

Optimasi beban dan harmonisa arus untuk reduksi arus netral pada pembangkit listrik tenaga surya

Faurina Fauzi¹, I Made Wiwit Kastawan^{2*}, Achmad Mudawari³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ds. Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kab. Bandung Barat, 40559, Indonesia

¹faurinafaz@gmail.com, ^{2*}wiwit.kastawan@polban.ac.id, ³achmad.mudawari@polban.ac.id

ABSTRAK

Beban non-linier dan distorsi harmonik merupakan dua hal yang sangat berpengaruh pada sistem ketenagalistrikan. Hal ini juga berpengaruh pada sistem distribusi sendiri (*self-usage*) di PLTS 1 MW Cirata, sebuah badan riset untuk pembangkit listrik tenaga surya di bawah PT PLN Nusantara Power UP Cirata. Terdapat besaran arus netral sebesar 36,2 A dengan besar arus fasa yang berbeda dan terindikasi adanya harmonik arus sebesar 19,72%, dimana melebihi standar IEEE-519 Tahun 2022. Ketidakseimbangan muncul akibat pembebahan yang tidak merata dan harmonik dapat muncul akibat adanya beban non-linier. Keduanya dapat menyebabkan panas berlebih pada beban ataupun kabel, terjadinya *short circuit*, bahkan kebakaran dan mati total. Penelitian ini melakukan pengajuan rekomendasi dalam mengurangi keberadaan besaran arus pada netral pada titik distibusi BUS A di PS (*Power Supply*) PLTS lewat penyeimbangan beban dan mereduksi harmonik untuk mengurangi besar arus pada netral menggunakan media simulasi ETAP 19.0.1. Data hasil pengukuran dijadikan referensi untuk simulasi kondisi eksisting. Baik ketidakseimbangan beban ataupun pemodelan pereduksi harmonik filter pasif *single-tuned* dirancang berdasarkan perhitungan matematis dan simulasi. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa ketidakseimbangan dapat direduksi dari 42,5% menjadi 3,867% dengan pemerataan beban. Kadar distorsi harmonik (*Total Harmonic Distortion*) juga direduksi dengan pemasangan filter, minimal reduksi sebesar 79,76% dan maksimal 95,49% dari kadar awal.

Kata kunci: arus netral, ketidakseimbangan beban, THD, filter harmonik pasif

ABSTRACT

Non-linear loads and harmonic distortion significantly affect power systems, including the self-usage distribution at the 1 MW Cirata Solar Power Plant (PLTS), operated by PT PLN Nusantara Power UP Cirata. Measurements recorded a neutral current of 36.2 A, unequal phase currents, and harmonic content of 19.72%, exceeding the IEEE-519 (2022) standard. Load imbalance occurs due to uneven loading, while harmonics mainly arise from non-linear loads. Both issues can cause equipment overheating, cable damage, short circuits, fires, or even total system failure. This final project focuses on reducing neutral current at the BUS A distribution point by balancing the load and mitigating harmonics using ETAP 19.0.1 software. Measured field data served as the basis for simulations. Load balancing was modeled to minimize current disparity among phases, while harmonic mitigation was addressed using a passive single-tuned filter. Both methods were supported by mathematical calculations and verified through simulation. The results demonstrate that load imbalance decreased significantly, from 42.5% to 3.867%, after load equalization. Furthermore, Total Harmonic Distortion (THD) was reduced substantially with the filter, achieving a minimum reduction of 79.76% and a maximum of 95.49% from the original levels, ensuring improved power system reliability.

Keywords: neutral current, load imbalance, THD, passive harmonic filter

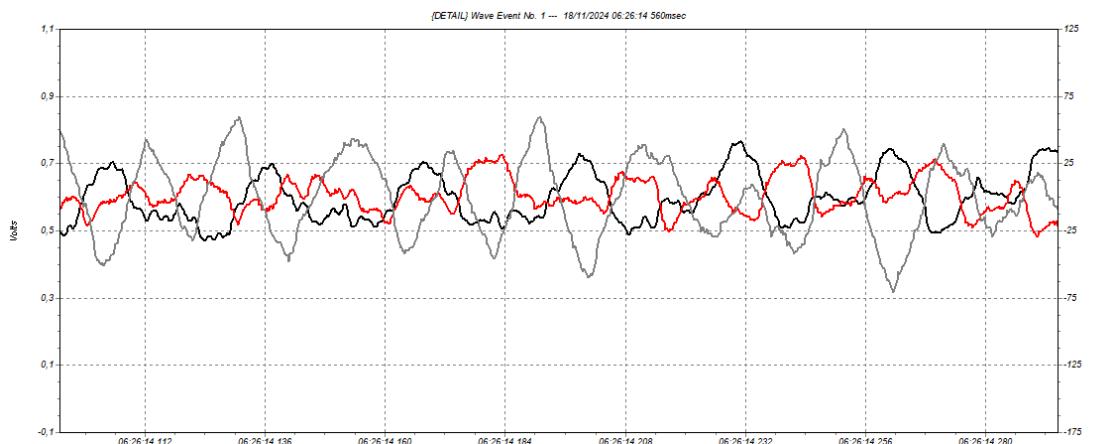
1. PENDAHULUAN

Seiring berkembangnya teknologi, maka energi baru terbarukan pun semakin marak digunakan dan salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Indonesia sendiri merupakan tempat yang strategis dengan potensi energi surya yang besar [1], [2], sehingga PT PLN Nusantara Power sebagai tonggak pembangkitan listrik pun membangun PLTS 1 MW Cirata sebagai ruang penelitian untuk tenaga surya. Teknologi inverter modern yang digunakan sudah lengkap dengan filter pada masukan maupun keluarannya, namun setelah dilakukan pengukuran awal ditemukan *magnitude* arus pada netral yang cukup besar. Adanya arus netral merupakan akibat dari kebocoran arus karena pembebahan yang tidak seimbang [3], [4]. Pengukuran awal seperti pada Tabel 1 serta Gambar 1 pun menunjukkan indikasi adanya harmonik arus dan perlu dilakukan analisis lebih lanjut. Keberadaan arus

netral yang semakin besar dapat menimbulkan rugi-rugi panas berlebih yang apabila melampaui nilai KHA (Kuat Hantar Arus) yang mampu menyebabkan isolasi kabel rusak hingga *short-circuit* [4].

