



**TUGAS AKHIR -TE 141599**

***SHUNT ACTIVE POWER FILTER UNTUK ELIMINASI  
HAMONIK DAN KOMPENSASI DAYA REAKTIF PADA  
PENGOPERASIAN CRANE***

Muhammad Fahmi Hasan  
NRP 2212 100 167

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

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**FINAL PROJECT-TE 141599**

**HARMONIC ELIMINATION AND REACTIVE POWER  
COMPENSATION USING SHUNT ACTIVE POWER FILTER  
IN CRANE OPERATION**

Muhammad Fahmi Hasan  
NRP 2212 100 167

Advisor

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

Ir Soedibyo, M.MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “***Shunt Active Power Filter Untuk Eliminasi Hamonik dan Kompensasi Daya Reaktif pada Pengoperasian Crane***” 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, 27 Juni 2016

Muhammad Fahmi Hasan  
NRP. 2212 100 167

**SHUNT ACTIVE POWER FILTER UNTUK  
ELIMINASI HARMONIK DAN KOMPENSASI DAYA  
REAKTIF PADA PENGOPERASIAN CRANE**

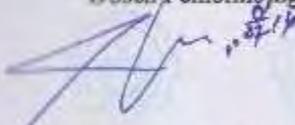
**TUGAS AKHIR**

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

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2

  
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D  
NIP. 197311192000031001

  
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.  
NIP. 19551207 198003 1 004



# ***SHUNT ACTIVE POWER FILTER* UNTUK ELIMINASI HAMONIK DAN KOMPENSASI DAYA REAKTIF PADA PENGOPERASIAN *CRANE***

## **ABSTRAK**

Pengoperasian *crane* dengan menggunakan motor listrik AC dan *Variable Frequency Drive* (VFD) telah digunakan secara luas pada berbagai macam sektor industri, misalnya adalah pada industri jasa bongkar muat barang di pelabuhan. Permasalahan harmonisa arus dan *power factor* yang rendah muncul sebagai masalah utama dalam pengoperasian ini. Harmonisa disebabkan oleh *switching* yang dilakukan *Variable Frequency Drive* (VFD) sedangkan nilai *power factory* yang rendah disebabkan oleh konsumsi daya reaktif yang besar, khususnya pada saat pergantian mode dari mode *hoisting* ke mode *lowering* atau sebaliknya.

Pada tugas akhir ini dilakukan pemodelan eliminasi harmonik dan kompensasi daya reaktif pada *crane* dengan menggunakan *Shunt Active Power Filter*. *Crane* yang digunakan adalah jenis motor *hold* dengan spesifikasi daya 200 kW. Eliminasi harmonik dan kompensasi daya reaktif dilakukan dengan menghubungkan *Shunt Active Power Filter* pada sistem tegangan rendah 400 V secara paralel. Digunakan tiga kontrol PI untuk mengatur tegangan  $V_{DC}$ , daya reaktif, dan pembentukan sinyal filter hasil penjumlahan dari kontrol daya aktif, kontrol daya reaktif, eliminir harmonik, dan arus aktual. *Shunt Active Power Filter* efektif mengurangi harmonisa arus dan meningkatkan *power factor* sesuai dengan standar yang diijinkan yaitu di bawah 15% untuk harmonisa arus dan di atas 0,85 untuk *power factor* sehingga dapat membantu sektor perindustrian agar tidak menemui kendala teknis akibat gangguan harmonisa dan tidak terkena denda atau *pinalty* akibat dari nilai *power factor* yang rendah.

**Kata kunci :** *Shunt Active Power Filter, Crane , harmonisa, power factor*

# **HARMONIC ELIMINATION AND REACTIVE POWER COMPENSATION USING SHUNT ACTIVE POWER FILTER IN CRANE OPERATION**

## **ABSTRACT**

*Crane operation using AC machine and Variable Frequency Drive (VFD) has been widely used in various industrial sectors, for example is the service of loading and unloading goods in port. The problem of harmonic current and low power factor emerged as a major problem in this operation. Harmonics caused by switching in Variable Frequency Drive (VFD) while the value of the low power factor caused by the high consumption of reactive power, especially while the mode changed from hoisting mode into lowering mode or vice versa.*

*In this final project will make a modeling of the harmonic elimination and reactive power compensation on a crane by using a Shunt Active Power Filter. Motor hold with 200 kW specification is used. To overcome both problems, Shunt Active Power Filter will connect to 400 V low voltage systems in parallel. Used three PI control to regulate the voltage on the  $V_{DC}$ , the reactive power, and the of the sum of the filter signal control active power, control reactive power, eliminate harmonics, and the actual current. Shunt Active Power Filters effectively reduce current harmonics and improve the power factor according to the allowable standards such as under 15% for current harmonics and over 0.85 for power factor so as to help the industrial sector to not meet the technical constraints due to harmonic interference and no fines or penalty as a result of the low value of power factor.*

***Keywords : Shunt Active Power Filter, Crane , harmonics, power factor***

## KATA PENGANTAR

Rasa syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkah, rahmat, dan karunia-Nya sehingga saya selaku penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul : **“Shunt Active Power Filter Untuk Eliminasi Hamonik Dan Kompensasi Daya Reaktif Pada Pengoperasian Crane”** dengan baik. Harapan saya sebagai penulis adalah kebermanfaatannya dari Tugas Akhir ini untuk semua orang khususnya bagi para pembaca.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang membantu dan membimbing dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

Secara khusus penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Ibu saya, Ibu Suharti yang selalu mendukung dan mendoakan akan kelancaran Tugas Akhir saya
2. Bapak Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng. dan Dr. Ir. Soedibyo, M.MT yang telah membimbing dengan sabar dan memberikan arahan yang jelas demi terselesaikannya Tugas Akhir saya.
3. Seluruh dosen jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan pengetahuan-pengetahuan dasar sebagai ilmu pendukung untuk mengerjakan Tugas Akhir ini.
4. Reni Mita Diwanti (Teknik Lingkungan, 2012) yang telah menemani perjuangan selama masa titik terendah hingga Tugas Akhir ini dapat selesai tepat waktu
5. Rekan-rekan di Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan semangat dan motivasi untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih terhadap pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan. Mohon maaf yang sebesar-besarnya apabila ada kesalahan kata yang dapat menyinggung pembaca. Saya ucapkan sekian dan terima kasih.

Surabaya, 27 Juni 2016

Penulis

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xi

## **BAB 1 PENDAHULUAN**

1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah .....	2
1.4. Tujuan .....	3
1.5. Metodologi .....	3
1.6. Sistematika Penulisan .....	3
1.7. Relevansi .....	4

## **BAB 2 SHUNT ACTIVE POWER FILTER UNTUK ELIMINASI HARMONIK DAN KOMPENSASI DAYA REAKTIF PADA PENGOPERASIAN CRANE**

2.1. <i>Active Power Filter</i> .....	5
2.1.1. <i>Shunt Active Power Filter</i> .....	5
2.2. Aliran Daya dari Inverter ke Grid .....	7
2.3. <i>Portal Harbour Crane (PHC)</i> .....	9
2.3.1. <i>Motor Portal Harbour Crane (PHC)</i> .....	10
2.3.2. <i>Driver Portal Harbour Crane (PHC)</i> .....	10
2.4. <i>Current Control Voltage Source Inverter (CC-VSI)</i> ...	16
2.4.1. <i>Average Model Switching</i> .....	17
2.4.2. <i>Kontrol Average Model Switching</i> .....	18
2.5. Standar Harmonisa .....	18

<b>BAB 3 PEMODELAN <i>SHUNT ACTIVE POWER FILTER</i> UNTUK ELIMINASI HARMONIK DAN KOMPENSASI DAYA REAKTIF PADA PENGOPERASIAN <i>CRANE</i></b>	
3.1. Eliminasi Harmonik Dan Kompensasi Daya Reaktif Pada Pengoperasian <i>Crane</i> .....	23
3.2. Karakteristik <i>Crane</i> .....	24
3.3. Desain Beban <i>Crane</i> .....	25
3.3.1. Pemodelan Harmonisa.....	26
3.3.2. Pemodelan Daya Aktif dan Daya Reaktif.....	31
3.3.3. Kontrol PI Untuk Pengaturan Tegangan DC ( $V_{DC}$ ).....	34
3.3.4. Kontrol PI Untuk Pengaturan Daya Reaktif ( $V_{Q}$ -kontrol).....	36
3.4. Desain Arus Referensi <i>Shunt Active Power Filter</i> .....	38
<b>BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS</b>	
4.1. Proses Simulasi .....	41
4.2. Operasi <i>Crane</i> Dengan <i>Shunt Active Power Filter</i> .....	41
4.2.1. Daya Aktif dan Reaktif.....	43
4.2.1.1. Daya Aktif dan Reaktif Pada saat <i>Hoisting</i> ...	45
4.2.1.2. Daya Aktif dan Reaktif Pada saat <i>Lowering</i> .	46
4.2.2. Tegangan $V_{DC}$ dan Arus Grid .....	49
4.2.3. Harmonisa .....	52
4.2.4. <i>Power factor</i> .....	56
<b>BAB 5 PENUTUP</b>	
5.1. Kesimpulan .....	59
5.2. Saran.....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	61
<b>DAFTAR RIWAYAT HIDUP</b> .....	63

