

Simulasi *Total Harmonic Distortion* pada Sel Surya dan Inverter Satu Fasa Terhubung Grid

¹Aggie Brenda Vernandez, ²Supari

¹Politeknik Negeri Semarang, ²Universitas Semarang
E-mail : ¹aggiavernandez@polines.ac.id, ²supari@usm.ac.id

Abstrak

Sel surya / *photovoltaic* adalah salah satu sumber energi terbarukan yang tersedia dengan jumlah peminat yang terus bertambah. Sistem sel surya memerlukan inverter dan filter *low-pass* agar dapat memenuhi persyaratan yang cukup untuk terhubung dengan grid. Permasalahan yang sering diperdebatkan adalah pengembangan dan penggunaan jenis inverter pada sel surya. Perbandingan antara inverter sumber tegangan (VSI) dan inverter sumber arus (CSI) umumnya dilakukan pada keadaan yang berbeda, sehingga sulit untuk melakukan komparasi diantara keduanya. Penelitian ini mencoba membantu untuk membandingkan peforma inverter CSI dengan VSI dengan tolak ukur angka *Total Harmonic Distortion* pada tegangan dan arusnya (*THDv* dan *THDi*). Hasil simulasi Simulink menunjukkan *THDv* rata-rata rangkaian CSI adalah 0,194% dan *THDi* rata-rata adalah 2,74%. Nilai ini layak untuk dioperasikan pada sistem *on-grid*. Namun hasil kurang memuaskan didapat pada nilai rata-rata *THD* rangkaian VSI. Nilai rata-ratanya mencapai 5 kali lipat lebih besar dibandingkan dengan rangkaian CSI. Titik fokus hasil simulasi perlu ditekankan pada *THD* arus inverter VSI karena diatas angka 5% dan melampaui batas operasi *on-grid*.

Kata kunci : harmonic, inverter, on-grid, photovoltaic, Simulink

Abstract

Solar / photovoltaic cells are a renewable energy sources available with a growing number of enthusiasts. The solar cell system requires an inverter and a low-pass filter to meet the sufficient requirements to be connected to the grid. Case that is always debatable is the development and use of inverter types in solar cells. Voltage source inverter (VSI) and current source inverter (CSI) are generally being applied in different circumstances, so it is difficult to make comparisons between the two. This study tries to help compare the performance of the CSI and VSI inverters by measuring the Total Harmonic Distortion on its voltage and current (THDv and THDi). Simulink based simulation results show the average THDv of the CSI circuit is 0.194% and the average THDi is 2.74%. This value is feasible to operate on an on-grid system. However unsatisfactory results were obtained at the average THD value of the VSI circuit. The value is up to 5 times greater than that of the CSI circuit. The Focal point of the simulation results needs to be emphasized on the THDi of VSI inverter because it is above 5% and exceeds the limit of on-grid operation.

Keywords : harmonic, inverter, on-grid, photovoltaic, Simulink

I. PENDAHULUAN

Listrik merupakan kebutuhan utama manusia. Sumber listrik pada umumnya didapat dari pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil. Selain tidak ramah lingkungan, persediaan bahan bakar fosil juga semakin lama semakin menipis. Hal ini mendorong peneliti untuk mengembangkan pembangkit listrik dengan sumber energi yang terbarukan.

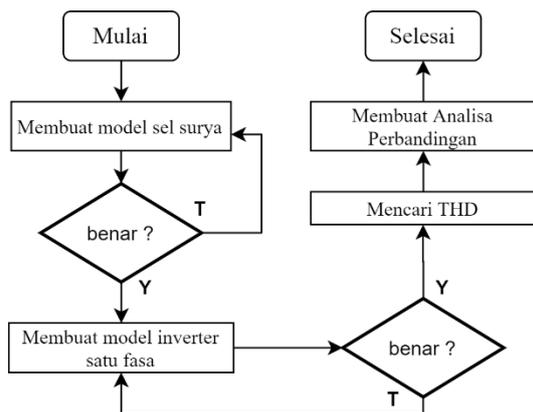
Sumber energi baru dan terbarukan banyak digunakan dalam sistem pembangkit tersebar. misal sel surya / solar cell / *photovoltaic* (PV), *wind turbine*, *micro-hydro*, dan sebagainya. Sel