Tabel 1. Hasil pengukuran awal pada BUS A power supply PLTS

No.	Waktu	Arus per Fasa (A)				THD (%)			
		R	S	T	N	R	S	T	N
1	10:00	0,9	4,5	16,9	14,6	20,46	38,29	19,07	22,03
2	11:00	0,9	5,1	17,1	14,7	11,25	24,94	13,69	22,32
3	12:00	0,9	7,1	25,3	22,5	15,53	32,7	13,43	16,36
4	13:00	1,5	12,4	31,7	27,3	17,39	27,25	11,99	15,29
5	14:00	2,3	12,8	28,9	24,3	19,17	31,13	13,31	18,62



Gambar 1. Gelombang arus pada BUS A power supply PLTS

Adanya arus netral menunjukkan bahwa terjadi ketidakseimbangan beban dan adanya harmonisa. Keseimbangan beban pada sebuah sistem tenaga listrik memiliki dua syarat utama, yaitu ketiga vektor arus atau tegangan sama besar dengan ketiga vektor saling membentuk sudut 120° . Saat salah satu atau kedua syarat tidak terpenuhi, maka arus netral yang seharusnya tidak memiliki besaran arus menjadi berarus akibat buangan dari fasa-fasa yang mengalami ketimpangan beban [3], [5], [6], [7]. Untuk menilai apakah suatu sistem dalam batas ketidakseimbangan yang baik atau tidak, maka tingkat ketidakseimbangan beban dikelompokan dalam indeks kesehatan (*health index*) beban pada Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014 tentang metode pemeliharaan trafo distribusi berbasis kaidah manajemen aset halaman 8 bagian 6.6.2.6 matriks *online assessment tier-1* pada trafo distribusi [8]. Harmonisa sendiri merupakan kumpulan dari gelombang yang terdistorsi dengan besar nilai frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamentalnya yang jika dijumlahkan akan membuat gelombang ideal menjadi non-sinusoidal. Tiap orde harmonik memiliki besaran nilainya masing-masing, baik positif, negatif, dan triplen. Harmonik positif dan negatif dapat saling meniadakan dalam sistem, menyisakan harmonik triplen yang merupakan penyebab munculnya arus pada kabel netral [9], [10], [11], [12]. Beban non-linier merupakan penyebab utama terjadinya harmonik pada sistem, seperti beban-beban yang terdiri dari komponen elektronika daya seperti *driver*, *rectifier*, inverter, dan alat pengalih daya lainnya [13]. Beban-beban ini akan menimbulkan harmonik yang dapat mengganggu kualitas daya listrik dari sumber. Harmonisa sendiri dapat mengakibatkan rugi-rugi panas, rugi-rugi inti besi, hingga kerusakan peralatan [9], [14]. Standar harmonik pada jaringan diatur pada IEEE-519 2022 yang merupakan versi terbaru dari IEEE-519 2014. Penanggulangan harmonik dapat dilakukan dengan berbagai macam cara, salah satunya pemasangan filter harmonik pasif yang akan memerangkap orde-orde harmonik tertentu yang diinginkan [15]. Sebelumnya pernah dilakukan kajian mengenai distorsi harmonisa pada PLTS 1 MW Cirata terhadap sistem jaringan 20 kV PLTA 1008 MW menggunakan *software* ETAP 12.6 [16] dan hasil menunjukkan bahwa terdapat kadar harmonik tegangan sebesar 0,69% saat dilakukan distribusi listrik dari PLTS ke *Power Supply* PLTA, sehingga dapat disimpulkan bahwa kadar harmonik output PLTS masih dibawah batas aman (< 5%)

Penelitian kali ini akan lebih menelisik ke dalam jaringan distribusi internal pada *Power Supply* PLTS untuk mencegah adanya potensi kerusakan akibat ketidakseimbangan dan harmonik arus.

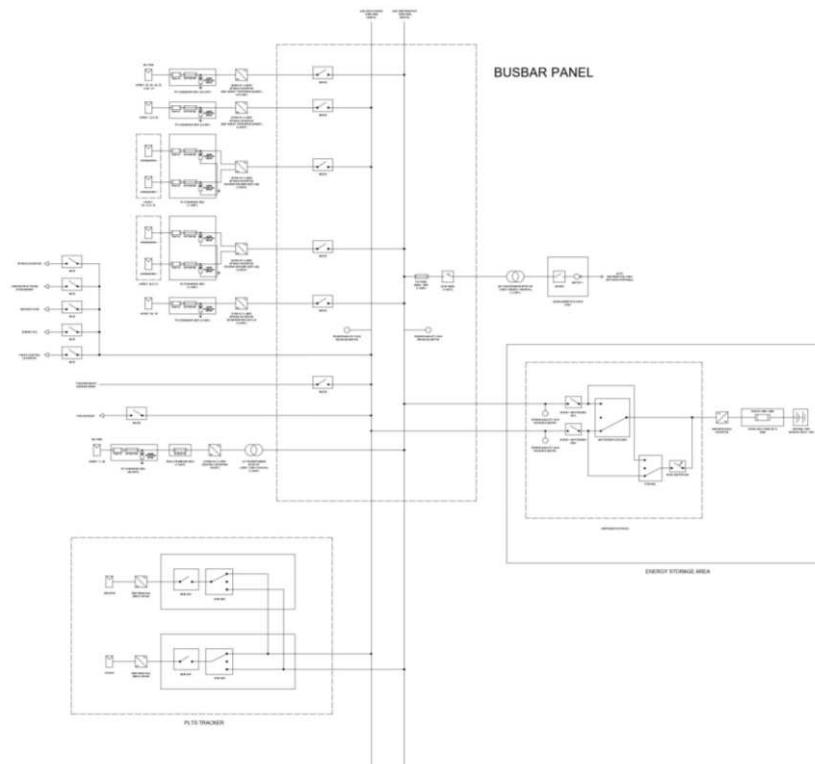
Penelitian dilakukan dengan melakukan pemodelan simulasi pembebanan dan harmonisa arus berdasarkan kondisi eksisting pada sistem akibat beban-beban non-linier berdasarkan spesifikasi teknis yang tersedia. Pemodelan yang dilakukan berfokus pada jaringan distribusi listrik pada BUS A *Power Supply* PLTS 1 MW Cirata. Penelitian ini hanya berfokus pada titik distribusi listrik PS PLTS BUS A untuk penggunaan sendiri dengan pengukuran dilakukan dalam kondisi tidak tersambung jaringan PLN (*Off-grid*), dengan data yang digunakan sebagai referensi adalah data pada kondisi *steady state*. Hasil output dianggap bebas harmonik (sinoidal murni) [16]. Beberapa upaya reduksi arus netral dilakukan melalui simulasi pada ETAP 19.0.1, seperti penyeimbangan beban pada titik distribusi yang ditentukan untuk mengurangi kadar ketidakseimbangan beban yang tinggi dan pemasangan filter harmonik pasif *single-tuned* untuk mengurangi harmonik arus pada sistem distribusi listrik di BUS A *Power Supply* PLTS. Pemodelan yang dilakukan tidak mencakup aspek ekonomi atau penentuan komponen secara riil, namun diharapkan upaya yang dilakukan diharapkan mampu mengurangi *magnitude* arus pada netral dan mencegah kerusakan lebih lanjut. Standar yang digunakan pada penelitian kali ini untuk menentukan persentase ketidakseimbangan beban berdasarkan standar JTR (Jaringan Tegangan Rendah) pada Surat Edaran Direksi PT PLN 2014 dan untuk batasan harmonik arus mengacu pada IEEE-519 2022.

