

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Harmonisa

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, harmonisa terjadi karena banyaknya beban nonlinier yang menarik arus non-sinusoidal, meskipun sebenarnya disuplai dari tegangan sinusoidal. Ini berbeda dengan beban linier yang menarik arus sinusoidal sesuai dengan tegangan yang menyuplainya (Sibuea & Thayib, 2014). Gelombang sinusoidal dengan frekuensi tinggi yang sama dengan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental adalah harmonisa ini.

Harmonisasi terjadi ketika beban nonlinier terhubung ke sistem distribusi tenaga listrik. Beban nonlinier ini biasanya peralatan elektronik dengan banyak komponen semi konduktor. Dalam proses kerjanya, mereka berfungsi sebagai saklar pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Semua jenis perangkat penyearah, seperti yang ditemukan di konverter daya, *uninterruptible power supply* (UPS), dan perangkat busur, seperti tungku listrik dan lampu *fluorescent*, adalah beban nonlinier yang terlibat dalam sistem tenaga.

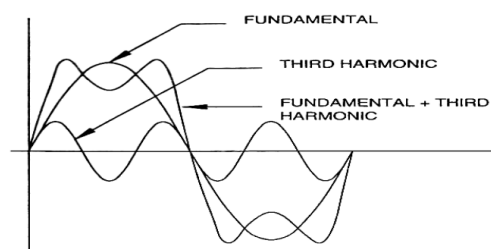
Dalam sistem tenaga listrik Indonesia, frekuensi dasar adalah 50 Hz. Gelombang dengan harmonisa kedua memiliki frekuensi 100 Hz, harmonisa ketiga memiliki frekuensi 150 Hz, harmonisa keempat memiliki frekuensi 200 Hz, dan seterusnya, sesuai dengan persamaan 2. 1:

$$f_h = (h) \times f_0 \quad 2. 1$$

dengan f_h merupakan frekuensi harmonisa, h bilangan bulat dan f_0 merupakan frekuensi fundamental.

Gelombang cacat, yang merupakan penjumlahan antara gelombang fundamental dan gelombang harmonisanya, terbentuk setelah gelombang harmonisa menumpang pada gelombang murni.

Gambar 2. 1 menunjukkan gelombang fundamental, yang juga merupakan gelombang harmonisa orde ke-3, yang mengalami tiga kali siklus penuh ($3 \times f_0$) dalam satu kali siklus gelombang fundamentalnya. Itu juga menunjukkan penjumlahan dari gelombang fundamental dan harmonisa orde ke-3.



Gambar 2. 1 Penjumlahan Gelombang Fundamental dan Harmonisa orde 3
(Sugiarto, 2012)

Sebagai contoh dari konsekuensi keberadaan harmonisa dalam jaringan, telah tercatat terjadinya distorsi dalam pengukuran energi listrik oleh meteran kWh tipe analog maupun digital, suatu temuan yang diteliti oleh (Yani, 2019), Penelitian tersebut melakukan pengukuran terhadap tegangan dan arus yang ada pada beban yang sudah terhubung dalam rangkaian. Tegangan yang diaplikasikan dalam proses ini berukuran 220 Volt, dengan beban yang digunakan terdiri atas lampu pijar (LP) dengan daya 100 Watt serta lampu hemat energi yang memiliki daya 20 Watt (LHE). Berdasarkan data yang diperoleh dari studi yang dilaksanakan, menggunakan 1 LP+5LHE, maka arus masuk = $1(0,45A) + 5(0,090A) = 0,9A$, tetapi hasil pengukuran arus bernilai 0,95; 0,96; 0,98; 0,99; 1,01; 1,02; 1,04 menandakan adanya divergensi dalam nilai arus yang dicatat dan mengindikasikan keberadaan harmonisa sebagai faktor yang memengaruhi ketidaktepatan ini.

2.1.1 Distorsi Harmonisa

Distorsi harmonisa adalah setiap perubahan dalam bentuk sinyal listrik yang tidak disengaja disebabkan oleh faktor tertentu dan umumnya tidak diinginkan dalam sistem (Dermawan & Rahman, 2018). Distorsi harmonis adalah sebuah penyimpangan bentuk gelombang arus dan tegangan dalam sebuah jaringan listrik dari kondisi sinusoidal aslinya, yang mengakibatkan munculnya komponen arus, tegangan, dan daya harmonik di dalam sistem yang memiliki beban non linier.

Ada dua jenis distorsi harmonisa, yaitu:

1. *Individual Harmonic Distortion* (IHD)
2. *Total Harmonic Distortion* (THD)

a. Individual Harmonic Distortion (IHD)

IHD adalah rasio nilai *root mean square* (RMS) dari harmonisa individual terhadap nilai RMS dari fundamental. IHD dapat diterapkan baik pada arus maupun tegangan (Sugiarto, 2012). Persamaan menggambarkan IHD 2. 2.

$$IHD = \frac{I_n}{I_1} \times 100 \% \quad 2.2$$

Keterangan:

I_n adalah Arus harmonisa pada orde ke-n (A)

I_1 adalah Arus fundamental (A)

b. Total Harmonic Distortion (THD)

Total Harmonic Distortion (THD) didefinisikan sebagai perbandingan antara nilai efektif (RMS) keseluruhan harmonik terhadap nilai efektif dasar (*fundamental*). Relasi antara THD dengan *Individual Harmonic Distortion* (IHD) tercantum pada Persamaan 2. 3.

$$THD = \sqrt{(IHD_2^2 + IHD_3^2 + IHD_4^2 + \dots IHD_n^2)} \quad 2.3$$

Total distorsi harmonisa dapat dinyatakan sebagai berikut:

a. **THD Tegangan**

THD tegangan ditulis dalam persamaan 2. 4.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad 2.4$$

Keterangan:

V_h merujuk pada tegangan harmonik pada orde ke n (V),

V_1 mewakili tegangan fundamental (V), dan

n adalah komponen harmonisa maksimum yang diamati.

b. **THD Arus**

THD arus ditulis dalam persamaan 2. 5.

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad 2.5$$

Keterangan:

I_n adalah besar arus harmonik pada orde ke n (A),

I_1 menyatakan besar arus fundamental (A), dan

n adalah jumlah tertinggi harmonik yang diukur.

2.1.2 Standar Harmonisa

Standar IEEE 519-2022 , yang merupakan revisi dari standar IEEE 519-2014, adalah standar harmonisa yang paling umum (IEEE Power and Energy Society, 2022). Standar ini memberikan saran tentang cara menggunakan dan

persyaratan pengaturan harmonisa untuk sistem tenaga listrik, baik harmonisa tegangan maupun harmonisa arus.

Standar IEEE 519-2022 menetapkan bahwa perbandingan perbandingan I_{sc}/I_L . I_{sc} menentukan harmonisa arus; I_{sc} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*), sedangkan I_L adalah arus beban utama. Di sisi lain, batas harmonisa tegangan ditentukan oleh besarnya tegangan sistem yang terpasang. Tabel 2. 1 menunjukkan standar harmonisa arus yang diizinkan sesuai dengan standar IEEE 519-2022.

Tabel 2. 1 Batas Distorsi Arus untuk Sistem dengan Rating 120V - 69kV

<i>Maximum harmonic current distortion in percent of I_L</i>						
<i>Individual harmonic order (odd harmonic)</i>						
I_{sc}/I_L	$2 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	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

Sumber: IEEE 519-2022

Menurut (Tomy & Reza, 2022) dan (Thamizh Thentral dkk., 2021), berdasarkan dari standar IEEE 519-2014 yang merupakan standar sebelumnya dari IEEE 519-2022 menjelaskan bahwa batas THD arus yang baik adalah dibawah 5%.

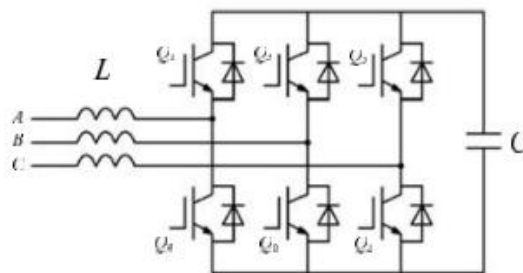
2.2 Filter Aktif

Filter aktif adalah rangkaian elektronika daya yang menggunakan konverter PWM untuk mengurangi harmonisa. Ini melakukannya dengan menyuntikkan arus untuk mengkompensasi harmonisa yang dihasilkan oleh beban non linier. (Sibuea & Thayib, 2014). Konverter dan kontroller adalah bagian penting dari filter aktif

(Odinanto dkk., 2013), sehingga jenis kontrol pembangkit arus referensi yang digunakan sangat memengaruhi kinerja filter aktif ini. Untuk mengkompensasi harmonisa, konverter filter aktif dihubungkan dengan sumber tegangan beban.

Untuk menentukan pola pensaklaran konverter pada filter aktif, arus kompensasi (I_{ref}) dan arus *feedback* (I_{fabc}) dibandingkan. Keluaran konverter mengkompensasi bagian gelombang sinusoidal yang hilang saat arus mengalir menuju beban non-linier dengan menghasilkan arus yang berlawanan fasa dengan arus harmonisa.

