

# Implementasi Desain Filter Pasif: Simulasi Perancangan Filter LCL untuk Inverter SPWM Berdasarkan Frekuensi Switching dan Distorsi Harmonik Total

## Implementation of Passive Filter Design: Simulation of LCL Filter Design for SPWM Inverter and Total Harmonic Distortion

Ahmad Khumedillah Irfa'i<sup>1\*</sup>, Ase Suryana<sup>2</sup>, Muhammad Adli Rizulloh<sup>3</sup>, Resa Pramudita<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Widyatama

Jl. Cikutra No.224 A, Sukapada, Kec. Cibeunying Kidul, Kota Bandung, Jawa Barat 40125

<sup>3,4</sup>Program Studi Pendidikan Teknik Otomasi Industri dan Robotika, Fakultas Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, Universitas Pendidikan Indonesia

Jl. Dr. Setiabudi No.229, Isola, Kec. Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40154

ahmad.khumedillah@widyatama.ac.id<sup>1\*</sup>, ase.suryana@widyatama.ac.id<sup>2</sup>, muhammad.adli.riz@upi.edu<sup>3</sup>, resa.pd@upi.edu<sup>4</sup>

**Abstrak** – Seiring berjalannya waktu, perkembangan sumber energi listrik terbarukan dan integrasi sistem jaringan listrik berkembang sangat pesat. Kemudian, kualitas daya menurun dikarenakan kandungan distorsi harmonik ikut terinjeksi ke jaringan listrik dari sebagian besar perangkat elektronika daya yang menggunakan aplikasi inverter. Diperlukan Filter LCL yang dioptimalkan guna meningkatkan kualitas daya untuk inverter satu fasa yang terhubung dengan perangkat utilitas. Filter LCL yang dirancang dibawah batasan varisasi frekuensi swtiching minimum, distorsi harmonik total (THD), nilai induktor, dan faktor daya ( $\cos\phi$ ). Dengan desain tersebut memberikan kinerja optimal untuk mengurangi konten harmonik. Semua hasil diperoleh melalui perhitungan, software PSIM, dan software LTspice. Hasil simulasi menunjukkan distorsi harmonik total pada tegangan dan arus keluaran mengalami penurunan yang signifikan, sehingga meningkatkan kualitas daya yang lebih minim distorsi. THD tegangan sebelum melewati filter sebesar 79,52% menjadi 0,4972% setelah melewati filter LCL, sedangkan pada arus inverter yang mulanya 3,288% menjadi 0,4972% setelah melewati filter LCL. Dengan redaman distorsi harmonik total pada keluaran tegangan sebesar 99,37% dan keluaran arus 84,88%. Hasil ini memverifikasi kelayakan desain filter LCL yang di usulkan.

**Kata Kunci:** LCL filter, SPWM inverter, LPF, THD, Switching.

**Abstract** – Over time, the development of renewable electrical energy sources and the integration of power grid systems have grown rapidly. Subsequently, power quality is degraded due to harmonic distortion content injected into the power grid from most power electronic devices using inverter applications. An optimized LCL filter is required to improve the power quality for single-phase inverters connected to utility

TELKA, Vol.10, No.3, November 2024, pp. 204~216

ISSN (e): 2540-9123

ISSN (p): 2502-1982

■ 204

devices. The LCL filter is designed under the constraints of minimum switching frequency variation, total harmonic distortion (THD), inductor value, and power factor ( $\cos\phi$ ). The design provides optimal performance to reduce the harmonic content. All results were obtained through, software PSIM, and software LTspice. The simulation results show that the total harmonic distortion in the output voltage and current has decreased significantly, thus improving the power quality with less distortion. The THD of the voltage before passing through the filter is 79.52% to 0.4972% after passing through the LCL filter, while that of the inverter current is initially 3.288% to 0.4972% after passing through the LCL filter. With a total harmonic distortion attenuation at the voltage output of 99.37% and current output of 84.88%. These results verify the feasibility of the proposed LCL filter design.

**Keywords:** LCL filter, SPWM inverter, LPF, THD, Switching.

## 1. Pendahuluan

Meningkatnya permintaan energi terbarukan serta digencarkannya penghematan konsumsi bahan bakar fosil, mendorong sumber energi terbarukan untuk di rekayasa guna memenuhi permintaan energi. Diantaranya penggunaan energi surya menggunakan fotovoltaik (PV) menjadi populer karena beberapa keunggulannya. Energi listrik yang dihasilkan dari fotovoltaik dalam bentuk sumber tegangan searah (DC), dan memerlukan konversi menggunakan inverter dengan spesifikasi daya sesuai permintaan konsumen. Keluaran tegangan bolak-balik (AC) dari inverter tidak murni sinusoidal, diperlukan desain rangkain filter yang tepat untuk menjadikannya sinusoidal guna menghindari hilangnya energi yang tidak perlu dalam pemggunaan perlatan rumah tangga. Dilain sisi, ketika sistem PV inverter terintegrasi dengan jaringan listrik, filter akan memberikan kualitas daya yang lebih baik

Untuk menurunkan nilai distorsi harmonik total (THD) dari arus inverter, diperlukan filter LCL pada keluaran inverter untuk menyaring tegangan denyut dan membatasi konten harmonik. Rangkaian Filter LCL dikonfigurasi sebagai *Low Pass Filter (LPF)* orde ketiga, yang dapat mewujudkan redaman harmonik secara efektif dengan kebutuhan induktansi yang jauh lebih rendah, sehingga saat ini lebih populer dibanding menggunakan filter *L* dan filter *LC* [1]. Pemilihan nilai induktor dan kapasitor untuk filter LCL merupakan kriteria penting dalam perbaikan kualitas daya yang di suplai ke jaringan [2], [3]. Besarnya arus serta daya aktif dan reaktif inverter bisa dikontrol melalui rangkaian loop tertutup (*closed loop control*) yang dibandingkan dengan sinyal referensi [4], [5]. Sedangkan distorsi harmonik total (THD) pada arus listrik tidak dapat dikendalikan tanpa menggunakan filter LCL.

