



TUGAS AKHIR - TE 141599

STUDI KINERJA FILTER DAYA AKTIF DENGAN METODE TEORI P-Q UNTUK BEBAN HARMONIK TINGGI PADA BEBAN BUSUR LISTRIK

Avif Prastya Ardyansah
NRP 07111645000027

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI KINERJA FILTER DAYA AKTIF DENGAN
METODE TEORI P-Q UNTUK BEBAN HARMONIK
TINGGI PADA BEBAN BUSUR LISTRIK**

Avif Prastya Ardyansah
NRP 0711164500027

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**THE STUDY OF PERFORMANCE ACTIVE POWER
FILTERS BY P-Q THEORY METHOD FOR HIGH
HARMONIC LOADS ON THE ELECTRIC ARC LOAD**

Avif Prastya Ardyansah
NRP 0711164500027

Supervisors
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

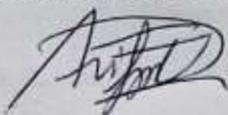
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“STUDI KINERJA FILTER DAYA AKTIF DENGAN METODE TEORI P-Q UNTUK BEBAN HARMONIK TINGGI PADA BEBAN BUSUR LISTRIK”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 16 Juli 2018



Avif Prastya Ardyansah
07111645000027

Halaman ini sengaja dikosongkan

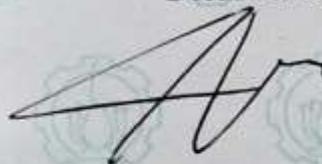
**STUDI KINERJA FILTER DAYA AKTIF DENGAN
METODE TEORI P-Q UNTUK BEBAN HARMONIK
TINGGI PADA BEBAN BUSUR LISTRIK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I


17
2018

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 19731119 200003 1 001

Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP. 19660318 199010 1 001



Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI KINERJA FILTER DAYA AKTIF DENGAN METODE TEORI P-Q UNTUK BEBAN HARMONIK TINGGI PADA BEBAN BUSUR LISTRIK

Nama mahasiswa : Avif Prastya Ardyansah
Dosen Pembimbing I : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

Abstrak:

Harmonisa yang dibangkitkan oleh beban busur listrik selama proses pengelasan berlangsung dapat menimbulkan gangguan pada sistem kelistrikan. Pada mesin las digunakan prinsip elektronika daya untuk menghasilkan busur listrik. Oleh karena itu, permasalahan ini harus segera diselesaikan untuk mengurangi resiko yang ditimbulkan pada peralatan disekitarnya. Untuk mengkompensasi arus harmonisa ini perlu digunakan filter aktif. Pada tugas akhir ini digunakan filter aktif yang dipasang paralel dengan sumber tegangan tidak ideal. Metode yang digunakan untuk perhitungan arus kompensasi adalah teori p-q dan bandpass filter. dari kedua metode tersebut akan dibandingkan performansinya dalam mengkompensasi arus harmonisa yang muncul.

Inverter yang berfungsi sebagai filter aktif yang dipasang paralel akan menghasilkan *output* berupa arus kompensasi harmonisa yang akan digunakan untuk mengeliminasi arus harmonisa pada *Point of Common Coupling* (PCC). Sumber tegangan yang tidak ideal akan dinormalisasi menggunakan d-q *frame* dan *low pass* filter. Tegangan dan arus beban dijadikan inputan dalam perhitungan teori p-q sedangkan arus beban dijadikan inputan dalam perhitungan bandpass filter, untuk membangkitkan arus anti harmonisa dalam tegangan tidak ideal.

Hasil tugas akhir ini menunjukkan bahwa performansi dari metode teori p-q lebih unggul dibandingkan bandpass filter dalam respon dinamis ketika arus beban sesaat dinaikkan dengan waktu rata-rata 48,7 ms untuk teori p-q dan 90 ms untuk bandpass filter. Sedangkan untuk THDi teori p-q adalah 3,34% dan bandpass filter adalah 3%. Pada tugas akhir ini hasil analisa data menggunakan software PSIM.

Kata kunci: *Filter Aktif, Teori p-q, Bandpass Filter, Mesin Las*

Halaman ini sengaja dikosongkan

THE STUDY OF PERFORMANCE ACTIVE POWER FILTERS BY P-Q THEORY METHOD FOR HIGH HARMONIC LOADS ON THE ELECTRIC ARC LOAD

Student Name : Avif Prastya Ardyansah
Supervisor I : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Supervisor II : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.

Abstract:

Harmonics caused by the burden of electric arc used for the welding process by using the principle of switching to obtain DC source cause electrical system disruption. Therefore, this problem must be resolved immediately to reduce the risk posed to the surrounding equipment. To compensate for this harmonic current it is necessary to use active filter. In this final project used active filter that installed in parallel with voltage source is not ideal. The method used for calculation of compensation flow is p-q and bandpass filter theory. of the two methods will be compared to its performance in compensating for the current harmonics.

Inverters that act as parallel-mounted active filters will produce outputs of harmonic compensation currents that will be used to eliminate harmonic currents at Point of Common Coupling (PCC). The non-ideal voltage source will be normalized by using d-q frame and low pass filter. Normalized stress is used as input in p-q calculation while welding load current is used as input in calculation of bandpass filter, to generate anti-harmonic current in not ideal voltage.

The result of this final project shows that the performance of the p-q theory method is superior to bandpass filter in dynamic response when the instantaneous load current is increased with 48.7 ms average time for p-q and 90 ms theory for bandpass filter. As for the THDi theory p-q is 3.34% and the bandpass filter is 3%. In this final project data analysis using PSIM software.

Key Word: Active Filter, p-q Theory, Bandpass Filter, Welding Machine

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**STUDI KINERJA FILTER DAYA AKTIF DENGAN METODE TEORI P-Q UNTUK BEBAN HARMONIK TINGGI PADA BEBAN BUSUR LISTRIK**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Yang tercinta orang tua Ariyanto dan Sulistyowati terima kasih atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D. dan Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Bapak Wahyu Wijaya yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan pengambilan data di PT. PAL Indonesia sehingga dapat menyelesaikan proses pengerjaan Tugas Akhir ini,
6. Teman-teman seperjuangan Lintas Jalur Teknik Elektro tahun 2016 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, 16 Juli 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	ixi
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	1
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Relevansi.....	3
BAB 2 FILTER AKTIF DAN BEBAN BUSUR LISTRIK.....	5
2.1 Beban Busur Listrik	5
2.2 Filter Aktif.....	5
2.3 Sistem Kontrol Filter Aktif Paralel menggunakan Teori p-q ..6	
2.4 Sistem Kontrol Filter Aktif menggunakan Bandpass Filter9	
BAB 3 DESAIN FILTER AKTIF.....	11
3.1 Diagram Blok Sistem	11
3.2 Inverter sebagai Filter Aktif	13
3.3 Pemodelan Beban Busur Listrik.....	13
3.4 Blok d-q Frame dan Low Pass Filter.....	18
3.5 Blok Teori p-q.....	20
3.6 Blok Bandpass Filter	21
3.7 Blok Linier Current Regulator	22
3.8 Blok DC Link.....	23
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA.....	25
4.1 Parameter Sistem untuk Simulasi.....	25

4.2	Simulasi Sistem Tanpa Filter	25
4.3	Simulasi Sistem dengan Metode Teori p-q dan Linier Current Regulator pada Tegangan Tidak Ideal	29
4.4	Simulasi Sistem dengan Metode Bandpass Filter dan Linier Current Regulator pada Tegangan Tidak Ideal	33
4.5	Performansi Metode Bandpass Filter dengan Metode Teori p-q ketika Amplitude Arus dinaikkan	38
4.6	Perbandingan Kinerja dari Metode Bandpass Filter dengan Metode Teori p-q untuk Kompensasi Harmonisa	41
BAB 5 KESIMPULAN		43
5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran	43
DAFTAR PUSTAKA		45
LAMPIRAN		47
BIODATA PENULIS		51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Flowchart Sistem.....	3
Gambar 2.1	Konfigurasi filter aktif paralel.....	6
Gambar 2.2	Blok Diagram Perhitungan Teori p-q.....	8
Gambar 2.3	Blok Diagram Bandpass filter.....	9
Gambar 3.1	Blok diagram fitler aktif paralel dengan metode teori p-q dan bandpass filter.....	11
Gambar 3.2	Voltage Source Inverter dengan menggunakan IGBT.....	13
Gambar 3.3	Penempatan Clamp arus dan tegangan pada panel.....	15
Gambar 3.4	Hasil pengukuran harmonisa mesin las 3 phase.....	16
Gambar 3.5	Hasil pengukuran gelombang Arus mesin las 3 pahse....	16
Gambar 3.6	Rangkaian pemodelan sumber arus mesin las 3 phase....	18
Gambar 3.7	Rangkaian Transformasi dq dan LPF.....	19
Gambar 3.8	Rangkaian perhitungan Teori p-q.....	20
Gambar 3.9	Rangkaian Bandpass filter.....	21
Gambar 3.10	Rangkaian Linier Current Regulator.....	22
Gambar 3.11	Rangkaian Dc Link.....	23
Gambar 4.1	Gelombang Arus Sumber tanpa filter.....	26
Gambar 4.2	Spektrum frekuensi Arus Sumber tanpa filter.....	26
Gambar 4.3	Tegangan sumber tanpa filter THD 1,39%.....	27
Gambar 4.4	Spektrum frekuensi Tegangan tanpa filter.....	27
Gambar 4.5	Gelombang Arus sumber dengan metode teori p-q.....	30
Gambar 4.6	Spektrum frekuensi arus sumber dengan metode teori p-q.....	30
Gambar 4.7	Tegangan sumber sistem dengan metode teori p-q.....	31
Gambar 4.8	Spektrum frekuensi tegangan sumber dengan metode teori p-q.....	31
Gambar 4.9	Gelombang Arus sumber dengan metode band pass filter.....	34
Gambar 4.10	Spektrum frekuensi Arus sumber dengan metode band pass filter.....	34
Gambar 4.11	Gelombang Tegangan sumber dengan metode band pass filter.....	35
Gambar 4.12	Spektrum frekuensi tegangan sumber dengan metode band pass filter.....	35
Gambar 4.13	Respon dinamis arus sumber saat amplitude arus naik dan turun dengan metode bandpass filter.....	38

Gambar 4.14 Respon dinamis arus sumber saat amplitude naik dan turun
dengan metode teori p-q.....40

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi Mesin Las 3 Phase Jenis FCAW	14
Tabel 3.2	Data Hasil Pengukuran nilai THDi Beban Mesin Las 3 Phase	17
Tabel 4.1	Parameter simulasi filter aktif	25
Tabel 4.2	THD arus sumber sistem tanpa filter.....	28
Tabel 4.3	THD tegangan sumber tanpa filter	28
Tabel 4.4	Hasil pengukuran sistem tanpa filter	29
Tabel 4.5	THD arus sumber dengan metode teori p-q	32
Tabel 4.6	THD tegangan sumber dengan metode teori p-q.....	32
Tabel 4.7	Hasil pengukuran sistem dengan filter aktif paralel metode teori p-q	33
Tabel 4.8	THD Arus sumber dengan metode band pass filter.....	36
Tabel 4.9	THD Tegangan sumber dengan metode band pass filter....	37
Tabel 4.10	Hasil pengukuran sistem dengan filter aktif paralel metode band pass filter	37
Tabel 4.11	Waktu yang dibutuhkan untuk steady state dengan metode band pass filter	39
Tabel 4.12	Waktu yang dibutuhkan untuk steady state dengan metode teori p-q	40
Tabel 4.13	Perbandingan kinerja sistem tanpa filter dengan menggunakan filter metode teori p-q dan band pass filter.	41

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kualitas daya dalam sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh beban tidak linier yang berasal dari peralatan elektronika dan teknologi semikonduktor yang menyebabkan munculnya polusi harmonisa [1]. Beban tidak linier yang dimaksud seperti mesin las, static var kompensator, konverter, pengendali kecepatan motor dan lain – lain. Arus harmonisa yang terbangkit akan menyebabkan ketidakstabilan sistem dan menurunkan performansi peralatan listrik.

