

Shunt Active Power Filter Untuk Peredaman Harmonisa Pada Inverter V/F Konstan Pengatur Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa

Fahmi Naufala Mumtaz^{1*}, Indhana Sudiharto², Ony Asrarul Qudsi³

¹²³*Politeknik Elektronika Negeri Surabaya*

*E-mail: fahminaufala20@gmail.com

Abstract

Electric drive for three-phase induction motor can save operational costs in the industry. The constant V/F is a method that only regulates voltage and frequency on three-phase induction motor. At the same time, the V/F inverter can cause harmonics during the process of electrical drive and these harmonics will reduce the power factor by increasing total harmonic distortion (THD). The presence of harmonics in the system can harm the power system and can potentially damage the equipment. This article proposes an active filter that can reduce harmonics in a V/F inverter to control the motor speed. The active filter used in this article is a shunt active power filter (SAPF) with a current injection controller named PWM Hysteresis Current Control and DC-link Voltage controller using a Fuzzy Logic Controller (FLC). The simulation results show that before the SAPF installation, the THDi value generated by the inverter V/F has not reached the tolerable standard value by IEEE 519, which is less than 5%. By using PI-SAPF, the resulting THDi can be less than 2.75% on 370W, 4000W, and 7500W motors. While FLC-SAPF can reduce harmonics even better, the THDi produced is less than 0.6% on 370W, 4000W, and 7500W motors.

Keywords: shunt active power filter, PWM hysteresis current control, fuzzy logic controller, three-phase induction motors, V/F inverter.

Abstrak

Pengemudian elektrik untuk motor induksi tiga fasa mampu menghemat biaya operasional di industri. Metode V/F konstan adalah pengaturan yang hanya mengatur besaran tegangan dan frekuensi pada motor induksi tiga fasa. Pada saat yang sama, inverter V/F konstan dapat menyebabkan harmonisa pada saat melakukan pengemudian elektrik dan harmonisa ini akan mengurangi faktor daya dengan meningkatkan *total harmonic distortion* (THD). Kehadiran harmonisa dalam sistem dapat berdampak negatif pada sistem tenaga dan dapat berpotensi merusak peralatan. Dalam artikel ini diusulkan suatu filter aktif yang mampu mengurangi harmonisa pada inverter V/F pengatur kecepatan motor. Filter aktif yang digunakan adalah jenis *shunt active power filter* (SAPF) dengan pengontrol injeksi arus berupa *PWM Hysteresis Current Control* dan pengontrol *DC-link Voltage* menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum pemasangan SAPF, nilai THDi yang dihasilkan oleh inverter V/F masih belum memenuhi standar yang ditoleransi oleh IEEE 519 yaitu kurang dari 5%. Ketika menggunakan PI-SAPF, THDi yang dihasilkan bisa kurang dari 2,75% baik pada motor 370 W, 4000 W, maupun 7500 W. Sedangkan FLC-SAPF dapat meredam harmonisa lebih baik lagi, THDi yang dihasilkan kurang dari 0,6% baik pada motor 370 W, 4000 W, maupun 7500 W.

Kata kunci: shunt active power filter, PWM hysteresis current control, fuzzy logic controller, motor induksi tiga fasa, inverter V/F.

1. Pendahuluan

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan dalam kegiatan industri karena memiliki banyak keunggulan. Menurut Saqib Jamshed Rind[1], motor induksi merupakan pilihan dengan penilaian yang paling tinggi untuk digunakan sebagai penggerak. Dibandingkan dengan motor jenis lain dengan ukuran dan daya yang sama, motor induksi lebih unggul dalam hal bertenaga besar, lebih murah, tidak ada emisi, tidak menggunakan magnet atau logam langka lainnya, tidak memercikkan bunga api, dan bebas perawatan menjadi faktor pilihan utama para pengguna motor tersebut.

Motor induksi secara struktur dan kendali standar dirancang untuk bekerja pada kecepatan nominal sehingga sulit untuk mengendalikan kecepatan sesuai yang dibutuhkan karena akan mengubah konstruksi motor. Metode kendali V/F sangat baik diterapkan dalam pengendalian kecepatan yang beragam atau torsi yang beragam. Prinsip dasar kendali ini adalah menjaga perbandingan tegangan dengan frekuensi (V/F) selalu konstan, sehingga mempertahankan medan magnet di celah udara (*air gap*) motor induksi[2]. Pada saat yang sama, inverter dengan metode V/F juga dapat menyebabkan harmonisa pada saat melakukan pengemudian elektrik dan harmonisa ini akan mengurangi faktor daya dengan meningkatkan *total harmonic distortion* (THD). Kehadiran harmonisa dalam sistem dapat berdampak negatif pada sistem tenaga dan dapat berpotensi merusak peralatan.

Harmonisa pada beban non-linier dapat diatasi dengan menggunakan *Active Power Filter* (APF) berbasis *Voltage Source Converter* (VSC) dengan penyimpanan energi kapasitif[3].

Pada tahun 1971, Sasaki dan Machida mengusulkan konsep *Shunt Active Power Filter* (SAPF) untuk menghilangkan harmonisa arus dalam sistem tenaga[4]. Tujuan umum SAPF adalah untuk mengurangi distorsi harmonisa yang disebabkan oleh beban non-linier dan meningkatkan faktor daya untuk beban reaktif.

Kinerja efisien dari SAPF pada dasarnya sangat bergantung pada dua area kontrol penting yaitu ekstraksi kompensasi arus referensi dan pengontrol arus untuk PWM[5]. Dalam komputasi kompensasi arus referensi memerlukan proses dekomposisi arus terdistorsi yang dihasilkan oleh beban non-linier dan menyortir komponen yang tidak berguna[6].

