

Filter harmonik aktif *shunt* untuk mereduksi harmonik akibat *charger* sistem DC di unit pembangkit tenaga listrik

Muhamad Surya Alfriana¹, I Made Wiwit Kastawan^{2*}, Wahyu Budi Mursanto³

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

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

¹suryaalfriana@gmail.com, ^{2*}wiwit.kastawan@polban.ac.id, ³wahyumursanto@gmail.com

ABSTRAK

Charger sistem arus searah (DC) adalah perangkat yang bekerja mengonversi arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah. Sistem ini menggunakan saklar elektronika daya yang dapat diatur untuk menghasilkan tegangan keluaran DC yang variatif. Perangkat ini pada pembangkit listrik digunakan untuk mengisi baterai dan menyuplai beban DC. Perangkat ini memiliki topologi rangkaian berupa penyearah terkendali tiga-fasa. Penyearah terkendali menarik arus sumber yang tidak linier karena proses *switching* dari *thyristor*, hal ini mengakibatkan distorsi harmonik pada sinyal arus yang ditarik. Distorsi sinyal arus ini menyebabkan beberapa masalah yang dapat mengurangi efisiensi dan keandalan sistem tenaga listrik. Studi ini memodelkan dan mensimulasikan filter harmonik aktif *shunt* untuk mengurangi harmonik. Filter ini menggunakan metode ekstraksi daya aktif reaktif sesaat dan kontrol arus histerisis pada inverter untuk mengurangi *Total Demand Distortion* (TDD) harmonik yang awalnya lebih dari 30% menjadi di bawah 5% berdasarkan pada standar IEEE 519-2022. Hasil simulasi menunjukkan efektivitas filter ini pada berbagai kondisi beban dapat mereduksi TDD harmonik dengan efektivitas sekitar 97%.

Kata kunci: harmonik, elektronika daya, filter aktif *shunt*, efisiensi, TDD

ABSTRACT

A direct current (DC) charger system is a device that converts alternating current (AC) into direct current (DC). This system uses power electronic switches that can be controlled to produce variable DC output voltage. In power plants, such devices are used to charge batteries and supply DC loads. The system typically employs a three-phase controlled rectifier topology. Controlled rectifiers draw non-linear source currents due to the switching operation of thyristors, resulting in harmonic distortion in the current waveform. This distortion can lead to several issues that reduce the efficiency and reliability of the power system. This study models and simulates a shunt active harmonic filter to mitigate these harmonics. The filter utilizes the instantaneous active and reactive power (*pq*) theory for harmonic extraction and applies hysteresis current control in the inverter to reduce the Total Demand Distortion (TDD) of harmonics from an initial value above 30% to below 5%, in accordance with IEEE 519-2022 standards. Simulation results demonstrate that the filter is effective under various load conditions, achieving harmonic TDD reduction with approximately 97% effectiveness.

Keywords: harmonic, power electronic, shunt active filter, efficiency, TDD

1. PENDAHULUAN

Perangkat elektronika daya seperti penyearah terkendali sangat penting dalam sistem kelistrikan modern, terutama untuk mengonversi arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) untuk menyuplai berbagai beban listrik DC. Penyearah terkendali tiga-fasa adalah salah satu perangkat yang pasti digunakan di pembangkit listrik untuk mengisi baterai dan menyuplai beban DC dan UPS. Kelebihan dari perangkat elektronika daya yang memiliki efisiensi konversi yang tinggi, namun proses *switching thyristor* menghasilkan distorsi harmonik arus yang signifikan [1]. Distorsi harmonik arus ini dapat berdampak negatif pada efisiensi dan keandalan sistem tenaga listrik, sehingga diperlukan upaya mitigasi harmonik yang efektif [2]. Harmonik arus yang tinggi dapat meningkatkan rugi daya pada penghantar dan inti dari berbagai peralatan listrik seperti transformator, motor dan generator yang bermuara pada penurunan efisiensi dan pemanasan berlebih, kesalahan dalam operasi alat ukur listrik, kondisi operasi motor dan generator yang tidak normal karena tingkat vibrasinya bertambah, aliran arus

netral pada sistem kelistrikan tiga-fasa serta kegagalan/kesalahan operasi alat-alat proteksi listrik seperti circuit breaker dan lain-lain [3], [4], [5], [6]. Untuk itu perlu dilakukan upaya untuk mengatasi permasalahan harmonik arus ini seperti misalnya penggunaan filter pasif, filter aktif dan transformator penggeser fasa. Reduksi harmonik arus dengan filter pasif dan aktif bersifat lebih umum karena dapat dilakukan untuk harmonik arus yang dibangkitkan oleh berbagai jenis perangkat elektronika daya. Sementara reduksi harmonik arus dengan transformator penggeser fasa bersifat lebih khusus karena hanya dapat dilakukan untuk harmonik arus yang dibangkitkan oleh perangkat elektronika daya yang berupa penyearah tiga-fasa yang digunakan dalam jumlah cukup banyak (dua atau lebih penyearah tiga-fasa) [7], [8], [9].

Penggunaan filter harmonik aktif *shunt* merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan harmonik yang kompleks akibat aplikasi elektronika daya seperti pada *variabel speed drive* atau *variable frequency drive* pada [10], [11], [12]. Filter harmonik aktif *shunt* bekerja dengan menginjeksikan arus kompensasi yang berlawanan fasa dengan arus harmonik yang muncul untuk mereduksi harmonik yang dihasilkan oleh beban non-linier [13]. Metode ekstraksi arus kompensasi didasarkan pada perhitungan daya aktif-reaktif sesaat (PQ-Theory) pada [14] dan dibangkitkan oleh *Voltage Source Inverter* (VSI) menggunakan metode kendali arus histerisis [15]. Reduksi harmonik arus menggunakan gabungan metode ini efektif dalam mengurangi harmonik secara signifikan dan dapat merespons secara dinamis terhadap kondisi beban yang variatif [16], sehingga cocok dalam aplikasi penyearah terkendali tiga-fasa atau *Charger* Sistem DC.

Penelitian ini dilakukan pemodelan dan simulasi penggunaan filter harmonik aktif *shunt* untuk mereduksi harmonik arus yang disebabkan oleh *charger* sistem DC atau penyearah terkendali tiga fasa dengan contoh spesifikasi yang terpasang di suatu pembangkit listrik. Proses pemodelan dan simulasi dititik beratkan untuk mengoptimalkan kinerjanya dalam mereduksi harmonik arus pada berbagai kondisi pembebanan penyearah terkendali tiga-fasa. Acuan distorsi harmonik yang digunakan berdasarkan standar IEEE 519-2014. Hasil dari filter yang diusulkan diharapkan secara signifikan mengurangi *Total Demand Distortion* (TDD), meningkatkan kualitas daya keseluruhan, dan keandalan sistem dengan menghilangkan pengaruh negatif harmonik pada sistem tenaga listrik [10].