Kontroler digunakan untuk mengurangi sinyal error pada sumber tegangan beban dengan harmonisa. Triger inverter akan menggunakan keluaran kontroller. Skema komponen switching dari filter aktif ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Filter Aktif

(Assaffat dkk., 2013)

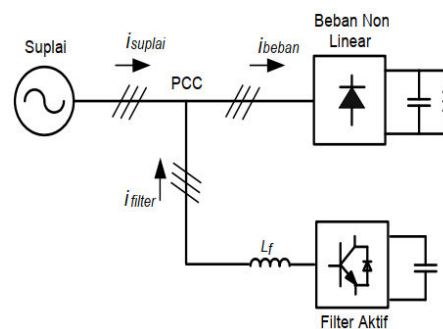
Filter aktif berdasarkan cara dihubungkan dengan sistem terbagi menjadi dua jenis, yaitu filter aktif seri (*series*) dan filter aktif paralel (*shunt*). Jenis filter aktif *shunt* merupakan filter aktif yang paling sering digunakan dikarenakan filter aktif *shunt* tidak membutuhkan transformator tambahan seperti filter aktif *series* (Sibuea & Thayib, 2014).

2.2.1 Filter Aktif *Shunt*

Konfigurasi sistem filter aktif shunt tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 2.

3. Untuk mengkompensasi harmonisa arus beban, filter aktif *shunt* umumnya menggunakan konverter jenis *voltage source inverter* (VSI) (A. Gautam dkk., 2016).

Di *Point of Common Coupling* (PCC), arus suplai mendekati sinusoidal karena fasa arus sumber (i_{suplai}) menjadi nol saat fasa arus filter aktif shunt dan fasa arus beban sama atau berlawanan dengan frekuensi harmonisa.



Gambar 2. 3 Skema Filter Aktif Shunt

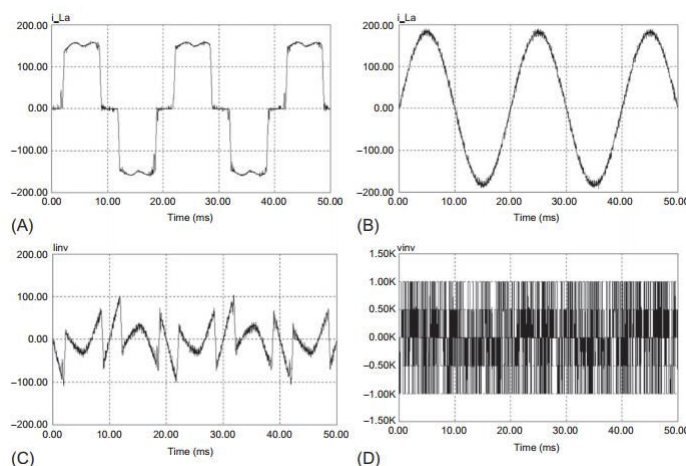
(Meliala, 2011)

Filter shunt aktif terdiri dari rangkaian konverter. Keluaran konverter dihubungkan dengan L atau LC secara paralel dengan beban, yang sangat penting untuk menjalankan filter aktif secara konsisten dan tepat agar terjadi kompensasi arus (Meliala, 2011).

Filter shunt aktif mendapatkan input dari sumber tegangan dan menghasilkan arus beban sesaat, atau (i_{beban}), untuk menghasilkan arus referensi harmonisa pada sistem kontrol. Untuk referensi pembangkit lebar pulsa (PWM), arus referensi ini akan dibandingkan dengan sinyal *carrier* yang menghasilkan pulsa. Pulsa ini kemudian dipicu oleh konverter, yang akan menghasilkan

gelombang arus filter untuk diinjeksikan ke dalam sistem (Prabowo dkk., 2015).

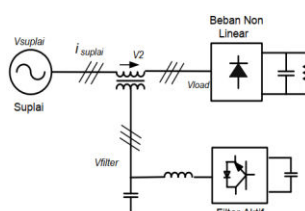
Bentuk gelombang yang dihasilkan oleh filter shunt aktif dapat digambarkan pada Gambar 2. 4.



Gambar 2. 4 Bentuk gelombang pada filter aktif shunt (A) Arus beban, (B) Arus sumber setelah pemasangan filter, (C) Arus kompensasi, (D) Tegangan output komponen aktif. (Rashid, 2018)

2.2.2 Filter Aktif Seri

Berbeda dengan filter aktif shunt, filter aktif seri digunakan sebagai isolator harmonisa dan mengkompensasi distorsi tegangan seperti tegangan kedip, serta tegangan tidak pada level sistem tegangan rendah dan tegangan tinggi. Setelah itu, keluaran dari konverter disambungkan ke filter L atau LC sebelum dihubungkan ke transformator (Meliala, 2011). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 5, filter aktif seri dihubungkan secara seri di antara suplai dengan beban.

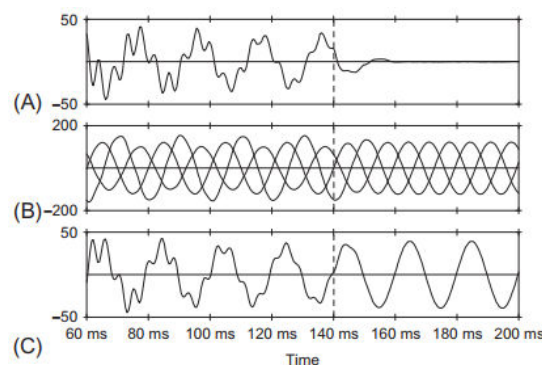


Gambar 2. 5 Skema Filter Aktif Seri

(Meliala, 2011)

Prinsip kerja filter aktif seri adalah sebagai berikut: konverter menghasilkan tegangan keluaran (v_{filter}) yang nilainya sebanding dengan arus harmonisa sumber (*isuplai*). Pada tegangan keluaran (v_2) kopling sisi sekunder transformator, nilainya sebanding dengan arus yang mengalir melalui transformator, juga dikenal sebagai tahanan aktif pada frekuensi harmonisa. Arus harmonisa sumber akan berkurang seiring dengan naiknya impedansi frekuensi harmonisa sumber akibat tahanan aktif (Meliala, 2011).

Gambar 2. 6 menunjukkan bentuk gelombang arus dan tegangan dari filter aktif seri, yang juga digunakan untuk memfilter harmonisa tegangan dan kompensasi kedip tegangan, seperti yang disebutkan sebelumnya.



Gambar 2. 6 Bentuk gelombang sebelum dan sesudah pemasangan filter aktif seri, (a) Arus netral sistem, (b) Tegangan Fasa-Netral, (c) Arus sumber tegangan

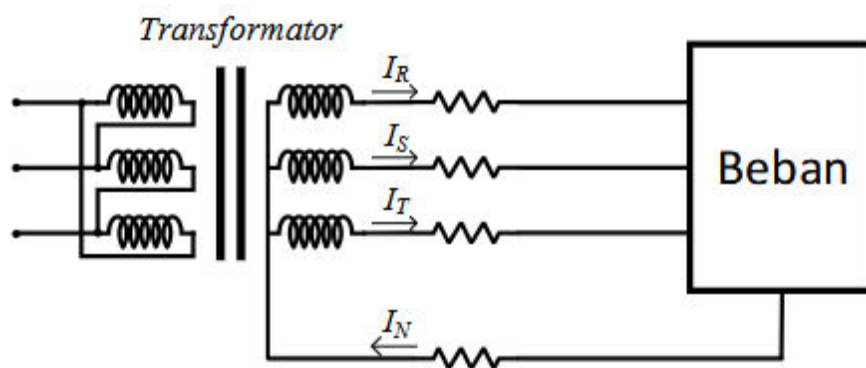
2.3 Sistem Sumber tiga fasa empat kawat

Sistem 3 fasa 4 kawat terdiri dari tiga konduktor fasa (A, B, C) dan satu konduktor netral (N). Konfigurasi ini banyak digunakan pada distribusi tenaga listrik karena memungkinkan pemanfaatan daya untuk beban 1 fasa dan 3 fasa.

Untuk tegangan fasa ke fasa pada penelitian ini sebesar 380 V merupakan nilai standar yang digunakan pada sistem distribusi tegangan rendah di Indonesia. Tegangan ini menjadi parameter penting dalam perancangan filter daya aktif karena

menentukan *rating* komponen yang digunakan serta strategi kontrol yang diterapkan.

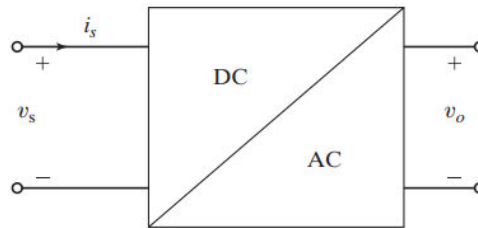
Dalam sistem 3 fasa, konfigurasi terhubung Y (atau bintang) adalah salah satu cara untuk menghubungkan tiga sumber tegangan atau beban. Dalam konfigurasi Y, ujung-ujung salah satu sisi dari setiap fasa dihubungkan bersama ke titik netral (N), sementara ujung-ujung sisi lainnya terhubung ke saluran fasa A, B, dan C. Gambar 2. 7 menggambarkan secara visual konfigurasi sumber tiga fasa terhubung Y.



Gambar 2. 7 Konfigurasi sumber tiga fasa terhubung Y

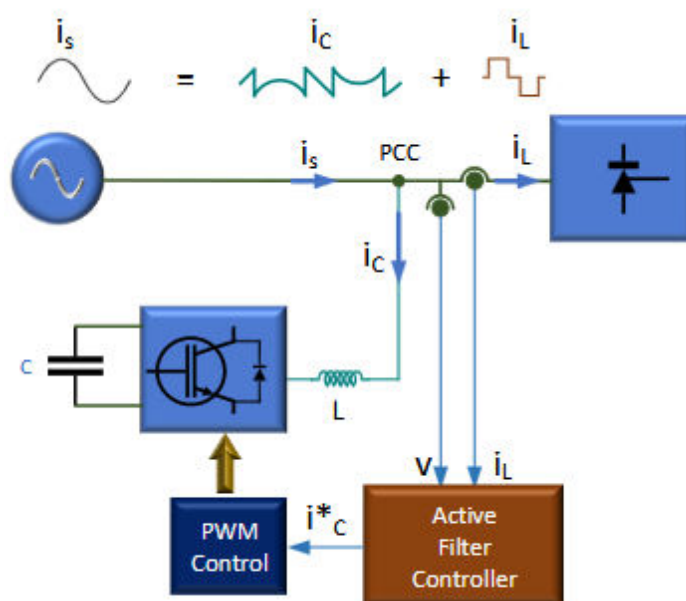
2.4 Konverter yang terhubung jaringan berfungsi sebagai filter Daya

Konverter yang digunakan pada filter aktif adalah jenis konverter DC ke AC, juga dikenal sebagai *inverter*. Tegangan atau arus yang dimasukkan ke *inverter* adalah DC, dan keluarannya adalah AC, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 9 Diagram Blok HAPF. Namun, tegangan *output inverter* praktis mengandung harmonisa.



