

Rancang Inverter 5-Level Cascaded H-Bridge untuk PLTS On Grid dengan Kapasitas Beban 25 kW

Aini Mutiara Syabani¹, I Made Wiwit Kastawan², Siti Saodah³

^{1, 2, 3}Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

¹E-mail : aini.mutiara.tken417@polban.ac.id

²E-mail : wiwit.kastawan@polban.ac.id

³E-mail : siti.saodah@polban.ac.id

Abstrak

Pembangkitan listrik tenaga surya menghasilkan listrik DC, agar dapat dimanfaatkan pada barang elektronik membutuhkan catu daya AC, dibutuhkan inverter untuk mengonversi listrik DC menjadi AC. Harmonisa merupakan distorsi gelombang pada output inverter yang disebabkan pembentukan gelombang dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental (50 Hz). Harmonisa ini dapat mengakibatkan overheating pada alat elektronik yang dicatutdayai, selain alat elektronik memiliki batas maksimum harmonisa yaitu 5%. Salah satu upaya reduksi harmonisa dapat dilakukan dengan menggunakan topologi inverter multilevel. Rancangan inverter topologi 5-Level Cascaded H-bridge (CHB 5-Level) berfungsi untuk mengubah tegangan DC 179 V menjadi tegangan 220 V untuk beban delta 25 kW. Inverter ini menggunakan saklar IGBT dan metode penyaklaran PWM Level Shifted—In Phase Disposition dengan frekuensi switching 320 Hz. Pada frekuensi switching 1 kHz inverter CHB 5-Level dapat mereduksi harmonisa 51.7% dibandingkan dengan inverter 3-Level Bridge. Untuk menghasilkan THD 5%, inverter CHB 5-Level dioperasikan dengan frekuensi switching 320 Hz sedangkan inverter 3-Level Bridge 525 Hz.. Frekuensi kerja yang lebih rendah dapat mengurangi rugi-rugi switching dan konduksi pada saklar (transistor).

Kata Kunci

inverter, cascade h-bridge 5-level, harmonisa, rugi-rugi

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengembangan teknologi untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan telah----- . Pembangkit listrik tenaga surya pada bangunan komersial diharapkan dapat turut serta menyuplai 2904 MW ke grid PLN dalam rangka mencapai target bauran energi terbarukan 2025 [6] [11].

Listrik yang dihasilkan dari panel surya adalah tegangan DC. Agar dapat digunakan pada alat elektronik yang dicatutdayai tegangan AC, diperlukan konverter DC ke AC. Inverter mengubah listrik DC menjadi AC dengan mengatur penyaklaran di saklar semikonduktor sesuai dengan topologinya.

Salah satu tantangan yang pada penggunaan inverter adalah kemunculan harmonisa. Harmonisa merupakan gelombang yang terdistorsi secara periodik karena adanya perubahan frekuensi pada sistem distribusi listrik. Dampak adanya harmonisa adalah timbulnya panas pada peralatan yang sensitif pada ketidakmurnian daya listrik AC. Alat-alat yang umumnya sangat terpengaruh adalah generator, motor listrik, lampu LED dan komputer.

1.2. Tujuan Penelitian

1. Merancang Inverter 5-Level Cascaded H-Bridge untuk PLTS On-Grid kapasitas 25 kW pada industri polimer di Cilegon
2. Menganalisis losses switching dan konduksi serta THD pada keluaran inverter Bridge 3-Level dan Inverter 5-Level Cascaded H-Bridge

1.3. Rumusan Masalah

Salah satu permasalahan yang ada pada sistem PLTS ini adalah munculnya harmonisa pada listrik keluaran inverter

Bridge 3-Level. Dibutuhkan *inverter* dengan yang dapat mereduksi harmonisa sehingga gelombang listrik semakin menyerupai sinusoidal. Inverter yang dipilih adalah inverter *cascaded H-bridge 5 level*.

1.4. Batasan Masalah

Penelitian ini akan berfokus pada rancangan inverter yang digunakan pada PLTS On Grid di industri polimer yang berlokasi di Cilegon, Banten. Penelitian tidak mencakup sistem kontrol dan perawatan sistem PLTS secara keseluruhan.

Simulasi dilakukan pada aplikasi MATLAB dan hanya memodelkan mulai dari inverter 3 fasa hingga ke beban dan grid. Teknik penyaklaran inverter menggunakan teknik PWM. Beban yang tersambung memiliki factor daya 0.85 sehingga beban diilustrasikan sebagai impedansi yang memiliki komponen resistif dan induktif.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Komponen PLTS

Komponen dasar dari sebuah pembangkit listrik tenaga surya adalah panel surya dan inverter.

