

REDUKSI HARMONISA MENGGUNAKAN TAPIS DAYA AKTIF BERBASIS *SYNCHRONOUS REFERENCE FRAME DQ* PADA SISTEM DAYA TIGA FASA

¹Setiyono, ²Bambang Dwinanto

^{1,2}Fakultas Teknologi Industri Universitas Gunadarma
Jl. Margonda Raya No. 100, Depok 16424, Jawa Barat

¹setiyono@staff.gunadarma.ac.id, ²bambang_dwi@staff.gunadarma.ac.id

Abstrak

Mutu listrik yang bagus memiliki ciri berbentuk sinusoida, kontinu, dan handal terhadap gangguan. Penggunaan perangkat elektronika daya dapat menurunkan kualitas sistem tenaga. Penyebabnya adalah arus harmonisa pada sisi beban mengintervensi arus listrik pada sisi sumber pasokan daya. Arus harmonisa ini menjadi masalah utama dalam sistem distribusi listrik sehingga diperlukan langkah antisipasi untuk meredam kehadiran harmonisa di dalam sistem tenaga. Penelitian ini bertujuan menyajikan tapis daya aktif paralel untuk menurunkan Total Harmonic Distortion (THD) pada sistem tenaga listrik melalui sebuah pemodelan simulasi. Beberapa peneliti telah melakukan riset dengan hasil yang masih bervariasi dalam menurunkan THD, dan pada umumnya nilai THD yang diperoleh berkisar pada nilai 5%. Pada penelitian ini, untuk menurunkan THD secara teknis adalah dengan menyuntikan arus kompensasi ke jala menggunakan metode synchronous d-q reference. Bentuk gelombang arus kompensasi ini dibuat sama dengan arus harmonisa beban namun berbeda fasa 180°. Hysterisis Current Control digunakan untuk membangun pulsa penyalaan rangkaian Voltage Spurce Inverter. Pemodelan sistem tapis daya aktif paralel dibangun menggunakan tools Matlab Simulink. Hasil simulasi memperlihatkan nilai indeks THD sebelum diinjeksi sebesar 30,67%, dan setelah diinjeksi turun menjadi 2,37%. Nilai THD ini sesuai dengan standar IEEE 519 sehingga dapat disimpulkan bahwa pemodelan ini layak dibangun untuk di implementasikan pada sebuah sistem tenaga.

Kata Kunci: Kualitas Daya, tapis aktif paralel, teori synchronous reference d-q, Total Harmonic Distortion (THD)

Abstract

Good electrical quality has the characteristics of sinusoidal shape, continuous, reliable against interference. The use of power electronics can reduce the quality of power systems. The reason is the harmonic currents on the load side intervene in the electric current on the power supply side. Harmonic current is a major problem in the electricity distribution system so that an anti-inflammatory step is needed to reduce the presence of harmonics in the power system. This study aims to present a parallel active power filter to reduce Total Harmonic Distortion (THD) in an electric power system through a simulation model. Some researchers have conducted research with varying results in reducing THD, and in general the THD value obtained is around 5%. In this study, to reduce THD technically is to inject compensation flow into the grid using the synchronous d-q reference method. This compensated current waveform is made the same as the load harmonic current but has a different phase 180°. Hysterisis Current Control is used to construct the pulse of the pulse of the Voltage Spurce Inverter circuit. Modeling a parallel active power filter system was built using the Matlab Simulink tools. The simulation results show the THD index value before being injected is 30.67%, and after the evaluation has dropped to 2.37%. THD value is in accordance with the IEEE 519 standard so it can be concluded that this modeling is feasible to be built to be implemented in a power system.

Keywords: Parallel Active Filter, power quality, d-q Synchronous Reference Theory, Total Harmonic Distortion (THD).

PENDAHULUAN

Distorsi arus harmonisa pada sistem tenaga listrik menjadi masalah yang serius, hal ini terkait dengan penggunaan beban non-linier seperti rangkaian konverter diode atau thyristor, dan berbagai macam perangkat yang menggunakan peralatan elektronika daya. Harmonisa ini akan menyebabkan beberapa kerugian antara lain panas lebih pada trafo distribusi, interferensi saluran telekomunikasi, turunnya performa peralatan listrik, dan dan lebih berbahaya lagi sering terjadi pemadaman listrik [1]. Untuk mengatasi permasalahan di atas diperkenalkan tapis daya pasif. Tapis ini telah digunakan secara luas, namun penggunaan tapis pasif ini masih kurang efektif karena masih tergantung perubahan beban sehingga tidak fleksibel. Kemudian dikembangkan sebuah tapis aktif yang mempunyai beberapa keunggulan dibanding dengan tapis pasif. Pengguna filter aktif begitu populer dalam meningkatkan kualitas daya pada beban untuk memberikan kepuasan pelanggan [2]. Tapis daya aktif ada dua macam yaitu tapis daya aktif seri dan tapis daya aktif paralel. Beberapa peneliti telah mengembangkan teori untuk meredam kehadiran harmonisa pada sistem tenaga menggunakan teori daya sesaat pq dan metode *Synchorounous Reference Frame* (SRF).