Gambar 2. 8 Blok Diagram Inverter
(Rashid, 2018)

Filter daya hibrid yang terhubung ke jaringan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. 9, memainkan peran penting dalam meningkatkan kualitas daya listrik. Filter ini menggunakan kombinasi filter LC pasif dan filter daya aktif yang terhubung secara seri untuk meredam harmonisa dan mengkompensasi daya reaktif. Kendali prediktif himpunan kontrol terbatas (FCS-MPC) digunakan untuk menghasilkan pola pensaklaran yang optimal pada inverter empat kaki, sehingga meminimalkan perbedaan antara arus prediksi dan arus referensi. Arus referensi diperoleh melalui transformasi Synchronous Reference Frame (SRF) dari arus beban, memastikan kompensasi harmonisa yang efektif.



Gambar 2. 9 Diagram Blok HAPF

Dalam upaya untuk meningkatkan kualitas daya pada sistem tenaga listrik tiga fasa empat kawat, penelitian ini mengusulkan penerapan filter daya hibrid. Filter ini terdiri dari filter LC dan konverter empat kaki yang dikendalikan oleh metode FCS-MPC. Gambar 2. 9 menunjukkan topologi jaringan yang digunakan, di mana filter daya hibrid terhubung pada titik *Point of Common Coupling* (PCC). Berdasarkan hukum Kirchhoff, tegangan pada PCC dapat dihitung menggunakan Persamaan 2. 6.

$$V_{xN} = R_{fx}i_x + L_{fx}\frac{di_x}{dt} + V_{dN} \quad 2. 6$$

Dengan:

V_{xN} : Tegangan antara titik x dan titik N.

R_{fx} : Resistansi filter pada fasa x.

i_x : Arus pada fasa x.

L_{fx} : Induktansi filter pada fasa x.

$\frac{di_x}{dt}$: Turunan waktu dari arus pada fasa x, yang merepresentasikan laju perubahan arus terhadap waktu.

V_{dN} : Tegangan pada lengan d dari inverter.

x : fasa a, b, c dan netral

yang mempertimbangkan impedansi filter dan tegangan *inverter*. Pensaklaran *inverter*, seperti yang dijelaskan dalam persamaan 2. 7 , mempengaruhi tegangan yang melintasi setiap lengan inverter dan menentukan kinerja filter daya hibrid.

$$\begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \\ V_{dN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \\ S_d \end{bmatrix} V_{dc} \quad 2. 7$$

Dalam Konverter jenis ini kapasitor digunakan sebagai sumber tegangan DC (Prabowo dkk., 2015). Dengan V_{dc} merupakan tegangan dc-bus, dan S_a , S_b , S_c , dan S_d merupakan pensakralan masing-masing lengan inverter. Sedangkan untuk tegangan fasa netral dari a,b,c dijelaskna dalam persamaan 2. 8.

$$V_{xN} = [S_x - S_d].V_{dc} \quad 2. 8$$

Dengan $n = d$, dalam bentuk matriks menjadi seperti pada persamaan 2. 9

$$\begin{bmatrix} V_{ad} \\ V_{bd} \\ V_{cd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \\ S_d \end{bmatrix} V_{dc} \quad 2. 9$$

Dengan perubahan diskrit dari turunan seperti pada persamaan 2. 10.

$$\frac{di_x}{dt} = \frac{i_x(k) - i_x(k-1)}{T_s} \quad 2. 10$$

Dengan $x = a,b,c$

Sedangkan untuk integral bila diubah menjadi bentuk diskrit menjadi persamaan 2. 11.

$$\int_0^{kT_s} i_x dt \approx \sum_{m=0}^k i(m).T_s \quad 2. 11$$

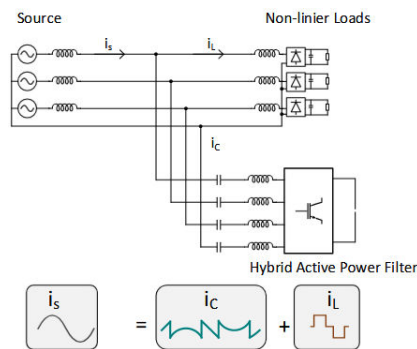
Sehingga persamaan diatas menjadi persamaan 2. 12 dan 2. 13.

$$V_{xN} = R_{fx}i_x + L_{fx}\frac{di_x}{dt} + V_{dN} \quad 2. 12$$

$$V_{xN}(k) = R_{fx}i_x(k) + L_{fx}\frac{i_x(k) - i_x(k-1)}{T_s} + S_x V_{dc} \quad 2. 13$$

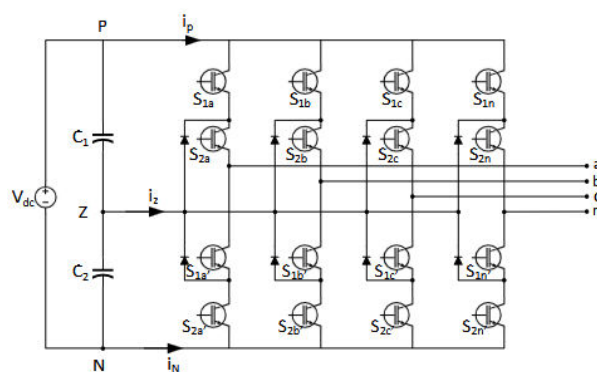
Konverter yang digunakan pada filter daya hibrid ini adalah konverter empat kawat dengan netral yang terhubung ke konverter. Hal ini dilakukan karena beban yang terhubung ke sistem tenaga listrik bukan hanya beban tiga fasa namun juga beban satu fasa. Dengan adanya variasi beban yang terhubung tersebut

kemungkinan ketidakseimbangan beban akan sangat besar, oleh karenanya filter daya yang digunakan harus mampu juga mengatasi ketidakseimbangan beban. Adapun topologi yang digunakan seperti pada Gambar 2. 10.



Gambar 2. 10 Konverter tiga fasa empat kawat

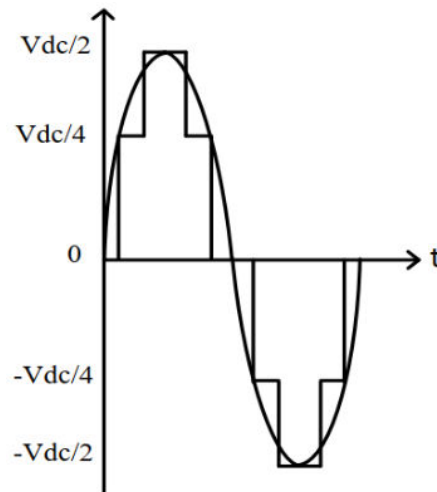
Topologi inverter yang digunakan adalah *multilevel converter clamped-diode* tiga fasa empat kawat dengan empat IGBT masing-masing lengan atau dikenal sebagai *Four-leg NPC Converter*. Terdapat empat lengan masing-masing fasa a,b,c dan n. Tiap lengan terdapat dua dioda jepit untuk mengatur aliran arus pada masing-masing lengan.



Gambar 2. 11 Multi Level Konverter dioda jepit tiga fasa empat lengan lima tingkat

Gambar 2. 11 menunjukkan terdapat kapasitor C_1 dan C_2 sebagai pembagi tegangan dari V_{dc} yang mempunyai nilai masing-masing $V_{C1} = V_{C2} = 0.5 \times V_{dc}$.

Lima tingkat tegangan yang dihasilkan oleh *multilevel converter* terdapat pada Gambar 2. 12.



Gambar 2. 12 Bentuk gelombang inverter multi lima tingkat

Terdapat masing-masing empat IGBT tiap lengan konverter, sehingga total berjumlah 16 buah. Untuk pengendalian akan terdapat kombinasi $3^4 = 81$ kombinasi pengsaklaran. Tegangan konverter akan dipengaruhi oleh penyalaan dari kombinasi 16 saklar dari keempat lengan. Hal itu sesuai dengan Tabel 2. 2.

Tabel 2. 2 Status Pengsaklaran Konverter empat lengan NPC dengan $x \in \{a, b, c\}$

Sinyal pengsaklaran				Tegangan Keluaran	Arus Masukan		DC-bus koefisien arus	
S_{x1}	S_{x2}	$\bar{S}_{x1}$	$\bar{S}_{x2}$	V_{xN}	i_p	i_z	K_{x1}	K_{x2}
1	1	0	0	$V_{C1} + V_{C2}$	i_x	0	-1	-1
0	1	1	0	V_{C2}	0	i_x	-1	0
0	0	1	1		0	0	0	0

Saklar S_{1a} merupakan kebalikan dari $\bar{S}_{1a}$ sedangkan S_{2b} merupakan kebalikan dari $\bar{S}_{2b}$ atau dalam persamaan akan berlaku.

$$\left. \begin{aligned} S_{1a} &= \overline{S_{1a'}} \\ S_{2a} &= \overline{S_{2a'}} \\ S_{1b} &= \overline{S_{1b'}} \\ S_{2b} &= \overline{S_{2b'}} \\ S_{1c} &= \overline{S_{1c'}} \\ S_{2c} &= \overline{S_{2c'}} \\ S_{2n} &= \overline{S_{1n'}} \\ S_{2n} &= \overline{S_{2n'}} \end{aligned} \right\}$$

Kombinasi empat saklar tiap lengan menghasilkan $3^4 = 81$ kombinasi. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 2. 3.