surya adalah salah satu teknologi yang memiliki perawatan cukup mudah diiringi oleh teknologi dan jumlah peminat yang terus bertambah. Sistem sel surya memerlukan inverter dan filter *low-pass* agar dapat memenuhi persyaratan yang cukup untuk terhubung dengan grid/jala-jala [1]. Permasalahan yang sering diperdebatkan adalah pengembangan dan penggunaan jenis inverter pada sel surya. Penelitian yang sudah dilakukan yaitu membuat sistem sel surya terhubung grid dengan konfigurasi inverter sumber arus/*current source inverter* (CSI) atau konfigurasi inverter sumber tegangan/*voltage source inverter* (VSI) [2]. Salah satu tolak ukur kehandalan inverter

dapat dilihat pada nilai rugi-rugi harmonik yang dibangkitkan. Semakin kecil harmonik maka akan semakin baik [3]. Perbandingan inverter VSI dan CSI umumnya dilakukan pada keadaan yang berbeda, sehingga sulit untuk melakukan komparasi diantara keduanya. Penelitian ini mencoba membantu untuk membandingkan peforma inverter CSI dengan VSI dengan tolak ukur angka *Total Harmonic Distortion* (THD) apabila dibandingkan pada keadaan yang tidak jauh berbeda, yaitu menggunakan model sel surya yang sama dan jenis filter yang sama.

II. METODE PENELITIAN

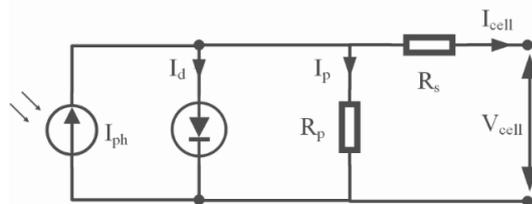
Metode penelitian yang digunakan penulis adalah dengan membuat model sel surya, model inverter sumber arus dan inverter sumber tegangan untuk melihat nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) yang ditimbulkan dari rangkaian tersebut melalui simulasi Simulink MATLAB seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Metode Penelitian.

2.1 Pemodelan Sel Surya

Solar cell / sel surya / *photovoltaic* (PV) adalah peralatan listrik yang dapat mengubah energi foton atau cahaya menjadi energi listrik arus searah/*direct current* (DC). Dalam rangka mencapai nilai tegangan dan arus yang cukup, diperlukan modul solar sel yang tersusun dari beberapa sel PV yang disusun seri dan parallel.



Gambar 2 Rangkaian Ekuivalen Sel Tunggal Solar Sel.

Dimana I_{ph} , I_d , dan I_p masing-masing adalah arus yang dihasilkan dari efek *photoelectric*, arus

dioda, dan arus yang melewati resistor R_p . Resistor R_s adalah resistansi seri, R_p adalah resistansi paralel, I_{cell} adalah arus output PV, dan V_{cell} adalah tegangan output PV. Berdasarkan Gambar 2, arus output dari sel tunggal sel surya dapat diformulasikan menjadi

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (1)$$

Dengan menggunakan [4]

$$I_{ph} = \left[I_{sc} + K_I (T - T_n) \right] \left(\frac{G}{G_n} \right) \quad (2)$$

Dari Pers (2) dapat dilihat bahwa nilai *photocurrent* (I_p) sangat bergantung pada parameter arus *short-circuit* (I_{sc}), konstanta arus (K_I), temperatur (T), dan iradian (G). Selanjutnya nilai dari arus dioda (I_D) dan arus yang melewati resistor R_p (I_p) masing-masing dapat dihitung menggunakan [5].

