

Simulasi Filter Aktif Hibrid Konfigurasi Seri-Seri dan Unjuk Kerjanya Untuk Meredam Harmonisa pada Beban *Induction Furnace*

Yusak Tanoto, Limboto Limantara, Ratna Shinta Dewi
Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra
E-mail: tanyusak@petra.ac.id, limboto@petra.ac.id

Abstrak

Penggunaan Filter harmonisa telah banyak direkomendasikan untuk mengatasi permasalahan harmonisa yang ditimbulkan oleh penggunaan beban non linier pada beberapa industri manufaktur. Pada penelitian terdahulu [1,2] Filter Aktif maupun Filter Aktif Hibrid Konfigurasi Paralel terbukti mampu meredam harmonisa arus yang timbul dengan baik. Makalah ini memaparkan salah satu konfigurasi Filter Harmonisa yaitu Filter Aktif Hibrid Konfigurasi Seri-Seri dan disimulasikan untuk meredam harmonisa yang timbul pada beban *Vacuum Induction Furnace* dengan daya 9 kW, 13.8 kVA, 200V, 3 Pasa, 50/60 Hz. Metode yang digunakan untuk menguraikan harmonisa menggunakan rangkaian *Band Pass Filter* (BPF) orde 2 dan menggunakan rangkaian kontrol *Proportional Integral* (PI). Hasil yang didapat dari simulasi menggunakan Filter Aktif Hibrid Konfigurasi Seri-Seri cukup baik yaitu dengan $\%I_{THD}$ sebesar 11.86 % dan $\%V_{THD}$ sebesar 1.88 %. Hasil ini telah sesuai dengan Standar IEEE 519.

Kata kunci: harmonisa, simulasi, filter aktif hibrid konfigurasi seri-seri, THD

Abstract

Harmonics Filter's usage had been widely recommended to overcome harmonics problem which occurred because of non-linear load presence in many industrial plants and manufacturing machines. On the previous research [1,2] it is obvious that both Active Filter and Hybrid Active Filter in Parallel Configuration made a satisfaction results for damping voltage and current harmonics. This paper descript in more depth on one of many types in harmonics filter named Hybrid Active Filter in Serie-Serie Configuration, thus it simulated to reduce harmonics that happened in a load such as vacuum casting induction furnace 9 kW, 13.8 kVA, 200V, 3 Ph, 50/60 Hz. The methods used still the same with the previous filter's simulated. This research (Hybrid Active Filter in Serie-Serie Configuration) produced on $\%I_{THD}$ for 11.86 % and $\%V_{THD}$ for 1.88%. In this case, both $\%I_{THD}$ and $\%V_{THD}$ are fulfilling IEEE 519.

Keywords: harmonics, harmonics, hybrid active filter, passive filter, active filter, THD.

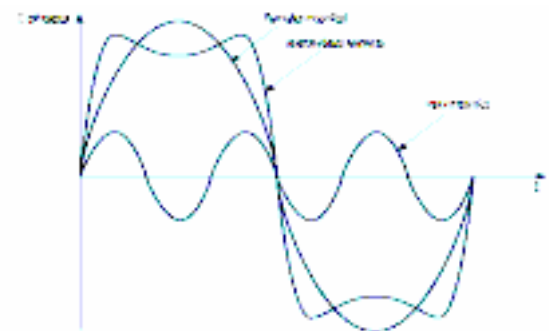
Pendahuluan

Penggunaan Filter untuk meredam harmonisa pada industri modern semakin banyak digunakan karena semakin banyak persoalan harmonisa yang timbul akibat penggunaan komponen beban non linier pada semua jenis industri, terutama industri pengecoran logam, industri baja, dan industri lainnya yang menggunakan peralatan konverter, inverter, dan lain sebagainya. Penggunaan jenis beban ini secara langsung akan mempengaruhi kualitas daya listrik karena arus pada beban non linier tidak berbentuk gelombang sinusoidal murni meskipun sumber tegangan yang dipakai pada saat itu berbentuk gelombang sinusoidal murni.