Pada tahun 1983 Akagi H mengajukan teori daya reaktif sesaat tiga fasa (teori p-q) yang berhasil diterapkan dalam deteksi harmonisa dan reaktif untuk rangkaian tiga fasa. Sedangkan inverter V/F dalam pengaplikasiannya di industri terkadang bersumber dari tegangan satu fasa sehingga teori p-q memerlukan penyesuaian perhitungan bila akan digunakan pada sistem satu fasa. Dua metode utama dari penyesuaian ini adalah konstruksi tiga fasa dan konstruksi dua fasa. Metode pertama adalah membangun sistem tiga fasa berdasarkan tegangan dan arus dalam rangkaian satu fasa. Tetapi algoritmanya rumit. Metode kedua, algoritma konstruksi dua fasa lebih sederhana karena mengubah komponen arus satu fasa secara langsung menjadi dua fasa[7].

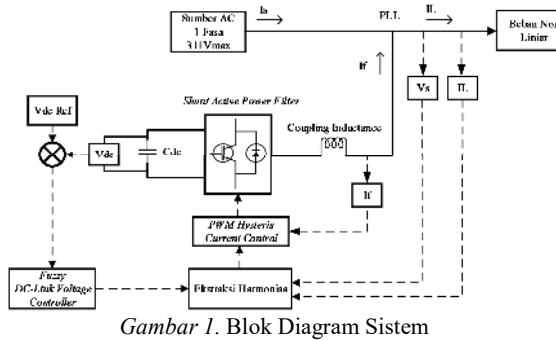
Metode yang dikemukakan oleh Akagi merupakan pengembangan dari teori daya reaktif sesaat (α - β) sebelumnya. Transformasi Clarke diterapkan untuk mengubah besaran koordinat tiga fasa menjadi besaran ekuivalen dua fasa α - β [6].

Sebuah teori p-q yang diterapkan untuk sistem satu-fasa akan digunakan untuk mendapatkan referensi arus kompensasi dalam simulasi dengan beban inverter V/F dalam artikel ini. Simulasi ini bertujuan untuk mereduksi harmonisa pada arus sumber sehingga memenuhi standar yang ditoleransi oleh IEEE 519.

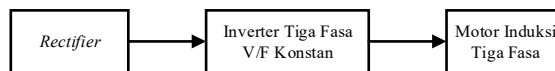
2. Metoda Penelitian

Sistem yang diusulkan dalam artikel ini bertujuan untuk membuat suatu filter aktif yang mampu mengurangi harmonisa pada beban non-linier berupa inverter V/F pengatur kecepatan motor. Filter aktif yang digunakan adalah jenis *shunt active power filter* (SAPF)

dengan pengontrol injeksi arus referensi berupa *PWM Hysteresis Current Control* dan pengontrol *DC-link Voltage* menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Gambar 1 di bawah ini adalah blok diagram sistem yang diusulkan.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem

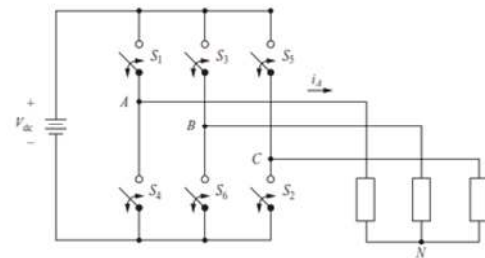


Gambar 2. Blok Diagram Beban Non-linier

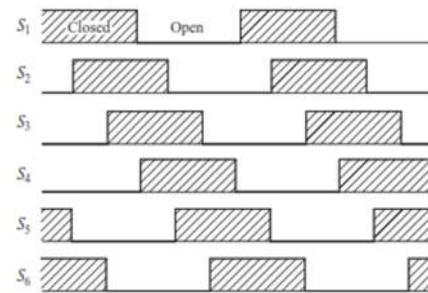
Gambar 2 adalah blok diagram dari beban non-linier yang digunakan dalam sistem. Di mana, inverter V/F memerlukan sumber tegangan DC, sehingga tegangan satu fasa disearahkan terlebih dulu menggunakan *rectifier*. Output dari *rectifier* menjadi suplai untuk inverter tiga fasa V/F konstan yang terhubung dengan motor induksi tiga fasa.

2.1. Inverter V/F Konstan

Inverter tiga fasa dengan metode V/F konstan digunakan untuk pengaturan kecepatan pada motor induksi tiga fasa. Jenis inverter yang digunakan adalah *VSI (Voltage Source Inverter)* dengan fungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC sebagai suplai motor induksi tiga fasa. Metode V/F konstan menggunakan pensaklaran dengan *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)*. Rangkaian inverter tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 3 dan sekuensial pensaklaran SPWM ditunjukkan pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 3. Rangkaian Inverter Tiga Fasa

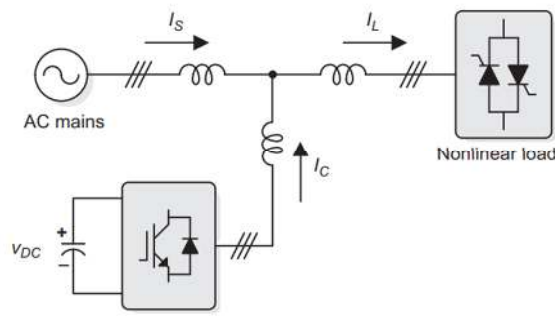


Gambar 4. Sekuensial pensaklaran pada inverter tiga fasa

Pada saat yang sama, inverter V/F juga dapat menyebabkan harmonisa pada saat melakukan pengemudian elektrik dan harmonisa ini akan mengurangi faktor daya[8]. Akibat gangguan ini kinerja motor akan terpengaruh dalam sistem ini. Efek harmonisa pada motor induksi adalah getaran bising, defleksi poros, panas berlebih, rugi-rugi berlebih, torsi harmonisa, osilasi, efisiensi rendah dan memperpendek umur operasi motor induksi.