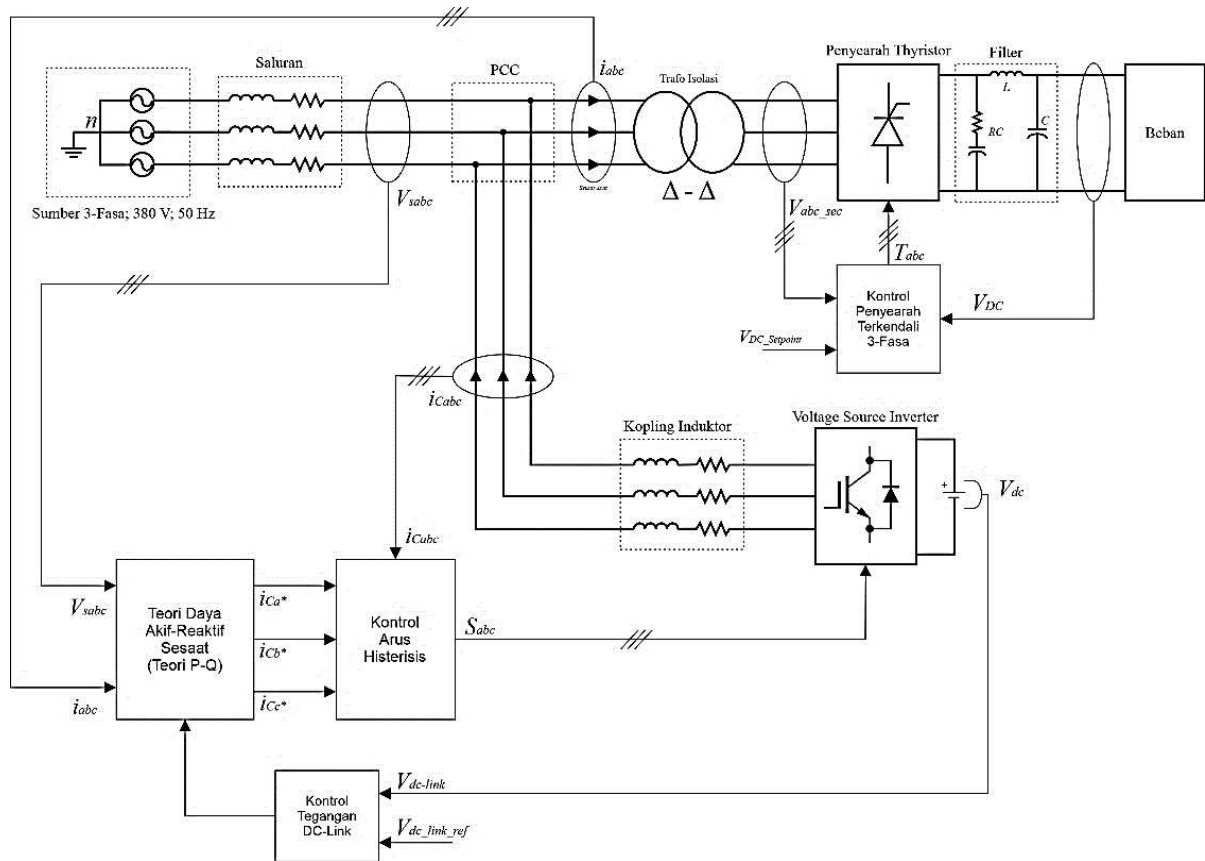
2. METODE PENELITIAN

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai pemodelan dan perancangan sistem kelistrikan dengan filter harmonik aktif *shunt* dengan metode ekstraksi harmonik menggunakan teori daya aktif-reaktif sesaat dan kontrol pembangkit arus inverter tiga-fasa menggunakan metode histerisis arus.

2.1 Blok Diagram Sistem

Sistem filter harmonik aktif *shunt* berdasarkan Gambar 1. dirancang untuk bekerja mereduksi harmonik arus yang disebabkan oleh beban non-linier berupa penyearah terkendali tiga-fasa. Sumber yang digunakan untuk menyuplai penyearah terkendali tersebut berupa sumber 3-fasa seimbang dengan tegangan fasa-fasa 380 V dan frekuensi 50 Hz.

Penyearah terkendali menghasilkan harmonik arus pada sisi sumber AC dan sisi masukan penyearah. Filter harmonik aktif *shunt* dipasang secara paralel pada titik kopling (PCC) untuk mengeliminasi harmonik arus pada sisi sumber AC dengan menginjeksikan arus yang berlawanan dan sebanding dengan arus harmonik. Gelombang arus yang harus diinjeksikan oleh filter harmonik aktif *shunt* ini didapatkan dengan mengekstraksi arus harmonik yang muncul pada sisi masukan penyearah untuk kemudian dilakukan perhitungan menggunakan teori daya aktif-reaktif sesaat (P-Q Teori) yang merujuk pada [14]. Pembangkitan arus kompensasi harmonik oleh inverter tiga-fasa selanjutnya dikendalikan oleh kontrol histerisis arus (*Hysteresis Current Controller*).



Gambar 1. Diagram blok sistem keseluruhan

2.2 Pemodelan Penyearah Terkendali Tiga-Fasa (Charger)

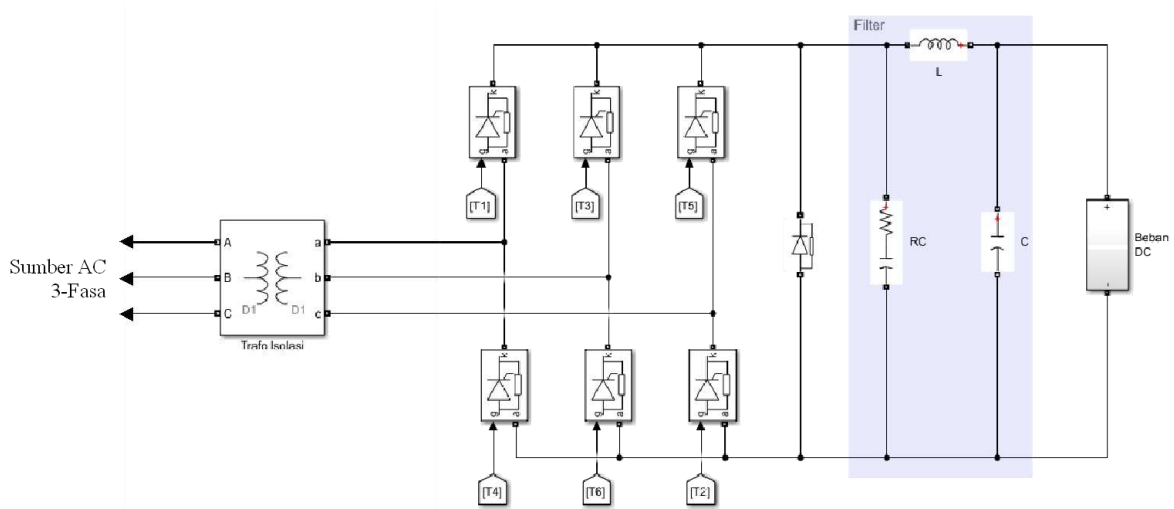
Penyearah terkendali memiliki dua mode operasi, yakni mode operasi *floating* dan mode operasi *boosting*. Pada mode operasi *floating*, penyearah menyuplai beban-beban DC, menyuplai UPS, dan mengisi baterai dengan menjaga tegangan keluaran yang konstan. Sedangkan pada mode operasi *Boosting*, penyearah memberikan pengisian daya tambahan (*boost charge*) untuk mengisi daya baterai dengan cepat hingga mencapai tegangan penuh, dengan menaikkan tegangan keluaran hingga 120% dari tegangan *floating*. Parameter yang menjadi acuan pemodelan didasarkan spesifikasi pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi penyearah terkendali tiga-fasa

Parameter	Nilai
Nominal Voltage	380 VAC ±15%
Nominal Frequency	50 Hz ±5%
Floating Output Voltage	110 VDC ±1%
Output Voltage Adjustment	Antara 90 – 160 VDC
Nominal Output Current	400 A
Output Current Adjust	0-100% terhadap <i>Nominal Current</i>
Boost Charge Voltage	100% to 120% terhadap <i>Floating Output Voltage</i>
Output Ripple	1% RMS AC terhadap <i>Output Voltage</i>
Dynamic Response	±10% terhadap <i>Output Voltage</i> pada 200 ms (dari 0% hingga 100% beban)

Pemodelan penyearah terkendali tiga-fasa mengikuti rangkaian penyearah *thyristor* jembatan penuh pada Gambar 2. Rangkaian penyearah terdiri dari 6 buah saklar *thyristor*, rangkaian filter, dan

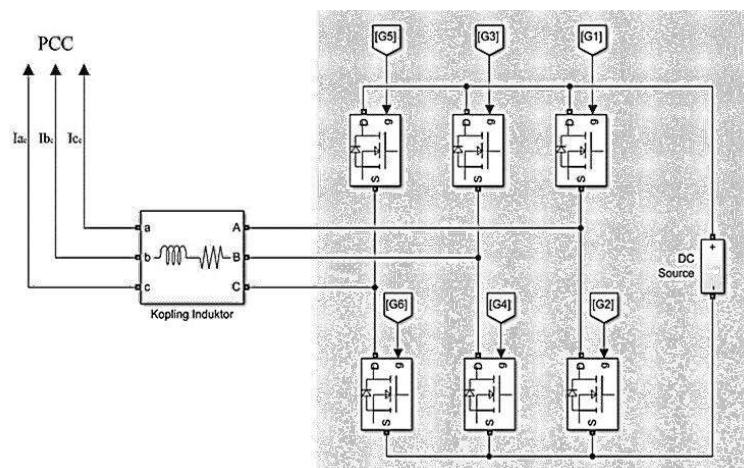
beban. Penyearah dipisahkan secara magnetik pada sisi masukan oleh trafo isolasi yang terhubung dengan sumber AC tiga-fasa.



Gambar 2. Rangkaian penyearah terkendali tiga-fasa

2.3 Rangkaian Filter Harmonik Aktif *Shunt*

Rangkaian pembangkit arus berupa rangkaian inverter tegangan tiga-fasa yang ditunjukkan pada Gambar 3. Rangkaian ini digunakan untuk menghasilkan gelombang keluaran yang variabel dengan cara mengatur *switching* dari komponen semikonduktor. Pada aplikasi filter harmonik aktif *shunt* ini, inverter tegangan digunakan karena karakteristiknya yang dapat menghasilkan gelombang arus keluaran lebih fleksibel dan akurat [17]. Saklar semikonduktor MOSFET digunakan pada VSI untuk membangkitkan gelombang arus yang variabel. Penggunaan MOSFET cocok karena dapat bekerja pada aplikasi frekuensi tinggi [18].



