

Research Article

Analisis Keseimbangan Tegangan dan Keseimbangan Arus Tiga Fasa pada Inverter Skala Komersial pada Sistem PLTS *On-Grid*

Sidik Kurniawan^{1,*}, Suadi An'Arih Sembiring²,

ABSTRAK: Artikel ini menganalisis keseimbangan tegangan dan arus tiga fasa pada inverter sistem PLTS *on-grid* di PT Pertamina Power Indonesia Wilayah Kerja Rokan Duri dengan menggunakan pendekatan utama berupa koefisien variasi sebagai indikator keseimbangan. Analisis dilakukan melalui pemantauan parameter keluaran AC pada periode pagi, siang, dan sore hari, meliputi tegangan antar fasa (AB, BC, CA) serta arus pada masing-masing fasa (A, B, C). Nilai rata-rata dan standar deviasi digunakan untuk menghitung koefisien variasi sebagai indeks keseimbangan sistem. Hasil penelitian menunjukkan koefisien variasi tegangan sebesar 0,06%–0,22% dan arus sebesar 0,08%–0,31%, yang seluruhnya berada di bawah batas evaluasi 5%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem berada dalam kondisi seimbang dari sisi tegangan dan seimbang dari sisi arus tiga fasa. Meskipun terdapat variasi iradiasi matahari sebesar 8,8%–25,42%, keluaran inverter tetap menunjukkan performa yang seimbang. Kontribusi penelitian ini terletak pada penerapan koefisien variasi sebagai metode kuantitatif sederhana namun efektif untuk mengevaluasi keseimbangan sistem PLTS *on-grid* berbasis data operasional aktual.

Kata kunci: keseimbangan sistem, arus tiga fasa, inverter komersial, PLTS *on-grid*, tegangan tiga fasa.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan pemanfaatan energi baru dan terbarukan di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan kebutuhan energi listrik serta komitmen pemerintah dalam menurunkan emisi karbon. Energi surya menjadi salah satu sumber energi yang paling potensial karena ketersediaannya yang melimpah di wilayah tropis. Berbagai penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *on-grid* mampu meningkatkan efisiensi energi serta menurunkan konsumsi energi berbasis fosil pada sektor industri. Sistem *on-grid* dinilai efektif karena dapat terintegrasi langsung dengan jaringan listrik eksisting tanpa memerlukan sistem penyimpanan energi dalam skala besar [1] [2] [3].

Dalam sistem PLTS *on-grid*, inverter merupakan komponen utama yang berfungsi mengonversi energi listrik arus searah (DC) dari modul surya menjadi arus bolak-balik (AC) sesuai dengan standar tegangan dan frekuensi jaringan. Selain melakukan konversi energi, inverter juga berperan dalam menjaga sinkronisasi dengan jaringan serta memastikan keseimbangan tegangan dan arus tiga fasa. Kualitas daya yang dihasilkan inverter sangat

OPEN ACCESS

Afiliasi:

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

²PT. Pertamina Power, Indonesia

Korespondensi:

Email: sidik.kurniawan2353@student.unri.ac.id

Diterima Redaksi:

14-04-2026

Selesai Revisi:

04-05-2026

Diterbitkan Online:

06-05-2026

Cara Mengutip Artikel ini (IEEE):

S. Kurniawan, S. A. Sembiring, “ Analisis Keseimbangan Tegangan dan Keseimbangan Arus Tiga Fasa pada Inverter Skala Komersial pada Sistem PLTS On-Grid,” *J. Electo*, vol. 2, no. 01, pp. 1–13, May 2026

This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



menentukan stabilitas sistem distribusi, terutama pada instalasi berkapasitas besar yang terhubung langsung ke jaringan [4] [5].

Pada sistem PLTS *on-grid* skala komersial, keseimbangan tegangan dan arus tiga fasa menjadi aspek krusial karena inverter beroperasi secara kontinu dan berinteraksi langsung dengan jaringan distribusi. Ketidakstabilan arus antar fasa dapat menyebabkan meningkatnya rugi-rugi daya, pemanasan berlebih pada peralatan, serta penurunan kualitas daya yang pada akhirnya berdampak pada keandalan sistem [6] [7]. Mengacu pada standar IEC 60038, tegangan sistem tenaga listrik dijaga dalam batas toleransi $\pm 5\%$ dari tegangan nominal. Selain itu, berdasarkan IEEE Std 141, ketidakseimbangan arus pada sistem tiga fasa direkomendasikan berada di bawah 10% dengan kondisi operasi optimal mendekati 5%. Secara operasional, keseimbangan tegangan dan arus pada sistem PLTS dipengaruhi oleh variasi iradiasi matahari, perubahan beban jaringan, serta kondisi lingkungan seperti suhu, namun sistem inverter tetap dirancang untuk menjaga keluaran agar tetap berada dalam batas standar yang ditetapkan [8]. Pada sistem bertipe *grid-following inverter*, tegangan mengikuti jaringan yang relatif konstan, sedangkan arus yang disuntikkan bergantung pada daya yang dihasilkan sehingga lebih rentan terhadap fluktuasi [9].

PLTS *on-grid* yang beroperasi di Wilayah Kerja Rokan Duri milik PT Pertamina Power Indonesia merupakan instalasi skala komersial yang berfungsi sebagai *fuel saver* untuk mendukung kebutuhan daya operasi [10]. Sistem ini terhubung ke jaringan distribusi 13,8 kV dan beroperasi pada kondisi lingkungan dengan suhu relatif tinggi. Dalam kondisi tersebut, inverter harus mampu menyuntikkan arus secara seimbang pada setiap fasa agar kontribusi daya optimal serta tidak menimbulkan gangguan pada sistem distribusi.