2.2. Shunt Active Power Filter

Suatu *active power filter* (APF) dapat diklasifikasikan berdasarkan topologinya seperti *shunt*, *series*, atau *hybrid*. *Shunt Active Power Filter* (SAPF) yang disimulasikan dalam artikel ini banyak digunakan untuk mengkompensasi harmonisa arus, daya reaktif, dan arus beban tidak seimbang[9]. Topologi rangkaian SAPF ditunjukkan pada Gambar 5 berikut ini:



Gambar 5. Topologi SAPF

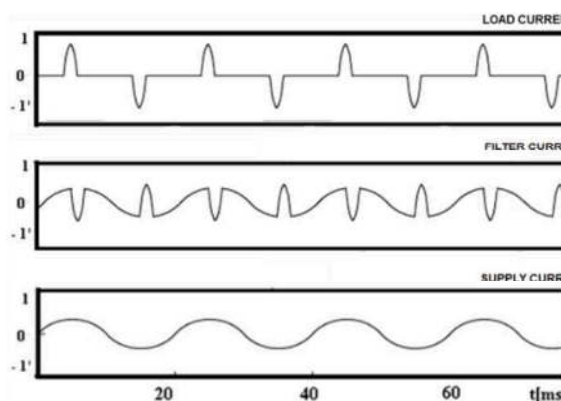
Secara umum, SAPF menggunakan *Voltage Source Converter* (VSC) yang dikontrol dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk menginjeksikan arus kompensasi pada *point of common coupling* (PCC).

SAPF harus menginjeksikan komponen reaktif dan harmonisa kepada arus beban dengan tujuan untuk meredam harmonisa pada arus sumber dan menjadikannya sefasa dengan tegangan sumber sesuai dengan persamaan:

$$i_f(t) = i_L(t) - i_s(t) \quad (1)$$

Keterangan:

i_f	=
Arus filter (A)	=
i_L	=
Arus beban (A)	=
i_s	=
Arus sumber (A)	



Gambar 6. Arus Beban (atas), Arus Filter (tengah), Arus Sumber (bawah)

Dari Gambar 6 di atas dapat dilihat bahwa arus filter akan mengkompensasi arus beban

yang terdistorsi sehingga arus sumber bisa menjadi sinusoidal murni.

2.3. Ekstraksi Harmonisa

Proses ekstraksi harmonisa dapat dilakukan dengan metode dq[10] atau metode ip-iq[5]. Dalam artikel ini menggunakan metode ip-iq karena tegangan sumber yang tidak terdistorsi dan kontrol SAPF disinkronisasi dengan *phase-locked loop* (PLL) untuk menyamakan frekuensi. Keluaran dari PLL berupa nilai cos dan sin dari frekuensi sinyal tiap satuan waktu (ωt). Dimana nilai tersebut yang digunakan sebagai pengali i_α dan i_β sehingga dapat diperoleh nilai ip-iq yang bila ditulis ke dalam persamaan menjadi:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Nilai i_p dan i_q masih mengandung komponen AC yang merepresentasikan nilai harmonisa arus aktif dan reaktif. Diperlukan penggunaan *low-pass filter* untuk menghilangkan komponen AC, sehingga tersisa komponen DC yang merepresentasikan nilai fundamental dari arus aktif dan reaktif pada komponen arus terdistorsi. Sinyal untuk arus referensi hanya memerlukan komponen DC berupa arus I_p dan $-I_q$. Hal ini karena secara ideal arus sumber sudah menyuplai nilai aktif fundamental dari permintaan beban, sedangkan untuk nilai harmonisa dan reaktifnya akan dipenuhi oleh SAPF.

Besarnya nilai arus fundamental diperoleh dari persamaan berikut:

$$i_{fund} = [\sin\omega t \quad -\cos\omega t] [I_p \quad -I_q] \quad (3)$$

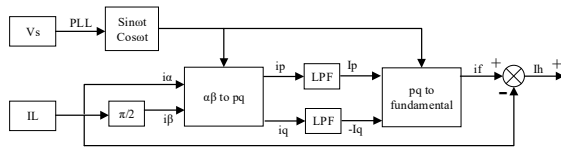
Arus harmonisa dapat dihitung dengan:

$$i_h = i_L - i_{fund} \quad (4)$$

Sedangkan untuk nilai arus reaktif diperoleh dari persamaan berikut:

$$i_q = I_q \cos\omega t \quad (5)$$

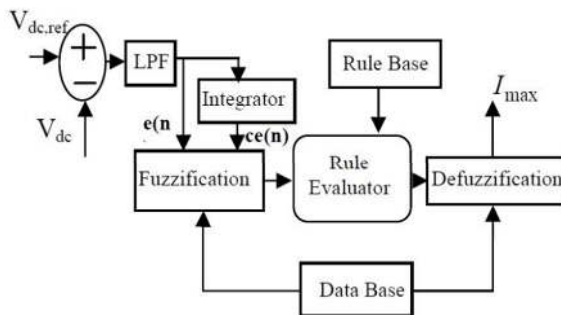
Maka proses ekstraksi harmonisa dapat disederhanakan ke dalam blok diagram seperti pada Gambar 7 berikut ini:



Gambar 7. Blok Diagram Proses Ekstraksi Harmonisa

2.4. Fuzzy DC-link Voltage Controller

Sisi DC VSC yang digunakan dalam SAPF terhubung dengan kapasitor. Kapasitor DC ini memberikan tegangan DC konstan dan daya nyata yang diperlukan untuk menutupi kerugian sistem. Dalam kondisi *steady-state*, daya nyata yang disuplai oleh sumber harus sama dengan permintaan daya nyata beban ditambah daya untuk mengkompensasi rugi-rugi pada filter aktif. Dengan demikian, tegangan kapasitor DC dipertahankan pada nilai referensi. *Fuzzy Logic Controller* (FLC) diterapkan untuk menjaga tegangan konstan melintasi kapasitor dengan meminimalkan kesalahan antara tegangan kapasitor dan tegangan referensi.