Salah satu cara untuk mengkompensasi harmonisa adalah dengan pemasangan filter daya. Filter daya dibedakan menjadi 2 jenis yaitu filter pasif dan filter aktif. Filter pasif menggunakan kombinasi induktor dan kapasitor untuk menghilangkan frekuensi harmonisa yang telah ditentukan. Kelemahan dari filter pasif ini adalah kompensasi harmonisa yang diberikan bersifat tetap, sehingga tidak dapat menghilangkan frekuensi harmonisa selain yang telah ditentukan sedangkan filter aktif memiliki kelebihan dapat mengeliminasi berbagai frekuensi harmonisa yang timbul. Pada filter aktif ini terdapat inverter dan kontroler untuk mengatur besaran kompensasi yang diberikan untuk mengeliminasi arus harmonisa yang timbul. Sumber tegangan yang digunakan merupakan sumber tegangan tidak ideal dimana sumber tersebut berada dalam kondisi bukan sinusoidal murni sehingga perlu dilakukan pengaturan terlebih dahulu dengan menggunakan *d-q frame* dan *low pass filter*. Filter aktif tersebut akan dipasang paralel dengan beban tidak linier.

Mesin las dipilih sebagai beban tidak linier karena memiliki distorsi gelombang yang bersifat random yang dihasilkan selama proses pengelasan. Filter aktif paralel akan mengkompensasi arus harmonisa mesin las dengan menggunakan perhitungan teori p-q dan bandpass filter yang digunakan untuk membangkitkan arus kompensasi.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana kinerja filter daya aktif paralel terhadap beban harmonik tinggi pada busur listrik.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah menganalisa kinerja filter daya aktif berbasis p-q teori dan bandpass filter pada beban dengan harmonik tinggi pada beban busur listrik.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Beban busur listrik yang digunakan adalah mesin las.
2. Untuk menentukan pola pensaklaran pada inverter digunakan metode *Linier Current Control*.
3. Untuk menjaga agar *output* tetap stabil sesuai dengan *set point* yang telah ditentukan maka digunakan kontrol PI
4. Digunakan untuk saluran 3 phase dengan sumber tidak ideal.
5. Untuk menentukan besaran arus kompensasi digunakan metode Teori p-q
6. Untuk menentukan besaran arus kompensasi digunakan metode Bandpass Filter

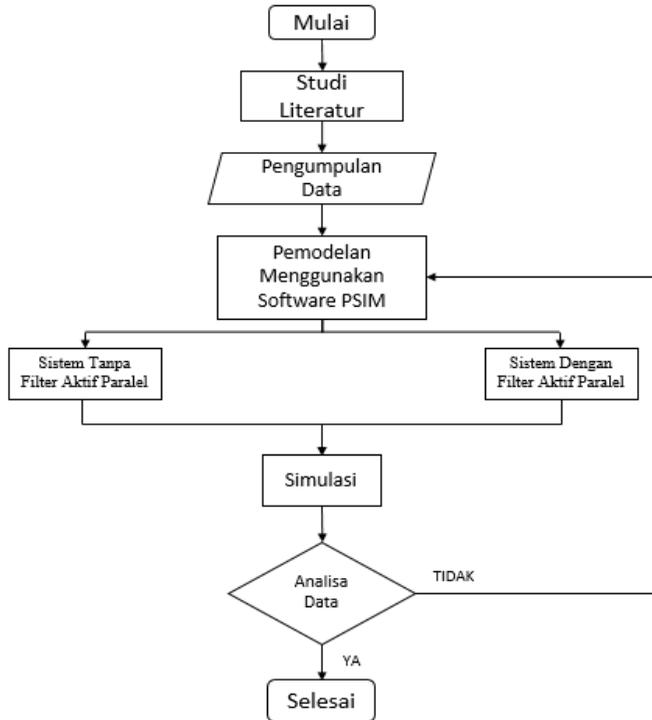
1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi pustaka
Studi pustaka yang dilakukan yaitu mempelajari informasi – informasi yang berkaitan dengan topik tugas akhir yaitu bagaimana cara mendesain filter daya aktif paralel dengan metode p-q teori dan menganalisa kinerja dari filter tersebut ketika diberikan beban dengan harmonik tinggi (mesin las). Referensi diperoleh dari journal/paper IEEE dan buku yang berkaitan dengan *Power Elelctronic*.
2. Pengambilan data
Pada tahap ini data yang diambil berupa bentuk gelombang dan spektrum frekuensi dari beban tidak linier yaitu mesin las. Pada saat proses pengelasan berlangsung bentuk gelombang dan spektrum frekuensi akan di Capture dengan alat ukur Fluke Power Quality Analyzer.
3. Pemodelan dan simulasi
Setelah proses pengumpulan data dilakukan, selanjutnya melakukan pemodelan dan simulasi filter daya aktif paralel dengan metode p-q teori menggunakan software PSIM.

4. Analisa Data

Setelah melakukan simulasi tahap selanjutnya adalah menganalisa data yang diperoleh dari simulais dengan membandingkan nilai THDi sebelum dan setelah pemasangan filter daya aktif paralel dengan menggunakan metode p-q teori sehingga dapat diketahui kinerja dari filter tersebut.



Gambar 1.1 Flowchart Sistem

1.6 Relevansi

Hasil Tugas akhir bisa dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam dunia industri untuk mengatasi persoalan harmnonisa dan dapat dijadikan rujukan untuk penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

FILTER AKTIF DAN BEBAN BUSUR LISTRIK

2.1 Beban Busur Listrik

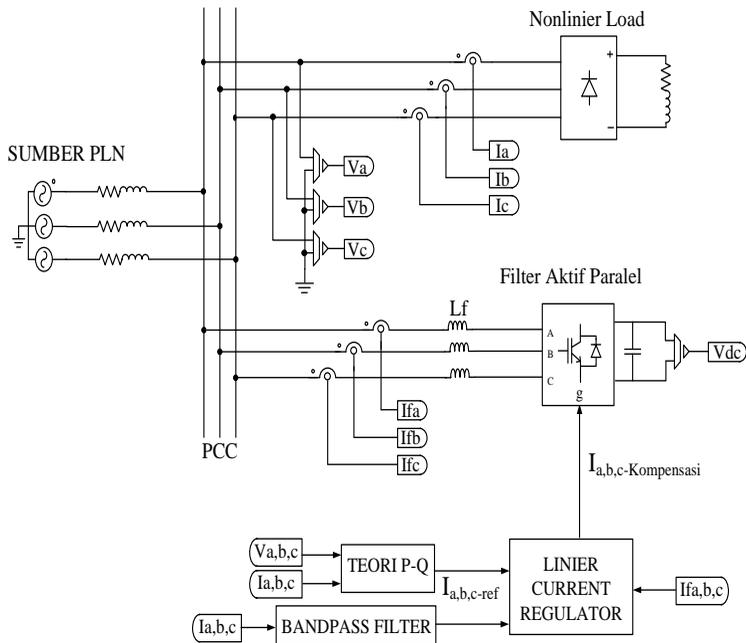
Las merupakan sebuah proses penyambungan dua buah material logam yang digabungkan menjadi satu melalui mekanisme pemanasan (ketika temperatur dinaikkan menyebabkan lempengan logam tersebut cepat lunak dan melebur menjadi satu). Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada saat proses pengelasan berlangsung yaitu dibutuhkan pengaturan suhu temperatur sesuai dengan karakteristik bahan. Panas tersebut diperloeh dari divergensi tegangan dengan benda yang akan di las sehingga akan muncul *arcing* yang berasal dari arus listrik [2]. Hal inilah yang menjadi alasan kenapa mesin las dijadikan sebagai beban yang mengandung harmonik tinggi selain itu juga bentuk gelombang yang dihasilkan bersifat acak atau random. Proses pengelasan yang paling sering digunakan yaitu Oxyacetylene welding (OAW), Shielded metal arc welding (SMAW), Gas tungsten arc welding (GTAW), Flux cored arc welding (FCAW), dan Torch or oxyfuel brazing (TB). Pada penelitian ini sampel yang diambil merupakan mesin las jenis FCAW.

Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui seberapa besar harmonik yang disumbang oleh mesin las 3 phase dan kemudian akan dilihat performansi pada saat di filter menggunakan filter aktif paralel dengan metode teori $p - q$ dan band pass filter.

2.2 Filter Aktif

Filter aktif berfungsi untuk mengeliminasi harmonisa di sisi sumber berdasarkan sistem kontrol yang digunakan. Selain itu, filter aktif juga berfungsi untuk mengkompensasi daya reaktif ke beban.

Gambar 2.1 Menunjukkan konfigurasi dari filter aktif paralel yang terhubung dengan beban tidak linier. Filter aktif terhubung dengan jaringan distribusi melalui *Point of Common Coupling* (PCC) melalui induktor LF. Induktor LF bukan sebagai induktor filter (filter pasif) melainkan sebagai induktor kopel atau induktor Alternating Current (AC) yang berfungsi sebagai tapis pesaklaran VSI.



Gambar 2.1 Konfigurasi filter aktif paralel

2.3 Sistem Kontrol Filter Aktif Paralel menggunakan Teori p-q

Pola penyalaan saklar *Voltage Source Inverter* (VSI) yang terdapat pada filter aktif untuk menginjeksi arus anti harmonisa ditentukan oleh arus referensi ($I_{a,b,c-ref}$). Arus referensi dibandingkan dengan arus *feedback* ($I_{fa,b,c}$) yang diinjeksikan dengan menggunakan *Linier current regulator*. Kemudian akan diperoleh pola penyaklaran untuk mengatur VSI. Teori p-q sendiri merupakan teori yang berdasarkan perhitungan dari daya aktif dan reaktif dalam domain waktu. Teori ini menggunakan sistem tiga phase tanpa mempertimbangkan netral. Daya aktif dan reaktif diperoleh dengan cara mengukur nilai arus dan tegangan dari beban yang mengandung harmonisa yang dijadikan sebagai parameter dalam membangkitkan arus kompensasi. Besaran tegangan dan arus tiga fasa hasil pengukuran dalam koordinat abc akan ditransformasikan menjadi koordinat $\alpha\beta$ menggunakan transformasi clarke. Persamaan (2.1) dan (2.2) masing – masing merupakan matrik transformasi tegangan dan arus dari koordinat abc menjadi koordinat $\alpha\beta$ [4].

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Daya aktif dan daya reaktif sesaat berdasarkan teori p-q dapat dinyatakan dengan komponen tegangan dan arus pada koordinat $\alpha\beta$ seperti pada persamaan (2.3).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Daya sesaat p dan q pada persamaan (2.3) terdiri dari komponen AC (\tilde{p} dan \tilde{q}) dan DC (P dan Q), sehingga:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P + \tilde{p} \\ Q + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Besar arus sumber sebagai fungsi dari daya p dan q adalah :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

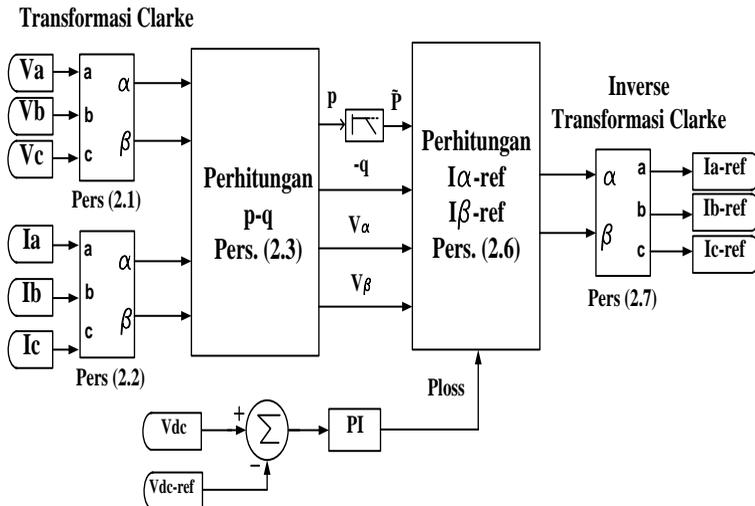
Dari persamaan (2.4) dan persamaan (2.5) dapat diketahui bahwa untuk mengeliminasi daya reaktif dari sisi sumber adalah dengan membuat negatif nilai q pada persamaan (2.5). Untuk memisahkan komponen harmonisa arus sumber, daya p hanya menggunakan komponen AC \tilde{p} . Kemudian ditambahkan dengan besarnya rugi daya dari VSI yang direpresentasikan sebagai P_{loss} . Sehingga arus referensi yang dibangkitkan adalah :

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha-ref} \\ I_{\beta-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ V_{\beta} & -V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} + P_{loss} \\ -q \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Arus referensi pada persamaan (2.6) kemudian ditransformasikan dari koordinat $\alpha\beta$ menjadi koordinat abc dengan persamaan (2.7) berikut:

$$\begin{bmatrix} I_{a-ref} \\ I_{b-ref} \\ I_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha-ref} \\ I_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Berikut merupakan mekanisme teori p-q untuk membangkitkan arus referensi filter aktif seperti ditunjukkan blok diagram pada gambar 2.1.



