

## Pengaruh Variasi Parameter Filter Terhadap Harmonisa Pada Operasi PLTS Terintegrasi Sistem Tenaga Listrik

Agung Budi Muljono<sup>1</sup>, I Made Ari Nrathta<sup>1</sup>, I Made Ginarsa<sup>1</sup>, Sultan<sup>1</sup>, I Ketut Perdana Putra<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Mataram Jl. Majapahit 62, Mataram, INDONESIA 83125

### ARTICLE INFO

#### Article history (8 pt):

Received January 19, 2024

Revised Februari 14, 2024

Accepted Februari 26, 2024

#### Keywords ;

FFT;

Harmonic filter;

Photovoltaic on Grid;

Power Systems,

THDi;

THDv.

### ABSTRACT

*This paper provides a comprehensive harmonic picture of Photovoltaic operations integrated with the Electric Power System (Photovoltaic on-grid). Harmonics in Photovoltaic on-grid are generated from the inverter. One way to reduce harmonics is by installing a filter. Apart from reducing harmonics, filters can improve the system power factor value. This research examines the effect of variations in Photovoltaic on-grid filter parameters on inverter power capacity using Simulink/Matlab simulation. The FFT (Fast Fourier Transform) method is used to determine the harmonic order and THD of the current and voltage of the system on the side before and after the filter. The simulation results show changes in filter parameter variations for Qc (Var) values giving THDi and THDv values before and after filter installation using the FFT approach.*

Peper ini memberikan gambaran harmonis yang komprehensif mengenai pengoperasian Fotovoltaik yang terintegrasi dengan Sistem Tenaga Listrik (Photovoltaic on-grid). Harmonisa pada fotovoltaik on-grid dihasilkan dari inverter. Salah satu cara untuk mengurangi harmonisa adalah dengan memasang filter. Selain mengurangi harmonisa, filter dapat meningkatkan nilai faktor daya sistem. Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi parameter Photovoltaic on-grid filter terhadap kapasitas daya inverter menggunakan simulasi Simulink/Matlab. Metode FFT (Fast Fourier Transform) digunakan untuk menentukan tatanan harmonik dan THD arus dan tegangan sistem pada sisi sebelum dan sesudah filter. Hasil simulasi menunjukkan perubahan variasi parameter filter untuk nilai Qc (Var) memberikan nilai THDi dan THDv sebelum dan sesudah pemasangan filter menggunakan pendekatan FFT.

### Corresponding Author:

Agung Budi Muljono, Department of Electrical Engineering, University of Mataram

Jl. Majapahit 62, Mataram, Lombok NTB, INDONESIA

Email: [agungbm@unram.ac.id](mailto:agungbm@unram.ac.id)

### 1. PENDAHULUAN

Energi mempunyai peranan penting dalam pencapaian tujuan sosial, ekonomi dan lingkungan untuk pembangunan berkelanjutan serta merupakan pendukung bagi kegiatan ekonomi nasional, demikian juga untuk energi listrik. Penggunaan energi di Indonesia meningkat pesat sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk. Dalam RUPTL 2021-2030 komposisi EBT dalam pasokan energi nasional porsi energi baru terbarukan (EBT) mencapai 51,6% atau 20.923 MW, termasuk di dalamnya adalah PLTS dengan kapasitas 4.680 MWp sekitar 4,5 kWh/m<sup>2</sup>/hari, baik *on grid* maupun *off grid*. Adapun sisanya dari pembangkit fosil 48,4% atau 19.652 MW [1].

Dengan semakin besar kapasitas daya terpasang dari PLTS akan meningkatkan pengaruh kualitas daya sistem. Seperti diketahui bahwa keluaran daya pada PLTS berupa arus DC, maka untuk interkoneksi kedua

sistem tersebut membutuhkan peralatan *converter* jenis inverter (DC ke AC). Hal ini mengakibatkan keluaran arus dan tegangan tidak berbentuk sinusoidal murni, sehingga untuk sinkronisasi sulit, akan ada ketidakefisiensi akibat pengaruh harmonik.

Daya yang dibangkitkan PLTS pada sistem distribusi memberikan dampak seperti aliran daya dan distorsi harmonik. Dengan pengukuran parameter kualitas daya (PQ) yang dilakukan pada jaringan distribusi radial dalam dua periode waktu pada titik kopling umum *point of common coupling* (PCC) memberikan nilai THDi kurang dari 5 % [2]. Dengan simulator *software* ETAP, pada saat beban puncak dampak integrasi PLTS terhadap kualitas daya jaringan distribusi tingkat distorsi harmonik yang tinggi juga terjadi seiring dengan peningkatan kapasitas penetrasi sistem PLTS masing-masing sebesar 4,97% dan 14,98% untuk THDi dan THDv [3]. Daya output dari PLTS ditentukan dari intensitas radiasi matahari yang diterima oleh modul, ketika sistem PLTS berukuran besar terhubung ke jaringan distribusi dalam kondisi cuaca yang bervariasi data dari *Malaysian Meteorological Department* (MMD), hal ini dapat menyebabkan masalah kualitas daya seperti kenaikan tegangan, kedipan tegangan sebesar 6 %, dan penurunan faktor daya serta THDi mencapai 14,27 % [4]. Di sisi lain dampak PLTS pada jaringan listrik dapat meningkatkan tingkat nominal tegangan dan penurunan rugi-rugi daya total terkecil sebesar 47,1 kW atau sebesar 22% dari rugi-rugi daya yang terjadi sebelum PLTS *on grid* pada batas operasi standar di jaringan distribusi 20 kV, [5].