2. METODE PENELITIAN

Bagian ini akan menjelaskan mengenai prosedur pelaksanaan penelitian tugas akhir dalam bentuk diagram alir dan uraian singkat, lokasi penelitian, teknik pengolahan data dalam melakukan penyeimbangan beban dan reduksi harmonik arus.

2.1 Lokasi Penelitian

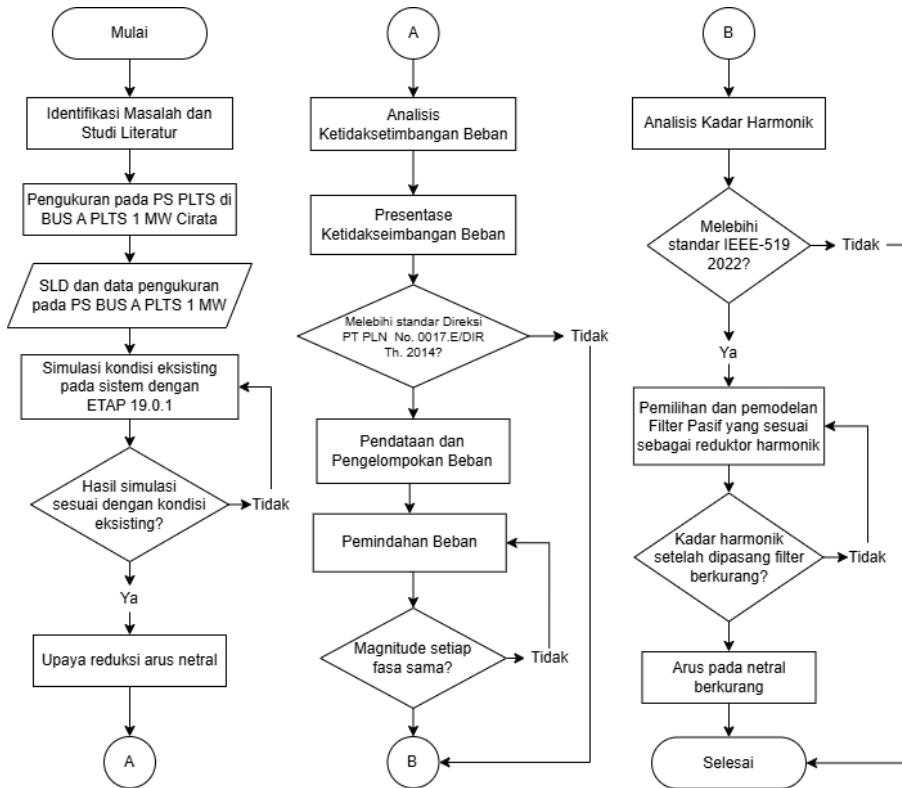
Penelitian ini dilakukan pada PLTS 1 MW Cirata, PT PLN Nusantara Power, pada titik distribusi sendiri (*self-use*) *Power Supply* PLTS seperti pada Gambar 2. Titik distribusi adalah BUS A PLTS yang tersambung pada berbagai jenis beban, mulai dari beban linier ataupun non-linier yang menyokong pembangkitan di PLTS 1 MW Cirata selama beroperasi. Titik pendistribusian beban ini dipilih untuk melihat bagaimana kualitas sistem tenaga listrik internal pada PLTS 1 MW Cirata untuk penggunaan sendiri.



Gambar 2. Single line diagram PLTS 1 MW Cirata

2.2 Tahapan Penelitian

Tahapan-tahapan yang digunakan dalam analisis ketidaksetimbangan beban dan pengaruh reduktor harmonik terhadap arus netral pada sistem distribusi lokal mengikuti diagram alir pada Gambar 3. Diagram alir penelitian berikut ini.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

2.3 Pengumpulan Data

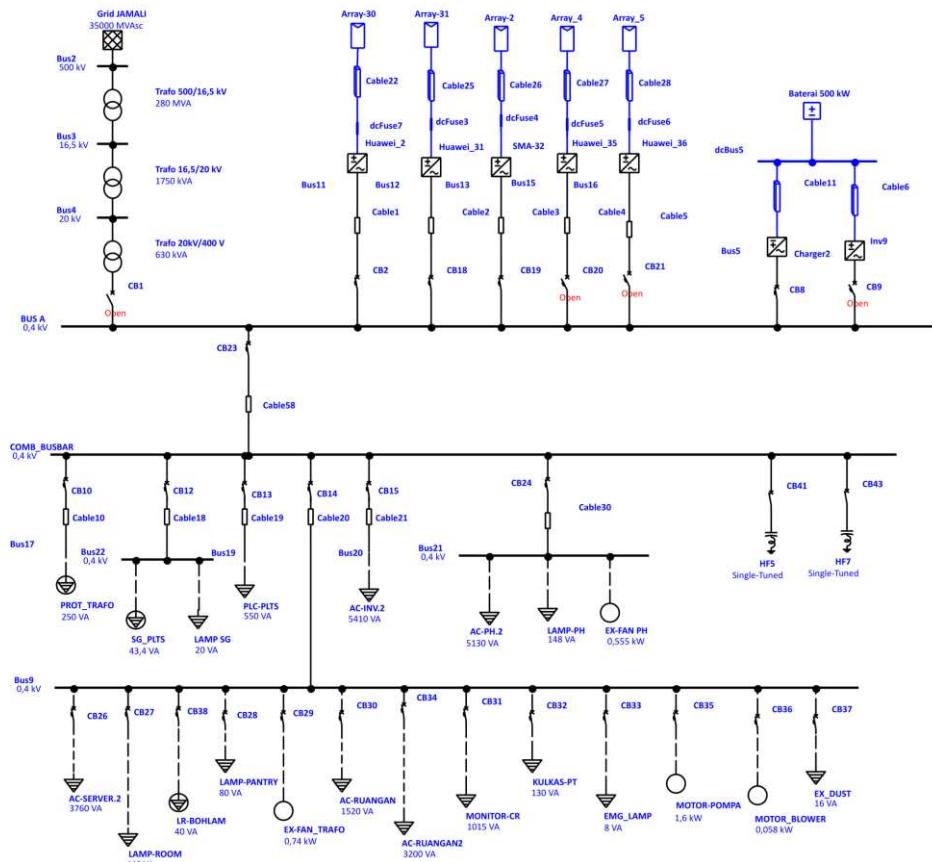
Sebelum melakukan pengecekan dengan pengukuran, tentu saja perlu melakukan identifikasi data-data yang akan digunakan untuk melakukan analisis dan penyelesaian masalah. Data yang dibutuhkan berupa data primer dari pengukuran sebagai referensi saat simulasi dan sekunder dari perusahaan yaitu PLN Nusantara Power UP Cirata. Berikut Tabel 2 merupakan data yang diperlukan untuk melakukan penelitian kali ini.