Harmonisa [1]

Harmonisa merupakan suatu fenomena yang timbul akibat pengoperasian beban listrik non linier, yang merupakan sumber terbentuknya gelombang fre-

kuensi tinggi (kelipatan dari frekuensi fundamental, misal: 100Hz, 150Hz, 200Hz, 300Hz, dan seterusnya), sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan yang idealnya adalah sinusoidal murni akan menjadi cacat akibat distorsi harmonisa yang terjadi. Bentuk gelombang akibat munculnya harmonisa dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 1. Bentuk Gelombang Yang Terdistorsi Harmonisa [3]

Gelombang periodik yang tidak berbentuk sinusoidal dapat dinyatakan dalam jumlah seri harmonisa

Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juni 2006. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 6, nomor 2, September 2006.

frekuensi dasar yang dinyatakan dengan analisis persamaan Fourier sebagai berikut[4]:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_o t + b_n \sin n\omega_o t) \quad (1)$$

di mana:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2)$$

= nilai dari f fundamental untuk satu periode yaitu dari 0 hingga T

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_o t dt \quad (3)$$

= 2 x nilai rata-rata $f(t) \cos n$ untuk satu periode gelombang

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_o t dt \quad (4)$$

= 2 x nilai rata-rata $f(t) \sin n$ untuk satu periode gelombang

n = indeks harmonisa

$\%V_{THD}$ adalah prosentase jumlah total tegangan yang terdistorsi oleh harmonisa, $\%I_{THD}$ adalah prosentase jumlah total arus yang terdistorsi oleh harmonisa, diberikan oleh rumus:

$$\%V_h = \frac{V_h}{V_s} \times 100 = h \frac{I_h}{I_{sc}} \times 100 \quad (5)$$

$$\%V_h = h \frac{(I_h / I_i)}{(I_{sc} / I_i)} \times 100 \quad (6)$$

$$\%I_h = \frac{I_h}{I_s} \times 100 \quad (7)$$

di mana:

V_h : Tegangan harmonisa.

V_s : Tegangan sistem.

I_h : Arus harmonisa.

I_{sc} : Arus *short circuit*.

h : Harmonisa ke- n

I_{sc}/I_i : Rasio pada tabel Limit Distorsi Arus Harmonisa.

I_i : Arus yang mengambil daya beban elektronik.

Total Harmonic Distortion (THD) untuk arus didefinisikan dengan persamaan[5]:

$$I_{THD} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{I_h^2}}{I_i} \quad (8)$$

Total Harmonic Distortion (THD) untuk tegangan didefinisikan dengan persamaan:

$$V_{THD} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{V_h^2}}{V_i} \quad (9)$$

Rangkaian Filter Aktif Hibrid[6]

Dua metode kompensasi yang dapat diaplikasikan pada *harmonics elimination* adalah:

- Kompensasi paralel untuk kompensasi arus beban pada titik yang bermasalah.
- Kompensasi seri untuk kompensasi tegangan pada sumber sebagai titik bermasalah.

Kedua metode kompensasi tersebut dapat diaplikasikan lebih lanjut menggunakan struktur Filter Hibrid, seperti ditunjukkan pada Gambar berikut ini.



Gambar 2. Struktur Filter Hibrid Aktif-Pasif

Struktur ini merupakan gabungan struktur Filter Pasif dan Filter Aktif. Salah satu struktur dari banyak alternatif yang ada yaitu struktur Hibrid Seri-Seri yang tersusun dari:

- Satu rangkaian atau lebih Filter Resonant Pasif (Fi), yang terhubung paralel dengan beban non linier.
- Pengatur harmonisa aktif (Filter Aktif), terdiri atas:
 - *Magnetic Coupler* (Tr), dimana sisi primer dihubungkan seri dengan Filter Pasif
 - Inverter (MUT) yang dihubungkan dengan sekunder *magnetic coupler*.

Tegangan terminal filter aktif dapat diatur melalui pengaturan nilai K sehingga:

$$V_{fa} = K \times I_{SH} \quad (10)$$

Di mana :

V_{fa} = Tegangan terminal pada *magnetic coupler*.

K = Nilai dalam (Ohm).

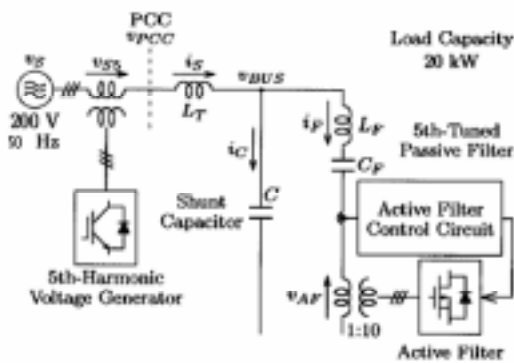
I_{SH} = Arus harmonisa sumber.