Kualitas daya mencakup beberapa variabel seperti tegangan, arus, frekuensi, faktor daya dan harmonik. Salah satu indikator kualitas daya nilai harmonisa ditentukan dengan indeks *Total Harmonic Distortion* (THD) yang dikibatkan beban *non linier* maupun komponen elektronika daya seperti inverter pada PLTS. Pengukuran THD menggunakan *3 Phase Power and Harmonic Analyzer* pada PLTS *on-grid* di Laboratorium Energi Baru Terbarukan Universitas Mataram didapatkan nilai THDi sebesar 33,33% [6]. Distorsi harmonik menimbulkan kerugian pada sistem jaringan, antara lain terjadinya resonansi paralel dan seri. Salah satu penyebabnya adalah pemasangan kapasitor shunt yang digunakan untuk kompensasi daya reaktif pada jaringan [7]. Identifikasi dan pengolahan kandungan harmonisa telah banyak diteliti antara lain pada beban listrik *mobile* [8], pada *Smart Energy Meter* (SEM) [9], aplikasi PLTS sistem *off grid* pada gedung dengan simulasi Simulink/Matlab [10] dan pada pemasangan *grid tie inverter* menggunakan Simulink MATLAB [11]. Semua menghasilkan kajian terhadap identifikasi nilai THD pada berbagai kondisi sebagai indikator kualitas daya.

Berbagai upaya untuk mereduksi harmonisa dan peningkatan kualitas daya pada sistem PLTS *on grid*, antara lain dengan memanfaatkan kompensator distribusi statis, yang dilengkapi dengan sistem penyimpanan energi baterai [12] dapat menentukan kesesuaian metode untuk mitigasi harmonisa dan peningkatan kualitas daya. Reduksi total distorsi harmonisasi pada luaran inverter satu-fasa dengan desain filter pasif menggunakan model simulasi SPICE [13], P. Cholamuthu *et al.*, mengusulkan desain Filter daya aktif seri *hybrid* untuk mereduksi harmonik berbasis-ANFIS, sesuai dengan standar IEEE 519-1992, model prototipe yang diusulkan terbukti menunjukkan bahwa sistem pengiriman daya bekerja secara efektif mengurangi distorsi harmonik total sekitar 30% [14].

Metode FFT (*Fast Fourier Transform*) digunakan untuk mengetahui orde harmonik dan THD arus dan tegangan pada beban *non linier* [15] menggunakan *Microcontroller* ARM STM32F7. Pendeteksian harmonisa dilakukan pelatihan dahulu dengan mengenali pola bentuk gelombang dan perhitungan proses FFT secara *offline* menggunakan FFNN memiliki input harmonisa dan output THDi [16]. Meninjau dari fenomena dan permasalahan dari pustaka yang ada, penelitian ini memberikan gambaran harmonisa yang menyeluruh pada operasi PLTS terintegrasi dengan Sistem Tenaga Listrik (PTLS *on-grid*), menggunakan metode FFT dengan filter kompensasi daya reaktif untuk nilai  $Q_c$  (Var) memberikan nilai THDi dan THDv sebelum dan sesudah pemasangan filter.

Harmonik adalah cacat gelombang yang dihasilkan konverter, output AC tidak sinusoidal murni tetapi mengandung gelombang lain dengan frekuensi kelipatan integer dari frekuensi nominalnya (sistem). Persamaan gelombang yang mengandung harmonik disajikan pada persamaan berikut, [17]:

$$v(i) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 + \theta_n) \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_0 + \phi_n) \quad (2)$$

Sehingga daya yang diberikan pada beban sebesar, berikut:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{n,rms} I_{n,rms} \cos(\theta_n - \phi_n) \quad (3)$$

Persamaan 3, daya yang diberikan pada beban menunjukkan daya yang diserap beban akan lebih besar apabila keluaran konverter adalah AC non sinusoidal. Apabila keluaran konverter adalah AC sinusoidal murni maka persamaan keluaran konverter adalah:

$$v(t) = V_{max} \cos(\omega_0 + \theta) \quad (4)$$

$$i(t) = I_{max} \cos(\omega_0 + \phi) \quad (5)$$

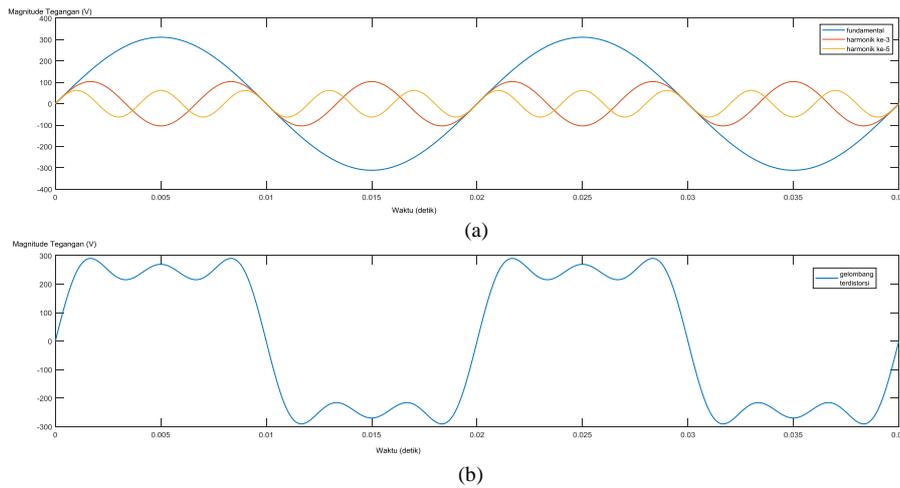
Sehingga daya yang diserap/diberikan pada beban seperti pada persamaan berikut:

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos(\theta - \phi) \quad (6)$$

Persamaan 6 mempunyai nilai lebih kecil daripada persamaan 3. Hal ini menunjukkan apabila keluaran konverter bisa dibuat sinusoidal maka transfer daya dari sumber DC ke beban AC akan optimal. Untuk beban yang sama, akan menyerap daya lebih kecil untuk keluaran sinusoidal murni dari pada keluaran non sinusoidal. Sehingga beban dapat dipasang lebih banyak dalam artian jumlah konsumen dapat lebih banyak apabila keluaran sinusoidal murni.