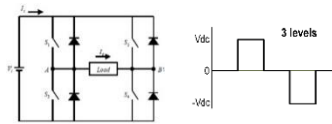
2.2. Inverter

Tegangan keluaran dari terminal panel surya merupakan tegangan searah (DC) sedangkan kebutuhan listrik saat ini membutuhkan tegangan bolak-balik (AC). Komponen ini mampu mengkonversi tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik sehingga dapat digunakan untuk mencatu daya perangkat elektronik.

Komponen Inverter

Inverter terdiri atas komponen sumber tegangan searah DC, komparator dan transistor. Sumber tegangan searah bisa berupa baterai, maupun panel surya. Besarnya tegangan searah dipengaruhi oleh banyak unit yang diseri, sedangkan arusnya dipengaruhi banyak unit yang diparalel. Transistor pada inverter merupakan komponen semikonduktor yang berfungsi untuk memutuskan atau menyambungkan arus (switching) untuk memodulasi tegangan dc ke ac. Pada penelitian ini digunakan transistor IGBT untuk saklar.

Topologi 3-Level Bridge



Gambar 1. Topologi dan Gelombang Output Inverter 3-Level Bridge

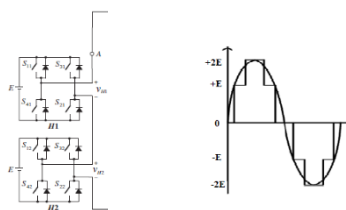
Terdiri atas 4 buah saklar IGBT dan 4 dioda seperti pada Gambar 1. Output dari inverter ini digambarkan pada adalah gelombang dengan output +Vdc, 0, -Vdc [13]. Penyaklaran pada topologi ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 2. Urutan Penyaklaran Inverter 3-Level Bridge

Output Voltage	Switching State			
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
+Vdc	1	0	0	1
0	1	1	0	0
0	0	0	1	1
-Vdc	0	1	1	0

Topologi Cascaded H-Bridge 5-Level (CHB 5-Level)

Inverter Cascaded H-Bridge 5-Level merupakan perkembangan dari topologi dasarnya, 3-Level Bridge. Topologi CHB 5-Level merupakan gabungan dua rangkaian 3-Level Bridge yang terpasang seri. Tegangan AC pada tiap level dihubungkan secara seri sehingga didapat gelombang tegangan penjumlahan dari setiap inverter [13].



Gambar 3. Topologi dan Gelombang Output Inverter CHB 5-Level

Kontrol PWM

Pulse width modulation (PWM) merupakan upaya untuk memanipulasi lebar sebuah sinyal. Sinyal analog PWM memiliki frekuensi dan amplitudo memiliki angka dasar yang tetap, namun duty cycle yang bervariasi. [13].

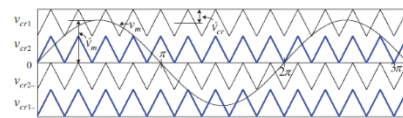
Level Shifted Multicarrier Modulation

Menggunakan sinyal segitiga termulasi (carrier) yang memiliki frekuensi dan amplitudo sama. Pada penelitian ini

Tabel 1. Urutan Penyaklaran Inverter CHB 5-Level^[13]

States	Output V	Switching State								v _{N1}	v _{N2}
		S ₁₁	S ₂₁	S ₃₁	S ₄₁	S ₁₂	S ₂₂	S ₃₂	S ₄₂		
1	2Vdc	1	1	0	0	1	1	0	0	Vdc	Vdc
2	Vdc	0	1	0	1	1	0	0	0	0	Vdc
3		1	1	0	0	1	0	1	0	Vdc	0
4		1	0	1	0	1	0	0	0	0	Vdc
5*		1	1	0	0	0	1	0	1	Vdc	0
6	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
7		0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
8		0	1	0	1	1	0	1	0	0	0
9*		1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
10		1	1	0	0	0	0	1	1	Vdc	-Vdc
11		0	0	1	1	1	0	0	0	-Vdc	Vdc
12*		0	0	1	1	1	0	1	0	-Vdc	0
13		0	0	1	1	0	1	0	1	-Vdc	0
14	-Vdc	1	0	1	0	0	0	1	1	0	-Vdc
15		0	1	0	1	0	0	1	1	0	-Vdc
16*	-2Vdc	0	0	1	1	0	0	1	1	-Vdc	-Vdc

digunakan skema In Phase Disposition (IPD) gelombang carrier termulasi seperti ilustrasi XX. Dibandingkan dengan metode Phase Shifted Modulation, sampling dengan Level Shifted mampu menghasilkan THD yang lebih rendah [13].