Dalam konfigurasi ini Filter Aktif hanya mengkompensasi arus harmonisa, dan meningkatkan keefektifan Filter Pasif. Hal ini bertujuan untuk:

- Mencegah meluasnya tegangan harmonisa dari sumber pada frekuensi anti resonant pada Filter Pasifnya.
- Melemahkan arus harmonisa antara beban dan sumber dengan cara menurunkan impedansi secara global (Filter Pasif dan Filter Aktif).

Struktur ini ideal untuk mengatasi harmonisa tegangan yang tinggi. Gambar 3. menunjukkan konfigurasi sistem untuk Rangkaian Filter Aktif Hibrid dimana komponen Filter Aktifnya terdiri dari tiga *Pulse Width Modulation* (PWM) inverter sumber tegangan 1 fasa. Masing-masing inverter dihubungkan secara seri dengan Filter Pasif yang dituning untuk harmonisa ke-5 melalui transformator 1 fasa dengan perbandingan rasio putaran 1:10.

Induktor L_T dihubungkan secara seri dari *Point of the Common Coupling* (PCC), untuk menunjukkan kebocoran induktor dari sebuah transformator distribusi. Sebuah kapasitor shunt C dihubungkan secara paralel dengan Bus. Kombinasi induktor dan kapasitor membentuk sirkuit resonan seri dan/atau paralel dimana frekuensi resonannya adalah sekitar frekuensi harmonisa ke-5. Generator harmonisa ke-5 terdiri dari PWM inverter. Sumber tegangan 3 fasa digunakan untuk menstimulasikan tegangan harmonisa ke-5 pada bagian kanan PCC.

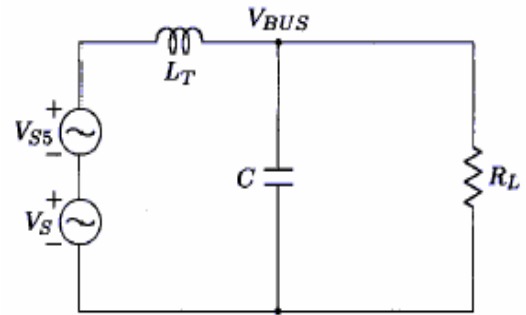


Gambar 3. Rangkaian *Hybrid Active Filter*



Gambar 4. Diagram Satu Fasa Filter Aktif Hibrid Seri-Seri

Gambar 5 menunjukkan rangkaian 1 fasa yang sama dengan sistem pembangkit dengan anggapan bahwa hanya $V_{\text{harmonisa ke-5}}$ yang ada pada PCC.



Gambar 5. Rangkaian Ekuivalen Satu Fasa

Tegangan bus V_{BUS} meliputi tegangan V_{BUS} harmonisa ke-5 yang diperoleh melalui:

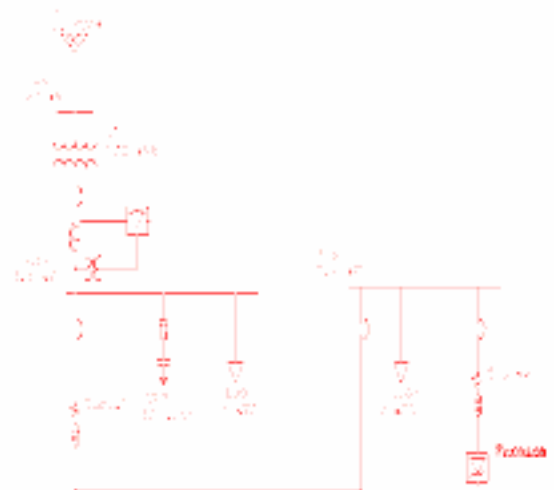
$$V_{BUS5} = \frac{1}{(1-(5\omega)^2 L_T C + \frac{j5\omega L_T}{R_L})} V_{S5} \quad (11)$$

Hal ini menunjukkan bahwa penambahan harmonisa terjadi pada sistem pembangkit tenaga industri. Ketika frekuensi resonansi antara L_T dan C timbul bersamaan dengan frekuensi harmonisa ke-lima, maka persamaan 11 dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$V_{BUS5} = \frac{R_L}{j5\omega L_T} V_{S5} \quad (12)$$

Resonansi harmonisa memperbesar $V_{\text{harmonisa ke-5}}$ sekitar 4 sampai 10 kali pada kondisi beban penuh karena L_T memiliki nilai induktansi sebesar 2 sampai 5%.