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema <i>Shunt Active Power Filter</i> .....	6
Gambar 2.2	Aliran daya dari inverter menuju ke grid.....	7
Gambar 2.3	Konstruksi <i>Portal Harbour Crane</i> .....	10
Gambar 2.4	Skema <i>Variable Frequency Drive</i> .....	12
Gambar 2.5	Skema rangkaian <i>Variable Frequency Controller</i> .....	13
Gambar 2.6	Konsumsi daya <i>crane</i> .....	14
Gambar 2.7	Nilai <i>power factor</i> selama operasi <i>crane</i> berlangsung .	15
Gambar 2.8	Harmonisa grid selama pengoperasian <i>crane</i> .....	16
Gambar 2.9	Skema kontrol PI.....	18
Gambar 3.1	Desain <i>Shunt Active Power Filter</i> .....	23
Gambar 3.2	Bentuk arus sumber yang terdistorsi oleh harmonisa ...	26
Gambar 3.3	FFT arus sumber <i>crane</i> .....	28
Gambar 3.4	Nilai THDi sumber dalam dua mode operasi .....	29
Gambar 3.5	Daya aktif dan daya reaktif yang diserap <i>crane</i> .....	32
Gambar 3.6	<i>Power factor</i> pada pengoperasian <i>crane</i> .....	33
Gambar 3.7	Skema kontrol $V_{DC}$ tahap pertama.....	34
Gambar 3.8	Skema kontrol $V_{DC}$ tahap kedua.....	35
Gambar 3.9	Skema kontrol $V_{DC}$ tahap ketiga.....	36
Gambar 3.10	Skema kontrol $V_{Q-kontrol}$ tahap pertama .....	36
Gambar 3.11	Skema kontrol $V_{Q-kontrol}$ tahap kedua .....	37
Gambar 3.12	Skema kontrol $V_{Q-kontrol}$ tahap ketiga .....	38
Gambar 3.13	Desain Arus Referensi.....	39
Gambar 3.14	Arus Referensi <i>Shunt Active Power Filter</i> .....	39
Gambar 4.1	Ilustrasi <i>paralleling generator</i> .....	44
Gambar 4.2	Daya aktif dan daya reaktif setelah pemasangan filter .	48
Gambar 4.3	Tegangan $V_{DC}$ .....	51
Gambar 4.4	Bentuk arus saat <i>hoisting</i> setelah pemasangan filter ....	53
Gambar 4.5	Bentuk arus saat <i>lowering</i> setelah pemasangan filter ...	54
Gambar 4.6	FFT orde harmonik setelah pemasangan filter .....	54
Gambar 4.7	Nilai THDi setelah pemasangan filter .....	55
Gambar 4.8	Nilai <i>power factor</i> setelah pemasangan filter .....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Karakteristik beban <i>crane</i> .....	25
Tabel 3.2 <i>Individual Harmonic Distortion</i> (IHD) arus .....	27
Tabel 3.3 Sudut fasa setiap IHD .....	30
Tabel 3.4 Parameter pemodelan beban pada <i>crane</i> .....	31

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Aktifitas pemindahan barang yang sangat berat tidak dapat dilakukan dengan menggunakan tangan kosong atau peralatan bantu seadanya. Diperlukan alat berat yang memiliki kapasitas yang cukup sesuai dengan berat benda yang akan diangkat. Alat berat yang sering digunakan untuk mengangkat beban yang sangat berat adalah *crane*. Dengan menggunakan *crane*, berat benda yang dapat diangkat dapat mencapai 20 Ton [1].

*Crane* merupakan alat berat yang dalam pengoperasiannya menggunakan motor listrik. Motor listrik jenis motor AC, dioperasikan dengan menggunakan *power electronic* jenis *Variable Frequency Drive* (VFD). *Power electronic* tersebut dapat mengubah frekuensi *output* sesuai dengan kehendak operator untuk mengatur kecepatan gerakan *crane* yang terhubung dengan motor listrik yang diatur.

Namun demikian, pengoperasian *crane* menggunakan VFD menimbulkan permasalahan harmonisa. Harmonisa muncul akibat dari aktifitas komponen *switching* dari VFD. Aktifitas *switching* tersebut menghasilkan frekuensi kelipatan 50 Hz atau frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental yang masuk ke grid PLN. Kondisi ini sangat merugikan karena dapat menyebabkan permasalahan teknis seperti kabel yang cepat panas karena impedansi kabel yang semakin tinggi, turunnya efisiensi karena *losses* pada peralatan yang cepat panas, mengurangi usia peralatan listrik akibat panas yang muncul, kesalahan pembacaan alat ukur akibat dari keberadaan harmonisa yang ikut terukur dalam alat ukur sehingga bukan nilai tegangan atau arus fundamental saja namun juga tegangan atau arus keseluruhan termasuk tegangan dan arus harmonisa, dan bahkan kebakaran akibat panas berlebihan.

Permasalahan yang muncul akibat pengoperasian *crane* tidak hanya pada permasalahan harmonisa saja. Terdapat permasalahan lain yang muncul yaitu rendahnya *power factor*. Motor merupakan alat listrik yang membutuhkan daya reaktif sebagai pembangkit medan magnet agar motor dapat berputar. Ketika motor dalam keadaan *standby* namun tidak dibebani, maka hanya daya reaktif saja yang dikonsumsi sedangkan konsumsi daya aktif sangat kecil. Dari perbandingan antara daya aktif dan daya reaktif tersebut, dapat diketahui bahwa nilai *power factor* dalam

keadaan sangat rendah. Nilai *power factor* yang rendah akan sangat merugikan. Bagi penyedia jasa listrik, daya yang disediakan dalam bentuk daya semu (VA) sedangkan pelanggan hanya membayar daya aktif saja (Watt) sehingga pelanggan hanya perlu membayar sedikit sesuai dengan daya aktif yang digunakan. Hal ini tidak sesuai daya semu (VA) yang telah disalurkan oleh penyedia jasa listrik dalam jumlah besar. Bagi pelanggan, kerugian disebabkan oleh denda atau *pinalty* yang diberikan penyedia jasa listrik.

Salah satu solusi dari kedua permasalahan tersebut adalah dengan cara menghubungkan *Shunt Active Power Filter* pada grid secara paralel yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini. *Shunt Active Power Filter* bekerja dengan cara mengeliminasi harmonisa arus sekaligus mengkompensasi daya reaktif. Eliminasi harmonisa arus dengan cara memberikan arus yang memiliki harmonisa yang sama atau identik namun terbalik. Penjumlahan antara arus *Shunt Active Power Filter* dengan arus grid akan saling menghilangkan harmonisa sehingga hanya gelombang arus fundamental yang tersisa. Kompensasi daya reaktif dilakukan dengan cara memberikan arus listrik yang bersifat kapasitif, sehingga dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif grid yang bersifat induktif. Dengan menggunakan *Shunt Active Power Filter*, listrik grid terbebas dari gangguan harmonisa dan memiliki *power factor* yang tinggi sehingga dapat meminimalisir kerugian yang ditimbulkan oleh kedua gangguan tersebut.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Permasalahan yang akan dibahas adalah bagaimana mengendalikan inverter tiga fasa sebagai *Shunt Active Power Filter* untuk mendapatkan arus kompensasi guna diinjeksikan ke sistem saluran tegangan rendah 400 Volt tiga fasa.

## **1.3. Batasan Masalah**

Dalam penelitian ini penyelesaian masalah dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. *Shunt Active Power Filter* dipasang pada sistem tegangan rendah 3 fasa, 50 Hz, 400 Volt paralel dengan beban seimbang non-*linier* sebesar 200 kW
2. Beban yang dimodelkan adalah *Crane* PHC pada motor *hold*.
3. Eliminasi harmonisa yang dilakukan adalah pada harmonisa arus.

#### 1.4. Tujuan

Penelitian ini dilakukan untuk :

1. Merancang skema *Shunt Active Power Filter* dengan menggunakan *hybrid control*.
2. Mengkompensasi daya reaktif sistem sehingga nilai *power factor* diatas 0,85.
3. Mengurangi harmonisa arus sumber pada sistem sehingga nilai harmonisa di bawah 5% dengan sistem frekuensi 50 Hz.

#### 1.5. Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah:

##### 1. Studi Literatur

Penulis mempelajari mengenai berbagai topologi *Shunt Active Power Filter* dari jurnal konferensi, publikasi ilmiah, beberapa buku tugas akhir, dan artikel-artikel dari internet.

##### 2. Pengumpulan Data

Setelah dilakukan studi literatur, maka penulis melakukan pengumpulan data tentang parameter-parameter pada pada pengoperasian *crane* (nilai daya aktif dan daya reaktif pada saat *Hoisting* dan *Lowering*).

##### 3. Pemodelan dan Simulasi

Setelah mengumpulkan data, penulis membuat pemodelan rangkaian *Shunt Active Power Filter* untuk disimulasikan. Pemodelan terdiri dari beban *crane* , CC-VSI, eliminasi harmonik, kontrol  $V_{DC}$ , kontrol daya reaktif, dan grid.

##### 4. Analisa Data

Setelah simulasi selesai dilakukan maka didapat hasil yang akan dianalisis. Data yang akan dianalisis adalah nilai harmonisa dan *power factor* pada grid pada sistem tegangan rendah 400 V.

##### 5. Penulisan Buku Tugas Akhir

Penulisan buku merupakan kumpulan informasi yang disajikan dalam bentuk buku yang berasal dari hasil pengaplikasian metodologi yang dilakukan

#### 1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan masing-masing bab diuraikan sebagai berikut :

## **BAB 1 Pendahuluan**

Bab Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, kontribusi penelitian dan sistematika penulisan

## **BAB 2 *Shunt Active Power Filter* Untuk Eliminasi Hamonik dan Kompensasi Daya Reaktif Pada Pengoperasian Crane**

Berisi tentang skema *Shunt Active Power Filter*, karakteristik *crane* , fungsi dari CC-VSI, dan standar harmonisa.

## **BAB 3 Pemodelan Sistem *Shunt Active Power Filter* Untuk Eliminasi Hamonik dan Kompensasi Daya Reaktif Pada Pengoperasian Crane**

Bab ini menjelaskan pemodelan sistem *Shunt Active Power Filter* dan perancangan kontrol sistem yang meliputi pemodelan sistem tegangan rendah 400 Volt tiga fasa, dan kontrol PI.

## **BAB 4 Simulasi dan Analisis**

Sistematika pembahasan penelitian ini adalah sebagai berikut: Berisi parameter simulasi, hasil simulasi sistem, dan analisa hasil simulasi

## **BAB 5 Penutup**

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil simulasi dan analisa.

### **1.7. Relevansi**

Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat menjadi referensi untuk mendesain *Shunt Active Power Filter* untuk aplikasi perbaikan kualitas daya pada pengoperasian *crane* . Khususnya pada perbaikan harmonisa dan *power factor*.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk tugas akhirnya.