Tabel 2. 3 Kombinasi pengsaklaran dan tegangan keluaran dari konverter

No	Fasaa		Fasab		Fasac		Fasan		output phase voltage		
	S1a	S2a	S1b	S2b	S1c	S2c	S1n	S2n	van	vbn	vcn
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1	-0,5	-0,5	-0,5
3	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	-1	-1
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,5
5	0	0	0	0	0	1	0	1	-0,5	-0,5	0
6	0	0	0	0	0	1	1	1	-1	-1	-0,5
7	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	1	1	0	1	-0,5	-0,5	0,5
9	0	0	0	0	1	1	1	1	-1	-1	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,5	0
11	0	0	0	1	0	0	0	1	-0,5	0	-0,5
12	0	0	0	1	0	0	1	1	-1	-0,5	-1
13	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0,5	0,5
14	0	0	0	1	0	1	0	1	-0,5	0	0
15	0	0	0	1	0	1	1	1	-1	-0,5	-0,5
16	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0,5	1
17	0	0	0	1	1	1	0	1	-0,5	0	0,5
18	0	0	0	1	1	1	1	1	-1	-0,5	0
19	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
20	0	0	1	1	0	0	0	1	-0,5	0,5	-0,5
21	0	0	1	1	0	0	1	1	-1	0	-1
22	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0,5
23	0	0	1	1	0	1	0	1	-0,5	0,5	0
24	0	0	1	1	0	1	1	1	-1	0	-0,5
25	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
26	0	0	1	1	1	1	0	1	-0,5	0,5	0,5

[illegible]

Kendali FCS-MPC digunakan untuk menghasilkan sinyal pensaklaran yang tepat, dengan mempertimbangkan arus referensi yang diperoleh dari transformasi SRF arus beban. Arus prediksi dihitung menggunakan Persamaan 2. 14, yang didasarkan pada model rangkaian filter daya hibrid.

$$i_{pre,x}(K + 1) = \frac{1}{R_f + \frac{L_{fx}}{T_s}} \left[V_{xN}(K + 1) + i_x(k) \frac{L_{fx}}{T_s} - S_x V_{dc} \right] \quad 2. 14$$

Kemudian hasil dari persamaan 2. 14 ini akan di bandingkan dengan arus referensi hasil transformasi arus beban menjadi dq yang diubah kembali.

Secara umum penggunaan MPC ini berdasar kepada optimasi *Cost Function* dari arus prediksi serta arus referensi pada persamaan 2. 15.

$$J = K(|i_{ref,aN}(k + 1) - i_{pre,an}(K + 1)| + |i_{ref,bN}(k + 1) - i_{pre,bn}(K + 1)| - |i_{ref,cN}(k + 1) - i_{pre,cn}(K + 1)|) \quad 2. 15$$

Dimana $i_{ref,xN} = i_c^*$

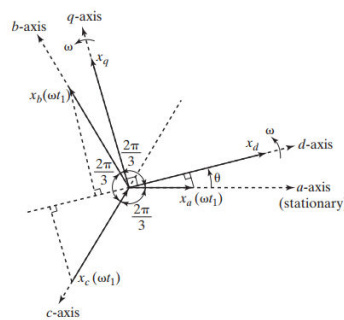
Dengan menggunakan iterasi didapatkan dari masing-masing sampling waktu dengan 16 kombinasi nilai galat terkecil yang akan dijadikan sebagai pola pensaklaran untuk menghasilkan arus injeksi untuk menurunkan harmonisa.

2.5 Perhitungan Arus Referensi

Untuk mengendalikan filter aktif, perlu dilakukan perhitungan arus referensi. Perhitungan ini digunakan dalam proses *switching* yang diolah menggunakan *Model Predictive Control* (MPC). Pertama, Transformasi Park digunakan untuk menghitung arus referensi dalam koordinat abc. Kemudian, Transformasi Clarke mengubah arus dan tegangan dari sistem tiga fasa menjadi koordinat $\alpha\beta 0$. Hasil dari koordinat ini digunakan dalam perhitungan MPC untuk menghasilkan *switching* yang diperlukan.

2.5.1 Transformasi Park

Dalam sebuah kendali filter aktif, membutuhkan kontrol arus dan ekstraksi arus referensi (Sathiyarayanan & Mishra, 2016). *Synchronous Reference Frame Theory* (SRFT) juga dikenal sebagai teori d-q. merupakan salah satu metode yang paling populer digunakan. Dalam teori SRFT, transformasi Park digunakan untuk mengkonversi arus beban ke koordinat $dq0$. Dengan menggunakan tegangan sumber, sudut sinus dan *cosinus* dihitung dengan *Phase Locked Loop* (PLL). dimana dalam teori SRF, nilai sudut ini digunakan untuk membedakan harmonisa dari fundamentalnya (Narendra Babu P dkk., 2017). Gambar 2. 13 menunjukkan bagaimana koordinat abc berubah menjadi koordinat dq.



Gambar 2. 13 Proyeksi Koordinat dq terhadap koordinat abc

(Rashid, 2018)

Pada persamaan 2. 15 merupakan transformasi Park, ' θ ' adalah sudut fasa urutan positif dari sistem tegangan yang dihasilkan oleh unit phase locked loop (PLL). PLL menghasilkan fungsi $\sin\theta$ dan $\cos\theta$ pada frekuensi fundamental, kemudian disinkronkan dengan komponen fundamental tegangan (Setiyono & Dwinanto, 2021).

$$\begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \\ i_{lo} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad 2.16$$

Setelah arus beban i_{ld} dan i_{lq} ditentukan pada koordinat $dq0$, *low pass filter* digunakan untuk mengekstraksi komponen DC dan komponen AC dari komponen aktif i_{ld} yang ditulis dalam persamaan 2. 17.

$$i_{ld} = \bar{i}_{ld} + \tilde{i}_{ld} \quad 2.17$$

Komponen DC $\bar{i}_{ld}$ merupakan nilai arus *fundamental* yang disuplai sumber, sedangkan komponen AC $\tilde{i}_{ld}$ adalah komponen harmonisa dari arus beban (Chebabhi dkk., 2016) Nilai arus referensi pada koordinat dq0 diperoleh dengan persamaan 2. 18.

$$\begin{bmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} \quad 2.18$$

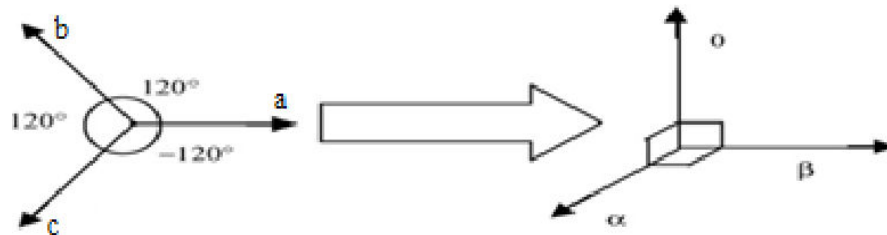
Langkah berikutnya adalah transformasi balik ke koordinat abc . Arus referensi pada koordinat abc dapat ditentukan dengan transformasi balik Park yang ditulis dalam persamaan 2. 19.

$$\begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{bmatrix} \quad 2.19$$

Selanjutnya, nilai arus referensi dari hasil perhitungan tersebut kemudian akan di olah oleh sistem kendali pada filter aktif.

2.5.2 Transformasi Clarke

Setelah memperoleh nilai arus referensi pada koordinat abc, selanjutnya teori transformasi clarke digunakan untuk mengubah arus dan tegangan pada sistem tiga fasa menjadi koordinat $\alpha\beta 0$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 14



Gambar 2. 14 Transformasi Sistem abc menjadi $\alpha\beta 0$

(Talagalamani & P, 2017)

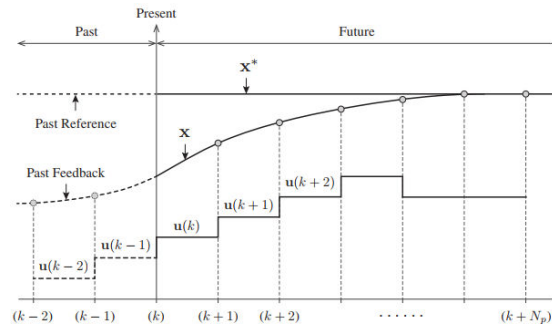
Rumus untuk transformasi clarke seperti pada persamaan 2. 20:

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad 2. 20$$

Dengan “x” untuk nilai tegangan ataupun nilai arus. Pada penelitian ini, teori transformasi clarke digunakan untuk menghasilkan *switching* melalui perhitungan MPC.

2.6 Model Predictive Control (MPC)

Model Predictive Control (MPC) merupakan teknik pengendalian yang menggunakan model proses dalam suatu sistem untuk memprediksi bagaimana variabel yang dikendalikan akan bertindak di masa depan. Metode diskrit digunakan MPC untuk optimalisasi, yang meminimalkan nilai *cost function* (Rodriguez & Cortes, 2012).