Artikel ini disusun untuk menganalisis keseimbangan tegangan dan arus tiga fasa inverter pada sistem PLTS *on-grid* di Wilayah Kerja Rokan Duri berdasarkan data operasi aktual pada periode pagi, siang, dan sore. Analisis ini diharapkan dapat memberikan gambaran nyata mengenai tingkat keseimbangan arus, mengidentifikasi potensi ketidakstabilan, serta menjadi dasar evaluasi kinerja dan penerapan pemeliharaan prediktif guna meningkatkan keandalan sistem PLTS sebagai *fuel saver*.

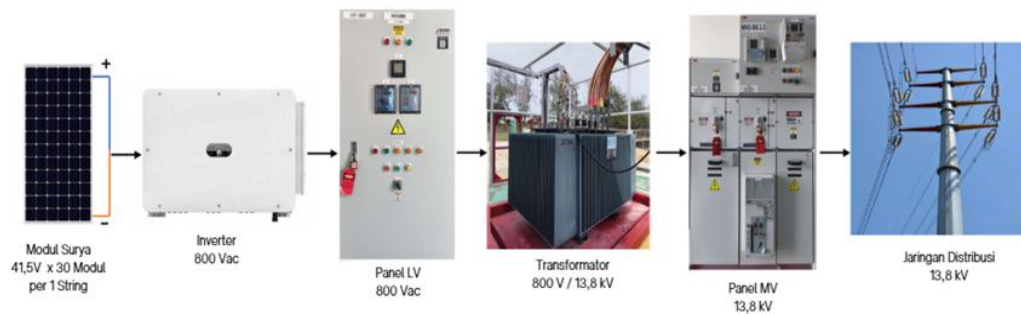
2. METODE PENELITIAN

Metode yang dilakukan dalam artikel ini adalah dengan *monitoring* sistem PLTS *on-grid* dengan pengambilan data secara online menggunakan aplikasi FusionSolar yang terintegrasi dengan inverter. Data yang dianalisis merupakan data operasional yang terekam pada sistem *monitoring*, meliputi tegangan antar fasa (AB, BC, CA), arus fasa (A, B, C), keluaran inverter. Inverter yang diteliti memiliki tegangan nominal 800 V.

Data operasional yang diperoleh dari aplikasi kemudian dianalisis dengan menghitung persentase variasi tegangan terhadap nilai nominal 800 V serta variasi arus terhadap nilai acuannya. Perhitungan ini dilakukan untuk mengevaluasi apakah tegangan dan arus keluaran inverter masih berada dalam batas toleransi $\pm 5\%$ dari nilai nominal sebagai indikator keseimbangan operasi [11]. Artikel ini dibatasi pada analisis data *monitoring* inverter dan tidak mencakup pengukuran langsung di lapangan maupun evaluasi pada sisi jaringan distribusi.

2.1. Blok Sistem PLTS On-Grid Terhubung Jaringan Distribusi

Sebelum analisis variasi tegangan keluaran inverter, Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem untuk menggambarkan alur kerja PLTS *on-grid*. Energi listrik berasal dari modul surya sebagai arus searah (DC), kemudian dikonversi oleh inverter menjadi arus bolak-balik (AC). Selanjutnya, energi disalurkan melalui panel LV, dinaikkan melalui transformator, dan diteruskan ke panel MV sebelum masuk ke jaringan distribusi listrik. [12] [13].



Gambar 1. Blok Sistem PLTS *On-Grid* Terhubung Jaringan Distribusi

Satu string pembangkit terdiri dari 30 modul fotovoltaik yang disusun secara seri dengan tegangan nominal masing-masing sebesar 41,5 V, sehingga menghasilkan tegangan total sebesar ± 1245 Vdc pada sisi masukan inverter. Nilai ini berada dalam rentang kerja *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) inverter yaitu 500–1500 Vdc, sehingga proses konversi energi dapat berlangsung dalam kondisi operasi normal inverter.

Energi listrik DC tersebut dikonversi oleh inverter tiga fasa menjadi energi listrik AC dengan tegangan nominal 800 V. Daya keluaran inverter disalurkan ke panel tegangan rendah (LV) 800 V, kemudian dinaikkan melalui transformator dengan rasio 800 V / 13,8 kV sebelum diteruskan ke panel tegangan menengah (MV) dan terhubung ke jaringan distribusi 13,8 kV.

Berdasarkan konfigurasi sistem tersebut, titik pengambilan data difokuskan pada sisi keluaran inverter (AC 800 V), yaitu sebelum transformator step-up. Data yang dianalisis meliputi tegangan antar fasa (AB, BC, CA) dan arus tiga fasa (A, B, C) yang diperoleh melalui sistem *monitoring* inverter. Pemilihan titik ini dilakukan untuk merepresentasikan kondisi keluaran inverter secara langsung sebelum mengalami perubahan pada sisi transformator maupun pengaruh dari jaringan distribusi. Posisi titik pengambilan data ini menjadi dasar dalam metode analisis yang digunakan, di mana parameter tegangan dan arus yang dianalisis merupakan keluaran langsung inverter tiga fasa. Dengan demikian, perhitungan rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi yang dilakukan dalam penelitian ini secara spesifik merepresentasikan tingkat keseimbangan keluaran inverter pada sisi AC 800 V.