Gambar 3. Rangkaian inverter tiga-fasa

a. Penentuan Tegangan Referensi DC

Tegangan DC masukan inverter harus lebih besar atau sama dengan tegangan puncak jaringan (*grid*) [19], Hal ini agar arus dapat mengalir dari inverter ke jaringan untuk mengeliminasi harmonik serta agar kendali arus histerisis dapat dilakukan selama satu siklus penuh gelombang AC. Dengan frekuensi kerja penyaklaran yang tinggi, nilai induktansi dianggap kecil sehingga tidak terjadi drop tegangan pada induktor dan dengan asumsi bahwa konverter PWM beroperasi pada modulasi linear [19], [20], tegangan referensi ($V_{DC_{ref}}$) dapat dihitung dengan persamaan (1).

$$V_{DC_{ref}} = 2\sqrt{2} V_{grid} \quad (1)$$

Tegangan referensi diterapkan pada sisi DC rangkaian inverter yang terhubung dengan saklar semikonduktor. Tegangan referensi dijadikan acuan sebagai tegangan minimum yang dapat ditahan oleh saklar semikonduktor, sehingga spesifikasi saklar tidak kurang dari tegangan referensi DC.

b. Penentuan Kapasitor DC

Daya nyata (P) yang harus disuplai oleh filter harmonik aktif harus kurang dari 0.1 per unit (p.u) [15], pada sistem 50 Hz satu periode (T) dari satu siklus AC adalah 20 milidetik (t), sehingga nilai kapasitor DC (C_{DC}) dapat dihitung berdasarkan persamaan (2).

$$C_{DC} = \frac{0.1P \cdot T}{\frac{1}{2}V_{DC}^2} \quad (2)$$

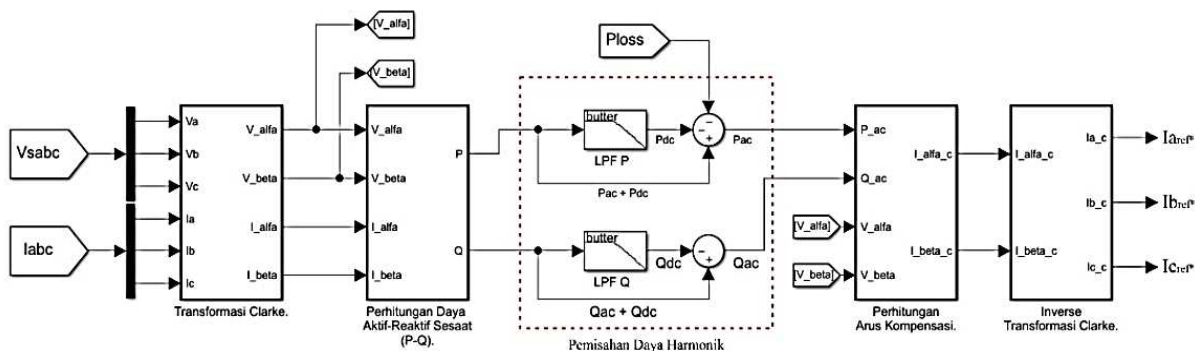
c. Penentuan Kopling Induktor

Pemasangan induktor bertujuan untuk memfilter arus harmonik frekuensi tinggi dari penyaklaran inverter ke jaringan (PCC). Nilai induktansi kopling (L_f) ditentukan dengan menetapkan dan mengasumsikan batas *ripple* arus maksimum ($\Delta I_{(pp)max}$) pada titik zero-crossing tegangan AC fundamental keluaran [20] dan frekuensi *switching* saklar inverter (f_s). Nilai induktansi dapat dihitung menggunakan persamaan (3).

$$L_f = \frac{V_{DC}}{6 f_s \Delta I_{(pp)max}} \quad (3)$$

2.4 Metode Ekstraksi Daya Aktif-Reaktif Sesaat (Teori P-Q)

Prinsip ekstraksi arus harmonik pada blok diagram Gambar 4. menggunakan teori daya aktif-reaktif sesaat (Teori P-Q) berdasarkan [14]. Lima bagian blok ini memiliki tujuan akhir memisahkan sinyal arus harmonik dari pengukuran sinyal arus yang ditarik penyearah terkendali dan mengondisikannya menjadi sinyal referensi untuk mengatur inverter agar menginjeksikan kembali sinyal arus berdasarkan referensi tersebut ke jaringan sehingga penjumlahannya akan mengeliminasi harmonik yang muncul dan menghasilkan arus sinusoidal pada sisi sumber AC jaringan.



Gambar 4. Diagram blok ekstraksi harmonik

Pada Blok Transformasi Clarke, tegangan sumber atau jaringan yang terdiri dari tiga-fasa tegangan a, b, dan c (V_{abc}) serta arus beban yang terdiri dari tiga-fasa arus a, b, dan c (I_{abc}) diubah menjadi 2 vektor tegangan α dan β ($V_{\alpha\beta}$) dan arus beban diubah menjadi 2 vektor arus ($I_{\alpha\beta}$) oleh (4) dan (5) Transformasi Clarke.

Transformasi Clarke untuk variabel tegangan tiga-fasa

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

Transformasi Clarke untuk variabel arus tiga-fasa:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

Pada Blok Perhitungan Daya Aktif-Reaktif Sesaat, setelah didapatkan vektor tegangan sumber dan arus beban 2 fasa selanjutnya dapat dihitung daya aktif-reaktif sesaatnya. Dengan sistem tiga-fasa tiga-kabel tanpa netral, daya aktif dan reaktif sesaat dihitung dengan matriks pada (6) [14].

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Daya aktif-reaktif sesaat yang dihitung terdiri dari komponen harmonik dan fundamental dinyatakan pada (7) dan (8) [14]. Untuk memisahkan komponen harmonik (AC) dari komponen fundamentalnya (DC) digunakan *Low Pass Filter* (LPF). Penggunaan filter ini akan memisahkan komponen sinyal harmonik yang memiliki frekuensi tinggi dari sinyal fundamentalnya yang memiliki frekuensi rendah.

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (7)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (8)$$

Setelah didapatkan hanya komponen harmonik dari daya aktif dan reaktif yang digunakan untuk menghasilkan arus referensi, kemudian komponen tersebut dihitung pada blok Perhitungan Arus Kompensasi dengan ditransformasikan kembali ke bentuk arus kompensasi 2-fasa menggunakan (9).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{bmatrix} \quad (9)$$

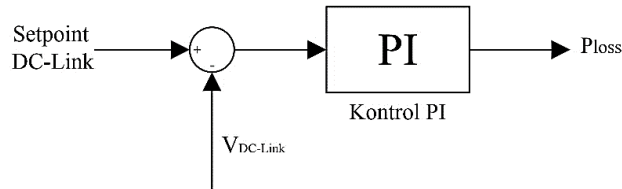
Arus kompensasi harmonik tersebut dikembalikan ke bentuk arus referensi aktual 3-fasa dengan menggunakan (10) Inverse Transformasi Clarke.

$$\begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \\ i_{Cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

Perlu diperhatikan bahwa komponen harmonik daya aktif sesaat mendapatkan *feedback* tambahan berupa P_{Loss} yang merupakan rugi-rugi dihasilkan oleh *switching* dan konduksi saklar inverter [16],[22], hal ini agar drop tegangan akibat arus kompensasi yang dibangkitkan menjaga tegangan tetap lebih besar atau sama dengan jaringan untuk menjaga agar arus tetap mengalir dari inverter ke jaringan [21].

