

# Desain dan Implementasi *Bidirectional Voltage Source Inverter* Satu Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis

Muhammad Athariq Yurisqi Riswandi, Dedet Candra Riawan, dan Feby Agung Pamuji  
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: dedet.riawan@ee.its.ac.id.

**Abstrak**—Sejak diperkenalkannya sumber energi terbarukan ke dalam sistem pembangkit daya terdistribusi, inverter yang terhubung ke jaringan dan pengendaliannya memainkan peran penting dalam produksi energi secara keseluruhan. Namun, karena perilaku stokastik sumber daya terbarukan yang terhubung ke jaringan, pengendalian arus inverter menjadi tantangan terbesar. Terdapat berbagai teknik yang diusulkan dalam literatur untuk pengendalian arus dengan pengendali linear dan non-linear. Pengendali linear berdasarkan modulasi PWM memiliki respons keadaan yang lebih baik, namun memiliki kinerja dinamis yang lambat tergantung pada jenis beban yang terhubung. Di antara berbagai teknik yang ada, pengendali arus histerisis (*Hysteresis Current Controller/HCC*) menawarkan respons dinamis yang cepat, mudah diimplementasikan, dan ketangguhan terhadap variasi parameter beban keluaran. Pada studi ini akan dibuat desain, simulasi, dan alat *Bidirectional VSI* dengan kontrol arus histerisis. Dengan memvariasikan besar beban dan besar band histerisis, akan di buktikan konverter ini dapat menyuplai daya dua arah. Di tetapkan daya sistem sebesar 144 Watt, dengan tegangan AC 24 V dan tegangan DC sebesar 48 V.

**Kata Kunci**—*Voltage Source Inverter (VSI)*, *Bidirectional*, Kontrol Arus Histerisis, Energi Baru Terbarukan.

## I. PENDAHULUAN

**S**ISTEM pembangkit daya terdistribusi, juga disebut energi terdesentralisasi atau energi terdistribusi, adalah metode untuk menghasilkan listrik dari banyak sumber kecil, seperti panel surya, turbin angin, dan sejenisnya, yang berlokasi dekat dengan titik penggunaan. Sistem pembangkit daya terdistribusi mengurangi jumlah energi yang hilang dalam pengiriman listrik karena listrik biasanya dihasilkan di dekat tempat penggunaan [1]. Sistem daya terdistribusi ini juga menjadi penting dalam pasar listrik global karena peningkatan permintaan dalam pembangkitan listrik, dan persyaratan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, dan sebagainya [2].

Sejak diperkenalkannya sumber energi terbarukan ke dalam sistem pembangkit daya terdistribusi, inverter yang terhubung ke jaringan dan pengendaliannya memainkan peran penting dalam produksi energi secara keseluruhan. Namun, karena perilaku stokastik sumber daya terbarukan yang terhubung ke jaringan, pengendalian arus inverter menjadi tantangan terbesar. Terdapat berbagai teknik yang diusulkan dalam literatur untuk pengendalian arus dengan pengendali linear dan non-linear. Pengendali linear berdasarkan modulasi PWM memiliki respons keadaan yang lebih baik, namun memiliki kinerja dinamis yang lambat tergantung pada jenis beban yang terhubung [3].

Di antara berbagai teknik yang ada, pengendali arus histerisis (*Hysteresis Current Controller/HCC*) menawarkan respons dinamis yang cepat, mudah diimplementasikan, dan ketangguhan terhadap variasi parameter beban keluaran [4]. Teknik pengendalian arus histerisis (*Hysteresis Current Control/HCC*) yang memiliki frekuensi sakelar yang dapat bervariasi saat kondisi beban dan telah terbukti menjadi solusi yang cocok untuk semua aplikasi yang membutuhkan operasi dengan kinerja tinggi, seperti filter daya aktif, penggerak, dan lain sebagainya [5]. Dalam HCC, pulsa sakelar dihasilkan dengan membandingkan sinyal eror dengan histerisis band. Jika sinyal eror lebih kecil dari band histerisis, pengendalian terhadap PWM-VSI akan hilang. Di sisi lain, jika sinyal eror lebih besar, maka ada kemungkinan terjadinya hubung singkat pada sumber masukan. Frekuensi sakelar juga berubah dengan variasi lebar band histerisis. Jika lebar band histerisis besar, maka frekuensi sakelar rendah, dan sebaliknya [6].

Pada studi ini dibuat desain, simulasi, dan alat *Bidirectional VSI* dengan kontrol arus histerisis. Dengan memvariasikan besar beban dan besar band histerisis, akan di buktikan bahwa konverter ini dapat menyuplai daya dua arah. Ditetapkan daya sistem sebesar 144 Watt, dengan tegangan AC 24 V dan tegangan DC sebesar 48 V.

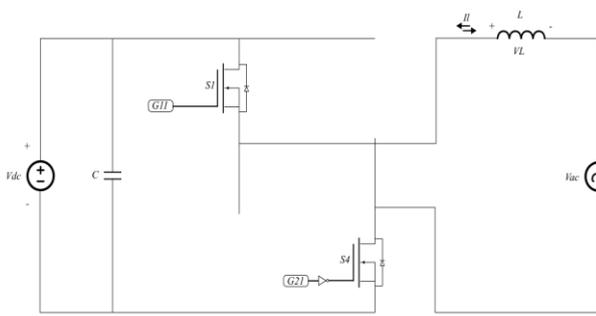
## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Dasar Teori

#### 1) *Bidirectional CC – VSI Terhubung ke Jaringan 1 Fasa*

Inverter merupakan alat yang memiliki fungsi mengkonversi dari sistem DC menjadi sistem AC. Tegangan keluaran inverter dapat berupa listrik 1 fasa atau 3 fasa yang berbentuk persegi dan modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation/pwm*). Inverter ini terdiri dari tegangan masukan berupa sumber DC, penyimpan energi sementara, saklar semikonduktor, filter AC, beban, dan sistem kendali. Sumber DC merupakan energi yang akan dikonversikan oleh inverter. Penyimpan energi sementara pada inverter berupa induktor dan kapasitor. Induktor dipasang seri terhadap sumber DC sedangkan kapasitor dipasang secara paralel terhadap sumber DC. Jika inverter menggunakan penyimpan daya sementara berupa induktor maka inverter ini disebut *Current Source Inverter (CSI)*. Sedangkan jika menggunakan kapasitor maka disebut *Voltage Source Inverter (VSI)* [7].