Tabel 2. Data penelitian

No.	Data	Jenis	Sumber
1	Arus (A)	Primer	Pengukuran dengan Power Quality Meter (PQM) Fluke 430 series II
2	Total Harmonic Distortion atau THDi (%)		
3	Individual Harmonic Distortion atau IHDi (%)		
4	Power Factor (%)		
5	Displacement Power Factor (%)		
6	Daya Aktif (W)		
7	Daya Reaktif (VA)		
8	Daya Semu (VAR)		
9	Current Phi (°)		
10	Data Beban PS PLTS		
11	Datasheet Komponen Kelistrikan dan Beban	Sekunder	Survei Beban Eksisting Halaman Official Pabrikan
12	Single Line Diagram PLTS 1 MW Cirata		
13	Single Line Diagram Grid 20 kV PLTA Cirata		

2.4 Pemodelan Sistem Distribusi BUS A pada ETAP 19.0.1

Pemodelan kondisi eksisting dilakukan berdasarkan SLD sistem eksisting dan komponen-komponennya, baik dari sisi PLTS maupun pembebanan berdasarkan data yang sudah ditemukan untuk penelitian pada Tabel 2. Gambar 5 merupakan hasil penyusunan SLD di ETAP 19.0.1 berdasarkan referensi dari *single line diagram* PLTS 1 MW Cirata pada bagian titik pendistribusian yang sudah ditentukan. Setelah melakukan substitusi spesifikasi komponen, dilakukan pula pengaturan posisi PLTS menggunakan titik *latitude* dan *longitude* menggunakan *google maps* untuk melihat kepresisian lokasi PLTS 1 MW di Cirata dan *Nasa Power DAV* untuk mengidentifikasi titik koordinat beserta pengaturan waktu simulasi (diatur pukul 12.00).



Gambar 4. Pembuatan SLD di ETAP

Kondisi beban baik pada simulasi diasumsikan sebagai beban penuh (beban maksimal), sedangkan kondisi beban pada saat pengukuran tidak maksimal sehingga terjadi perbedaan antara hasil daya ataupun arus yang dihasilkan. Kondisi beban sendiri tidak dapat dipantau secara terus menerus karena keterbatasan akses dan selalu mengalami fluktuasi serta perubahan sesuai dengan jamnya. Namun, simulasi ini dapat dikatakan sesuai berdasarkan kesesuaian SLD eksisting dengan rangkaian simulasi di ETAP beserta penyesuaian tiap komponennya.

2.5 Upaya Penyeimbangan Beban

Upaya penyerimbangan beban dilakukan dengan melakukan perhitungan persentase ketidakseimbangan beban pada pengukuran menggunakan persamaan berikut [3]. Perhitungan dimulai dengan melakukan perbandingan arus setiap fasanya dengan arus rata-rata yang dituliskan dengan koefisien a, b, c untuk fasa R, S, dan T [17].

Menghitung ketidakseimbangan antar ketiga fasa dalam bentuk persentase dapat menjadi tolak ukur apakah ketidakseimbangan yang terjadi masih pada batas normal atau tidak.

$$I_{Rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (1)$$

$$a = \frac{I_R}{I_{Rata-rata}} \quad (2)$$

$$b = \frac{I_S}{I_{Rata-rata}} \quad (3)$$

$$c = \frac{I_T}{I_{Rata-rata}} \quad (4)$$

Menghitung ketidakseimbangan antar ketiga fasa dalam bentuk persentase dapat menjadi tolak ukur apakah ketidakseimbangan yang terjadi masih pada batas normal atau tidak [18].

$$\%Unbalanced = \frac{(|a - 1| + |b - 1| + |c - 1|)}{3} \times 100\% \quad (5)$$

Standar yang digunakan merujuk pada Surat Edaran Direksi PT PLN (Persero) No. 0017.E/DIR/2014 tentang Metode Pemeliharaan Trafo Distribusi Berbasis Kaidah Manajemen Aset halaman 8 bagian 6.6.2.6 Matriks *Online Assessment tier-1* pada Trafo Distribusi menetapkan acuan *Load Reading and Profiling* Persentase Ketidakseimbangan arus antar fasa seperti pada Tabel 3 [8].

Tabel 3. Standar ketidakseimbangan arus antar fasa

Karakteristik	Health Index			
	Baik	Cukup	Kurang	Buruk
Ketidakseimbangan Arus Antar Fasa	< 10%	10% ≤ 20%	20% ≤ 25%	≥ 25%

Setelah melihat persentase ketidakseimbangan arus antar fasa dan ditemukan hasil melebihi standar, maka akan dilakukan pemetaan ulang dari beban pada jaringan distribusi tersebut.

2.6 Upaya Reduksi Harmonik Arus

Harmonisa dapat mengakibatkan kerugian, mulai dari rugi panas, rugi tembaga, hingga rugi inti-inti besi, yang dapat mengakibatkan kerusakan peralatan. Terutama harmonik triplen yang sebelumnya sudah dikatakan tidak hilang hanya dengan mengurangi urutan, mampu menghasilkan arus netral yang mungkin sama atau melebihi arus fasa meskipun bebannya seimbang. Akibat arus yang terlalu tinggi, arus tersebut akan melebihi kuat hantar arus dari kabel, yang mampu menyebabkan short, atau bahkan kebakaran. Standar harmonisa pada jaringan ditentukan pada IEEE-519 2022 yang merupakan versi terbaru dari standar IEEE-519 2014. Standar THD arus diatur berdasarkan IEEE 519-2022. Selain menentukan batas distorsi total keseluruhan, ditentukan pula limit distorsi individual dari setiap orde dari orde ke-1 hingga ke-50 [19]. Standar inilah yang menentukan suatu sistem dengan harmonik masih dalam batas aman atau tidak.

Tabel 4. Current distortion limits rated 120 V through 69 kV

I_{SC}/I_L	Harmonic Limits (%)					TDD (%)
	2≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h≤50	
< 20 ^C	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Standar THD arus ditentukan berdasarkan *short circuit ratio* (SC_{ratio}), hasil bagi antara arus *short-circuit* (I_{SC}) dan arus beban (I_L) dalam sistem dengan persamaan sebagai berikut [10], [20].