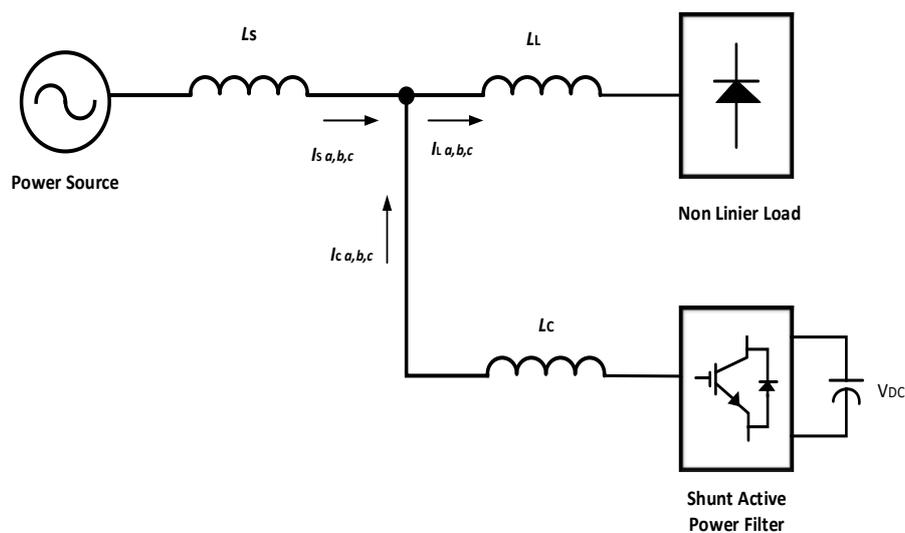
Teori daya sesaat pq pertama diajukan oleh Akagi (1984) dan awalnya berlaku pada sistem seimbang. Teori ini mengatakan bahwa

untuk menghilangkan harmonisa harus dilakukan ekstraksi komponen daya yang dibutuhkan oleh sistem dan membuang komponen daya yang tidak dibutuhkan oleh sistem melalui sebuah tapis. Nilai yang dibutuhkan sistem tersebut dijadikan sampel untuk membangun sinyal penyalan pada saklar yang digunakan untuk mengkomposasikan daya reaktif ke jala. Namun teori ini masih mengandung kelemahan yakni tidak mampu diterapkan pada tegangan terdistorsi maupun pada sistem tak seimbang. Kekurangan ini dapat diatasi menggunakan tegangan urutan positif frekuensi fundamental untuk menghasilkan arus referensi dengan teori $p-q$. Metode lain dikenal dengan *Synchorounous Reference Frame* (SRF). Teori ini mengandung perhitungan sederhana, di mana semua komponen sistem tenaga direpresentasikan dalam kerangka referensi yang berputar secara sinkron dan variabel yang terkait diubah menjadi kerangka referensi yang berputar secara sinkron pula.

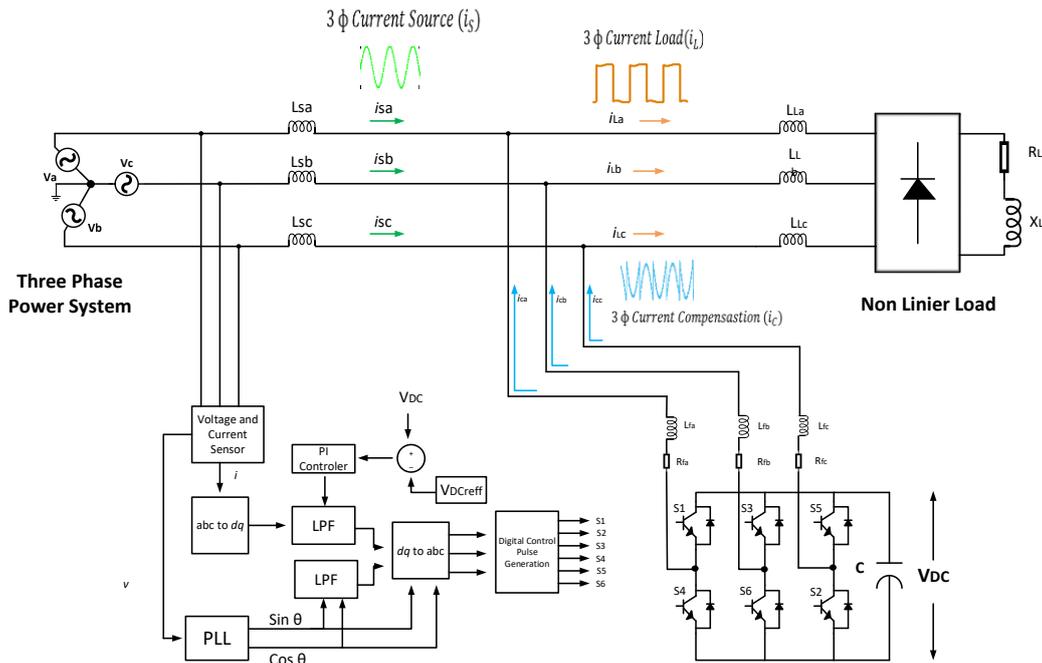
Teknik SRF ini adalah mengubah besaran koordinat abc ke dalam domain waktu. Kemudian melalui beberapa transformasi balik diperoleh sinyal sampel untuk membangkitkan pulsa penyalan gerbang saklar *Voltage Source Inverter* (VSI) dalam menyalurkan daya reaktif ke sistem yang berwujud arus komposisi. Beberapa peneliti terdahulu, Jose dan Sreehari menggunakan teori SRF untuk mengurangi pengaruh turun tegangan (*voltage sag*) dan mereduksi kehadiran harmonisa dalam sistem

