₃	S ₅	S ₇
1	α_1	0,00049	0 - α_1	0,00049	HIGH	HIGH	LOW	LOW
2	α_2	0,00152	$\alpha_1 - \alpha_2$	0,00103	HIGH	LOW	LOW	LOW
3	α_3	0,00277	$\alpha_2 - \alpha_3$	0,00125	HIGH	HIGH	HIGH	LOW
4	α_3'	0,00724	$\alpha_3 - \alpha_3'$	0,00447	HIGH	LOW	HIGH	LOW
5	α_2'	0,00849	$\alpha_3' - \alpha_2'$	0,00125	HIGH	HIGH	HIGH	LOW
6	α_1'	0,00952	$\alpha_2' - \alpha_1'$	0,00103	HIGH	LOW	LOW	LOW
7	0,01	0,01	$\alpha_1' - 0,01$	0,00048	HIGH	HIGH	LOW	LOW
8	$-\alpha_1$	0,0105	$0,01 - -\alpha_1$	0,0005	LOW	LOW	HIGH	HIGH
9	$-\alpha_2$	0,0115	$-\alpha_1 - -\alpha_2$	0,001	LOW	HIGH	HIGH	HIGH
10	$-\alpha_3$	0,0128	$-\alpha_2 - -\alpha_3$	0,0013	LOW	LOW	LOW	HIGH
11	$-\alpha_3'$	0,0172	$-\alpha_3' - -\alpha_3'$	0,0044	LOW	HIGH	LOW	HIGH
12	$-\alpha_2'$	0,0185	$-\alpha_3' - -\alpha_2'$	0,0013	LOW	LOW	LOW	HIGH
13	$-\alpha_1'$	0,0195	$-\alpha_2' - -\alpha_1'$	0,001	LOW	HIGH	HIGH	HIGH
14	0,02	0,02	$-\alpha_1' - 0$	0,0005	LOW	LOW	HIGH	HIGH

Table 8. Nilai Sudut Tiap Tigkatan dan Durasi Waktu Antar Sudut Gelombang 9 Tingkat

No	Sudut		Durasi waktu antar sudut		Kondisi Sakelar			
	Alpa	Detik ke-	Alpa ke alpa	Durasi (detik)	S ₁	S ₃	S ₅	S ₇
1	α_1	0,00038	0 - α_1	0,00038	HIGH	LOW	LOW	LOW
2	α_2	0,00115	$\alpha_1 - \alpha_2$	0,00077	HIGH	LOW	LOW	LOW
3	α_3	0,00201	$\alpha_2 - \alpha_3$	0,00086	LOW	HIGH	HIGH	LOW
4	α_4	0,00308	$\alpha_3 - \alpha_4$	0,00107	HIGH	HIGH	HIGH	LOW
5	α_4'	0,00693	$\alpha_4 - \alpha_4'$	0,00385	HIGH	LOW	HIGH	LOW
6	α_3'	0,00800	$\alpha_4' - \alpha_3'$	0,00107	HIGH	HIGH	HIGH	LOW
7	α_2'	0,00886	$\alpha_3' - \alpha_2'$	0,00086	LOW	HIGH	HIGH	LOW
8	α_1'	0,00963	$\alpha_2' - \alpha_1'$	0,00077	HIGH	LOW	LOW	LOW
9	0,01	0,01	$\alpha_1' - 0,01$	0,00037	HIGH	LOW	LOW	LOW
10	$-\alpha_1$	0,01040	$0,01 - -\alpha_1$	0,0004	LOW	HIGH	HIGH	HIGH
11	$-\alpha_2$	0,01110	$-\alpha_1 - -\alpha_2$	0,0007	LOW	HIGH	HIGH	HIGH
12	$-\alpha_3$	0,012	$-\alpha_2 - -\alpha_3$	0,0009	HIGH	LOW	LOW	HIGH
13	$-\alpha_4$	0,0131	$-\alpha_3 - -\alpha_4$	0,0011	LOW	LOW	LOW	HIGH
14	$-\alpha_4'$	0,0169	$-\alpha_4 - -\alpha_4'$	0,0038	LOW	HIGH	LOW	HIGH
15	$-\alpha_3'$	0,018	$-\alpha_4' - -\alpha_3'$	0,0011	LOW	LOW	LOW	HIGH
16	$-\alpha_2'$	0,0189	$-\alpha_3' - -\alpha_2'$	0,0009	HIGH	LOW	LOW	HIGH