Ada beberapa jenis konfigurasi inverter salah satunya yaitu *fullbridge inverter*. Konfigurasi *fullbridge* ini terdiri dari empat saklar yang bekerja dengan cara menyalakan 2 pasang saklar secara bersamaan dan 2 pasang saklar yang lain



Gambar 1. Siklus ON Inverter Terhubung ke Jaringan Satu Fasa.

dipadamkan. Pensaklaran ini dilakukan selama setengah periode dari frekuensi output listrik AC yang diinginkan. Untuk dapat menyalakan atau mematikan saklar semikonduktor pada inverter sesuai frekuensi output yang diinginkan, digunakan perangkat sistem kendali. Sistem kendali dapat mengeluarkan 2 macam sinyal yang bernilai 1 atau 0. Ketika sinyal bernilai 1 maka dinamakan kondisi “high” dan akan menyebabkan saklar semikonduktor menyala atau konduksi. Sebaliknya, Ketika sinyal bernilai 0 maka akan menyebabkan saklar menjadi padam. Sistem kendali menyalakan atau mematikan saklar semikonduktor dengan cara membangkitkan gelombang persegi, PWM pulsa tunggal, PWM pulsa jamak, atau sinusoidal PWM [8]. Output inverter dapat di hubungkan langsung ke beban dan dapat juga dihubungkan ke jaringan PLN.

Inverter terhubung ke jaringan satu fasa mirip dengan inverter satu fasa yang banyak digunakan dalam aplikasi industri seperti pemanasan induksi, sumber daya cadangan, dan konverter pada sumber energi baru terbarukan. Namun, keluaran inverter ini langsung terhubung ke jaringan listrik. Inverter terdiri dari empat perangkat penyaklar yang terhubung dalam konfigurasi jembatan.

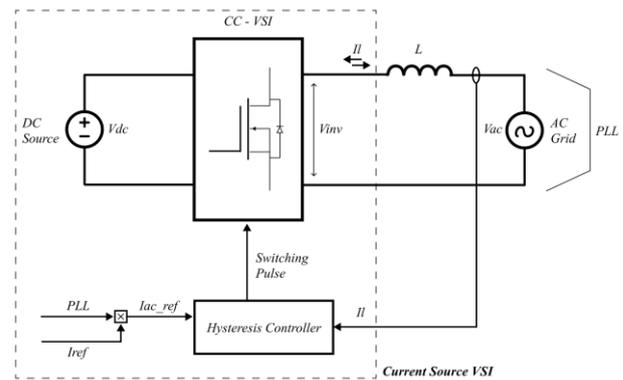
Agar dapat menyuplai daya ke Grid, tegangan yang dihasilkan oleh inverter harus lebih tinggi dari tegangan Grid. Hal ini diperlukan untuk membuat beda potensial antara tegangan inverter dan tegangan grid. Dengan adanya beda potensial ini, arus dapat mengalir ke potensial yang lebih rendah. Karena tegangan grid tidak dapat diatur, maka kontrol arus merupakan satu satunya pilihan untuk mengatur operasi dari inverter terhubung ke grid.

Siklus kerja konverter pada Gambar 1 dapat dianalisis dari kondisi sakelar S1 dan S4 mendapatkan sinyal ON, dengan menganggap komponen dalam kondisi ideal, persamaan tegangan masing masing sinyal keluaran dapat diperoleh:

$$V_{DC} - V_{AC} = V_L \tag{1}$$

Konverter ini dapat berfungsi sebagai rectifier dan inverter dalam dua arah yang akan diatur oleh metode pensaklaran. Pada mode penyearah, konverter ini berfungsi sebagai penyearah jembatan dioda dengan mengubah pulsa gate untuk pemicuan. Sedangkan pada mode inverter, sistem kontrol pensaklaran memonitor tegangan dan arus input serta output, dan mengatur sinyal sakelar semikonduktor untuk menghasilkan gelombang AC dengan frekuensi dan tegangan yang diinginkan. Ada dua metode kontrol pensaklaran yang dapat digunakan yaitu kontrol arus dan kontrol tegangan.

Metode kontrol arus diperlukan untuk konverter ini dapat menyuplai daya dua arah. Untuk mempermudah analisis



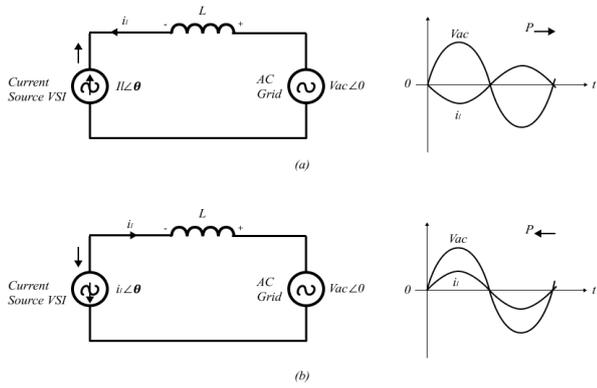
Gambar 2. Single Phase Bidirectional Inverter.

transfer daya dua arah, Bidirectional CC – VSI dapat di representasikan sebagai sumber arus. Dapat dilihat pada Gambar 3 (a), Bidirectional CC – VSI beroperasi dalam mode inverter yang di mana arah arus  $I_i$  menuju ke AC Grid. Sedangkan pada Gambar 3 (b) Bidirectional CC – VSI sedang beroperasi dalam mode rectifier yang arah arus  $I_i$  menuju current source VSI. Perpindahan arah arus ini menyebabkan perubahan sudut fasa sebesar 180 derajat. Terjadi perbedaan sudut fasa arus  $I_i$  antara mode inverter dan rectifier ini dikarenakan perbedaan arah arus yang semula ke arah AC grid kemudian berpindah sebaliknya ke arah current source VSI.

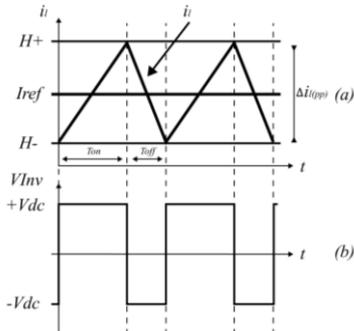
### 2) Kontrol Arus Histerisis

Untuk mengontrol arus inverter dua arah ini, akan digunakan kontrol arus histerisis. Kontrol arus histerisis sangat sederhana dan mudah diimplementasikan, sehingga banyak digunakan dalam mode inverter yang terhubung ke grid [9]. Operasi sistem kontrol ini dapat dilihat pada Gambar 2 yang bekerja dengan membandingkan arus keluaran induktor ( $I_i$ ) yang diukur dari inverter satu fasa dengan arus referensi. Dalam pengontrol arus histerisis ini , sinyal referensi diambil langsung dari jaringan listrik yang skemanya dapat di lihat pada Gambar 2. Pertama, tegangan jaringan (PLL) diambil dan disesuaikan dengan nilai arus yang diinginkan sebelum dikonversi menjadi sinyal arus untuk menjadi sinyal arus referensi ( $I_{ref}$ ) [3]. Sebuah Phase-Locked Loop (PLL) digunakan untuk melacak sudut fase dan frekuensi grid secara real-time. Sehingga, *Bidirectional* CC - VSI akan selalu sinkron terhadap grid. Dapat di lihat pada Gambar 4, saat pengontrol menghasilkan pulsa sakelar untuk MOSFET, suatu pita band histerisis tetap yang terdiri dari batas atas ( $H+$ ) dan batas bawah ( $H-$ ) digunakan untuk mengontrol kesalahan arus dalam rentangnya. Sakelar S1 dan S4 berada dalam keadaan ON ketika kesalahan arus mencapai batas atas, sementara S2 dan S3 dinyalakan jika kesalahan arus memenuhi batas bawah [10].