Gambar 2. 15 *Prinsip Kerja Model Predictive Control*

(Yaramasu & Wu, 2017)

Gambar 2. 15 menunjukkan prinsip kerja MPC. Lintasan referensi kendali (x^*) diatur konstan untuk menyederhanakan analisis. MPC dirancang secara diskrit untuk memungkinkan variabel mengubah nilainya sendiri selama tiap tahap sampling. MPC menggunakan nilai variabel masa lalu, sekarang, dan masa depan sebagai acuan kendali. Ini berbeda dengan kendali histeresis klasik dan teknik kendali linier, yang hanya menggunakan nilai variabel masa lalu dan sekarang sebagai acuan kendali. Dengan kata lain, MPC memperkuat sistem secara keseluruhan dengan memprediksi dan mengambil tindakan pengendalian preventif untuk mencegah kesalahan yang signifikan di masa depan (Yaramasu & Wu, 2017).

2.6.1 Model Waktu Diskrit

Metode MPC menggunakan model waktu diskrit untuk prediksi, yang dapat diwakili sebagai model ruang keadaan (*state space*), seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 2. 21 dan 2. 22:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad 2. 21$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad 2. 22$$

Perhitungan arus beban dinamis diperlukan untuk memodelkan proses diskritisasi pada MPC. Ini dapat ditunjukkan dengan persamaan diferensial vektor yang ditemukan dalam persamaan 2. 23.

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad 2.23$$

Inverter menghasilkan sebuah vektor tegangan yang disimbolkan dengan v , sementara R mewakili resistansi. Vektor arus diwakili oleh i , L untuk induktansi, dan e untuk vektor *back-emf*.

Model waktu diskrit yang dijelaskan dalam persamaan 2.23 digunakan sebagai model prediksi untuk interval waktu pengambilan sampel, T_s . Model ini kemudian diaplikasikan untuk meramal nilai arus beban di masa yang akan datang dengan memperhitungkan vektor tegangan dan arus beban yang tercatat pada waktu sampel ke- k . Berdasarkan persamaan yang telah disebutkan, perubahan arus beban terhadap waktu, di/dt , dapat dinyatakan melalui metode pendekatan *forward Euler* yang tertera dalam persamaan 2.24:

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad 2.24$$

Persamaan 2.25 memprediksi arus beban untuk setiap nilai vektor tegangan $v(k)$ yang dibuat oleh *inverter* pada waktu $k+1$ jika disubstitusikan ke dalam persamaan .

$$i^p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} (v(k) - e(k)) \quad 2.25$$

Dimana $e(k)$ menunjukkan estimasi *back-emf* yang ditulis dengan persamaan 2.26.

$$e(k) = v(k-1) - \frac{L}{T_s} i(k) - \left(R - \frac{L}{T_s}\right) i(k-1) \quad 2.26$$

2.6.2 Cost Function

Cost function (g) adalah kunci model kendali prediktif ini karena memungkinkannya untuk menemukan keadaan *switching* yang optimal dengan nilai error cost function yang paling rendah.

Dalam penelitian ini, parameter arus adalah parameter yang digunakan pada persamaan *cost function*, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 2. 27 berikut:

$$g = |i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^p| + |i_{\beta}^* - i_{\beta}^p| \quad 2. 27$$

Dimana i_{α}^* dan i_{β}^* merupakan bilangan *real* dan bilangan *imaginer* dari arus referensi, sedangkan i_{α}^p dan i_{β}^p merupakan bilangan *real* dan bilangan *imaginer* dari arus prediksi.

Penelitian ini menggunakan *output* dari metode kendali MPC untuk mengatur metode pensaklaran konverter pada filter aktif.

2.7 Beban

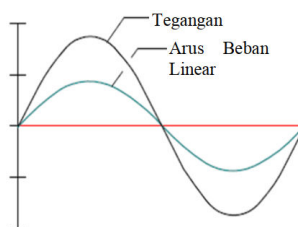
Beban listrik dapat dikategorikan berdasarkan cara mereka menarik arus dari catu daya. Beban linier menarik arus secara proporsional dengan tegangan, mempertahankan impedansi yang konstan, sedangkan beban non-linier memiliki impedansi yang berubah dengan tegangan, yang menyebabkan penarikan arus non-sinusoidal meskipun disuplai dengan tegangan sinusoidal (Wang & Blaabjerg, 2019).

Beban linier hanya menghasilkan arus sinusoidal fundamental ketika disuplai oleh sumber sinusoidal pada frekuensi fundamental, dan umum terjadi di lingkungan perumahan dan komersial, serta pada motor induksi dan motor sinkron.

Beban non-linier, seperti beban elektronik, penggerak kecepatan yang dapat disesuaikan, dan tungku busur, menghasilkan harmonisa dan berbeda dari beban linier.

2.7.1 Beban Linier

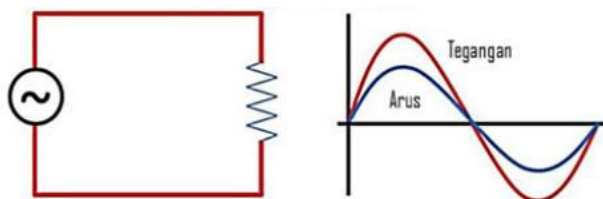
Beban linier merupakan tipe beban dengan impedansi konstan, memastikan proporsionalitas antara arus dan tegangan di setiap momen, seperti yang digambarkan pada Gambar 2. 16. Sesuai prinsip hukum Ohm, hubungan arus dan tegangan bersifat linear. Jika beban menerima tegangan bentuk sinus, maka arus yang dihasilkan juga sinusoidal dan tidak mengalami distorsi atau menciptakan harmonisa. Contoh dari beban linear meliputi lampu pijar dan elemen pemanas, serta beban lainnya yang tidak terhubung melalui perangkat pengubah daya.



Gambar 2. 16 Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Beban Linier

a. Beban Resistif

Sebuah beban resistif merupakan beban dengan sifat resistansi yang murni, misalnya elemen pemanas atau lampu pijar. Komponen ini, yaitu resistor, berperan menghambat laju elektron yang mengalir melaluinya, yang menyebabkan konversi energi listrik menjadi energi termal. Saat gelombang arus dan tegangan listrik melintasi resistor, keduanya akan selaras dalam mencapai puncak ataupun nilai terendah, sehingga tidak terjadi pergeseran fasa pada arus atau tegangan dalam jaringan listrik. Gambaran rangkaian dan profil gelombang beban dengan sifat resistansi ditunjukkan pada Gambar 2. 17.



Gambar 2. 17 Rangkaian dan Bentuk Gelombang Beban Resistif

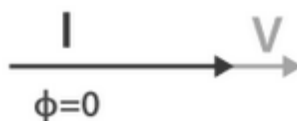
Persamaan impedansi beban resistif dapat dilihat pada persamaan 2. 28:

$$Z = R \quad 2. 28$$

Dengan :

Z = Impedansi (Ω)

R = Resistansi (Ω)



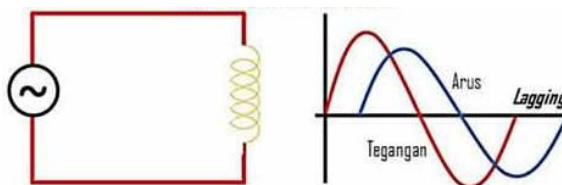
Gambar 2. 18 Diagram phasor beban resistif

Pada Gambar 2. 18 menunjukkan diagram phasor beban resistif, dalam diagram phasor beban resistif, vektor tegangan (V) ditetapkan sebagai vektor referensi pada sumbu real atau sumbu 0° . Vektor arus (I) digambarkan sefase dengan vektor tegangan (V) karena tidak terdapat pergeseran fase antara tegangan dan arus pada beban resistif murni. Dengan demikian, vektor arus (I) terletak pada garis yang sama dengan vektor tegangan (V) pada sumbu real.

b. **Beban Induktif**

Beban induktif adalah beban yang ditimbulkan oleh lilitan kawat, juga dikenal sebagai kumparan, yang ditemukan di berbagai alat listrik, seperti motor, transformator, dan relay. Alat listrik ini membutuhkan kumparan karena kumparan

menghasilkan medan magnet, yang kemudian berfungsi sebagai beban induktif pada rangkaian arus listrik AC. Selain itu, kumparan menghambat laju arus, yang mengubah posisi gelombang arus menjadi tertinggal (*lagging*) sebesar 90 derajat dari gelombang tegangan. Gambar 2. 19 menunjukkan rangkaian dan bentuk gelombang beban induktif.



Gambar 2. 19 Rangkaian dan Bentuk Gelombang Beban Induktif

Persamaan impedansi beban induktif dapat dilihat pada persamaan 2. 29:

$$Z = X_L = \omega L \quad 2. 29$$

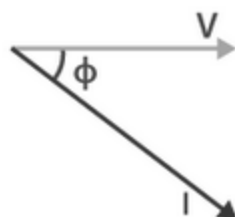
Dengan :

Z = Impedansi (Ω)

X_L = Reaktansi Induktansi (Ω)

ω = frekuensi angular ($2\pi f$)

L = Induktansi (H)



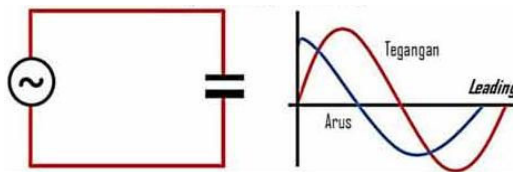
Gambar 2. 20 Diagram phasor beban induktif

Pada Gambar 2. 20 merupakan diagram phasor beban induktif, vektor tegangan (V) ditetapkan sebagai vektor referensi pada sumbu real atau sumbu 0° . Vektor arus (I) tertinggal dari vektor tegangan (V) dengan sudut fase tertentu (ϕ)

akibat sifat induktif beban yang menyebabkan pergeseran fase antara tegangan dan arus. Sudut fase (ϕ) antara vektor tegangan (V) dan vektor arus (I) bernilai positif, yang mengindikasikan arus tertinggal dari tegangan.

c. Beban Kapasitif

Berkebalikan dengan beban induktif, beban kapasitif memiliki karakteristik menahan perubahan pada nilai tegangan listrik. Kapasitor berfungsi seperti reservoir yang menampung tegangan dalam durasi tertentu. Efek ini menghasilkan fenomena dimana gelombang arus listrik akan berada di depan (*leading*) tegangan sebanyak 90° . Bisa dilihat detail lebih lanjut mengenai rangkaian serta bentuk gelombang yang terkait dengan beban kapasitif pada Gambar 2. 21 yang tersedia.