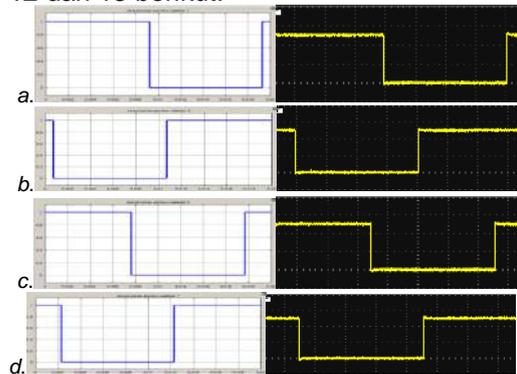
17	$-\alpha_1$	0,0196	$-\alpha_2 - \alpha_1$	0,0007	LOW	HIGH	HIGH	HIGH
18	0,02	0,02	$-\alpha_1 - 0$	0,0004	LOW	HIGH	HIGH	HIGH

Gambar 10 memperlihatkan bentuk gelombang tegangan bertingkat 9 dengan 14 titik sudut tiap tingkatan, nilai dari masing-masing sudut dapat dilihat pada Tabel 8 dimana pada tabel tersebut ditentukan juga kondisi dari masing-masing sakelar penyalan dari tiap durasi waktu dalam tiap tingkat tegangan. Setelah didapat nilai durasi waktu dari tiap sudut pada pembentukan gelombang bertingkat dilakukan pembangkitan sinyal pulsa dengan menggunakan software Arduino IDE untuk digunakan sebagai pemacu waktu penyalan MOSFET pada inverter yang direalisasikan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

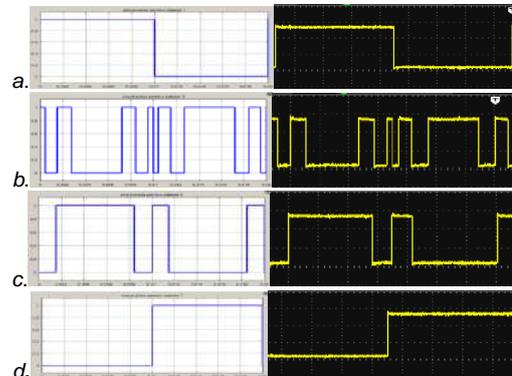
A. Pengujian Program Pembangkitan Pulsa Pemacu Penyalan MOSFET.

Pengujian program pembangkitan pulsa pemacu penyalan MOSFET adalah membandingkan bentuk pulsa hasil pembangkitan pada Arduino Mega 2560 dengan bentuk pulsa pada simulasi, dimana pulsa yang di bandingkan adalah pulsa pemacu sakelar S_1 , S_3 , S_5 dan S_7 seperti yang diperlihatkan pada gambar 11, 12 dan 13 berikut.



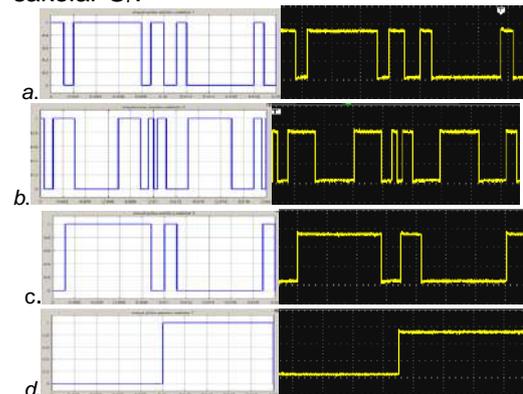
Gambar 11. PWM hasil simulasi (kiri) dan keluaran PWM Arduino Mega 2560 (kanan) pada inverter 5 tingkat

Gambar 11 merupakan bentuk pulsa untuk penyalan sakelar Mosfet pada inverter 5 tingkat dimana gambar a untuk sakelar S_1 , Gambar b untuk sakelar S_3 , Gambar c untuk sakelar S_5 Gambar d untuk sakelar S_7 .