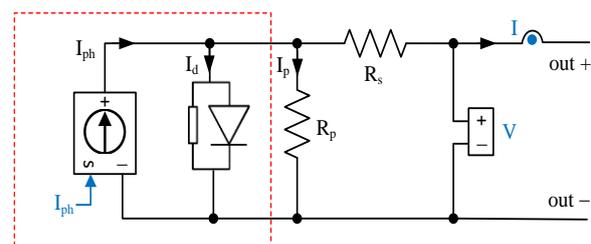
$$I_D = I_0 \left[e^{\left(\frac{(V_{cell} + R_s I_{cell}) q}{A k T N_s} \right)} - 1 \right], \text{ dan}$$

$$I_p = \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (3)$$

Dengan menambahkan arus saturasi dioda (I_0) yang dapat dihitung menggunakan [6].

$$I_0 = \frac{I_{SCn} + K_I \Delta T}{\left(e^{\left(\frac{(V_{OCn} + K_V \Delta T) q}{A k T N_s} \right)} - 1 \right)} \quad (4)$$

Setelah mendapatkan persamaan dari masing-masing parameter di dalam sel surya, selanjutnya pemodelan sel surya dapat dilakukan dengan mengubah Gambar 2 menjadi bentuk Simulink seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Rangkaian ekuivalen PV pada Simulink

Penyederhanaan persamaan arus saturasi dioda Pers (4) dan arus *photocurrent* PV Pers (2) digabung menjadi satu model sumber arus terkontrol agar didapatkan model dioda dengan arus yang tersaturasi.

Dari Pers (1) dan (3), didapatkan

$$I = I_{ph} - I_d - I_p$$

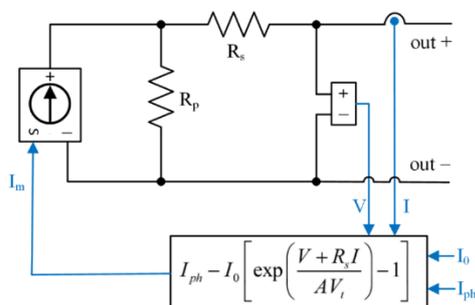
$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{(V_{cell} + R_s I_{cell}) q}{A k T N_s} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (5)$$

Model sumber arus terkontrol dapat digantikan dengan sinyal input yang merupakan selisih antara arus *photocurrent* (I_{ph}) dengan arus dioda (I_d) [7].

$$I_m = I_{ph} - I_d$$

$$I_m = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{(V_{cell} + R_s I_{cell}) q}{A k T N_s} \right)} - 1 \right] \quad (6)$$

Model akhir dari rangkaian ekivalen sel surya ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Pemodelan PV pada Simulink

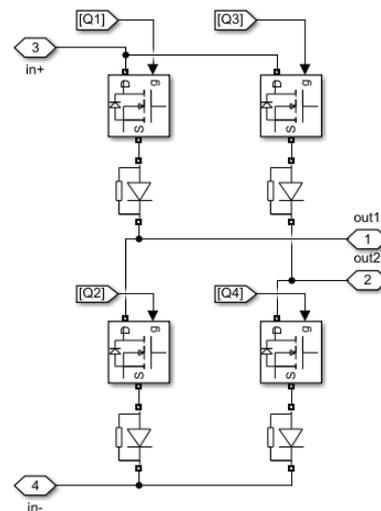
2.2 Inverter Satu Fasa

Inverter adalah rangkaian pengubah tegangan dan arus searah / *direct current* (DC) menjadi tegangan dan arus bolak balik / *alternating current* (AC). Berdasarkan fungsinya, inverter dapat digolongkan menjadi inverter 1 fasa dan inverter 3 fasa. Berdasarkan sumbernya, inverter dapat digolongkan menjadi inverter sumber arus dan inverter sumber tegangan [8]. Penelitian ini menggunakan dua jenis inverter yaitu inverter satu fasa sumber arus dan inverter satu fasa sumber tegangan.

2.2.1 Pemodelan Inverter Satu Fasa Sumber Arus

Pada topologi inverter sumber arus, Teknik pensaklaran yang digunakan salah satunya adalah dengan *Sinusoidal Pulse Width Modulation*

(SPWM). Teknik ini cukup sederhana dan memberikan hasil yang cukup baik. SPWM adalah teknik yang membandingkan sinyal sinusoidal sebagai sinyal modulasi dengan sinyal segitiga sebagai sinyal pembawa/*carrier*. Keadaan/*state* pensaklaran pada inverter satu fasa sumber arus mengikuti aturan Tabel 1. Topologi rangkaian dapat dilihat pada Gambar 5