Gambar 2. Skema IPD Level Shifted Modulation untuk CHB 5-Level^[13]

2.3. Harmonisa

Harmonisa merupakan gelombang yang terdistorsi secara periodik karena adanya perubahan frekuensi pada system distribusi listrik. Frekuensi periodic ini dikenal juga sebagai orde harmonisa (n) dengan besaran n=1, 3, 5, 7, ... Menurut (Prathiba & Renuga, 2012) nilai THD pada dipengaruhi oleh topologinya. Harmonisa dapat terjadi pada gelombang tegangan (THDv) dan arus (THDi). Batas maksimal THD pada line PLN adalah 5%.

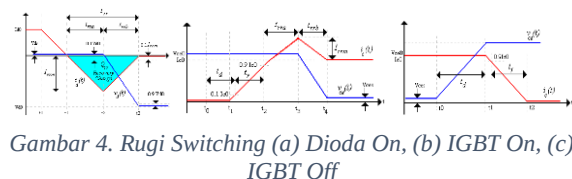
2.4. Rugi Switching

Rugi ini terjadi karena ketidakidealan transistor. Perubahan tegangan serta arus pada kondisi on ke off tidak berlangsung secara simultan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4. Pada satu siklus penggunaan saklar IGBT, rugi switching terbagi menjadi tiga kondisi, *diode on*, *IGBT off*, dan *IGBT on* [2]. Selain itu rugi switching berbanding lurus dengan peningkatan frekuensi penyaklaran. Sehingga rugi switching dapat dihitung dengan persamaan

$$P_{switch} = (W_{drec} + W_{IGBT on} + W_{IGBT off}) f_{sw}$$

2.5. Rugi Konduksi

Pada pengoperasian inverter, pengendalian dilakukan dengan mengatur waktu konduksi dari saklar. Pada saat saklar konduksi terjadi disipasi daya ($P_{on}(t)$) yang dapat diketahui dengan mengalikan tegangan saturated pada saat on-state dengan arus on-state [2]. Jika diterapkan pada rangkaian inverter 5 level, total losses konduksi merupakan



Gambar 4. Rugi Switching (a) Dioda On, (b) IGBT On, (c) IGBT Off

Sumber: (Farzaneh & Nazarzadeh, 2009)

penjumlahan dari integral waktu konduksi setiap komponen dalam satu siklus.

$$P_{cond\ avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^T p_{on}(t) dt$$

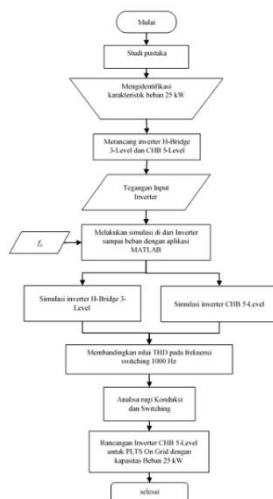
III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini, dilakukan untuk merancang inverter CHB 5-Level untuk pembangkit listrik tenaga surya yang tekoneksi on grid untuk melayani beban perkantoran 25 kW delta. Inverter yang dibuat harus mampu mencatudayai beban tiga fasa, sehingga pada setiap inverter terdapat satu rangkaian CHB 5-Level pada setiap fasa yang memiliki spek identik. Syarat perancangan yang harus terpenuhi ditunjukkan pada Gambar 5.

$V_{LL,RMS}$	220 V
V_{dc}	Konstan
Konfigurasi Beban	Delta Beban Seimbang
P_{delta}	25 kW
P_{load}	8.33 kW
THD	5%

Gambar 5. Syarat Perancangan

Analisa kualitas daya dilakukan dengan mengambil basis fasa R. Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tahapan Perancangan

3.1. Perancangan Inverter Tiga Fasa

• Mengidentifikasi Karakteristik Beban

Beban yang terkoneksi adalah beban perkantoran dengan detail beban seperti **Error! Reference source not found..** Total beban yang terhubung adalah 25 kW (tiga fasa, delta). Beban ini beroperasi dengan tegangan fasa-fasa ($V_{LL,RMS}$) 220 V dan frekuensi 50 Hz. Faktor daya beban adalah 0.85, hal ini dikarenakan terdapat beban induktif seperti lampu TL, komputer, printer dan dispenser.