tenaga. Hasilnya bahwa teori SRF sangat efisien dalam memperbaiki cacat tegangan dan arus serta membantu menjaga tegangan beban seimbang dan konstan [3]. Babu, Kar, dan Halder membangun simulasi gabungan (*hybrid*) tapis pasif dan tapis aktif menggunakan teori SRF dengan pengendali PI dan pengontrol histerisis untuk mengurangi rugi pensaklaran (*switching*) pada *voltage source inverter* dalam mengalirkan arus injeksi ke jala. Hasilnya teori ini menghasilkan arus kompensasi tiga fasa dan mampu menghilangkan gangguan pada tapis yang berbeda dan beban yang berbeda pula [4]. Singh

menggunakan teori SRF untuk menghilangkan harmonisa pada sistem tenaga sekaligus meningkatkan kualitas daya beban. Pembangkitan arus referensi menggunakan pengatur arus histerisis. Hasilnya THD sebelum diinjeksi sebesar 30,50 % dan setelah diinjeksi turun menjadi 4,66% [5]. Pada artikel ini akan menyajikan sebuah tapis daya aktif paralel sistem tiga fasa tiga kawat menggunakan metode SRF dengan kendali PI. Metode pembangkitan sinyal penyalan menggunakan *Hysteresis Current Control*. Konsep sederhana tapis daya aktif paralel seperti tampak pada Gambar 1.



Gambar 1 Sebuah Konsep Tapis Daya Aktif Paralel



Gambar 2 Desain Tapis Daya Aktif Paralel Sistem Tenaga

METODE PENELITIAN

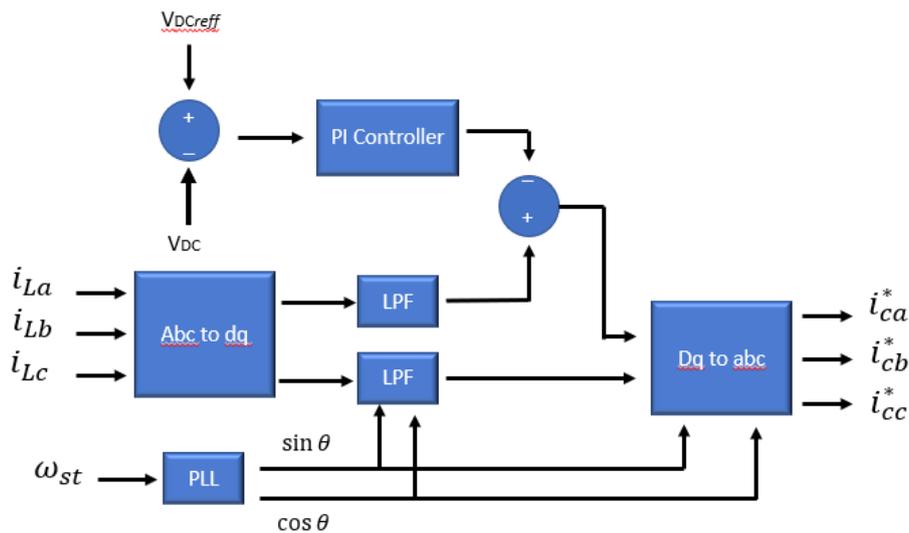
Gambar 2 merupakan desain tapis aktif paralel berbasis kontrol *Synchronous Reference Frame* (SRF) sebagai pembangkit sinyal referensi dan *Voltage Source Inverter* (VSI) sebagai unit penyuntik atau mengkompensasikan energi yang disalurkan ke jala guna membatalkan arus harmonisa pada sistem tenaga. Pembangkitan arus referensi dikembangkan dalam domain waktu. Hal ini sangat tepat diterapkan untuk kestabilan dan sistem transien. Teori ini sangat efektif dan fleksibel dalam perancangan tapis daya aktif paralel pada keadaan tegangan non sinuoida. Berdasarkan Gambar 3, sebuah metode *Synchronous Reference Frame* mengandung langkah aljabar yaitu di mana arus beban tiga fasa I_{La}, I_{Lb}, I_{Lc} ditransformasikan ke

komponen aktif sesaat (i_d) dan komponen reaktif (i_q) menggunakan rotasi sinkron *frame* dengan urutan positif sistem tegangan seperti pada Persamaan (1).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega_{st} & \sin(\omega_{st} - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega_{st} + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos \omega_{st} & \cos(\omega_{st} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega_{st} + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Pada Persamaan (1), ω_{st} adalah fasa urutan positif dari sistem tegangan yang disediakan oleh unit *phase locked loop* (PLL). PLL membangkitkan fungsi $\sin \omega_{st}$ dan $\cos \omega_{st}$ pada frekuensi dasar, disinkronkan dengan komponen dasar tegangan. arus aktif dan reaktif dapat juga dikomposisi pada nilai dc dan ac seperti pada Persamaan (2).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{d_{dc}} \\ i_{q_{dc}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{d_{ac}} \\ i_{q_{ac}} \end{bmatrix} \quad (2)$$



Gambar 3 Pembangkit Arus Referensi Berbasis Teori *Synchronous Reference Frame* (SRF)

$i_{d_{dc}}$ dan $i_{q_{dc}}$ adalah nilai komponen yang disuplai oleh sumber sedangkan $i_{d_{ac}}$ dan $i_{q_{ac}}$ adalah komponen harmonisa dari arus beban sehingga diperoleh dengan Persamaan (3).

$$\begin{bmatrix} i_{d_{ac}} \\ i_{q_{ac}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{d_{dc}} \\ i_{q_{dc}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Langkah selanjutnya adalah tranformasi balik ke koordinat abc arus referensi dapat ditentukan dengan Persamaan (4).