## **BAB 2**

### ***SHUNT ACTIVE POWER FILTER UNTUK ELIMINASI HARMONIK DAN KOMPENSASI DAYA REAKTIF PADA PENGOPERASIAN CRANE***

#### **2.1. *Active Power Filter***

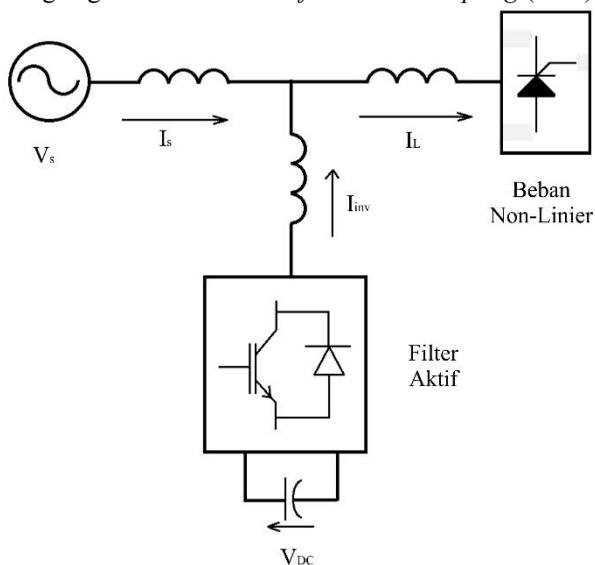
Rangkaian filter dalam peralatan listrik digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan sinyal polutan yang terdapat pada saluran. Sinyal polutan dalam saluran adalah sinyal yang memiliki frekuensi kelipatan frekuensi fundamental yang disebut sebagai frekuensi harmonik dan frekuensi yang tidak merupakan kelipatan frekuensi fundamental yang disebut sebagai frekuensi interharmonik. Frekuensi polutan tersebut akan dilemahkan oleh rangkaian filter. Terdapat dua jenis filter yang digunakan yaitu filter pasif dan filter aktif. Filter pasif menggunakan komponen pasif sebagai filter. Komponen yang digunakan adalah kapasitor dan induktor. Filter aktif menggunakan komponen aktif sebagai komponen rangkaian filter. Komponen yang digunakan adalah komponen *controlled switching* seperti IGBT, MOSFET, dan BJT. Komponen tersebut disusun menjadi inverter untuk menyuplai arus AC ke saluran.

*Active Power Filter* bekerja dengan cara memberikan arus pada grid dengan nilai harmonisa yang sama dan terbalik. Nilai harmonisa diperoleh dari arus beban yang di-*input*-kan ke rangkaian pembentuk arus referensi. Melalui *control switching* tertentu, sinyal *switching* mengendalikan *switching* pada komponen *switching* inverter. *Output* inverter akan mengikuti referensi *control switching*. *Output* inverter menghasilkan sinyal harmonisa yang bernilai sama dengan saluran dan terbalik. Penjumlahan dari harmonisa grid dengan harmonisa *Active Power Filter* akan saling menghilangkan. Keadaan ini menghasilkan sinyal arus grid yang bebas dari harmonisa [2].

##### **2.1.1. *Shunt Active Power Filter***

Pada aplikasinya, *Shunt Active Power Filter* dirangkai secara paralel dengan grid. Untuk mendapatkan sinyal referensi, *Shunt Active*

*Power Filter* men-sensing arus dan tegangan pada sisi *load* dan  $V_{DC}$ . Sinyal arus digunakan untuk mendapatkan referensi harmonisa yang kemudian akan dibalik. Sinyal tegangan digunakan untuk memperbaiki *power factor* dengan cara, arus yang akan disalurkan ke grid memiliki fasa yang sama dengan fasa tegangan grid. Sinyal keluaran dari rangkaian proses tersebut digunakan untuk mengontrol *switching* pada inverter yang diparalel dengan grid melalui *Point of Common Coupling* (PCC) [3].



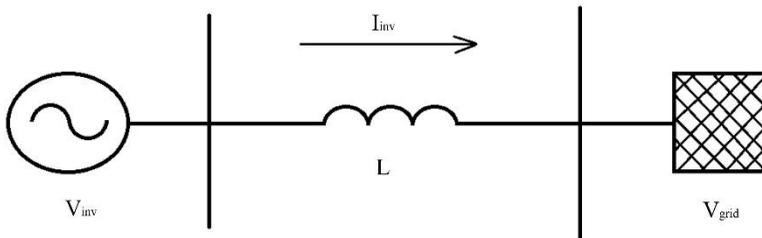
**Gambar 2.1** Skema *Shunt Active Power Filter*

Skema pada gambar 2.1 adalah rangkaian *Shunt Active Power Filter* yang mana rangkaian ini terdiri dari sumber tegangan AC ( $V_s$ ), beban non-linier, dan filter aktif. Arus sumber ( $I_s$ ) mengalir menuju beban non-linier, memberikan daya pada beban. Antara  $I_s$  dengan beban non-linier, terdapat percabangan saluran dari filter aktif. Saluran ini memberikan arus inverter ( $I_{inv}$ ) yang bersifat mengeliminasi harmonik dan mengkompensasi daya reaktif, sehingga nilai *power factor* dan harmonik  $I_s$  sesuai standar. Arus beban ( $I_L$ ) tetap memiliki harmonisa dan *power*

*factor* yang rendah karena pengaruh *switching* rangkaian *power electronic* dan kebutuhan daya reaktif yang besar dari beban non-linier.

## 2.2. Aliran Daya dari Inverter ke Grid

*Shunt Active Power Filter* menggunakan inverter untuk mengeliminasi harmonisa dan mengkompensasi daya reaktif. Inverter tersebut bertugas menyalurkan daya ke grid dengan jumlah tertentu sesuai dengan kebutuhan grid. Jika harmonisa pada grid sangat besar, maka daya yang disalurkan ke grid juga besar agar harmonisa pada grid dapat hilang atau tereliminasi. Demikian juga dengan kebutuhan perbaikan *power factor*. Jika *power factor* sangat kecil, maka diperlukan daya reaktif yang besar untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif pada saluran sehingga sumber tenaga tidak perlu memberikan daya reaktif yang besar ke saluran.



**Gambar 2.2** Aliran daya dari inverter menuju ke grid

Pada gambar 2.2 arus inverter ( $I_{inv}$ ) mengalir dari sisi inverter menuju sisi grid melalui sebuah induktansi saluran ( $L$ ). Untuk mendapatkan kondisi ini, maka tegangan inverter ( $V_{inv}$ ) harus lebih besar dari tegangan grid ( $V_{grid}$ ). Nilai arus yang mengalir, ditentukan oleh nilai induktansi saluran ( $L$ ) antara sisi inverter dengan sisi grid.

Dalam penyaluran daya dari inverter menuju ke grid, diperlukan perhitungan nilai induktansi yang harus dipasang pada kabel antara inverter dengan grid. Nilai induktansi ini akan menghasilkan reaktansi induktif ( $xL$ ) yang dapat mengontrol aliran daya aktif pada saluran. Berikut adalah persamaan aliran daya sesuai dengan persamaan yang ada pada ref[4]:

$$P = \frac{3V_{\phi inv}V_{\phi grid}}{xL} \sin \delta \quad (2.1)$$

Keterangan:

$P$  = Daya aktif yang disalurkan inverter (Watt)

$V_{\phi inv}$  = Tegangan inverter *line to netral* (V)

$V_{\phi grid}$  = Tegangan grid *line to netral* (V)

$xL$  = Reaktansi saluran antara inverter dengan grid ( $\Omega$ )

$\sin \delta$  = Sinus sudut antara  $V_{\phi inv}$  dengan  $V_{\phi grid}$

Dari rumus diatas dapat dilihat bahwa, jika nilai reaktansi ( $xL$ ) saluran adalah sama dengan nol, maka nilai  $P$  atau daya aktif yang disalurkan ke grid akan bernilai tak hingga. Hal ini adalah sesuatu yang tidak diinginkan sehingga penentuan nilai  $L$  atau induktor atau nilai induktansi saluran menjadi sangat penting.

Inverter dapat menyalurkan daya apabila nilai dari  $\sin \delta$  adalah positif. Nilai positif berarti menunjukkan bahwa inverter sebagai generator dan grid sebagai beban. Selain itu, tegangan *output* dari inverter harus lebih besar dari pada tegangan grid. Dengan demikian, arus akan mengalir dari inverter menuju ke grid. Persamaan rumusnya dapat dilihat pada persamaan berikut ini:

$$V_{inv} = V_{grid} + V_{induktor} \quad (2.2)$$

Keterangan :

$V_{inv}$  = Tegangan inverter (V)

$V_{grid}$  = Tegangan grid (V)

$V_{induktor}$  = Tegangan drop pada induktor atau saluran (V)

Tegangan drop pada saluran disebabkan oleh reaktansi saluran seperti yang telah dijelaskan pada penjelasan sebelumnya, sehingga rumus dari  $V_{inv}$  dapat dijabarkan seperti berikut:

$$V_{inv} = V_{grid} + jX_L I_{inv} \quad (2.3)$$

Keterangan:

$X_L$  = Reaktansi saluran ( $\Omega$ )

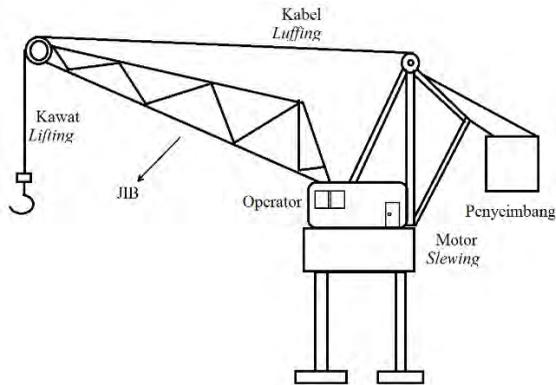
$I_{inv}$  = Arus *output* inverter (A)

### 2.3. *Portal Harbour Crane (PHC)*

PHC digunakan untuk memindahkan barang dari dan ke kapal. Terkadang dijumpai PHC yang berada diatas kapal. PHC yang berada diatas kapal memiliki fungsi yang sama seperti PHC yang ada di pelabuhan yaitu untuk memindahkan muatan atau barang dari dan ke kapal. PHC yang berada diatas kapal biasanya merupakan jenis *mobile* PHC yaitu PHC yang dapat berpindah tempat. PHC ini juga digunakan untuk proyek konstruksi ditengah laut misalnya pembuatan kontruksi bangunan pengeboran minyak ditengah laut.