Gambar 8. Blok Diagram FLC

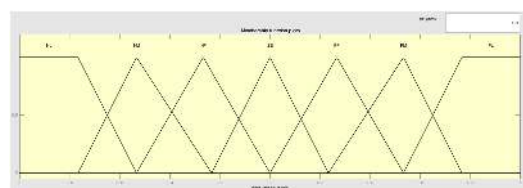
FLC secara sederhana dibangun oleh satu set aturan (*rule based*) berdasarkan pengetahuan manusia tentang perilaku dari sistem. Kontrol ini adalah pilihan yang tepat ketika suatu perhitungan matematika sulit dilakukan. Blok diagram dari FLC yang ditunjukkan pada Gambar 8 terdiri dari komponen sebagai berikut[11]: *Fuzzification*: FLC menggunakan variabel linguistik. Di mana kesalahan antara sinyal referensi dan sinyal keluaran dapat ditetapkan sebagai

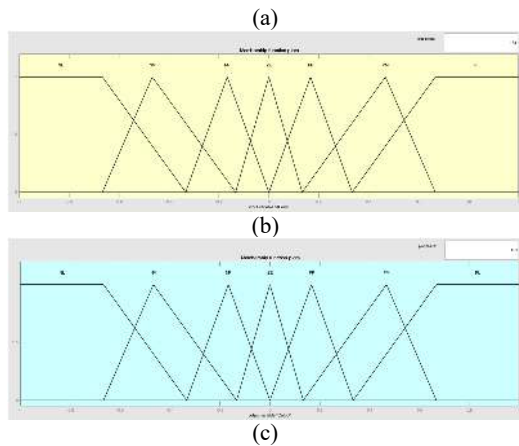
Negative Large (NL), *Negative Medium* (NM), *Negative Small* (NS), *Zero* (ZE), *Positive small* (PS), *Positive Medium* (PM), *Positive Large* (PL). Fungsi keanggotaan segitiga digunakan untuk fuzzifikasi. Proses fuzzifikasi mengubah variabel numerik (bilangan real) menjadi variabel linguistik (bilangan fuzzy). *Rule Evaluator*: FLC menggunakan variabel linguistik bukan nilai numerik. Sehingga operasi dasar pengontrol logika fuzzy menggunakan aturan himpunan fuzzy. *Defuzzification*: Aturan pengontrol logika fuzzy menghasilkan *Output* yang dibutuhkan dalam variabel linguistik (*Fuzzy Number*), sesuai dengan kebutuhan dunia nyata; variabel linguistik harus ditransformasikan ke *Output* yang jelas (bilangan real). Pemilihan strategi ini merupakan kompromi antara akurasi dan intensitas komputasi. *Rule Base*: Basis aturan menyimpan aturan kontrol linguistik yang dibutuhkan oleh evaluator aturan (logika pengambilan keputusan).

Fungsi keanggotaan dari variabel *Input* dan *Output* ditunjukkan pada Gambar 9. Aturan fuzzy IF-THEN yang dibentuk untuk mengendalikan tegangan DC diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Aturan fuzzy IF-THEN

Error (e)	Change of error (de)						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL

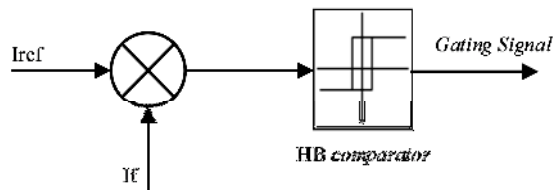




Gambar 9. Fungsi Keanggotaan (a) *error*, (b) *error*, dan (c) *output Fuzzy*

2.5. PWM Hysteresis Current Control

PWM-HCC adalah metode untuk menghasilkan pulsa pemicu yang diperlukan dengan membandingkan sinyal *error* dengan *hysteresis band* (HB) dan digunakan untuk mengontrol VSC sehingga arus keluaran yang dihasilkan dari filter akan mengikuti bentuk gelombang arus referensi. Diagram proses HCC ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Diagram proses PWM Hysteresis Current Control

2.6. Standar Acuan

Pada artikel ini menggunakan standar IEEE 519-2014[12] untuk nilai harmonisa arus yang masih dapat ditoleransi yang ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

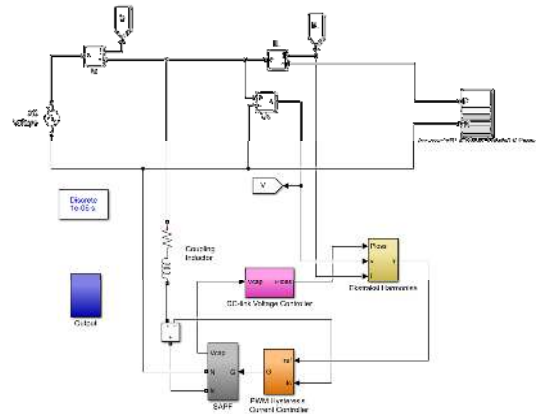
Tabel 2. Batas harmonisa arus untuk sistem dengan rating tegangan 120 V - 69 kV

Maximum harmonic distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonic)						
I_h/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	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

3. Hasil Penelitian

Pada sistem yang diusulkan, pengujian dilakukan dengan simulasi secara menyeluruh dari SAPF menggunakan beban berupa *rectifier* dan inverter V/F terhubung ke motor

induksi tiga fasa menggunakan Simulink MATLAB. Gambar 11 merupakan rangkaian keseluruhan simulasi. Suplai tegangan maksimum sistem adalah 220 V dengan frekuensi 50 Hz.