$$S = \frac{P}{\cos \theta}$$

Arus RMS beban dapat dihitung menggunakan

$$I_{o,rms} = \frac{S}{V_{LL,RMS}}$$

Tabel 3. Beban

Beban	Daya (W)	Kuantitas	Total Daya (W)	t (jam)	Konsumsi Energi (kWh/hari)
Lift*	15000	1	15000	3	45
AC*	4440	1	4440	10	44.4
Pompa*	1100	3	3300	2	6.6
Lampu LED	18	12	216	12	2.6
Printer	1400	1	1400	2	2.8
Komputer	200	30	6000	10	60
Dispenser	35	5	175	2	0.35
Lampu TL	44	36	1584	12	19.008
Total Energi Beban					188.238
Beban yang tersambung ke PLTS					92.238

Nilai faktor daya 0.85 dapat direpresentasikan sebagai impedansi beban. maka impedansi beban didapatkan dari

$$Z_{load} = \frac{V_{LL,RMS}^2}{S}$$

Nilai resistansi dan reaktansi beban akan terlihat dari bilangan kompleksnya. Besarnya beban induktif yang terhubung dapat dihitung menggunakan

$$L_{load} = \frac{X_L}{2\pi f}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, karakteristik beban ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristik Beban

	Satuan	Nilai
P	kW	25
S	kVA	29.41
Q	kVAR	13.17
$V_{LL,RMS}$	V	220
f	Hz	50
$\cos \theta$		0.85
$I_{o,rms}$	A	44.56
Z_{load}	Ω	4.94 $\angle$ -31.79 atau 4.2-2.6j
R	Ω	4.2
X_L	Ω	2.6
L_{load}	H	0.0008

• Menentukan Kebutuhan Tegangan Input Inverter

Tegangan output inverter ditentukan oleh tegangan kerja pada beban. Konfigurasi beban terpasang secara delta, maka tegangan yang akan terasa pada beban adalah tegangan fasa-fasa ($V_{LL,RMS}=220$ V). Karena inverter dipasang satu unit pada setiap fasa, maka tegangan perfasanya adalah

$$V_{o,rms} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{o,peak}}{\sqrt{2}}$$

Tegangan input inverter dapat diketahui berdasarkan karakteristik tiap topologi (x). Pada 3-Level Bridge $x=1$ sedangkan pada CHB 5-Level $x=2$.

$$V_{o,peak} = x V_{dc}$$

• Menentukan Jumlah Bridge

Jumlah bridge pada sebuah inverter (B) bergantung kepada topologi dan level dengan menggunakan rumus berikut

$$B = \frac{L-1}{2}$$

• Menentukan Kapasitas Transistor

Transistor yang akan digunakan harus memiliki kemampuan untuk menghantarkan arus sebesar 126.04 A, tegangan 179.6 V (3-Level Bridge) dan 89.80 V, arus 63.02 A (Cascaded H-Bridge 5-Level).

Jumlah transistor/saklar untuk inverter (N) bergantung kepada banyaknya bridge (B) yang ada dan topologi inverter yang digunakan. Untuk mengetahui jumlah saklar dapat menggunakan rumus berikut,

$$N = 4 \times B$$

• Menentukan Switching Saklar

Frekuensi switching saklar ditentukan oleh teknik modulasi yang digunakan. Pada penelitian ini modulasi carrier

menggunakan teknik PWM Level Shifted tipe In Phase Disposition. Jumlah sinyal carrier pada teknik modulasi ini ditentukan dengan persamaan

$$n_{\text{carrier}} = L - 1$$

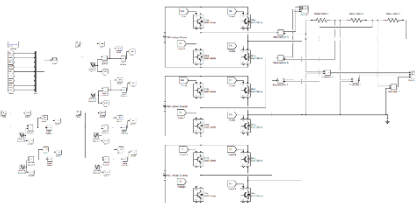
- Melakukan Simulasi pada MATLAB-Simulink

Pada topologi inverter yang berbeda, susunan komponen kontrol akan berbeda. Penelitian ini menggunakan dua topologi inverter untuk disimulasikan.

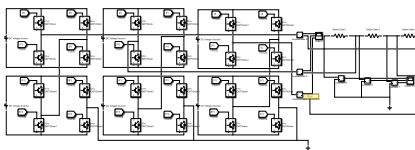
Rangkaian inverter 3-Level Bridge Gambar 7 dan CHB 5-Level Gambar 8 dibuat secara terpisah. Alat ukur yang terpasang adalah amperemeter pada setiap fasa, voltmeter.