Objek Penelitian dan Data Pengukuran



Gambar 6. Single Line Diagram Sistem (82.5 kVA, 380V, 3 fasa, 50 Hz)



Gambar 7. Vacuum Casting Induction Furnace.[2]

Data Teknis:

- Nominal Power : 3 kW, 3 fasa
- Oscillating Frequency : 18 kHz
- Arsorbed Power : 4.6 kVA
- Power Supply : 200V, 50/60Hz

Alat ukur yang digunakan adalah Power Harmonics Analyzer Fluke 41B, untuk mengukur besarnya tegangan, arus, daya, power factor, tingkat kandungan harmonisa.

Pengukuran dilakukan pada:

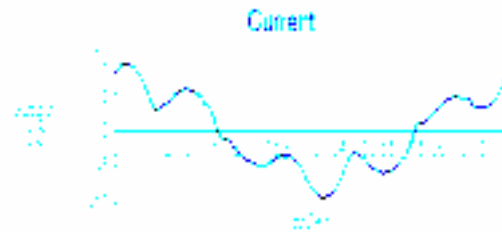
1. Incoming Main Distribution Panel (MDP) dan penghantar netral MDP untuk mengambil data: tegangan, % V_{THD} , % I_{THD} , frekuensi, arus, daya aktif, faktor daya (PF), dan distorsi faktor daya (DPF).
2. Outgoing Sub Distribution Panel (SDP) yang langsung berhubungan dengan bus beban vacuum casting induction furnace untuk mengambil data: tegangan, % V_{THD} , % I_{THD} , frekuensi, arus, daya aktif, faktor daya, dan distorsi faktor daya (DPF).

Tabel 1. Pengukuran Incoming MDP[2]

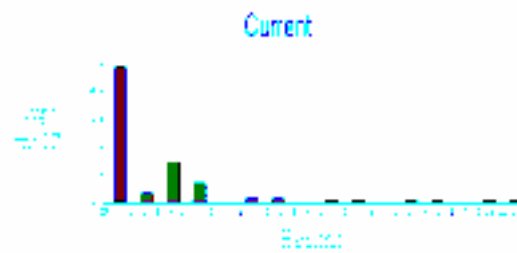
		V		I
F	49.81	RMS	399.2	70.18
Power		Peak	568.7	100.65
KW	-15.2	DC Offset	-0.5	-0.16
KVA	28.02	Crest	1.42	1.43
KVAR	23.48	THD Rms	0.94	3.24
Peak				
KW	-42.5	THD Fund	0.94	3.24
Phase	123° lead	HRMS	3.7	2.27
Total PF	-0.54	KFactor		1.03
DPF	-0.55			

Tabel 2. Pengukuran Induction Furnace[2]

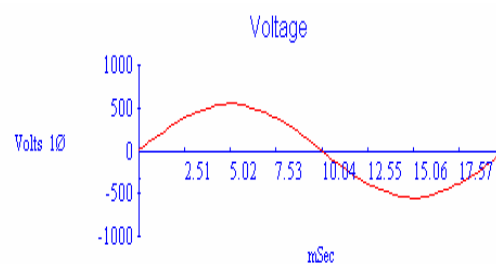
Single Phase Readings		V		I
F	49.81	RMS	395.2	5.18
Power		Peak	569.1	9.3
KW	0.35	DC Offset	-0.4	-0.04
KVA	2.05	Crest	1.44	1.8
KVAR	1.91	THD Rms	1.51	32.41
Peak KW	2.96	THD Fund	1.51	34.26
Phase	80°lead	HRMS	6	1.68
Total PF	0.17	KFactor		4.75
DPF	0.17			



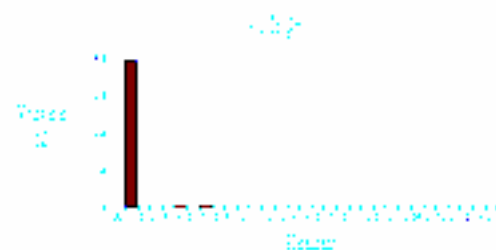
Gambar 8. Gelombang Arus Induction Furnace



Gambar 9. Spektrum Arus pada Induction Furnace



Gambar 10. Gelombang Tegangan pada Induction Furnace



Gambar 11. Spektrum Tegangan pada Induction Furnace

Seperti terlihat pada Gambar 8 dan Gambar 9, bentuk gelombang dan spektrum arus yang ditimbulkan oleh karena penggunaan beban menjadi tidak sinusoidal murni, tetapi terjadi harmonisa arus pada frekuensi harmonisa ke-5 dan ke-7.