Gambar 11. Rangkaian Simulasi

Motor yang digunakan terdapat 3 jenis dengan daya sebesar 370 W, 4000 W, dan 7500 W. Spesifikasi lengkap dari motor induksi dan parameter simulasi ditunjukkan pada Tabel 3 berikut ini:

Tabel 3. Parameter Simulasi

Parameter	Nilai		
Tegangan Maksimum	220 V		
Frekuensi	50 Hz		
	Motor Induksi 3 Fasa		
Motor ke	1	2	3
Daya Nominal	370 W	4000 W	7500 W
Tegangan Line-Line	220 V	400 V	400 V
Frekuensi	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Stator Resistance	22,22 ohm	1,405 ohm	0,7384 ohm
Stator Inductance	0,1621 H	0,005839 H	0,003045 H
Rotor Resistance	27,2 ohm	1,395 ohm	0,7402 ohm
Rotor Inductance	0,0111 H	0,005839 H	0,003045 H
Mutual Inductance	0,2993 H	0,1772 H	0,1241 H
Inertia	0,0343 J	0,0131 J	0,0343 J
Pole	2	2	2
Torsi Mekanik	0,6 Nm	5 Nm	10 Nm
	Shunt Active Power Filter		
Coupling Inductance	1 ohm, 3,5 mH		

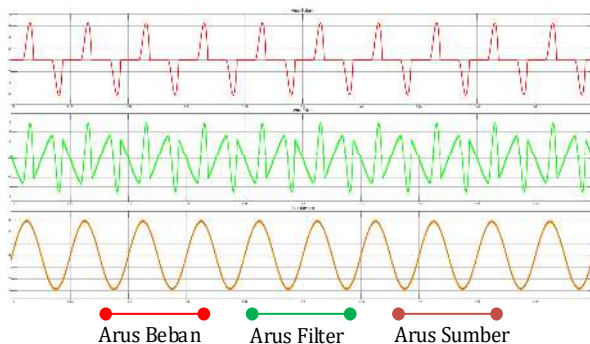
Rangkaian yang ada pada Gambar 11 dijalankan dalam mode *Discrete* dengan *Sample Time* 1 μ s. Simulasi dijalankan dalam waktu 1.5 s. Dalam simulasi ini juga dilakukan perbandingan respon antara FLC dengan PI controller sebagai pengontrol DC-link voltage.

Nilai K_p dan K_i untuk PI controller adalah 5 dan 1.3, sedangkan untuk *membership function* dan *if-then rules* pada FLC sesuai dengan yang telah direncanakan.

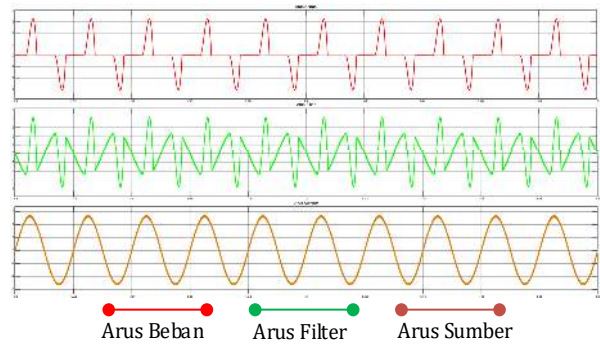
Bentuk gelombang pengamatan pada Gambar 12 sampai Gambar 17 disajikan pada kondisi *steady-state* dalam rentang waktu 1.3-1.5 s.

Bentuk gelombang pengamatan berupa arus beban, arus filter, dan arus sumber pada beban motor 370 W ditunjukkan pada Gambar 12 yang merupakan kondisi dengan PI-SAPF dan Gambar 13 yang merupakan kondisi dengan FLC-SAPF. Bentuk gelombang pengamatan berupa arus beban, arus filter, dan arus sumber pada motor 4000 W ditunjukkan pada Gambar 14 yang merupakan kondisi dengan PI-SAPF dan Gambar 15 yang merupakan kondisi dengan FLC-SAPF. Bentuk gelombang pengamatan berupa arus beban, arus filter, dan arus sumber pada motor 7500 W ditunjukkan pada Gambar 16 yang merupakan kondisi dengan PI-SAPF dan Gambar 17 yang merupakan kondisi dengan FLC-SAPF.

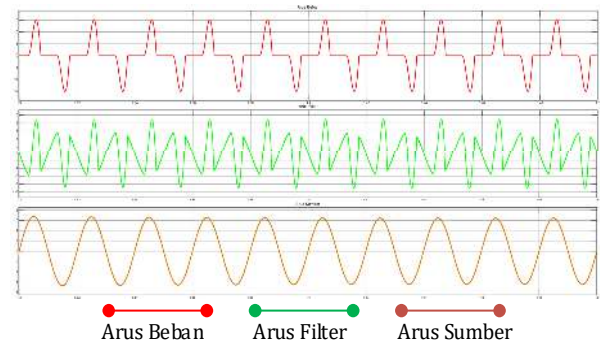
Dari gelombang pengamatan dapat dilihat bahwa gelombang arus beban (IL) terdistorsi karena karakteristik beban non-linier. Kemudian SAPF menginjeksikan arus kompensasi (If) untuk mengkompensasi arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban. Ketika arus filter diinjeksikan ke sistem, maka gelombang arus sumber (Is) akan menjadi sinusoidal murni.