Tabel 5. Kontrol PWM

Parameter	Satuan	Nilai
Frekuensi Sinyal Referensi	Rad/s	314
	Hz	50
Frekuensi Sampling	Time Values	[0 0.5 1]/1000
	Hz	1000
Jumlah Level Sampling	3-Level Bridge	2
	CHB 5-Level	4



Gambar 7. Rangkaian 3-Level



Gambar 8. Rangkaian CHB 5-Level

3.2. Uji THD, Rugi Switching dan Konduksi

Analisa THD pada penelitian ini dilakukan secara langsung pada aplikasi MATLAB Simulink dengan menggunakan FFT Analysis. Sinyal tegangan dan arus yang terbaca pada alat ukur akan dianalisis menggunakan tool ini.

Rugi switching umumnya telah didefinisikan pada datasheet transistor. Pada penelitian ini transistor yang digunakan adalah MG12100W-XN2MM (Littelfuse, 2015). Rugi konduksi dihitung menggunakan rumus di 2.5.

3.3. Penentuan Kebutuhan Panel Surya

Panel yang akan digunakan adalah tipe polycrystalline dari Mitsubishi Photovoltaic Module. Data spesifikasinya ditunjukkan pada tabel Tabel 6.

Tabel 6. Spesifikasi Modul PV

Mitsubishi Photovoltaic Module		
Max Power	Wp	210
Max System Volt	VDC	600
Max Voltage	V	29.2
Max Current	A	7.19
Tegangan OC	Voc	35.8
Arus SC	Isc	8
Dimensi	mm	1658
	mm	994
	mm	46
Berat	kg	20
Efisiensi PV	%	12.7

Besarnya tegangan dan arus yang akan dihasilkan oleh PLTS bergantung pada konfigurasi panel surya. Berdasarkan spesifikasi daya yang dimiliki panel, spesifikasi inverter, dan beban maka konfigurasi PV untuk PLTS dapat diketahui menggunakan persamaan berikut.

$$\Sigma \text{Modul paralel} = \frac{I_{dc}}{I_{PV}}$$

$$\Sigma \text{Modul seri} = \frac{V_{dc}}{V_{PV}}$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Rancangan

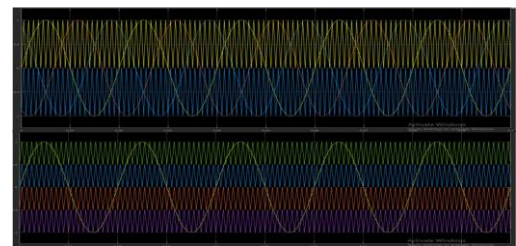
Pada penelitian ini dilakukan perhitungan untuk rancangan inverter 5-Level Cascaded H-Bridge yang selanjutnya akan disinkronisasi di MATLAB Simulink.

Tabel 7. Hasil Perancangan CHB 5-Level

Simbol	Parameter	Satuan	Hitung	Simulasi
B	Jumlah Bridge	Unit	2	
N	Jumlah Saklar	Unit	8	
n_{carrier}	Jumlah Sinyal Carrier	Sinyal	4	
	Tegangan Rating IGBT	V	1200	1200
f_{carrier}	Frekuensi Switching IGBT	Hz	320	
R	Resistansi	Ω	4.02	
H	Induktansi	H	0.008	
V_{dc}	Tegangan Terminal Panel	Volt	89.80 V	89.80 V
I_{dc}	Arus dari Panel Surya	Ampere	63 A	
V_{peak}	Tegangan Peak Output Inverter	Volt/fasa	179.6	179.4
V_{RMS}	Tegangan RMS Output Inverter	Volt/fasa	127	126.86
V_{LLRMS}	Tegangan pada Beban	Volt/beban	220	206.114
I_{loadRMS}	Ampere/beban	Ampere	44.56	47.16
P_{out}		kW	8.33	8.263
P_{dcin}		kW	25	24.79
η	Efisiensi Inverter	%	-	79.1
THD _v	Harmonisa Arus	%	-	16.42
THD _i	Harmonisa Arus	%	-	4.99
$E_{\text{switching}}$	Rugi Switching	mJ	-	25.3
E_{konduksi}	Rugi Konduksi	mJ	-	0.0015
P_{loss}	Total Rugi	W	-	64.77