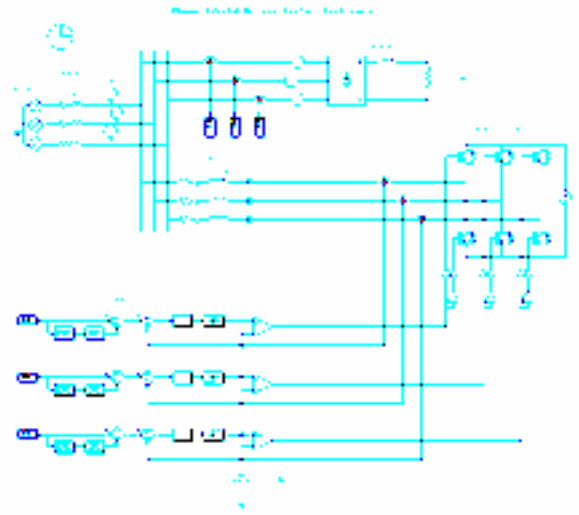
Kompensasi pada Harmonisa Sistem Menggunakan Filter Aktif Hibrid Konfigurasi Seri-Seri

Penelitian terdahulu pada sistem dengan beban *Vacuum Induction Furnace* tanpa menggunakan filter[1] menunjukkan bahwa telah terjadi harmonisa arus pada frekuensi harmonisa ke-5 (250 Hz) sebesar 7.79 A, dan pada frekuensi harmonisa ke-7 (350 Hz) sebesar 4.49 A. Demikian juga untuk $\%I_{THD}$ dan $\%V_{THD}$ pada sistem tanpa filter telah diketahui nilainya masing-masing sebesar 32.86% ($\%I_{THD}$) dan 4.5% ($\%V_{THD}$).

Konfigurasi untuk simulasi ini berupa sistem pembangkit industri mempunyai data : 200 V, 50 Hz dan 20 kVA (data dari sisi sekunder trafo). Filter Aktif terdiri dari sebuah inverter PWM sebagai sumber tegangan 3 fasa yang menggunakan 6 IGBT. Setiap inverter dihubungkan paralel dengan Filter Pasif yang disetting pada frekuensi harmonisa ke-5. Rating Filter Aktif sebesar 0.14 kVA-hanya sebesar 0.7% dari 20kVA, sedangkan rating Filter Pasif adalah 0.43 kVA atau 2% dari 20 kVA. Sebuah induktor L_T seperti pada Gambar 2 dihubungkan seri ke bawah pada PCC, untuk menunjukkan induktansi bocor pada trafo distribusi.

Rangkaian kontrol yang digunakan untuk meredam arus dan tegangan harmonisa menggunakan rangkaian *Band Pass Filter* orde 2 disetting pada: *Centre Frequency* 50 Hz dengan *Passing Band* 45 Hz, untuk mendapatkan bentuk gelombang yang baik. Rangkaian kontrol yang digunakan berupa kontroler Proporsional Integral (PI).

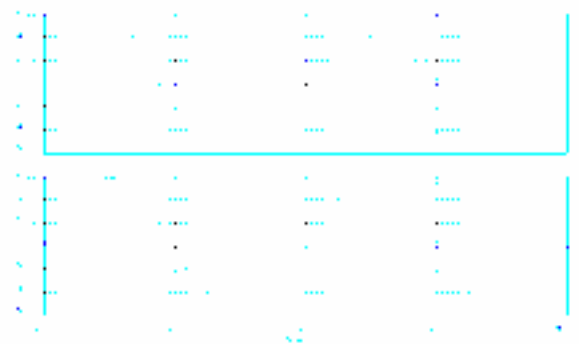
Beban yang dipakai mengandung harmonisa ke-5 dan harmonisa ke-7, yaitu *Induction Furnace* dengan daya 9 kW, 13.8 kVA, 200V, 3 Fasa, yang dapat dibuat rangkaian pengganti sebagai *rectifier* tiga fasa dengan beban R, L yang digunakan untuk menghasilkan harmonisa ke 5 dan harmonisa ke 7. Dari data tersebut maka dapat diketahui arus pada beban sebesar $\approx 40A$, maka pemodelan untuk beban juga disetting dengan besar arus sebesar $\approx 40 A$. Pemodelan rangkaian Filter seperti gambar berikut ini[7]:



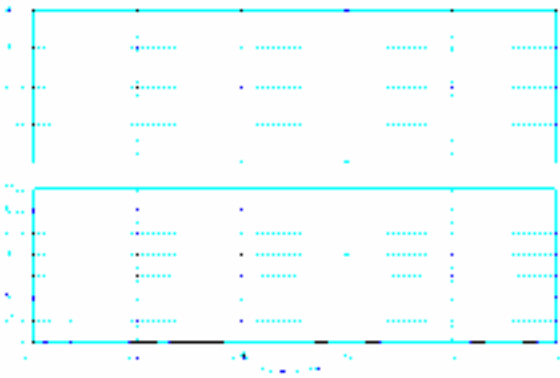
Gambar 12. Rangkaian Simulasi *Vacuum Casting Induction Furnace* dengan Filter Hibrid Aktif Konfigurasi Seri-Seri

Dari hasil simulasi diatas didapat V_{input} mengandung $V_{fundamental}$ (200V), $V_{harmonisa}$ ke-5 dan $V_{harmonisa}$ ke-7. Dari V_{input} tersebut akan dikurangi dengan V_{bpf} menjadi V_{output} yang hanya mengandung $V_{harmonisa}$ ke-5 dan $V_{harmonisa}$ ke-7. V_{output} tersebut akan dipakai sebagai referensi untuk mentrigger IGBT (filter aktif). BPF yang dipakai pada sistem ini akan memisah $V_{fundamental}$, $V_{harmonisa}$ ke-5, $V_{harmonisa}$ ke-7 menjadi $V_{harmonisa}$ ke-5 dan $V_{harmonisa}$ ke-7.

Rangkaian Pembangkit Sinyal PWM menggunakan Op Amp sebagai komparator dan sinyal pembangkit gelombang segitiga. Pada simulasi ini dipakai frekuensi pembangkit gelombang segitiga 12 kHz. Unjuk kerja Filter Aktif Hibrid Konfigurasi Seri-Seri dalam meredam harmonisa arus dan tegangan seperti terlihat pada gambar berikut ini.



Gambar 13. Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan yang Sudah Terfilter oleh Filter Hibrid Aktif Konfigurasi Seri-Seri



Gambar 14. Bentuk Spektrum Arus dan Tegangan yang Sudah Terfilter oleh Filter Hibrid Aktif Konfigurasi Seri-Seri

Dari Gambar 13 dan Gambar 14 tampak bentuk gelombang arus 3 fasa yang dihasilkan telah lebih baik dibandingkan tanpa filter meskipun belum berbentuk sinusoidal murni. Di sisi lain, bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan sudah cukup baik. Hal ini juga dapat dijelaskan melalui perhitungan $\%I_{THD}$ dan $\%V_{THD}$ berikut ini:

Berdasarkan persamaan 7, jika Diketahui: $I_{RMS} = 39.83$ A, $I_1 = 39.29$ A, $I_5 = 2.58$ A, $I_7 = 1.61$ A, $I_9 = 0.17$ A, $I_{11} = 2.63$ A, $I_{13} = 2.35$ A, maka $I_{THD} (\%) = 11.86$ %. Untuk $V_1 = 143.63$ Volt, $V_5 = 1.35$ Volt, $V_7 = 0.865$ Volt, $V_9 = 0.098$ Volt, $V_{11} = 1.58$ Volt, $V_{13} = 1.51$ Volt, maka $V_{THD} (\%) = 1.88$ %. Berdasarkan hasil perhitungan, Filter Aktif Hibrid Konfigurasi Seri-Seri dapat dipergunakan untuk meredam harmonisa arus dan tegangan. Nilai $\%I_{THD}$ dapat diterima/didalam standar THD yang diperbolehkan meskipun memiliki nilai sedikit dibawah standar $\%I_{THD}$ yaitu 15 %. Nilai $\%V_{THD}$ sudah sesuai dengan dengan standar THD yang diperbolehkan. $\%THD$ tegangan sudah dapat diterima karena standart THD untuk tegangan yaitu 5% (untuk tegangan dibawah 69 kV. Dengan $I_{SC} = 10$ kA (Kapasitas pemutusan MCB) dan $I_L \approx 40$ A (Perhitungan nilai arus *Induction Furnace* 13.8 kVA, 200 V, 3 fasa), maka: $I_{SC}/I_L = 10$ kA/40 A = 250 (antara 100-1000, sesuai tabel standard minimum I_{THD}), dengan demikian standar THD yang digunakan untuk arus adalah 15% seperti yang terlihat pada Tabel 3 dan Tabel 4 berikut ini