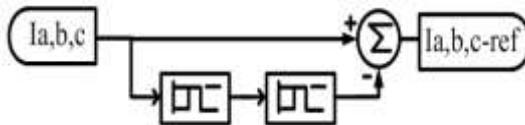
Gambar 2.2 Blok Diagram Perhitungan Teori p-q

2.4 Sistem Kontrol Filtir Aktif menggunakan *Bandpass* Filter

Bandpass filter merupakan sebuah rangkaian filter yang memberikan output yang tetap jika frekuensi input berada dalam range frekuensi kerja dari filter atau diantara frekuensi cut – off atas dan frekuensi cut off bawah. Band pass filter tersusun dari high pass filter yang diseri dengan low pass filter[3]. Berikut merupakan rangkaian dari bandpass filter yang ditunjukkan pada gambar 2.3. dari gambar tersebut dapat diketahui bahwasannya arus harmonisa ($I_{\text{harmonisa}}$) diperoleh dengan cara arus total (I_{total}) dikurangi dengan arus fundamentalnya ($I_{\text{fundamental}}$) sesuai dengan persamaan 2.8.

$$I_{\text{harmonisa}} = I_{\text{total}} - I_{\text{fundamental}} \quad (2.8)$$

sehingga dapat diperoleh arus kompensasi untuk mereduksi harmonisa yang ditimbulkan oleh beban nonlinier dalam hal ini adalah mesin las.



Gambar 2.3 Blok Diagram *Bandpass* filter

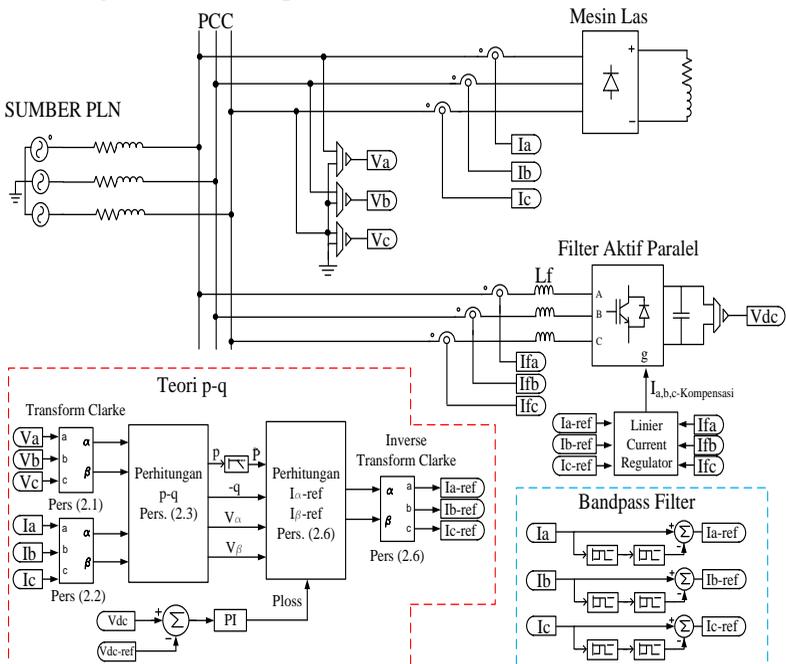
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 DESAIN FILTER AKTIF

Pada bagian ini akan membahas mengenai desain filter aktif pada beban busur listrik menggunakan teori p-q dan *bandpass* filter. Desain filter aktif dengan teori p-q dan *bandpass* filter digunakan untuk menentukan arus kompensasi untuk mereduksi harmonisa pada beban nonlinier dan beban busur listrik.

3.1 Diagram Blok Sistem

Pada single line diagram di bawah ini merepresentasikan sistem kerja dari filter daya aktif yang dipasang secara paralel dengan beban non linier yaitu mesin las dan komponen utama yang digunakan untuk membangkitkan arus kompensasi.



Gambar 3.1 Blok diagram filter aktif paralel dengan metode teori p-q dan *bandpass* filter

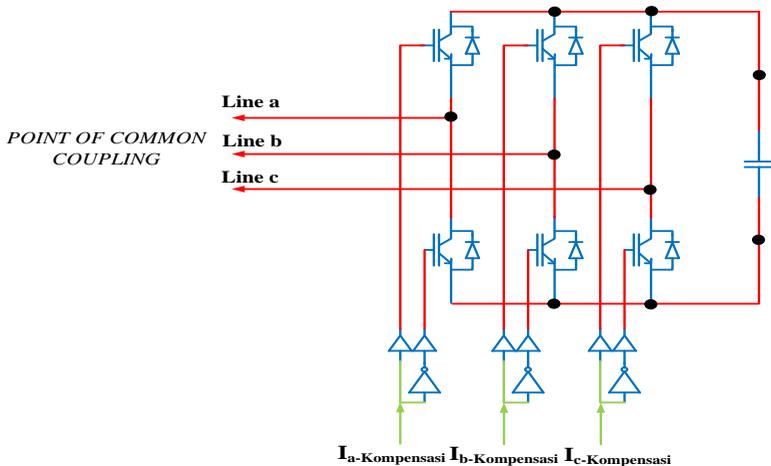
Sumber yang digunakan merupakan sumber tidak ideal 3 phase dengan tegangan fasa netral 220 V serta frekuensi 50 Hz. Mesin las dipilih sebagai beban non linier karena selama proses pengelasan akan muncul *arcing* yang menyebabkan distorsi gelombang yang bersifat *random*. Gelombang yang terdistorsi akan di ukur menggunakan sensor tegangan (V_{abc}) dan arus (I_{abc}) dengan tujuan untuk mengetahui besaran nilai gelombang yang terdistorsi. Besarnya arus dan tegangan 3 phase yang terukur menggunakan sensor dalam koordinat abc akan ditransformasikan menggunakan transformasi *Clarke* menjadi koordinat $\alpha\beta$. Dari koordinat $\alpha\beta$ tersebut akan dilakukan perhitungan dengan menggunakan Teori p-q untuk menentukan berapa besar arus kompensasi yang akan dibangkitkan maka dilakukan perhitungan arus kompensasi ($I_{\alpha\beta}$).

Pada saat perhitungan arus kompensasi terdapat *input* dari PI kontrol yang akan memproses sinyal *error* yang diperoleh dari perbandingan antara tegangan aktual (V_{dc}) yang diukur dari kapasitor filter dengan tegangan kompensasi ($V_{dc\ ref}$) dan besarnya arus suplai yang diperoleh saat *zero crossing* (titik perpotongan saat gelombang sinusoidal berpindah dari positif ke negatif). *Output* PI kontrol adalah arus maksimal (I_{max}) yang diperlukan untuk mempertahankan tagangan pada inverter agar berada dalam keadaan konstan dan digunakan untuk mengkompensasi rugi daya yang terjadi pada filter daya aktif. Pada perhitungan arus kompensasi, I_{max} digunakan untuk menghitung besaran arus kompensasi yang akan dibangkitkan sehingga dapat mengkompensasi arus harmonisa yang muncul. Arus kompensasi ($I_{\alpha\beta}$) masih berada dalam koordinat $\alpha\beta$ maka harus diubah menjadi koordinat abc menggunakan inverse transformasi *Clarke*. Sedangkan besarnya arus beban mesin las digunakan sebagai masukan untuk metode *Bandpass* filter sehingga dapat diperoleh arus kompensasi harmonisa.

Penentuan pola pensaklaran pada inverter sebagai filter daya aktif yaitu menggunakan *Linier Current Regulator* bekerja dengan cara membandingkan arus kompensasi ($I_{abc-ref}$) dengan arus *feedback* ($I_{f,a,b,c}$) yang merupakan *output* dari inverter. Keluaran dari inverter digunakan untuk mengkompensasi bagian gelombang sinusoidal yang hilang pada saat arus mengalir menuju ke beban mesin las dengan cara membangkitkan arus yang berlawanan phase dengan arus harmonisa.

3.2 Inverter sebagai Filter Aktif

Pengertian dari inverter pada sistem tenaga yaitu suatu rangkaian yang dapat mengkonversi sumber DC menjadi AC. Hal ini bisa diperoleh dengan pengaturan *switching* pada rangkaian pensaklaran. Sehingga tegangan outputnya bisa tertentu dan bisa pula diubah – ubah. Karena output inverter bisa dikontrol maka inverter bisa digunakan sebagai filter aktif yang berfungsi untuk mengeliminasi arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban mesin las yang berupa komponen *rectifier* yaitu dengan cara membangkitkan arus yang berlawanan phase dengan arus harmonisa. secara umum inverter ada dua macam yaitu sumber tegangan (VSI) dan sumber arus (CSI). Inverter yang digunakan pada tugas akhir ini adalah inverter sumber tegangan. Berikut adalah gamba rangkaian inverter 3 phase dengan sumber tegangan. Gambar 3.2 menunjukkan bahwa inverter ini menggunakan mode VSI dengan kapasitor sebagai sumber tegangannya dan IGBT sebagai *switching* untuk tiap – tiap fasanya yang nantinya akan dikontrol menggunakan rangkaian kontrol yaitu *Linier Current Regulator*.



Gambar 3.2 Voltage Source Inverter dengan menggunakan IGBT

3.3 Pemodelan Beban Busur Listrik

Pemodelan dilakukan dengan tujuan untuk memudahkan dalam melakukan analisa bentuk gelombang dan THD dari mesin las 3 phase

jenis FCAW yang di filter dengan menggunakan filter aktif paralel metode teori $p - q$ dan *bandpass* filter.

Data diambil dari PT. PAL Indonesia. Berikut merupakan spesifikasi dari mesin las 3 phase jenis FCAW yang ditunjukkan pada tabel 3.1 :

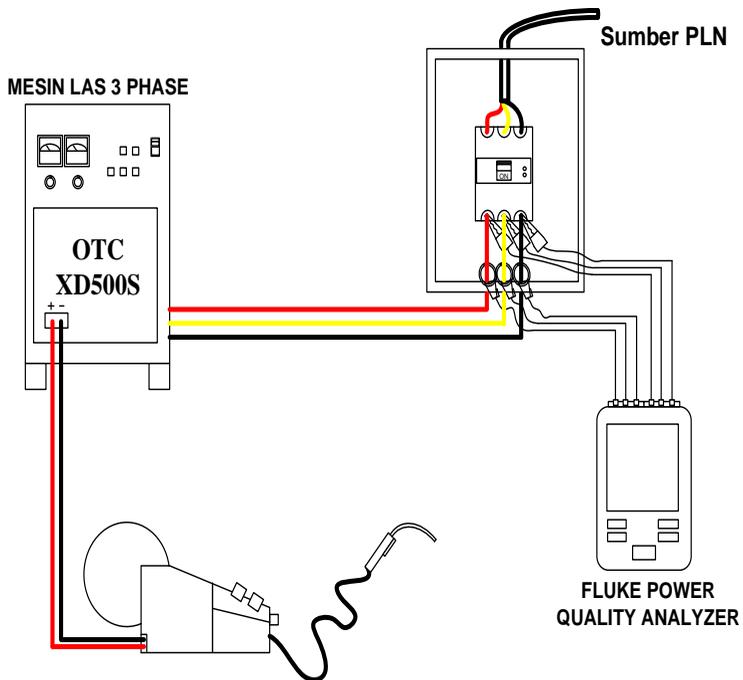
Tabel 3.1 Spesifikasi Mesin Las 3 Phase Jenis FCAW

Model Name		XD500S
Model Number	Type	CPXDS-500
Rated Input Voltage	V	380 V
Phases		3 phase
Rated Frequency	Hz	50 Hz
Rated Input Power	kVA	30.6kVA (28.6kW)
Rated Output Current	A	500
Rated Load Voltage	V	39
Max, Open Circuit Voltage	V	65
Output Current Range	A	50 ~ 500
Output Voltage Range	V	16.5 ~ 39
Rated Duty Cycle	%	60

Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan alat ukur *Fluke power quality analyzer*. Data diambil pada saat mesin las bekerja sehingga dapat diperoleh nilai Harmonisa arus dan bentuk gelombang yang terdistorsi.