2.5 Kontrol Tegangan Referensi DC

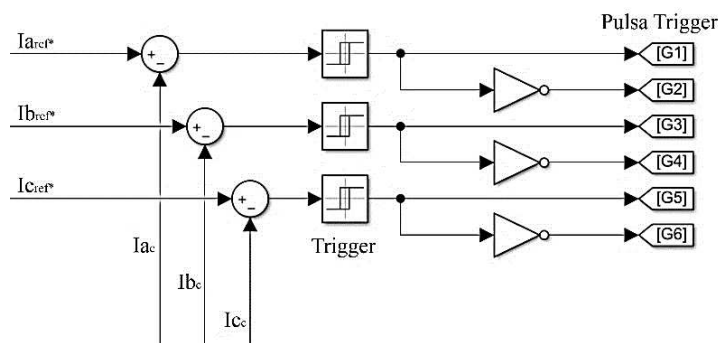
Tegangan masukan inverter atau tegangan referensi DC (*DC-Link*) perlu dijaga agar tetap pada nilai pengaturannya. Inverter dengan sumber DC berupa kapasitor, tegangannya akan variatif tergantung seberapa besar arus yang perlu diinjeksikan. Pengaturan tegangan ini menggunakan kontrol Proportional-Integral (PI) untuk menjaga agar tegangan DC tetap pada nilai *setpoint*-nya. Prinsip pengaturan tegangan ini dengan membandingkan tegangan DC-Link yang terukur dengan tegangan referensi DC-Link (*setpoint*) yang ditentukan sebelumnya [21]. Blok diagram kontrol tegangan referensi DC ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Blok kontrol tegangan referensi DC

2.6 Kontrol Arus Histerisis

Pembangkitan arus oleh inverter tiga-fasa agar sesuai dengan arus referensi kompensasi diatur menggunakan Kontrol Arus Histerisis. Arus referensi yang telah diekstraksi dibandingkan dengan arus aktual keluaran inverter, perbandingan ini akan menghasilkan sinyal *error*. Jika nilai perbedaan (*error*) menghasilkan nilai positif, kendali histerisis akan memberikan sinyal penyaklaran ON untuk menaikkan arus aktual. Sebaliknya, jika perbedaan negatif, maka sinyal penyaklaran OFF untuk mengurangi arus aktual. Output keluaran dari blok kendali ini berupa pulsa yang mengatur apakah inverter harus aktif atau tidak. Blok kontrol arus histerisis dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Blok kontrol tegangan referensi DC

2.7 Standar Acuan Harmonik

Pada penelitian ini, standar acuan harmonik arus yang digunakan sebagai batas minimum yang dapat diterapkan pada sistem tenaga listrik berdasarkan standar IEEE 519-2014 pada Tabel 2.

Tabel 2. Batas harmonik arus pada tegangan nominal 120V – 69kV

<i>Individual Harmonic Order (odd harmonics)</i>						
I_{sc}/I_L	$1 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4,0	2,5	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

Keterangan:

- I_{sc} = Arus hubung singkat maksimum pada titik kopling.
 I_L = Arus beban maksimum (komponen frekuensi fundamental) pada titik kopling.
 h = Orde harmonik individual.

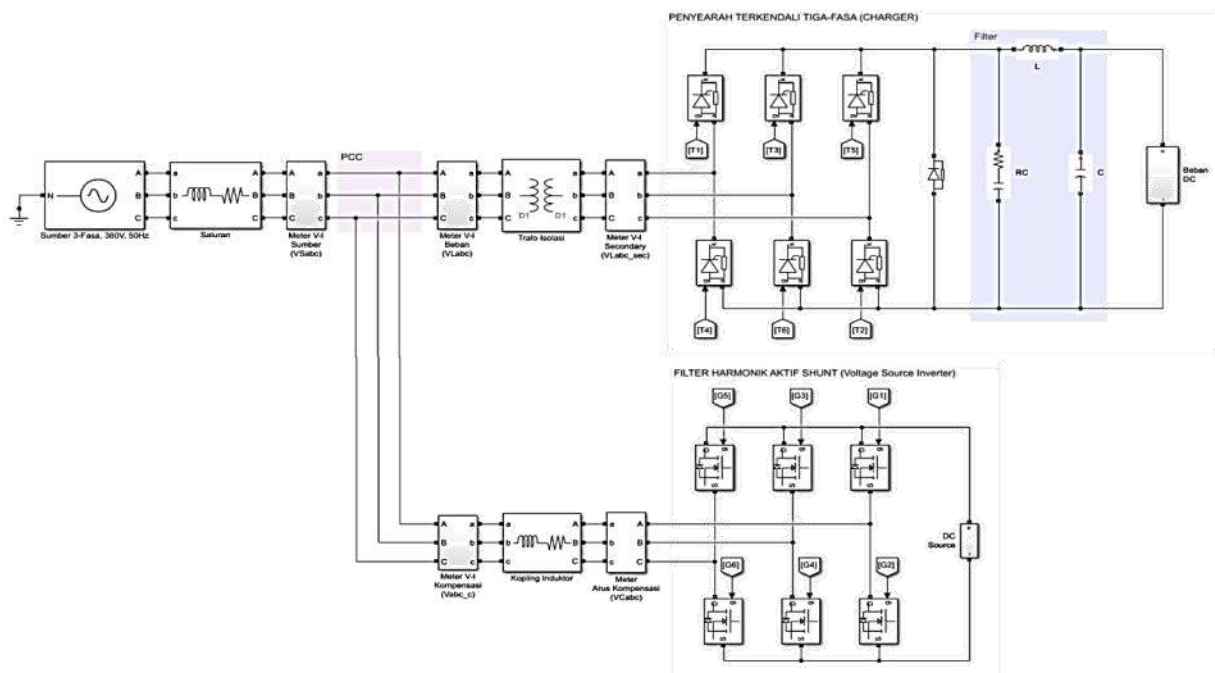
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil usulan perancangan filter harmonik aktif *shunt* dilakukan pengujian dengan simulasi secara menyeluruh seperti pada Gambar 7. dengan menghubungkan penyearah terkendali tiga-fasa atau *Charger* dengan Filter Harmonik Aktif *Shunt* secara paralel pada titik PCC dengan suplai tegangan AC tiga-fasa sebesar 380V, 50Hz. Simulasi dilakukan pada Simulink MATLAB dengan skenario pengujian pembebanan penyearah terkendali dari beban nol hingga beban penuh baik pada mode operasi *Floating* dan *Boosting*. Parameter yang digunakan dalam simulasi untuk filter harmonik aktif yang sudah di hitung ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter simulasi filter harmonik aktif

Parameter	Simbol	Nilai
Tegangan referensi DC-Link	V_{DC}	1180 V_{DC}
Tegangan maksimum saklar	V_{SW}	1180 V_{DC}
Kopling induktor	L_C	1000 μH
Kapasitor DC-Link	C_{DC}	150 μF
Frekuensi <i>switching</i>	f_{sw}	40 kHz
<i>Hysteresis Band</i>	HB	3.0
Konstanta P kontrol DC-Link	K_p	30
Konstanta I kontrol DC-Link	K_i	1

Parameter *Proportional* (P) dan *Integral* (I) ditentukan dengan mengatur nilai keduanya dengan nilai 1,0. Nilai K_p dan K_i ini selanjutnya ditentukan dengan metode *trial and error* hingga sesuai dengan spesifikasi teknis pada Tabel 1. Respon dinamik perubahan tegangan dari beban 0% hingga 100% harus memenuhi waktu respon 200 milidetik dan deviasi maksimum $\pm 10\%$.



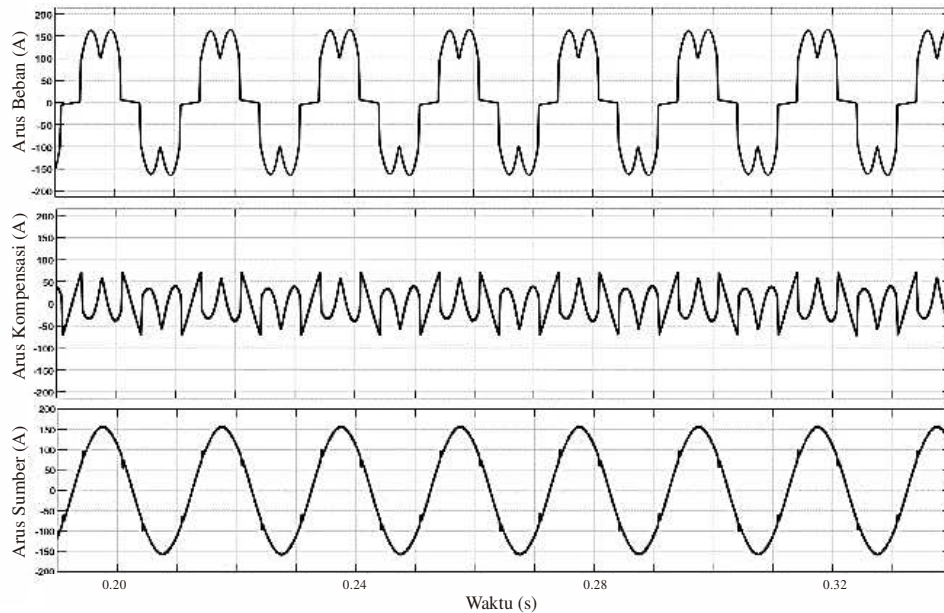
Gambar 7. Rangkaian simulasi keseluruhan