Kontrol arus histerisis tidak memerlukan parameter sistem, ataupun model konverter, sehingga menjadikannya salah satu teknik kontrol arus yang paling sederhana dan kuat. Pendekatan ini telah banyak digunakan dalam industri elektronika daya sejak era platform kontrol analog [11]. Pendekatan ini juga tidak melibatkan ekspresi matematika kompleks atau teori bingkai referensi, dan tidak memerlukan rangkaian analog yang rumit atau pengendali digital presisi tinggi [12]. Selama perubahan langkah pada arus referensi, kontrol histerisis menunjukkan respons dinamis yang cepat karena struktur kontrolnya yang bebas modulator. Waktu



Gambar 3. (a) Daya mengalir dari Current Controlled VSI ke AC Grid, (b) Daya mengalir dari AC Grid ke Current Controlled VSI.



Gambar 4. (a) arus induktor dan band kontrol arus histerisis, (b) bentuk gelombang tegangan keluaran inverter.

respons dinamis dalam metode ini terutama dibatasi oleh frekuensi pengalihan konverter, dan magnitudo [13]. Untuk mencari frekuensi maksimal *switching* dapat menggunakan persamaan dari rangkaian Single Phase PWM VSI dan kontrol arus histerisis:

$$T = T_{on} + T_{off} \tag{2}$$

$$T = \frac{4V_{DC} * L * H}{(V_{DC} + V_{AC})(V_{DC} - V_{AC})} = \frac{4V_{DC} * L * H}{(V_{DC}^2 - V_{AC}^2)} \tag{3}$$

$$f_s = \frac{1}{T} = \frac{(V_{DC}^2 - V_{AC}^2)}{4V_{DC} * L * H} \tag{4}$$

Di mana  $V_{AC}$ : Tegangan keluaran inverter,  $V_{DC}$ : Tegangan DC,  $L$ : Induktor,  $I_e$ : error arus,  $H$ : Lebar pita band histerisis,  $f_s$ : frekuensi *switching*. Frekuensi *switching* maksimum terjadi pada saat persilangan nol tegangan grid. Karena tegangan keluaran inverter bersifat sinusoidal, frekuensi *switching* berubah pada rentang tetap selama satu siklus lengkap dari 0 hingga  $V_{DC}$  [1].

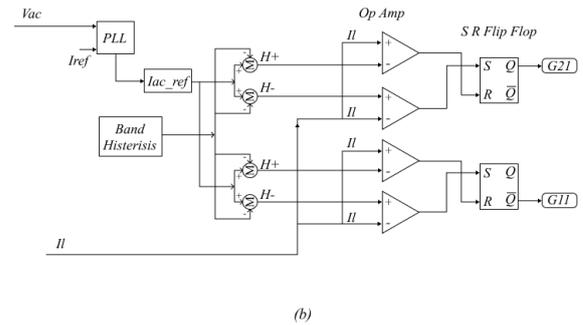
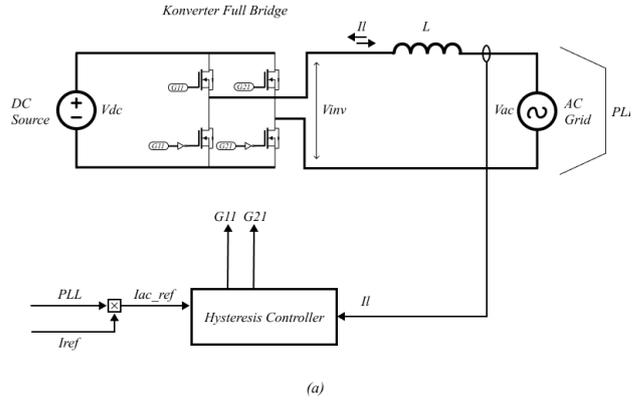
$$f_{max} = \frac{V_{DC}^2}{4V_{DC} * L * H} \tag{5}$$

$$f_{max} = \frac{V_{DC}}{4 * L * H} \tag{6}$$

### III. METODOLOGI

#### A. Pemodelan Rangkaian Bidirectional VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis

Rangkaian *Bidirectional* VSI 1 Fasa terdiri dari konverter dengan konfigurasi *full bridge* dan rangkaian kontrol arus



Gambar 5. (a) Rangkaian Daya dengan Konfigurasi Full Bridge, (b) Rangkaian Kontrol Arus Histerisis.

menggunakan metode histerisis yang terdiri dari komponen analog. Konverter ini dapat menyuplai daya dua arah. Terdapat dua mode untuk menyuplai daya dua arah yaitu mode Inverter dan mode Rectifier.

Gambar 5 adalah rangkaian dari sistem *bidirectional* VSI dengan kontrol arus histerisis. Dalam sistem ini akan dialiri oleh arus AC dan DC yang dapat mentransfer daya dua arah. Daya yang ditransfer dari sisi AC grid dalam mode Rectifier akan disearahkan menjadi tegangan DC. Daya ini akan digunakan untuk menyuplai beban resistif. Sebaliknya, daya yang ditransfer dari DC Source dalam mode Inverter akan diubah menjadi tegangan AC yang dayanya akan di transfer ke grid PLN.

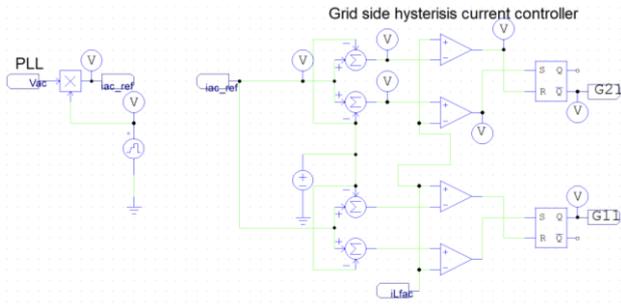
#### 1) Komponen Filter Induktor

Persamaan nilai komponen filter induktor ( $L$ ) pada Inverter Terhubung ke Jaringan Satu Fasa dapat dilakukan dengan menurunkan persamaan 4. Sehingga nilai Induktor dapat dicari dengan persamaan:

$$f_{max} = \frac{V_{DC}^2}{2V_{DC} * L * \Delta I_L} \tag{7}$$

$$L = \frac{V_{DC}}{2 * f_{max} * \Delta I_L} \tag{8}$$

Dengan didapatkan nilai  $L$  yang akan digunakan, makan lebar band Histerisis juga dapat ditentukan. Lebar band histerisis ( $H$ ) adalah setengah dari ripple arus ( $\Delta I_L$ ). Band histerisis ini digunakan untuk membatasi ripple arus atau eror arus ( $I_e$ ) yang akan di dihasilkan oleh inverter. Ketika eror arus lebih besar dari band histerisis atas, pulsa pengalihan akan dihasilkan untuk satu pasang saklar (VSwitching) sehingga arus induktor akan turun. Sebaliknya, ketika eror arus melebihi band histerisis bawah, maka pulsa pengalihan (VSwitching) akan dihasilkan sehingga arus induktor kembali naik dan proses ini akan terus di berulang ulang.