Berikut merupakan mekanisme pengambilan data yang dilakukan :

1. Pastikan bahwa setting clamp arus berada pada settingan yang benar yaitu 40A/5mV
2. Pasang clamp arus dan tegangan pada panel mesin las 3 phase yang akan diukur nilai THDnya. Seperti ditunjukkan pada gambar 3.3 dibawah ini :



Gambar 3.3 Penempatan Clamp arus dan tegangan pada panel

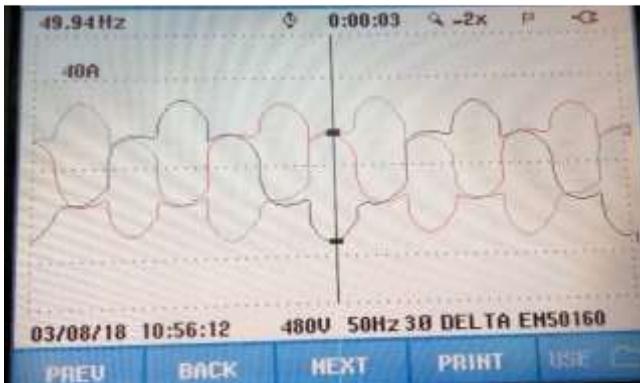
3. Pastikan mesin las sudah bekerja dan mulailah mengukur nilai THDi dan bentuk gelombang arus dengan memilih menu Harmonisa untuk melihat THD dan menu scope untuk melihat bentuk gelombang arus pada alat ukur *fluke*. Hasil dari pengukuran seperti ditunjukkan pada gambar 3.6 dibawah ini :

HARMONICS TABLE			
Amp	L1	L2	L3
THD%	25.7	27.3	25.9
H3%	2.1	3.6	3.3
H5%	21.8	23.2	21.4
H7%	5.9	5.7	7.3
H9%	1.7	1.3	0.8
H11%	6.9	7.9	6.4
H13%	3.7	3.3	4.8
H15%	1.6	1.2	0.7

03/08/18 11:03:30 693U 50Hz 38 IT EN50160

PREV BACK NEXT PRINT USE

Gambar 3.4 hasil pengukuran harmonisa mesin las 3 phase



Gambar 3.5 Hasil pengukuran gelombang Arus mesin las 3 pahse

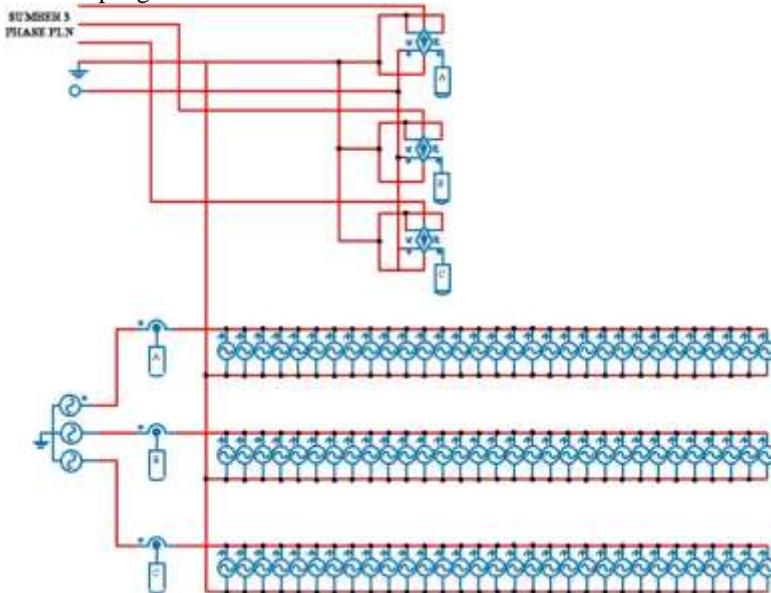
4. Pada gambar 3.4 merupakan tabel harmonisa dari mesin las 3 phase dan gambar 3.5 merupakan gelombang arus dari mesin las 3 phase dari data tersebut kemudian diubah menjadi excel untuk memudahkan analisa. Berikut merupakan data yang telah diubah kedalam excel yang ditunjukkan pada tabel 3.2 :

Tabel 3.2 Data Hasil Pengukuran nilai THDi Beban Mesin Las 3 Phase

Freq	Line a		Line b		Line c	
	Amplitude (A)	Phase Degree	Amplitude (A)	Phase Degree	Amplitude (A)	Phase Degree
50	26,53	-203,74	24,35	-321,95	24,90	-84,45
150	0,85	-231,09	0,70	-84,90	0,33	25,62
250	6,27	-303,83	5,20	-180,20	5,37	-62,04
350	1,40	-351,39	1,54	-116,34	1,18	-253,91
400	0,23	-211,94	0,41	-89,85	0,45	31,08
450	0,31	-341,11	0,10	-318,00	0,26	-139,99
500	0,11	-255,79	0,12	-10,06	0,15	-87,55
550	2,00	-99,11	1,31	-328,35	1,40	-217,33
650	0,84	-143,27	1,00	-267,97	0,75	-49,72
700	0,18	-355,07	0,28	-240,67	0,37	-123,68
750	0,30	-123,48	0,11	-157,64	0,24	63,47
850	1,18	-250,95	0,66	-114,68	0,73	-9,23
950	0,56	-288,92	0,70	-54,11	0,48	-201,75
1000	0,15	-150,55	0,19	-29,51	0,30	79,71
1050	0,29	-272,94	0,10	-308,75	0,23	-86,86
1150	0,81	-43,27	0,41	-261,46	0,47	-159,21
1250	0,40	-72,75	0,53	-201,45	0,34	4,98
1350	0,27	-64,27	0,10	-97,99	0,22	-236,87
1450	0,61	-195,39	0,28	-48,45	0,34	48,42
1550	0,31	-216,78	0,43	-349,01	0,26	-148,69
1600	0,10	-98,17	0,09	-326,27	0,19	-228,21
1650	0,26	-217,13	0,10	-245,38	0,22	-28,52
1750	0,49	-347,65	0,21	-193,74	0,25	-104,02
1850	0,26	-358,62	0,36	-137,84	0,21	55,49
1950	0,25	-10,16	0,10	-32,01	0,21	-178,72

Freq	Line a		Line b		Line c	
	Amplitude (A)	Phase Degree	Amplitude (A)	Phase Degree	Amplitude (A)	Phase Degree
2150	0,23	-141,99	0,31	-286,52	0,17	-100,67
2250	0,23	-163,06	0,10	-182,65	0,20	29,83
2350	0,32	-293,12	0,12	-120,63	0,15	-50,14
2450	0,21	-285,31	0,27	-75,43	0,14	-257,89

5. Dari pengukuran THDi dapat diperoleh nilai *amplitude* arus dan *phase degree* masing – masing orde harmonisa yang nantinya dapat digunakan sebagai inputan sumber arus pada simulasi di PSIM sehingga dapat menyerupai bentuk gelombang pengukuran.



Gambar 3.6 Rangkaian pemodelan sumber arus mesin las 3 phase

3.4 Blok d-q *Frame* dan *Low Pass Filter*

Untuk memberikan sinyal masukan tegangan yang ideal dari sumber tegangan yang tidak ideal maka digunakan transformasi d-q dan

kemudian di filter menggunakan *Low Pass Filter* hal ini bertujuan untuk mengeliminasi harmonisa yang terdapat pada tegangan sumber sehingga tegangan tersebut ketika dilakukan perhitungan dengan metode teori p-q menghasilkan output arus kompensasi yang maksimal. Transformasi dari $V_{\alpha\beta}$ ke dalam V_{dq} menggunakan persamaan berikut :

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Dimana :

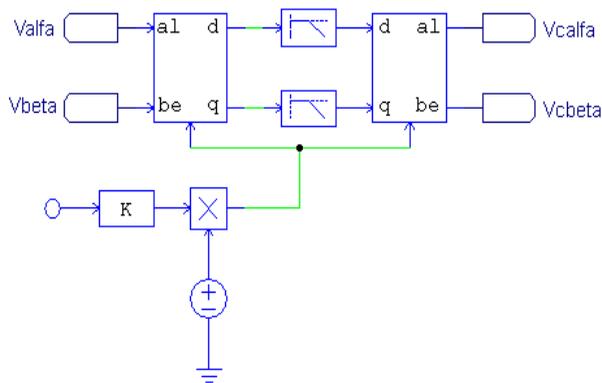
$$V_{\alpha\beta} = T \cdot V_{dq} \quad (3.2)$$

$$V_{dq} = T^{-1} \cdot V_{\alpha\beta} \quad (3.3)$$

Maka :

$$V_{\alpha} = [V_d \cos \theta - V_q \sin \theta] \quad (3.4)$$

$$V_{\beta} = [V_d \sin \theta + V_q \cos \theta] \quad (3.5)$$

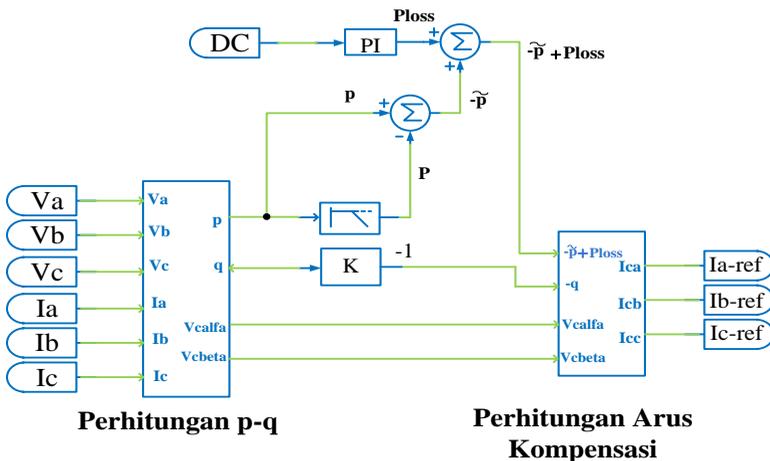


Gambar 3.7 Rangkaian Transformasi dq dan LPF

Gambar 3.7 diatas adalah rangkaian dari transformasi dq dan LPF yaitu tegangan sesaat yang nonideal dari sumber dimana sinyal tegangan sesaat yang nonideal dari sumber dimana sinyal tegangan awal yang dicapai dalam koordinat abc ditransformasi ke koordinat $\alpha\beta$ yang menghasilkan tegangan V_α dan V_β dan kemudian ditransformasi ke dalam koordinat dq. Hasil dari komponen dq dihasilkan tegangan V_d dan V_q dan difilter dengan menggunakan LPF (*Low Pass Filter*) dengan gain 1, *cut off frequency* 20 Hz, dan *damping ratio* 0.7 kemudian ditransformasi kembali ke dalam koordinat $\alpha\beta$ sehingga di dapat tegangan ideal.

3.5 Blok Teori p-q

Teori p-q merupakan suatu metode yang digunakan untuk membangkitkan sinyal kompensasi dan mengontrol elemen *switching* dari inverter daya dengan menggunakan kontrol *Linier Current Regulator* yang nantinya akan menghasilkan arus harmonisa yang memiliki phase yang berlawanan. Untuk mendapatkan komponen p – q, maka tegangan dan arus dalam koordinat abc diubah menjadi koordinat $\alpha\beta$. Tegangan yang tidak ideal akan di ubah menjadi koordinat dq dan kemudian difilter sehingga dihasilkan tegangan yang ideal.