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega_{st} & \cos \omega_{st} \\ \sin \left(\omega_{st} - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\omega_{st} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \left(\omega_{st} + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\omega_{st} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dengan metode SRF ini, ekstraksi komponen dasar dan komponen harmonisa dari tegangan dan arus lebih mudah. Teori ini juga dapat diterapkan pada sistem fasa tunggal dengan

kawat netral dan sistem tiga fasa dengan atau tanpa kawat netral [2][3][4][6] [7][8][9].

Pengatur Tegangan DC Link

Pengendali tegangan dc-link ini akan mempengaruhi nilai kompensasi daya reaktif, dengan demikian, waktu pengisian dan pembuangan kapasitor menentukan arus kompensasi dalam menggagalkan arus munculnya harmonisa jala [10]. Pengendali Proposional Integral (PI) pada umumnya digunakan untuk mengatur tegangan DC link dari tapis daya aktif paralel. Pengendali PI digunakan untuk membandingkan tegangan dc *actual* (V_{DC}) dengan tegangan dc referensi (V_{DCref}) di mana selisih *error* tegangan tersebut dijadikan sampel. Transformasi $H(s)$ dinyatakan dengan Persamaan (5).

$$H_s = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (5)$$

K_p adalah konstanta proporsional dan K_i adalah konstanta integral. Kendali PI digunakan untuk meningkatkan penguatan *loop* dan mengeliminasi nilai *error*. Pengatur tegangan DC *link* dari sebuah tapis daya aktif paralel dapat dilihat pada Gambar 3.

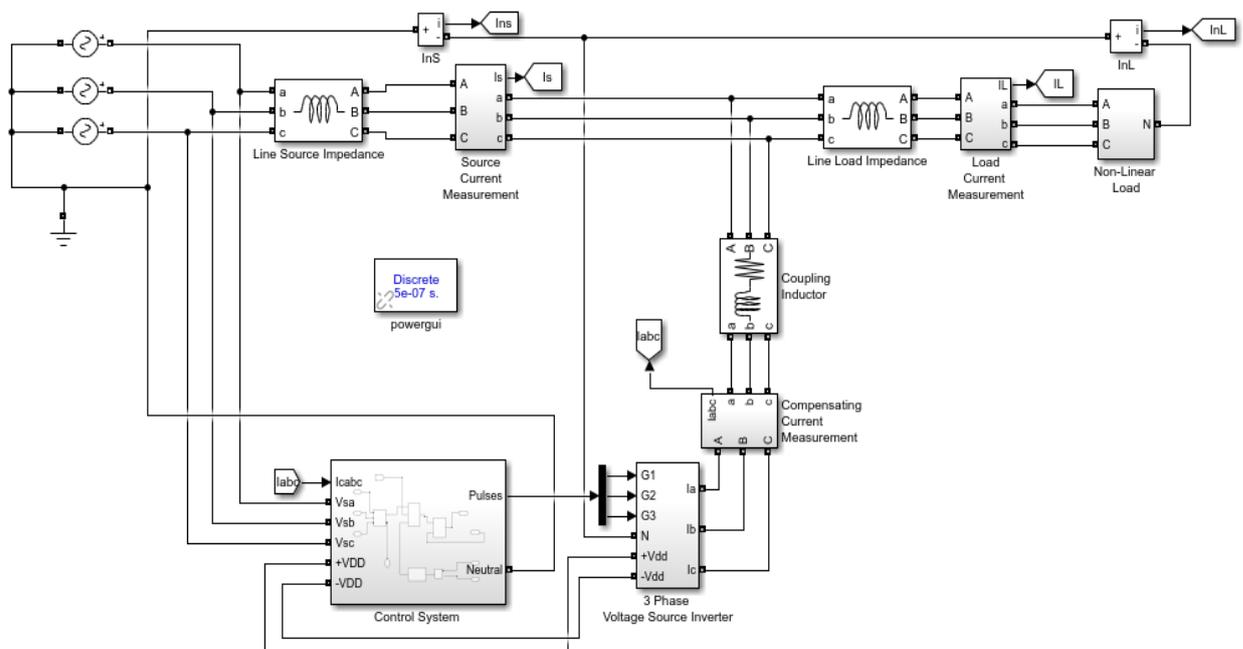
Hysteresis Current Control

Untuk mengurangi kerugian *switching*, *harmonics*, *voltage sag & swell*, pengontrol *hysteresis* sangat efektif diterapkan pada pembangkitan pulsa penyalan saklar *voltage source inverter* dan dengan biaya yang lebih rendah. *Hysteresis Current Control* digunakan untuk membandingkan arus saluran (I_{sa} , I_{sb} , I_{sc}) dengan arus kompensasi referensi (I_{ca} , I_{cb} , I_{cc}), di mana selisih *error* dari perbandingan ini digunakan untuk membangkitkan pulsa penyalan saklar VSI

melalui kaidah PWM (*Pulse Width Modulation*). Metode kendali hysteresis ini memproses dua level sinyal arus masukan satu lebih tinggi dari arus kompensasi dan satu lebih rendah dari arus referensi. Arus *actual* diambil dari isyarat umpan balik. Ketika arus *actual* lebih rendah dari arus referensi maka IGBT dalam keadaan ON, dan Ketika arus *actual* lebih tinggi dari arus referensi maka IGBT dalam keadaan OFF. Hasilnya adalah arus *actual* tetap berada pada jalur pita atas dan bawah dari arus referensi [11].