Filter harmonik aktif *shunt* diharapkan dapat mereduksi harmonik arus yang disebabkan oleh *Charger* hingga batas minimum TDD sesuai standar. Lebih sedikit harmonik yang muncul pada sistem

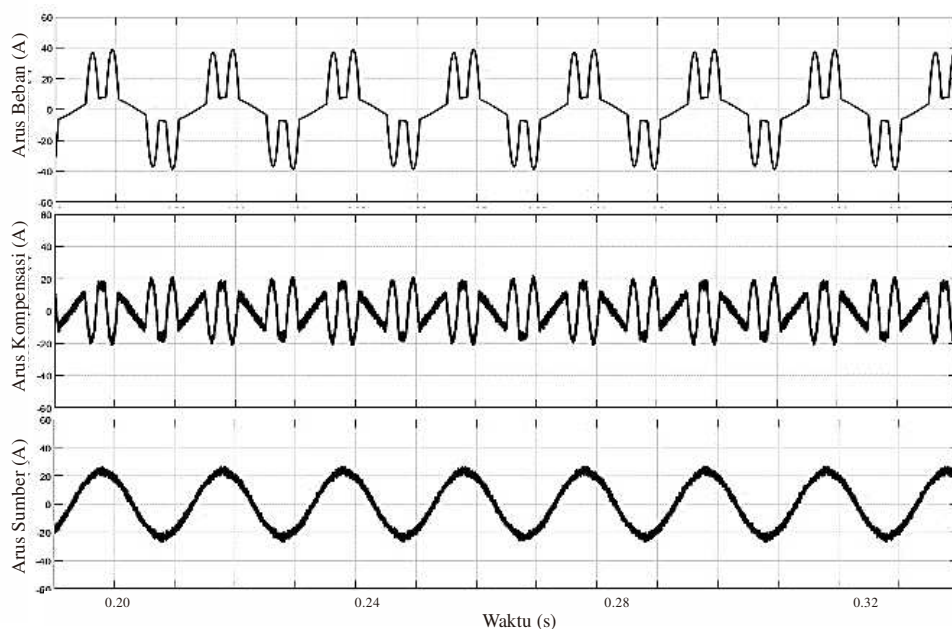
juga diharapkan dapat mengurangi permasalahan seperti panas berlebih pada peralatan dan permasalahan lainnya [2].

3.1 Simulasi Pada Mode *Floating*

Pada mode operasi *floating*, tegangan output penyearah dibiarkan mengambang (*floating*) relatif terhadap sistem baterai dengan *setpoint* tegangan DC sebesar 110 VDC. Sampel hasil simulasi pada ditunjukkan dengan bentuk gelombang hasil pengukuran arus yang secara berurutan terdiri dari arus beban, arus kompensasi, dan arus sumber seperti ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



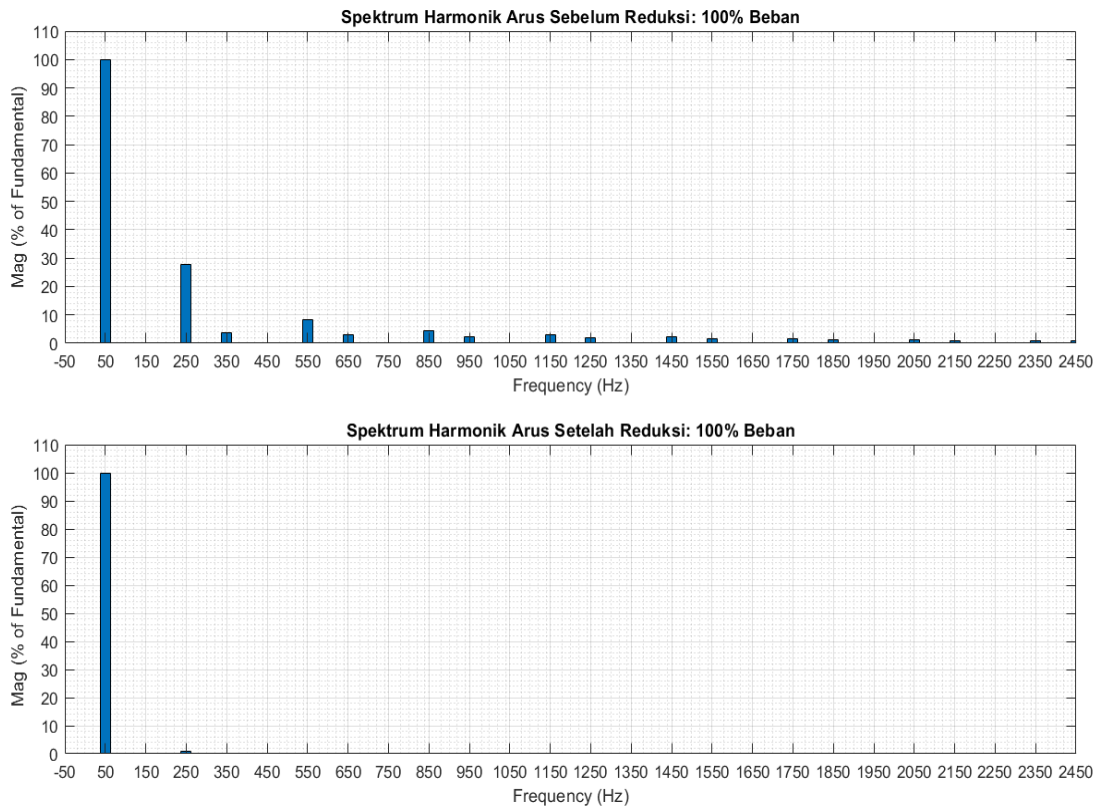
Gambar 8. Simulasi *Floating* arus beban 100%



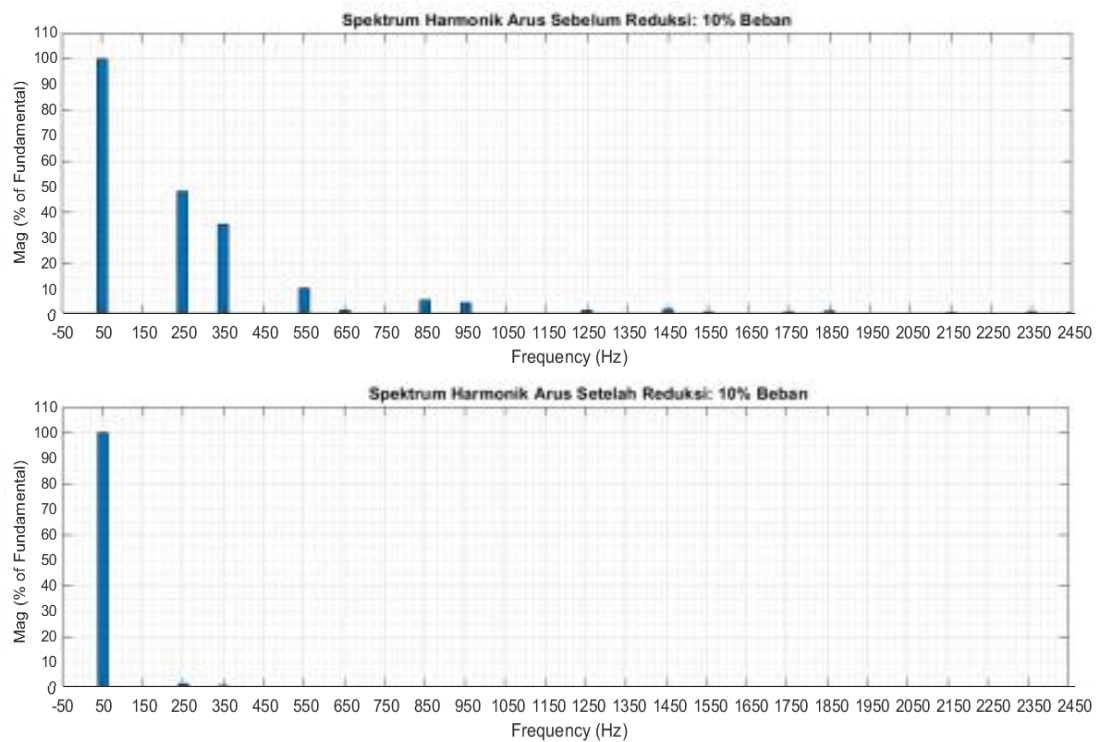
Gambar 9. Simulasi *Floating* arus beban 10%

Spektrum harmonik arus yang ditampilkan pada Gambar 10 dan Gambar 11 dihasilkan dari analisis FFT pada gelombang sisi sumber secara berurutan sebelum dan setelah direduksi dengan filter.