2.2. Spesifikasi Alat

Modul surya Sankelux tipe SLX-390-72M memiliki daya maksimum (P_{max}) sebesar 390 Wp pada kondisi *Standard Test Condition* (STC), dengan tegangan maksimum daya (V_{mp}) 41,5 V dan arus maksimum daya (I_{mp}) 9,4 A. Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) tercatat sebesar 48,74 V dan arus hubung singkat (I_{sc}) 9,87 A. Modul ini dirancang untuk tegangan sistem maksimum 1000 VDC dengan maksimum arus sekering seri 16 A. Modul yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk Fisik Modul Surya

Spesifikasi modul surya kemudian dicatat berdasarkan data yang tertera pada nameplate. Data tersebut selanjutnya dirangkum dan disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data Modul Surya

No	Parameter	Keterangan
1	<i>Model Type</i>	SLX-390-72M
2	<i>Nominal Maximum Power</i>	390 W
3	<i>Optimum Operating Voltage</i>	41,5 V
4	<i>Optimum Operating Current</i>	9,4 A
5	<i>Open Circuit Voltage</i>	48,74 V
6	<i>Short Circuit Current</i>	9,87 A
7	<i>Maximum System Voltage</i>	1000 V
8	<i>Maximum Series Fuse Rating</i>	16 A
9	<i>Fire Rating Application Class</i>	Class C

Secara konstruksi, modul dilengkapi dengan *junction box* berkapasitas 1500 VDC yang mendukung penerapan sistem tegangan tinggi (*high voltage string configuration*), sehingga dapat mengurangi rugi-rugi daya pada sisi DC akibat penurunan arus pada konfigurasi tegangan yang lebih tinggi. Keberadaan diode bypass di dalam *junction box* juga berfungsi sebagai sistem proteksi terhadap efek *hot-spot* yang dapat terjadi akibat bayangan parsial (*partial shading*), sehingga keandalan dan umur pakai modul dapat lebih terjaga [14]. Dari sisi prinsip kerja, modul ini memanfaatkan efek fotovoltaiik pada material semikonduktor silikon tipe P-N, di mana foton dari radiasi matahari akan membebaskan elektron dan menghasilkan beda potensial listrik dalam bentuk arus searah (DC) [15]. Energi listrik DC yang dihasilkan kemudian disalurkan menuju inverter untuk dikonversikan menjadi arus bolak-balik (AC), sehingga dapat digunakan untuk menyuplai beban atau disinkronkan dengan jaringan pada sistem PLTS *on-grid* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Bentuk Fisik Inverter

Kemudian dilakukan pencatatan spesifikasi inverter melalui nameplate yang telah ada. Kemudian dirangkum dan dijelaskan pada Tabel 2 untuk nantinya dilakukan perhitungan.

Tabel 2. Data Inverter

No	Parameter	Keterangan
1	Jenis Inverter	Inverter surya <i>on-grid</i> tiga fasa (<i>Grid-Connected</i>)
2	Model Inverter	Huawei SUN2000-215KTL-H0
3	Tegangan Input DC Maksimum	1500 Vdc
4	Arus Masuk Maksimum DC	9×30 A
5	Arus Hubung Singkat Maksimum DC	9×50 A
6	Tegangan Input DC Maksimum (Isc)	1500 Vdc
7	Rentang Tegangan MPPT	500 – 1500 Vdc
8	Tegangan Keluaran Nominal (AC)	800 Vac, 3 Fasa
9	Frekuensi Operasi Nominal	50/60 Hz
10	Daya Keluaran Terukur	200 kW
11	Daya Semu Maksimum	215 kVA
12	Arus Keluaran Maksimum	155.2 A
13	Faktor Daya	0,8 (leading) – 0,8 (lagging)
14	Rentang Suhu Operasi	-25 °C sampai 60 °C
15	Topologi Inverter	Non-Isolation
16	Tingkat Proteksi	IP66
17	Kelas Proteksi	Class 1
18	Kategori Tegangan Lebih	II (DC) / III (AC)
19	Tingkat Polusi	III
20	Sistem Pendingin	Kipas Pendingin
21	Ketinggian Operasi Maksimum	4000 meter
22	Sistem Komunikasi	MBUS / RS485

Inverter yang digunakan adalah Huawei SUN2000-215KTL-H0, yaitu inverter surya *on-grid* tiga fasa dengan topologi non-isolation. Perangkat ini memiliki tegangan input DC maksimum 1500 Vdc dengan rentang tegangan MPPT 500–1500 Vdc, arus masuk maksimum 30 A per string, serta arus hubung singkat maksimum 50 A. Pada

sisi keluaran, inverter menghasilkan tegangan nominal 800 Vac tiga fasa dengan frekuensi operasi 50/60 Hz. Daya keluaran terukur sebesar 200 kW, dengan daya semu maksimum 215 kVA dan arus keluaran maksimum 155,2 A. Faktor daya dapat diatur pada rentang 0,8 leading hingga 0,8 lagging untuk mendukung pengendalian daya reaktif pada sistem jaringan.

Inverter ini memiliki tingkat proteksi IP66 dan kelas proteksi Class I, dengan kategori tegangan lebih II (DC) dan III (AC) serta tingkat polusi III. Perangkat mampu beroperasi pada rentang suhu -25°C hingga 60°C dan ketinggian maksimum 4000 meter. Sistem pendinginan menggunakan kipas (*fan cooling*) serta dilengkapi antarmuka komunikasi MBUS/RS485 untuk integrasi sistem *monitoring* dan pengawasan kinerja pembangkit.