HASIL PEMBAHASAN

Rancangan dari Gambar 2 kemudian disimulasikan ke dalam *tools* Matlab Simulink Sympower seperti tampak pada Gambar 4.



Gambar 4. Pemodelan Tapis Daya Aktif Paralel

Tabel 1 Desain Parameter Sistem Tenaga

Sistem Tenaga	<i>Voltage Source Inverter</i>	Beban Non-Linier Penyearah diode melayani Beban	
Sistem 3 Fasa, V_{L-N} 220V, 50Hz	3 buah pasang (3 Leg) saklar IGBT	R	RL
Impedans saluran $L_s = 10^{-4}$ H	2 kapasitor @ 47000uF 350 Volt	Seimbang	tak seimbang
		$R_a=R_b=R_c$ 50 Ohm	R_{La} 50 Ω , 1H RLb 75 Ω ,2H RLc 100 Ω ,1.5H

Keterangan:

Sumber Tegangan 3 Fasa 220VL-N. 50 Hz merupakan sistem tenaga 3 fasa 3 kawat Impedansi saluran kawat 0.0001 H induktif murni

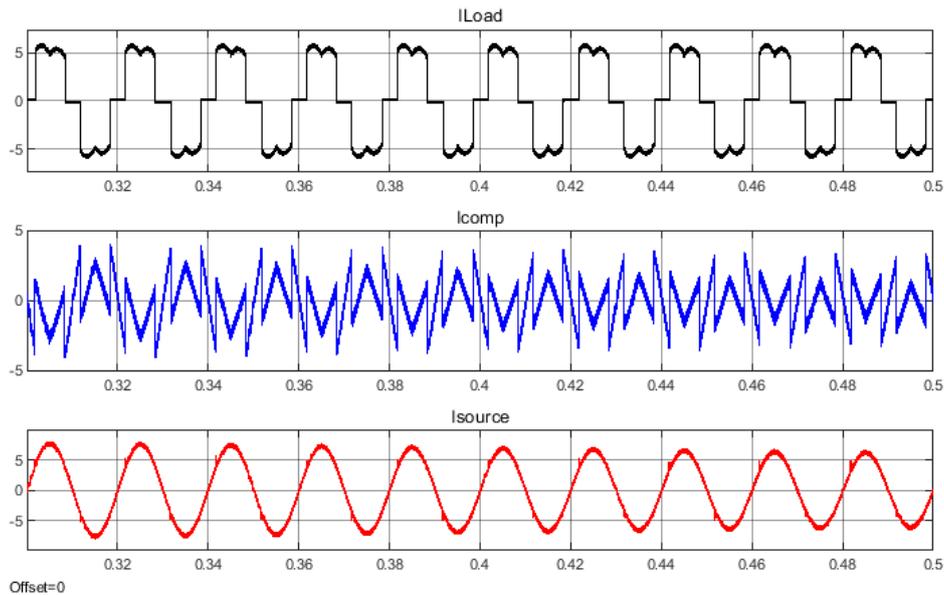
Tabel 1 merupakan parameter teknis yang digunakan dalam perancangan model Matlab Simulink. Sistem tenaga 3 fasa 220 V_{L-N} dan 380 V_{L-L} dengan impedansi masukan 0.0001 H. Enam buah (3 pasang) saklar *voltage source inverter* menggunakan IGBT (*Insulate Gate Bipolar Transistor*) dan dipasang paralel dengan dua buah kapasitor seri masing-masing sebesar 47.000 uF 350 V. Dua buah beban resistif (tiap fasa sama 50 ohm) dan resistif induktif dengan nilai yang berbeda digunakan sebagai beban pada saat melakukan pengujian. Tujuannya adalah untuk mengetahui watak sistem atau model jika terjadi perubahan beban. Pemodelan dilakukan dengan pergantian jenis beban yang berbeda yaitu saat model sistem dibebani pada faktor daya satu (beban resistif) dan beban dengan faktor daya tertinggal (resistif induktif) secara bergantian.