Gambar 6. Rangkaian Kontrol Arus Histerisis pada PSIM.

2) *Komponen Filter Capacitor*

Capacitor (C) berfungsi sebagai filter frekuensi tinggi pada sisi tegangan DC yang dihasilkan. Dengan adanya filter Capacitor, tegangan DC yang dihasilkan dapat lebih mulus, sedikit adanya ripple, dan meningkatkan kualitas tegangan DC yang akan dihasilkan. Nilai filter capacitor dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

Ketika ripple secara signifikan kecil, ripple tegangan keluaran diperkirakan sebagai:

$$V_{r(pp)} = \frac{V_m}{fRC} \tag{9}$$

Dan nilai rata raita tegangan output DC adalah:

$$V_{dc} = V_m \left(1 - \frac{1}{2fRC}\right) \tag{10}$$

$$\frac{V_{r(pp)}}{V_{dc}} = RF = \frac{\frac{V_m}{fRC}}{V_m \left(1 - \frac{1}{2fRC}\right)} \tag{11}$$

$$C = \frac{\left(\frac{2}{RF}\right) + 1}{2fR} \tag{12}$$

Di mana:

$V_{r(pp)}$ : Ripple Tegangan (V)

$V_m$ : Tegangan Puncak AC (V)

$f$ : Frekuensi Switching Rata Rata (Hz)

$R$ : Resistansi Beban ( $\Omega$ )

$RF$ : Faktor Ripple

B. *Desain Inverter Terhubung ke Jaringan Satu Fasa*

1) *Penentuan Nilai Induktor dan Lebar Band Histerisis*

Penentuan nilai induktor ini akan mempengaruhi besar ripple arus yang akan dihasilkan oleh inverter. Ripple arus ini juga digunakan untuk menentukan lebar band histerisis yang di mana nilainya setengah dari dari ripple arus. Penentuan nilai induktor dapat menggunakan Persamaan 13.

$$L = 1.95 \text{ mH} \tag{13}$$

Lebar band histerisis yang digunakan:

$$\Delta I_L = 2H \tag{14}$$

$$H = 0.41 \tag{15}$$

2) *Penentuan Nilai Beban*

Beban resistif digunakan di sisi tegangan DC saat mode rectifier dijalankan. Daya maksimum yang akan di transfer sebesar 140 Watt dan tegangan DC yang digunakan sebesar

Tabel 1.

Parameter Desain Bidirectional VSI Satu Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis.

| No. | Parameter                                | Value              |
|-----|--|--------------------|
| 1.  | Tegangan DC (Vdc)                        | 48 V               |
| 2.  | Tegangan AC (Vac)                        | 24 V (RMS)         |
| 3.  | Arus DC (Idc)                            | 3 A                |
| 4.  | Arus AC (Iac)                            | 6 A (RMS)          |
| 5.  | Daya (P)                                 | 144 W              |
| 6.  | Ripple Arus Induktor ( $\Delta I_L/2H$ ) | 10 % / 0.82 A (pp) |
| 7.  | Ripple Tegangan DC                       | $\leq 5\%$         |
| 8.  | Frekuensi Switching Maksimum             | 15 kHz             |
| 9.  | Frekuensi Switching Minimum              | 7.5 kHz            |
| 10. | Induktor                                 | 1.95 mH            |
| 11. | Lebar Band Histerisis                    | 0.41               |
| 12. | Capacitor                                | 8,109 $\mu$ F      |
| 13. | Load Resistance                          | 16.45 $\Omega$     |

48 V. Penentuan nilai beban resistif berdasarkan nilai tegangan, dan daya dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$R = \frac{V_{dc}^2}{P} \tag{16}$$

$$R = 16.45 \Omega \tag{17}$$

3) *Penentuan Nilai Capacitor*

Penentuan nilai capacitor dapat menggunakan persamaan 12. Diperlukan data frekuensi Minimum untuk menentukan besar kapasitor yang digunakan untuk dapat menghasilkan ripple kecil dari 5%. Untuk mencari nilai frekuensi minimum dapat menggunakan Persamaan 4. Frekuensi minimum terjadi pada saat tegangan AC mencapai puncak maksimum atau minimum.

$$f_{min} = \frac{(48^2 - (24 * \sqrt{2})^2)}{4 * 48 * 1.95 * 10^{-3} * 0.41} \tag{18}$$

$$f_{min} = 7,504 \text{ Hz} \tag{19}$$

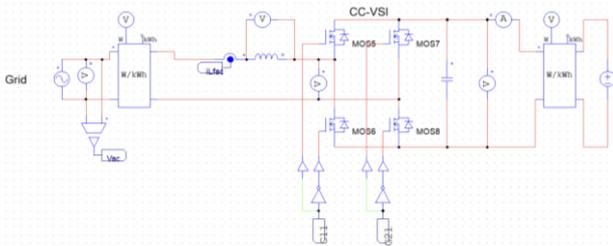
Setelah didapatkan f minimum, maka nilai capacitor dapat ditentukan menggunakan persamaan 3.2. Ripple Faktor dapat ditemukan dengan membagi nilai ripple tegangan dengan nilai tegangan nominal. Ditemukan nilai ripple faktor sebesar 0.001.

$$C = 8,109 \mu F$$

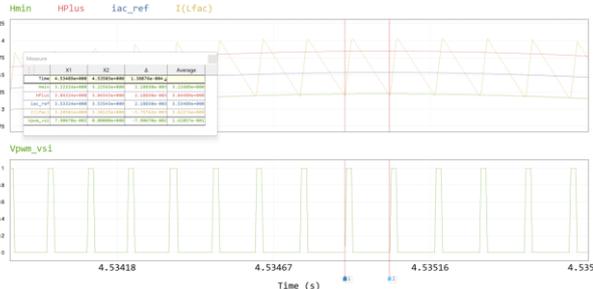
Berdasarkan perhitungan desain yang telah dilakukan maka besar parameter komponen yang dibutuhkan dalam implementasi *Bidirectional* VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis dapat dilihat pada Tabel 1.