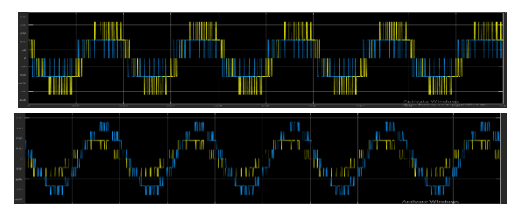
4.2. THD dan Topologi

Topologi yang disimulasikan adalah Inverter 3-Level Bridge dan Cascaded H-bridge 5-Level yang terkoneksi dengan beban 3 fasa yang terhubung delta. Gelombang carrier pada simulasi inverter 3-Level Bridge dan CHB 5-Level ditunjukkan pada Gambar 9.



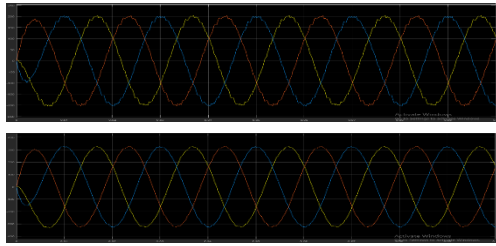
Gambar 9. Sinyal Carrier untuk (atas) 3-Level Bridge, (bawah) CHB 5-Level

Inverter 3-Level Bridge diuji dengan diinputkan $V_{dc,3} = 127.02 \text{ V}$ dengan menggunakan fungsi goto. Sedangkan inverter CHB 5-Level diinputkan $V_{dc,5(1)} = V_{dc,5(2)} =$



Gambar 10. Tegangan (atas) 3-Level Bridge, (bawah) CHB 5-Level

89 V. Pada frekuensi *switching* yang sama—1 kHz, harmonisa yang terjadi pada output setiap *inverter* dapat terlihat. Gelombang output *inverter* ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 10.



Gambar 11. Arus (atas) 3-Level Bridge, (bawah) CHB 5-Level

Bentuk gelombang yang belum sinusoidal merupakan indikasi adanya distorsi pada tegangan output akibat konversi DC ke AC. Perhitungan besarnya harmonisa bisa dilakukan dengan menggunakan tool FFT Analysis. Perbandingan nilai harmonisa pada output inverter topologi 3-Level Bridge dan CHB 5-Level yang dioperasikan pada frekuensi 1 khz disajikan pada Tabel 8.

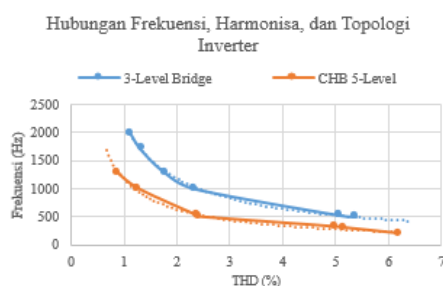
Tabel 8. Total Harmonic Distortion pada Setiap Topologi dan Fasa

		3-Level Bridge	CHB 5-Level	Reduksi
THD _v R	%	35.45	17.08	51.7%
THD _v S	%	35.34	17.16	
THD _v T	%	35.45	17.08	
THD _i R	%	2.36	1.38	45.1%
THD _i S	%	2.32	1.22	
THD _i T	%	2.33	1.25	

Perbedaan THD pada tiap fasa diakibatkan oleh perbedaan sudut fasa gelombang ($R=0^\circ$, $S=120^\circ$, $T=240^\circ$) terhadap sinyal carrier yang tetap pada sudut 0° . Berdasarkan perbandingan tersebut, pada frekuensi *switching* yang sama, besar harmonisa akan berbeda tergantung pada jenis topologinya. Aplikasi inverter topologi CHB 5-Level dapat mereduksi 51.7% harmonisa tegangan dan 45.1% harmonisa arus menggantikan topologi 3-Level Bridge.

4.3. THD dan Frekuensi Switching

Frekuensi *switching* pada dasarnya merupakan banyaknya sampling yang dilakukan pada tegangan DC sehingga dapat dikonversi menjadi tegangan AC. Frekuensi *switching* yang berbeda akan menghasilkan nilai harmonisa yang berbeda. Pada penelitian ini dilakukan simulasi pengujian nilai THD pada frekuensi *switching* yang bervariasi. Range frekuensi yang disimulasikan mulai dari 200 Hz-2000 Hz.