Hasil Simulasi dengan Beban R

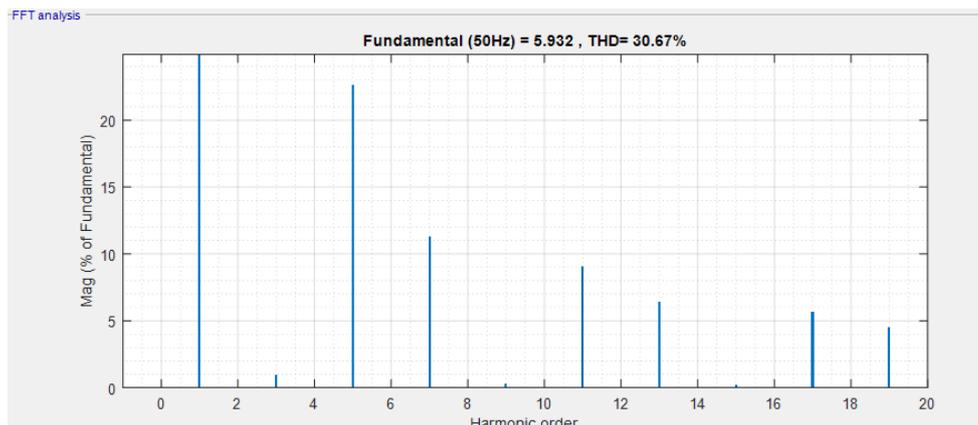
Pengujian model sistem pada beban resistif pada tiap tiap fasa sebesar 50 ohm seimbang. Performa model sistem diuji untuk

mengetahui beberapa parameter gelombang arus sumber, arus beban, arus kompensasi, nilai indeks THD dan kinerja kapasitor dalam menyuntikan energi kompensasi ke jala. Hasil pengujian nampak pada Gambar 5.

Pada Gambar 5 terlihat gelombang arus beban berupa gelombang sinusoida terdistorsi dan hampir mirip dengan gelombang pulsa. Gelombang ini cacat dikarenakan kinerja saklar VSI yang berubah-ubah nilai impedansinya terhadap waktu sehingga arus yang ditarik dari sisi sumber mengikuti pola kerja dari kerja saklar VSI. Gambar kedua (tengah) adalah gelombang arus kompensasi yang diinjeksikan ke sistem membentuk pola gelombang lancip melengkung. Hal ini sebenarnya pergerakan arus kapasitor yang mengalir melalui saklar inverter untuk memberikan reaksi menutup cacat gelombang yang dikonsumsi oleh beban. Gambar ketiga (bawah) adalah arus saluran sumber yang dijaga agar tetap berbentuk sinuoida. Amplitude maksimum sesaat tiap tiap gelombang adalah berkisar 7 A.



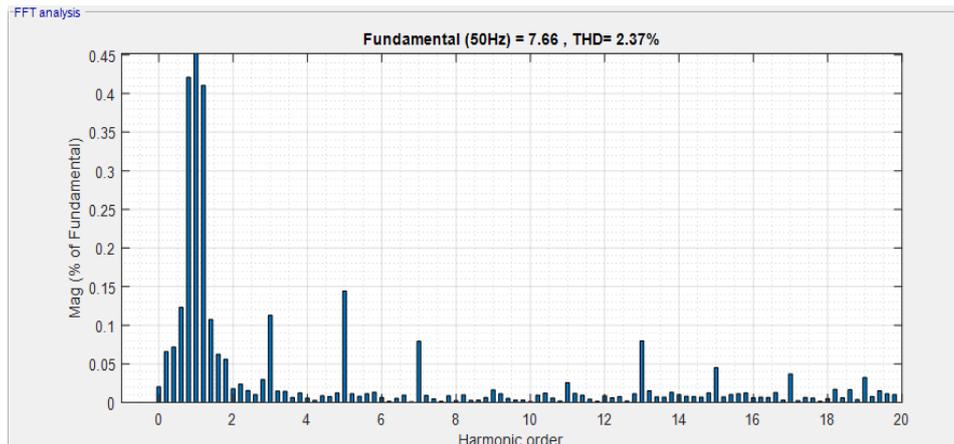
Gambar 5 Arus Beban, Arus Kompensasi, Arus Saluran Sumber pada Beban Resitif



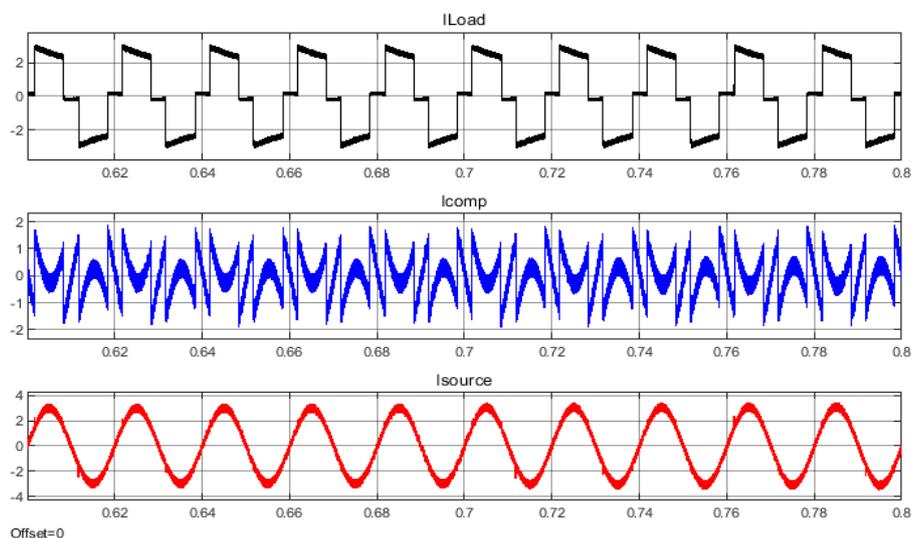
Gambar 6. Indeks THD Sebelum Diinjeksi pada Beban Resitif

Gambar 6 adalah sebuah indeks kandungan harmonisa yang terdapat pada sistem tenaga yang didesain sebelum diinjeksi oleh arus kompensasi. Indeks THD sebesar 30,67% adalah sebuah nilai THD yang cukup besar hal ini berarti memiliki factor daya yang rendah. Amplitudo harmonisa terdapat pada orde

ke 3, 5, 7, 11,13,17 dan 19. Hal ini dapat dikatakan bahwa harmonisa terjadi pada frekuensi kelipatan ganjil (150 Hz, 250Hz, 350 Hz dan seterusnya) dari frekuensi dasarnya (50Hz). Amplitudo maksimum terdapat pada harmonisa ke 5 kira-kira sebesar 25% dari amplitude dasarnya (7A).