Gambar 2. 21 Rangkaian dan Bentuk Gelombang Beban Kapasitif

Persamaan impedansi beban induktif dapat dilihat pada persamaan 2. 30:

$$Z = X_C = \frac{1}{\omega C} \quad 2. 30$$

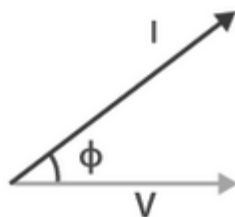
Dengan :

Z = Impedansi (Ω)

X_C = Reaktansi Kapasitansi (Ω)

ω = frekuensi angular ($2\pi f$)

C = Kapasitansi (F)

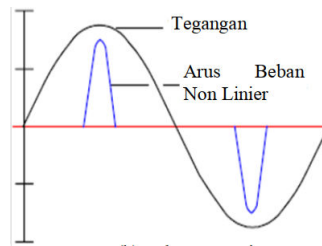


Gambar 2. 22 Diagram phasor beban kapasitif

Pada Gambar 2. 22 menunjukkan diagram *phasor* beban kapasitif, vektor tegangan (V) ditetapkan sebagai vektor referensi pada sumbu real atau sumbu 0° . Vektor arus (I) mendahului vektor tegangan (V) dengan sudut fase tertentu (ϕ) akibat sifat kapasitif beban yang menyebabkan pergeseran fase antara tegangan dan arus. Sudut fase (ϕ) antara vektor tegangan (V) dan vektor arus (I) bernilai negatif, yang mengindikasikan arus mendahului tegangan.

2.7.2 Beban Non Linier

Berlawanan dengan beban linier, beban non linier memiliki impedansi yang berfluktuasi sepanjang setiap siklus input tegangan. Ini berarti arus yang timbul tidak selalu seproporsional dengan tegangan yang diberikan, melanggar asas Hukum Ohm tentang proporsionalitas arus terhadap tegangan. Beban non linier menciptakan gelombang arus yang berbeda dari bentuk gelombang tegangan, seringkali mengalami distorsi, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2. 23. Alat elektronik seperti yang menggunakan banyak komponen semikonduktor merupakan beban non linier umum, mereka terkadang bertindak sebagai saklar selama setiap siklus gelombang tegangan, yang mengakibatkan gelombang arus terdistorsi dan bukan sinusoidal.

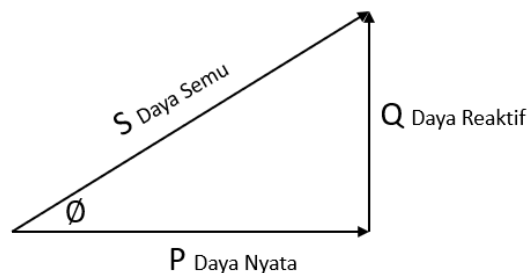


Gambar 2. 23 Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus pada Beban Non Linier

Arus harmonisa adalah gelombang arus sinusoidal berfrekuensi tinggi yang dapat dihasilkan oleh beban non linier.

2.8 Daya Listrik

Daya listrik adalah jumlah energi listrik yang dihasilkan atau dikonsumsi oleh rangkaian setiap satuan waktu. Tegangan listrik dan sumber energi lainnya akan menghasilkan energi, dan beban yang terhubung dengannya akan menyerap energi tersebut. Ada tiga jenis daya listrik: daya nyata (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S).



Gambar 2. 24 Segitiga Daya

Gambar 2. 24 merupakan hubungan antara daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S), yang disebut dengan segitiga daya.

2.8.1 Daya Aktif (P)

Daya aktif merupakan energi yang beban resistif konsumsi. Ini menggambarkan perpindahan energi listrik dari asal ke beban, dimana energi

tersebut diubah menjadi berbagai bentuk lain, contohnya cahaya, gerakan, atau suara. Rumus untuk menghitung daya aktif terdapat pada ekspresi matematika 2. 31:

$$P = V \times I \times \cos \varphi \quad 2. 31$$

Keterangan :

P = Daya Aktif (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus Listrik (A)

$\cos \varphi$ = Faktor Daya

2.8.2 Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif adalah tipe energi yang digunakan untuk memproduksi medan magnetis di dalam kumparan beban yang bersifat induktif. Contohnya, pada motor induksi, medan magnet dari daya reaktif yang ada di kumparan stator digunakan untuk menginduksi rotor, sehingga menyebabkan terbentuknya medan magnet induksi di dalam rotor itu sendiri. Rumus untuk menghitung daya reaktif dijelaskan dalam persamaan 2. 32:

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \quad 2. 32$$

Keterangan :

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (V)

I = Arus Listrik (A)

$\sin \varphi$ = Faktor Reaktif

2.8.3 Daya Semu (S)

Daya Semu, atau yang dikenal pula sebagai daya tampak, merupakan daya yang timbul akibat perkalian nilai rms (root mean square) tegangan dan arus dalam

suatu rangkaian listrik. Daya Semu juga dapat didefinisikan sebagai hasil dari penjumlahan vektorial antara daya aktif dan daya reaktif. Dalam konteks sumber arus bolak-balik (AC), daya semu merupakan total daya yang disalurkan oleh sumber atau yang diserap oleh beban. Representasi matematis daya semu bisa dilihat pada persamaan 2. 33:

$$S = V \times I \quad 2. 33$$

Keterangan :

S = Daya Semu (VA)

V = Tegangan (V)

I = Arus Listrik (A)

2.9 *Field Programmable Gate Array (FPGA)*

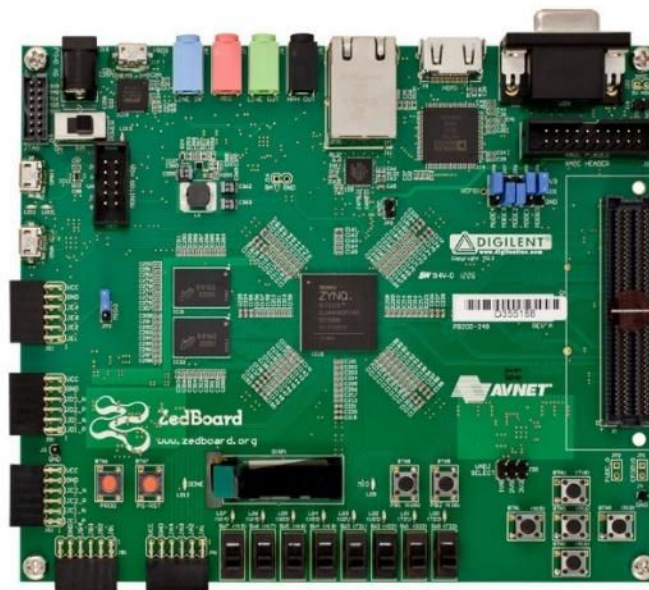
Field Programmable Gate Array (FPGA) merupakan perangkat elektronika yang terintegrasi dan terbuat dari bahan semikonduktor, yang dirancang dengan kemampuan untuk diprogram ulang secara berulang kali oleh pengguna dalam penerapan rangkaian digital. Istilah "*Field Programmable*" mengindikasikan bahwa perangkat ini dapat diprogram di tempat, tanpa perlu dimasukkan ke fasilitas laboratorium dengan bantuan komputer. Sementara itu, "*Gate Array*" mengacu pada kenyataan bahwa FPGA terdiri dari sejumlah gerbang digital, dengan kemungkinan konfigurasi interkoneksi antar gerbang yang dapat disesuaikan sesuai kebutuhan.

FPGA memiliki komponen gerbang terprogram (*programmable logic*) dan sambungan terprogram. Jenis gerbang logika umum seperti (AND, OR, XOR, dan NOT) termasuk dalam komponen gerbang terprogram FPGA. Komponen gerbang terprogram termasuk jenis fungsi matematis dan kombinatorik yang lebih

kompleks, seperti *decoder*, *adder*, *subtractor*, *multiplier*, dan sebagainya. Di FPGA, blok blok komponen dapat mengandung elemen memori (*register*), seperti flip-flop dan *random access memory* (RAM).

2.9.1 FPGA Zedboard

ZedBoard, yang dikembangkan oleh Avnet dan Digilent, adalah platform pengembangan yang serbaguna yang berfokus pada *Xilinx Zynq-7000 System-on-Chip (SoC)*. ZedBoard menghubungkan desain perangkat lunak dan perangkat keras dengan mengintegrasikan prosesor ARM Cortex-A9 *dual-core* dengan *fabric FPGA Artix-7*. Arsitektur *hybrid* ini memungkinkan co-design perangkat keras dan perangkat lunak, menjadikannya ideal untuk sistem tertanam, pemrosesan sinyal digital, dan *prototyping* cepat di lingkungan akademik dan industri pada .