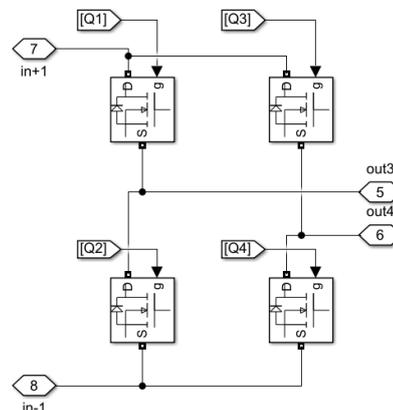
Gambar 5 Topologi Inverter Sumber Arus

TABEL 1 PENSAKLARAN INVERTER SUMBER ARUS

State	Q1	Q2	Q3	Q4	Output
1	1	0	0	1	i_l
2	0	1	1	0	$-i_l$
3	1	1	0	0	0
4	0	0	1	1	0
N/A	0	0	0	0	N/A

2.2.2 Pemodelan Inverter Sumber Tegangan Satu Fasa

Teknik pensaklaran pada topologi inverter sumber tegangan menggunakan SPWM dengan beberapa aturan yang berbeda. Topologi rangkaian mengikuti Gambar 6 dan kondisi/*state* pensaklaran mengikuti Tabel 2.



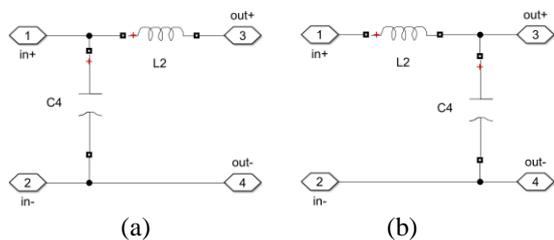
Gambar 6 Topologi Inverter Sumber Tegangan

TABEL 2 PENSAKLARAN INVERTER SUMBER TEGANGAN

State	Q1	Q2	Q3	Q4	Output
1	1	0	0	1	v_i
2	0	1	1	0	$-v_i$
3	1	0	1	0	0
4	0	1	0	1	0
5	0	0	0/1	0/1	depend
6	0/1	0/1	0	0	depend

2.4 Desain Filter Low Pass

Jenis filter yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe filter CL untuk inverter sumber arus dan filter LC untuk inverter sumber tegangan seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Konfigurasi filter (a) inverter sumber arus, (b) inverter sumber tegangan

Konfigurasi rangkaian filter diperlukan untuk menekan angka harmonik hingga dibawah 5%. Nilai basis kapasitansi dapat dihitung dengan Pers (7).

$$C_B = \frac{1}{\omega_B Z_B} \quad (7)$$

Sehingga nilai filter kapasitor (C) dapat dihitung menggunakan Pers (8) [9].

$$C = \alpha C_B \quad (8)$$

Dengan asumsi nilai variasi maksimum $\alpha=5\%$, maka

$$C = \alpha \frac{1}{2\pi f \frac{V_B^2}{P_B}}$$

$$C = 0.05 \frac{1}{2\pi(50) \frac{220^2}{2500}}$$

$$C = 8,22 \times 10^{-6} F = 8,22 \mu F$$

Langkah berikutnya adalah memasukkan nilai C kedalam persamaan resonansi filter sesuai yang ditunjukkan pada Pers (9).

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

Nilai filter induktor (L) menjadi

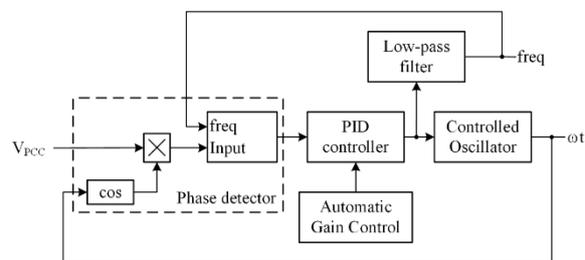
$$L = \frac{1}{(2\pi f_R)^2 C}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi 500)^2 8,22 \times 10^{-6}}$$