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (6)$$

Arus *short-circuit* terdapat pada titik distribusi (PCC atau *Point of Common Coupling*). Untuk menentukan arus *short-circuit* dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$I_{SC} = \frac{kVA \times 100}{\sqrt{3} kV} \quad (7)$$

Arus beban (I_L) merupakan komponen fundamental dari arus beban maksimum yang diperlukan pada titik distribusi (PCC) tersebut. Untuk arus beban (I_L) dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$I_L = \frac{kW}{PF\sqrt{3} kV} \quad (8)$$

Tabel 5 merupakan standar untuk THD tegangan berdasarkan tegangan jaringan yang digunakan pada sistem. Selain menentukan THD, ditentukan pula harmonik pada setiap orde (IHD atau *Individual Harmonic Distortion*). Jika kadar harmonik melebihi standar, maka perlu dilakukan reduksi. Aplikasi reduktor harmonik yang digunakan adalah filter pasif karena orde-orde harmonik yang muncul pada filter hanya orde-orde rendah (orde 5, orde 7, dan sebagainya).

Tabel 5. Voltage distortion limit

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5

Pemakaian filter ini lebih cocok pada sistem ini karena orde yang tidak terlalu besar dan sudah diketahui ordenya. Filter pasif juga lebih sering digunakan pada industri bertegangan menengah hingga atas dan memiliki *lifetime* yang lebih lama karena tidak ada komponen aktif yang sering rusak [21]. Filter ini terdiri dari kombinasi kapasitor (C), induktor (L), biasa digunakan pada harmonik frekuensi rendah. Harmonisa akan menghasilkan arus berfrekuensi tinggi [22]. Arus dengan frekuensi tinggi tersebut cenderung akan melewati kapasitor (C) terlebih dahulu, karena kapasitor memiliki impedansi rendah pada frekuensi tersebut. Untuk meredam harmonisa pada beban, kapasitor biasanya dipasang secara paralel, memungkinkan arus dengan frekuensi tinggi mengalir melaluiinya. Sementara itu, induktor (L) biasanya dipasang seri dengan beban. Hal ini membuat perubahan arus dalam rangkaian menjadi lebih lambat, sebanding dengan nilai induktansi induktor [23].

Dalam rangka uji pemasangan filter pasif, diperlukan perhitungan sudut yang diinginkan untuk mendapatkan kapasitas dari kapasitor yang diperlukan [20]. Setelah itu dilakukan penghitungan besar daya reaktif kapasitor yang diperlukan, yaitu sebagai berikut.

$$\theta_0 = \cos^{-1}(PF_0) \quad (9)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}(PF_1) \quad (10)$$

$$Q_C = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_0) \quad (11)$$

Besar daya reaktif kapasitor yang ditemukan dapat digunakan untuk menghitung nilai komponen kapasitor menggunakan persamaan berikut [9].

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \quad (12)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (13)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (14)$$

Sebelum menentukan komponen induktor, perlu ditentukan terlebih dahulu salah satu orde harmonik tertinggi agar harmonik yang memiliki efek terbesar tereduksi (n), kemudian tentukan frekuensi tuning. Frekuensi tuning diatur 5% dibawah orde aslinya sebagai faktor keamanan [24].

$$h_n = n - (0.05 \times n) \quad (15)$$

Komponen induktor digunakan untuk menahan selubung berfrekuensi tinggi, yaitu efek kulit atau *skin effect* [25].

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2} \quad (16)$$

$$X_L = \omega L \quad (17)$$

$$L = 2\pi f X_L \quad (18)$$

Perlu dilakukan pemilihan besar kualitas filter yang diinginkan untuk mengatur kepresision filter dalam menyaring frekuensi [23].

$$30 \leq Q < 100 \quad (19)$$

Dengan tereduksinya harmonik pada sistem tenaga listrik, selain dapat memperbaiki kualitas daya, dapat pula mengurangi besaran arus yang mengalir pada netral.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai simulasi kondisi sistem eksisting, persentase ketidakseimbangan beban dan penyeimbangannya, hingga analisis harmonik serta upaya reduksinya. Hasil simulasi akan dievaluasi kinerjanya sesuai dengan data teknis yang ada sehingga kedua permasalahan, baik ketidakseimbangan beban dan harmonik dapat teratasi serta mampu memenuhi standar yang berlaku.

3.1 Analisis Penyeimbangan Beban

Persentase ketidakseimbangan dihitung berdasarkan arus pada kondisi eksisting dan kondisi simulasi. Hasil pada simulasi masih dapat merepresentasikan kondisi eksisting karena perbedaan ketidakseimbangan pada keadaan eksisting dan simulasi diakibatkan oleh kondisi beban saat dilakukan pengukuran dan saat simulasi berbeda. Pada arus netral di kedua kondisi (baik pada pengukuran maupun simulasi), besar arus pada netral melampaui besar arus pada fasa R dan S. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi kebocoran arus akibat ketidakseimbangan beban antar fasanya dan dapat berbahaya bagi kawat penghantar pada netral. Saat dibandingkan dengan standar pada Tabel 3, dapat diketahui bahwa golongan pembebanan sistem adalah sangat buruk yaitu melebihi 25%.

Ketidakseimbangan beban pada sistem tenaga listrik dapat menyebabkan gangguan seperti ketidakstabilan tegangan dan arus, meningkatnya rugi daya, dan penurunan efisiensi sistem. Salah satu cara untuk mengatasi ketidakseimbangan ini adalah dengan melakukan pemindahan beban antar fasa agar distribusi arus menjadi lebih seimbang.

Tabel 6. Kondisi ketidakseimbangan beban sebelum penyeimbangan

Jam	I (A)				%	Standar	Kategori
	I _R	I _S	I _T	I _N			
Kondisi Pengukuran							
08:00	0,90	7,90	23,00	20,00	77,9%	> 25%	Sangat Buruk
12:00	2,30	14,80	33,80	28,60	66,16	> 25%	Sangat Buruk
16:00	1,00	5,10	19,50	17,00	85,86	> 25%	Sangat Buruk
Kondisi Simulasi							
12:00	24,3	26,7	61,3	36,2	42,5	> 25%	Sangat Buruk

Dalam proses ini, penting untuk memeriksa jenis beban yang akan dipindahkan. Pastikan bahwa beban yang dipindahkan memiliki karakteristik yang serupa dengan beban di fasa tujuan, seperti jenis (linier dan non-linier) serta pola konsumsi dayanya, untuk menjaga keseragaman karakteristik fasa. Dengan memperhatikan kesamaan jenis beban, proses penyeimbangan beban dapat dilakukan dengan aman dan efektif, sehingga meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Tabel 7. Penyeimbangan arus dengan pemindahan beban

Fasa	R	S	T	Total
Kondisi awal sebelum penyeimbangan				
Daya (W)	5660	5896,4	13152	24708,4
Kondisi akhir setelah penyeimbangan				
Daya (W)	8102	8046,4	8560	24708,4

Setelah dilakukan penyeimbangan beban, maka persentase ketidakseimbangan beban berkurang dari yang awalnya lebih dari 25% menjadi kurang dari 10%. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan indikator kesehatan ketidakseimbangan beban setelah dilakukan penyeimbangan beban. Indikator naik dari yang awalnya berstatus buruk menjadi berstatus baik. Pada arus netral pun terjadi pengurangan *magnitude* yang awalnya 36,2 A menjadi 7,0 A. Hal ini menunjukkan bahwa penyeimbangan beban efektif mengurangi besaran *magnitude* pada arus netral pada sistem, meminimalisir kerusakan lebih lanjut.