Ukuran ketidakmurnian gelombang AC dinyatakan dengan THD (*Total Harmonic Distortion*) seperti pada Gambar 1(a). Gambar 1(b) terbentuk dari beberapa gelombang sinus dengan frekuensi kelipatan integer dari frekuensi fundamental. THD ini akan bernilai tinggi untuk gelombang yang mempunyai cacat tinggi. THD dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_{n,rms}^2}{I_1^2,rms}} \quad (7)$$



**Gambar 1.** Gelombang terdistorsi harmonisa

Untuk memenuhi kualitas daya standar harmonisa, mengacu IEEE Std. 519-1992. Tabel 1 tetapan standar pada *Point of Common Coupling* (PCC) atau titik sambung bersama [18].

**Tabel 1.** Batas distorsi tegangan pada berbagai tingkat tegangan pada titik sambung bersama

| Tegangan Sistem          | IHD <sub>V</sub> (%) | THD <sub>V</sub> (%) |
|--------------------------|----------------------|----------------------|
| V <sub>rms</sub> ≤ 66 kV | 3                    | 5                    |

| Tegangan Sistem          | I <sub>sc</sub> /I <sub>load</sub> | THDi (%) |
|--------------------------|------------------------------------|----------|
| V <sub>rms</sub> ≤ 66 kV | < 20                               | 5        |
|                          | 20 – 50                            | 8        |
|                          | 50 – 100                           | 12       |
|                          | 100 – 1000                         | 15       |
|                          | > 1000                             | 20       |

Penelitian ini menggunakan MATLAB untuk pengolahan data sinyal arus dan tegangan dengan metode *Fast Fourier Transform*. Metode FFT untuk mengolah data yang didapatkan dan menampilkan secara grafis dengan tambahan GUI pada program pengolahan sinyal arus dan tegangan sistem PLTS *on grid*. *Discrete Fourier Transform* (DFT) digunakan untuk memproses sinyal diskrit dan periodik dari wilayah waktu ke wilayah frekuensi atau sebaliknya. Kandungan harmonisa dapat diperoleh dengan membangun prosedur DFT maju dapat dirumuskan [19]:

$$\text{Re}X[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x[i] \cos(2\pi ki/N) \quad (8)$$

$$\text{Im}X[k] = -\sum_{i=0}^{N-1} x[i] \sin(2\pi ki/N) \quad (9)$$

X[k], k, x[i], i, dan N, adalah sinyal wilayah frekuensi, frekuensi ke-k, sinyal wilayah waktu, waktu ke-i, dan N masing-masing adalah jumlah data sinyal.

Saat menghitung DFT, algoritma FFT dapat digunakan. FFT dapat melakukan perhitungan DFT lebih cepat. Menghitung persamaan 8 dan 9 secara langsung memerlukan 0(N<sup>2</sup>) operasi aritmatika, sedangkan algoritma FFT hanya memerlukan 0(N log N) operasi untuk menghitung deret yang sama.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan komputer dengan spesifikasi Intel Core i7 4790, RAM 16GB, SSD-16GB NVME 512GB, windows10, aplikasi Simulink MATLAB versi 2015a untuk simulasi sistem PLTS *on grid*. Bahan penelitian berupa data parameter sistem PLTS *on grid* dengan kapasitas total daya PLTS sebesar 875 kWp dengan susunan 22 modul seri setiap string dan 24 string paralel, dan inverter sebesar 680 kW. Parameter sistem meliputi spesifikasi panel surya dari Trina Solar TSM-325PEG14 (325W) Solar Panel seperti pada Tabel 2, spesifikasi inverter Conext Core XC sistem PLTS *on-grid* seperti pada Tabel 3, parameter filter (LC), parameter saluran dan beban sistem tenaga listrik yang terhubung ke *grid* 20 kV melalui transformator *step-up* 680 kVA, 380V/20 kV.

**Tabel 2.** Spesifikasi modul Trina Solar TSM-325PEG14 [20]

| Electrical Data (STC)   | Kapasitas |
|---|-----------|
| Daya maksimum ( $P_{maks}$ )  | 325 Wp    |
| Toleransi daya output maksimum  | 0 ~ 5 W   |
| Tegangan maksimum ( $V_{MPP}$ )   | 37,4 V    |
| Arus maksimum ( $I_{MPP}$ )   | 8,69 A    |
| Tegangan untai terbuka ( $V_{OC}$ )   | 45,6 V    |
| Arus untai tertutup ( $I_{SC}$ )  | 9.27 A    |
| Efisiensi Modul PV ( $\eta_M$ )   | 16,6 %    |
| STC: Irradiance 1000W/m <sup>2</sup> , Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5. |           |
| *Measuring tolerance: $\pm 3\%$ .   |           |

**Tabel 3.** Spesifikasi inverter Conext Core XC system PLTS *on-grid* [21]

| Spesifikasi Electrical         | Kapasitas    |
|--------------------------------|--------------|
| Rating tegangan masukan MPPT   | 550 - 880 V  |
| Rating tegangan operasi        | 550 - 885 V  |
| Tegangan maksimum open circuit | 1000 V       |
| Arus maksimum                  | 1280 A       |
| Arus hubung singkat maksimum   | 2000 A       |
| Kapasitas Daya Semu            | 680 kVA      |
| Kapasitas Daya aktif           | 680 kW       |
| Rentang daya reaktif           | +/- 680 kVar |
| Tegangan output                | 380 V        |
| Frekuensi                      | 50 Hz        |
| Arus output                    | 1040 A       |

Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram. Penelitian dilaksanakan dari bulan Juni sampai Oktober tahun 2023. Alur penelitian adalah sebagai berikut:

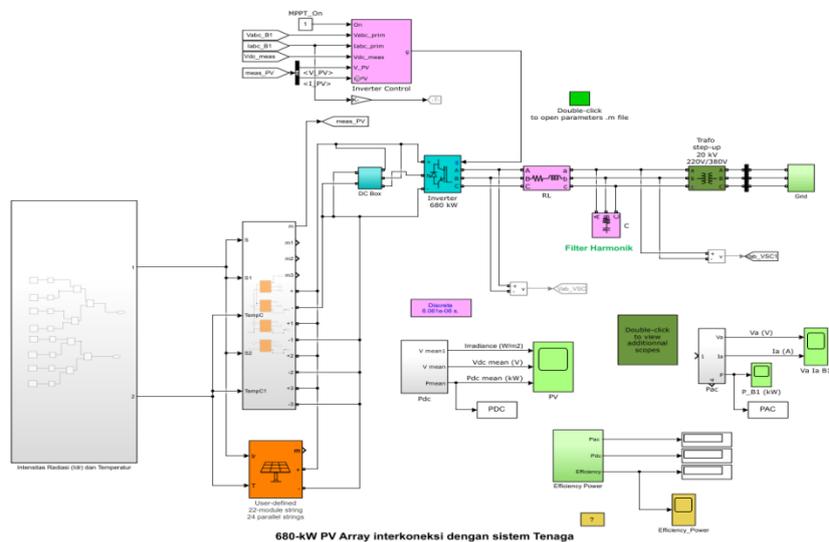
1. Pengumpulan data parameter sistem PLTS *on grid*, iradiasi dan suhu panel surya.
2. Pembuatan sistem PLTS *on grid* yang terhubung ke sistem tenaga listrik pada Simulink MATLAB dengan data parameter dari langkah 1,
3. Menguji operasi sistem dengan memberikan perubahan iradiasi dan suhu pada panel surya, Pengujian dilakukan selama 7 hari, setiap hari 10 jam, dari pukul 07-00 sampai dengan 17.00, dilanjutkan dengan validasi hasil untuk memastikan pemodelan sistem sesuai dengan kondisi lapangan.
4. Memberikan perubahan nilai parameter filter untuk mengetahui pengaruh filter ( $Q_c$ ) terhadap harmonisa yang dihasilkan oleh PLTS *on grid*, pada bagian sistem sebelum rangkaian filter dan sesudah rangkaian filter.
5. Menarik kesimpulan mengenai pengaruh perubahan nilai dari parameter filter terhadap harmonisa yang dihasilkan PLTS *on grid*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini sebagai bahan simulasi mengacu pada data dari penelitian [22]. Data sistem SCADA yang digunakan meliputi variabel iradiasi matahari ( $W/m^2$ ) dan temperatur panel surya. Pembuatan model sistem PLTS *on grid* pada aplikasi Simulink Matlab diuji menggunakan data pada tanggal 21 Juli 2022 pukul 07.00 – 17.00 waktu setempat dengan nilai iradiasi matahari berada pada rentang nilai 119 – 1032  $W/m^2$ , sedangkan temperatur modul PV bernilai 35 – 45  $^{\circ}C$ .

Untuk mengetahui nilai harmonisa yang menyeluruh pada operasi PLTS terintegrasi dengan Sistem Tenaga Listrik (PTLS *on-grid*) dibangun model filter melalui simulator Simulink Matlab. Pemasangan filter ini untuk mengetahui pengaruh sebelum dan sesudah pemasangannya terhadap nilai THDi dan THDv menggunakan metode FFT apakah sesuai dengan standard yang ditetapkan oleh IEEE 519–1992 dan dalam *Recommended for Monitoring Electric Power Quality* oleh IEEE[18].

Model sistem PLTS *on-grid* telah dibangun pada Simulink Matlab sebagai rancangan yang digunakan untuk mengetahui kinerja PLTS *on-grid* akibat perubahan iradiasi sinar matahari dan temperatur modul seperti pada Gambar 2. Model PLTS *on-grid* secara garis besar terdiri dari komponen-komponen sub sistem yaitu blok input data iradiasi dan suhu panel surya, PV array, inverter dilengkapi sistem kontrol, beban, trafo *step-up* dan *grid* (sistem tenaga listrik). Pada model sistem ini juga dilengkapi dengan filter untuk mengetahui nilai THDi dan THDv sebelum dan sesudah pemasangan filter.



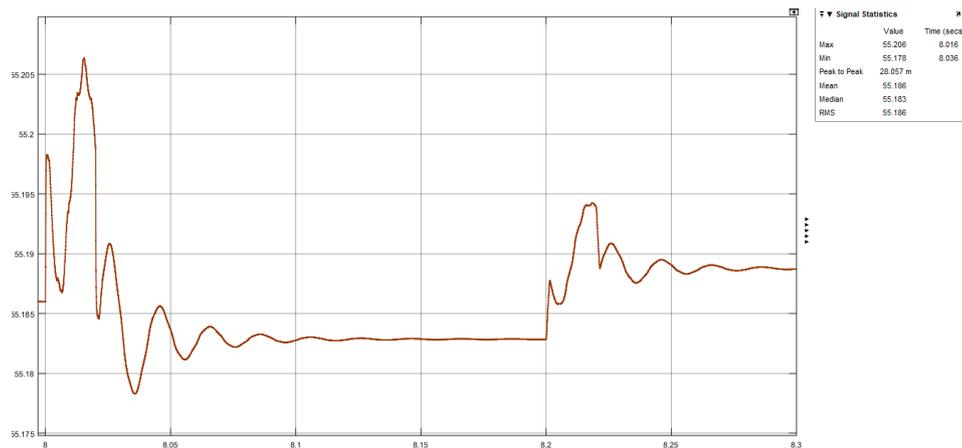
Gambar 2. Model sistem PLTS on grid [22]