$$L = 12,3 \times 10^{-3} H = 12,3 mH$$

2.5 Konfigurasi Phase Locked Loop (PLL)

Perekaman sudut fasa dari tegangan yang terukur di titik *Point of Common Coupling* (PCC) dapat dilakukan dengan menambahkan rangkaian *Phase locked loop* (PLL). Sudut fasa ini selanjutnya digunakan untuk membangkitkan sinyal sinusoidal yang memiliki sudut fasa dan frekuensi yang sama dengan tegangan PCC. Rangkaian PLL dapat diartikan sebagai alat untuk sinkronisasi fasa pada sinyal yang dibangkitkan dengan tegangan grid yang terhubung. Ada tiga bagian utama pada rangkaian PLL yaitu *phase detector*, *controlled oscillator* dan *low pass filter* seperti yang terlihat pada Gambar 8. Output dari rangkaian PLL ini adalah nilai sudut fasa dan frekuensi



Gambar 8 Konfigurasi Rangkaian PLL

2.6 Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) merupakan tolak ukur seberapa banyak rugi-rugi harmonik yang muncul dikarenakan adanya mekanisme pensaklaran/*switching* di dalam rangkaian daya atau pada beban yang tidak linier. Besaran THD tegangan dan arus masing-masing dapat dihitung menggunakan Pers (10) dan (11).

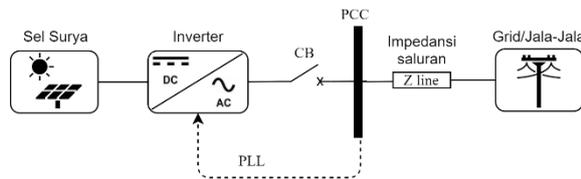
$$THD_V = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (10)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (11)$$

Metode pengukuran nilai THD yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan menggunakan tool THD *analyzer* yang terdapat di dalam Simulink.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Skema diagram saluran tunggal pada sistem sel surya yang terhubung grid dapat dilihat pada Gambar 9.



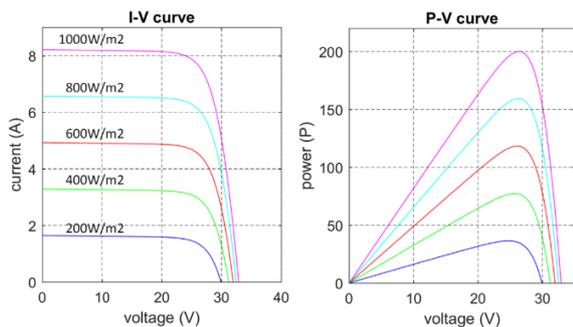
Gambar 9 Skema Sistem PV Terhubung Grid

Modul sel surya yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe KC200GT dengan masing-masing nilai parameter dasar dapat dilihat pada Tabel 3 [10].

TABEL 3 NILAI PARAMETER SEL SURYA KC200GT

Parameter	Nilai
P_{max}	200,143 W
V_{mp}	26,3 V
I_{mp}	7,61 A
V_{oc}	32,9 V
I_{sc}	8,21 A
$I_{0,n}$	$9,825 \times 10^{-8}$
I_{pv}	8,214
A	1,3
R_p	415,405 Ω
R_s	0,221 Ω

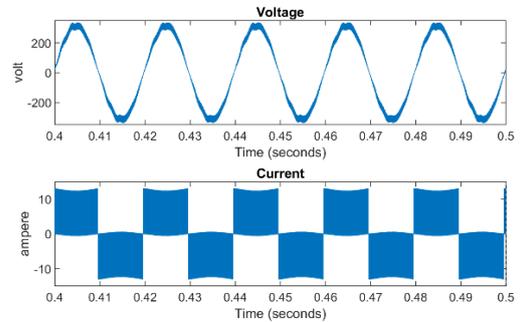
Hasil pengujian model sel surya KC200GT dapat dilihat pada Gambar 10.