Gambar 12. PWM hasil simulasi (kiri) dan keluaran PWM Arduino Mega 2560 (kanan) pada inverter 7 tingkat

Gambar 12 merupakan bentuk pulsa untuk penyalan sakelar Mosfet pada inverter 7 tingkat dimana gambar a untuk sakelar S_1 , Gambar b untuk sakelar S_3 , Gambar c untuk sakelar S_5 Gambar d untuk sakelar S_7 .



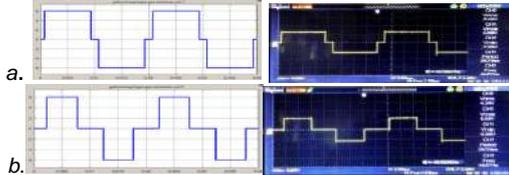
Gambar 13. PWM hasil simulasi (kiri) dan keluaran PWM Arduino Mega 2560 (kanan) pada inverter 9 tingkat

Gambar 13 merupakan bentuk pulsa untuk penyalan sakelar Mosfet pada inverter 9 tingkat dimana gambar a untuk sakelar S_1 , Gambar b untuk sakelar S_3 , Gambar c untuk sakelar S_5 Gambar d untuk sakelar S_7 .

B. Pengujian Tegangan Keluaran Inverter Cascaded H-Bridge.

Pengujian tegangan keluaran dari masing-masing sel inverter ini dilakukan dengan memberikan nilai input tegangan DC pada sel 1 dan sel 2 dengan menggunakan baterai/ aki, digunakan 6 volt

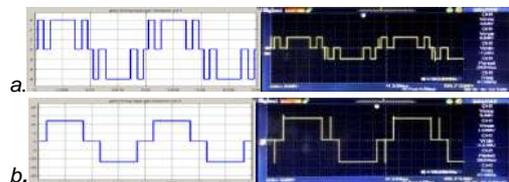
untuk tegangan input pada sel 1 dan untuk nilai tegangan DC input pada sel 2 diberikan nilai tegangan yang berbeda-beda yaitu 6 volt,12 volt dan 18 volt.



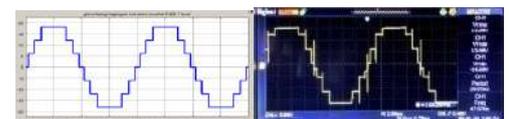
Gambar 14. Keluaran inverter tiap sel simulasi (kiri) dan realisasi(kanan) untuk rasio tegangan 1:1 (6v:6v)



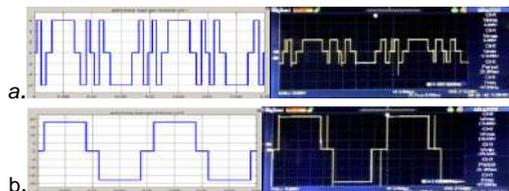
Gambar 15. Keluaran inverter CHB 5 tingkat simulasi (kiri) dan realisasi(kanan) untuk rasio tegangan 1:1 (6v:6v)



Gambar 16. Keluaran inverter tiap sel simulasi (kiri) dan realisasi(kanan) untuk rasio tegangan 1:2 (6v:12v)



Gambar 17. Keluaran inverter CHB 7 tingkat simulasi (kiri) dan realisasi(kanan) untuk rasio tegangan 1:2 (6v:12v)

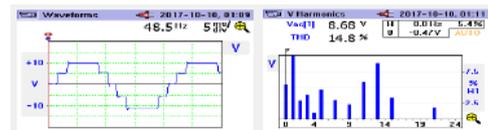


Gambar 18. Keluaran inverter tiap sel simulasi (kiri) dan realisasi(kanan) untuk rasio tegangan 1:3 (6v:18v)