Tabel 3. Limit Distorsi Tegangan Harmonisa[8]

HARMONIC VOLTAGE DISTORTION In % of Fundamental	HARMONIC ORDER (ODD HARMONICS)		
	<69	69 - 138 kV	> 138 kV
Max. for Individual Harmonic	3	1.5	1
Total Harmonic Distortion (THD)	5	2.5	1.5

Tabel 4. Limit Distorsi Arus Harmonisa[8]

I _{SC} /I _L	HARMONIC ORDER (ODD HARMONICS)					THD
	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	
<20*	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

EVEN HARMONICS are limited to 25 % of the odd harmonic limits above

• All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L

I_{sc} = Maximum short circuit current at PCC
 I_L = Maximum load current (fundamental frequency) at PCC

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Peredaman harmonisa arus menggunakan Filter Aktif Hibrid Konfigurasi Seri-Seri pada *Vacuum Casting Induction Furnace* adalah sebesar 11.86 %, telah sesuai dengan standar I_{THD} (15%). Peredaman harmonisa tegangan sebesar 1.88 %, telah sesuai dengan standar V_{THD} (5 %).
2. Filter Aktif Hibrid Konfigurasi Seri-Seri kurang menunjukkan *performance* yang baik untuk meredam harmonisa arus karena hanya menghasilkan perbaikan arus sebesar $\pm 20\%$ ($\%I_{THD}$ sebesar 11.86%) dibanding dengan limit distorsi yang diijinkan (15%).
3. Konfigurasi Filter Aktif sebagai komponen dari Jenis filter ini sangat optimal untuk meredam harmonisa tegangan yang timbul. Hal ini disebabkan oleh konfigurasi seri-seri yang memang ideal (memberikan hasil optimal) untuk mengatasi harmonisa tegangan dibandingkan harmonisa arus.

Daftar Pustaka

- [1] Tanoto, Yusak, et.al. *Simulasi Aktif Filter dan Sistem Kerja Rangkaian dalam Meredam Harmonisa pada Vacuum Casting Induction Furnace dengan Daya 9 kW, 13.8 kVA, 200 V, 3 Fasa, 50/60 Hz*. Surabaya: Jurnal Teknik Elektro UK Petra 2005
- [2] Limantara, Limboto, et.al. *Simulasi Hybrid Active Filter Dalam Meredam Harmonisa pada Induction Furnace dengan Daya 9 kW, 13.8 kVA, 200 V, 3 Ph, 50/60 Hz*. Surabaya: Prosidings SITIA 2005
- [3] Roccia, Pierre and Quillon, Noël, *Harmonics in Industrial Networks*. Cahier Technique Merlin Gerin no: 152
- [4] B.L. Theraja, *A Textbook of Electrical Technology*, S Chand & Company LTD:1997

- [5] Li, Jianlin, et al. *A Novel Current-source Converter with Carrier Phase Shifted SPWM for Active Power Filter*. Electrical Engineering Dept. Zhejiang University Hangzhou. China: 2000.
- [6] Fujita, Hideaki and Yamasaki, Takahiro, *A Hybrid Active Filter for Damping of Harmonic Resonance in Industrial Power Systems*, IEEE Transaction On Power Electronic, vol. 15, no. 2, March 2000.
- [7] Powersim, Inc. *PSim Powersim Version 6.0*.
- [8] Burke, James J. *Power Distribution Engineering-Fundamentals And Applications*. NewYork: Marcel Dekker INC, 1994.