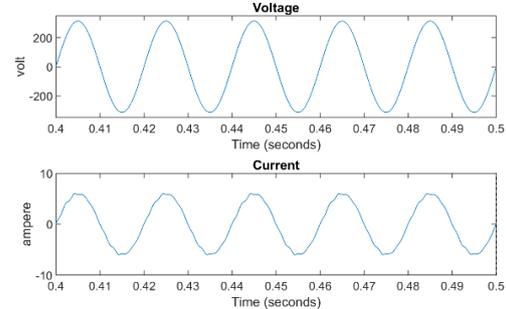
Gambar 10 Pengujian Model Sel Surya KC200GT

Gambar 10 menunjukkan grafik kurva I-V yang nilainya sebanding dengan nilai irradian atau intensitas cahaya matahari. Semakin besar nilai irradian maka sel surya akan membangkitkan arus dan daya yang lebih tinggi. Kurva I-V dan P-V sudah mendekati kurva sel surya ideal.

Selanjutnya dilakukan simulasi untuk melihat gelombang tegangan dan arus keluaran inverter sumber arus (CSI) maupun inverter sumber tegangan (VSI) dengan tujuan untuk melihat apakah rangkaian filter *Low Pass* yang digunakan sudah berfungsi dengan baik.

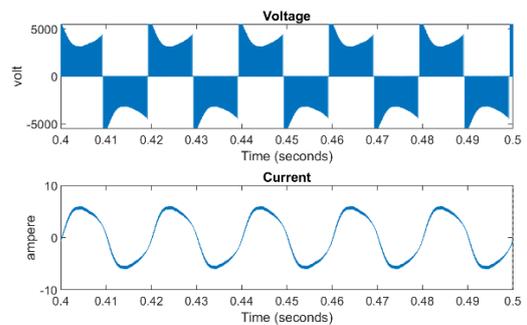


(a)

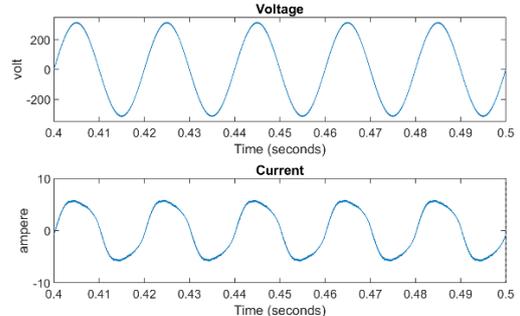


(b)

Gambar 11 Tegangan, dan Arus CSI (a) sebelum difilter (b) sesudah difilter.



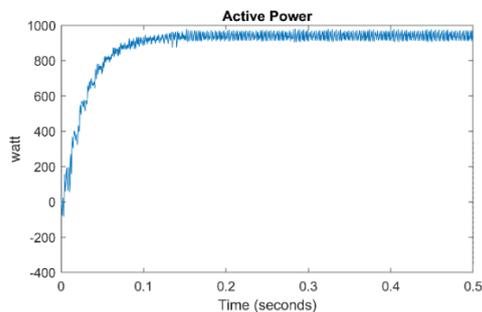
(a)



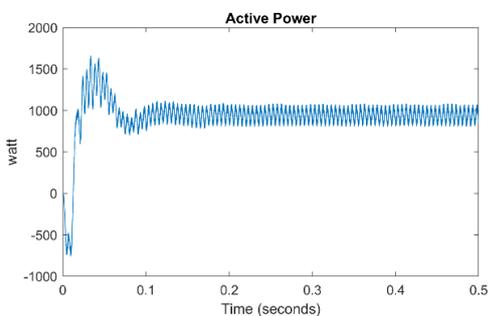
(b)

Gambar 12 Tegangan, dan Arus VSI (a) sebelum difilter (b) sesudah difilter.

Dari Gambar 11 dan Gambar 12, dapat dilihat bahwa filter *Low Pass* sudah berhasil meredam distorsi tegangan dan arus inverter menjadi mendekati gelombang sinus.