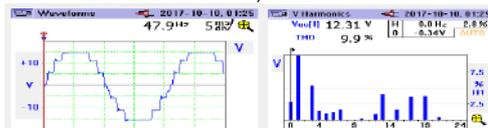
Gambar 19. Keluaran inverter CHB 9 tingkat simulasi (kiri) dan realisasi(kanan) untuk rasio tegangan 1:3 (6v:18v)

C. Pengujian Nilai THDv Pada Inverter Cascaded H-Bridge



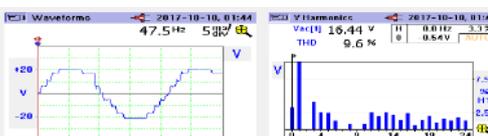
Gambar 20. Hasil tegangan keluaran (kiri) dan spektrum harmonisa (kanan) pada inverter CHB 5 tingkat

Gambar 20 memperlihatkan bentuk tegangan dan nilai THDv yang dihasilkan inverter *Cascaded H Bridge* (CHB) satu fasa 5 tingkat, dimana frekuensi yang dihasilkan adalah sebesar 48,5 Hz dan tegangan harmonisa sebesar 8,68 serta nilai THDv sebesar 14,8%.



Gambar 21. Hasil tegangan keluaran (kiri) serta spektrum harmonisa(kanan) pada inverter CHB 7 tingkat

Gambar 21 memperlihatkan bentuk tegangan dan nilai THD yang dihasilkan inverter *Cascaded H Bridge* (CHB) satu fasa 7 tingkat, dimana frekuensi yang dihasilkan adalah sebesar 47,9 Hz dan tegangan harmonisa sebesar 12,31 Volt serta nilai THDv sebesar 9,9%.



Gambar 22. Hasil tegangan keluaran(kiri) serta spektrum harmonisa(kanan) pada inverter CHB 9 tingkat

Gambar 22 memperlihatkan bentuk tegangan dan nilai THD yang dihasilkan inverter *Cascaded H Bridge* (CHB) satu fasa 9, tingkat dimana frekuensi yang dihasilkan adalah sebesar 47,5 Hz dan tegangan harmonisa sebesar 16,44 Volt serta nilai THDv sebesar 9,6%.

D. Analisa Hasil Keluaran Inverter Cascaded H-Bridge 1 Fasa

Tabel 9 menunjukkan bahwa dengan memberikan perbandingan tegangan masukan antar sel dapat memperbaiki kualitas tegangan yang dihasilkan dimana semakin tinggi nilai perbandingan tegangan maka tingkatan tegangan yang di hasilkan semakin banyak dan nilai THDv semakin rendah.

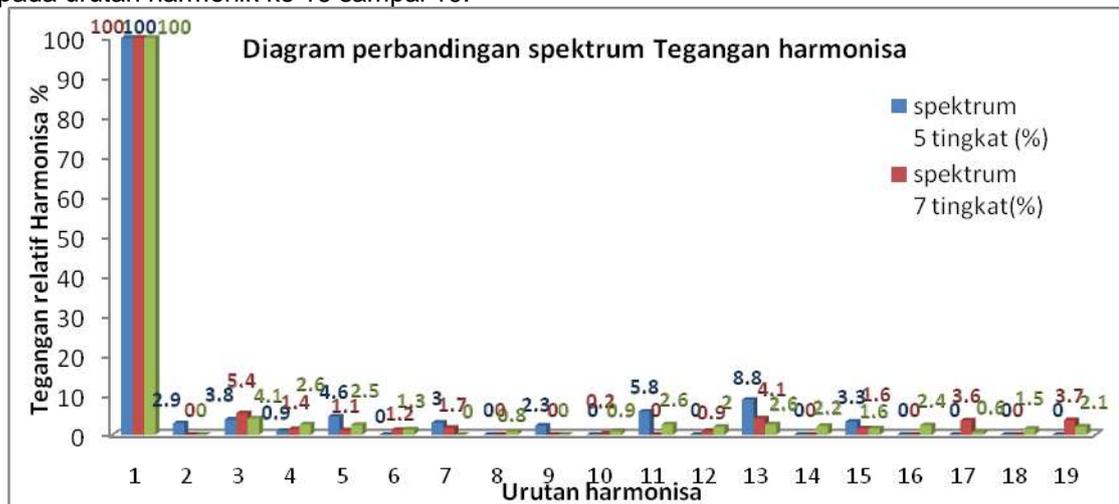
Tabel 9. Hasil Keluaran Inverter Cascaded H-Bridge 1 Fasa