#### 3.1. Operasi PLTS *on grid* karena perubahan iradiasi dan suhu

Kinerja sistem PLTS *on-grid* tidak dilengkapi dengan *battery* daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh nilai intensitas radiasi matahari dan temperatur modul PV. Dari model sistem pada Gambar 2, dengan menggunakan data pada salah satu hari pada tanggal 21 Juli 2022, mengikuti pola siklus matahari dari pukul 07.00-17.00, rentang nilai 119 – 1032  $W/m^2$ , sedangkan temperatur modul PV bernilai 35 – 45  $^{\circ}C$ . Pada kondisi cuaca dalam keadaan cerah dan berawan pada siklus harian, dengan simulasi dari model yang sudah dibangun menghasilkan kinerja PLTS *on-grid* didapat nilai efisiensi rerata sebesar 55,186 %, dengan nilai maksimum sebesar 55,206 % dan nilai efisiensi minimum sebesar 55,175 %, seperti pada Gambar 3. Dengan demikian sistem yang dibangun sudah dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan kinerja PLTS *on-grid*.

#### 3.2. Perubahan THD terhadap perubahan nilai parameter filter

Pada operasi PLTS terintegrasi dengan Sistem Tenaga Listrik (PLTS *on-grid*), permasalahan yang timbul adalah tingginya nilai harmonisa terutama dihasilkan dari inverter dan beban *non linier*. Untuk kualitas daya dari PLTS *on-grid* ditinjau dari frekuensi tegangan dan faktor daya, nilai yang diperoleh cukup baik harus sesuai dalam standar operasi menurut IEEE 519-1992 [18].



**Gambar 3** Karakteristik efisiensi sistem PLTS *on-grid*

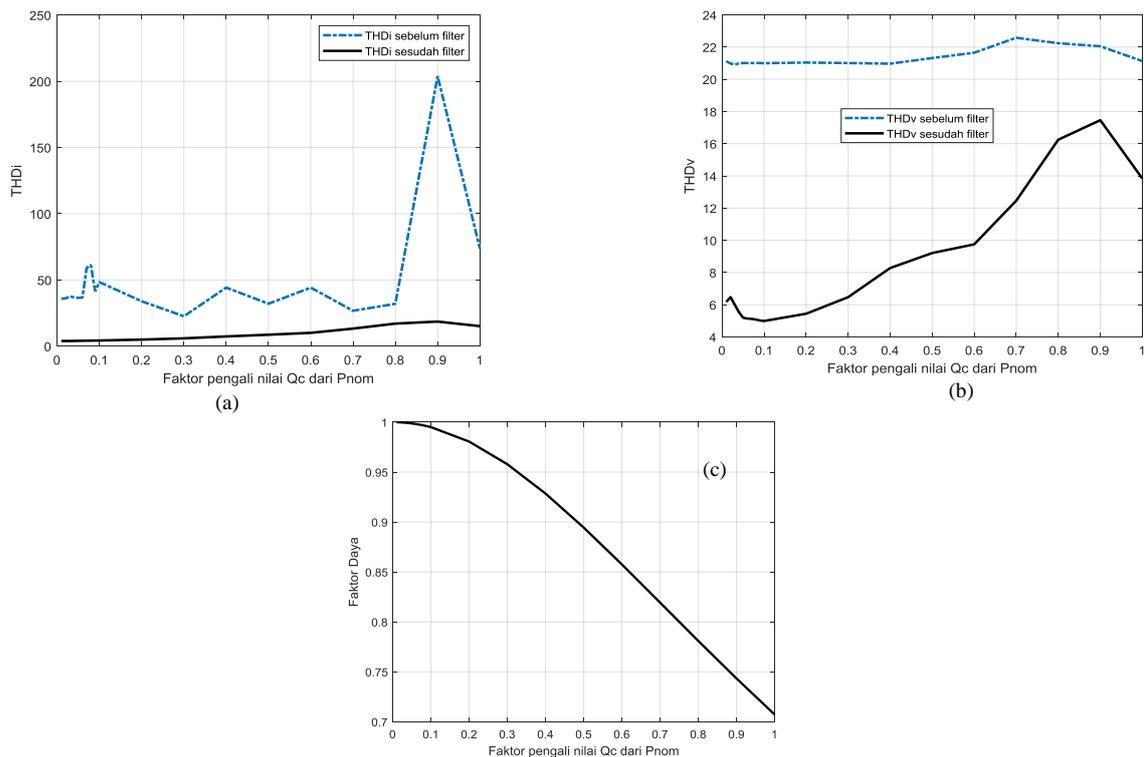
Simulasi model PLTS *on-grid* dilengkapi dengan pemasangan filter untuk mereduksi harmonisa dan memperbaiki faktor daya sistem. Metode FFT digunakan untuk mengetahui orde harmonik THDi dan THDv dari sistem pada sisi sebelum dan sesudah filter. Hasil simulasi dengan perubahan nilai parameter filter untuk nilai daya nominal sistem sebesar 680 kW dengan nilai daya reaktif  $Q_c$  berubah dengan faktor pengali ( $k$ ) dari 0,01 sampai 1 dari  $P_{nom}$  dan faktor daya beban 0,707 *lagging* sampai dengan 1, dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Hasil nilai THDi dan THDv sebelum dan sesudah pemasangan filter