Selain literatur yang berkenaan dengan implementasi LCL dalam berbagai aplikasi, dilakukan juga studi literatur dari penelitian sebelumnya terkait filter LCL yang dilakukan oleh Yi Tang dkk, [6]. Yi Tang dkk. merancang sistem filter LCL dengan frekuensi resonansi filter lebih tinggi dari frekuensi nyquist, yaitu setengah dari frekuensi sampling. Penelitian Yi Tang tidak menyisipkan resistansi redaman yang dapat menekan lonjakan frekuensi resonansi. Penelitian lain dilakukan oleh S Hasan dkk, yang menerapkan filter LCL pada sistem inverter 3 fasa dengan daya 20 kW, tegangan 400 VDC dan frekuensi switching 10 kHz. Pada penelitiannya, Hasan dkk. menyisipkan resistansi redaman untuk menekan lonjakan frekuensi resonansi [7]. Selain dari itu, penelitian lain menerapkan filter LCL pada sistem inverter 1 fasa dengan daya 200 W, tegangan 100 VDC dan frekuensi switching 4 kHz dengan keluaran 50 V [1].

Berdasarkan studi sebelumnya, maka pada penelitian ini diimplementasikan sebuah desain filter LCL yang memiliki fungsi spesifik sebagai *Low Pass Filter (LPF)* orde ketiga pada sistem jaringan satu fasa dan menerapkan resistansi redaman menggunakan resistor untuk menekan lonjakan frekuensi resonansi LCL [8]. Hasil penelitian ini diperoleh melalui perhitungan dengan menggunakan beberapas software, diantaranya: *software* PSIM sebagai pemodelan inverter SPWM, *software* LTspice sebagai verifikasi tanggapan respon filter.

## 2. Metode Penelitian

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai metode dan tahapan penelitian termasuk desain LCL pada sistem inverter SPWM.

### 2.1. Inverter SPWM (*sinusoidal pulse width modulation*) satu fasa

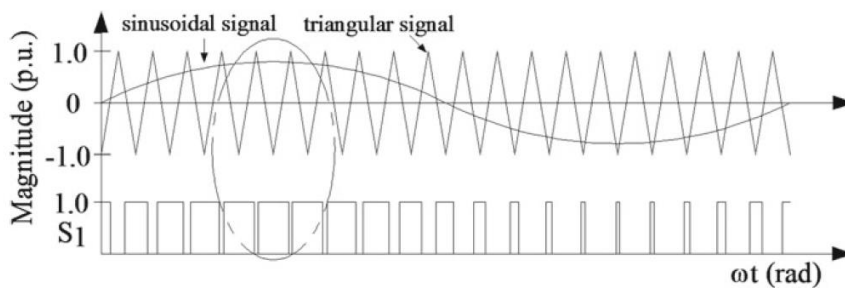
Dari beberapa topologi *switching* inverter, metode SPWM banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan dan nilai konten harmonik yang rendah pada keluaran inverter. Tegangan keluaran inverter bisa dikendalikan dengan memvariasikan indeks modulasi yang didefinisikan sebagai rasio antara sinyal puncak modulasi dan sinyal puncak pembawa, sehingga dapat dituliskan menggunakan Persamaan (1) berikut.

$$m_a = \frac{V_{sin}}{V_{tri}} \quad (1)$$

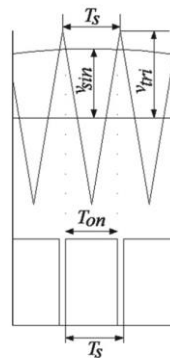
dengan  $V_{sin}$  dan  $V_{tri}$  adalah nilai puncak gelombang sinus modulasi dan nilai puncak gelombang segitiga pembawa. Karena tegangan keluaran inverter ditentukan oleh nilai puncak sinyal modulasi, maka tegangan fundamental dari inverter juga dapat dituliskan sebagai Persamaan (2) berikut.

$$V_{il} = \frac{m_a V_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Persamaan (1) menunjukkan pengembangan sinyal SPWM melalui perbandingan sinyal sinusoidal dengan sinyal segitiga. Persamaan (2) adalah tampilan yang diperbesar dari suatu bagian desain Filter LCL untuk Inverter SPWM.



Gambar 1. Pengembangan sinyal SPWM.



Gambar 2. Pembesaran perbandingan sinyal sinusoidal dan sinyal segitiga.

## 2.2. Pemodelan filter LCL

Secara umum, inverter SPWM menghasilkan keluaran yang tidak memiliki bentuk gelombang sinusoidal dan cenderung mengandung konten harmonik. Persamaan (4) menunjukkan diagram rangkaian LCL, yang dapat diatur menggunakan persamaan berikut.

$$L_i \frac{di_i}{dt} = V_i - V_c - (R_i - R_f) i_i + R_f i_g \quad (3)$$

$$L_g \frac{di_g}{dt} = V_c - V_g + R_f i_i - (R_f + R_g) i_g \quad (4)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{i_i - i_g}{C_f} \quad (5)$$

$V_i$  yaitu tegangan AC sisi inverter,  $V_g$  sisi keluaran tegangan AC,  $V_c$  tegangan pada kapasitor,  $R_i$  hambatan dalam induktor pada sisi inverter  $L_i$ ,  $R_g$  hambatan dalam induktor pada sisi inverter  $L_g$ ,  $C_f$  kapasitansi filter,  $R_f$  adalah resistansi redaman.

Matriks dari filter dapat dinyatakan sebagai Persamaan (6) berikut.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_i}{dt} \\ \frac{di_g}{dt} \\ \frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_i + R_f}{L_i} & \frac{R_f}{L_i} & -\frac{1}{L_i} \\ \frac{R_f}{L_g} & -\frac{R_f + R_g}{L_g} & \frac{1}{L_g} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_i \\ i_g \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_i} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_g \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Yang dinyatakan dengan  $\dot{x} = Ax + Bu$ . Fungsi transfer dari rangkaian filter dapat mengikuti Persamaan (7).

$$\frac{i_g}{V_i} = C[sI - A]^{-1}B \quad (7)$$

dengan

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_i + R_f}{L_i} & \frac{R_f}{L_i} & -\frac{1}{L_i} \\ \frac{R_f}{L_g} & -\frac{R_f + R_g}{L_g} & \frac{1}{L_g} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_i} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ dan } C = [0 \quad 1 \quad 0]$$

Fungsi transfer sistem dapat ditulis dengan mengabaikan nilai resistansi internal induktor, yaitu dengan asumsi  $R_i = R_g = 0$ .

$$\frac{i_g}{V_i} = \frac{R_f C_f s + 1}{s[L_i L_g C_f s^2 + R_f C_f (L_i + L_g) s + (L_i + L_g)]} \quad (8)$$

Karakteristik Persamaan (10) dapat ditulis sebagai Persamaan (9).

$$s^2 = R_f \left( \frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_g} \right) s + \frac{1}{C_f} \left( \frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_g} \right) = 0 \quad (9)$$

Dengan membandingkan persamaan dengan  $s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2 = 0$ . Rasio redaman dapat di estimasi menggunakan Persamaan 10.

$$\xi = \frac{1}{2} R_f \sqrt{C_f \left( \frac{1}{L_i} + \frac{1}{L_g} \right)} \quad (10)$$

### 2.3. Rancangan desain filter LCL

Untuk merancang filter LCL, beberapa karakteristik filter harus masuk dalam pertimbangan, diantaranya redaman *switching*, *ripple* arus, nilai filter, dan lain lain. Faktor redaman resonansi pada LCL merupakan kriteria yang penting, dengan demikian redaman pasif harus disertakan dengan cara memasukan resistansi secara seri dengan kapasitansi, seperti yang ditunjukkan Persamaan (10).

Parameter yang dibutuhkan dalam desain rangkain filter diantaranya tegangan input dalam arus searah  $V_{dc}$ , tegangan dasar keluaran  $V_{il}$ , daya aktif  $P_n$ , frekuensi *switching*  $f_s$ , frekuensi resonansi  $f_{res}$ , dan frekuensi output  $f_g$ . Kriteria LCL yang didesain adalah  $10 * f_g \leq f_{res} \leq \frac{1}{2} * f_s$ , di desain seperti ini untuk menghindari frekuensi resonansi dari filter LCL pada harmonik orde rendah dan orde tinggi [9], [10].

Adapun perhitungan untuk menentukan basis impedansi dan basis kapasitansi ditentukan oleh Persamaan (11) dan (12).

$$Z_B = \frac{V_{il}^2}{P_n} \quad (11)$$

$$C_B = \frac{1}{\omega_g * Z_B} \quad (12)$$

Untuk menentukan arus keluaran dasar  $I_{il}$  dan arus maksimum  $I_{max}$  dapat menggunakan Persamaan 13 dan 14.

$$I_{il} = \frac{P_n}{V_{il}} \quad (13)$$

$$I_{max} = I_{il} * \sqrt{2} \quad (14)$$

Untuk menentukan nilai nilai  $\Delta I_{max}$  diperkirakan 10% dari nilai arus output maksimum  $I_{max}$ , dengan memberikan pengurangan faktor daya atau *cosphi* sebesar 5% [3]. Nilai  $L_1$   $C_f$  dapat ditentukan menggunakan Persamaan (15), (16).

$$L_1 = \frac{V_{dc}}{4 * f_s * \Delta I_{max}} \quad (15)$$

$$C_f = 0.05 * C_b \quad (16)$$

Dari banyak kasus, nilai  $L_2$  atau sisi grid, dipertimbangkan desain dengan memberikan nilai 20% dari nilai induktor sisi inverter atau  $L_1$ . Desain ini akan memberikan redaman yang lebih baik pada frekuensi harmonik diatas harmonik ke 50 [1]. Nilai  $L_2$  dapat di tuliskan sebagai Persamaan 17.

$$L_2 = 0.2 * L_1 \quad (17)$$

Untuk menghitung frekuensi resonansi dalam Persamaan (9), dapat menggunakan Persamaan (18) dimana hasilnya dalam radian.

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 * L_2 * C_f}} \quad (18)$$

Mengkonversi frekuensi resonansi  $f_{res}$  kedalam satuan Hz.

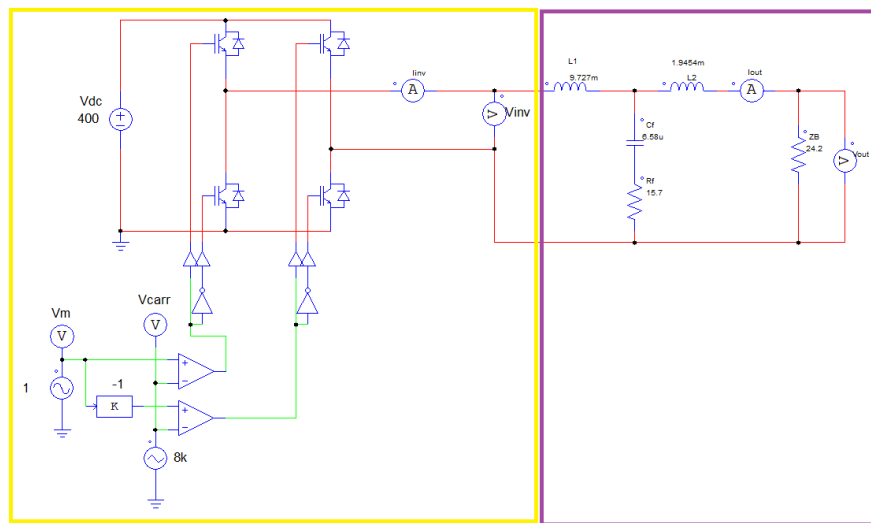
$$\omega_{res} = f_{res} = \frac{\omega_{res}}{2 * \pi} \quad (19)$$

Menentukan nilai resistansi redaman  $R_f$  menggunakan Persamaan (20).

$$R_f = \frac{1}{\omega_{res} * C_f} \quad (20)$$

#### 2.4. Implementasi desain

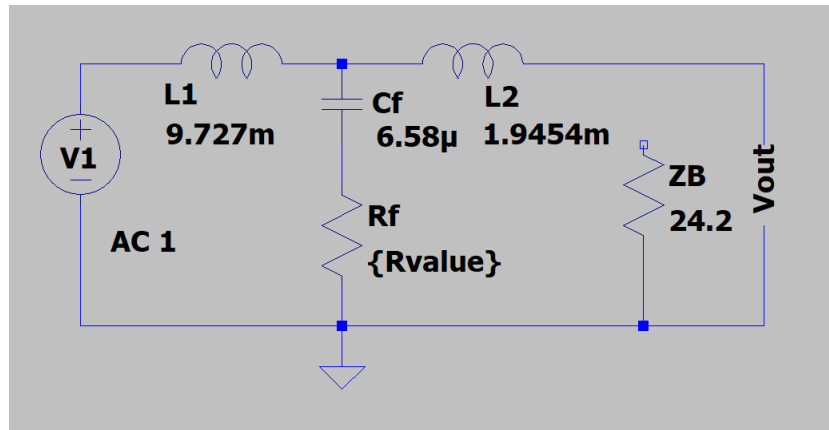
Pengujian model filter LCL dalam menyaring dan mengurangi frekuensi harmonik pada inverter SPWM, perlu dilakukan simulasi menggunakan *software* PSIM dan simulasi tanggapan filter menggunakan *software* LTspice. Dalam menentukan nilai  $V_{sin}$  dan  $V_{tri}$  pada Gambar 3, digunakan persamaan (1). Gambar 4 menunjukkan rangkain LCL pada *software* LTspice dengan kondisi *open loop*, untuk mengubah menjadi rangkain *closed loop* perlu dilakukan penyambungan kaki resistor ZB yang menggantung ke induktor L2.



Gambar 3. Diagram SPWM dan filter LCL pada PSIM.

Gambar 3 menunjukkan diagram inverter SPWM dan filter LCL pada PSIM, dimana kotak kuning merupakan inverter SPWM yang terdiri dari 4 IGBT difungsikan sebagai pensaklaran model gelombang penuh (*Full Bridge*), dikendalikan menggunakan komparator yang digunakan untuk memodulasi bentuk sinyal. Karena menggunakan konsep modulasi lebar pulsa, rangkaian komparator menggunakan sinyal sinusoidal ( $V_{sin}$ ), pada rangkaian berlabel Vm, sebagai referensi dengan amplitudo 1 Vpeak dan frekuensi 50 Hz, kemudian sinyal segitiga ( $V_{tri}$ ) sebagai pembawa (*carrier*), pada rangkaian berlabel Vcarr, dengan amplitudo 1,2856 Vpeak dan frekuensi 8 kHz, dengan persamaan (1), didapat nilai  $m_a = 0,7778$ . Keluaran komparator menghasilkan sinyal SPWM, kemudian sinyal keluarannya di drive ke gate IGBT. Pengukuran tegangan pada keluaran sisi inverter dilakukan di titik Vinv, dan arus pada Iinv.

Gambar 3 kotak ungu merupakan rangkaian filter LCL yang terdiri dari  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $R_f$  dan  $C_f$ . Beban digambarkan menggunakan resistor ZB. Pengukuran tegangan dan arus setelah melewati LCL pada sisi keluaran (grid), dilakukan pada titik Vout dan Iout.



Gambar 4. Skematik filter LCL pada LTspice.

Gambar 4 merupakan rangkaian filter LCL pada *software* LTspice yang terdiri dari  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $R_f$  dan  $C_f$ . Beban digambarkan menggunakan resistor ZB. V1 merupakan sinyal masukan untuk mensimulasikan kerja filter LCL, kemudian keluaran filter LCL pada Vout dimana di titik ini merupakan titik pengukuran tanggapan respon filter LCL.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini, dijelaskan hasil dari pengujian sistem yang dirancang dan disimulasikan menggunakan PSIM dan LTspice.

#### 3.1. Spesifikasi Sistem

Desain LCL merujuk pada spesifikasi inverter SPWM dan target sebagai berikut.

- Jalur Tegangan DC  $V_{dc} = 400$  V
- Tegangan keluaran inverter  $V_{il} = 220$  V
- Daya keluaran aktif inverter  $P_n = 2000$  W
- Frekuensi Switching  $f_s = 8000$  Hz
- Frekuensi grid (keluaran)  $f_g = 50$  Hz

Spesifikasi sistem yang dirancang merupakan pengembangan penelitian yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya [1], [6], [7]. Tegangan keluaran dan frekuensi keluaran ditetapkan 220 V dan 50 Hz mengikuti standar yang banyak digunakan di dunia, salah satunya Indonesia, dan referensi standar tegangan yang digunakan di Indonesia merujuk ke standar IEC 60038. Jalur tegangan DC dipilih 400 V karena dianggap memungkinkan konversi yang lebih baik karena arus yang lebih rendah untuk daya yang sama, sehingga mengurangi rugi daya sesuai hukum ohm  $P = I^2 * R_{losses}$ . Frekuensi switching dipilih 8kHz karena menghasilkan lebih banyak siklus per periode gelombang sinusoidal, yang memungkinkan reproduksi bentuk gelombang sinusoidal yang lebih halus dan lebih akurat dibanding kurang dari 8 kHz.

#### 3.2. Perhitungan Nilai Filter LCL

Mencari nilai impedansi dan kapasitansi sistem menggunakan Persamaan (11) dan (12).

$$Z_B = \frac{V_{il}^2}{P_n} = \frac{220^2}{2000} = 24,2 \Omega$$

$$C_B = \frac{1}{\omega_g * Z_B} = \frac{1}{2 * \pi * 50 * 24,2} = 0,0001315 F (131,533 \mu F)$$

Kalkulasi indek modulasi keluaran inverter menggunakan Persamaan (1) :

$$m_a = \frac{\sqrt{2V_{il}}}{V_{dc}} = \frac{\sqrt{2 \cdot 220}}{400} = 0,7778$$

Menentukan arus keluaran dasar  $I_{il}$  dan arus maksimum  $I_{max}$  dapat menggunakan Persamaan (13) dan (14).

$$I_{il} = \frac{P_n}{V_{il}} = \frac{2000}{220} = 9,09 \text{ A}$$

$$I_{max} = I_{il} * \sqrt{2} = 9,09 * \sqrt{2} = 12,85 \text{ A}$$

Nilai  $\Delta I_{max}$  diperkirakan 10% dari nilai arus output maksimum.

$$\Delta I_{max} = \frac{I_{max}}{100} * 10 = \frac{12,85}{100} * 10 = 1,285 \text{ A}$$

Dengan menggunakan  $\Delta I_{max}$  senilai 10%, maka nilai  $L_1$ ,  $L_2$  dan  $C_f$  dapat ditentukan dengan Persamaan (15), (16), dan (17).

$$L_1 = \frac{V_{dc}}{4 * f_s * \Delta I_{max}} = \frac{400}{4 * 8000 * 1,285} = 0,009727 \text{ H (9,727 mH)}$$

$$C_f = 0,05 * C_b = 0,05 * 0,0001315 = 0,000006575 \text{ F (6,58 uF)}$$

$$L_2 = 0,2 * L_1 = 0,2 * 9,727 \text{ mH} = 1,9454 \text{ mH}$$

Estimasi frekuensi resonansi dalam radian Persamaan (18) dan frekuensi dalam Hz Persamaan (19).

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 * L_2 * C_f}} = \sqrt{\frac{0,009727 + 0,0019454}{0,009727 * 0,0019454 * 0,000006575}} = 9685,86$$

$$f_{res} = \frac{\omega_{res}}{2 * \pi} = \frac{9685,86}{2 * \pi} = 1541 \text{ Hz}$$

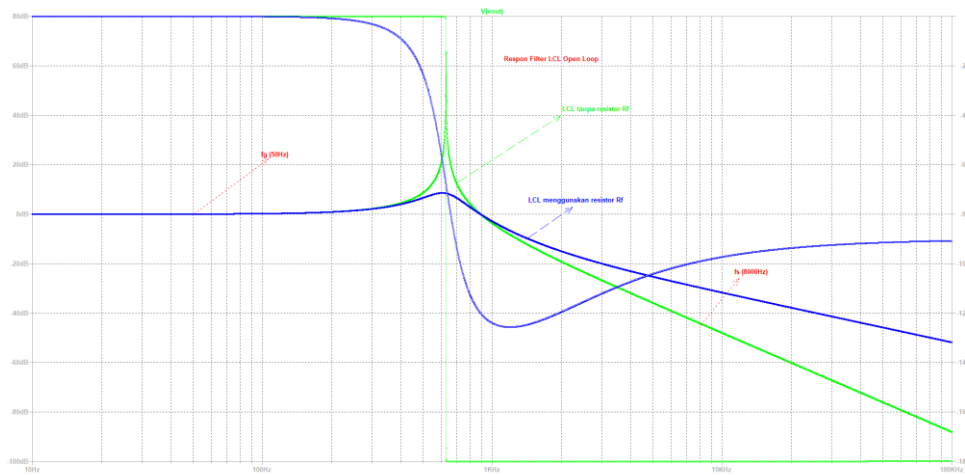
Nilai resistansi redaman  $R_f$ , dapat dihitung berdasarkan Persamaan (20).

$$R_f = \frac{1}{\omega_{res} * C_f} = \frac{1}{9685,86 * 0,000006575} = 15,7 \Omega$$

### 3.3. Pengujian sistem

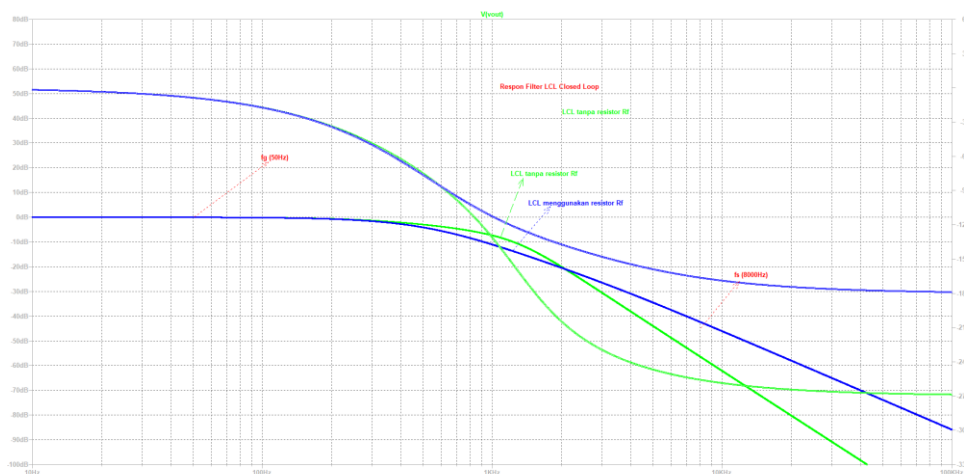
Pada Gambar 5, ditunjukkan tanggapan respon rangkaian terbuka (*open loop*), dimana garis hijau merupakan tanggapan respon rangkaian LCL tanpa resistansi peredam  $R_f$  mengakibatkan puncak resonansi yang nilainya sangat tinggi di angka 57dB. Garis biru merupakan tanggapan respon dengan memasukkan resistansi peredam  $R_f$ , yang berdampak pada perbaikan respon menjadi lebih konstan karena teredamnya frekuensi resonansi yang mulanya 57dB menjadi 9dB.





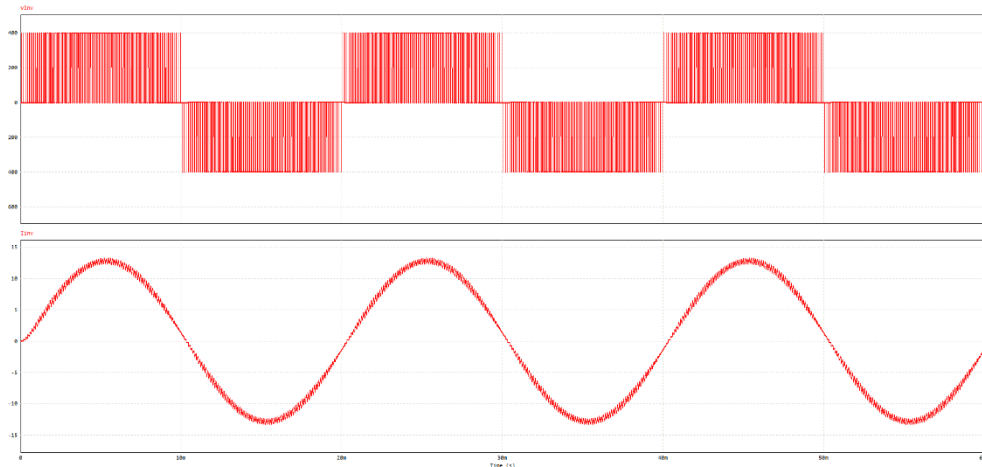
Gambar 5. Diagram bode filter LCL pada kondisi *open loop*.

Pada Gambar 6, menunjukkan tanggapan respon rangkaian tertutup (*closed loop*), ketika nilai  $R_f = 0$  tingkat kecuraman pemotongan filter memiliki nilai 18dB per oktaf frekuensi, saat nilai  $R_f = 15,7 \Omega$  tingkat kecuraman pemotongan filter menjadi 12dB per oktaf frekuensi. Solusi dengan menambah resistor peredam sangat sederhana dan memiliki dampak yang signifikan, namun resistansi redaman ini mengakibatkan kehilangan daya dan mengurangi kemampuan attenuasi filter, kelemahan ini bisa diatasi dengan menerapkan rangkain peredam aktif [13].



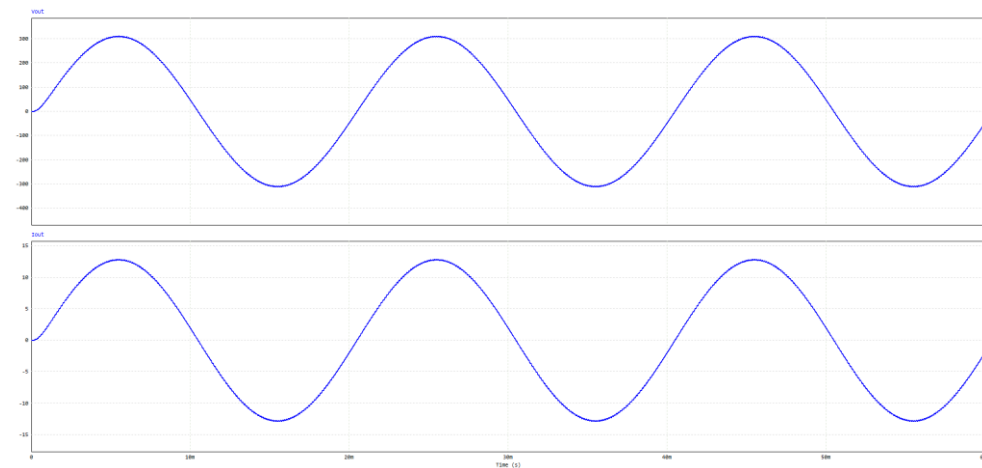
Gambar 6. Diagram bode filter LCL pada kondisi *closed loop*.

Pada Gambar 7, bagian atas menunjukkan hasil pengukuran tegangan pada keluaran sisi inverter ( $V_{inv}$ ) masih mengandung sinyal SPWM, yang mana sinyal ini mengandung frekuensi *grid* ( $f_g$ ), frekuensi *switching* ( $f_s$ ), dan konten harmonik (THD). Bagian bawah Gambar 7 menunjukkan arus keluaran ( $I_{inv}$ ), dimana ini adalah pengukuran arus dengan filter LCL, dan beban  $Z_B$  terpasang.



Gambar 7. Tegangan dan arus pada sisi *inverter*.

Pada Gambar 8, menunjukkan hasil pengukuran tegangan dan arus keluaran sisi *grid*, yang mana sinyal ini merupakan sinyal hasil filtrasi LCL, menghasilkan nilai frekuensi *grid* ( $f_g$ ) 50 Hz, dan sinyal ini mengandung konten harmonik (THD) yang jauh lebih kecil dibanding sisi *inverter*.



Gambar 8. Tegangan dan arus setelah melewati LCL pada sisi keluaran (*grid*).

Measure					
	X1	X2	$\Delta$	THD	
Time	1.04262e-02	5.03934e-02	3.99672e-02	freq=50	
Vinv	4.38583e-06	4.28374e-06	-1.02092e-07	7.95230e-01	
Vout	6.04982e+00	8.38862e+00	2.33879e+00	4.97210e-03	
Iinv	-2.08849e-01	-2.03987e-01	4.86151e-03	3.28869e-02	
Iout	2.49993e-01	3.46637e-01	9.66444e-02	4.97210e-03	

Gambar 9. Nilai distorsi harmonik pada tegangan dan arus.

Pada Gambar 9, menunjukkan nilai THD masih dalam satuan desimal dan perlu dikonversi ke persen. Adapun perhitungannya sebagai berikut.  
 THD pada tegangan *inverter*.

$$7,952e - 01 = 7,952 * 10^{-1} = 0,7952 = 0.7952 * 100 = 79,52\%$$

THD pada tegangan keluaran.

$$4,972e - 03 = 4,972 * 10^{-3} = 0,004972 = 0,004972 * 100 = 0,4972\%$$

THD pada arus inverter.

$$3,2886e - 02 = 3,2886 * 10^{-2} = 0,032886 = 0,032886 * 100 = 3,2886\%$$

THD pada arus keluaran.

$$4,972e - 03 = 4,972 * 10^{-3} = 0,004972 = 0,004972 * 100 = 0,4972\%$$

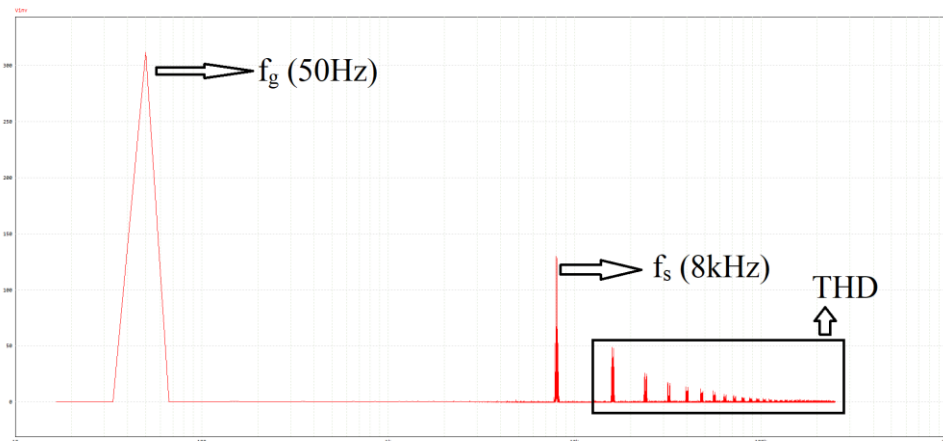
Persentase penurunan THD pada tegangan keluaran.

$$\frac{0,4972 - 79,52}{79,52} * 100 = -99,37\%$$

Persentase penurunan THD pada arus keluaran.

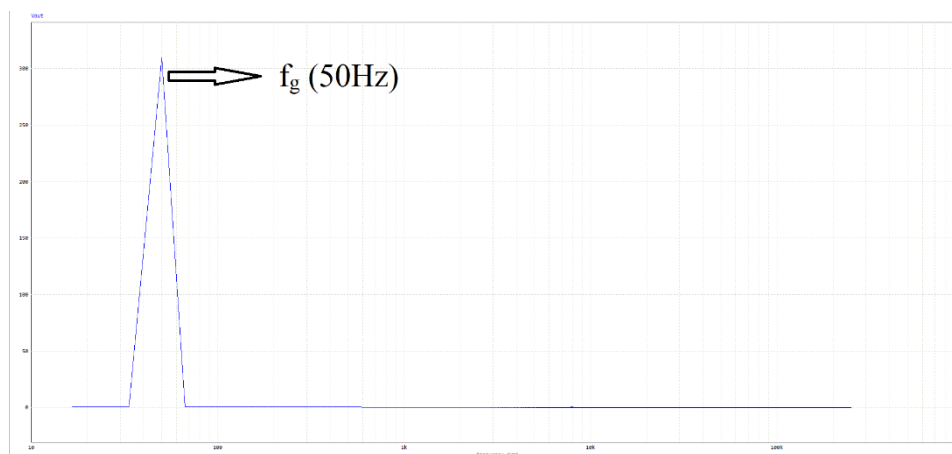
$$\frac{0,4972 - 3,2886}{3,2886} * 100 = -84,88\%$$

Pada Gambar 9, menunjukkan bahwa nilai distorsi harmonik total (THD) menurun drastis. Adapun nilai distorsi harmonik total pada tegangan inverter sebesar 79,52% menjadi 0,4972% setelah melewati filter LCL, menghasilkan pengurangan THD sebesar 99,37%. Sedangkan THD pada arus inverter 3,288% dan arus keluaran 0,4972%, menghasilkan pengurangan THD sebesar 84,88%.



Gambar 10. Tampilan spektrum frekuensi tegangan pada sisi inverter.