2.3. Variabel Pengukuran

Artikel ini menyajikan hasil pengukuran dan analisis parameter kelistrikan inverter pada sistem PLTS *on-grid* tiga fasa, dengan penentuan variabel pengukuran yang dilakukan secara sistematis untuk mengevaluasi tingkat keseimbangan tegangan dan arus keluaran inverter berdasarkan variasi waktu operasi serta pengaruh kondisi lingkungan. Pengambilan data dilakukan selama satu hari operasi sistem pada beberapa interval waktu yang mewakili kondisi pagi, siang, dan sore hari, yaitu pukul 09.00, 10.00, 12.00, 13.00, 15.00, dan 16.00. Pemilihan waktu tersebut didasarkan pada variasi intensitas iradiasi matahari sepanjang hari, di mana pagi hari merepresentasikan kondisi awal pembangkitan, siang hari sebagai puncak produksi energi, dan sore hari sebagai fase penurunan daya, sehingga variasi ini digunakan untuk mengevaluasi konsistensi dan keseimbangan keluaran inverter pada berbagai kondisi operasional harian.

Untuk meningkatkan representasi variasi data dalam satu siklus harian, pengukuran dikelompokkan menjadi dua dataset, yaitu Data 1 yang terdiri dari pengukuran pada pukul 09.00, 12.00, dan 15.00, serta Data 2 yang terdiri dari pengukuran pada pukul 10.00, 13.00, dan 16.00 seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Pengelompokan ini bertujuan untuk merepresentasikan kondisi operasi inverter pada interval waktu yang berbeda dalam satu hari yang sama. Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi waktu operasi berdasarkan pembagian dataset tersebut serta intensitas iradiasi matahari (W/m^2) sebagai parameter lingkungan yang secara langsung memengaruhi daya masukan sistem fotovoltaik dan berimplikasi terhadap perubahan arus serta daya keluaran inverter.

Tabel 3. Data Pengukuran Sistem

Jenis Data	Pukul	Tegangan (V)	Arus(A)	Daya (kW)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Iradiasi (W/m^2)
Data 1	09:00	833,2	80,413			
		834,2	80,350	98,660	48,2	384
		834,8	80,516			
	12:00	843,0	147,398			
		842,6	147,154	206,067	57,4	324
		843,6	147,404			
	15:00	823,1	53,941			
		825,6	53,997	46,370	59,8	342
		826,7	54,078			
Data 2	10:00	831,0	74,367			
		832,8	74,340	87,720	49,4	302

		833,9	74,453			
Data 2	13:00	828,3	65,905			
		830,1	65,995	72,535	57,9	183
		831,3	66,302			
	16:00	828,5	92,150			
		830,0	91,840	116,960	56,8	291
		831,1	92,070			

Variabel terikat dalam artikel ini merupakan parameter utama yang dianalisis tingkat keseimbangannya, yaitu tegangan dan arus keluaran inverter tiga fasa. Tegangan keluaran inverter (V_{ac}) meliputi tegangan antar fasa AB, BC, dan CA yang selanjutnya diolah menjadi nilai rata-rata tiga fasa, standar deviasi tegangan, serta indeks keseimbangan tegangan dalam bentuk persentase. Arus keluaran inverter (I_{ac}) meliputi arus pada fasa A, B, dan C yang dianalisis melalui perhitungan arus rata-rata tiga fasa, standar deviasi arus, serta indeks keseimbangan arus. Evaluasi keseimbangan dilakukan dengan pendekatan statistik deskriptif melalui perhitungan nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi untuk mengidentifikasi tingkat fluktuasi keluaran inverter terhadap nilai rata-ratanya selama periode pengamatan.

Sebagai variabel pendukung, artikel ini juga mengukur daya aktif (P_{ac}) dan suhu inverter ($^{\circ}\text{C}$). Daya aktif digunakan untuk menggambarkan kondisi operasional sistem dan keterkaitannya dengan variasi arus dan tegangan, sedangkan suhu inverter digunakan sebagai parameter respon termal yang mencerminkan tingkat beban kerja inverter selama operasi.

2.4. Metode Analisis Data

Data penelitian ini diperoleh melalui sistem *monitoring* berbasis SCADA pada aplikasi *FusionSolar* yang terintegrasi dengan inverter. Akurasi data bergantung pada sensor internal dan sistem akuisisi data pabrikan. Data bersifat real-time, namun memiliki keterbatasan resolusi serta tidak dapat diverifikasi langsung melalui pengukuran lapangan. Selain itu, kemungkinan *delay*, *filtering*, dan pembulatan oleh sistem *monitoring* dapat memengaruhi ketelitian data. Meskipun demikian, data tersebut tetap representatif untuk analisis keseimbangan karena berasal langsung dari sistem kontrol inverter pada kondisi operasi aktual.

Analisis ketidakstabilan tegangan dan arus tiga fasa dilakukan dengan pendekatan statistik deskriptif. Tahap pertama adalah menghitung nilai rata-rata dari masing-masing parameter tiga fasa, yang dinyatakan pada Persamaan (1):

$$X_{avg} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}$$

di mana X_1 , X_2 dan X_3 masing-masing merupakan nilai tegangan atau arus pada masing-masing fasa, sedangkan X_{avg} adalah nilai rata-rata tiga fasa.