Tabel 8. Perbandingan kondisi sebelum dan sesudah penyeimbangan

Jam	I (A)				%	Standar	Kategori
	I _R	I _S	I _T	I _N			
Kondisi awal sebelum penyeimbangan							
12:00	24,3	26,7	61,3	36,2	42,5	> 25%	Sangat Buruk
Kondisi akhir setelah penyeimbangan							
12:00	36,2	39,6	36,6	7,0	3,867	> 10%	Baik

3.2 Analisis Reduksi Harmonik

Setelah melakukan analisis dari upaya penyeimbangan beban, maka analisis selanjutnya yang perlu dilakukan adalah melihat bagaimana reduktor harmonik dalam bentuk filter harmonik pasif mempengaruhi kadar harmonik pada sistem ketenagalistrikan BUS A. Pada simulasi analisis harmonik yang sudah dilakukan sebelumnya, ditemukan besaran THD baik arus ataupun tegangan melampaui standar sehingga perlu dilakukan reduksi harmonik menggunakan filter pasif.

Tabel 9. Kadar harmonik arus dan tegangan pada BUS A

Kategori Tegangan	Standar THD/IHD	Simulasi	Keterangan
Harmonik Arus			
SC _{RATIO} ≤ 20 ^C (SC _{RATIO} =7,139)	5,0%	19,72%	THD melebihi standar
	4,0%	14,52%	IHD ₅ melebihi standar
	4,0%	10,17%	IHD ₇ melebihi standar
	4,0%	5,43%	IHD ₁₁ melebihi standar
	4,0%	5,14%	IHD ₁₃ melebihi standar
	4,0%	3,31%	IHD ₁₇ dibawah standar
	4,0%	2,7%	IHD ₁₉ dibawah standar
	4,0%	0	IHD ₂₃ dibawah standar
	4,0%	0	IHD ₂₅ dibawah standar
Harmonik Tegangan			
V ≤ 1,0 kV	8,0%	16,40%	THD melebihi standar
	5,0%	7,59%	IHD ₅ melebihi standar
	5,0%	7,44%	IHD ₇ melebihi standar
	5,0%	6,24%	IHD ₁₁ melebihi standar
	5,0%	6,99%	IHD ₁₃ melebihi standar
	5,0%	5,88%	IHD ₁₇ melebihi standar
	5,0%	5,38%	IHD ₁₉ melebihi standar
	5,0%	0,01%	IHD ₂₃ dibawah standar
	5,0%	0,01%	IHD ₂₅ dibawah standar

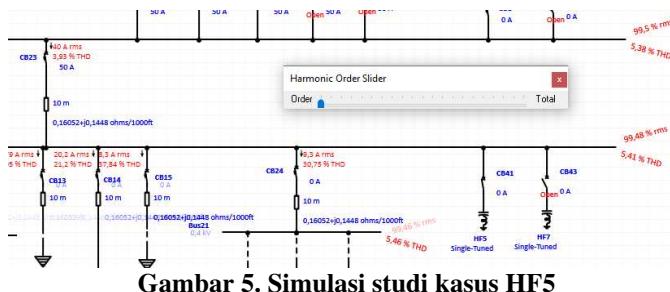
Setelah melihat THD dan spektrum harmonik yang ada pada BUS A, orde harmonik yang perlu direduksi adalah orde ke-5 dan ke-7 karena kedua orde tersebut memiliki kadar yang paling tinggi diantara yang lain. Orde ke-5 memiliki kadar harmonik sebesar 14,53% dan orde ke-7 memiliki kadar harmonik sebesar 10,17%. Kedua orde tersebut perlu direduksi hingga kurang dari 4% masing-

masingnya. Setelah dilakukan perhitungan untuk menentukan kapasitas kapasitif maupun induktif, ditemukan besar kapasitor dan induktor yang diperlukan adalah sebagai berikut.

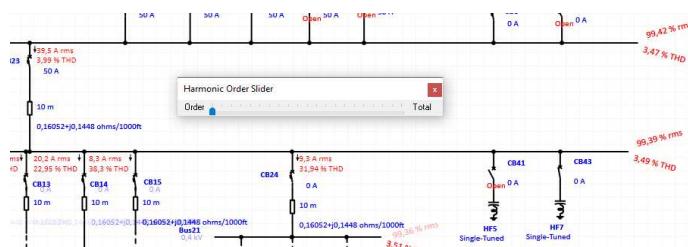
Tabel 10. Hasil sizing filter harmonik pasif single-tuned

Orde	Xc (Ω)	C (μF)	X _L (Ω)	L (H)
5	5,997	531,043	0,265	20,865
7	5,997	531,043	0,135	10,645

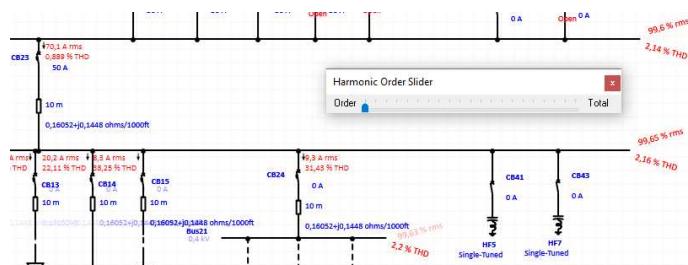
Setelah dilakukan pemasangan filter pasif dengan tipe seri L-C pada *COMBUSBAR* agar dapat memerangkap harmonik yang masuk dari beban dari BUS A, maka kadar harmonik yang ada pada BUS A berkurang secara signifikan. Pada penelitian ini dilakukan pengujian menggunakan dua buah filter yang secara bergantian dan bersamaan dipakai untuk melihat bagaimana pengaruhnya terhadap kadar harmonik pada BUS A.