Gambar 7 Indeks THD Setelah Diinjeksi pada Beban Resitif



Gambar 8. Arus beban, Arus Kompensasi, dan Arus Saluran Sumber pada Beban Resitif Induktif

Gambar 7 menunjukkan sebuah ukuran indeks THD dari sistem yang sudah diinjeksi dengan kandungan harmonisa turun hingga 2,37%. Amplitudo harmonisa ke 5 dapat ditekan atau diturunkan hingga pada level 0,14% dari amplitude dasarnya. Nilai indeks THD ini menurut aturan IEEE 519 keberadaannya masih bisa ditolerir.

Hasil Simulasi dengan Beban RL

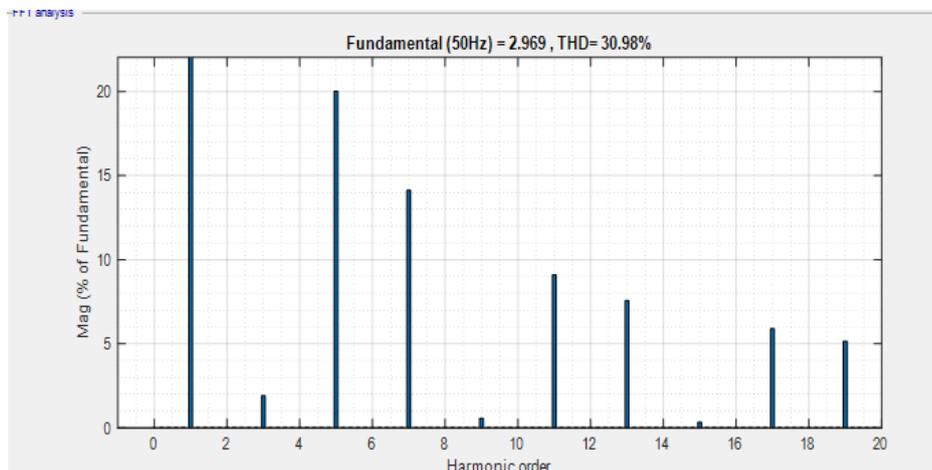
Pada model sistem dengan beban resitif induktif pengujian dilakukan dengan memberikan beban yang tidak seimbang pada masing-masing fasa. Tabel 1 beban non-linier penyearah diode dibebani beban tak seimbang. Hasil simulasi menunjukkan data gelombang yang dapat dilihat pada Gambar 8.

Gambar 8 paling atas menampilkan arus beban berupa gelombang yang mendekati gelombang persegi, puncak gelombang

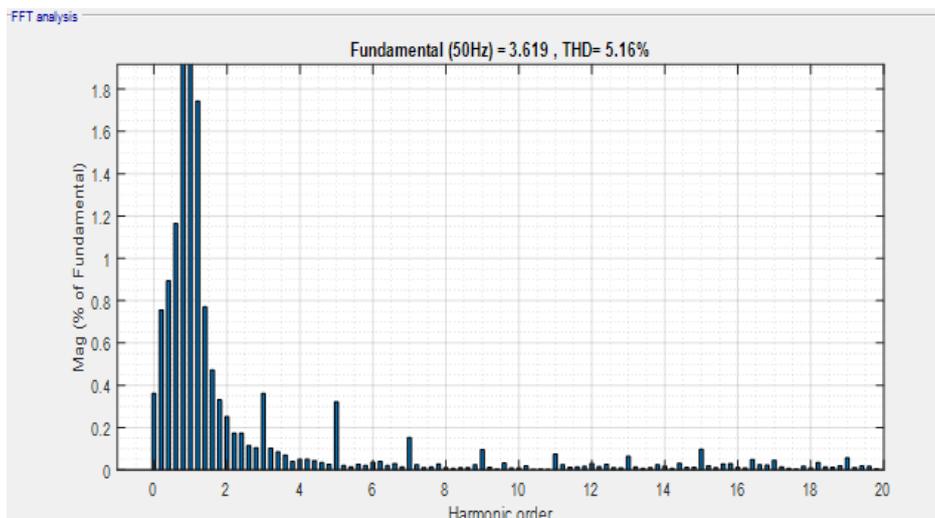
dan lembah gelombang lebih rata dibanding pada saat berbeban resistif. Hal ini komponen induktif dapat berfungsi sebagai elemen perata. Gelombang kedua (tengah) adalah aliran arus kompensasi berupa pola pola gelombang lancip melengkung yaitu sebuah pola aliran muatan atau arus kapasitor yang mengalir melalui saklar saklar VSI. Gelombang yang ke tiga (bawah) adalah sinyal arus saluran sumber yang dipaksa tetap berbentuk sinusoida. Amplitudo maksimum

sesaat masing masing gelombang berkisar 3.