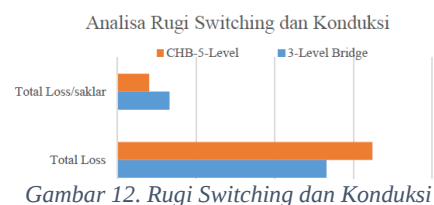


Gambar 13. Hubungan Frekuensi Switching dan Harmonisa

Hubungan antara frekuensi dan harmonisa diilustrasikan pada Gambar 12. Dapat terlihat bahwa meningkatnya

frekuensi *switching* menurunkan besarnya distorsi arus (THDi). Seperti yang telah dibahas, topologi inverter akan berpengaruh pada nilai THD, sehingga pada frekuensi yang sama, harmonisa pada arus output inverter CHB 5-Level akan lebih rendah.

Batas maksimal THD dalam sistem listrik yang dapat diterima oleh alat elektronik adalah 5% [4]. Berdasarkan karakteristik yang didapatkan pada Gambar 12 untuk mencapai THDi 5% pada topologi inverter 3-Level bridge membutuhkan *switching* sebesar 525 Hz, sedangkan pada topologi CHB 5-Level sebesar 320 Hz. Harmonisa tegangan pada frekuensi berbeda tidak menunjukkan karakteristik yang serupa, sehingga masih dibutuhkan penelitian lanjutan untuk mengetahui karakteristik harmonisa tegangan terhadap frekuensi *switching*.



4.4. Rugi Switching dan Konduksi

Rugi *switching* pada saklar IGBT tipe MG12100W-XN2MM pada saat IGBT On sebesar 7.8 mJ, IGBT Off sebesar 8 mJ, Dioda Off sebesar 9.5 mJ (Littelfuse, 2015). Saklar CHB 5-Level yang dioperasikan pada frekuensi 320 memiliki total rugi/saklar (8096.48 mJ/unit) yang lebih rendah dibandingkan saklar 3-Level bridge yang dioperasikan pada 525 Hz (13282.68 mJ/unit). Penurunan frekuensi kerja saklar sebesar 205 Hz mampu mereduksi rugi/saklar sebesar 39.05%.

Jumlah saklar yang digunakan pada setiap topologi akan mempengaruhi total loss. Penggunaan saklar pada unit *inverter* CHB 5-Level dua kali lipat dari pada *inverter* 3-Level Bridge. Sehingga apabila dijumlahkan, total loss saklar pada *inverter* CHB 5-Level sebesar 64771.86 mW lebih besar dari pada *inverter* 3-Level Bridge sebesar 53130.72 mW.

4.5. Inverter dan Panel Surya

Pemilihan topologi tidak mempengaruhi jumlah jumlah panel, namun akan berpengaruh pada kualitas daya yang akan terasa pada beban. Untuk dapat diaplikasikan pada sebuah PLTS, maka jumlah panel surya yang akan terkoneksi ke inverter harus menyesuaikan kapasitas dari inverter yang dirancang.

Jika tegangan output *inverter* pada setiap fasa sebesar $V_{o,rms} = 127 \text{ V}$, maka pada topologi CHB 5-Level membutuhkan dua catu daya DC dengan tegangan masing-masing sebesar $V_{dc,5} = 89.80 \text{ V}$. Mengacu pada spesifikasi panel surya 210 W (Mitsubishi Electric, 2010), maka kebutuhan panel adalah 54 unit.

Parameter	Satuan	5-Level	Dibulatkan
$V_{o,rms}$	V	127.02	123.89
$I_{Load,rms}$	A	44.56	45.75
V_{dc}	V	$V_{dc1}=89.81$	87.60
		$V_{dc2}=89.81$	87.60
I_{dc}	A	63	63
P_{dc}	kW	11320.5	11037.1
Seri	Unit	$S1=3.08$	3.00
		$S2=3.08$	3.00
Paralel	Unit	8.77	9
Total Panel	Unit	54.02	54

Gambar 14. Konfigurasi Panel Surya

4.6. Spesifikasi Rancangan Inverter Cascaded H-Bridge 5-Level

Inverter yang dirancang pada penelitian ini merupakan alat inverter CHB 5-Level 3 fasa yang terdiri atas satu rangkaian *Cascaded H-Bridge* 5-Level pada setiap fasa. Pada Tabel 9 sudah ditampilkan hasil rancangan inverter perfasa, agar menyesuaikan dengan pasar maka spesifikasi inverter harus dibuat dalam bentuk tiga fasa. Spesifikasi *Cascaded H-Bridge* 5-Level 3 Fasa adalah sebagai berikut,