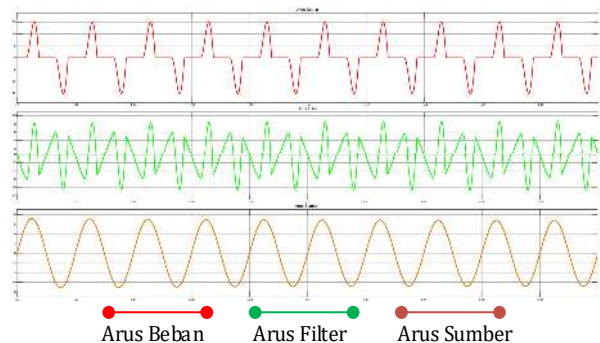
Gambar 12. Gelombang Pengamatan (PI-SAPF Motor 370 W)



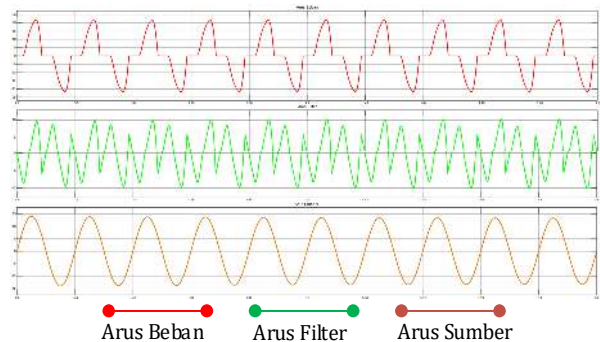
Gambar 13. Gelombang Pengamatan (FLC-SAPF Motor 370 W)



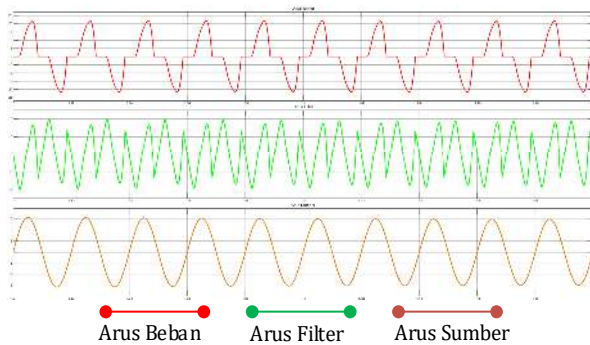
Gambar 14. Gelombang Pengamatan (PI-SAPF Motor 4000 W)



Gambar 15. Gelombang Pengamatan (FLC-SAPF Motor 4000 W)



Gambar 16. Gelombang Pengamatan (PI-SAPF Motor 7500 W)



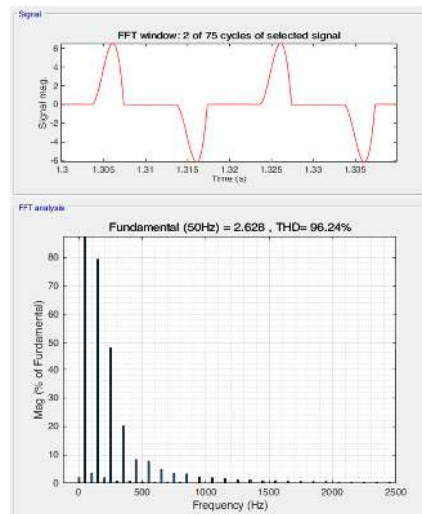
Gambar 17. Gelombang Pengamatan
(FLC-SAPF Motor 7500 W)

Besar harmonisa yang terdapat pada arus sumber ditunjukkan pada Gambar 18 sampai Gambar 26.

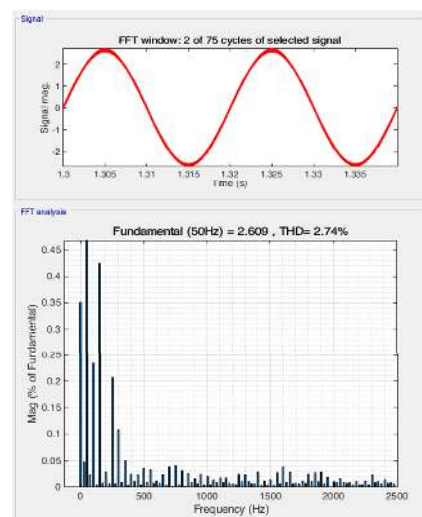
FFT Analysis Tool arus sumber pada motor 370 W ditunjukkan pada Gambar 18 tanpa pemasangan SAPF dengan nilai harmonisa mencapai 96,24%, Gambar 19 dengan PI-SAPF memiliki nilai harmonisa sebesar 2,74%, dan Gambar 20 dengan FLC-SAPF memiliki nilai harmonisa sebesar 0,56%. Nilai arus rms pada motor 370 W berkisar antara 2,609 A – 2,628 A.

FFT Analysis Tool arus sumber pada motor 4000 W ditunjukkan pada Gambar 21 tanpa pemasangan SAPF dengan nilai harmonisa mencapai 84,25%, Gambar 22 dengan PI-SAPF memiliki nilai harmonisa sebesar 1,23%, dan Gambar 23 dengan FLC-SAPF memiliki nilai harmonisa sebesar 0,39%. Nilai arus rms pada motor 4000 W berkisar antara 6,721 A – 7,112 A.

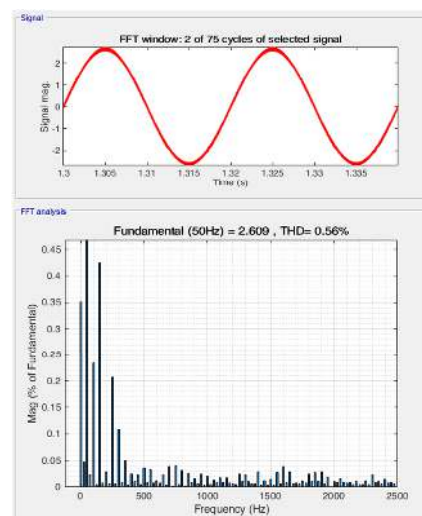
FFT Analysis Tool arus sumber pada motor 7500 W ditunjukkan pada Gambar 24 tanpa pemasangan SAPF dengan nilai harmonisa mencapai 44,03%, Gambar 25 dengan PI-SAPF memiliki nilai harmonisa sebesar 0,69%, dan Gambar 26 dengan FLC-SAPF memiliki nilai harmonisa sebesar 0,28%. Nilai arus rms pada motor 7500 W berkisar antara 13,94 A – 15,66 A.