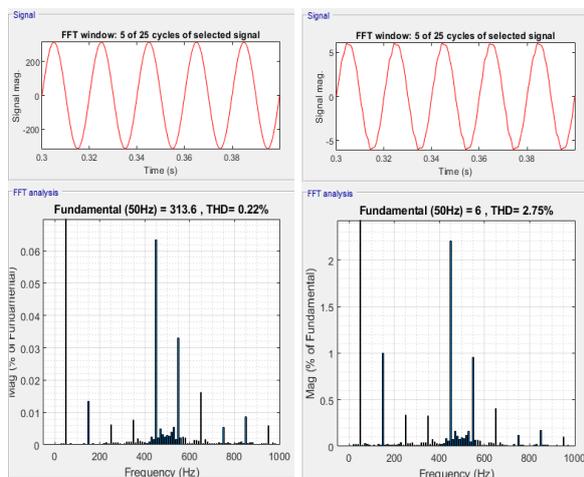
(a)



(b)

Gambar 13 Injeksi Daya ke Grid 950W (a) CSI, (b) VSI

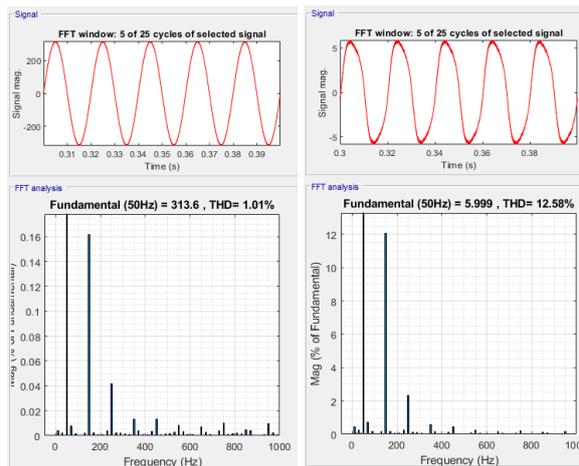
Gambar 13 menunjukkan kemampuan inverter dalam mengirimkan daya ke grid. Gambar 14 dan Gambar 15 merupakan hasil pengujian THD tegangan dan arus inverter sumber arus dan sumber tegangan pada keadaan tunak (*steady state*).



(a)

(b)

Gambar 14 THD sistem PV-inverter sumber arus saat daya 950W (a) tegangan, (b) arus



(a)

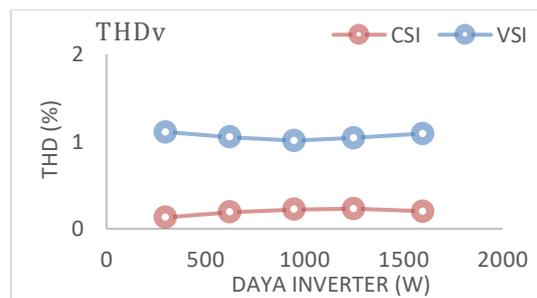
(b)

Gambar 15 THD sistem PV-inverter sumber tegangan saat daya 950W (a) tegangan, (b) arus

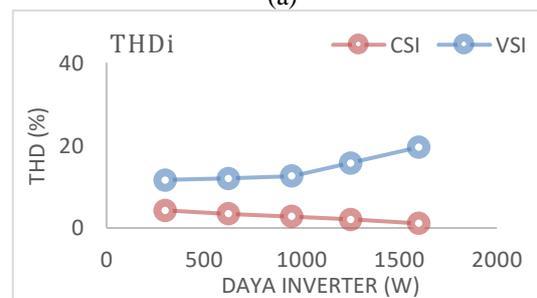
Tabel 4 adalah hasil pengujian THD lengkap untuk masing masing inverter sumber arus / *current source inverter* (CSI) dengan inverter sumber tegangan / *voltage source inverter* (VSI) dengan variasi injeksi daya inverter ke jala-jala. Presentasi Tabel 4 dapat disajikan dalam bentuk grafik seperti yang terlihat pada Gambar 16.