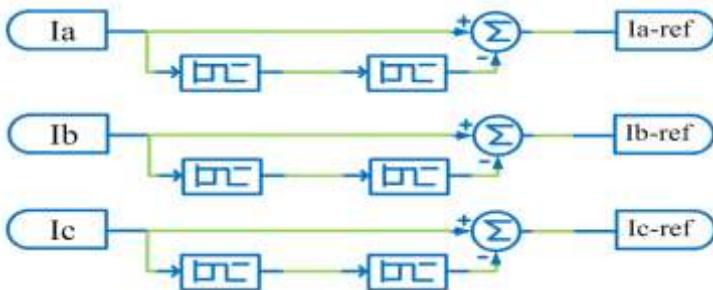


Gambar 3.8 Rangkaian perhitungan Teori p-q

Setelah itu dilakukan perhitungan nilai p dan q seperti pada persamaan 2.3 dan gambar 3.8 yang merupakan rangkaian perhitungan teori p - q . *Output* dari P akan dipisahkan menggunakan filter untuk mengetahui nilai \tilde{p} yang mengandung harmonisa sedangkan nilai q dengan mengalikan konstanta -1 . Pada kapasitor yang digunakan oleh inverter mengandung rugi – rugi, rugi – rugi tersebut dijumlahkan dengan nilai p seperti pada persamaan 2.6 kemudian nilai p dan q tersebut dihitung pada blok perhitungan arus kompensasi untuk mengetahui nilai arus kompensasi yang dibutuhkan. Untuk mengubah arus kompensasi tersebut kedalam koordinat abc digunakan inverse transformasi clarke seperti pada persamaan 2.7. kemudian arus ini dibandingkan dengan arus *feedback* dari inverter dan pada proses selanjutnya akan dikontrol menggunakan blok *Linier current regulator*.

3.6 Blok Bandpass Filter

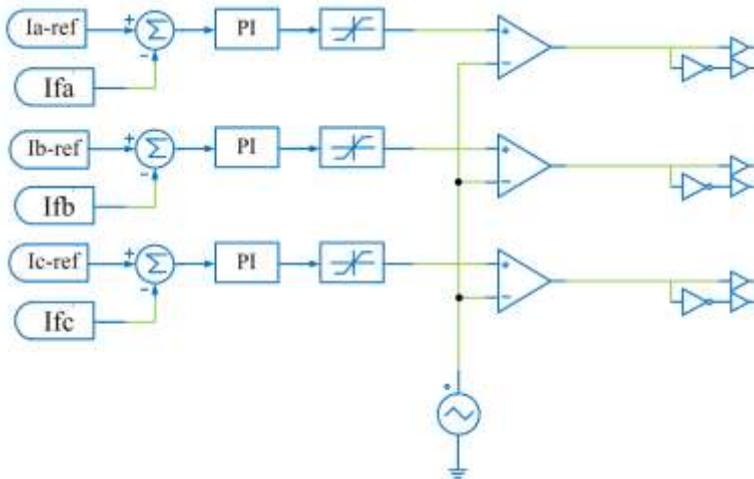
Bandpass filter merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mereduksi harmonisa dengan cara melewatkan frekuensi yang diinginkan dan menghilangkan frekuensi yang tidak diinginkan sesuai dengan batasan frekuensi cut-off yang dikehendaki. Bandpass filter merupakan gabungan dari highpass filter (untuk menghilangkan frekuensi dibatas bawah dari frekuensi cut-off) dan lowpass filter (untuk menghilangkan frekuensi dibatas atas dari frekuensi cut-off). Pada simulasi ini dirancang frekuensi *center* pada 50 Hz dan *passband* pada 20 Hz dengan tujuan untuk memperoleh akurasi yang lebih baik.



Gambar 3.9 Rangkaian Bandpass filter

3.7 Blok Linier Current Regulator

Arus kompensasi dibandingkan dengan arus kompensasi feedback dari inverter yang dihasilkan oleh algoritma kontrol. Untuk mendapatkan respon yang tepat dan cepat suatu metode harus memiliki *supply quick current controllability*. Untuk alasan ini *Linier Current Regulator* dapat diterapkan untuk menghasilkan pola *switch* pada inverter. Pada gambar 3.10 memperlihatkan bahwa arus kompensasi hasil perhitungan baik dengan metode p-q teori maupun dengan metode band pass filter akan dibandingkan kembali dengan arus kompensasi feedback dari inverter. Metode ini menggunakan kontroler PI sebagai faktor pengoreksinya. Sinyal kompensasi yang telah dibandingkan tadi akan dijadikan sebagai sinyal output kontroler PI yang akan dimodulasikan dengan sinyal segitiga yang mempunyai nilai indeks modulasi tertentu, hasil modulasi tersebut akan digunakan untuk pensaklaran inverter.

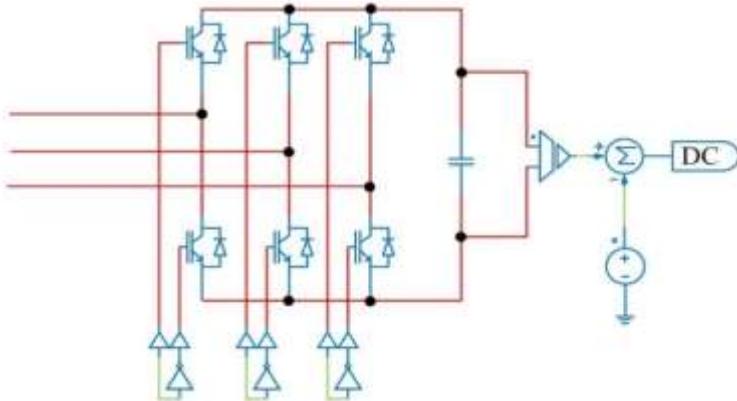


Gambar 3.10 Rangkaian *Linier Current Regulator*

3.8 Blok DC Link

Proses switching pada IGBT memerlukan daya real yang bekerja secara terus menerus untuk mensupply kapasitor atau DC link *voltage* ditunjukkan pada gambar 3.13 yang nilainya harus dijaga agar lebih besar dari tegangan *peak* pada bus dengan tujuan untuk menjaga supaya kontrol arus kompensasi pada *linier current regulator* tetap konstan. Proses ini menimbulkan rugi switching dan ohmic, Untuk mengetahui berapa besar rugi – rugi (V_{dc}) yang terjadi yaitu dengan mengurangkan nilai tegangan pada dc link (V_i) sebesar 850 V dengan tegangan eksternal (V_s) sebesar 860 V atau dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_s - V_i = V_{dc} \quad (3.6)$$



Gambar 3.11 Rangkaian Dc Link

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA

Software yang digunakan untuk simulasi adalah PSIM (Power Simulation). Jenis beban yang digunakan adalah beban mesin las 3 phase. Sumber sistem yang digunakan berupa sumber tegangan tiga fase line to netral Vrms 220V/50 Hz.

4.1 Parameter Sistem untuk Simulasi

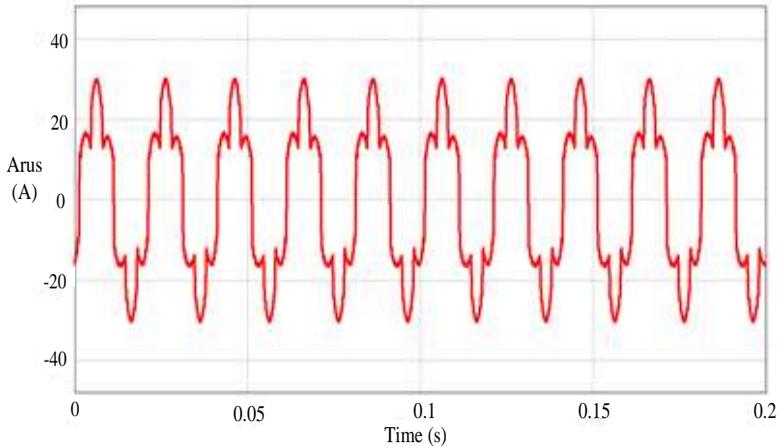
Parameter sistem untuk simulasi meliputi, aliran daya dari sumber, dan beban mesin las. Pada tabel 4.1 parameter yang digunakan dalam melakukan simulasi filter aktif dengan metode teori pq dan bandpass serta komponen – komponen yang digunakan.

Tabel 4.1 Parameter simulasi filter aktif

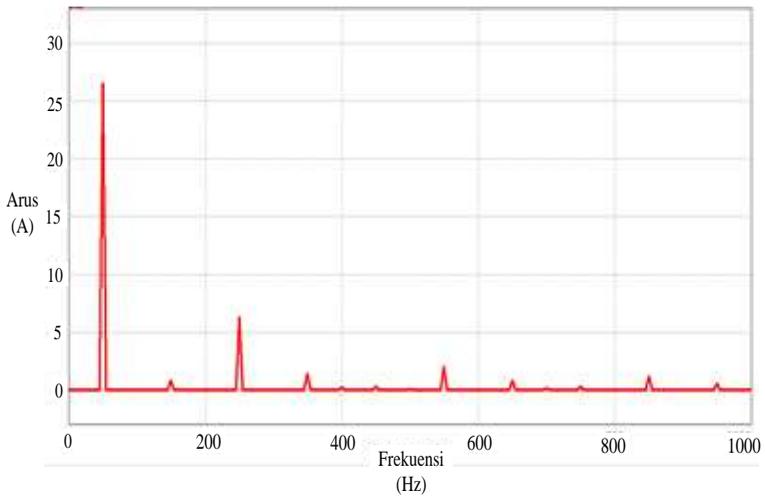
Parameter	Nilai
Time Step	5,00E-06
Time Total	0,5
Vsumber rms L-L	380
frekuensi	50
Beban Mesin Las	3,7 kW, 1,9 kVAR
Vdc	850 V
Kapasitor DC link	20uF
Induktor filter	2mH
DC Link Konstanta PI	$K_p = 1, K_i = 2$
LCC Konstanta PI	$K_p = 200, K_i = 10$
Ripple Filter	$R = 0,1\Omega, C = 2\mu$

4.2 Simulasi Sistem Tanpa Filter

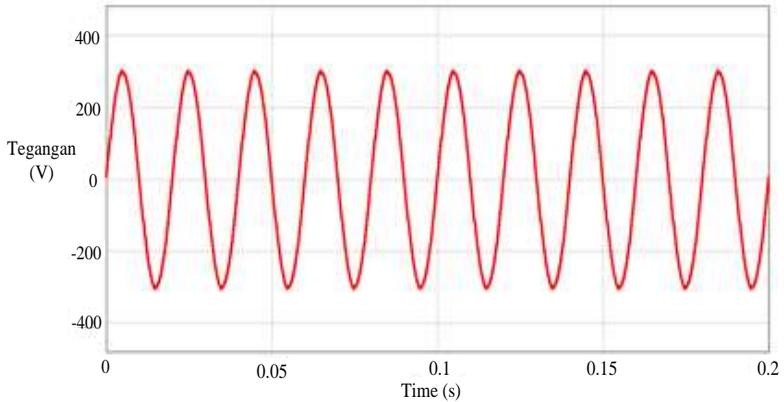
Sistem digunakan tanpa filter dan akan dapat diketahui besar arus sumber fundamental dan tegangan sumber fundamental serta spektrum frekuensinya. Setelah itu akan dilakukan analisa distorsi harmonisa arus dan tegangan.