Selanjutnya, tingkat penyebaran data terhadap nilai rata-rata dihitung menggunakan standar deviasi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - X_{Rata-Rata})^2}{n-1}}$$

Indeks variasi sistem dihitung menggunakan koefisien variasi yang menyatakan tingkat penyebaran data terhadap nilai rata-rata, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3):

$$\text{Indeks Variasi}(\%) = \frac{\sigma}{X_{avg}} \times 100\%$$

Koefisien variasi digunakan untuk menggambarkan tingkat fluktuasi terhadap nilai rata-rata sebagai indikator keseimbangan tegangan tiga fasa. Keseimbangan tegangan ditetapkan dalam batas toleransi $\pm 5\%$ dari nilai nominal, yaitu pada sistem 800 V berada pada rentang 760–840 V. Pada arus tiga fasa, nilai koefisien variasi digunakan sebagai pendekatan untuk menilai keseragaman antar fasa A, B, dan C sebagai indikator keseimbangan sistem, dengan batas keseimbangan arus ditetapkan sebesar 5% terhadap nilai rata-rata arus pada masing-masing kondisi pengamatan.

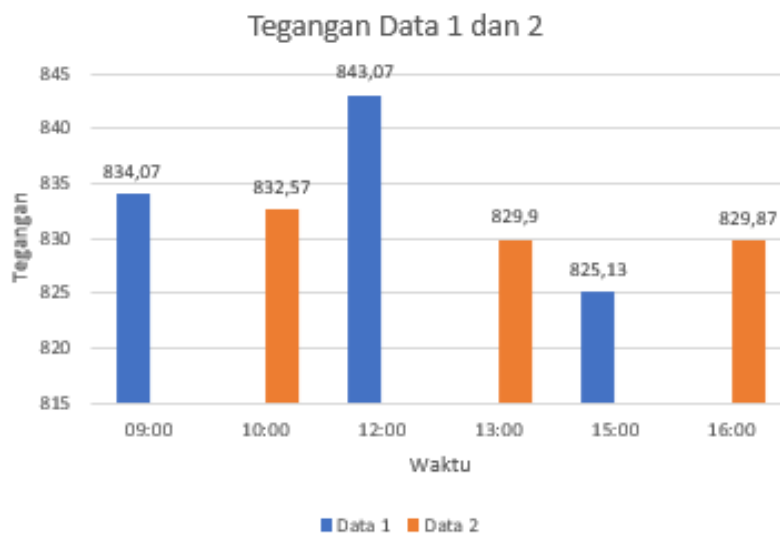
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Artikel ini menganalisis keseimbangan tegangan dan arus keluaran inverter tiga fasa pada sistem PLTS *on-grid* berdasarkan variasi waktu operasi dan perubahan kondisi lingkungan. Data pengukuran dilakukan pada periode pagi, siang, dan sore hari, kemudian dianalisis menggunakan pendekatan statistik berupa perhitungan rata-rata, standar deviasi, dan indeks keseimbangan (koefisien variasi) untuk mengevaluasi tingkat fluktuasi parameter kelistrikan terhadap nilai rata-ratanya.

3.1. Analisis Keseimbangan Tegangan Tiga Fasa

Tabel 4. Hasil Analisis Tegangan Tiga Fasa

Data	Waktu	Rata – rata (V)	Standar Deviasi (V)	Indeks Variasi (%)
Data 1	09:00	834,07	0,8	0,10
	12:00	843,07	0,5	0,06
	15:00	825,13	1,8	0,22
Data 2	10:00	832,57	1,46	0,18
	13:00	829,90	1,51	0,18
	16:00	829,87	1,31	0,16



Gambar 4. Grafik Rata -rata Tegangan Data 1 dan Data 2

Tabel 4 menunjukkan nilai rata-rata tegangan pada Data 1 masing-masing sebesar 834,07 V, 843,07 V, dan 825,13 V dengan standar deviasi berturut-turut sebesar 0,8 V, 0,5 V, dan 1,8 V. Nilai indeks ketidakstabilan sebesar 0,10%, 0,06%, dan 0,22% menunjukkan bahwa variasi tegangan antar fasa relatif kecil sehingga distribusi

tegangan tiga fasa berada dalam kondisi stabil. Rendahnya standar deviasi mengindikasikan kemampuan inverter dalam menjaga keseragaman tegangan meskipun terjadi perubahan beban dan iradiasi.

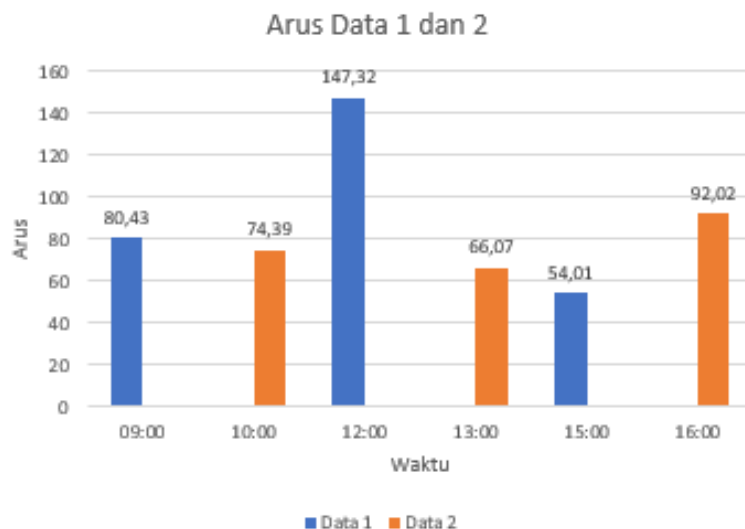
Pada Data 2, nilai rata-rata tegangan sebesar 832,57 V, 829,90 V, dan 829,87 V dengan indeks ketidakstabilan 0,16%–0,18% juga menunjukkan keseimbangan yang konsisten. Dibandingkan dengan batas toleransi $\pm 5\%$ dari 800 V (760–840 V), terdapat satu kondisi pada pukul 12.00 dengan tegangan 843,07 V yang sedikit melebihi batas atas. Kenaikan ini terjadi bersamaan dengan arus maksimum (147,32 A), yang mengindikasikan peningkatan daya keluaran inverter dan potensi fenomena *voltage rise* akibat injeksi daya ke jaringan.