Spektrum menunjukkan orde frekuensi harmonik ke-5 dan ke-7 secara signifikan direduksi oleh filter sehingga hanya menyisakan gelombang fundamentalnya saja.



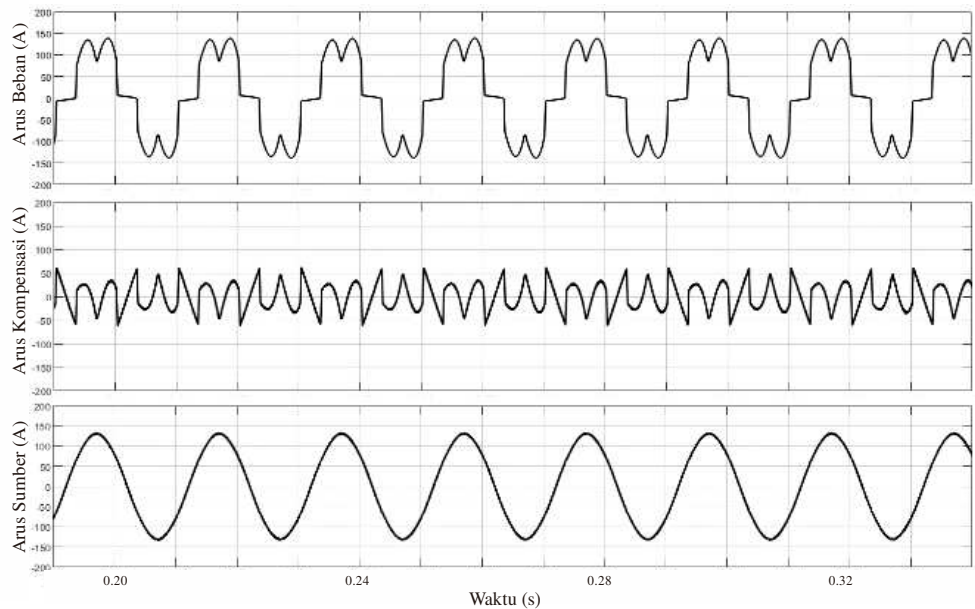
Gambar 10. FFT pada beban 100% (*floating*)



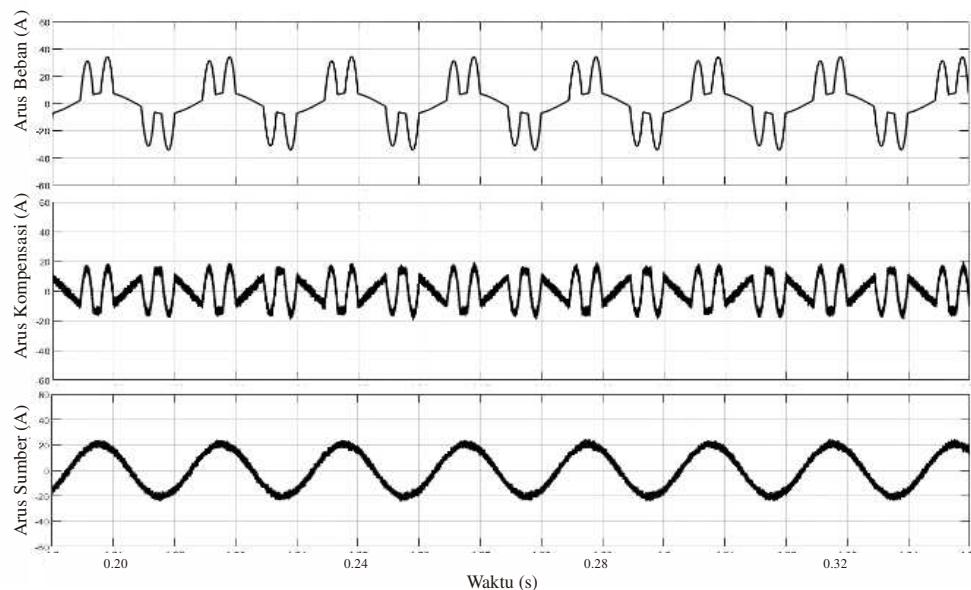
Gambar 11. FFT pada arus beban 10% (*floating*)

3.2 Simulasi Pada Mode *Boosting*

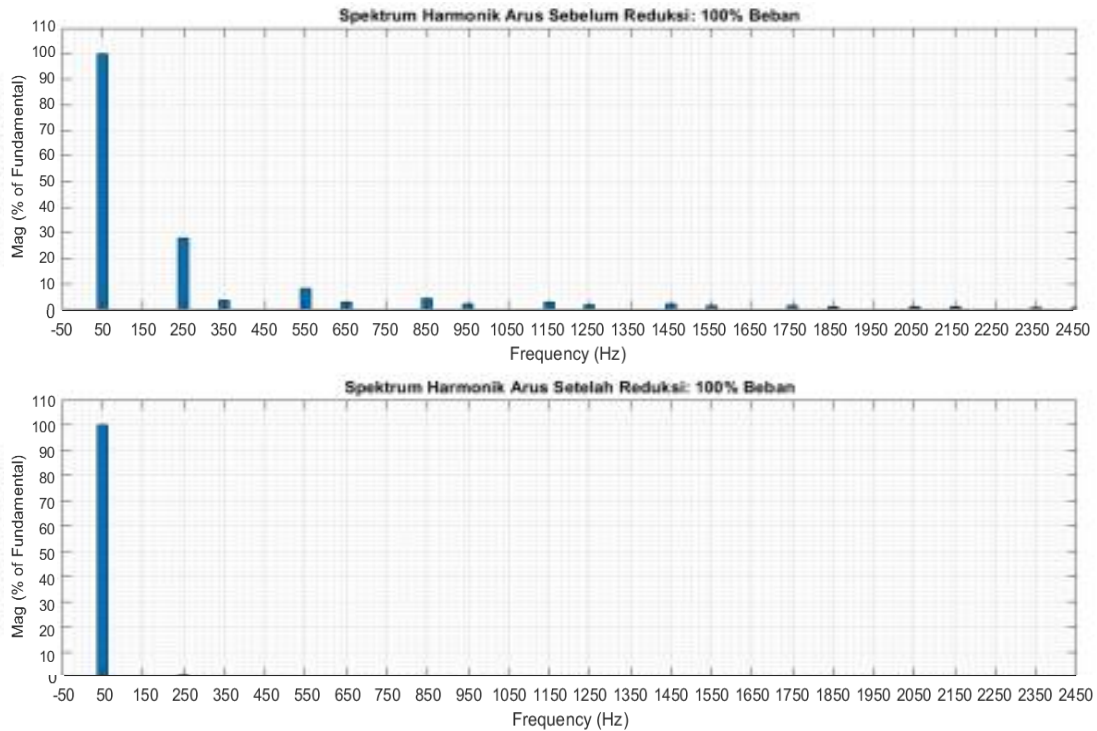
Selanjutnya, pada mode operasi *boosting*, tegangan *output* penyearah ditingkatkan menjadi lebih besar relatif terhadap sistem baterai dengan *setpoint* tegangan DC sebesar 132 VDC. Serupa dengan pada mode *Floating*, sampel hasil simulasi ditunjukkan dengan bentuk gelombang hasil pengukuran arus yang secara berurutan terdiri dari arus beban, arus kompensasi, dan arus sumber seperti ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13.