Jika PHC dikombinasikan dengan *grab system*, maka PHC ini berfungsi untuk mengangkat batu bara dan beberapa jenis hasil tambang yang masih berupa bijih seperti bijih bauksit, bijih timah, dan *ore*. Kapasitas angkat dapat mencapai 750 TPH (*Ton Per Hour*). Kapasitas maksimal *lifting* mencapa 100 ton dengan satu *cycle* memerlukan waktu selama 75 detik.

Pada gambar 2.3 konstruksi *Portal Harbour Crane* (PHC) terdiri dari *motor slewing*, penyeimbang, operator, *luffing*, JIB, dan kawat *lifting*. *motor slewing* digunakan untuk memutar badan PHC sehingga PHC dapat menghadap pada tempat yang dikehendaki. Penyeimbang digunakan sebagai kompensasi berat ketika PHC mengangkat beban sehingga PHC tetap seimbang. Operator disini adalah ruang operator yang digunakan untuk mengoperasikan PHC. *Luffing* digunakan untuk menaikkan atau menurunkan ujung JIB agar JIB tidak bertabrakan dengan benda tinggi disekitar PHC ketika *motor slewing* dioperasikan. JIB merupakan kontruksi memanjang yang digunakan untuk menjangkau beban dan kawat *lifting* digunakan sebagai penghubung antara motor dengan beban sehingga beban dapat dinaikkan maupun diturunkan.



**Gambar 2.3** Konstruksi *Portal Harbour Crane*

### 2.3.1. *Motor Portal Harbour Crane (PHC)*

*Portal Harbour Crane* digerakkan dengan menggunakan motor listrik. Kapasitas motor ditentukan oleh kapasitas beban yang diangkat. Bagian utama dari PHC adalah JIB yang digunakan untuk meraih beban dan memindahkannya ke tempat yang dikehendaki. Selain itu terdapat penyeimbang yang berupa pemberat yang berfungsi sebagai kompensasi berat ketika mengangkat beban sehingga konstruksi PHC tetap seimbang. *Portal Harbour Crane (PHC)* menggunakan empat motor AC yaitu motor *Holding*, *Luffing*, *Slewing*, dan *Close* sebagai penggerakannya.

Motor *Holding* berfungsi sebagai pengangkat beban, motor *Luffing* berfungsi sebagai penggerak JIB ke atas dan ke bawah, motor *Slewing* berfungsi untuk memutar *body crane*, dan motor *Close* berfungsi untuk membuka dan menutup *grab system*. Motor menggerakkan bagian – bagian PHC dengan aturan tertentu sehingga tidak menyebabkan *miss-movement* yang dapat menyebabkan PHC tidak seimbang dan runtuh..

### 2.3.2. *Driver Portal Harbour Crane (PHC)*

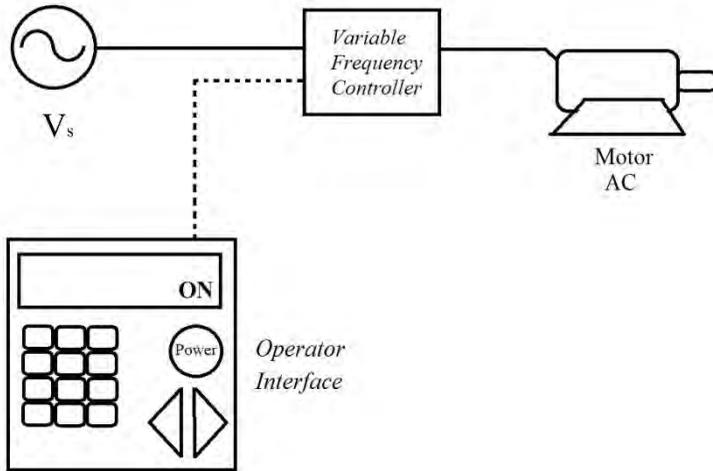
Motor pada *crane*, dioperasikan dengan menggunakan sebuah *driver* yang memiliki spesifikasi sesuai dengan kebutuhan motor. *Driver* berfungsi sebagai jembatan antara motor dengan sumber tenaga. *Driver* merupakan alat kontrol yang dapat menyesuaikan kebutuhan listrik motor

sesuai dengan keinginan operator. *Driver* yang digunakan adalah *Variable Frequency Drive* (VFD). *Driver* ini dapat mengatur kecepatan motor AC dengan cara mengatur frekuensi listrik *output* .

*Portal Harbour Crane* (PHC) memiliki empat motor AC seperti penjelasan sebelumnya. Keempat motor PHC dikendalikan dengan menggunakan (*Variable Frequency Drive*) VFD. Operator dapat mengatur kecepatan dan arah gerak bagian – bagian bergerak pada *crane* dengan cara menggerakkan tuas atau tombol yang terdapat pada ruang operator. Tuas atau tombol tersebut berhubungan dengan rangkaian yang dapat memerintahkan VFD yang selanjutnya VFD akan mengeluarkan *output* tegangan listrik dengan frekuensi tertentu sesuai dengan perintah operator sehingga bagian – bagian bergerak dari *crane* dapat bergerak sesuai dengan keinginan operator.

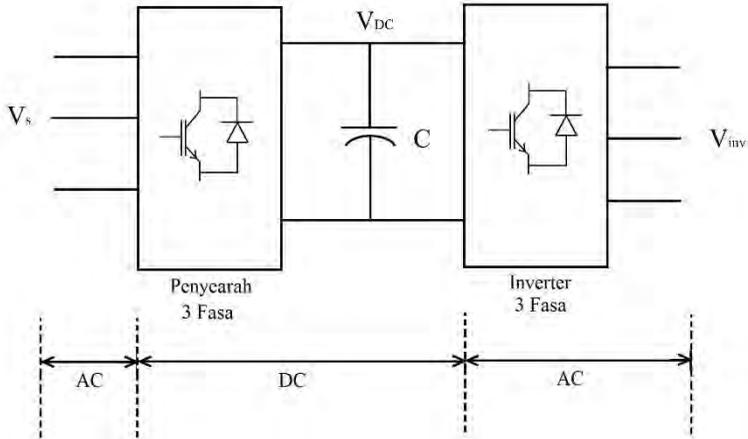
Terdapat komponen *power electronic* pada VFD yang digunakan untuk mengatur frekuensi *output* VFD. *Power electronic* tersebut membentuk salah satu bagian dari rangkaian utama VFD, yaitu *variable frequency controller*. *Variable Frequency Controller* menghasilkan sinyal *switching* untuk men-*trigger power electronic*, sedangkan *power electronic* berfungsi sebagai pengubah arus DC menjadi arus AC.

Pada gambar 2.4 *Variable Frequency Drive* terdiri dari sumber tegangan AC ( $V_s$ ), *Variable Frequency Controller*, motor AC, dan *Operator Interface*. Bagian utama pada *Variable Frequency Drive* adalah *Operator Interface* dan *Variable Frequency Controller*. *Operator Interface* digunakan untuk mengendalikan operasi VFD oleh operator. *Operator Interface* merupakan jembatan penghubung antara operator dengan VFD. Bagian – bagian dari *Operator Interface* adalah papan tombol, tuas, dan layar. *Variable Frequency Controller* berfungsi sebagai pengatur frekuensi *output* dari VFD. *Variable Frequency Controller* mendapatkan *input* daya dari grid dan mendapatkan *input* perintah dari *operator interface*.



**Gambar 2.4** Skema *Variable Frequency Drive*

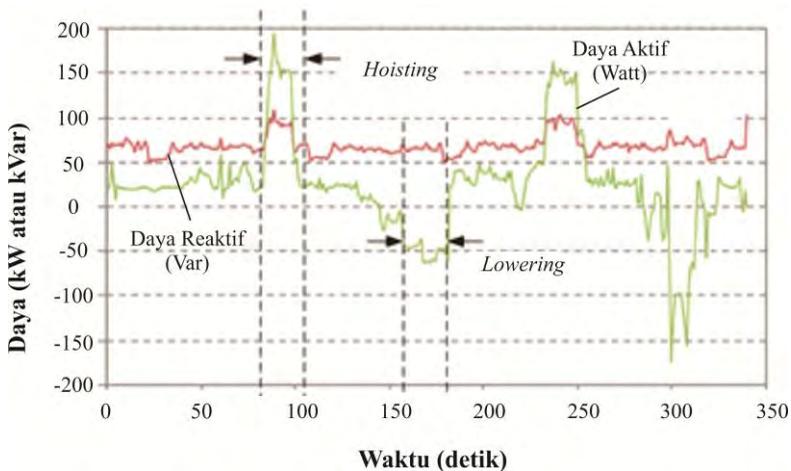
Kemudian sinyal perintah dari *Operator Interface* akan menjadi referensi bagi *Variable Frequency Controller* untuk mengatur daya yang masuk dari grid yang akan disesuaikan dengan referensi yang diterima. Secara sederhana, bagian penting dari *Variable Frequency Controller* adalah *rectifier* tiga fasa,  $V_{DC}$ , dan inverter tiga fasa. Baik *rectifier* tiga fasa maupun inverter tiga fasa merupakan perangkat *power electronic* yang dapat diatur karena menggunakan *thyristor* atau IGBT sebagai komponen *switching*-nya. Untuk mengatur tegangan atau frekuensi keluaran yang berbeda hanya perlu mengatur sudut penyalan masing – masing komponen *switching* tersebut [4].