No	Parameter terukur	Rasio Tegangan masukan		
		1 : 1	1 : 2	1 : 3
1	Tingkatan tegangan	5	7	9
2	Frekuensi (Hz)	48,5	47,9	47,5
3	Nilai THDv (%)	14,8	9,9	9,6
4	Tegangan harmonisa (V)	8,68	12,31	16,44

Gambar 23 menunjukkan bahwa pada spektrum harmonisa 7 tingkat dan 9 tingkat untuk harmonik urutan ke 9 bernilai nol, spektrum harmonisa 7 tingkat untuk harmonik urutan ke 11 bernilai nol. Spektrum harmonisa 9 tingkat untuk harmonik urutan ke 7 bernilai nol, sedangkan spektrum harmonisa 5 tingkat untuk urutan harmonisa bernilai nol terjadi pada urutan harmonik ke 16 sampai 19.

Hal ini menandakan bahwa semakin banyak tingkat tegangan dan sudut penyalan sakelar maka urutan harmonik tertentu dapat terhapuskan atau bernilai nol. Untuk urutan harmonik pada spektrum harmonisa 7 tingkat dan 9 tingkat masih terkandung harmonik genap yang disebabkan oleh tidak simetrisnya nilai antar tingkat tegangan pada inverter, yang dikarenakan oleh komponen inverter dan kombinasi tegangan inputan yang digunakan.

Gambar 23 juga menunjukkan untuk tegangan 5 tingkat mempunyai nilai harmonik genap paling rendah karena bentuk tegangan yang dihasilkan lebih simetris dibandingkan dengan tegangan 7 tingkat dan 9 tingkat, tetapi untuk nilai THD yang dihasilkan oleh tegangan 5 tingkat lebih tinggi dari nilai THD pada tegangan 7 tingkat dan 9 tingkat.



Gambar 23. Diagram perbandingan spektrum Tegangan harmonisa inverter CHB

Untuk nilai THD yang dihasilkan pada tegangan 9 tingkat memiliki nilai terendah karena rata-rata nilai harmonik ganjil yang paling rendah dan bentuk gelombang tegangan paling mendekati bentuk sinus.

dengan THDv 14,8%, tegangan DC masukan 1:2 menghasilkan tegangan 7 tingkat dengan THDv 9,9% dan tegangan DC masukan 1:3 menghasilkan tegangan 9 tingkat dengan THDv 9,6%.

IV. KESIMPULAN

1. Perbandingan tegangan DC masukan yang bervariasi pada inverter multilevel *Cascade H-Bridge* (CHB) satu fasa 2 sel dapat menghasilkan jumlah tingkat tegangan keluaran pada inverter dan menghasilkan nilai THD yang bervariasi.
2. Perbandingan tegangan DC masukan 1:1 menghasilkan tegangan 5 tingkat

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Wu, "High Power Converters and AC Drivers", The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., 2006
- [2] G. M. Idris, I.N.W. Satiawan, dan I.K. Wiryajati, "Investigasi Sudut Penyalan Inverter Multilevel dengan Struktur

- Cascaded H-Bridge Untuk Sistem PLTS”,
Dielektrika, Vol. 2, No 2 hal.81-90, 2015
- [3] D. W. Hart, “Power Electronics”, The
McGraw-Hill Companies, Inc. Avenue of the
Americas, New York, 2011
- [4] E. A. T. Yuwono, A. Warsito, dan M. Facta,
“Inverter Multilevel Tipe Jembatan Satu
Fasa Tiga Tingkat Dengan Mikrokontroller
AT89S51”, Transmisi, Vol. 13, No. 4, hal.
135-140, 2011
- [5] I. Kurniawan, “Pencuplikan dan Kuantisasi
Sinyal”, Diktat Pengolahan Sinyal Digital,
Politeknik Jambi, 2012