C. *Simulasi Bidirectional VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis*

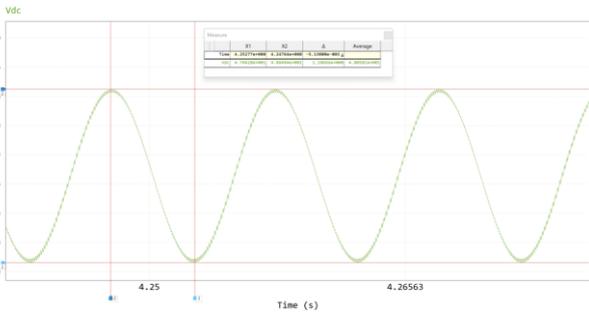
Simulasi *Bidirectional* VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis dilakukan dengan menggunakan software PSIM. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui *Bidirectional* VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histeris dapat bekerja sesuai dengan desain yang telah dilakukan. Pada simulasi ini *Bidirectional* VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis dijalankan dalam keadaan steady state.



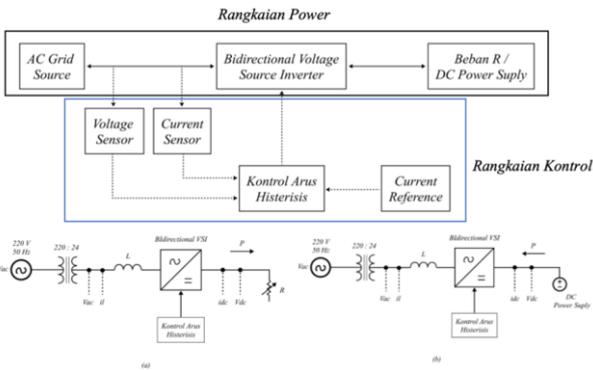
Gambar 7. Rangkaian Bidirectional VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis.



Gambar 8. Gelombang PWM, Band Histerisis (Vup & Vlo), dan Arus Aktual Inverter pada saat frekuensi switching minimum.



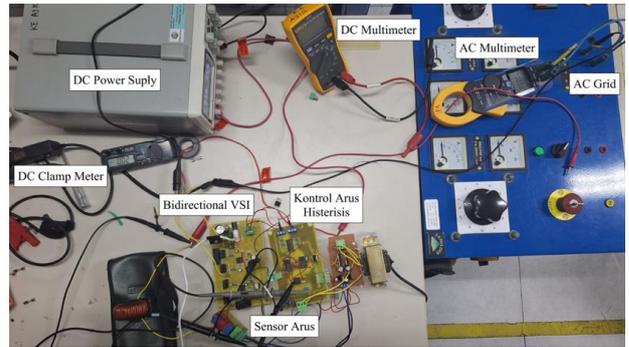
Gambar 9. Bentuk Gelombang Keluaran Tegangan DC dalam Mode Rectifier.



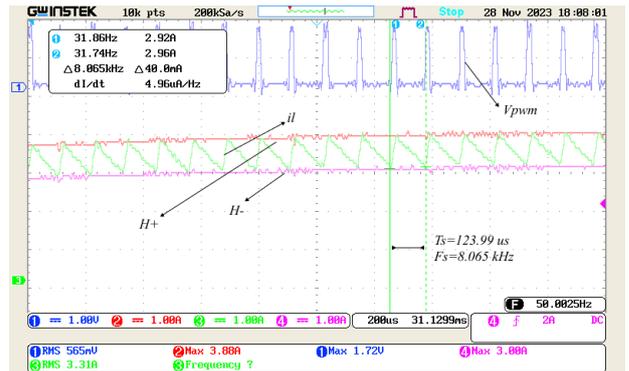
Gambar 10. Diagram Blok Sistem Alat Bidirectional VSI dengan Metode Kontrol Arus Histerisis (a) Mode Rectifier, (b) Mode Inverter.

1) Rangkaian Bidirectional VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis

Rangkaian Bidirectional VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis memiliki sumber tegangan AC Grid dan juga sumber tegangan DC yang masing masing sebesar 24 V dan 48 V (Lihat Gambar 7). rangkaian full bridge digunakan pada konverter ini. Sensor arus diletakkan pada sisi AC yang akan digunakan untuk membaca arus AC. Kemudian, arus AC yang telah di baca akan digunakan untuk mengontrol arus oleh kontrol arus histerisis. Arus yang akan dikontrol merupakan arus induktor yang memiliki ripple. Pada simulasi ini akan diamati bentuk gelombang SPWM, Arus induktor (iLfac), referensi tegangan (iac\_ref), band



Gambar 11. Alat Pengujian Bidirectional VSI dengan Metode Kontrol Arus Histerisis.



Gambar 12. Gelombang PWM, Band Histerisis (Vup & Vlo), dan Arus Aktual Alat Pengujian Bidirectional VSI Saat frekuensi Switching Minimum.

histerisis (H), tegangan DC (Vdc), Tegangan AC (Vac), Arus DC (Idc), dalam mode rectifier dan mode inverter. Daya input dan output pada mode rectifier dan inverter juga diperhatikan dalam simulasi ini.

Rangkaian pada PSIM terdiri dari rangkaian daya dan rangkaian kontrol (Lihat Gambar 6). Rangkaian kontrol menggunakan metode histerisis yang akan menghasilkan sinyal pensaklaran berupa Bipolar SPWM (Vpwm\_vsi). Terdapat juga rangkaian Phase Lock Loop untuk menjaga sinkronisasi antara grid dan inverter.

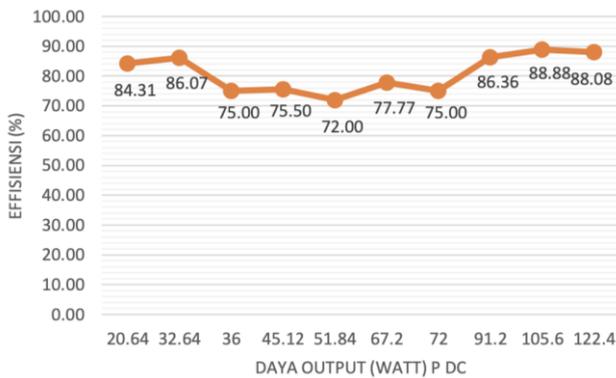
2) Hasil Simulasi Bidirectional VSI 1 Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis

Dapat di lihat pada Gambar 8, untuk melakukan 1 cycle memerlukan waktu sebesar  $1.35 \times 10^{-4}s$ . Maka frekuensi switching minimum didapatkan sebesar 7.45 kHz. Nilai frekuensi maksimum dan minimum pada simulasi sudah sesuai dengan desain perhitungan yang telah dilakukan.