Gambar 2. 25 Zedboard

Pada Gambar 2. 21 merupakan bentuk dari FPGA *Zedboard*, *Zedboard* memiliki tinjauan arsitektur sebagai berikut:

- a. Zynq-7000 SoC: Menggabungkan *processing system* (PS) dan *programmable logic* (PL) pada satu *chip*.
 - 1) Processing System (PS): Dual ARM Cortex-A9 *cores* (667 MHz), 512 MB DDR3 *memory*, dan *standard peripherals* (USB, *Ethernet*, GPIO).
 - 2) Programmable Logic (PL): Artix-7 FPGA (XC7Z020) with 85k *logic cells*, 4.9 Mb block RAM, dan 220 DSP *slices for custom hardware acceleration*.
- b. Periferal dan Ekspansi:
 - 1) Antarmuka pada Zedboard: HDMI, VGA, USB OTG, SD *card*, dan *Gigabit Ethernet*.
 - 2) *Header* ekspansi (PMOD, FMC) untuk menambahkan sensor, tampilan, atau modul komunikasi.

2.10 MATLAB dan Simulink

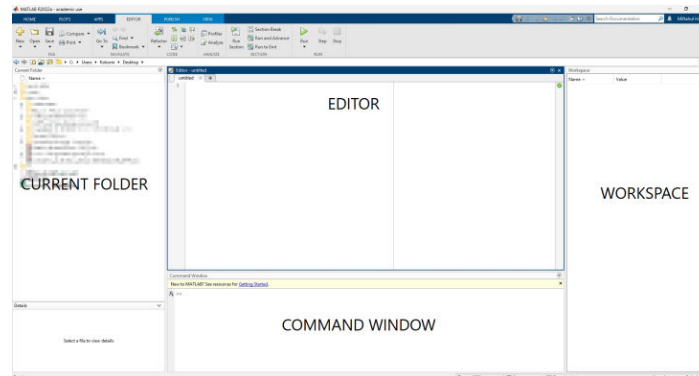
MATLAB dan Simulink adalah alat yang sangat penting dalam penelitian dan pengembangan di berbagai bidang ilmu pengetahuan dan teknik, dikarenakan Integrasi yang kuat antara MATLAB dan Simulink memungkinkan pengguna untuk memanfaatkan kedua alat ini secara bersamaan, sehingga meningkatkan efisiensi dalam pengembangan dan pengujian model.

2.10.1 MATLAB

MATLAB, juga dikenal sebagai Matrix Laboratory, adalah platform pemrograman yang dikembangkan oleh MathWorks Inc. yang ditujukan untuk pemrograman berbasis matriks (Tjolleng, 2017).

MATLAB banyak digunakan pada :

- a. Analisis data
- b. Matematika dan Komputasi
- c. Pengembangan dan Algoritma
- d. Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan prototipe
- e. Pengembangan aplikasi teknik



Gambar 2. 26 Tampilan Utama MATLAB

Pada Gambar 2. 26 merupakan tampilan utama pada saat membuka aplikasi MATLAB. Secara umum, layar utama MATLAB memiliki beberapa bagian penting yaitu:

- a. Current Directory

Berfungsi untuk mengakses dan menampilkan isi dari direktori kerja saat menggunakan MATLAB.

- b. Editor

Digunakan untuk membuat M-file yang akan dipakai untuk membuat atau mengedit program yang dijalankan oleh MATLAB.

- c. Command Window

Digunakan untuk menjalankan barisan-barisan program yang ditulis secara langsung di jendela ini melalui editor.

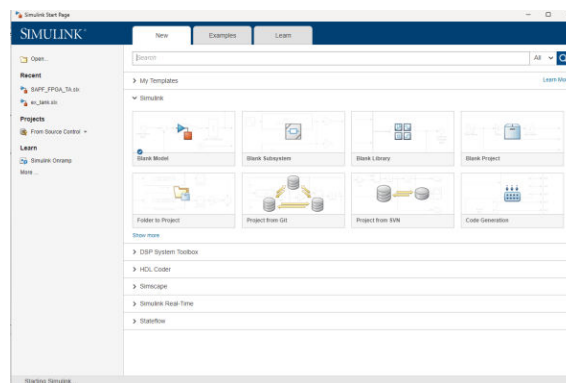
d. Workspace

Berisi informasi tentang variabel yang disimpan berdasarkan program yang dibuat.

2.10.2 Simulink

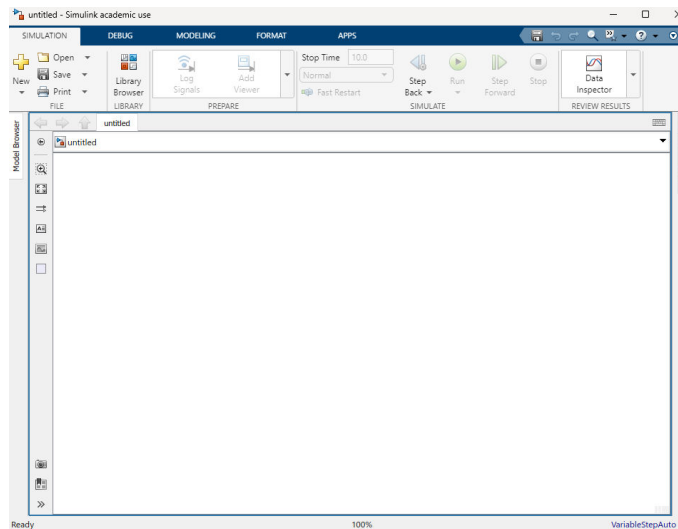
Sebagai bagian dari MATLAB, Simulink adalah lingkungan pemrograman yang memungkinkan pemodelan, simulasi, dan analisis sistem dinamis dengan antarmuka grafis. Banyak elemen diagram blok, seperti fungsi transfer dan penjumlahan persimpangan, dan perangkat *input* dan *output* virtual, seperti osiloskop dan generator fungsi, dapat digunakan untuk menampilkan sistem di layar simulasi.

Membuka jendela Simulink dapat dilakukan melalui pemilihan ikon Simulink yang terletak di *menu bar Home*, atau dengan memasukkan perintah "simulink" pada jendela perintah. Selanjutnya, tampilan awal Simulink akan muncul seperti pada Gambar 2. 27.



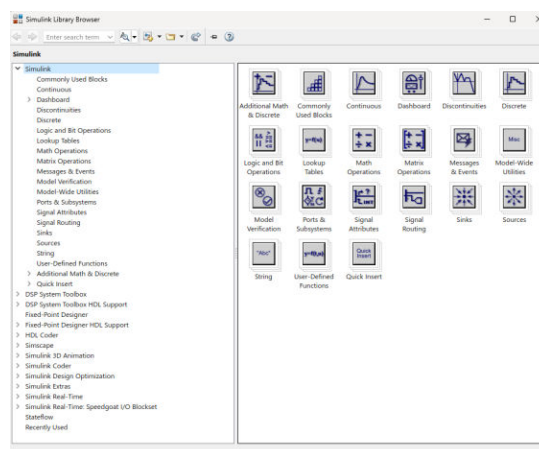
Gambar 2. 27 Jendela Awal Simulink

Dalam Simulink, beragam templat tersedia untuk digunakan. Untuk membuka berkas yang sudah ada, pilih "*Open*", sedangkan untuk menginisiasi pembuatan model sistem baru dari dasar, memilih "*Blank Model*" pada tampilan yang disediakan, maka akan muncul tampilan seperti pada Gambar 2. 28.



Gambar 2. 28 Tampilan kerja Simulink

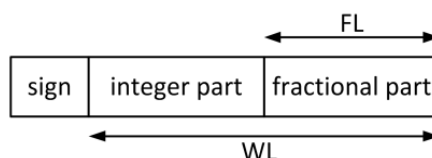
Jika ingin membuat pemodelan dengan Simulink, untuk menjalankannya diperlukan blok komponen. Untuk melakukan ini, klik ikon *library browser* di menu bar Simulink, maka akan melihat tampilan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 29. Pada gambar tersebut, sisi kiri menampilkan *tree pane*, yang menampilkan semua library Simulink yang sudah terinstall, sedangkan sisi kanan menampilkan *contents pane*, yang menampilkan blok-blok yang ada di dalam library yang telah dipilih pada tree pane. Setelah melihat *library browser*, pilih blok komponen yang dibutuhkan.

Gambar 2. 29 Simulink *Library Browser*

2.11 Fixed-Point

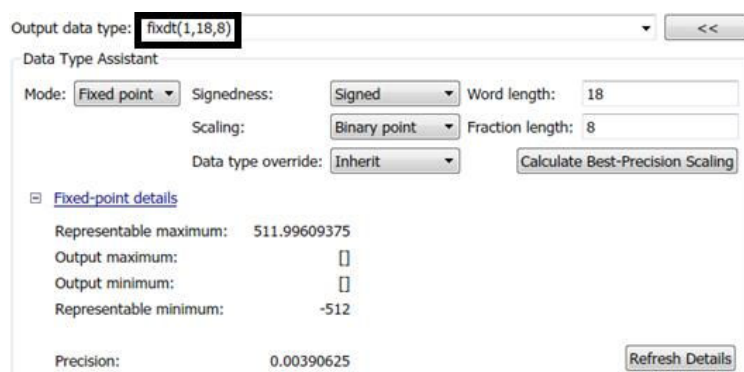
Dalam perangkat keras digital, angka diwakili sebagai tipe data titik tetap. Dalam pemrograman FPGA, pengaturan nilai *fixed point* berdampak besar pada latensi komputasi, penggunaan sumber daya FPGA, dan presisi data.