| Pnom<br>(kW) | $Q_c=k \cdot P_{nom}$<br>(kVar) | Sudut fasa<br>(°) | Faktor<br>daya | THDi (%) |         | THDv (%) |         |       |
|--------------|---------------------------------|-------------------|----------------|----------|---------|----------|---------|-------|
|              |                                 |                   |                | Sebelum  | Sesudah | Sebelum  | Sesudah |       |
| 680          | 0,01                            | 6,8               | 0,573          | 1,000    | 35,91   | 3,93     | 21,12   | 6,18  |
| 680          | 0,02                            | 13,6              | 1,146          | 1,000    | 36,01   | 3,94     | 20,98   | 6,47  |
| 680          | 0,03                            | 20,4              | 1,718          | 1,000    | 37,65   | 3,94     | 20,91   | 6     |
| 680          | 0,04                            | 27,2              | 2,291          | 0,999    | 36,93   | 3,98     | 20,99   | 5,54  |
| 680          | 0,05                            | 34                | 2,862          | 0,999    | 36,48   | 4,04     | 21,01   | 5,19  |
| 680          | 0,06                            | 40,8              | 3,434          | 0,998    | 36,7    | 4,1      | 21,01   | 5,14  |
| 680          | 0,07                            | 47,6              | 4,004          | 0,998    | 59,08   | 4,15     | 21,01   | 5,12  |
| 680          | 0,08                            | 54,4              | 4,574          | 0,997    | 61,33   | 4,2      | 21,01   | 5,08  |
| 680          | 0,09                            | 61,2              | 5,143          | 0,996    | 41,61   | 4,25     | 21,01   | 5,02  |
| 680          | 0,1                             | 68                | 5,711          | 0,995    | 48,38   | 4,3      | 21      | 4,99  |
| 680          | 0,2                             | 136               | 11,310         | 0,981    | 33,93   | 4,98     | 21,04   | 5,44  |
| 680          | 0,3                             | 204               | 16,699         | 0,958    | 22,6    | 5,93     | 21,01   | 6,47  |
| 680          | 0,4                             | 272               | 21,801         | 0,928    | 44,25   | 7,37     | 20,97   | 8,28  |
| 680          | 0,5                             | 340               | 26,565         | 0,894    | 32,06   | 8,66     | 21,32   | 9,21  |
| 680          | 0,6                             | 408               | 30,964         | 0,857    | 44,22   | 10,08    | 21,65   | 9,75  |
| 680          | 0,7                             | 476               | 34,992         | 0,819    | 26,74   | 13,29    | 22,58   | 12,46 |
| 680          | 0,8                             | <b>544</b>        | 38,660         | 0,781    | 32      | 17,06    | 22,24   | 16,25 |
| 680          | 0,9                             | 612               | 41,987         | 0,743    | 203,91  | 18,59    | 22,05   | 17,46 |
| 680          | 1                               | 680               | 45,000         | 0,707    | 73,63   | 15,14    | 21,13   | 13,84 |

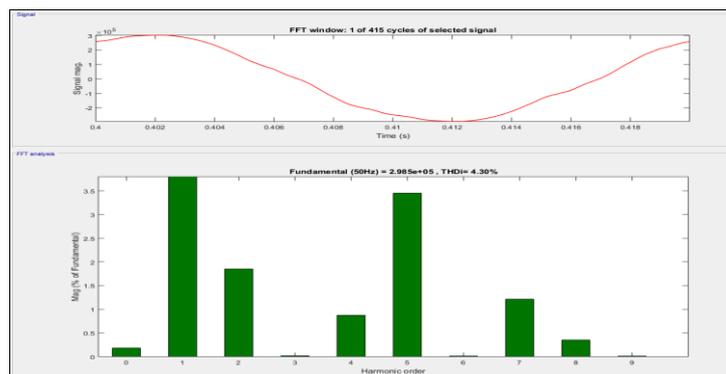
Dilihat dari hasil simulasi pada Tabel 4, dapat digambarkan kecenderungan nilai harmonisa arus (THDi), harmonisa tegangan (THDv) dan faktor daya beban dengan berbagai faktor pengali nilai  $Q_c$  dari  $P_{nom}$  sebelum dan sesudah pemasangan filter, diilustrasikan pada Gambar 4(a), 4(b) dan 4 (c). Hasil simulasi menunjukkan dengan kenaikan faktor pengali ( $k$ ) nilai THDi dan THDv mengalami kenaikan sampai pada Pengaruh Variasi Parameter Filter Terhadap Harmonisa Pada Operasi PLTS Terintegrasi Sistem Tenaga Listrik (Muljono et al)

nilai  $k = 0,9$ , kemudian turun dengan bertambahnya nilai  $k$ , baik sebelum dan sesudah pemasangan filter. Sebelum pemasangan filter nilai THDi dan THDv melebihi nilai standar sesuai IEEE 519-1992 disesuaikan dengan *short circuit ratio* antara 20 sampai 50 nilai standar THDi adalah maksimum 8 % dan 5 % untuk THDv untuk nilai tegangan bus PCC sampai dengan 69 kV. Setelah pemasangan filter LC memberikan perbaikan untuk nilai THDi, THDv maupun faktor daya dengan perubahan faktor pengali nilai  $Q_c$  dari  $P_{nom}$ . Pada nilai THDi sesuai standar IEEE 519-1992 untuk faktor pengali nilai  $Q_c$  sampai dengan  $0,4 \cdot P_{nom}$  dengan nilai 3,93% sampai 7,37%, sedangkan untuk nilai THDv yang sesuai untuk faktor pengali nilai  $Q_c$  sebesar  $0,1 \cdot P_{nom}$  dengan nilai 4,99 % pada faktor daya 0,995 *lagging*.