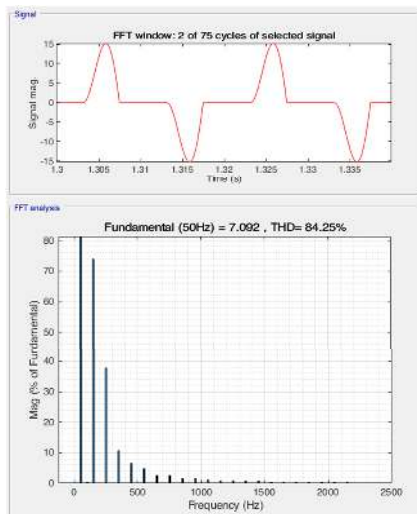
Gambar 18. Harmonisa Arus pada Motor 370 W tanpa SAPF



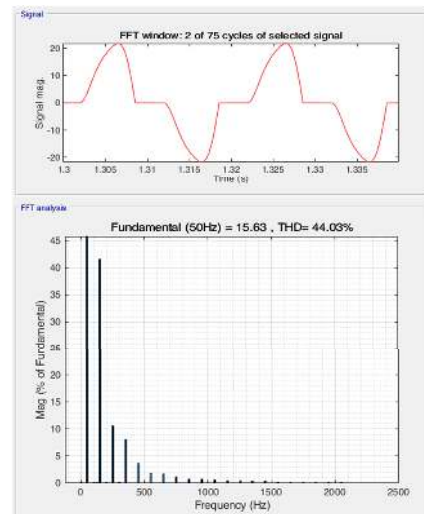
Gambar 19. Harmonisa Arus pada Motor 370 W dengan PI-SAPF



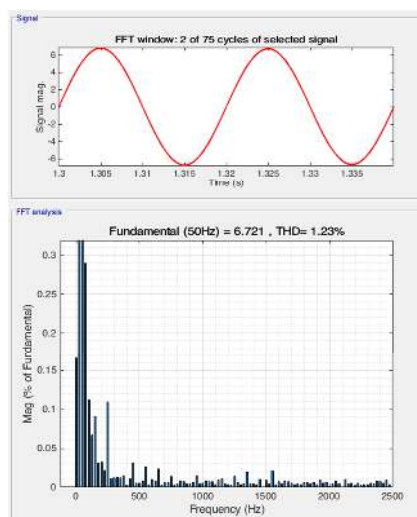
Gambar 20. Harmonisa Arus pada Motor 370 W dengan FLC-SAPF



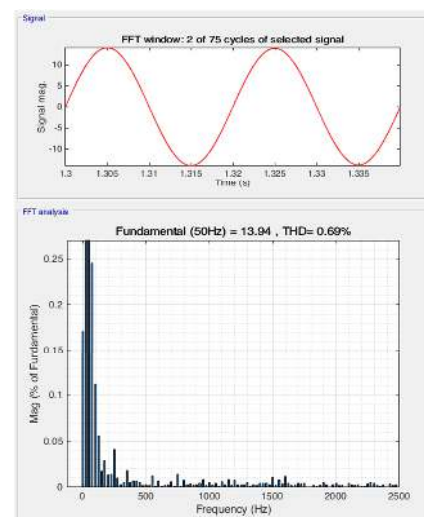
Gambar 21. Harmonisa Arus pada Motor 4000 W tanpa SAPF



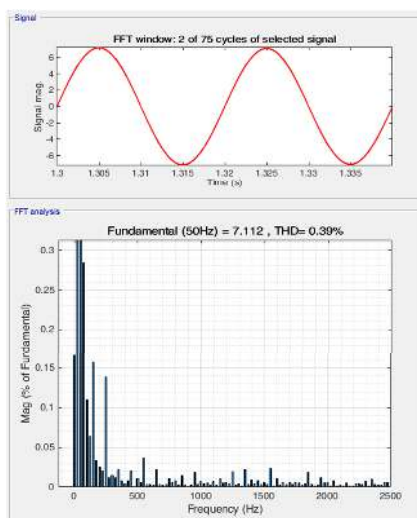
Gambar 24. Harmonisa Arus pada Motor 7500 W tanpa SAPF



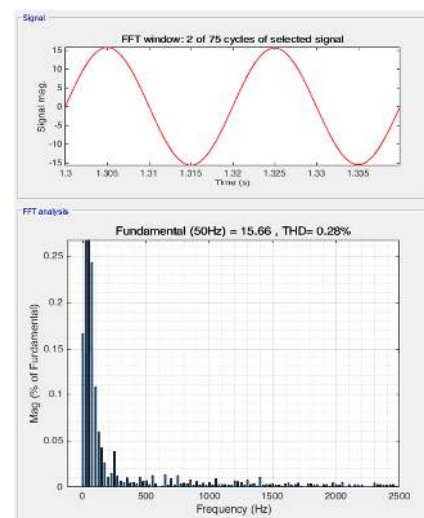
Gambar 22. Harmonisa Arus pada Motor 4000 W dengan PI-SAPF



Gambar 25. Harmonisa Arus pada Motor 7500 W dengan PI-SAPF



Gambar 23. Harmonisa Arus pada Motor 4000 W dengan FLC-SAPF



Gambar 26. Harmonisa Arus pada Motor 7500 W dengan FLC-SAPF

Dari hasil simulasi *FFT Analysis Tool* dapat dilihat bahwa pada beban *rectifier* dan inverter V/F yang terhubung dengan motor induksi tiga fasa yang disimulasikan memiliki nilai THDi yang sangat tinggi. THDi pada beban motor 370 W mencapai 95,24%, motor 4000 W mencapai 84,25%, dan motor 7500 W mencapai 44,03%. Nilai THDi tersebut tidak memenuhi standar harmonisa yang ditoleransi oleh IEEE 519-2014. Seharusnya pada jaringan dengan *rating* tegangan pada PCC sebesar 120 V hingga 69 kV nilai THDi yang masih bisa ditoleransi hanya sebesar 5%. Adapun perbandingan nilai THDi pada masing-masing jenis beban dan kontrol ditunjukkan pada Tabel 4 berikut ini:

Tabel 4. Perbandingan THDi

Beban	Parameter %THDi		
	Tan pa SAPF	PI- SAPF	FLC- SAPF
Motor 370 W	95,24%	2,74%	0,56%
Motor 4000 W	84,25%	1,23%	0,39%
Motor 7500 W	44,03%	0,69%	0,28%

Dari data yang disajikan pada Tabel 4 di atas menunjukkan bahwa pemasangan SAPF baik dengan PI *controller* maupun FLC dapat mengurangi THDi di sisi sumber secara signifikan. Ketika menggunakan PI *controller*, THDi di sisi sumber pada beban motor 370 W adalah 2,74%, motor 4000 W adalah 1,23%, dan motor 7500 W adalah 0,69%. Sedangkan ketika menggunakan FLC, THDi di sisi sumber pada beban motor 370 W adalah 0,56%, motor 4000 W adalah 0,39%, dan motor 7500 W adalah 0,28%.

Harmonisa yang terjadi pada saat motor induksi beroperasi dapat membangkitkan medan harmonisa dan menghasilkan mmf yang berotasi dua arah (*forward* dan *backward*). Harmonisa urutan positif menghasilkan arah medan putar dan torsi yang searah komponen fundamental, sedangkan harmonisa urutan negatif menghasilkan arah medan putar dan torsi yang berlawanan dengan yang dihasilkan komponen fundamental. Timbulnya torsi harmonisa yang bersamaan dengan torsi fundamental akan menghasilkan

getaran (*vibration*) dan kebisingan yang pengaruhnya cukup besar pada operasi motor induksi. Dengan berkurangnya nilai harmonisa (THDi), maka pengaruh negatif tersebut dapat diatasi.

Secara umum, FLC dapat meredam harmonisa lebih baik dibandingkan dengan PI *controller* dan SAPF yang diusulkan mampu mengurangi THDi arus sumber di bawah batas yang diizinkan oleh IEEE 519-2014.

4. Kesimpulan

Artikel ini telah membahas mengenai pemasangan SAPF pada beban inverter V/F konstan pengatur kecepatan motor. SAPF yang disimulasikan dalam artikel ini dapat bekerja sebagai peredam harmonisa pada beban *rectifier* dan inverter V/F konstan yang terhubung dengan motor induksi tiga fasa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sebelum pemasangan SAPF, nilai THDi yang dihasilkan masih belum memenuhi standar yang ditoleransi oleh IEEE 519-2014 yaitu kurang dari 5%. Ketika menggunakan PI-SAPF, THDi yang dihasilkan bisa kurang dari 2,75% baik pada motor 370 W, 4000 W, maupun 7500 W. Sedangkan FLC-SAPF dapat meredam harmonisa lebih baik lagi, THDi yang dihasilkan kurang dari 0,6% baik pada motor 370 W, 4000 W, maupun 7500 W.

5. Saran

Diperlukan adanya penelitian lebih lanjut mengenai pengimplementasian purwarupa perangkat keras SAPF untuk peredaman harmonisa pada perangkat inverter V/F di masa mendatang.

6. Daftar Pustaka

- [1] "Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review," *Chin. J. Electr. Eng.*, vol. 3, no. 3, hlm. 1–17, Des 2017, doi: 10.23919/CJEE.2017.8250419.
- [2] C. M. F. S. Reza, Md. D. Islam, dan S. Mekhilef, "A review of reliable and energy efficient direct torque controlled induction motor drives," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, hlm. 919–932, Sep 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.05.067.

- [3] B. Singh, K. Al-Haddad, dan A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. 5, hlm. 960–971, Okt 1999, doi: 10.1109/41.793345.
- [4] H. Sasaki dan T. Machida, "A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation-Considerations on Basic Design," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-90, no. 5, hlm. 2009–2019, Sep 1971, doi: 10.1109/TPAS.1971.292996.
- [5] R. Kanagavel, I. Vairavasundaram, dan S. Padmanaban, "Design and prototyping of single-phase shunt active power filter for harmonics elimination using model predictive current control," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 2, Feb 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12231.
- [6] A. Bitoleanu dan M. Popescu, "Shunt active power filter Overview on the reference current methods calculation and their implementation," dalam *2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, Galati, Romania, Okt 2013, hlm. 1–12. doi: 10.1109/ISEEE.2013.6674384.
- [7] X. Lei, C. Guo, Y. Xu, dan Q. Liu, "Study on Detection Method for Harmonic and Reactive Current in Single-Phase Circuit," dalam *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Zhangjiajie, Hunan, China, 2009, hlm. 695–698. doi: 10.1109/ICMTMA.2009.168.
- [8] M. Tamilvani, K. Nithya, M. Srinivasan, dan S. Prabha, "Harmonic Reduction in Variable Frequency Drives Using Active Power Filter," vol. 3, no. 2, hlm. 8, 2014.
- [9] L. Morán, J. Dixon, dan M. Torres, "Active Power Filters," dalam *Power Electronics Handbook*, Elsevier, 2018, hlm. 1341–1379. doi: 10.1016/B978-0-12-811407-0.00046-5.
- [10] J. Dixon, J. Contardo, dan L. Moran, "DC LinkFuzzy Control for an Active Power Filter, Sensing the Line Current Only.," hlm. 6.
- [11] K. K. Ingale dan P. D. Kulkarni, "Implementation of Fuzzy Logic Controller Based Active Power Filter to Improve Power Quality of 25KV Traction System," hlm. 13.
- [12] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.