Dalam representasi *fixed point*, terdiri dari tiga bagian. Itu terdiri dari bidang sign yang hanya terdiri dari dua bilangan, satu untuk menunjukkan angka positif dan satu untuk menunjukkan angka negatif; bidang bulat pada bagian *Word Length* (WL), dan bidang pecahan, di mana posisi angka berada setelah titik desimal pada bagian *Fraction Length* (FL). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 30.



Gambar 2. 30 Struktur *Fixed Point*

(Kovacs dkk., 2017)



Gambar 2. 31 Contoh Pengaturan Fixed Point pada Blok Simulink

Dalam Gambar 2. 31 menunjukkan contoh pengaturan nilai titik tetap pada blok yang digunakan dalam simulink. Pada bagian yang ditandai, angka "1" menunjukkan nilai negatif, "18" menunjukkan panjang kata yang dapat menampung nilai dari -512 hingga 511.99609375, dan "8" menunjukkan panjang

pecahan yang digunakan untuk mengatur presisi pecahan, dengan nilai yang lebih besar sebanding dengan presisi.

2.12 *Hardware-in-the-Loop*

Hardware-in-the-Loop merupakan metode pengujian dimana perangkat lunak (*software*) dijalankan pada perangkat keras (*hardware*) target yang sebenarnya (Mihalič dkk., 2022), sementara lingkungan eksternal atau sistem yang berinteraksi dengan *hardware* tersebut disimulasikan secara *real-time*.

Karakteristik utama HIL meliputi:

- 1) Konfigurasi Sistem
 - a) Software berjalan pada hardware target sebenarnya;
 - b) Lingkungan disimulasikan menggunakan *simulator real-time*;
 - c) Memerlukan *interface hardware* untuk komunikasi.
- 2) Aspek Pengujian
 - a) Validasi performa *real-time*;
 - b) Verifikasi integrasi hardware-software;
 - c) Pengujian kondisi batas dan penanganan kesalahan.
- 3) Keunggulan Teknis
 - a) Dapat mendeteksi masalah *timing* dan hardware;
 - b) Memungkinkan pengujian kondisi ekstrim yang aman;
 - c) Mendukung *automated testing* dan validasi.
- 4) Implementasi
 - a) Memerlukan *simulator* HIL khusus;
 - b) *Interface I/O* untuk komunikasi dengan *hardware*;
 - c) *Tools* untuk monitoring dan analisis real-time

2.13 Penelitian Terkait

Tabel 2. 4 menunjukkan penelitian sebelumnya yang terkait dengan perancangan kendali konverter untuk filter aktif, yang telah dilakukan dan dipublikasikan dalam berbagai jurnal.

Tabel 2. 4 Penelitian Terkait (State of the Art)

No	Judul Jurnal	Peneliti, Tahun	Pembahasan Jurnal
1	Perancangan Kendali Konverter Pada Filter Aktif Menggunakan Metode Model Predictive Control Berbasis Fpga	(Gunawan, Risna, 2023)	Jurnal ini mengkaji tentang dampak harmonisa pada sistem jaringan listrik, dan kendali konverter pada filter aktif menggunakan metode MPC, Jurnal ini juga meneliti ketahanan sistem kendali MPC yang dirancang untuk FPGA dalam mengurangi harmonisa dengan kesimpulan bahwa sistem dapat bekerja efektif pada beban maksimal di bawah 270VA. Akan tetapi pada jurnal ini metode MPC berbasis FPGA tersebut belum bisa menyamai hasil dari filter aktif pada model simulink dikarenakan terjadinya penyesuaian dari program simulink ke program FPGA.
2	FPGA Controlled 3phase Voltage Source Inverter	(A. A. Gautam & Laxmi, 2020)	Penelitian dalam jurnal ini berfokus pada penerapan FPGA Xilinx Spartan guna mengatur inverter sumber tegangan tiga fasa. Penerapan ini langsung diterapkan pada perangkat keras. Namun, jurnal

			ini tidak menguraikan teknik pengendalian yang diterapkan.
3	<i>Active Filter Based on Four-Leg Inverter and PQ Theory</i>	(El-Sotouhy dkk., 2019)	Penelitian yang diuraikan dalam jurnal ini menggali penggunaan simulasi filter daya aktif dengan inverter empat kaki dalam sistem empat kawat. Kemampuannya terletak pada penyaringan arus harmonik dari beban nonlinier. Teori pq diadopsi untuk menetralkan komponen arus yang tidak dikehendaki di sumber suplai. Selain itu, jurnal ini membandingkan antara metode <i>Hysteresis Current Controller</i> dan <i>Three-Dimensional Space Vector Modulation</i> .
4	<i>Implementation Of Finite Set Model Predictive Current Control for Shunt Active Filter</i>	(Cherif dkk., 2018)	Kajian yang tertuang dalam jurnal ini mengulas tentang uji coba simulasi dan validasi dari efisiensi metode <i>Finite Set Model Predictive Current Control</i> (FS-MPCC) ketika diterapkan pada Filter Aktif Shunt. Metode ini menggunakan <i>Multivariabel Filter</i> (MVF) secara langsung untuk menarik komponen fundamental dari arus dan tegangan dalam jaringan guna menghasilkan arus referensi.
5	<i>HIL Co-Simulation of Finite Set-</i>	(Singh dkk., 2018)	Dalam jurnal ini, dibahas penggunaan metode <i>Finite Set Model Predictive Current Control</i> (FS-

	<i>Model Predictive Control Using FPGA for a Three-Phase VSI System</i>		MPC) untuk mengatur aliran arus pada beban dalam sistem Inverter Sumber Tegangan (VSI) tiga fasa. Sistem dimodelkan dengan menggunakan MAT-LAB / Simulink dan Xilinx <i>System Generator</i> (XSG), dan kemudian diuji dengan simulasi <i>Hardwae-in-the-Loop</i> (HIL) memanfaatkan FPGA <i>Zed-board Xilinx Zynq-7000 ARM</i> , demi mencapai konversi daya yang terkontrol pada sistem VSI tiga fasa dengan kondisi beban motor.
6	<i>Shunt Active Filter for Harmonic Compensation Using Fuzzy Logic Technique</i>	(Chavan dkk., 2018b)	Studi yang dimuat dalam jurnal ini mengkaji metode eliminasi harmonik arus yang dihasilkan oleh beban nonlinier dengan penerapan filter aktif paralel. Dalam penelitiannya, jurnal ini memanfaatkan teori arus aktif instan dan arus reaktif instan (i_d dan i_q) untuk mengekstrak arus referensi dan menggunakan teknik kendali logika fuzzy untuk mengendalikan filter aktif tersebut.
7	<i>Finite Control Set Model Predictive Control for Dynamic Reactive Power</i>	(Ferreira dkk., 2018)	Penelitian yang terdapat dalam jurnal ini mengeksplorasi penerapan metode <i>Finite Control Set - Model Predictive Control</i> (FCS-MPC) yang digunakan untuk mengompensasi daya reaktif secara

	<i>Compensation with Hybrid Active Power Filter</i>		dinamis melalui penggunaan filter aktif <i>hybrid</i> . Simulasi model dari penelitian ini dilaksanakan menggunakan MATLAB/Simulink.
8	<i>Automatic Optimization and Control of Power Factor, Reactive Power and Reduction of THD for Linear and Nonlinear Load by using Arduino Uno</i>	(Jarad dkk., 2018)	Dalam studi yang dirinci oleh jurnal ini, dibahas teknik peningkatan kualitas daya, termasuk penyempurnaan faktor daya, daya reaktif, serta penurunan <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD), dengan memanfaatkan Arduino UNO. Arduino dikonfigurasi sebagai sistem yang dapat mendeteksi secara otomatis kondisi faktor daya apakah <i>leading</i> atau <i>lagging</i> . Para peneliti menambah kapasitor secara seri untuk meningkatkan faktor daya dan memasang filter aktif <i>shunt</i> untuk menekan THD, yang memberikan hasil memuaskan pada berbagai macam beban.
9	<i>Fundamental Refence Signal Generation for Shunt Active Filter for Harmonic and Reactive Power Mitigation using Xilinx</i>	(Sriranjani & Jayalalitha, 2017)	Studi yang tersaji dalam jurnal ini berfokus pada pembuatan filter aktif shunt yang bertujuan mengurangi harmonisa serta daya reaktif, menggunakan metode SRF dalam pembuatan arus referensi. Sistem kendali konverter yang diadopsi adalah kendali histeresis yang diintegrasikan dalam model MATLAB Xilinx. Model yang sudah

	<i>System Generator</i>		dibangun kemudian direalisasikan langsung ke dalam FPGA Xilinx Spartan 3A, dan hasilnya ditampilkan melalui Precision Power Analyzer WT3000.
10	<i>FPGA Implementation of Open-Loop Controller for Five-Level Three Phase Modular Multilevel Converter</i>	(Fatunmbi dkk., 2017)	Penelitian dalam jurnal ini bertujuan mengeksplorasi konsep Hardware-in-the-Loop yang diterapkan dalam simulasi <i>modular multilevel converter</i> (MMC). MMC tersebut diproses simulasi dalam MATLAB/Simulink. Kendali diterapkan pada FPGA Altera DE2 yang bertugas menghasilkan fungsi switching yang diperlukan untuk pengendalian MMC, memungkinkan pengujian hasil yang diinginkan dengan cara yang real-time dan efisien.

Yang membedakan penelitian ini dengan yang sudah ada adalah Menggunakan FPGA *Zedboard* sebagai unit under test (UUT) atau device under test (DUT) dalam konsep pengujian *software in the loop* dengan menampilkan *Zedboard* sebagai kendali pada GCI yang berfungsi sebagai filter daya aktif menggunakan metode FCS-MPC (Finite Control State-MPC), untuk mereduksi arus harmonisa pada jaringan listrik empat kawat.