Gambar 5. Simulasi studi kasus HF5

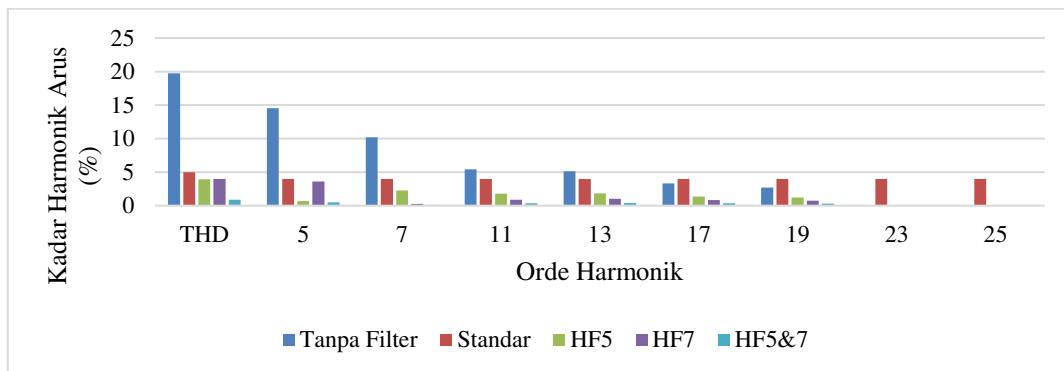


Gambar 6. Simulasi studi kasus HF7



Gambar 7. Simulasi studi kasus HF5 dan HF7

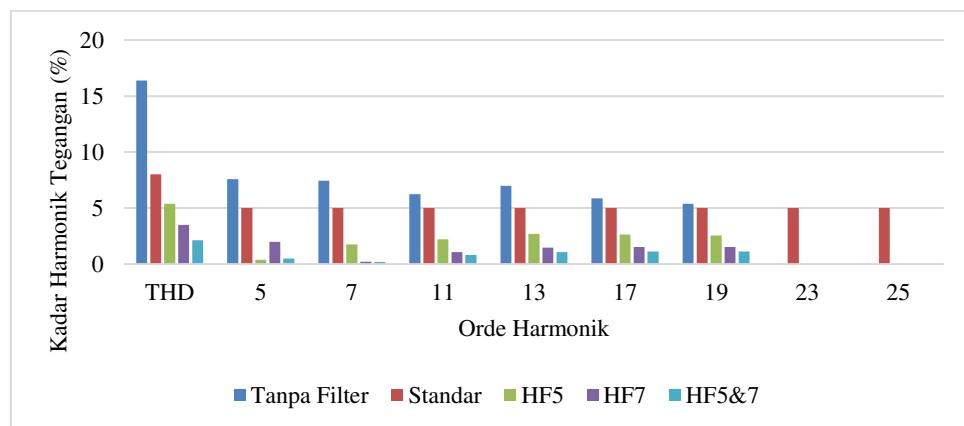
Berikut ini hasil pemasangan dari setiap filter harmonik pasif dengan orde tertentu.



Gambar 8. Spektrum harmonik arus sebelum dan sesudah pemasangan filter

Selain mempengaruhi harmonik arus, pemasangan filter juga mempengaruhi harmonik tegangan. Tidak hanya orde 5 dan 7 saja yang tereduksi, namun orde-orde lainnya pun ikut tereduksi. Secara keseluruhan, nilai THD dan IHD dari setiap orde sudah berada dibawah standar (memenuhi). Berikut ini kadar harmonik tegangan dari hasil simulasi filter harmonik pasif *single-tuned* yang telah dilakukan sebelumnya.

Diantara ketiga studi kasus, dapat disimpulkan bahwa kadar harmonik dapat direduksi seminimal mungkin saat dilakukan pemasangan filter pasif HF5 dan HF7 secara bersamaan pada sistem *Power Supply PLTS BUS A*. Namun, pemasangan HF5 saja ataupun HF7 saja pun sudah cukup untuk mereduksi harmonik total ataupun per orde nya. Arus harmonik pada BUS A dengan kadar yang melebihi standar menyebabkan pemanasan berlebih pada motor, trafo, komponen elektronik, dan beban-beban lainnya. Upaya reduksi harmonik dengan menggunakan filter harmonik *pasif single-tuned* mampu mereduksi harmonik arus dan tegangan. Reduksi harmonik dapat meningkatkan efisiensi sistem serta memperpanjang masa pakai peralatan karena energi tidak terbuang sebagai panas dan beban termal berkurang. Selain melindungi komponen PLTS dan beban-beban *auxiliary*, reduksi harmonik juga mengurangi gangguan operasional pada peralatan-peralatan sensitif seperti relay, sensor, atau kontrol digital (jaringan telekomunikasi pada PLTS). Reduksi harmonik mampu membuat sistem bekerja lebih stabil dan handal.



Gambar 9. Spektrum harmonik tegangan sebelum dan sesudah pemasangan filter

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyeimbangan beban secara efektif mampu mereduksi keberadaan arus netral hingga memenuhi standar ketidakseimbangan yang ada seperti pada referensi [3], [7]. Disamping itu, pemodelan filter harmonik pasif dapat meminimalisir harmonik arus maupun harmonik tegangan, baik kadar THD maupun IHD [20], [24].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi pembebanan dan harmonik arus menggunakan ETAP 19.0.1 pada PLTS 1 MW Cirata dengan kondisi beban maksimal, diketahui bahwa sistem mengalami ketidakseimbangan beban sebesar 42,5% dan kadar harmonik arus (THDi) sebesar 19,72% serta harmonik tegangan (THDv) sebesar 16,42%. Ketidakseimbangan beban tersebut tergolong “sangat buruk” menurut standar PT Direksi PLN, namun berhasil diturunkan menjadi 3,867% (kategori “baik”) melalui pemetaan ulang beban antar fasa. Kemudian, analisis harmonik menunjukkan bahwa harmonik dominan berada pada orde ke-5 dan ke-7, sehingga dilakukan perancangan filter pasif tipe *single-tuned* untuk masing-masing orde. Setelah pemasangan kedua filter secara bersamaan, diperoleh hasil THDi sebesar 0,889% dan THDv sebesar 2,14%, yang telah memenuhi standar IEEE 519-2022 dan memiliki hasil yang paling minimal dibanding dengan pemasangan filter harmonik pasif untuk orde 5 ataupun orde 7 saja. Selain itu, upaya penyeimbangan beban juga berhasil menurunkan arus netral dari 36,2 A menjadi 7,0 A, sementara pemasangan filter hanya sedikit menurunkan arus netral menjadi 6,9 A. Dengan demikian, kombinasi penyeimbangan beban dan pemasangan filter harmonik efektif meningkatkan kualitas daya pada sistem PLTS. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi penerapan filter harmonik pasif jenis *single-tuned* secara langsung di lapangan maupun skala laboratorium guna memverifikasi efektivitasnya dalam kondisi nyata. Selain itu, dapat dikaji juga metode lain yang sesuai untuk peningkatan faktor daya dan keandalan sistem kelistrikan.