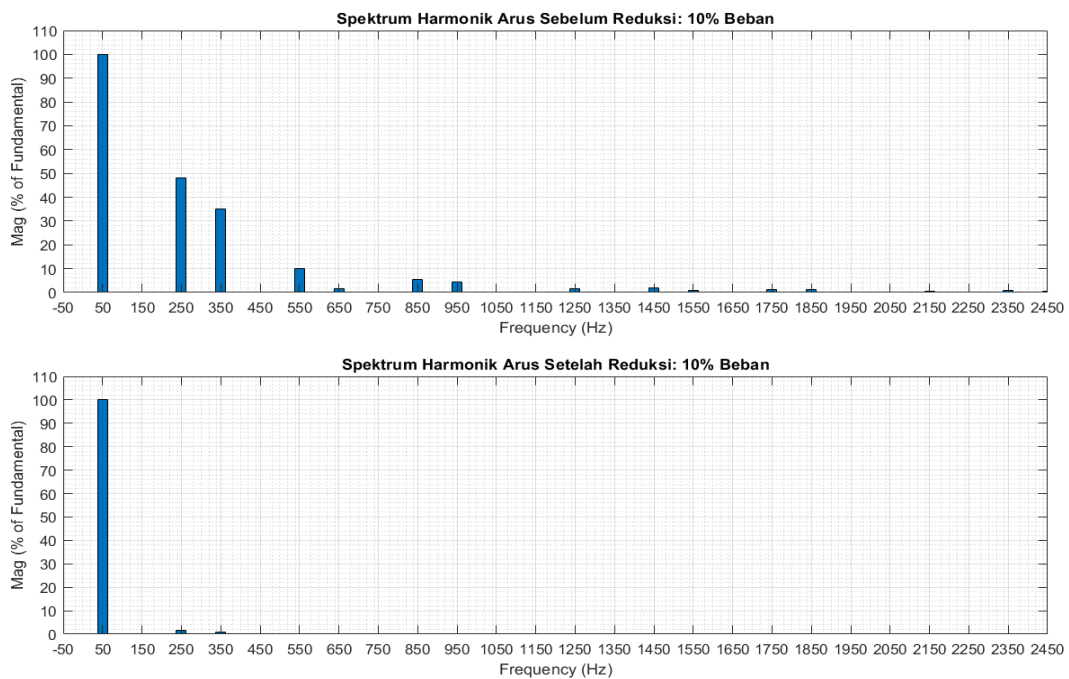
Gambar 12. Simulasi *Boosting* arus beban 100%



Gambar 13. Simulasi *Boosting* arus beban 10%



Gambar 14. FFT pada beban 100% (*boosting*)



Gambar 15. FFT pada arus beban 10% (*boosting*)

Spektrum harmonik arus yang ditampilkan pada Gambar 14 dan Gambar 15 secara berurutan sebelum dan setelah direduksi dengan filter menunjukkan hasil yang hampir serupa dengan hasil pada mode *Floating*, yang mana spektrum menunjukkan orde frekuensi harmonik ke-5 dan ke-7 secara signifikan direduksi oleh filter sehingga hanya menyisakan gelombang fundamentalnya saja.

3.3 Variasi Pembebanan *Charger*

Hasil simulasi sebelum dan sesudah dilakukan reduksi harmonik arus pada sisi sumber AC penyearah menggunakan filter harmonik aktif *shunt* pada mode operasi *floating* dan *boosting* dengan variasi pembebanan 0% -100% ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Hasil reduksi harmonik arus mode *floating*

Beban	Sebelum Reduksi			Setelah Reduksi			Efektivitas Reduksi THD	Efektivitas Reduksi TDD
	Arus RMS (A)	THD (%)	TDD (%)	Arus RMS (A)	THD (%)	TDD (%)		
0%	5,52	10,14	0,49	5,85	2,75	0,15	72,9%	70,1%
10%	19,5	60,92	10,36	16,6	2,01	0,30	96,7%	97,1%
20%	31,2	56,89	15,47	27,2	1,74	0,43	96,9%	97,2%
30%	42,9	49,68	18,58	37,6	1,51	0,52	97,0%	97,2%
40%	52,0	42,58	19,30	48,0	1,23	0,54	97,1%	97,2%
50%	62,2	38,06	20,64	58,3	1,16	0,62	97,0%	97,0%
60%	72,6	35,24	22,31	68,6	1,04	0,65	97,0%	97,1%
70%	83,1	33,37	24,18	78,9	0,98	0,70	97,1%	97,1%
80%	93,5	32,14	26,20	89,3	0,95	0,77	97,0%	97,1%
90%	104,1	31,17	28,29	99,6	0,89	0,81	97,1%	97,1%
100%	114,7	30,5	30,50	109,9	0,87	0,87	97,1%	97,1%

Tabel 5. Hasil reduksi harmonik arus mode *boosting*

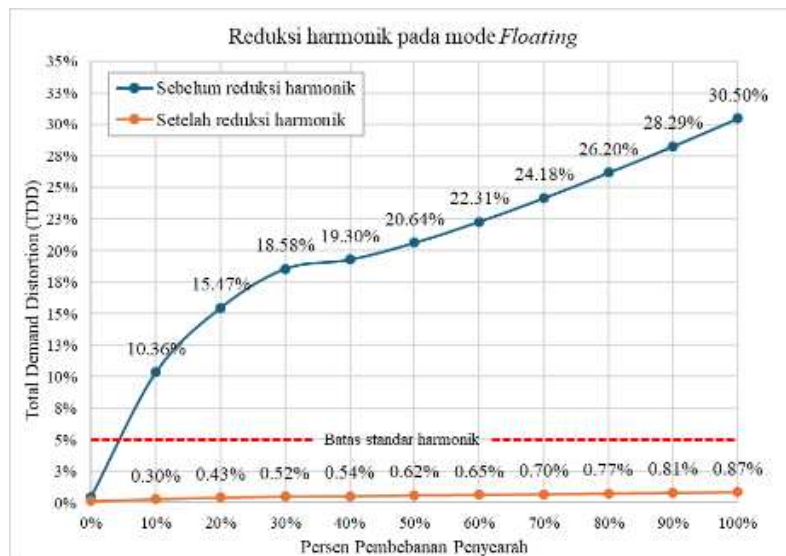
Beban	Sebelum Reduksi			Setelah Reduksi			Efektivitas Reduksi THD	Efektivitas Reduksi TDD
	Arus RMS (A)	THD (%)	TDD (%)	Arus RMS (A)	THD (%)	TDD (%)		
0%	5,52	10,09	0,58	5,85	2,75	0,15	72,7%	74,8%
10%	16,8	60,91	10,66	14,7	2,01	0,27	96,7%	97,5%
20%	26,6	56,89	15,76	23,4	1,74	0,37	96,9%	97,6%
30%	35,5	49,63	18,35	32,1	1,51	0,44	97,0%	97,6%
40%	43,8	42,57	19,42	40,7	1,23	0,46	97,1%	97,7%
50%	52,4	38,02	20,75	49,3	1,16	0,52	96,9%	97,5%
60%	61,0	35,17	22,35	57,9	1,04	0,55	97,0%	97,6%
70%	69,7	33,28	24,16	66,5	0,98	0,59	97,1%	97,5%
80%	78,5	32,06	26,22	75,0	0,95	0,65	97,0%	97,5%
90%	87,3	31,1	28,28	83,6	0,89	0,68	97,1%	97,6%
100%	96	30,45	30,45	92,2	0,87	0,87	97,1%	97,1%

Berdasarkan Tabel 4, sebelum dilakukan reduksi, pada mode *floating*, arus RMS pada beban 0% adalah 5,52 A dengan THD sebesar 10,14% dan TDD sebesar 0,49%. Pada kondisi ini belum ada arus yang ditarik oleh beban penyearah sehingga nilai THD-nya kecil dan nilai TDD masih memenuhi standar < 5%. Penambahan tingkat beban penyearah yakni beban 10%, arus RMS terukur 16,8 A dengan nilai THD arus sebesar 60,91% dan nilai TDD arus sebesar 10,66%, nilai TDD pada level beban ini sudah melampaui batas nilai TDD. Seiring dengan peningkatan beban hingga mencapai 100%, dengan

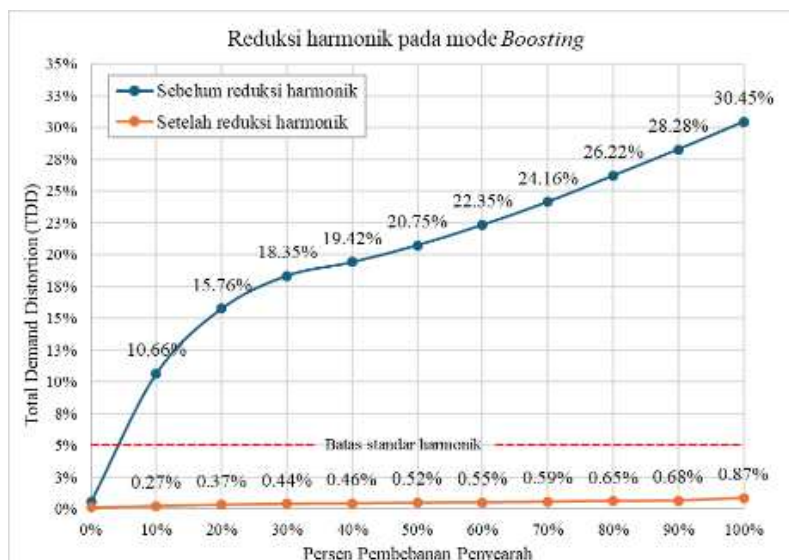
arus RMS yakni 114,7 A menyebabkan TDD semakin meningkat menjadi 30,5%, jauh melampaui batas < 5%.