**Gambar 2.5** Skema rangkaian *Variable Frequency Controller*

Pada gambar 2.5 *rectifier* tiga fasa digunakan untuk menghasilkan tegangan DC ( $V_{DC}$ ).  $V_{DC}$  ini akan digunakan sebagai *input* dari inverter tiga fasa. Karena  $V_{DC}$  yang dihasilkan adalah tegangan *output* dari *rectifier* tiga fasa, maka  $V_{DC}$  yang dihasilkan bukan  $V_{DC}$  murni namun  $V_{DC}$  yang mengandung *ripple* tegangan maupun arus. Untuk mengurangi permasalahan tersebut, digunakanlah kapasitor yang dipasang secara paralel pada  $V_{DC}$ . *Output*  $V_{DC}$  setelah melewati kapasitor akan lebih halus dan  $V_{DC}$  tersebut dapat dikonversi menjadi tegangan AC melalui inverter [5].

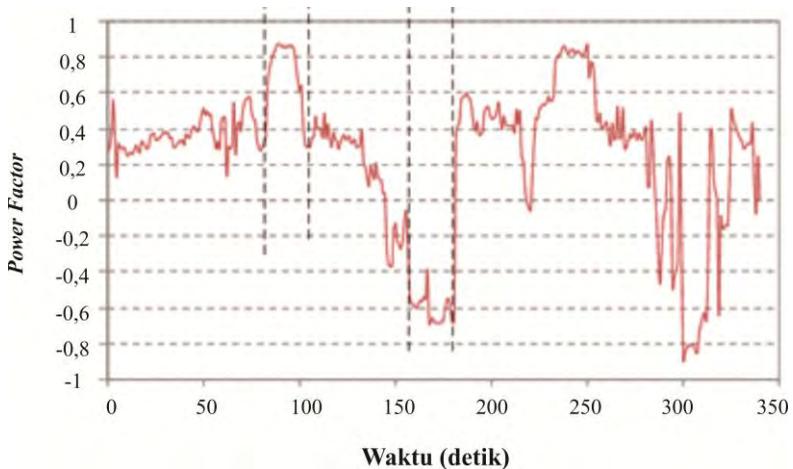
Pengoperasian VFD dapat menimbulkan masalah harmonisa dan penurunan *power factor* pada grid. Harmonisa dihasilkan akibat dari proses *switching* pada VFD. *Switching* pada VFD dilakukan oleh penyearah tiga fasa. Penurunan *power factor* disebabkan oleh pengoperasian motor pada saat motor tidak dibebani. Pada saat motor *standby*, motor akan mengkonsumsi daya reaktif sebesar arus yang dapat mengalir pada rangkaian magnetisasinya. Jika konsumsi daya reaktif lebih besar dari pada daya aktif, maka nilai *power factor* akan turun. Berikut adalah daya jumlah daya yang dikonsumsi oleh pengoperasian *crane* pada salah satu pelabuhan yang ada di Indonesia.



**Gambar 2.6** Konsumsi daya crane

Pada gambar 2.6 dapat dilihat bahwa dari pola pengoperasian crane terdapat dua mode pengoperasian, yaitu mode *hoisting* dan mode *lowering*. Pada saat mode *hoisting*, konsumsi daya melonjak drastis sedangkan pada saat mode *lowering* kebutuhan daya menurun drastis dan bahkan aliran daya berubah yang semula dari grid menuju motor terbalik menjadi dari motor menuju grid. Aktifitas fluktuasi konsumsi daya tersebut mempengaruhi *power factor* selama operasi.

*Power factor* dihitung berdasarkan pada perbandingan antara daya aktif dibanding dengan daya semu. Daya semu merupakan perkalian antara tegangan dan arus. Dengan demikian, nilai dari daya semu selalu lebih besar dari pada daya aktif maupun reaktif karena daya aktif maupun daya reaktif harus dikalikan dengan cosinus atau sinus sudut antara tegangan dan arus. Pada saat daya aktif lebih rendah dari pada daya reaktif, nilai *power factor* menjadi rendah, karena perbandingan antara daya aktif dan daya semu rendah. Besarnya daya semu adalah lebih besar dari daya reaktif sedangkan daya reaktif lebih besar dari pada daya aktif. Hal ini menekankan bahwa keadaan tersebut membuat *power factor* menjadi rendah.

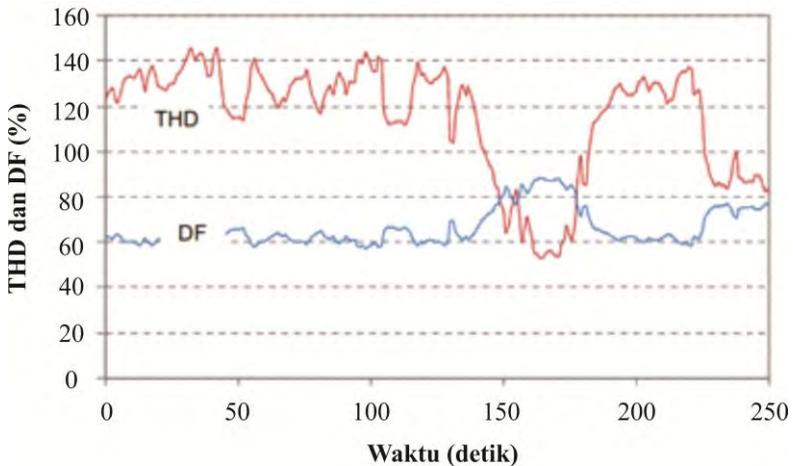


**Gambar 2.7** Nilai *power factor* selama operasi *crane* berlangsung

Pada gambar 2.7 nilai *power factor* berfluktuasi selama pengoperasian *crane* berlangsung. Pada awal pengoperasian, nilai *power factor* menunjukkan adanya *ripple* yang mana cenderung lebih stabil. Antara detik ke 100, *power factor* meningkat drastis. Hal ini karena mode *hoisting* yang sedang berlangsung pada saat itu. Kemudian *power factor* menurun hingga bernilai negatif sekitar detik 180. Pada saat tersebut adalah mode *lowering*. Selanjutnya *power factor* meningkat dan mengalami *ripple* dan kemudian naik kemudian turun lagi. Begitu seterusnya. Hal ini dapat dilihat bahwa pada saat mode *hoisting*, nilai *power factor* mengalami peningkatan *power factor* sedangkan pada saat mode *lowering* nilai *power factor* menjadi negatif.

Selama pengoperasian, harmonisa muncul sebagai akibat dari aktifitas *switching* pada VFD. Besarnya harmonisa bervariasi tergantung dari mode operasi yang sedang berlangsung seperti yang terlihat pada gambar 2.8. Pada saat berlangsung operasi *hoisting*, nilai harmonisa pada saluran meningkat sedangkan pada saat *lowering*, nilai harmonisa pada saluran menurun. Pada saat *hoisting*, VFD menghasilkan tegangan dengan frekuensi tertentu sesuai dengan perintah dari operator. Pada saat

itu, VFD mengkonsumsi daya dari grid dan aktif dalam menyalurkan daya dari grid menuju motor pada *crane*. Keadaan ini membuat konsentrasi yang tinggi untuk menyalurkan daya besar menuju motor, sedangkan pada saat *lowering*, daya berasal dari motor menuju grid. Daya yang di konversi oleh VFD lebih kecil daripada pada saat *hoisting*, sehingga distorsi harmonisa tidak sebesar pada saat *hoisting*. Berikut adalah grafik harmonisa selama pengoperasian *crane*.



**Gambar 2.8** Harmonisa grid selama pengoperasian *crane*

#### 2.4. *Current Control Voltage Source Inverter (CC-VSI)*

Sesuai dengan namanya, kontrol yang digunakan untuk membangkitkan tegangan AC pada sisi *output* adalah kontrol arus. Arus listrik dari *load* di-*sensing*, kemudian diproses untuk menghasilkan sinyal referensi. Sinyal ini digunakan untuk membangkitkan tegangan pada *output* inveter. Ada dua tipe pembangkitkan/pensakalaran pada inverter yaitu *Switching Detail* dan *Average Model Switching*.

### 2.4.1. *Avegare Model Switching*

Pensaklaran oleh *Avegare Model Switching* berbeda dengan pensaklaran *Switching Detail*. Pensaklaran oleh *Switching Detail* menggunakan komparator yang digunakan untuk menghasilkan pulsa *switching*. Pulsa ini digunakan untuk mengatur *switching* pada inverter sehingga memiliki *output* yang sesuai dengan sinyal referensinya. berikut adalah persamaan tegangan *output* inverter dengan *Switching Detail*:

$$V_{ab} = m_a \times \sqrt{3} \times \frac{V_i}{2} \quad 0 < m_a \leq 1 \quad (2.4)$$

Keterangan:

$V_{ab}$  = Tegangan keluaran *line-to-line* inverter (V)

$m_a$  = Perbandingan antara *amplitude* sinyal modulasi dengan *amplitude* sinyal *carrier*

$V_i$  = Tegangan masukan inverter (V)

Pensaklaran *Avegare Model Switching* tidak menggunakan komparator maupun inverter. *Avegare Model Switching* menggunakan perkalian antara sinyal DC dan AC. Sinyal AC merupakan sinyal referensi yang dihasilkan dari suatu proses pembangkitan sinyal referensi sedangkan sinyal DC merupakan sinyal tenaga. Tujuan menggunakan *Avegare Model Switching* adalah memiliki waktu simulasi yang lebih singkat dari pada menggunakan *Switching Detail*. Persamaan tegangan dan arus pada *Avegare Model Switching* adalah sebagai berikut:

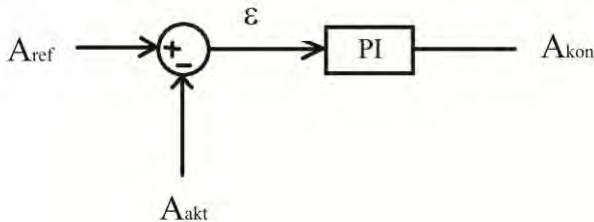
$$\begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_m \cos(\omega t) \\ f_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ f_m \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} \times V_{dc} \quad (2.6)$$

$$I_{dc} = [f_{ab} \quad f_{bc} \quad f_{ca}]x \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

#### 2.4.2. Kontrol *Avegare Model Switching*

Untuk mengatur *output* dari *Avegare Model Switching* digunakan kontrol PI sebagai penstabil tegangan  $V_{DC}$ . Kontrol PI bekerja dengan cara memperkecil sinyal *error*. Sinyal *error* diperoleh dari pengurangan antara sinyal referensi dengan sinyal aktual. Jika *error* sama dengan nol, maka sinyal referensi sama dengan sinyal aktual. Kelemahan dari kontrol PI adalah timbulnya osilasi pada sinyal *output* jika *setting* parameter PI tidak sesuai. Kontrol PI mempunyai dua parameter yaitu parameter gain ( $K_p$ ) dan *time constant*. Parameter gain digunakan untuk memperbaiki *raising time* dan *settling time* sedangkan *time constant* digunakan untuk mempercepat *steady state* [6].