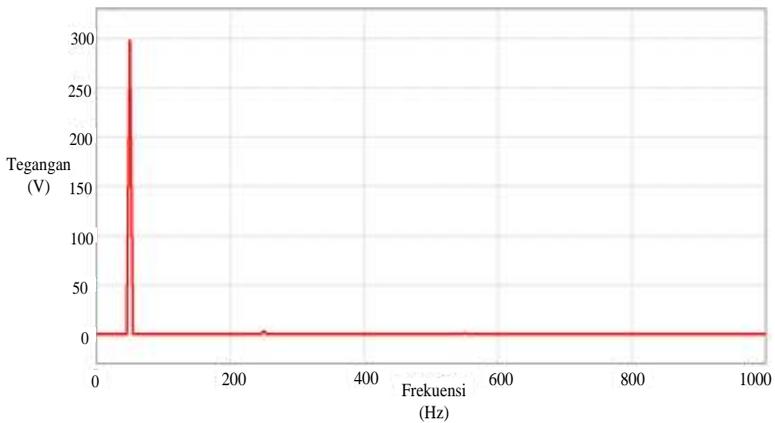
Gambar 4.1 Gelombang Arus Sumber tanpa filter



Gambar 4.2 Spektrum frekuensi Arus Sumber tanpa filter



Gambar 4.3 Tegangan sumber tanpa filter THD 1,39%



Gambar 4.4 Spektrum frekuensi Tegangan tanpa filter

Dari gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat gelombang dan spektrum arus yang memiliki nilai arus peak sumber sebesar 30,2 A dan untuk arus rmsnya 19,42 A. Sedangkan gambar 4.3 dan 4.4 dapat dilihat gelombang dan spektrum tegangan yang memiliki nilai tegangan peak sumber adalah 301,8 V dan untuk tegangan rmsnya 210.6 V. Dari spektrum frekuensi juga dapat diketahui nilai THDi untuk arus sebesar 26.9% dan THDv untuk tegangan sebesar 1.39%. Pada arus sumber harmonisa tertinggi terdapat pada orde ke 5 dengan nilai sebesar 22% yang melebihi batas

maksimum yang diizinkan oleh standart *IEEE 519-1992*. Karena pada sistem ini tidak menggunakan kawat netral maka harmonisa kelipatan ke 3 tidak muncul. Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada tabel 4.2 dan 4.3.

Tabel 4.2 THD arus sumber sistem tanpa filter

Orde Harmonisa ke-n	Magnitudo Arus (A)	Persen terhadap Arus fundamental
5	5,76	22,60%
7	1,35	5,30%
11	1,46	5,70%
17	0,92	3,60%
19	0,55	2,20%
23	0,52	2,00%
25	0,37	1,50%
THD%	24,38%	
Arus Fundamental (50Hz)	25,51 A	

Tabel 4.3 THD tegangan sumber tanpa filter

Orde Harmonisa ke-n	Magnitudo Tegangan (V)	Persen terhadap Tegangan fundamental
5	3,3	1,10%
7	0,8	0,30%
11	1,2	0,40%
17	0,9	0,30%
19	0,5	0,20%
23	0,7	0,20%
25	0,4	0,10%
THD%	1,29%	
Tegangan Fundamental (50Hz)	297,8 A	

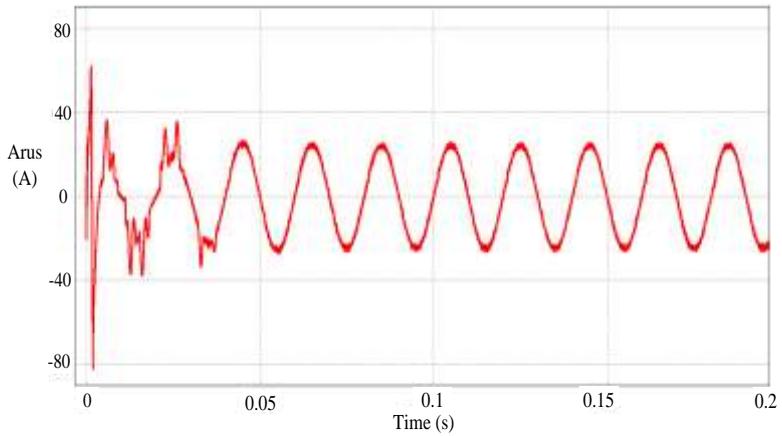
Tabel 4.2 dan 4.3 adalah komponen arus dan tegangan sumber untuk tiap – tiap frekuensi berikut merupakan perbandingan dengan arus fundamentalnya. Arus sistem mempunyai komponen harmonisa yang signifikan, diantaranya adalah harmonisa ke 5, 7, dan 11. Berikut pada tabel 4.4 merupakan hasil pengukuran sistem tanpa filter.

Tabel 4.4 Hasil pengukuran sistem tanpa filter

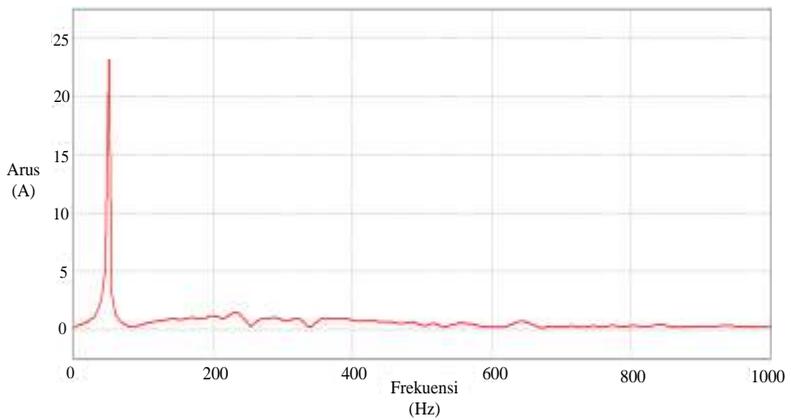
Hasil Pengukuran sistem	
Faktor Daya	0,87
V peak	302 V
Ipeak	30,2 A
Vrms	211 V
Irms	19,43 A
P (Watt)	3579,16
Q (Var)	1983,16
S (VA)	4091,86
THDv	1,39%
THDi	26,90%

4.3 Simulasi Sistem dengan Metode Teori p-q dan *Linier Current Regulator* pada Tegangan Tidak Ideal

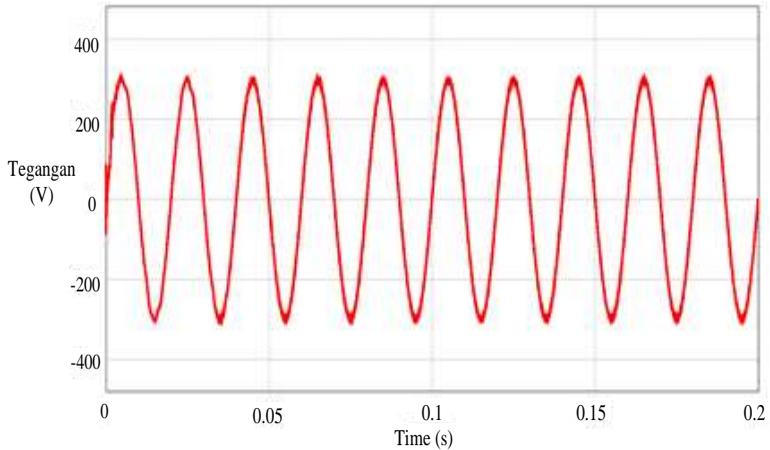
Pada bagian ini akan dilakukan pengujian hasil rancangan simulasi pada metode teori p-q dan dq frame pada tegangan tidak ideal dengan tujuan untuk melihat sejauh mana performansi dari teori p-q untuk mereduksi harmonisa pada beban mesin las 3 phase. Berikut ini merupakan hasil simulasi menggunakan filter aktif paralel metode teori p-q terhadap beban mesin las 3 phase:



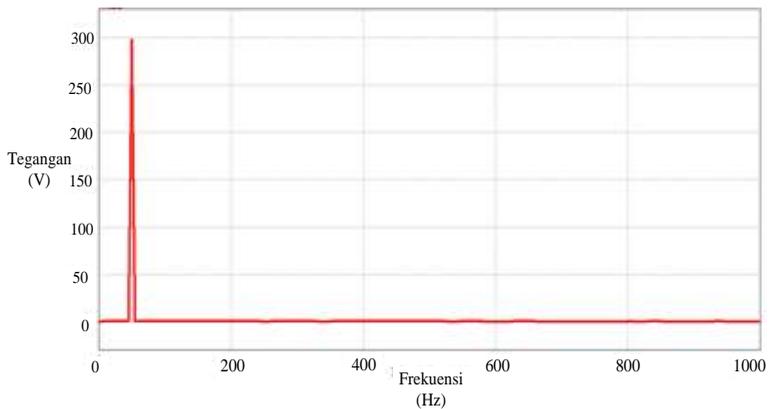
Gambar 4.5 Gelombang Arus sumber dengan metode teori p-q



Gambar 4.6 Spektrum frekuensi arus sumber dengan metode teori p-q



Gambar 4.7 Tegangan sumber sistem dengan metode teori p-q



Gambar 4.8 Spektrum frekuensi tegangan sumber dengan metode teori p-q

Dari gambar 4.5 dapat dilihat proses transisi gelombang arus dari *transient* ke *steady state* yang membutuhkan waktu sekitar 40 ms dan gambar 4.6 merupakan spektrum frekuensi arus yang memiliki nilai arus peak sumber sebesar 23,6 A dan untuk arus rmsnya 18,15 A. Sedangkan gambar 4.7 dan 4.8 dapat dilihat gelombang dan spektrum tegangan yang memiliki nilai tegangan peak sumber adalah 310 V dan untuk tegangan

rmsnya 211 V. Dari spektrum frekuensi juga dapat diketahui nilai THDi untuk arus sebesar 3,34% dan THDv untuk tegangan sebesar 1,5%. Pada arus sumber harmonisa tertinggi terdapat pada orde ke 5 dengan nilai sebesar 22% namun setelah di filter menggunakan metode teori p-q berkurang menjadi 1,7% seperti ditunjukkan pada tabel 4.5 yang merupakan orde harmonisa setelah dilakukan filter menunjukkan bahwa metode ini sangat efektif untuk mereduksi harmonisa dilihat dari semakin kecilnya nilai amplitudanya.

Tabel 4.5 THD arus sumber dengan metode teori p-q

Orde Harmonisa ke-n	Magnitudo Arus (A)	Persen terhadap Arus fundamental
5	0,4	1,70%
7	0,6	2,50%
11	0,4	1,70%
17	0,3	1,30%
19	0,2	0,80%
23	0,2	0,80%
25	0,1	0,40%
THD%	3,86%	
Arus Fundamental (50Hz)	24 A	

Tabel 4.6 THD tegangan sumber dengan metode teori p-q

Orde Harmonisa ke-n	Magnitudo Tegangan (V)	Persen terhadap Tegangan fundamental
5	0,2	0,10%
7	0,3	0,10%
11	0,28	0,10%
17	0,22	0,10%
19	0,2	0,10%
23	0,18	0,10%
25	0,17	0,10%
THD%	0,20%	
Tegangan Fundamental (50Hz)	298,27 V	

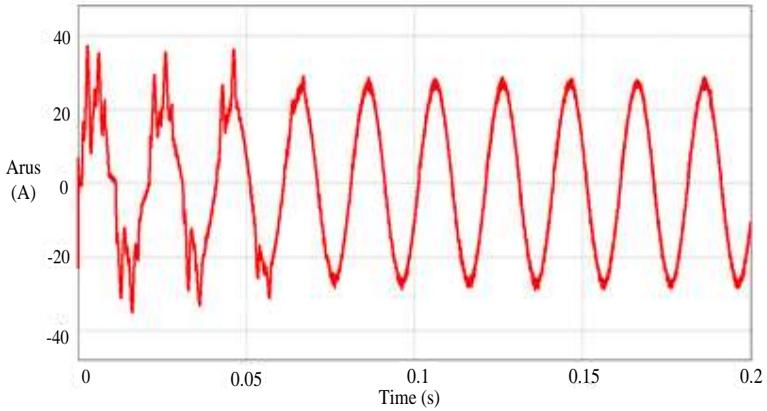
Tabel 4.5 dan 4.6 menunjukkan komponen harmonisa dari arus dan tegangan sumber untuk tiap – tiap ordenya. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa nilai dari amplitude sebelum dan setelah dilakukan filter menunjukkan penurunan yang signifikan dibandingkan dengan sebelum dilakukan filter. sehingga dari simulasi tersebut dengan menggunakan metode teori p-q memiliki performansi yang bagus jika digunakan untuk mereduksi harmonisa pada beban mesin las. Berikut pada tabel 4.7 merupakan hasil pengukuran sistem dengan metode teori p-q.