Gambar 9 menunjukkan indeks THD dari sistem tenaga dengan beban resistif induktif sebelum diinjeksi sebesar 30,98%. Frekuensi gangguan harmonisa terdapat pada harmonisa orde ganjil 3,5,7,9,11,13,15,17,19. Amplitudo maksimum dari komponen harmonisa terjadi pada orde ke 5 (frekuensi 250 Hz) sebesar 20% dari amplitude maksimum arus beban (3A).



Gambar 9 Indeks THD Sebelum Diinjeksi pada Beban Resistif Induktif



Gambar 10 Indeks THD Setelah Diinjeksi pada Beban Resistif Induktif

Gambar 10 memperlihatkan indeks THD setelah sistem diinjeksi. Nilai indeks THD berkurang hingga 5,16%. Kandungan ini masih cukup tinggi. Menurut aturan IEEE 519 bahwa nilai THD yang masih diperbolehkan dalam sebuah sistem tenaga maksimal sebesar 4%. Ada beberapa komponen yang menyebabkan nilai THD tersebut sedikit diatas batas atas diantaranya perubahan beban yang tidak ideal, dan element kopling VSI (Lc) perlu dilakukan perubahan.

SIMPULAN DAN SARAN

Kontrol strategi yang digunakan dalam meredam kehadiran harmonisa pada sistem tenaga tiga fasa telah berhasil dibangun melalui simulasi pemodelan. Format arus beban setelah diinjeksi tetap sama dengan bentuk gelombang sebelum diinjeksi, yang berubah adalah arus saluran sumber mendekati sinusoida murni. Pada beban resistif hasil simulasi memperlihatkan indeks THD (*Total Harmonic Distortion*) turun di mana nilai indeks THD sistem tenaga pada saat sebelum diinjeksi sebesar 30,67%, dan setelah diinjeksi turun menjadi 2,37%. Nilai THD ini sesuai dengan standar IEEE 519 di mana pada salah satu pasalnya mengatakan bahwa nilai THD yang masih boleh terjadi pada sistem tenaga adalah dibawah 4 % sehingga dapat disimpulkan bahwa pemodelan ini layak dibangun untuk diimplementasikan pada sebuah sistem tenaga. Pada beban resistif induktif penurunan indeks THD juga

menunjukkan angka yang cukup besar namun nilai indeks THD masih di atas angka yang ditetapkan oleh aturan IEEE 519. Oleh karena itu, masih diperlukan pengembangan sistem untuk memperoleh hasil yang lebih baik. Untuk penelitian lebih lanjut, pemodelan ini dapat diimplementasikan pada sistem fasa tunggal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. R. Joshi, "Harmonics Mitigation by PQ theory Based Shunt Active Filter using Hysteresis Control," *International Journal of Darshan Institute on Engineering Research & Emerging Technologies*, vol. 6, no. 1, 2017.
- [2] K. Rameshkumar dan V. Indragandhi, "Overview of reference current extraction techniques in single phase shunt active power filter," *Int. J. Emerg. Technol.*, vol. 11, no. 2, hal. 689 – 698, 2020.
- [3] S. Jose dan S. Sreehari, "Synchronous Reference Frame Based Control Method for UPQC," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 2, no. 4, hal. 1606 – 1609, 2015.
- [4] P. N. Babu, B. Kar, dan B. Halder, "Modelling and analysis of a hybrid active power filter for power quality improvement using hysteresis current control technique," *India Int. Conf.*

- Power Electron (IICPE)*, vol. 2016-
November, no. 03, hal. 369 – 374,
2017.
- [5] B. S. Singh, “P-Q Theory Based Upqc
for Reactive Power Compensation
With Ucap,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*,
vol. 4, no. 6, hal. 434 – 439, 2017.
- [6] M. Monfared, S. Golestan, dan J. M.
Guerrero, “A new synchronous
reference frame-based method for
single-phase shunt active power
filters,” *J. Power Electron.*, vol. 13, no.
4, hal. 692 – 700, 2013.
- [7] S. Rajeev, “IUPQC simulation for
power quality improvement,” *Int. J.
Eng. Res.*, vol. 3, no. 4, hal. 261 – 264,
2014.
- [8] A. S. Fegade dan P. Khampariya,
“Compensation of harmonics power by
using shunt active filter,” *International
Journal of Innovative Research in
Advanced Engineering (IJIRAE)*, vol.
1, no. 9, hal. 30–36, 2014.
- [9] L. Sowjanya dan M. Manohara, “An
active power filter implemented with a
4-Leg VSI using predictive control
scheme for improving power quality,”
Int. J. Sci. Res., vol. 4, no. 6, hal. 885 –
891, 2015.
- [10] P. Manasa, K. N. Rao, dan D. B.
Bhaskar, “Mitigation of harmonics
using shunt active power filter in the
distribution system,” *Journal of
Emerging Technologies and Innovative
Research (JETIR)*, vol. 5, no. 7, hal.
1513 – 1519, 2018.
- [11] B. V. Siva, B. M. Babu, L. R. Srinivas,
dan S. S. Tulasiram, “Design of shunt
active power filter for improvement of
power quality with artificial
intelligence techniques,” *Int. J. Adv.
Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*,
vol. 03, no. 08, hal. 11304 – 11314,
2014.