REFERENSI

- [1] A. Kharisma, S. Pinandita, and A. E. Jayanti, "Literature Review: Kajian Potensi Energi Surya Alternatif Energi Listrik," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 5, no. 2, pp. 145–154, 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.23956.
- [2] A. Faisal and M. Awaludin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 6, no. 1, pp. 43–52, 2022, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/362433776_Tinjauan_Potensi_dan_Kebijakan_Energi_Surya_di_Indonesia
- [3] S. Hidayat, S. Legino, and N. Fatihah Mulyanti, "Penyeimbangan Beban Pada Jaringan Tegangan Rendah Gardu Distribusi Cd 33 Penyulang Sawah Di Pt Pln (Persero) Area Bintaro," *Sutet*, vol. 8, no. 1, pp. 21–27, 2018, [Online]. Available: <https://jurnal.itpln.ac.id/sutet/article/view/712>
- [4] R. Khomarudin and L. Subekti, "Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban dan Harmonisa Terhadap Arus Netral Pada Trafo Distribusi 8 Kapasitas 500 KVA di PPSPM Migas Cepu," *J. List. Instrumentasi dan Elektron. Terap.*, vol. 1, no. 2, 2021, doi: 10.22146/juliet.v1i2.59560.
- [5] W. D. S. Jr, "Analisis Sistem Tenaga Listrik," *Erlangga*, p. 2004, 1984.
- [6] J. S. Setiadji, T. Machmudsyah, and Y. Isnanto, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral dan Losses Daya Pada Trafo Distribusi," *J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 68–73, 2006, doi: 10.31959/js.v7i2.43.
- [7] R. N. Sidabutar, "Studi Pemerataan Beban Transformator Tidak Seimbang Pada Gardu Distribusi BR 114 Di PT . PLN (PERSERO) ULP Medan Baru Study of Unbalanced Transformer Load Distribution at BR 114 Distribution Substation at PT . PLN (PERSERO) ULP Medan Baru," vol. 7776, pp. 16–24, 2023.
- [8] I. W. Yoga Prasetya, I. N. Setiawan, and I. G. Dyana Arjana, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Dan Harmonisa Pada Transformator Distribusi Mi 0096 Penyulang Abianbase," *J. SPEKTRUM*, vol. 7, no. 1, p. 109, 2020, doi: 10.24843/spektrum.2020.v07.i01.p16.
- [9] G. J. Wakileh, *Power Systems Harmonics: Fundamentals analysis and filter design*. 2001. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04343-1>
- [10] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, "Electrical Power Systems," *Power Syst.*, pp. 3–47, 2003, doi: 10.1007/978-3-319-51118-4_1.
- [11] O. A. Rozak, "Simulasi Perbaikan THD pada Sistem Distribusi Listrik dengan Filter Harmonisa Berbasis Software ETAP 12.6.0," *Epic J. Electr. Power, Instrum. Control*, vol. 2, no. 2, pp. 1–12, 2019, doi: 10.32493/epic.v2i2.2878.
- [12] M. Afdal and R. S. Lubis, "Analisa Total Distorsi Harmonik Arus Terhadap Pengaruh Beban pada Sistem 3 Fasa dengan Menggunakan Simulink Matla," *Univ. Syiah Kuala Jl. Tgk. Syech Abdurrauf*, vol. 7, no. 3, pp. 122–127, 2022.
- [13] M. S. Alfriana, I. M. W. Kastawan, and W. B. Mursanto, "Filter harmonik aktif shunt untuk mereduksi harmonik akibat charger sistem DC di unit pembangkit tenaga listrik.," vol. 5, no. 1, pp. 19–34, 2025.
- [14] P. Ferracci, "Cahier technique no . 199 Power Quality," *Power Qual.*, no. 199, p. 91, 2000.
- [15] T. L. Skvarenina, *The Power Electronics Handbook*. New York: CRC Press LLC, 2001.
- [16] E. K. P. Sasi, "Kajian Distorsi Harmonisa pada PLTS Cirata 1 MW dengan Sistem Jaringan 20 kV PLTA 1008MW dengan menggunakan Software ETAP 12.6," 2020.
- [17] R. T. Ginting, Zulfahri, and Arlenny, "Analisis Ketidakseimbangan Beban Jaringan Distribusi Tegangan Rendah Menggunakan ETAP.," *Sain, Energi, Teknol. Ind.*, vol. 6, no. 2, pp. 81–89, 2022, doi: 10.31849/sainetin.v6i2.9734.
- [18] A. D. Novfowan, M. Miefkah, and W. Kusuma, "Alternatif Penanganan Losses Akibat Ketidakseimbangan Beban Pada Trafo Distribusi," *J. Tek. Ilmu Dan Apl.*, vol. 9, no. 1, pp. 83–90, 2021, doi: 10.33795/jtia.v9i1.17.
- [19] ABB, "IEEE 519-2022 Review What has changed from the previous 2014 version ?," pp. 1–5, 2022.
- [20] A. M. Risca, M. Facta, and D. Denis, "Perencanaan Filter Pasif Pada Sisi Tegangan Rendah Untuk Mengurangi Harmonisa Beban Non-Linear Di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro," *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 3, pp. 543–551, 2021, doi: 10.14710/transient.v10i3.543-551.
- [21] J. Arillaga, *Power System Harmonics*. 2003.
- [22] W. Sunanda and Y. A. Rahman, "Aplikasi Filter Pasif Sebagai Pereduksi," vol. 2, no. 1, pp. 136–142, 2012.
- [23] Elvinda, E. Kurniawan, and B. Setiadi, "Analisis Filter Harmonisa Pasif Untuk Mengurangi Harmonisa Pada Penyearah Terkendali Satu Fasa," *e-Proceeding Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 2–8, 2015.
- [24] H. Prasetijo, "Analisa Perancangan Filter Pasif Untuk Meredam Harmonik Pada Instalasi Beban Nonlinear Analyze of Passive Filter Design To Reduce Harmonic At Non-Linier Loads Instalation," *Techno*, vol. 13, no. 1, pp. 57–67, 2012.
- [25] Y. Fernando, I. G. A. Darmawan, and N. U. Putri, "Analisis Penyempurnaan Nilai Harmonisa Pada Gardu Traksi Kereta Rel Listrik (KRL) Jalur Pesing – Duri Menggunakan Filter Pasif," *Electr. J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 18, no. 2, pp. 112–120, 2024, doi: 10.23960/elc.v18n2.2560.