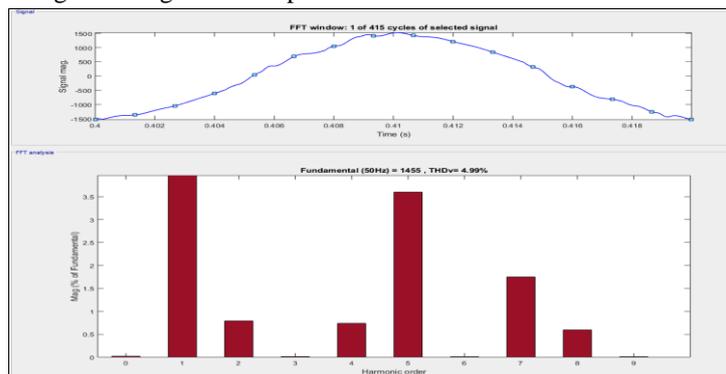


**Gambar 4.** (a). Trend nilai harmonisa arus (THDi), (b). harmonisa tegangan (THDv) dan (c). faktor daya beban dengan berbagai faktor pengali nilai  $Q_c$  dari  $P_{nom}$

Setelah pemasangan filter beban LC pada inverter, dengan menggunakan metode FFT dapat mereduksi gangguan distorsi harmonisa arus dan tegangan yang tinggi pada orde ke-5 dan orde ke-7. Kondisi ini memberikan nilai yang sesuai standar IEEE 519-1992 diperoleh pada nilai  $Q_c$  dengan faktor pengali sebesar 0,1 dari  $P_{nom}$ , sebesar 4,3 % untuk THDi dan 4,99 % untuk THDv pada faktor daya 0,995 *lagging*, ditampilkan seperti pada Gambar 5 dan 6.



**Gambar 5.** Bentuk gelombang arus dan spektrum harmonisa arus setelah filter untuk  $Q_c = 0,1 \cdot P_{nom}$



**Gambar 6.** Bentuk gelombang tegangan dan spektrum harmonisa tegangan setelah filter untuk  $Q_c = 0,1 \cdot P_{nom}$

#### 4. KESIMPULAN

Studi harmonisa pada sistem PLTS *on-grid* sangat diperlukan untukantisipasi program konservasi energi listrik menggunakan energi baru terbarukan yang semakin meningkat baik jumlah maupun kapasitasnya. Sistem PLTS *on-grid* yang dilengkapi dengan inverter dengan beban listrik non linier memberikan tingginya nilai THD yang dapat mempengaruhi nilai kualitas daya yang rendah.

Sistem PLTS *on-grid* berhasil disimulasikan pada Simulink MATLAB. Dengan input intensitas radiasi matahari dan temperatur modul PV dalam siklus harian matahari didapatkan daya output PLTS meningkat seiring meningkatnya Iradiasi dan suhu panel surya, dengan nilai efisiensi rerata sebesar 55,186 %. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan nilai parameter filter berpengaruh pada THD sistem PLTS *on-grid*. Nilai parameter filter kompensasi daya reaktif ( $Q_c$ ) semakin meningkat memberikan kenaikan nilai THD. Kondisi ini memberikan nilai yang sesuai standar IEEE 519-1992 diperoleh pada nilai  $Q_c$  dengan faktor pengali sebesar 0,1 dari  $P_{nom}$ , sebesar 4,3 % untuk THDi dan 4,99 % untuk THDv pada faktor daya 0,995 lagging.

#### REFERENCES

- [1] PT. PLN (PERSERO), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030.," 2021.
- [2] P. González, E. Romero-Cadaval, E. González, and M. A. Guerrero, "Impact of Grid Connected Photovoltaic System in the Power Quality of a Distribution Network BT - Technological Innovation for Sustainability," *Dr. Conf. Comput. Electr. Ind. Syst. - Technol. Innov. Sustain.*, pp. 466–473, 2011, [Online]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-19170-1\\_51](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-19170-1_51)
- [3] E. A. Sharew, H. A. Kefale, and Y. G. Werkie, "Power Quality and Performance Analysis of Grid-Connected Solar PV System Based on Recent Grid Integration Requirements," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/4281768.
- [4] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef, and H. Zayandehroodi, "Power quality impact of grid-connected photovoltaic generation system in distribution networks," *SCORED 2012 - 2012 IEEE Student Conf. Res. Dev.*, no. February 2018, pp. 1–6, 2012, doi: 10.1109/SCORED.2012.6518600.
- [5] M. Zainuddin, "Pengaruh Masuknya PLTS on Grid Skala Besar Pada Sistem Distribusi 20 KV