**Gambar 2.9** Skema kontrol PI

Pada gambar 2.9, sinyal  $A_{ref}$  akan membentuk sinyal  $A_{akt}$  dengan cara mengurangi sinyal  $A_{ref}$  dengan sinyal  $A_{akt}$ . Hasil pengurangannya adalah sinyal error ( $\epsilon$ ). Sinyal  $\epsilon$  akan diperkecil oleh kontrol PI dengan cara kontrol PI menghasilkan sinyal  $A_{kon}$  yang dapat membuat sinyal  $A_{akt}$  memiliki nilai yang mendekati nilai sinyal  $A_{ref}$  sehingga nilai  $\epsilon$  mengecil.

#### 2.5. *Standar Harmonisa*

Harmonisa dalam kelistrikan ada dua macam yaitu harmonisa tegangan dan harmonisa arus. Standar harmonisa yang diaplikasikan

berbeda antara tegangan dan arus. Standar harmonisa arus lebih kompleks dari standar harmonisa tegangan karena harus memperhitungkan nilai arus *short circuit* ( $I_{sc}$ ). Standar harmonisa arus sesuai dengan IEEE Std 519-1992 dapat dilihat pada tabel 2.1[7].

Pada tabel 2.1, batas nilai harmonisa yang tertera adalah batas nilai harmonisa pada orde ganjil. Batas nilai harmonisa ditentukan oleh perbandingan antara  $I_{sc}$  dengan arus load ( $I_L$ ). Perhitungan  $I_{sc}$  sangat sulit dilakukan jika parameter trafo, saluran, dan generator tidak diketahui. Dengan demikian, untuk mendapatkan perbandingan nilai  $I_{sc}/I_L$  menjadi sangat sulit. Untuk mengatasi hal tersebut, dapat dilakukan pendekatan dengan cara menggunakan perbandingan daya kedua arus tersebut yaitu  $MVA_{sc}/MVA_L$ .

**Tabel 2.1** Distorsi arus untuk sistem saluran distribusi (120 V – 69 kV)

Harmonisa maksimal arus dalam persen						
Harmonisa setiap orde (orde ganjil)						
$I_{sc}/I_L$	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Batas harmonisa orde genap adalah 25% dari harmonisa orde ganjil di atas						
Tidak mengandung komponen DC						
*berlaku untuk semua peralatan pembangkitan						
Keterangan:						
$I_{sc}$ = arus hubung singkat maksimum pada PCC ( <i>Point of Common Coupling</i> )						
$I_L$ = arus beban penuh						
TDD = <i>Total Demand Distortion</i> , harmonisa arus total						

Kesetaraan nilai perbandingan  $I_{sc}/I_L$  dengan nilai perbandingan  $MVA_{sc}/MVA_L$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{I_{sc}}{I_L} \approx \frac{MVA_{sc}}{MVA_L} \quad (2.8)$$

Keterangan:

$I_{sc}$  = arus *short circuit* pada PCC (A)

$I_L$  = arus pada saat *full load* (A)

$MVA_{sc}$  = Daya yang dihasilkan pada saat *short circuit* (MVA)

$MVA_L$  = Daya yang dihasilkan pada saat *full load* (MVA)

Nilai  $MVA_{sc}$  dapat di peroleh dari perbandingan antara kuadrat kV saluran dengan impedansi saluran. Parameter impedansi saluran dapat diperoleh dari perhitungan total resistansi dan reaktansi pada saluran atau dapat dengan cara menggunakan *typical data* saluran yang sering digunakan pada aplikasi yang sama.  $MVA_L$  dapat dicari dari perbandingan antara daya aktif dan *power factor*. Persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$MVA_{sc} = \frac{kV^2}{Z_{saluran}} \quad (2.9)$$

Keterangan:

$MVA_{sc}$  = daya yang dihasilkan pada saat *short circuit* (MVA)

$kV^2$  = tegangan kerja saluran (kV)

$Z_{saluran}$  = impedansi saluran ( $\Omega$ )

Persamaan untuk mencari  $MVA_L$  dapat ditulis sebagai berikut:

$$MVA_L = \frac{P}{power\ factor} \quad (2.10)$$

Keterangan:

$MVA_L$  = daya pada saat *full load* (MVA)

$P$  = daya aktif saluran (watt)

*Power factor* = *power factor* saluran

Setelah mendapatkan perbandingan  $I_{sc}/I_L$  maka dapat ditentukan batas nilai harmonisa. Jika nilai perbandingan  $I_{sc}/I_L$  kurang dari 20, maka nilai harmonisa untuk *Individual Harmonic Distortion* (IHD) untuk kolom pertama ( $>11$ ) adalah 4% yaitu untuk orde ganjil antara 0 – 10. Begitu pula seterusnya. Nilai *Total Demand Distortion* (TDD) senilai 5%. TDD adalah nilai harmonisa secara keseluruhan. Untuk batas nilai harmonisa orde genap, maka batas nilai harmonisa pada tabel 2.1 dikalikan dengan 25%. Dengan demikian, batas nilai harmonisa orde genap lebih kecil dari pada batas nilai harmonisa orde ganjil.

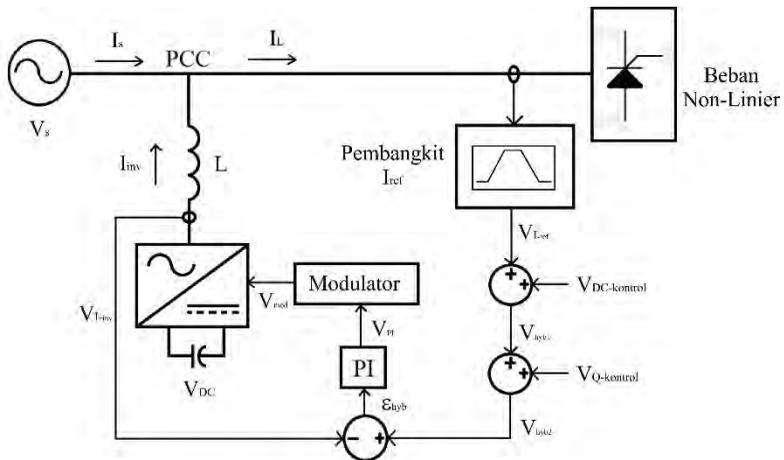
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 3

### PEMODELAN *SHUNT ACTIVE POWER FILTER* UNTUK ELIMINASI HARMONIK DAN KOMPENSASI DAYA REAKTIF PADA PENGOPERASIAN *CRANE*

#### 3.1. Eliminasi Harmonik Dan Kompensasi Daya Reaktif Pada Pengoperasian *Crane*

Sistem *Shunt Active Power Filter* terdiri dari pengontrol  $V_{DC}$ , pengontrol daya reaktif, pembangkit sinyal referensi, modulator, inverter, dan induktansi  $L$  yang menghubungkan antara inverter dengan grid. Arus listrik yang disalurkan ke grid merupakan arus listrik yang memiliki harmonisa yang sama dengan grid namun terbalik. *Shunt Active Power Filter* juga memberikan daya reaktif yang dibutuhkan grid sehingga *power factor* disisi saluran sumber meningkat. Berikut adalah desain dari *Shunt Active Power Filter* [8]:



**Gambar 3.1** Desain *Shunt Active Power Filter*

Gambar 3.1 adalah desain keseluruhan *Shunt Active Power Filter*. Tegangan sumber ( $V_s$ ) akan mengalirkan arus ( $I_s$ ) menuju beban sebesar daya yang diperlukan oleh beban. Pada titik *Point of Common Coupling*

(PCC) terjadi penjumlahan arus yaitu penjumlahana antara arus sumber ( $I_s$ ) dengan arus inverter ( $I_{inv}$ ). Penjumlahan arus ini menghasilkan arus beban ( $I_L$ ) yang mengalir dari PCC menuju beban. Beban yang digunakan adalah beban non-linier berupa *Variable Frequency Drive* (VFD) yang digunakan untuk mengoperasikan motor. Pemodelan beban akan dibahas pada pembahasan selanjutnya.

Terdapat inverter yang digunakan untuk menyuplai arus inverter ( $I_{inv}$ ) menuju PCC. Sinyal kontrol untuk membangkitkan bentuk gelombang arus pada *output* inverter ( $I_{inv}$ ) diperoleh dari proses pembangkitan sinyal inverter. Pembangkit sinyal inverter terdiri dari pembangkitan sinyal referensi, sistem *hybrid*, kontrol PI, dan modulasi sinyal.