INVERTER CASCADED H-BRIDGE 5-LEVEL 3 FASA	
Tegangan Output/Input (perfasa)	179 VAC/179 VDC
Arus Input (perfasa)	63 ADC
Daya Input (perfasa)	11.28 kW (DC)
Hubungan Beban	Delta
Tegangan Beban	220 VAC
Arus Beban	44.56 A
Daya Output Maksimal	25 kW
	29.411 kVA
Faktor Daya	0.85
Frekuensi Switching	320 Hz
Model IGBT	MG12100W-XN2MM
Rating Tegangan IGBT	179 V
THD _v	16.42%
THD _i	4.99%
Efisiensi	79.1%
Rugi Switching/rangkain	25.3 mJ
Rugi Konduksi/ rangkain	0.0015 mJ
Total Rugi 3-Fasa	194.31 mW

Tabel 9. Rancangan Inverter

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Inverter merupakan komponen penting dalam sistem penyearahan catu daya. Pada penelitian ini didapatkan kesimpulan yakni

- Topologi inverter Cascaded H-Bridge 5-Level dapat mereduksi 51.7% harmonisa tegangan dan 45.1% harmonisa arus dibandingkan topologi 3-Level Bridge.
- Perubahan frekuensi kerja sebesar 205 Hz dapat mereduksi rugi switching dan konduksi sebesar 39.05% Topologi Cascaded H-Bridge memiliki total loss 64771.9 mW, lebih besar dari pada 3-Level bridge karena pada CHB 5-Level terdapat 8 buah saklar.
- Rancangan inverter menggunakan topologi Cascade H-bridge 5-Level yang dioperasikan pada frekuensi switching 320 Hz menggunakan saklar IGBT. Inputnya perfasanya membutuhkan tegangan DC 179 V dan 63 A terkonversi menjadi 220 V dan 44.56 A pada setiap beban. Inverter tiga fasa ini dapat mengkonversi daya DC

33.83 kW (DC) menjadi 25 kW (AC) dengan efisiensi inverter 79.1%.

5.2. Saran

Hasil perancangan inverter Cascaded H-Bridge 5-Level untuk PLTS On Grid kapasitas 25 kW ini masih dapat dikembangkan sebelum menjadi solusi dan direalisasikan. Pada penelitian ini frekuensi switching berdampak signifikan terhadap reduksi harmonisa arus, disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut untuk reduksi harmonisa tegangan dengan filter LC yang dipasang sebelum beban.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ali, A. H., Hamad, H. S., & Abdulrazzaq, A. A. (2019). *An Adaptable Different-Levels Cascaded H-Bridge Inverter Analysis for PV Grid-Connected Systems*. International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)
- [2] Farzaneh, A., & Nazarzadeh, J. (2009). *Precise Loss Calculation in Cascaded Multilevel Inverters*. 2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering.
- [3] Giroux, P., & Sybille, G. (2011). Math Works.
- [4] IEEE Standard Association. (1992). IEEE Standard 519.
- [5] Kastawan, I. W. (n.d.). *Konverter DC/AC (Inverter) Multilevel*. 3.
- [6] Kementerian ESDM. (2020, September Rabu). *Proyeksi Perencanaan Ketenagalistrikan Melalui RUPTL*. dirren.pdf
- [7] Khomarul, H. (2021, Januari Jumat). Soal RUPTL 2020-2029, *APLSI Berharap Bauran Energi Terbarukan Diperbesar*. Kontan
- [8] Mashar, A., Ramadhan, P. J., & Kastawan, I. W. (n.d.). *Perancangan On-Line Uninterruptible Power Supply untuk Pembangkit Tenaga Listrik*. ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi dan Teknik Elektronika.
- [9] Mitsubishi Electric. (2010, Januari). *Mitubishi Electric Solar Power UJ-GA6 Series Catalogue*.
- [10] Prathiba, T., & Renuga, P. (2012). *A Comparative Study of Total Harmonic Distortion in Multilevel Inverter Topologies*. Journal of Information Engineering and Applications, 34.
- [11] Pratiwi, F. (2021, Januari Jumat). *Kementerian ESDM: Pemasangan PLTS Atap Baru 21 MW*.
- [12] Sinaga, V. D., Hiendro, A., Syaifurrahman, Suryadi, D., & Sanjaya, B. W. (n.d.). *Rancang Bangun Inverter Satu Fasa Lima Level*.
- [13] Wu, B., & Narimani, M. (2017). *High Power Converter and AC Drives Second Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.