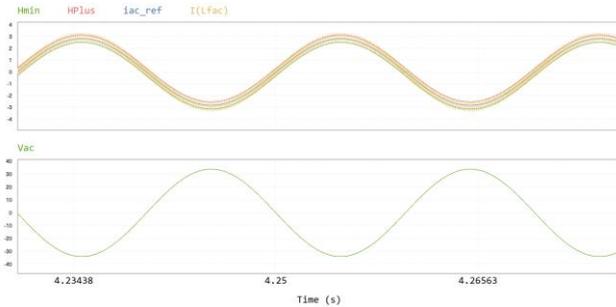
Ripple tegangan DC yang di desain sebesar  $\leq 5\%$  dengan besar capacitor 8,109 uF. Pada simulasi, dengan menggunakan besar capacitor yang telah di desain, besar ripple tegangan DC yang dihasilkan yaitu 1.18 V(pp). Ripple tegangan yang dihasilkan sudah di bawah 5 % yaitu sebesar 2.4 %. ripple tegangan tersebut sedikit berbeda dengan desain awal dikarenakan pada desain menggunakan nilai kapasitor minimum yang cari pada saat frekuensi switching minimum. Sedangkan pada sistem frekuensi bervariasi antara 7.5 kHz hingga 15 kHz. Walaupun demikian perbedaan nilai tersebut tidak terlalu signifikan dan masih dapat di toleransi (Lihat Gambar 9).

D. Implementasi Alat Bidirectional Voltage Source Inverter Satu Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis

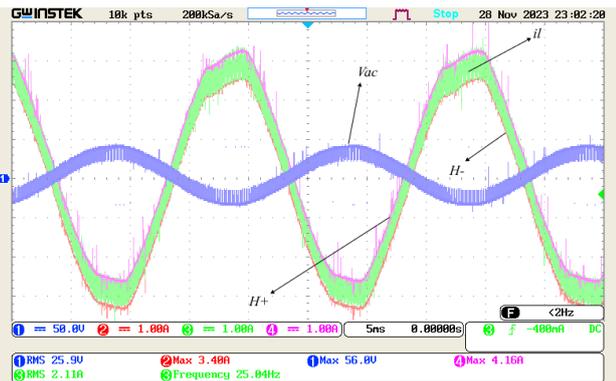
Tahap implementasi merupakan tahap pembuatan alat



Gambar 13. Grafik Efisiensi Mode Rectifier.



Gambar 14. Bentuk Gelombang Arus AC dan Tegangan AC Simulasi Mode Rectifier.



Gambar 15. Bentuk Gelombang Arus AC dan Tegangan AC Alat Uji Mode Rectifier.

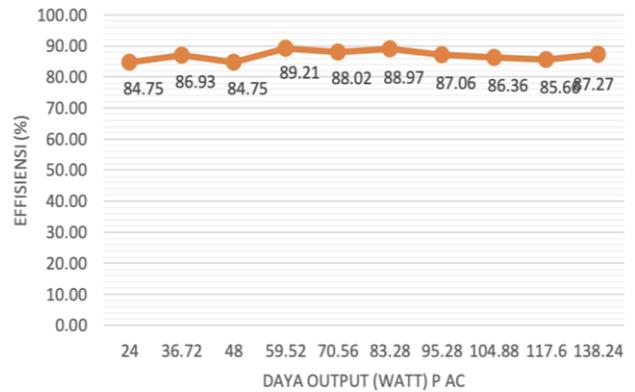
dengan menggunakan acuan dari proses desain yang telah dilakukan. Proses implementasi ini dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem secara riil.

1) *Pengujian Alat Bidirectional VSI Satu Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis*

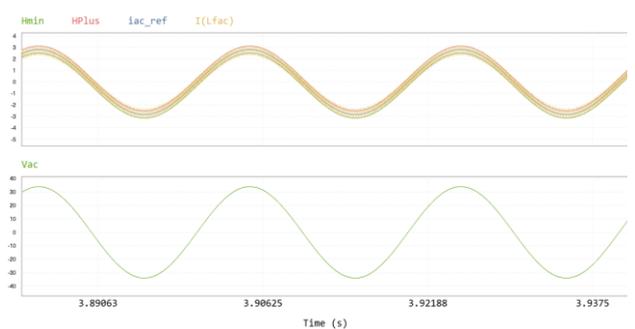
Diagram blok sistem alat serta peralatan yang akan dibuat dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11 pada saat konverter ini di jalankan pada mode rectifier, di sisi DC akan dipasang beban R. Daya akan mengalir dari AC Grid menuju ke beban R. Sedangkan pada saat konverter dijalankan pada mode inverter, di sisi DC akan di pasang DC power supply sehingga daya akan mengalir dari DC power supply menuju AC Grid.

2) *Hasil Pengujian Alat Bidirectional VSI Satu Fasa dengan Metode Kontrol Arus Histerisis*

Lebar band histerisis sudah di set sesuai dengan desain yang telah dilakukan yaitu sebesar 0.41. arus aktual juga sudah mengikuti batas atas (Hplus) dan batas bawah (Hmin) sehingga ripple arus memiliki nilai sebesar 0.82 A (pp). Frekuensi maksimum sebesar 16.13 kHz yang di mana



Gambar 16. Grafik Efisiensi Mode Inverter.



Gambar 17. Bentuk Gelombang Arus AC dan Tegangan AC Simulasi Mode Inverter.

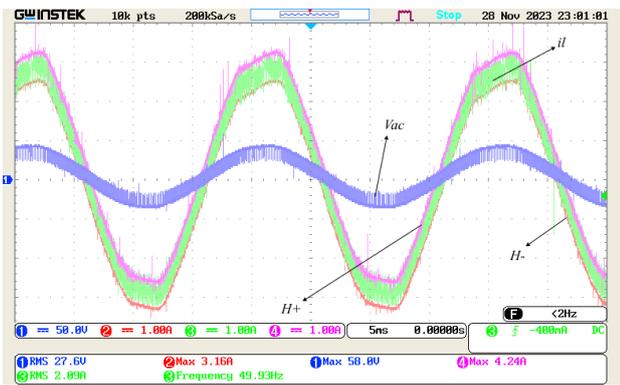
frekuensi maksimum sudah sesuai dengan desain yang memiliki nilai sebesar 15 kHz. Terdapat sedikit perbedaan nilai tetapi masih dapat di toleransi. Pengujian alat menggunakan daya 60 Watt agar dapat dibandingkan dengan desain simulasi yang telah dilakukan. Dengan tegangan 24 Vac, maka arusnya sebesar 2.5 A RMS dengan peak sebesar 3.53 A. Untuk frekuensi switching minimum dapat dilihat pada saat kondisi tegangan AC mencapai titik puncaknya. Dapat dilihat pada Gambar 12, frekuensi minimum memiliki nilai sebesar 8.06 kHz. Nilai tersebut sudah mendekati nilai frekuensi switching minimum yang telah di desain yaitu sebesar 7.45 kHz. Perbedaan nilai tersebut dapat terjadi dikarenakan kondisi alat percobaan yang tidak ideal dan juga di akibatkan oleh *human error*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