Pembangkitan sinyal referensi dimulai dengan *men-sensing* arus beban ( $I_L$ ) yang kemudian akan digunakan untuk membangkitkan sinyal arus referensi ( $V_{I-ref}$ ). Sinyal  $V_{I-ref}$  akan masuk ke dalam sistem *hybrid* yaitu dijumlahkan dengan sinyal kontrol lainnya. Sinyal kontrol yang masuk sistem *hybrid* adalah sinyal kontrol tegangan DC ( $V_{DC}$ ) dan sinyal kontrol daya reaktif ( $V_{Q-kontrol}$ ) yang digunakan untuk mengatur *power factor* sistem. *Output* dari sistem *hybrid*, akan dikurangkan dengan arus inverter ( $I_{inv}$ ) sehingga menghasilkan sinyal error. Sinyal error akan memasuki *kontroller* PI. Oleh *kontroller* PI, sinyal error diperkecil dengan cara memberikan *output* sinyal pada modulator. Modulator akan membuat sinyal kontrol menjadi sinyal *output* inverter yang diinginkan

### 3.2. Karakteristik *Crane*

Pengoperasian *crane* membutuhkan daya yang sangat besar karena sesuai dengan fungsinya yaitu memindahkan beban yang berat dengan cara mengangkatnya dan meletakkannya pada tempat yang diinginkan. *Crane* menggunakan motor AC sebagai penggerakannya sehingga membutuhkan daya listrik untuk mengoperasikannya. Motor AC membutuhkan daya reaktif untuk membangkitkan medan magnet sehingga motor memiliki torsi tertentu yang cukup untuk mengangkat beban berat yang akan dipindahkan. Pada simulasi ini, digunakan motor *crane* jenis motor *hold* pada salah satu pelabuhan di Indonesia. Berikut adalah karakteristik motor pada saat dioperasikan:

**Tabel 3.1** Karakteristik beban *crane*

Parameter	Nilai
Daya Aktif Saat <i>Hoisting</i> (kW)	194
Daya Reaktif Saat <i>Hoisting</i> (kVar)	121
Daya Aktif Saat <i>Lowering</i> (kW)	-72
Daya Reaktif Saat <i>Lowering</i> (kVar)	72
Harmonisa (%)	52,69
<i>Power factor</i> Saat <i>Hoisting</i>	0,84
<i>Power factor</i> Saat <i>Lowering</i>	0,70

Pada tabel 3.1 beban *crane* mengkonsumsi daya aktif sebesar 194 kW dan daya reaktif sebesar 121 kVar pada saat mode operasi *hoisting*. Sebaliknya pada saat operasi *lowering*, beban *crane* mengkonsumsi daya aktif sebesar -72 kW dan 72 kVar. Konsumsi daya pada saat *hoisting* jauh lebih besar dari pada saat *lowering* karena pada saat *hoisting* beban mengkonsumsi daya untuk melakukan kerja sesuai dengan kehendak operator. Pada saat tersebut, beban berat diangkat. Dengan demikian, daya yang dibutuhkan juga sebanding dengan berat beban yang diangkat. Sedangkan pada saat *lowering*, beban diturunkan dan hanya ada proses pengereman atau *regeneratif braking*. Proses ini tidak memakan daya aktif sama sekali, namun menyuplai daya aktif menuju grid dengan nominal yang kecil.

Harmonisa sistem pada kedua mode operasi adalah sama yaitu sebesar 52,69% menunjukkan besarnya kerusakan gelombang arus karena harmonisa yang disebabkan oleh proses *switching* pada beban. *Power factor* sistem pada saat *hoisting* lebih besar yaitu bernilai 0,84 dari pada pada saat *lowering* yang hanya bernilai 0,70 karena pada saat *hoisting* beban *crane* lebih banyak mengkonsumsi daya aktif dari pada daya reaktif sehingga *power factor*-nya lebih tinggi.

### **3.3. Desain Beban Crane**

Beban *crane* dimodelkan dengan menggunakan sumber arus. Terdapat sembilan sumber arus yang disusun secara paralel untuk setiap fasanya. Sumber arus pertama adalah sumber arus dengan frekuensi

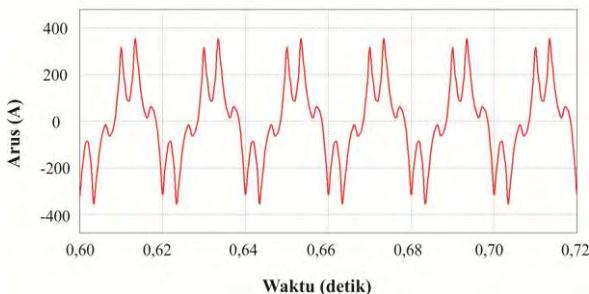
fundamental sedangkan delapan sisanya adalah sumber arus dengan frekuensi harmonisa.

Terdapat dua mode pengoperasian yaitu mode *hoisting* dan *lowering*. Pada saat mode *hoisting*, pemodelan sumber arus adalah dengan cara arah keluaran sumber arus, searah dengan arah arus sumber ke beban sehingga seolah sumber arus adalah beban yang menarik arus dari sumber. Pada saat mode *lowering*, sumber arus dimodelkan dengan cara arah arus keluaran sumber arus dipasang berlawanan dengan arus sumber, karena pada saat mode ini terjadi perubahan arah putaran motor sehingga motor menghasilkan daya dari proses *regeneratif braking*. Dengan demikian, memungkinkan beban dapat menyuplai daya ke sumber.

### 3.3.1. Pemodelan Harmonisa

Baik arus sumber maupun arus beban mengalami distorsi arus akibat dari aktifitas *switching* beban *non-linier*. Harmonisa tersebut mengganggu gelombang utama atau gelombang dengan frekuensi fundamental sebesar 50 Hz. Harmonisa menyebabkan gelombang fundamental menjadi tidak sinus murni melainkan menjadi gelombang sinus yang terdistorsi atau cacat.

Gelombang arus yang berbentuk sinus, terdistorsi oleh frekuensi lain yang juga terdapat pada saluran yang sama. Pada gambar 3.2 dapat dilihat bahwa seolah – olah terdapat dua puncak pada satu kali puncak atas dan begitu pula pada satu kali puncak bawah. Gelombang arus yang terdistorsi ini, terbentuk oleh beberapa frekuensi, yaitu frekuensi fundamnetal dan beberapa frekuensi harmonik. Nilai frekuensi beserta *magnitude*-nya, akan dibahas pada pembahasan selanjutnya.



**Gambar 3.2** Bentuk arus sumber yang terdistorsi oleh harmonisa

Harmonisa yang dihasilkan dari pengoperasian *crane* adalah sebesar 52,69 % pada semua mode pada pemodelan ini. Namun pada saat *hoisting*, nilai harmonisa lebih dari 100%. Nilai harmonisa disama ratakan pada saat *hoisting* maupun *lowering* untuk mempermudah pemodelan. Nilai harmonisa sebesar 52,69% merupakan nilai harmonisa terendah selama pengoperasian *crane* dari detik 0 sampai dengan detik ke 250 sesuai dengan data grafik pada gambar 2.8. Nilai tersebut terjadi pada saat *lowering*. Pada saat mode ini, terjadi *regeneratif braking*, yaitu pengereman pada motor yang sedang menurunkan beban atau muatan dimana pengereman tersebut menghasilkan arus listrik yang mengalir dari motor menuju grid. Jumlah arus listrik yang mengalir tidak lebih besar dari pada jumlah arus listrik yang mengalir pada saat *hoisting* sehingga harmonisa yang dihasilkan pada saat *lowering* lebih kecil dari pada pada saat *hoisting*.

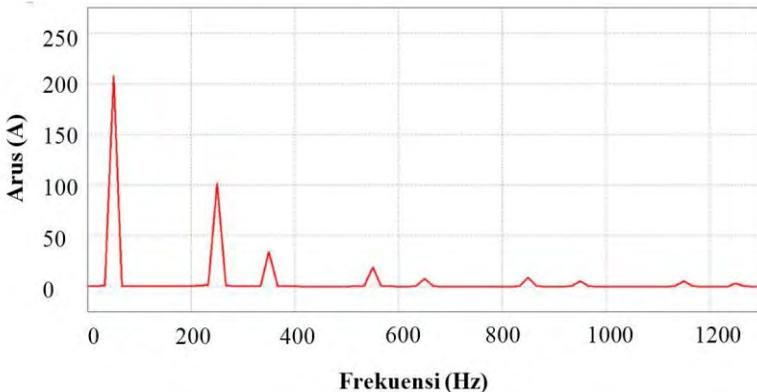
Nilai harmonisa sebesar 52,69% terdiri dari beberapa frekuensi harmonik yang memiliki *magnitude* tertentu. Masing – masing frekuensi harmonik tersebut disebut sebagai dengan *Individual Harmonic Distortion* (IHD). Berikut adalah data orde, frekuensi, dan *magnitude* masing – masing frekuensi harmonik:

**Tabel 3.2** *Individual Harmonic Distortion* (IHD) arus

Orde	Frekuensi (Hz)	<i>Magnitude</i> (%)
5	250	48,87
7	350	16,638
11	550	9,18901
13	650	3,721344
17	850	4,300428
19	950	2,672328
23	1150	2,67019
25	1250	1,624584

Dari tabel 3.2, *magnitude* masing – masing IHD dituliskan dalam bentuk persentase terhadap arus fundamental dimana persentase *magnitude* arus fundamental adalah 100%. Kemudian pemodelan dilanjutkan dengan cara mengatur *magnitude* sesuai dengan data daya yang mengalir pada saluran. Pengaturan dilakukan dengan cara mengalikan persentase *magnitude* tersebut dengan faktor pengali. Faktor pengali bernilai sama pada setiap *magnitude* orde. Nilai faktor pengali dipilih dengan pertimbangan daya yang dihasilkan sesuai dengan data. Penentuan nilai faktor pengali akan dijelaskan pada pembahasan berikutnya tentang pemodelan daya aktif dan daya reaktif.