Tabel 4 THD terhadap variasi daya PV

Power (W)	THD _v (%)		THD _i (%)	
	CSI	VSI	CSI	VSI
300	0,13	1,11	4,26	11,63
625	0,19	1,05	3,42	11,97
950	0,22	1,01	2,75	12,58
1250	0,23	1,04	2,04	15,70
1600	0,20	1,09	1,10	19,54



(a)



(b)

Gambar 16 Tren nilai THD pada CSI dan VSI (a) THD Tegangan, (b) THD Arus

Dari Tabel 4 dan Gambar 16 dapat dilihat bahwa nilai *Total Harmonic Distortion* (THD) pada inverter sumber tegangan memiliki nilai yang lebih tinggi disbanding topologi inverter sumber arus. Perbedaan nilai ini cukup signifikan mengingat batas toleransi THD yang diijinkan dari sistem sel surya yang terhubung ke jala-jala adalah di bawah 5%. Dengan melakukan variasi perubahan daya PV, tidak ada perbedaan berarti terhadap nilai THD tegangan pada rangkaian CSI maupun VSI. Gambar 14.b menunjukkan perubahan daya inverter berdampak pada tren yang berbeda untuk THD arus kedua rangkaian inverter. Pada rangkaian CSI semakin besar daya injeksi ke jala-jala maka akan semakin kecil nilai THD arusnya, hal ini berbanding terbalik dengan rangkaian VSI.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini didasari pada simulasi menggunakan pemodelan sel surya terhubung grid dengan konfigurasi inverter sumber arus dan sumber tegangan yang dilengkapi dengan filter *low pass* LC/CL. Hasil simulasi menunjukkan inverter CSI memberikan hasil yang baik yaitu THD tegangan rata-rata adalah 0,194% dan THD arus rata-rata adalah 2,74%. Nilai ini layak untuk dioperasikan pada sistem *on-grid* karena masih dibawah 5%. Hasil simulasi juga menunjukkan perbedaan nilai THD tegangan dan arus yang cukup besar antara inverter sumber arus (CSI) dengan inverter sumber tegangan (VSI) ketika disimulasikan pada keadaan yang tidak jauh berbeda. Apabila diambil nilai rata-rata THD pada rangkaian VSI, hasilnya memiliki nilai mencapai 5 kali lipat lebih besar dibandingkan dengan rangkaian CSI. Titik fokus hasil simulasi perlu ditekankan pada THD arus (THDi) inverter VSI karena diatas angka 5% dan melampaui batas operasi *on-grid*. Kesimpulan akhir yang didapat adalah model sel surya pada penelitian ini lebih cocok menggunakan inverter CSI yang dilengkapi dengan filter CL. Penelitian selanjutnya terkait sistem sel surya terhubung grid apabila menggunakan inverter tipe VSI, penulis sangat menyarankan untuk menggunakan tipe filter LCL. Filter ini memiliki konfigurasi yang rumit, namun hal ini terbayar dengan performa tinggi yang ditawarkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," IEEE Std 1547-2003, pp. 1–28, Jul. 2003
- [2] M. Kesraoui, A. Lazizi, and A. Chaib, "Grid Connected Solar PV System: Modeling, Simulation and Experimental Tests," Int. Sci. Conf. "Environmental Clim. Technol. CONECT 2015, vol. 95, pp. 181–188, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.043.
- [3] M. Nour, E. Radwan, and L. Xiong, "Harmonic Analysis of Photovoltaic Generation in Distribution Network and Design of Adaptive Filter," Int. J. Comput. Digit. Syst., vol. 9, pp. 2210–142, Jan. 2020, doi: 10.12785/ijcds/090108.
- [4] H. Yatimi and E. Aroudam, "Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Power Source using Matlab/Simulink," International Journal of Innovation and Applied Studies, vol. 16, no. 2, p. 322, 2016.
- [5] J. A. Ramos-Hernanz et al., "Two photovoltaic cell simulation models in Matlab/Simulink," International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE), vol. 4, no. 1, pp. 45–51, 2012.
- [6] S. Sumathi, L. Ashok Kumar, and P. Surekha, "Application of MATLAB/SIMULINK in Solar PV Systems," in Solar PV and Wind Energy Conversion Systems: An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques, S. Sumathi, L. Ashok Kumar, and P. Surekha, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 59–143.
- [7] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009.
- [8] N. Vázquez and J. V. López, "11 - Inverters A2 - Rashid, Muhammad H.," in Power Electronics Handbook (Fourth Edition), Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 289–338.
- [9] S. Jayalath and M. Hanif, "CL-filter design for grid-connected CSI," in 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, pp. 1–6.
- [10] "KC200GT High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module Datasheet Kyocera. [Online]. Available: <http://www.kyocera.com>."