Pada mode operasi *boosting* sebelum dilakukan reduksi ditunjukkan Tabel 5, arus RMS pada beban 0% adalah 5,52 A dengan THD sebesar 10,09% dan TDD sebesar 0,58%. Seiring dengan peningkatan beban hingga mencapai 100%, dengan arus RMS yakni 96 A, nilai TDD semakin meningkat pula menjadi 30,45%. Pola peningkatan distorsi harmonik ini mirip dengan yang terlihat pada mode *floating*, di mana distorsi atau nilai TDD meningkat secara signifikan dengan peningkatan beban.

Filter harmonik aktif *shunt* secara signifikan dapat mereduksi harmonik arus yang ditarik oleh *Charger*, sebagai contoh pada mode *floating*, pada beban 10%, THD turun dari 60,92% menjadi 2,01% dan TDD turun dari 10,36% menjadi 0,30%, serta pada beban 100%, THD turun dari 30,50% menjadi 0,87% dan TDD turun dari 30,50% menjadi 0,87%. Pada mode *boosting*, hasil serupa terlihat, di mana pada beban 10%, THD turun dari 60,91% menjadi 2,01% dan TDD turun dari 10,66% menjadi 0,27%, serta pada beban 100%, THD turun dari 30,45% menjadi 0,87% dan TDD turun dari 30,45% menjadi 0,87%. Efektivitas reduksi THD dan TDD pada mode *Floating* dan *Boosting* dapat menurunkan harmonik sekitar 97% dari nilai awalnya. Penurunan yang signifikan seperti ditunjukkan pada Gambar 16 dan Gambar 17 menunjukkan bahwa hasil rancangan filter pada semua kondisi beban sangat efektif dalam mengurangi harmonik hingga di bawah nilai standarnya yakni < 5%.



Gambar 16. Grafik hasil reduksi mode *floating*



Gambar 17. Grafik hasil reduksi mode *boosting*

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan filter harmonik aktif *shunt* terbukti efektif dalam mereduksi harmonik hingga memenuhi standar dengan jenis dan kapasitas beban yang berbeda-beda, seperti pada [1], [12], [13], [15], [22]. Rancangan filter harmonik aktif *shunt* ini dapat mereduksi *Total Harmonic Distortion* (THD) dan *Total Demand Distortion* (TDD) secara signifikan pada aplikasi Charger atau penyearah terkendali tiga-fasa dengan berbagai skenario pembebanan sehingga memenuhi standar acuan harmonik. Dibandingkan dengan [10] yang menggunakan filter pasif, filter harmonik aktif *shunt* menunjukkan keunggulan yang lebih signifikan dalam mereduksi harmonik. Usulan filter harmonik aktif *shunt* menunjukkan penurunan THD dan TDD hingga sekitar 97% dari nilai awal.

4. KESIMPULAN

Pemasangan filter harmonik aktif *shunt* terbukti berhasil dan efektif dalam mengurangi distorsi harmonik arus sumber yang disebabkan oleh *Charger* atau penyearah terkendali tiga-fasa, baik pada mode *Floating* dan *Boosting*. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan yang signifikan pada nilai THD dan TDD pada berbagai tingkat beban, mulai dari 0% hingga 100%, hingga nilai-nilai tersebut dapat memenuhi standar batasan harmonik menurut IEEE 519-2014 yakni dengan nilai TDD kurang dari 5%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa filter harmonik aktif *shunt* yang dirancang mampu mengurangi harmonik dengan efektivitas rata-rata $\pm 97\%$ pada semua tingkat beban (0-100%) sehingga hasil akhir dapat memenuhi standar harmonik IEEE 519-2014. Secara visual, filter dapat menghasilkan gelombang arus sumber yang sinusoidal dan nilai RMS arusnya berkurang.

REFERENSI

- [1] M. F. Hasan, "Shunt Active Power Filter Untuk Eliminasi Harmonik Dan Kompensasi Daya Reaktif Pada Pengoperasian Crane," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [2] I. P. and Energy, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," *IEEE Std. 519-2014*, vol. 2014, pp. 519–2014, 2014.
- [3] Y. Rangelov, "Overview on Harmonics in the Electrical Power System," Proc. Int. Sci. Symp. Electrical Power Engineering, 2014.
- [4] R. Pinyol, *Harmonics: Causes, Effects and Minimization*, Barcelona: SALICRU White Papers, 2015.
- [5] M. J. Ghorbani and H. Mokhtari, "Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems," *Int. J. Electr. Comput. Eng. (IJECE)*, 2015.
- [6] I. M. W. Kastawan, "Pengaruh Harmonisa Arus Akibat Penggunaan Beban Non-Linier Terhadap Hasil Pengukuran kWhmeter Analog," *J. Tek. Energi, Politeknik Negeri Bandung*, 2021.
- [7] M. Davudi, S. Torabzad, and B. Ojaghi, "Analysis of Harmonics and Harmonics Mitigation Methods in Distribution System," *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 5, pp. 996–1005, 2011.
- [8] K. Gamit and K. Chaudhari, "Multi Phase Rectifier Using Difference Phase Shifting Transformer and its THD Comparison for Power Quality Issues," in Proc. CGPIT, Gujarat, 2016.
- [9] I. M. W. Kastawan, E. Yusuf, and A. Fadhilah, "Simulation of Source Current Harmonic Elimination Technique Using Phase Shifting Transformer," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 830, p. 032028, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/830/3/032028.
- [10] I. M. W. Kastawan, E. Yusuf, and A. Fadhilah, "Design of Phase-Shifting Transformer Based on Simulink Matlab Simulation," *Curr. J. Int. J. Appl. Technol. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 148–162, 2020, doi: 10.35313/ijatr.v1i2.30.
- [11] V. Petrushyn, V. Horoshko, J. Plotkin, N. Almuratova, and Z. Toigozhinova, "Power balance and power factors of distorted electrical systems and variable speed asynchronous electric drives," *Electron.*, vol. 10, no. 14, 2021, doi: 10.3390/electronics10141676.
- [12] F. N. Mumtaz, I. Sudiharto, and O. A. Qudsi, "Shunt Active Power Filter Untuk Peredaman Harmonisa Pada Inverter V/F Konstan Pengatur Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa," *JIT (Jurnal Teknol. Terpadu)*, vol. 9, no. 2, pp. 131–141, 2021, doi: 10.32487/jtt.v9i2.1176.
- [13] D. N. Prabowo, M. Haddin, and D. Nugroho, "Reduksi Harmonisa Dengan Filter Aktif Shunt Berbasis MATLAB/Simulink," *Media Elektr.*, vol. 8, no. 2, pp. 20–34, 2015.
- [14] H. Akagi, *Instantaneous active and reactive power theory and applications*. 2007. doi: 10.1201/b14924-7.
- [15] S. Kumaresan and H. Habeebullah Sait, "Design and control of shunt active power filter for power quality improvement of utility powered brushless DC motor drives," *Automatika*, vol. 61, no. 3, pp. 507–521, 2020, doi: 10.1080/00051144.2020.1789402.
- [16] M. T. Alkhayat, M. Y. Suliman, and F. F. Aiwa, "PQ & DQ based shunt active power filter with PWM & hysteresis techniques," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 2021, no. 9, pp. 78–84, 2021, doi: 10.15199/48.2021.09.17.

-
- [17] J. G. Pinto, B. Exposto, V. Monteiro, L. F. C. Monteiro, C. Couto, and J. L. Afonso, "Comparison of current-source and voltage-source Shunt Active Power Filters for harmonic compensation and reactive power control," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 5161–5166, 2012, doi: 10.1109/IECON.2012.6389552.
- [18] M. H. Rashid, *Electric Renewable Energy Systems*. 2015. doi: 10.1016/C2013-0-14432-7.
- [19] M. Rastogi, R. Naik, and N. Mohan, "A Comparative Evaluation of Harmonic Reduction Techniques in Three-Phase Utility Interface of Power Electronic Loads," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 5, pp. 1149–1155, 1994, doi: 10.1109/28.315225.
- [20] F. Krim, "Parameters estimation of shunt active filter for power quality improvement," *2011 5th Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2011 - Progr. Abstr.*, no. June, pp. 306–311, 2011, doi: 10.1109/PEOCO.2011.5970393.
- [21] A. A. Imam, R. Sreerama Kumar, and Y. A. Al-Turki, "Modeling and simulation of a pi controlled shunt active power filter for power quality enhancement based on p-q theory," *Electron.*, vol. 9, no. 4, 2020, doi: 10.3390/electronics9040637.
- [22] M. A. A. M. Zainuri *et al.*, "Photovoltaic integrated shunt active power filter with simpler ADALINE algorithm for current harmonic extraction," *Energies*, vol. 11, no. 5, 2018, doi: 10.3390/en11051152.