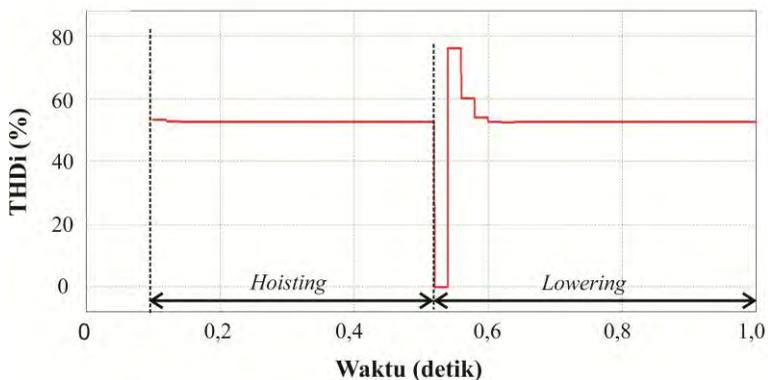
Data pada tabel 3.2 di-*input*-kan pada sumber arus. Masing – masing sumber arus mewakili satu orde. Masing – masing sumber arus dihubungkan secara paralel sehingga nilai arus *output* adalah penjumlahan *magnitude* masing – masing IHD. Penjumlahan arus tersebut akan menghasilkan bentuk gelombang arus seperti gambar 3.2. Untuk melihat hasil *input* data pada tabel 3.2 terhadap masing – masing sumber arus telah tepat, digunakan (*fast fourier transform*) FFT untuk mengubah grafik dari *time domain* menjadi *frequency domain*. Dengan grafik *frequency domain*, dapat dilihat dengan jelas frekuensi – frekuensi yang terdapat pada suatu gelombang arus beserta nilai *magnitude*-nya. Berikut adalah FFT dari pemodelan harmonisa arus sumber:



**Gambar 3.3** FFT arus sumber *crane*

Pada gambar 3.3, *magnitude* arus frekuensi 50 Hz (pada kolom rentang 0 – 200 Hz) merupakan *magnitude* yang paling tinggi. Sedangkan semakin ke kiri (menuju ke frekuensi 1200 Hz) *magnitude* arus semakin rendah. Terlihat pula *magnitude* arus pada frekuensi 250 Hz dan 350 Hz (pada kolom rentang 200 – 400 Hz) memiliki nilai *magnitude* yang cukup besar dan pada frekuensi 250 Hz memiliki *magnitude* hampir setengah dari *magnitude* fundamental. Jika semua *magnitude* tersebut disajikan dalam bentuk persentase dengan *base magnitude* frekuensi fundamental maka akan diperoleh persentase yang sama seperti yang di tunjukkan pada tabel 3.2.

Pada gambar 3.4 dapat dilihat bahwa besarnya nilai harmonisa arus (THDi) pada kedua mode operasi adalah sama yaitu bernilai 52,69%. Pada saat unit diaktifkan dan *crane* bekerja pada mode *hoisting*, nilai harmonisa sedikit lebih besar dari pada 52,69% karena pada saat tersebut terjadi lonjakan arus akibat dari proses starting motor. Kemudian dalam waktu kurang dari 0,1 detik, nilai THDi telah stabil pada nilai 52,69%. Pada detik ke 0,5 terjadi perubahan mode yaitu menjadi mode *lowering* yang mana arah daya aktif terbalik namun arah daya reaktif tetap. Pada detik tersebut, nilai THDi turun drastis hingga mendekati nilai nol dan melonjak naik hingga melebihi nilai 52,69%. Setelah beberapa saat, nilai harmonisa menjadi stabil pada nilai 52,69% hingga proses *lowering* selesai.



**Gambar 3.4** Nilai THDi sumber dalam dua mode operasi

Pada pemodelan IHD, diperlukan penyesuaian sudut fasa ( $\Delta\phi$ ). Pada arus fundamental fasa a, sudut fasa sebesar nol derajat. Untuk semua IHD pada fasa a, sudut fasanya adalah sebesar nol derajat. Pada arus fundamental fasa b dan c masing – masing memiliki sudut fasa sebesar 240 dan 120 derajat. Untuk sudut fasa IHD pada masing – masing fasa tersebut diperlukan penyesuaian dengan rumus sebagai berikut:

$$\Delta\phi = \left( \frac{c \times 20 \times n \times 50}{1000} \right) \text{Mod } 360 \quad (3.1)$$

Keterangan:

- $\Delta\phi$  = besar sudut penyesuaian (derajat)  
 $c$  = sudut fasa fundamental (derajat)  
 $n$  = orde harmonisa

Digunakan operasi matematika modulo karena sinyal sinusoidal bersifat bolak – balik sehingga berapapun besar sudut yang dihasilkan, nilainya akan setara dengan sudut awal. Hanya saja semakin besar sudut, maka semakin banyak jumlah gelombang dalam satu waktu. Hasil dari perhitungan diatas dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 3.3** Sudut fasa setiap IHD

Orde	$\Delta\phi$ (°)		
	Fasa a	Fasa b	Fasa c
1	0	240	120
5	0	120	240
7	0	240	120
11	0	120	240
13	0	240	120
17	0	120	240
19	0	240	120
23	0	120	240
25	0	240	120

Tabel 3.3 merupakan tabel yang menunjukkan hasil secara keseluruhan dari perhitungan penyesuaian fasa menggunakan persamaan 3.1. Semua IHD pada fasa a bernilai 0 semua, karena sudut fundamental fasa a bernilai 0, sehingga berapapun nilai IHD-nya maka penyesuaian fasanya tetap 0. Penyesuaian sudut fasa pada IHD fasa b adalah 240 untuk orde fundamental dan 120 untuk orde 5. Begitu pula seterusnya. Penyesuaian sudut fasa pada IHD fasa c adalah 120 untuk orde fundamental dan 240 untuk orde 5, berkebalikan dengan fasa b. Begitu pula seterusnya

### 3.3.2. Pemodelan Daya Aktif dan Daya Reaktif

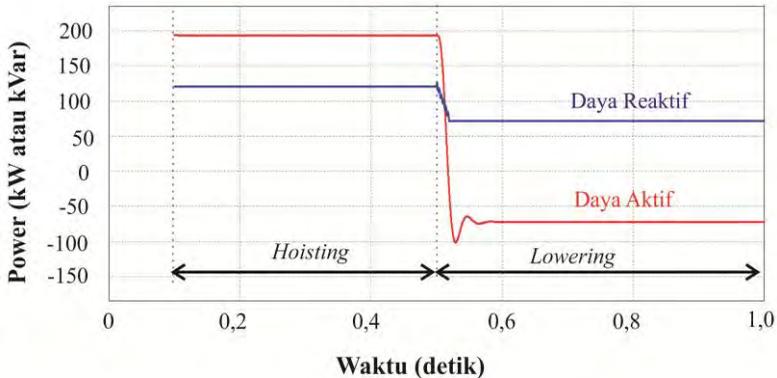
Dalam pengoperasian motor baik motor *crane* atau motor pada aplikasi lain, diperlukan daya aktif dan daya reaktif. Pengoperasian *crane* membutuhkan daya aktif sebesar 194 kW dan daya reaktif sebesar 121 kVar saat *hoisting*. Pada saat *lowering* pengoperasiannya membutuhkan daya aktif sebesar -72 kW dan mengkonsumsi daya reaktif sebesar 72 kVar.

Pemodelan daya aktif dilakukan dengan cara mengalikan persentase *magnitude* masing – masing IHD dengan faktor pengali tertentu hingga diperoleh *output* daya yang sesuai dengan daya yang dibutuhkan pada masing – masing mode operasi. Berbeda dengan daya reaktif, pemodelan dilakukan dengan cara menggeser fasa masing – masing IHD karena pergeseran fasa menghasilkan efek daya reaktif. Pemodelan daya aktif dan reaktif saling berhubungan sehingga diperlukan parameter yang tepat untuk pemodelan kedua daya tersebut. Berikut adalah tabel parameter faktor pengali dan pergeseran fasa pada pemodelan beban:

**Tabel 3.4** Parameter pemodelan beban pada *crane*

Mode Operasi			
<i>Hoisting</i>		<i>Lowering</i>	
Faktor Pengali <i>Magnitude</i>	Pergeseran Fasa	Faktor Pengali <i>Magnitude</i>	Pergeseran Fasa
2,7	-2	1,2	75

Parameter pada gambar 3.4 diperoleh dari hasil *trial and error* hingga daya *output* baik daya aktif maupun daya reaktif yang diperlukan tercapai. Ketika pergeseran fasa masih dalam keadaan nol, *magnitude* arus di-*setting* hingga nominal daya aktif yang diperlukan tercapai, namun daya reaktif masih dalam keadaan nol. Setelah itu, menentukan nilai daya reaktif dengan cara menggeser sudut fasa. Penggeseran sudut fasa ini, menghasilkan daya reaktif namun nilai daya aktif yang telah di-*setting* sesuai dengan nominalnya berubah. Keadaan ini membuktikan bahwa *setting* antara daya aktif dengan daya reaktif saling terkait sehingga tidak dapat di-*setting* secara terpisah. Setelah parameter yang diperoleh di atas dimasukkan pada pemodelan, dihasilkan nilai daya aktif dan daya reaktif seperti pada gambar dibawah ini:

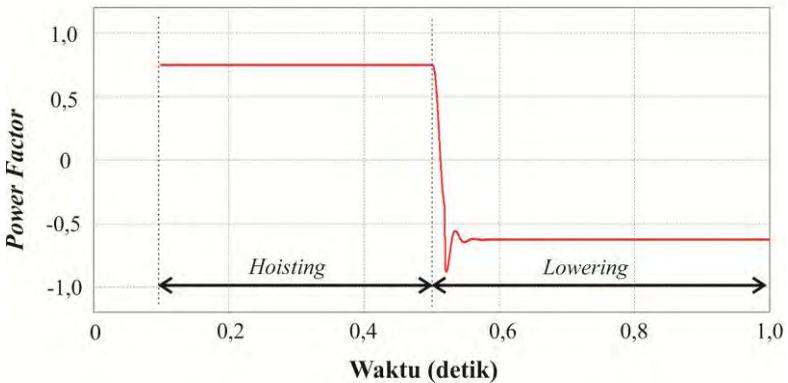


**Gambar 3.5** Daya aktif dan daya reaktif yang diserap *crane*

Pada gambar 3.5, daya aktif pada saat *hoisting* bernilai lebih besar dari pada daya reaktifnya yaitu sebesar 194 kW dan 121 kVar. Pada detik ke 0,5 atau pada saat peralihan dari *hoisting* menuju *lowering*, terjadi penurunan daya aktif sangat drastis. