

Implementasi *filter* LCL pada Inverter SPWM

Implementation of LCL filters on SPWM Inverters

Raihan Nurhakim¹, Fadlika Ardiansyah² Muhammad Adli Rizulloh³

^{1,2,3}Pendidikan Teknik Otomasi Industri Dan Robotika, Fakultas Pendidikan Teknologi Dan Kejuruan,
Universitas Pendidikan Indonesia

Jl. Dr. Setiabudhi No.299 Bandung 40154 Jawa Barat – Indonesia Telp. 022-2013163
raihannurhakim@upi.edu¹, fadlikaardiansyah@upi.edu², Muhammad.adli.riz@upi.edu³

Abstrak – Seiring dengan pertumbuhan sumber energi terbarukan dan integrasinya dengan jaringan, kualitas tenaga keseluruhan mengalami penurunan. Hal ini terutama disebabkan oleh harmonik yang diperkenalkan ke jaringan dari penggunaan meningkatnya perangkat elektronik daya dalam pengaturan inverter. Sebuah filter LCL yang dirancang dengan efektif dapat meningkatkan kualitas tenaga dari inverter satu fase yang terhubung dengan utilitas utama. Didorong oleh pemahaman ini, para peneliti berfokus pada pembuatan filter LCL, memastikan kinerja optimal sambil meminimalkan faktor-faktor seperti variasi frekuensi sakelar, distorsi harmonik total (THD), ukuran induktor, dan faktor daya dari arus jaringan. Temuan yang disajikan telah divalidasi menggunakan platform PSIM, yang mengkonfirmasi keunggulan desain yang diusulkan. LCL dengan parameter $L_i = 67,8\text{mH}$, $L_g = 13$, $C_f = 657.5\text{nF}$ dan $R_f = 131.257\Omega$ dapat menurunkan THD yang awalnya 0.579% menjadi 0.19%. Selain filter, besarnya beban juga mempengaruhi besaran V_{max} serta V_{rms} dari output Inverter SPWM. Semakin mendekati Z_b maka V_{max} serta V_{rms} yang dihasilkan akan semakin kecil. Pada saat RL mendekati Z_b maka noise akan semakin besar, hal ini menyebabkan Frekuensi harmonik muncul kembali. Kedepannya perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai implementasi closed loop untuk mengatur modulation index, sehingga pada saat terjadi perubahan beban RL, V_{max} serta V_{rms} tidak akan terpengaruh

Kata Kunci: Inverter SPWM · Filter LCL · Frekuensi switching · THD

Abstract – As renewable energy sources and their integration with the grid continue to grow, the overall quality of power experiences a decline. This is primarily due to the harmonics introduced to the grid from the increasing use of power electronic devices in inverter setups. An effectively designed LCL filter can enhance the power quality of a single-phase inverter that's linked with the main utility. Driven by this understanding, the researchers focused on crafting an LCL filter, ensuring optimal performance while minimizing factors like switching frequency variance, total harmonic distortion (THD), inductor size, and the power factor of the grid current. The findings presented have been validated using the PSIM platform, confirming the excellence of the proposed design. An LCL filter with parameters $L_i = 67.8\text{mH}$, $L_g = 13$, $C_f = 657.5\text{nF}$, and $R_f = 131.257\Omega$ can reduce the initial THD from 0.579% to 0.19%. Besides the filter, the load size also affects the values of V_{max} and V_{rms} of the Inverter SPWM output. As it approaches Z_b , both V_{max} and V_{rms} produced will decrease. When RL approaches Z_b , noise increases, leading to the reappearance of harmonic frequencies. In the future, further research is needed to implement a closed-loop control for regulating the modulation index, ensuring that changes in the RL load do not affect V_{max} and V_{rms} .

Keywords: SPWM inverter · LCL filter · Switching frequency · THD

1. Pendahuluan

Permintaan energi global yang meningkat serta upaya penghematan konsumsi bahan bakar fosil mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan untuk memenuhi kebutuhan energi. Di antaranya, penggunaan energi fotovoltaik (PV) matahari sangat populer karena memiliki banyak kelebihan. Energi tersebut tersedia dalam bentuk sumber DC dan memerlukan konversi melalui inverter dengan kapasitas sesuai kebutuhan konsumen. Karena keluaran AC dari inverter tidak bersifat sinusoidal, perancangan sirkuit filter yang tepat sangat penting untuk menjadikannya sinusoidal agar menghindari kerugian energi pada peralatan rumah tangga. Di sisi lain, ketika sistem inverter PV terintegrasi dengan jaringan listrik, filter akan meningkatkan kualitas daya listrik.

Untuk menurunkan distorsi harmonik total (THD) dari arus inverter, filter LCL saat ini lebih populer dibandingkan dengan filter L dan filter LC [1]. Pemilihan nilai induktor dan kapasitor untuk filter LCL adalah kriteria penting untuk meningkatkan kualitas arus keluaran inverter dan arus jaringan, sehingga meningkatkan kualitas daya yang disalurkan ke jaringan [2, 3]. Besarnya arus serta daya aktif dan reaktif dari inverter dapat dikontrol melalui pengontrol loop tertutup bila dibandingkan dengan sinyal referensi [4-6], di mana THD dari arus tidak dapat dikontrol tanpa filter LCL. Dengan kehadiran komponen pasif dari filter, sebuah resistensi kecil harus dimasukkan secara seri dengan kapasitansi filter untuk peredaman yang tepat. Selain itu, karena kehilangan daya yang disebabkan oleh elemen pasif dari filter, pengenalan peredaman aktif dalam sirkuit lebih disukai [7].

THD dapat dikendalikan langsung dari inverter melalui topologi saklar yang tepat dengan frekuensi saklar yang lebih tinggi. Modulasi lebar pulsa sinusoidal (SPWM) dan teknik kontrol histeresis bisa menjadi solusi untuk menurunkan THD [8, 9]. Selain itu, ukuran filter akan berkurang, tetapi saklar inverter akan mengalami tekanan saklar yang tinggi dan kerugian saklar yang besar. Meskipun hal ini dapat dikurangi dengan teknik soft-switching, keseluruhan sirkuit saklar akan menjadi lebih rumit. Penelitian yang diusulkan ini mencari titik tengah antara frekuensi saklar dari inverter dan ukuran filter LCL dengan THD dari arus jaringan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini memfokuskan diri pada metode modulasi lebar pulsa sinusoidal (SPWM) yang dikenal memiliki keunggulan dalam menghasilkan keluaran dengan kandungan harmonik yang rendah.

2.1. Inverter SPWM Satu Fasa

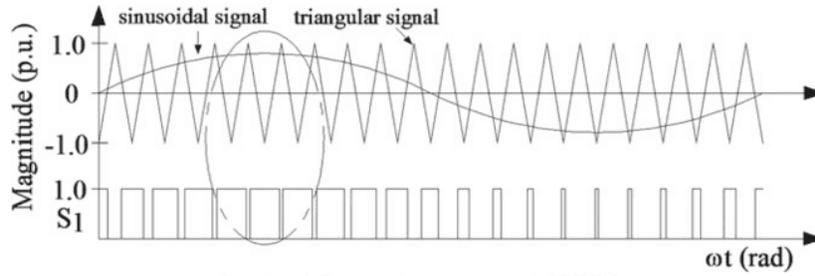
Metode modulasi lebar pulsa sinusoidal (SPWM) banyak digunakan karena memiliki banyak kelebihan dan kandungan harmonik rendah pada keluarannya. Tegangan keluaran dari inverter dapat dikontrol dengan mengubah indeks modulasi, yang didefinisikan sebagai rasio antara puncak sinyal pemodulasi dan sinyal pembawa. Oleh karena itu,

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

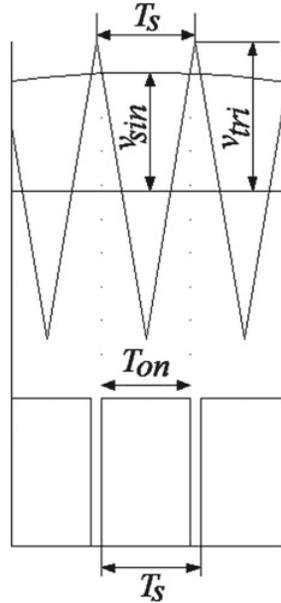
Di mana v_{sin} dan v_{tri} adalah nilai puncak dari gelombang sinus pemodulasi dan nilai puncak dari gelombang segitiga pembawa, masing-masing. Karena tegangan keluaran inverter ditentukan oleh nilai puncak dari sinyal pemodulasi, maka tegangan fundamental dari inverter akan sesuai menjadi,

$$V_{i1} = \frac{m_a V_{dc}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Gambar 1 menunjukkan pengembangan sinyal SPWM melalui perbandingan antara sinyal sinusoidal dengan sinyal segitiga. Gambar 2 adalah tampilan perbesaran dari sebuah bagian



Gambar 1 Pengembangan sinyal SPWM



Gambar 2 Tampilan perbesaran dari perbandingan sinus-segitiga.

dari Gambar 2 untuk memahami hubungan antara rasio tugas (duty ratio) dan indeks modulasi.

2.2. Pemodelan Filter LCL

Secara umum, keluaran dari inverter bukanlah sinusoidal dan mengandung beberapa harmonik. Gambar 4 menunjukkan diagram rangkaian dari filter LCL, yang dapat diatur oleh persamaan berikut.

$$L_i \frac{di_i}{dt} = v_i - v_c - (R_i + R_f)i_i + R_f i_g \tag{3}$$

$$L_g \frac{di_g}{dt} = v_c - v_g + R_f i_i - (R_f + R_g) i_g \tag{4}$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{i_i - i_g}{C_f} \tag{5}$$

Di mana V_i adalah tegangan AC di sisi inverter, V_g adalah tegangan AC di sisi jaringan, v_c adalah tegangan melintasi kapasitor, R_i adalah resistansi internal dari induktor sisi inverter L_i , R_g adalah resistansi internal dari induktor sisi inverter L_g , C_f adalah kapasitansi filter, dan R_f adalah resistansi redaman.

Matriks keadaan dari filter dapat diungkapkan sebagai:

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

Yang diungkapkan sebagai $x = Ax + Bu$. Fungsi transfer dari rangkaian filter dapat diperoleh dengan persamaan berikut.

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

Dimana :

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

Dengan mengabaikan nilai resistansi internal dari induktor, yaitu dengan mempertimbangkan $R_i = R_g = 0$, fungsi transfer dari sistem dapat dituliskan sebagai:

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

Persamaan karakteristik dari Persamaan (10) dituliskan sebagai:

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

Dengan membandingkan persamaan dengan $S^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0$ rasio redaman dapat diestimasi sebagai Desain Filter LCL untuk Inverter SPWM Berbasis..

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

3. Hasil dan Pembahasan

Dalam upaya menyelidiki dan mengembangkan solusi teknologi yang lebih efisien, kami telah memfokuskan perhatian pada desain filter LCL dan analisis performa yang berhubungan. Dengan pertumbuhan yang signifikan dalam bidang energi terbarukan dan kebutuhan untuk meningkatkan kualitas tenaga yang disuplai ke jaringan, pentingnya memiliki filter yang dioptimalkan menjadi lebih kritical. Di sini, kami akan membahas proses yang kami lalui saat merancang filter dan hasil-hasil yang kami temukan selama fase pengujian dan evaluasi. Kedua aspek ini saling berkaitan, dengan desain yang mendasari kinerja dan analisis performa yang memberikan masukan berharga untuk iterasi desain selanjutnya. Dalam bab ini, kami akan mendalami rincian teknis dari proses tersebut dan memberikan wawasan tentang bagaimana penelitian ini dapat membantu meningkatkan standar dalam aplikasi terkait.

3.1. Rancangan Filter

Untuk merancang filter LCL, beberapa karakteristik filter harus dipertimbangkan, seperti arus ripple, peredaman ripple sakelar, ukuran filter, dll. Faktor redaman dari filter LCL adalah kriteria penting, sehingga harus disertakan peredaman pasif dengan memasukkan resistansi secara seri dengan kapasitansi seperti yang diindikasikan di Persamaan (10). Parameter yang diperlukan

untuk merancang rangkaian filter adalah tegangan link DC V_{dc} , keluaran tegangan fundamental dari inverter V_{i1} , daya aktif yang dinilai P_n , frekuensi sakelar f_s , frekuensi resonansi f_r , dan frekuensi jaringan f_g . Impedansi dasar dan kapasitansi dasar didefinisikan oleh persamaan berikut:

$$Z_B = \frac{V_{i1}^2}{P_n} \tag{11}$$

Dan

$$C_B = \frac{1}{\omega_g Z_B} \tag{12}$$

Kapasitor filter harus dirancang dengan mempertimbangkan variasi maksimum dari faktor daya di sisi jaringan, yang adalah 5%, sehingga nilai kapasitansi filter akan menjadi $C_f = 0,05C_B$. Jika diperlukan, nilai kapasitansi filter mungkin dianggap lebih tinggi dari 5% kapasitansi dasar agar dapat mengkompensasi reaktansi induktif dari filter. Arus ripple dari induktor sisi inverter Δi_i dapat diperkirakan sebagai:

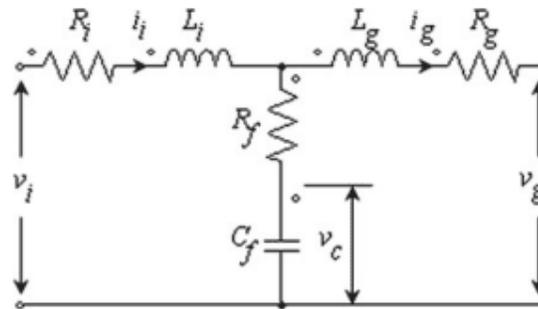
$$V_{dc} - V_o = L_i \frac{\Delta i_i}{DT_s} \tag{13}$$

Atau,

$$\Delta i_i = \frac{D \times (V_{dc} - V_o)}{L_i \times f_s}$$

Atau,

$$\Delta i_i = \frac{D(1-D)V_{dc}}{L_i f_s} \tag{14}$$



Gambar 3 Rangkaian Filter LCL

Di mana V_o adalah tegangan sisi jaringan yang merujuk ke sisi DC dan dapat dengan mudah dianggap sebagai DV_{dc} . Karena bentuk gelombang tegangan keluaran dari inverter adalah refleksi dari siklus kerja yang bervariasi secara sinusoidal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3, arus ripple yang merujuk ke sisi AC dapat ditulis menggunakan Persamaan (14) sebagai:

$$\Delta i_i = \frac{m_a(1-m_a)V_{dc}}{L_i f_s} \tag{15}$$

Dari Persamaan (15) jelas bahwa arus ripple maksimum akan terjadi pada $D = 0,5$ dan nilainya dapat diperkirakan sebagai:

$$\Delta i_{imax} = \frac{V_{dc}}{4L_i f_s}$$

Atau

$$L_i = \frac{V_{dc}}{4f_s \Delta i_{imax}} \quad (16)$$

Pada sebagian besar kasus, induktor sisi jaringan dirancang dengan mempertimbangkan 20% dari nilai induktor yang terhubung di sisi inverter. Ini akan memberikan peredaman yang lebih baik, khususnya pada frekuensi di atas harmonik ke-50 dan dapat dihitung sebagai:

$$L_g = 0.2L_i \quad (17)$$

Frekuensi osilasi alami dapat dengan mudah diperkirakan dari Persamaan (9) sebagai berikut:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i \cdot L_g \cdot C_f}} \quad (18)$$

Dari Persamaan (10) dan (18), resistansi redaman R_f dapat dihitung dengan sederhana dengan mempertimbangkan rasio redaman $\xi = 0.5$, yang memberikan hasil,

$$R_f = \frac{1}{\omega_r \cdot C_f} \quad (19)$$

Juga, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir melalui induktor akibat komponen fundamental dari arus inverter dapat diungkapkan sebagai:

$$P_i = \frac{V_{i1} V_g}{x} \sin \delta \quad (20)$$

Dan,

$$Q_i = \frac{V_{i1}}{x} (V_{i1} - V_g \cos \delta) \quad (21)$$

Di mana δ adalah sudut antara komponen fundamental dari tegangan keluaran inverter dan tegangan jaringan, dan x adalah reaktansi induktif seri dari filter yang sama dengan $L_i + L_g$.

3.2. Analisis Performa

Untuk menentukan komponen filter, data berikut diperlukan: tegangan fasa keluaran (E_n), daya aktif (P_n), tegangan sumber (V_{dc}), frekuensi grid (f_g), dan frekuensi *switching* (f_{sw}). Jika tegangan keluaran diharapkan pada 220 V/50Hz dengan amplitudo modulasi SPWM $m_a=0.9$, maka tegangan sumbernya adalah sekitar:

$$V_{dc} = \frac{E_n \cdot \sqrt{2}}{m_a} = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{0.9} = 345.6V \approx 350V \quad (22)$$

Kapasitansi sumber dihitung berdasarkan tegangan sumber (350V), frekuensi grid (50 Hz), dan daya aktif (200W). Sedangkan impedansi dasar (Z_b), kapasitansi dasar, dan arus maksimum dihitung berdasarkan E_n , P_n , dan f_g .

$$P_n = 200W$$

$$V_{dc} = 350V$$

$$f_g = 50Hz$$

$$f_{sw} = 10kHz$$

$$Z_b = \frac{E_n^2}{P_n} = \frac{220^2}{200} = 242\Omega$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_g Z_b} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 242} = 13,15\mu F$$

$$I_{max} = \frac{P_n \cdot \sqrt{2}}{E_n} = \frac{200 \cdot \sqrt{2}}{220} = 1,285A$$

Dengan menggunakan pendekatan ΔI_{Lmax} 10% dari I_{max} , maka L_i , L_g dan C_f dapat diestimasi menggunakan persamaan berikut:

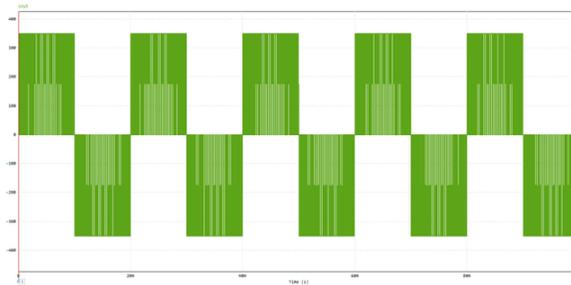
$$L_i = \frac{V_{DC}}{4 \cdot F_{sw} \cdot \Delta I_{Lmax}} = \frac{350}{4 \cdot 10^4 \cdot 0,129} = 67,8mH$$

$$C_f = 0,05 \cdot C_b = 0,05 \cdot 13,15 \cdot 10^{-6} = 657,5nF$$

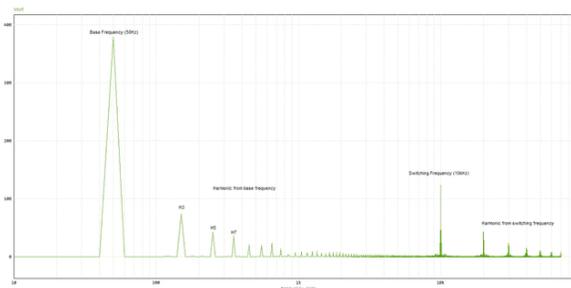
$$L_g = r \cdot L_1 = 0,2 \cdot 67,8 \cdot 10^{-3} = 13,6mH$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i \cdot L_g \cdot C_f}} = 11,587 \cdot 10^3$$

$$R_f = \frac{1}{C_f \cdot \omega_n} = 131,257\Omega$$

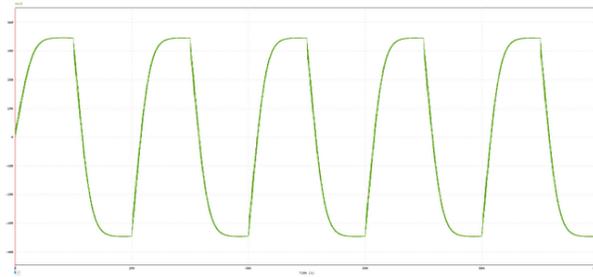


Gambar 4 Sinyal Keluaran Inverter SPWM

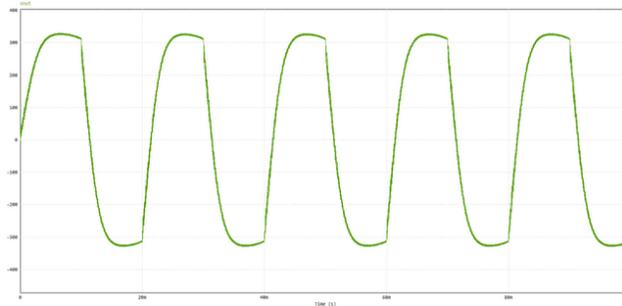


Gambar 5 FFT dari sinyal Keluaran Inverter SPWM

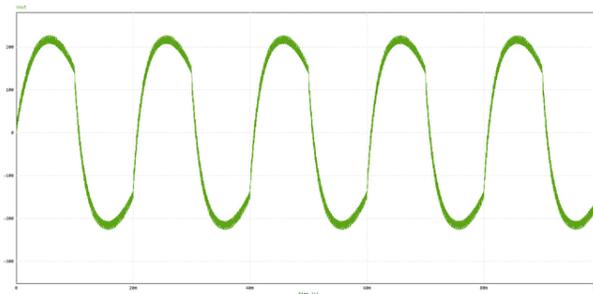
Nilai THD sebelum LCL filter diimplementasikan sebesar 0.579%. Beban (R_L) yang digunakan bersifat resistif, dengan nilai $1000 \times Z_b$, $100 \times Z_b$, $10 \times Z_b$ & Z_b .



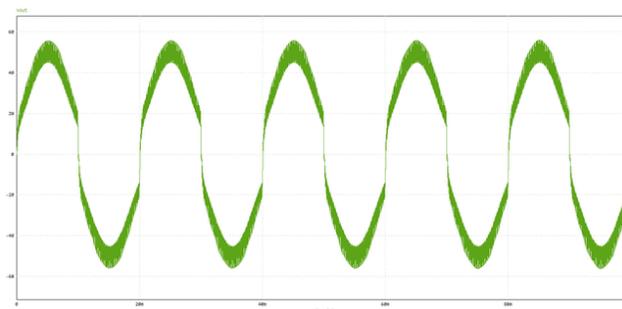
Gambar 6 Sinyal Keluaran Inverter SPWM pada saat $R_L = 242k\Omega$



Gambar 7 Sinyal Keluaran Inverter SPWM pada saat $R_L = 24,2k\Omega$

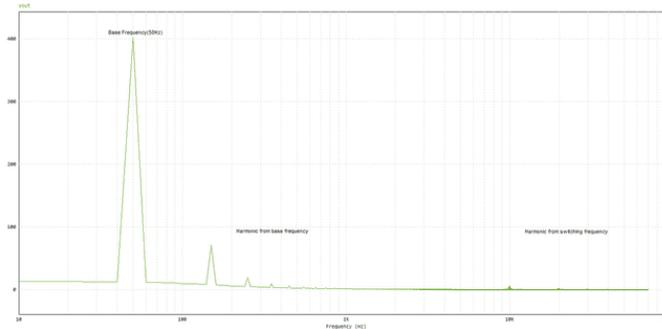


Gambar 8 Sinyal Keluaran Inverter SPWM pada saat $R_L = 2,42k\Omega$

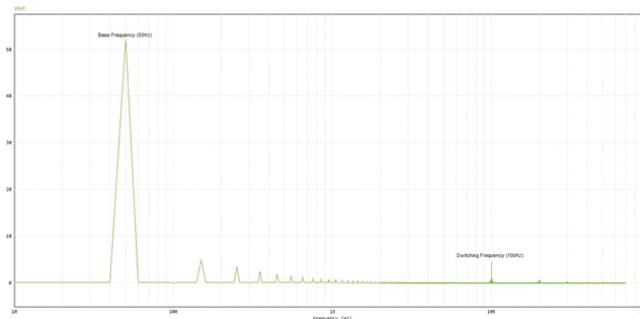


Gambar 9 Sinyal Keluaran Inverter SPWM pada saat $R_L = 242\Omega$

Semakin kecil nilai R_L , *noise* dari frekuensi switching semakin terlihat. Hal ini bisa dilihat pada Gambar 9. Selain tegangan V_{max} nya turun, sinyal keluaran inverter memiliki riak yang sangat terlihat.



Gambar 10 FFT dari sinyal Keluaran Inverter SPWM pada saat $RL = 242k\Omega$



Gambar 11 FFT dari sinyal Keluaran Inverter SPWM pada saat $RL = 242\Omega$

Semakin kecil nilai RL , maka nilai harmonik dari base dan switching frekuensi mulai menaik Kembali. Hal ini dapat dilihat dari gambar 10 dan 11.

Table 1 Uji coba hubungan perubahan beban terhadap tegangan serta THD

Beban (Ω)	Tegangan Puncak (V)	Tegangan RMS (V)	THD (%)
242k	346	290	0,19
24,2k	329	273	0,18
2,42k	226	174	0,17
242	40	37	0,16

4. Kesimpulan

Sebuah filter LCL dengan parameter $L_i = 67,8mH$, $L_g = 13$, $C_f = 657.5nF$ dan $R_f = 131.257\Omega$ dapat menurunkan THD yang awalnya 0.579% menjadi 0.19%. Selain filter, besarnya beban juga mempengaruhi besaran V_{max} serta V_{rms} dari output Inverter SPWM. Semakin mendekati Z_b maka V_{max} serta V_{rms} yang dihasilkan akan semakin kecil. Pada saat RL mendekati Z_b maka noise akan semakin besar, hal ini menyebabkan Frekuensi harmonik muncul kembali. Kedepannya perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai implementasi *closed loop* untuk mengatur modulation index, sehingga pada saat terjadi perubahan beban RL , V_{max} serta V_{rms} tidak akan terpengaruh.

Referensi

- [1] Hanju C, Vu TK (2010) Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase gridconnected photovoltaic inverter. In: 25th annual IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC), pp 1659–1665

- [2] Sedo J, Kascak S (2016) Control of single-phase grid connected inverter system. In: IEEE ELEKTRO, pp 207–212
- [3] Cossoli P, Cáceres M, Vera L, Firman A, Busso A (2018) Proportional-resonant controller and LCL filter design for single-phase grid-connected PV micro-inverters. In: IEEE PES transmission and distribution conference and exhibition.
- [4] Liu X, Ma P, He G, Wang D (2018) Study on control strategy of LCL type single-phase grid-connected inverter. In: 3rd international conference on mechanical, control and computer engineering (ICMCCE), pp 37–42
- [5] Tang H, Zhao R, Tang S, Zeng Z (2012) Linear quadratic optimal control of a single-phase grid-connected inverter with an LCL filter. IEEE Int Symp Indus Electron, pp 372–376
Design of LCL Filter for SPWM Inverter Based ... 451
- [6] Li X, Balog RS (2015) PLL-less robust active and reactive power controller for single phase grid-connected inverter with LCL filter. In: IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC), pp 2154–2159
- [7] Cai P, Wu X, Yang Y, Yao W, Liu W, Blaabjerg F (2018) Design of digital filter-based highly robust active damping for LCL-filtered grid-tied inverters. In: IEEE 4th southern power electronics conference (SPEC)
- [8] Maghraby M, Ashour HA, Hossam-Eldin AA (2017) Analysis and implementation of discrete SPWM signals for grid-connected inverter with LCL filter. In: 9th international middle east power systems conference (MEPCON), pp 515–520
- [9] Sudhakar B, Satish Kumar GVS (2016) A unipolar fixed hysteresis band based sliding mode control of single phase grid connected LCL filtered voltage source inverter. In: IEEE international conference on power electronics, drives and energy systems (PEDES)