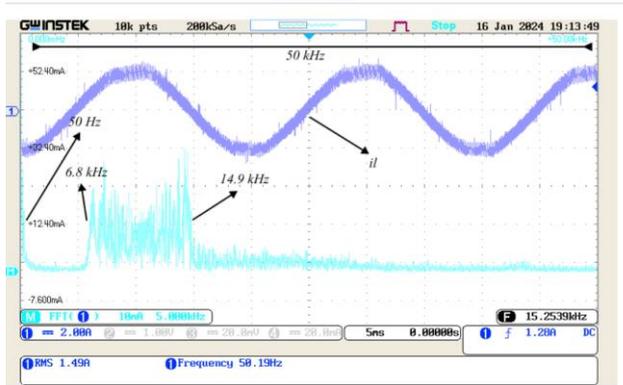
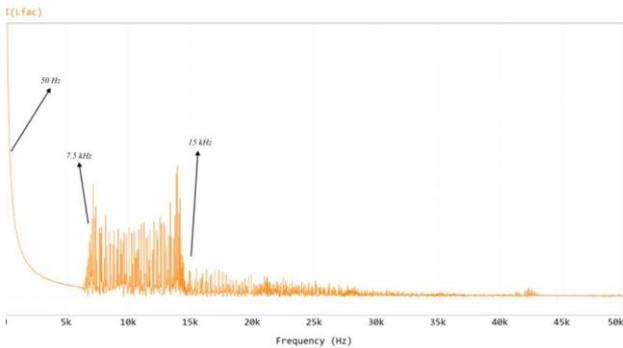
A. *Pengujian Bidirectional VSI dalam Mode Rectifier*

Dalam mode rectifier, sisi DC akan diberi beban Rheostad sehingga daya menuju dari grid ke sisi beban. Untuk menjaga tegangan DC tetap di 48 V, besar resistansi harus disesuaikan dengan daya yang akan diterima. Pada sisi grid, tegangan 220 V akan diturunkan menggunakan trafo ke 24 V. Arus referensi akan di ubah ubah secara bertahap dari 1 A hingga 5.8 A.

Gambar 13 menunjukkan grafik efisiensi alat uji dan simulasi *bidirectional VSI* mode rectifier ketika beban diubah ubah. Efisiensi terendah terjadi pada saat arus 3 A yaitu sebesar 72 %. Sedangkan efisiensi tertinggi terjadi pada saat arus 5 A yang memiliki efisiensi sebesar 88.88 %. Untuk efisiensi pada beban penuh 5.8 A yaitu sebesar 88.08 %. Terlihat bahwa efisiensi dari *bidirectional VSI* mode rectifier cenderung konstan dan memiliki efisiensi rata rata sebesar 80.59 %. Rugi rugi daya ini dapat terjadi dikarenakan adanya



Gambar 18. Bentuk Gelombang Arus AC dan Tegangan AC Alat Uji Mode Inverter.



Gambar 19. FFT Pada Simulasi dan Alat Implementasi saat Mode Inverter.

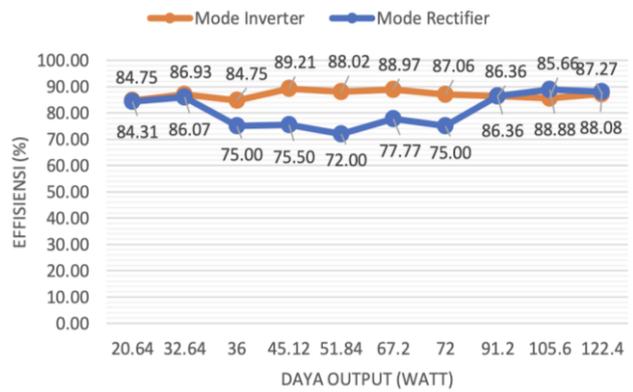
komponen yang tidak ideal seperti induktor dan capacitor, rugi rugi tembaga, dan jalur pada PCB.

Gambar 14 merupakan bentuk gelombang arus AC, arus referensi, band histerisis, dan tegangan AC pada saat simulasi dalam mode rectifier. Terdapat perbedaan sudut sebesar 180 derajat antara arus AC dan tegangan AC. hal ini menandakan bahwa arus menuju ke arah beban dari arah grid.

Pada Gambar 15 merupakan bentuk gelombang arus AC, arus referensi, band histerisis, dan tegangan AC pada alat uji dalam mode rectifier. Dapat dilihat bahwa gelombang arus AC sudah mengikuti band histerisis dan sudah sesuai dengan simulasi. Tegangan dan arus juga berbeda sudut sebesar 180 derajat. Tegangan AC yang seharusnya 24 V menjadi 25.9 V dapat terjadi diakibatkan oleh pensaklaran yang dilakukan pada *Bidirectional VSI*. Pensaklaran tersebut membuat adanya ripple tegangan yang membuat nilai tegangan AC sedikit naik.

**B. Pengujian Bidirectional VSI dalam Mode Inverter**

Dalam mode inverter, sisi DC akan di pasang oleh DC power suply sehingga daya akan disupply menuju grid. Pada sisi grid, tegangan 220 V akan diturunkan menggunakan trafo



Gambar 20. Perbandingan Efisiensi Mode Rectifier dan Mode Inverter.

ke 24 V. Arus referensi akan diubah ubah secara bertahap dari 1 A hingga 5.8 A.

Gambar 16 menunjukkan grafik efisiensi alat uji dan simulasi *bidirectional VSI* mode inverter ketika beban diubah ubah. Terlihat bahwa efisiensi dari *bidirectional VSI* mode rectifier cenderung konstan dan memiliki efisiensi rata rata sebesar 86.9 %.

Pada Gambar 17 merupakan bentuk gelombang arus AC, arus referensi, band histerisis, dan tegangan AC pada simulasi dalam mode inverter. Ripple tegangan tersebut juga dapat terjadi diakibatkan adanya nilai impedansi pada trafo yang digunakan. Impedansi trafo ini akan menyebabkan drop tegangan yang akan menyebabkan terjadinya ripple tegangan.

Pada Gambar 18 merupakan bentuk gelombang arus AC, arus referensi, band histerisis, dan tegangan AC pada alat uji dalam mode inverter. Dapat dilihat bahwa gelombang arus AC sudah mengikuti band histerisis dan sudah sesuai dengan simulasi.

**C. Spektrum Frekuensi Arus Induktor**

Pada kontrol arus histerisis, frekuensi switching yang dihasilkan tidak konstan, melainkan berubah ubah tergantung respon dari sistem. Pada penelitian ini spektrum frekuensi di desain antara 7.5 kHz hingga 15 kHz. Spektrum frekuensi ini dapat dilihat menggunakan FFT (Fast Fourier Transform) pada Gambar 19.