Meskipun demikian, deviasi tersebut relatif kecil, yaitu sekitar 0,38% di atas batas maksimum tegangan (840 V). Kondisi ini menunjukkan adanya kenaikan tegangan sesaat yang masih berada pada kategori marginal terhadap batas standar sistem tenaga listrik. Kenaikan tegangan tersebut bersifat merata pada seluruh fasa, sehingga tidak mengindikasikan adanya ketidakseimbangan sistem atau gangguan distribusi fasa. Berdasarkan IEC 60038 sebagai acuan standar tegangan nominal sistem tenaga listrik, kondisi tersebut masih berada pada batas toleransi operasi selama tidak bersifat kontinu dan tidak menyebabkan overvoltage yang dapat mengganggu peralatan [16].

3.2. Analisis Keseimbangan Arus Tiga Fasa

Tabel 5. Hasil Analisis Arus Tiga Fasa

Data	Waktu	Rata – rata (A)	Standar Deviasi (A)	Indeks Variasi (%)
Data 1	09:00	80,43	0,084	0,10
	12:00	147,32	0,14	0,10
	15:00	54,01	0,069	0,13
Data 2	10:00	74,39	0,059	0,08
	13:00	66,07	0,208	0,31
	16:00	92,02	0,161	0,17



Gambar 5. Grafik Rata – rata Arus Data 1 dan Data 2

Tabel 5 menunjukkan nilai rata-rata arus tiga fasa pada Data 1 berdasarkan waktu pengamatan. Pada Data 1, nilai rata-rata arus masing-masing sebesar 80,43 A, 147,32 A, dan 54,01 A dengan standar deviasi berturut-turut sebesar 0,084 A, 0,14 A, dan 0,069 A. Nilai indeks ketidakstabilan sebesar 0,10%, 0,10%, dan 0,13% menunjukkan bahwa fluktuasi arus antar fasa relatif kecil sehingga distribusi arus tiga fasa berada dalam kondisi seimbang. Rendahnya nilai standar deviasi mengindikasikan bahwa inverter mampu menjaga keseimbangan arus meskipun terjadi perubahan kondisi beban dan intensitas radiasi.

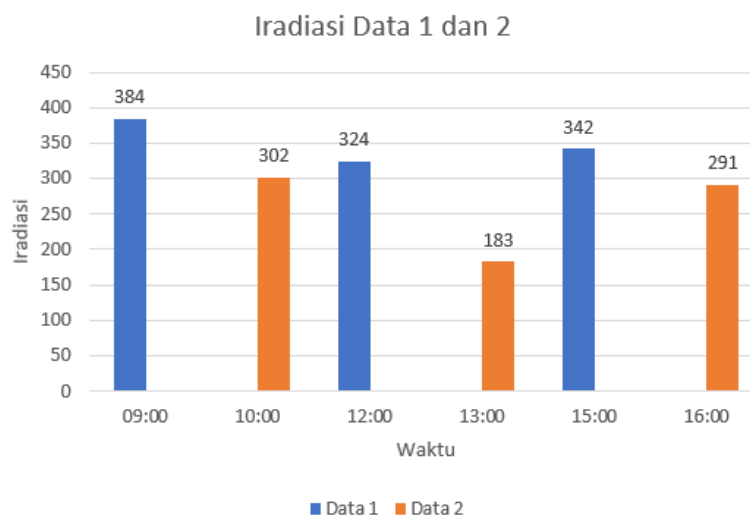
Pada Data 2, nilai rata-rata arus masing-masing sebesar 74,39 A, 66,07 A, dan 92,02 A dengan standar deviasi berturut-turut 0,059 A, 0,208 A, dan 0,161 A. Indeks variasi yang diperoleh berkisar antara 0,08% hingga 0,31%, yang menunjukkan kondisi arus tiga fasa masih seimbang meskipun terdapat sedikit peningkatan fluktuasi pada pukul 13:00. Nilai indeks tertinggi pada periode tersebut mengindikasikan adanya variasi arus antar fasa yang lebih besar dibandingkan waktu lainnya, namun masih dalam batas keseimbangan operasional sistem.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan menunjukkan bahwa sistem inverter mampu menjaga keseimbangan arus tiga fasa dengan tingkat ketidakstabilan yang rendah. Jika dibandingkan dengan batas toleransi arus sebesar 5% dari nilai nominal, seluruh data pengamatan masih berada dalam rentang yang diizinkan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem PLTS *on-grid* memiliki kemampuan regulasi arus yang baik dalam berbagai kondisi operasi. Berdasarkan IEEE Std 141, sistem distribusi tenaga listrik yang baik harus mampu mempertahankan keseimbangan arus antar fasa untuk menjaga kualitas daya dan keandalan operasi sistem [17].