Gambar 10 memvisualisasikan *transfer function* untuk melihat keseluruhan kandungan frekuensi dalam sistem, yang diantaranya berisi frekuensi *grid* (keluaran)  $f_g = 50$  Hz, frekuensi Switching  $f_s = 8000$  Hz, dan konten harmonik ganjil, genap.



Gambar 11. Tampilan spektrum frekuensi tegangan setelah melewati LCL.

Gambar 11 menunjukkan bahwa filter LCL sudah berhasil membatasi dan meredam sinyal dengan frekuensi di atas frekuensi resonansi  $f_{res}$ , sehingga menghasilkan kandungan spektrum frekuensi yang lebih minim distorsi.

#### 4. Kesimpulan

Filter yang dirancang telah memenuhi kriteria desain, kriteria yang didesain adalah  $10 * f_g \leq f_{res} \leq \frac{1}{2} * f_s$ . Filter LCL di desain untuk kebutuhan inverter SPWM dengan frekuensi *switching* 8kHz, daya keluaran 2000 Watt, dari sumber tegangan 400 VDC, arus maksimum 12.85 A, tegangan keluaran 220 VAC, dan frekuensi keluaran 50 Hz. Adapun nilai  $L_1, L_2, C_f$ , dan  $R_f$  yaitu 9.727 mH, 1.9454 mH, 6.58 uF, dan 15.7  $\Omega$ . Pada sisi *grid* (keluaran LCL) terjadi pengurangan THD pada tegangan sebesar 99.37% dan pengurangan THD pada arus sebesar 84.88%. dengan di implementasikannya filter LCL, akan meningkatkan kualitas daya yang minim distorsi sehingga meminimalisir kerugian daya akibat konten harmonik. Selanjutnya penelitian ini diharapkan dapat ditindaklanjuti sampai menjadi sistem yang utuh dalam penerapan pembangkit listrik terbarukan dalam fungsi spesifik konverter DC-AC.

#### Referensi

- [1] H. Cha and T. -K. Vu, "Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic inverter," *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Palm Springs, CA, USA, 2010, pp. 1659-1665, doi: 10.1109/APEC.2010.5433454.
- [2] J. Sedo and S. Kascak, "Control of single-phase grid connected inverter system," *2016 ELEKTRO*, Strbske Pleso, Slovakia, 2016, pp. 207-212, doi: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512066.
- [3] P. Cossoli, M. Cáceres, L. Vera, A. Firman and A. Busso, "Proportional-Resonant Controller and LCL Filter Design For Single-Phase Grid-Connected PV Micro-Inverters," *2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)*, Lima, Peru, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC-LA.2018.8511669.
- [4] X. Liu, P. Ma, G. He and D. Wang, "Study on Control Strategy of LCL Type Single-Phase Grid-Connected Inverter," *2018 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*, Huhhot, China, 2018, pp. 37-42, doi: 10.1109/ICMCCE.2018.00016.

- [5] X. Li and R. S. Balog, "PLL-less robust active and reactive power controller for single phase grid-connected inverter with LCL filter," *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Charlotte, NC, USA, 2015, pp. 2154-2159, doi: 10.1109/APEC.2015.7104647.
- [6] Y. Tang, W. Yao, P. C. Loh and F. Blaabjerg, "Design of LCL Filters with LCL Resonance Frequencies Beyond the Nyquist Frequency for Grid-Connected Converters," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 3-14, March 2016, doi: 10.1109/JESTPE.2015.2455042.
- [7] Hasan, S., et al, "The LCL filter design for three phase DC-AC voltage converter," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, pp. 012067.
- [8] A. Mukhopadhyay, V. John. "Solid-state tuning restorer for second-harmonic LC filter in single-phase converters," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023.
- [9] T. Saha, A. Mitra, B. Halder, "Design of LCL filter for SPWM inverter based on switching frequency and THD criterion," in *Electronic Systems and Intelligent Computing: Proceedings of ESIC 2020*, 2020, pp. 439–451.
- [10] Tang, H., et al, "Linear quadratic optimal control of a single-phase grid-connected inverter with an LCL filter," in *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2012, pp. 372–376.
- [11] Roger C. Dugan, et al., *Electrical power system quality* (New York: McgGraw Hill, 2002), hal. 233-252
- [12] J. Lettl, J. Bauer, L. Linhart. "Comparison of different filter types for grid connected inverter," in *PIERS Proceedings, Marrakesh, Morocco*, 2011.
- [13] K. Hamza, H. Linda, L. Cherif, "LCL filter design with passive damping for photovoltaic grid connected systems," in *IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress*, 2015, pp. 1–4.
- [14] Wang, X., et al. "Full feedforward of grid voltage for grid-connected inverter with LCL filter to suppress current distortion due to grid voltage harmonics," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3119–3127, 2010.
- [15] Guo, B., et al. "Optimization design and control of single-stage single-phase PV inverters for MPPT improvement," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 12, pp. 13000–13016, 2020.
- [16] Pan, D., et al. "Optimized controller design for LCL-type grid-connected inverter to achieve high robustness against grid-impedance variation," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 3, pp. 1537–1547, 2014.
- [17] Xu, J., et al. "Design of LCL-filter considering the control impact for grid-connected inverter with one current feedback only," in *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 11, pp. 1324–1332, 2017.
- [18] M. Maghraby, H. Ashour, A. Eldin, "Analysis and implementation of discrete SPWM signals for grid-connected inverter with LCL filter," in *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 2017, pp. 515–520.
- [19] D. Yang, X. Wang, F. Blaabjerg, "Investigation of the sideband effect for the LCL-type grid-connected inverter with high LCL resonance frequency," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017, pp. 5601–5606.