Tabel 4.7 Hasil pengukuran sistem dengan filter aktif paralel metode teori p-q

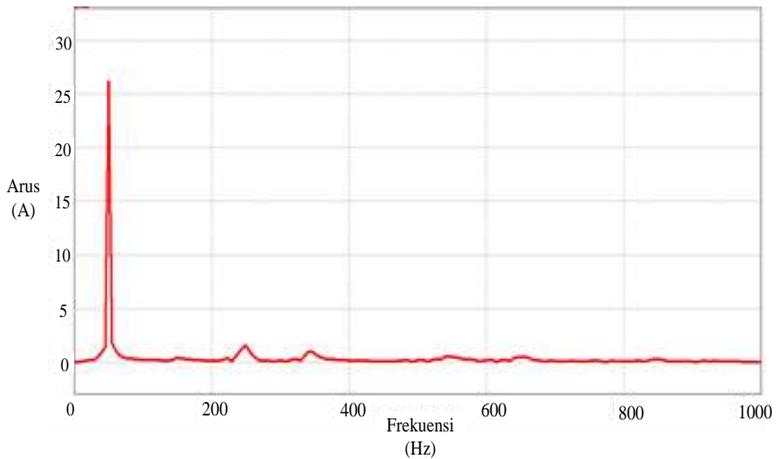
Hasil Pengukuran sistem	
Faktor Daya	0,93
Vpeak	310 V
Ipeak	23,6 A
Vrms	211 V
Irms	18,15 A
P (Watt)	3566,86
Q (Var)	1395,69
S (VA)	3830,2
THDv	1,50%
THDi	3,34%

4.4 Simulasi Sistem dengan Metode Bandpass Filter dan Linier Current Regulator pada Tegangan Tidak Ideal

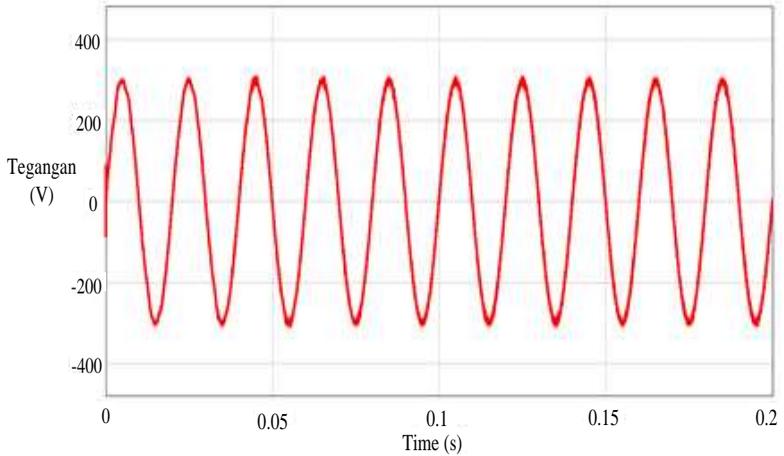
Pada bagian ini akan dilakukan pengujian hasil rancangan simulasi dengan metode bandpass filter pada tegangan tidak ideal dengan tujuan untuk melihat sejauh mana performansi dari bandpass filter untuk mereduksi harmonisa pada beban mesin las 3 phase. Berikut ini merupakan hasil simulasi menggunakan filter aktif paralel metode bandpass filter terhadap beban mesin las 3 phase:



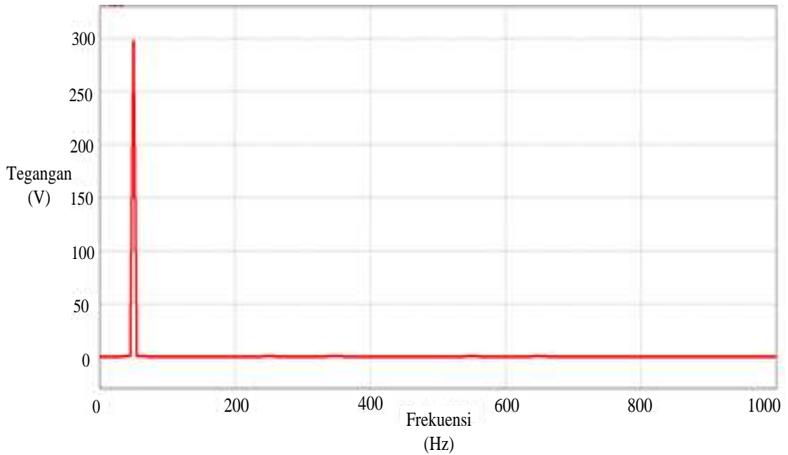
Gambar 4.9 Gelombang Arus sumber dengan metode band pass filter



Gambar 4.10 Spektrum frekuensi Arus sumber dengan metode band pass filter



Gambar 4.11 Gelombang Tegangan sumber dengan metode band pass filter



Gambar 4.12 Spektrum frekuensi tegangan sumber dengan metode band pass filter

Dari gambar 4.9 dapat dilihat proses transisi gelombang arus dari *transient* ke *steady state* yang membutuhkan waktu sekitar 70 ms dan 4.10 dapat dilihat gelombang dan spektrum arus yang memiliki nilai arus peak

sumber sebesar 24,7 A dan untuk arus rmsnya 18,8 A. Sedangkan gambar 4.11 dan 4.12 dapat dilihat gelombang dan spektrum tegangan yang memiliki nilai tegangan peak sumber adalah 308,2 V dan untuk tegangan rmsnya 210 V. Dari spektrum frekuensi juga dapat diketahui nilai THDi untuk arus sebesar 3% dan THDv untuk tegangan sebesar 1,7%. Pada arus sumber harmonisa tertinggi terdapat pada orde ke 5 dengan nilai sebesar 22% namun setelah di filter menggunakan metode bandpass filter berkurang menjadi 5,9% seperti ditunjukkan pada tabel 4.8 yang merupakan orde harmonisa setelah dilakukan filter menunjukkan bahwa metode ini sangat efektif untuk mereduksi harmonisa dilihat dari semakin kecilnya nilai amplitudanya.

Tabel 4.8 THD Arus sumber dengan metode band pass filter

Orde Harmonisa ke-n	Magnitudo Arus (A)	Persen terhadap Arus fundamental
5	1,55	5,90%
7	0,65	2,50%
11	0,43	1,60%
17	0,27	1,00%
19	0,14	0,50%
23	0,14	0,50%
25	0,07	0,30%
THD%	6,75%	
Arus Fundamental (50Hz)	26,19 A	

Tabel 4.9 THD Tegangan sumber dengan metode band pass filter

Orde Harmonisa ke-n	Magnitudo Tegangan (V)	Persen terhadap Tegangan fundamental
5	0,82	0,30%
7	0,45	0,20%
11	0,26	0,10%
17	0,21	0,10%
19	0,11	0,04%
23	0,13	0,04%
25	0,07	0,02%
THD%	0,34%	
Tegangan Fundamental (50Hz)	297,63 V	

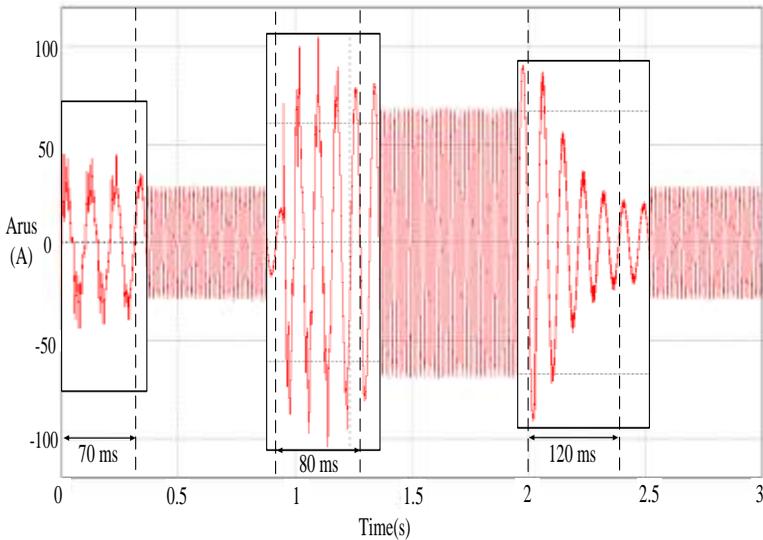
Tabel 4.10 Hasil pengukuran sistem dengan filter aktif paralel metode band pass filter

Hasil Pengukuran sistem	
Faktor Daya	0,92
Vpeak	308,2 V
Ipeak	24,7 A
Vrms	210 V
Irms	18,8 A
P (Watt)	3674,6
Q (Var)	1514,66
S (VA)	3974,53
THDv	1,70%
THDi	3,00%

Tabel 4.8 dan 4.9 menunjukkan komponen harmonisa dari arus dan tegangan sumber untuk tiap – tiap ordenya. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa nilai dari amplitude sebelum dan setelah dilakukan filter menunjukkan penurunan yang signifikan dibandingkan dengan sebelum dilakukan filter. sehingga dari simulasi tersebut dengan menggunakan metode bandpass filter memiliki performansi yang bagus jika digunakan untuk mereduksi harmonisa pada beban mesin las. Berikut pada tabel 4.10 merupakan hasil pengukuran sistem dengan metode bandpass filter.

4.5 Performansi Metode *Bandpass* Filter dengan Metode Teori p-q ketika Amplitude Arus dinaikkan

Pada bagian ini akan dilakukan pengujian respon dinamis dari metode teori p-q dan bandpass filter pada tegangan tidak ideal dengan cara menaikkan nilai amplitud arus beban 1x dan 2,5x dengan pertimbangan 1x merupakan nilai terukur pada saat setting arus rms beban adalah 200A pada sisi sekunder trafo sedangkan pada sisi primer trafo adalah 500A dengan rasio tegangan 380:39 maka sesuai dengan spesifikasi pada mesin las itu sendiri dengan batasan arus beban 50 ~ 500A. Respon dinamis bertujuan untuk melihat sejauh mana performansi dari metode teori p-q dan bandpass filter untuk merespon perubahan beban yang signifikan sehingga dapat kita bandingkan waktu untuk mencapai kondisi steady state pada beban mesin las 3 phase. Berikut ini merupakan hasil simulasi respon dinamis filter aktif paralel dengan metode teori p-q dan bandpass filter terhadap beban mesin las 3 phase:

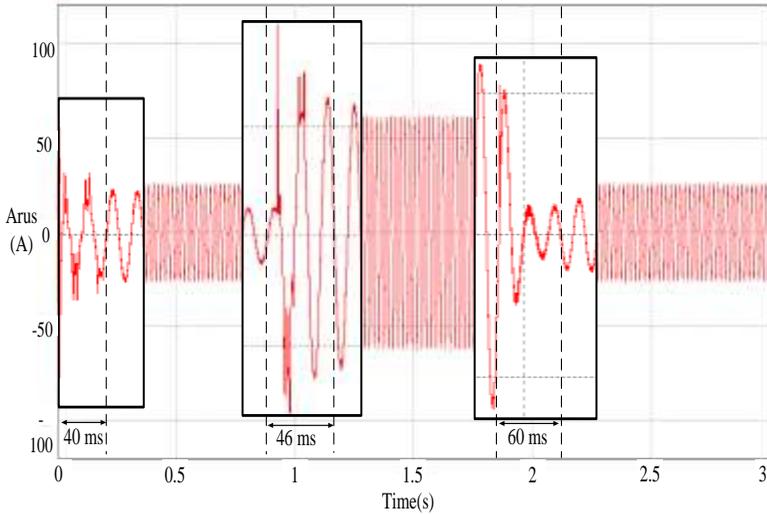


Gambar 4.13 Respon dinamis arus sumber saat amplitud arus naik dan turun dengan metode bandpass filter

Tabel 4.11 waktu yang dibutuhkan untuk steady state dengan metode band pass filter

Band Pass Filter	
Time for Steady State	
Ix	T(ms)
1	70
2.5	80
1	120

Dari gambar 4.13 dapat dilihat respon dinamis arus dengan metode bandpass filter dengan total time 3s dengan mekanisme awal menggunakan besaran arus rms tanpa di naikkan atau dikali dengan 1x kemudian pada periode waktu 1s mulai dinaikkan dengan mengalikan 5x dari arus rms nominal setelah itu mulai diturunkan kembali pada periode waktu 2s sampai dengan selsai. Pada tabel 4.11 menunjukkan respon waktu yang dibutuhkan untuk steady state dengan metode banpass filter untuk periode awal dibutuhkan waktu sekitar 70ms untuk mencapai kondisi steady state, kemudian setelah dinaikkan sesaat menjadi 5x untuk periode waktu 1s dibutuhkan waktu sekitar 80ms untuk mencapai kondisi steady state, pada periode waktu 2s mulai diturunkan kembali pada kondisi awal sehingga dibutuhkan waktu sekitar 120ms untuk mencapai kondisi steady state.