3.3. Analisis Pengaruh Iradiasi terhadap Keseimbangan Sistem

Tabel 6. Hasil Analisis Iradiasi

Data	Rata – rata (W/m^2)	Standar Deviasi (W/m^2)	Indeks Variasi (%)
Data 1	350	30,82	8,8
Data 2	258,67	65,76	25,42



Gambar 6. Grafik Iradiasi Data 1 dan Data 2

Tabel 6 menunjukkan bahwa perhitungan standar deviasi dilakukan berdasarkan data yang diambil pada beberapa waktu pengamatan dalam satu hari, yaitu pagi, siang, dan sore, sehingga nilai yang diperoleh merepresentasikan variasi parameter antar waktu pengamatan, bukan fluktuasi kontinu sistem. Dalam konteks tersebut, variasi iradiasi pada Data 1 (8,8%) dan Data 2 (25,42%) menunjukkan perbedaan tingkat fluktuasi intensitas radiasi matahari antar waktu pengamatan dalam satu periode pengukuran, di mana nilai yang lebih tinggi pada Data 2 mengindikasikan perubahan iradiasi yang lebih besar dibandingkan Data 1.

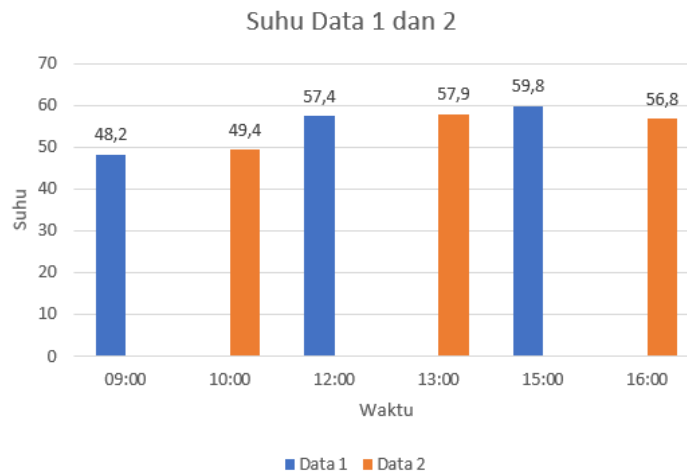
Secara konseptual, variasi iradiasi tersebut berpengaruh langsung terhadap arus keluaran inverter karena besarnya arus dipengaruhi oleh daya input dari modul fotovoltaik. Hal ini terlihat dari pola arus yang cenderung mengikuti perubahan nilai iradiasi pada setiap waktu pengamatan. Namun demikian, variasi iradiasi tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap tegangan keluaran inverter. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem kontrol inverter

mampu menjaga keseimbangan tegangan pada sisi AC, sehingga tegangan tetap berada di sekitar nilai nominal dengan deviasi yang terbatas pada setiap kondisi operasi.

3.4. Analisis Pengaruh Suhu Inverter

Tabel 7. Hasil Analisis Suhu Inverter

Data	Rata – rata (°C)	Standar Deviasi (°C)	Indeks Variasi (%)
Data 1	55,13	6,12	11,1
Data 2	54,7	4,62	8,45



Gambar 7. Grafik Suhu Inverter Data 1 dan Data 2

Tabel 7 menunjukkan nilai rata-rata parameter yang dianalisis pada Data 1 dan Data 2 beserta standar deviasi dan indeks ketidakstabilannya. Pada Data 1, nilai rata-rata sebesar 55,13 °C dengan standar deviasi 6,12 °C dan indeks ketidakstabilan 11,1%. Sementara itu, pada Data 2 diperoleh nilai rata-rata sebesar 54,7 °C dengan standar deviasi 4,62 °C dan indeks ketidakstabilan 8,45%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa Data 2 memiliki tingkat variasi yang lebih rendah dibandingkan Data 1, sehingga kondisi sistem cenderung lebih stabil.

Secara teknis, variasi nilai tersebut menunjukkan pengaruh kondisi lingkungan terhadap parameter operasional sistem, di mana fluktuasi suhu dapat memengaruhi kinerja modul fotovoltaik dan inverter. Namun, perbedaan indeks ketidakstabilan antara Data 1 dan Data 2 menunjukkan bahwa sistem masih mampu mempertahankan keseimbangan operasional meskipun terjadi variasi suhu. Hal ini mengindikasikan bahwa PLTS *on-grid* memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap perubahan suhu tanpa memberikan dampak signifikan terhadap keseimbangan keluaran sistem.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, sistem PLTS *on-grid* menunjukkan kinerja yang stabil pada parameter tegangan dan keseimbangan arus tiga fasa, di mana tegangan keluaran inverter secara umum berada dalam batas toleransi $\pm 5\%$ dari tegangan nominal 800 V sesuai IEC 60038, yaitu sekitar 760–840 V, meskipun pada satu kondisi pengukuran terjadi kenaikan hingga 843 V yang bersifat sesaat dan tidak memengaruhi keseimbangan sistem secara keseluruhan. Sementara itu, arus tiga fasa menunjukkan kondisi yang relatif seimbang dengan variasi yang rendah dan masih berada dalam batas ketidakseimbangan yang direkomendasikan oleh IEEE Std 141, yaitu di bawah 10% dengan kondisi operasi yang baik mendekati 5%, sehingga secara keseluruhan inverter tetap mampu mempertahankan keseimbangan operasi meskipun terdapat fluktuasi iradiasi dan suhu lingkungan.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada durasi pengambilan data yang hanya dilakukan dalam satu hari pengamatan, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan variasi kondisi operasi dalam jangka panjang, seperti

perubahan cuaca harian maupun musiman. Selain itu, data yang digunakan berasal dari sistem *monitoring* inverter tanpa verifikasi langsung melalui pengukuran lapangan, sehingga akurasi bergantung pada sistem akuisisi data yang digunakan.

Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengambilan data dalam periode yang lebih panjang serta mengombinasikan data *monitoring* dengan pengukuran langsung di lapangan guna meningkatkan validitas hasil. Selain itu, analisis dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan pengaruh harmonisa, kualitas daya, serta interaksi sistem dengan jaringan distribusi untuk memperoleh evaluasi performa PLTS yang lebih komprehensif.

❖ DAFTAR PUSTAKA

- [1] U. A. Pringsewu, M. Tri, C. Wicaksono, I. A. Bangsa, dan M. Sc, “Instalasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) photovoltaic rooftop pada gedung gardu induk kantor pusat PT pembangkit,” *Aisyah Journal of Informatics and Electrical Engineering*, vol. xx, no. xx, pp. 107–115, doi: 10.30604/jti.v4i2.
- [2] K. Energi, D. A. N. Pengurangan, dan B. Operasional, “Performance pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap berkapasitas 1,1 MWp di industri dalam konteks peningkatan kemandirian energi dan pengurangan biaya operasional,” *RELE (Rekayasa Elektriika dan Energi) Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 1, 2024, doi: 10.30596/rele.v7i1.20594.
- [3] S. Gautami, M. Mubarak, dan Y. I. Siregar, “Pemanfaatan energi surya sebagai upaya pengurangan emisi di wilayah Provinsi Riau,” *Jurnal Zona*, vol. 7, no. 1, pp. 56–66, Jun. 2023, doi: 10.52364/zona.v7i1.81.
- [4] Z. Huda, “Desain kendali stabilitas konverter DC/AC pada sistem PV terhubung ke grid,” *ELECTRON: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 2, no. 1, pp. 5–9, 2021, doi: 10.33019/electron.v2i1.253.
- [5] I. Kenedi, “Analisa sinkronisasi PLTS on-grid dan PLN yang terpasang di Gedung One Satrio Mega Kuningan,” *Jurnal Zetroem*, vol. 6, no. 2, pp. 74–80, 2024, doi: 10.36526/ztr.v6i2.4151.
- [6] M. Cole, D. Campos-Gaona, A. Stock, dan M. Nedd, “A critical review of current and future options for wind farm participation in ancillary service provision,” *Energies*, vol. 16, no. 3, 2023, doi: 10.3390/en16031324.
- [7] C. Matakana, L. M. Parera, dan M. Jamlaay, “Desain pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) off-grid Dusun I Negeri Hutumuri,” *Jurnal SIMETRIK*, vol. 15, no. 2, pp. 188–195, Nov. 2025, doi: 10.31959/js.v15i2.3390.
- [8] M. Fikri, F. R. Priyana, R. A. Setiawan, dan M. Nur, “Dampak pemasangan PLTS pada sistem distribusi terhadap kualitas tegangan dan rugi-rugi daya,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3, 2024, doi: 10.23960/jitet.v13i3.7574.
- [9] S. Jagadish Kumar, “Power quality enhancement in grid-connected solar PV systems using adaptive control and multilevel inverter topologies under dynamic grid conditions,” *Journal of Electrical Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 6806–6819, 2024, doi: 10.52783/jes.7134.
- [10] A. S. N. Aminasya, “Analisis kinerja dan efisiensi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) on-grid 735 kWp: studi kasus di kantor pusat Pertamina Hulu Rokan,” *Center of Publication*, vol. 2, pp. 2048–2054, 2024, doi: 10.60145/jcp.v1i8.186.
- [11] M. S. Ariwibowo, U. Usman, M. Putri L., dan A. Rahmadani, “Analisis pengaruh pembangkit listrik tenaga surya terhadap kestabilan sistem kelistrikan Kepulauan Sangihe,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3S1, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.8048.
- [12] S. S. Sudewanto dan M. A. Riyadi, “Evaluasi pemanfaatan pembangkit listrik tenaga surya on-grid di

- Laboratorium B PLN UPDL Pandaan,” *TELKA: Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, vol. 8, no. 2, pp. 165–174, Nov. 2022, doi: 10.15575/telka.v8n2.165-174.
- [13] B. F. Tanjung, “Perancangan desain PLTS on-grid pada gedung asrama putri UNSIKA Karawang dengan menggunakan simulasi Helioscope,” *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3, 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3.6615.
- [14] D. Yoo, J. Park, J. Moon, dan C. W. Kim, “Reliability-based design optimization for reducing the performance failure and maximizing the specific energy of lithium-ion batteries considering manufacturing uncertainty of porous electrodes,” *Energies*, vol. 14, no. 19, 2021, doi: 10.3390/en14196100.
- [15] S. Thakur, K. Sharma, dan A. Gupta, “Integrating solar photovoltaic systems with multilevel inverter topology for enhanced grid connectivity,” in *2024 IEEE Third International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Apr. 2024, pp. 108–113, doi: 10.1109/ICPEICES62430.2024.10719254.
- [16] M. Marozi, B. Eko, dan M. Fahmi, “Analisis aliran daya dan kualitas daya voltage uprating 70 kV ke 150 kV menggunakan performance index,” *Jurnal Elektro Universitas Islam Lamongan*, vol. 8, no. 2, 2021, doi: 10.30736/je-unisla.v7i2.786.
- [17] E. Control, C. Information, P. Systems, G. di, dan P. Bantargebang, “Analisis sistem kontrol dan informasi pada pembangkit di Bantargebang,” *JE-UNISLA*, vol. 7, no. 2, pp. 49–55, 2022, doi: 10.33795/elposys.v8i2.630.