- Terhadap Kualitas Tegangan dan Rugi-rugi Daya,” *Fortei*, no. October 2017, p. 7, 2017.
- [6] Y. Akhmalagani, A. B. Muljono, and I. M. Ginarsa, “Pengukuran Dan Simulasi Pengurangan Harmonisa Dengan Filter Pasif Pada Sistem PLTS Di Laboratorium Energi Baru Terbarukan,” vol. 6, no. 2, pp. 103–110, 2019.
- [7] J. Sinaga, R. M. Siburian, and J. Sirait, “Analisa Pengaruh Harmonisa Pada Pengoperasian Beban Listrik,” *J. Teknol. Energi Uda*, vol. 9, no. 2, pp. 88–97, 2020.
- [8] A.B. Muljono, I. M.A Nrarth, I. M. Ginarsa, and I. M.B Suksmadan, “Identifikasi dan Pengolahan Kandungan Harmonisa Sinyal Arus pada Beban Listrik Mobile Berbasis Arduino UNO,” *J. Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 9, no. 2, p. 97, 2017, doi: 10.5614/joki.2017.9.2.3.
- [9] A. B. Muljono, I. M. A. Nrartha, I. M. Ginarsa, and I. M. B. Suksmadana, “Rancang Bangun Smart Energy Meter Berbasis UNO dan Raspberry Pi,” *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 14, no. 1, pp. 9–18, 2018, doi: 10.17529/jre.v14i1.8718.
- [10] J. Syaputra Siregar and H. Eteruddin, “Analisa Kualitas Daya Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem Off Grid Pada Gedung Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning,” *J. Sain, Energi, Teknol. Ind.*, vol. 6, no. 2, pp. 90–98, 2022, doi: 10.31849/sainetin.v6i2.9624.
- [11] I. D. G. B. Satya Nugraha, C. G. I. Partha, and I. W. A. Wijaya, “Analisis Pengaruh Distorsi Harmonisa Pada Pemasangan Grid Tie Inverter Dengan Menggunakan Simulink MATLAB,” *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 16, no. 3, p. 72, 2017, doi: 10.24843/mite.2017.v16i03p12.
- [12] O. P. Mahela, B. Khan, H. H. Alhelou, S. Tanwar, and S. Padmanaban, “Harmonic mitigation and power quality improvement in utility grid with solar energy penetration using distribution static compensator,” *IET Power Electron.*, vol. 14, no. 5, pp. 912–922, 2021, doi: 10.1049/pe12.12074.
- [13] G. Hasan Ma’arif, Tirza Damayanti, Faizal Arya Samman, “Analisa dan desain filter pasif untuk inverter satu-fasa melalui pengujian beban variabel resistif,” in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Energi dan Ketenagalistrikan SNTEK 2016*, 2016.
- [14] P. Chalamuthu *et al.*, “A Grid-Connected Solar PV/Wind Turbine Based Hybrid Energy System Using ANFIS Controller for Hybrid Series Active Power Filter to Improve the Power Quality,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/9374638.
- [15] N. Rasyid, *Identifikasi Beban Pada Sistem Tegangan Rendah Menggunakan Harmonisa Secara Real Time Berbasis Fast Fourier Transform Dan Neural Network*. Surabaya: DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING Faculty of Electrical Technology Sepuluh Nopember Institute of Technology Surabaya, 2018.
- [16] E. Wahjono *et al.*, “Pendeteksian Harmonisa Arus Berbasis Feed Forward Neural Network Secara Real Time,” *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 16, no. 1, pp. 8–14, 2020, doi: 10.17529/jre.v16i1.15093.
- [17] J. Arrillaga, B. C. Smith, N. R. Watson, and A. R. Wood, *Power system harmonic analysis*. 2013. doi: 10.1002/9781118878316.
- [18] IEEE, “Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE), IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power System,” 1992.
- [19] Steven W. Smith, “Smith, SW 1997, The scientist and engineer’s guide to digital signal processing, 1st edition. California Technical Publishing, San Diego,” p. 1999, 1999.
- [20] Solaridesigntool.com, “Solaridesigntool.com, (2023, 31 Juli), Trina Solar TSM-325PEG14 (325W) Solar Panel, Diakses pada 31 Juli 2023, Trina Solar TSM-325PEG14 (325W) Solar Panel (solaridesigntool.com).”
- [21] Solar.se.com, “solar.se.com, (2023, 5 Agustus), 1000V Conext Core XC, Diakses pada 5 Agustus 2023, <https://solar.se.com/us/en/product/conext-core-xc/>.”
- [22] Serlynita, “Analisis Kinerja Inverter Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya On- Grid,” Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram., 2023.

**BIOGRAPHY OF AUTHORS**

**Agung Budi Muljono** lahir pada bulan Februari 1971 di Purwodadi Grobogan Jawa Tengah. Memeroleh gelar Sarjana Teknik dari ITN Malang tahun 1996 dan Magister Teknik di bidang Teknik Elektro dari Universitas Gadjah Mada tahun 2000. Sebagai staff pengajar di Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram sejak tahun 1998 sampai sekarang. Minat utama penelitiannya adalah dinamika dan stabilitas sistem tenaga, transmisi dan distribusi tenaga listrik, sistem HVDC, Eenergi terbarukan, sistem pembangkit DG dan aplikasi AI dalam sistem tenaga listrik.



**I Made Ari Nrartha** lahir di Denpasar, Bali Indonesia, pada April 1973. Pendidikan formal ditempuh dari Pendidikan Menengah ditempuh di kota kelahiran Denpasar, Bali. memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro (ST) dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, pada tahun 1997 dan memperoleh gelar Magister Teknik (MT) dari Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, pada tahun 2001. Sejak 1999 sampai sekarang, I Made Ari Nrartha ST.,MT selain sebagai kepala Lab bidang Power Sistem Tenaga Listrik ia juga aktif sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, Indonesia. Selain berorganisasi ia juga aktif menulis Buku dan Jurnal nasional maupun internasional fokus penelitiannya adalah Sistem Tenaga Listrik, Sumber Energi Terbarukan, Smart Metering, dan Smart Grid



**I Made Ginarsa**, memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Udayana tahun 1997, Magister Teknik dari Universitas Gadjah Mada tahun 2001 dan Doktor dari Institut Sepuluh Nopember tahun 2012. Sekarang bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram. Bidang penelitian yang ditekuni optimasi sistem tenaga listrik, operasi dan perencanaan serta stabilitas sistem tenaga listrik



**Sultan**, memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Hasanuddin tahun 1995, Magister Teknik dari Universitas Gadjah Mada tahun 2004. Sekarang bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram. Bidang penelitian yang ditekuni optimasi sistem tenaga listrik, operasi sistem tenaga dan perencanaan instalasi tenaga listrik



**I Ketut Perdana Putra**, memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Gadjah Mada tahun 1997, Magister Teknik dari Universitas Gadjah Mada tahun 2004. Sekarang bekerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram. Bidang penelitian yang ditekuni transmisi dan distribusi tenaga listrik, perencanaan instalasi tenaga listrik dan aplikasi sistem *ergonomic* pada bidang teknik