Gambar 4.14 Respon dinamis arus sumber saat amplitude naik dan turun dengan metode teori p-q

Tabel 4.12 waktu yang dibutuhkan untuk steady state dengan metode teori p-q

Teori p-q	
Time for Steady State	
I _x	T(ms)
1	40
2.5	46
1	60

Dari gambar 4.14 dapat dilihat respon dinamis arus dengan metode teori p-q dengan total time 3s dengan mekanisme awal menggunakan besaran arus rms tanpa di naikkan atau dikali dengan 1x kemudian pada periode waktu 1s mulai dinaikkan dengan mengalikan 5x dari arus rms nominal setelah itu mulai diturunkan kembali pada periode waktu 2s sampai dengan selsai. Pada tabel 4.12 menunjukkan respon waktu yang dibutuhkan untuk steady state dengan metode banpass filter untuk periode

awal dibutuhkan waktu sekitar 40ms untuk mencapai kondisi steady state, kemudian setelah dinaikkan sesaat menjadi 2,5x untuk periode waktu 1s dibutuhkan waktu sekitar 46ms untuk mencapai kondisi steady state, pada periode waktu 2s mulai diturunkan kembali pada kondisi awal sehingga dibutuhkan waktu sekitar 60ms untuk mencapai kondisi steady state. Dari data yang diperoleh dapat dilihat bahwa performansi dari metode teori p-q lebih cepat untuk merespon perubahan beban secara mendadak dibandingkan dengan menggunakan metode bandpass filter.

4.6 Perbandingan Kinerja dari Metode *Bandpass* Filter dengan Metode Teori p-q untuk Kompensasi Harmonisa

Tabel 4.13 perbandingan kinerja sistem tanpa filter dengan menggunakan filter metode teori p-q dan band pass filter

Besaran yang diukur	Tanpa filter	Metode teori p-q	Metode Band pass filter
Faktor Daya	0,87	0,93	0,92
V _{peak}	302 V	310 V	308,2 V
I _{peak}	30,2 A	23,6 A	24,7 A
V _{rms}	211 V	211 V	210 V
I _{rms}	19,43 A	18,15 A	18,8 A
P (Watt)	3579,16	3566,86	3674,6
Q (Var)	1983,16	1395,69	1514,66
S (VA)	4091,86	3830,2	3974,53
THD _v	1,39%	1,50%	1,70%
THD _i	26,90%	3,34%	3,00%
Waktu rata- rata Respon dinamis		48,7 ms	90 ms

Dari tabel 4.13 diatas dapat kita lihat kinerja sistem ketika sebelum dan setelah dipasang filter aktif paralel baik dengan menggunakan metode teori p-q ataupun dengan metode bandpass filter. Dari perbandingan data diatas dapat di tarik kesimpulan bahwa:

- a. Faktor daya sebelum dipasang filter adalah 0.87 setelah dilakukan pemasangan filter terjadi perbaikan faktor daya bekisar 0.93 sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan filter aktif paralel dapat memperbaiki nilai faktor daya.

- b. THD untuk tegangan sumber sebelum dipasang filter adalah 1.39% setelah dilakukan pemasangan filter terjadi kenaikan THD menjadi 1.5% untuk teori p-q dan 1.7% untuk bandpass filter, kemudian ketika dilakukan analisa dengan membandingkan nilai dari masing – masing orde harmonisa terjadi penurunan yang signifikan setelah dilakukan pemasangan filter.
- c. THD untuk arus sumber sebelum dipasang filter adalah 26.9% setelah dilakukan pemasangan filter terjadi penurunan THD menjadi 3.34% untuk teori p-q dan 3% untuk bandpass filter, kemudian ketika dilakukan analisa dengan membandingkan nilai dari masing – masing orde harmonisa terjadi penurunan yang signifikan sebelum dan setelah dilakukan pemasangan filter.
- d. Respon dinamis dari metode teori p-q dan band pass filter setelah nilai dari waktu yang diperlukan untuk mencapai steady state di rata – rata hasilnya menunjukkan bahwa teori p-q membutuhkan waktu yang lebih cepat yaitu 48.7 ms dibandingkan dengan band pass filter 90 ms.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data – data yang diperoleh dari hasil simulasi dan analisis, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Metode pengontrolan filter aktif paralel menggunakan teori p-q dapat menurunkan kandungan arus harmonisa dari 26,9% menjadi 3,34% pada beban mesin las 3 phase.
2. Metode pengontrolan filter aktif paralel menggunakan bandpass filter dapat menurunkan kandungan arus harmonisa dari 26,9% menjadi 3% pada beban mesin las 3 phase.
3. Metode pengontrolan filter aktif paralel menggunakan teori p-q lebih efektif dibandingkan dengan bandpass filter dalam mereduksi tegangan harmonisa dilihat dari orde harmonik 5, 7 dan 11.
4. Pada respon dinamis dari metode teori p-q dan band pass filter menunjukkan bahwa teori p-q memiliki respon yang lebih cepat pada saat terjadi perubahan amplitue dibandingkan dengan *Bandpass* filter karena teori p-q membutuhkan waktu rata - rata yang lebih cepat yaitu 48.7 ms dibandingkan dengan band pass filter 90 ms.

5.2 Saran

Ada beberapa saran yang perlu diperhatikan dalam mendesain simulasi filter aktif paralel dengan menggunakan metode teori p-q dan bandpass filter:

1. Pemodelan dari beban yang ingin diteliti haruslah sesuai dengan kondisi pengukuran karena tingkat akurasi dari simulasi bergantung dari kesesuaian beban real.
2. Filter aktif tidak dapat mengkompensasi semua harmonisa sekaligus, pada tugas akhir ini filter aktif ditunjukkan untuk mengkompensasi arus harmonisa sehingga hal ini berpengaruh pada nilai THDv tegangan yang naik oleh karena itu untuk meningkatkan kinerja dari filter maka harus dikombinasikan dengan menggunakan filter pasif (filter hybrid).

Halaman ini sengaja dikosongkan

3.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. kothuru, N. K. Appala, Y. Suresh, and J. Kotturu, "Investigation on Shunt Active Filter with P-Q Theory," in *2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2013, pp. 445–449.
- [2] L. F. Jeffus, *Welding: principles and applications*, Seventh edition. Clifton Park, N.Y: Delmar Cengage Learning, 2012.
- [3] D. Lancaster, *Active-filter cookbook*, 1st ed. Indianapolis: H. W. Sams, 1975.
- [4] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience/ John Wiley & Sons, 2007.
- [5] G. S. Raj and K. Rathi, "P-Q theory based Shunt Active Power Filter for power quality under ideal and non-ideal grid voltage conditions," in *2015 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, 2015, pp. 1–5.
- [6] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power system harmonics*, 2nd ed. West Sussex, England ; Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons, 2003.
- [7] R. Oktantya, "Desain Filter Aktif Shunt Menggunakan Kontroler Hysterisis Untuk Mengkompensasi Harmonisa Dengan Sumber Tegangan Yang Tidak Ideal.," *Undergraduated Thesis Electr. Eng. RSE 621381 532 4 Okt 2010*, Jun. 2010.
- [8] M. Ashari, *Desain Konverter Elektronika Daya*. Bandung: Informatika, 2017.

Halaman ini sengaja dikosongkan

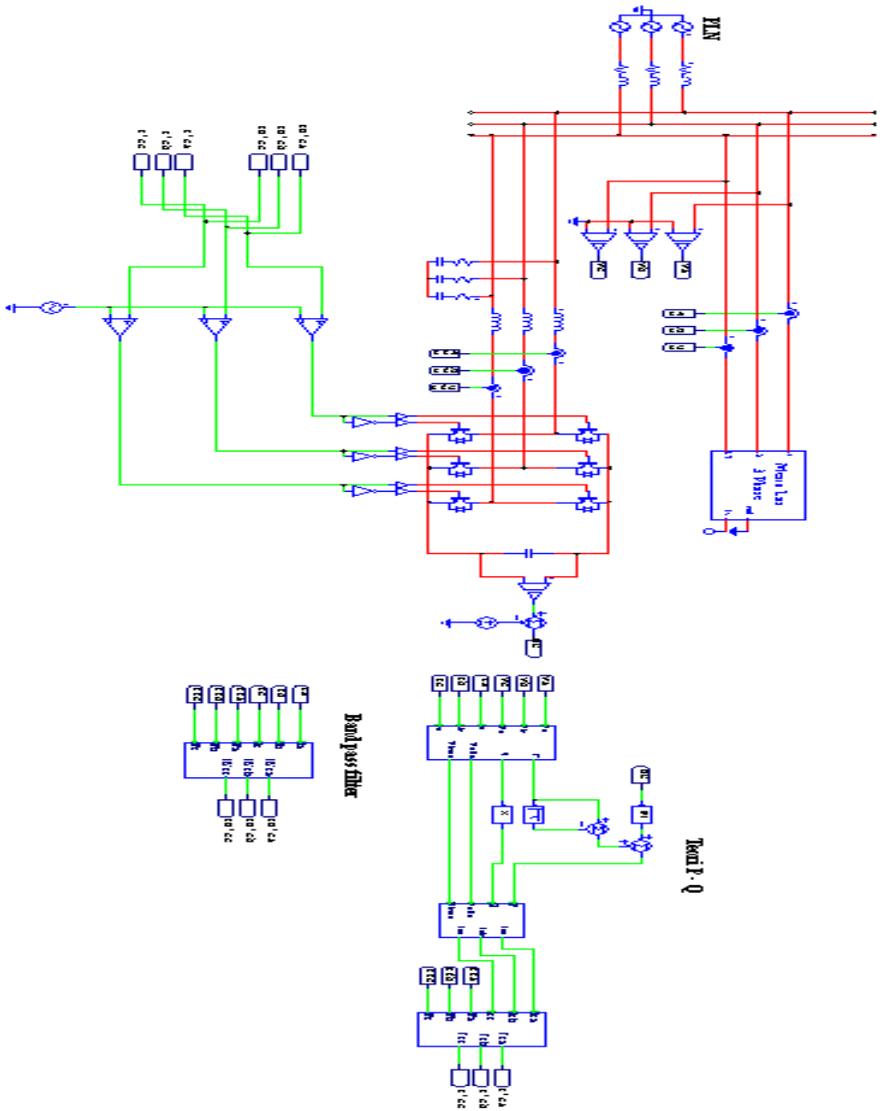
LAMPIRAN

A. Proses Pengambilan data THDi dari Mesin Las 3 phase





B. Blok Simulasi Filter Aktif dengan metode teori p-q dan *bandpass* Filter



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Avif Prastya Ardyansah lahir di Rembang Jawa Tengah pada tanggal 18 April 1993. Penulis adalah anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Ariyanto dan Sulistyowati. Penulis menempuh sekolah dasar di SD Kutoharjo 3 Rembang, setelah 6 tahun, penulis melanjutkan sekolah di SMP Negeri 2 Rembang. Sampai akhirnya lulus, penulis meneruskan sekolahnya di SMAN 1 Rembang. Penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Diponegoro Semarang, jurusan D3 Teknik Elektro dengan bidang studi Teknik Sistem Tenaga dan lulus pada tahun 2014. Setelah lulus penulis melanjutkan kerja di PT. Hartono Istana Teknologi selama 1 tahun kemudian pada tahun 2016 penulis melanjutkan studi S1 Lintas Jalur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Penulis dapat dihubungi dengan email di bawah ini :

e-mail: avif18@mhs.ee.its.ac.id