**D. Perbandingan Efisiensi Mode Rectifier dan Mode Inverter**

Efisiensi dari konverter yang telah di desain juga cukup bagus yang dimana mode rectifier memiliki efisiensi sebesar 80.59 % dan pada mode inverter memiliki efisiensi sebesar 86.9 %. Hal ini dipengaruhi oleh rugi-rugi yang dialami oleh konverter *bidirectional VSI*. Perbedaan efisiensi antara mode rectifier dan mode inverter dapat terjadi karena ripple arus DC yang di hasilkan sangat besar (lihat Gambar 20). Hal ini akan mempengaruhi hasil pembacaan pada sensor arus. Beban resistif yang digunakan juga dapat mempengaruhi efisiensi yang di hasilkan pada mode rectifier.

**V. KESIMPULAN DAN SARAN**

Berdasarkan data dan analisis, maka dapat ditarik kesimpulan: (1) Desain simulasi dan alat uji sudah seusaai dengan perhitungan dan dari hasil simulasi dan implementasi dapat dibandingkan bahwa nilai simulasi lebih baik. Hal ini dikarenakan simulasi dilakukan pada kondisi ideal oleh software PSIM sedangkan implementasi alat uji di buat

menggunakan komponen yang tidak ideal. (2) Implementasi alat *Bidirectional VSI* dengan metode kontrol arus histerisis dapat digunakan untuk transfer daya dua arah yang dimana konverter ini dapat bekerja sebagai rectifier sekaligus inverter. (3) Metode kontrol arus histerisis sangat cepat merespon terhadap perubahan sistem yang dinamis tanpa perlu memerlukan perhitungan yang rumit. (4) Ripple arus sudah mengikuti nilai band histerisis. Saat simulasi ripple arus sebesar 0.82 A (pp) dan pada alat implementasi sebesar 0.82 A (pp). (5) Didapatkan nilai efisiensi dari alat implementasi bidirectional VSI yaitu pada mode rectifier sebesar 80.59% dan mode inverter sebesar 86.9 %. (6) Frekuensi switching dari alat implementasi maupun simulasi bidirectional VSI sangat bervariasi di rentang 7 kHz hingga 15 kHz.

Berdasarkan data dan analisis, maka dapat diberikan saran: (1) Diperlukan induktor dengan core yang memiliki kapasitas flux magnet yang lebih tinggi untuk menghindari saturasi dan noise yang di hasilkan induktor. (2) Memperkecil band histerisis agar ripple arus yang dihasilkan semakin kecil. (3) Diperlukan pemilihan bahan bahan dan material yang bagus untuk mengurangi rugi rugi daya yang dihasilkan. (4) Diperlukan rangkaian pengamanan untuk bidirectional VSI ketika terjadi gangguan pada sistem agar konverter tidak terkena gangguan yang di akibatkan oleh sistem.

#### REFERENSI

- [1] J. K. Singh and R. K. Behera, "Hysteresis current controllers for grid connected inverter: Review and Experimental Implementation," in *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Chennai, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. doi: 10.1109/PEDES.2018.8707755.
- [2] S. Jena, B. C. Babu, and L. Sahu, "Experimental Study on Adaptive Hysteresis Current Controller For Inverter-Interfaced 1- $\Phi$  Grid Connected System," in *Proceedings - 2011 Annual IEEE India Conference: Engineering Sustainable Solutions (INDICON)*, Hyderabad, India: IEEE, 2011. doi: 10.1109/INDCON.2011.6139544.
- [3] K. Krismadinata, N. A. Rahim, and J. Selvaraj, "Implementation Of Hysteresis Current Control For Single-Phase Grid Connected Inverter," in *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Bangkok, Thailand: IEEE, 2007, pp. 1097–1101. doi: 10.1109/PEDS.2007.4487841.
- [4] S. Jena, B. Mohapatra, and C. K. Panigrahi, "Realization of Double Band Hysteresis Current Controller For Single Phase Grid Connected Pulse Width Modulated Voltage Source Inverter," in *Proceedings - 2015 International Conference on Man and Machine Interfacing, MAMI 2015*, Bhubaneswar, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. doi: 10.1109/MAMI.2015.7456579.
- [5] A. Idris, R. Baharom, N. R. Hamzah, and M. K. Hamzah, "Hysteresis Current Control For AC-DC Converter Using Single-Phase Matrix Converter Fed Permanent Magnet Motor," in *ISCAIE 2014 - 2014 IEEE Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics*, Penang, Malaysia: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015, pp. 117–120. doi: 10.1109/ISCAIE.2014.7010221.
- [6] S. Jena, N. Tiwary, C. K. Panigrahi, and P. K. Sahu, "Performance Improvement Of Grid Integrated Voltage Source Inverter Using Different Hysteresis Current Controllers," in *7th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, UPCON 2020*, Prayagraj, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. doi: 10.1109/UPCON50219.2020.9376436.
- [7] R. D. Dzulfikar, "Desain dan Implementasi Wireless Power Transfer untuk Aplikasi Pengisian Baterai Kendaraan Listrik," Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2023.
- [8] M. Ashari, *Desain Konverter Elektronika Daya*. Bandung, Indonesia: Informatika, 2021, ISBN: 9786026232397.
- [9] T. Nguyen-Van, R. Abe, and K. Tanaka, "A digital hysteresis current control for half-bridge inverters with constrained switching frequency," *Energies* 2017, Vol. 10, Page 1610, vol. 10, no. 10, p. 1610, Oct. 2017, doi: 10.3390/EN10101610.
- [10] C. N. A. Julius, L. N. Muhammad, H. Daniyal, N. Jaalam, N. R. H. Abdullah, and S. A. Ghani, "A comparative study of hysteresis current controller and pi controller in grid-connected inverter," *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 3182–3187, Nov. 2019, doi: 10.30534/ijatcse/2019/83862019.
- [11] D. Maksimović, R. Zane, and R. Erickson, "Impact of Digital Control In Power Electronics," in *IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Kitakyushu, Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2004, pp. 13–22. doi: 10.1109/WCT.2004.240284.
- [12] J. M. Bosque-Moncusí, H. Valderrama-Blavi, F. Flores-Bahamonde, E. Vidal-Idiarte, and L. Martínez-Salamero, "Using low-cost microcontrollers to implement variable hysteresis-width comparators for switching power converters," *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 5, pp. 787–795, May 2018, doi: 10.1049/IET-PEL.2016.1001.
- [13] V. Yaramasu and B. Wu, "Overview of Digital Control Techniques," in *Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems*, Wiley-IEEE Press, 2017, pp. 91–116. doi: 10.1002/9781119082989.CH3.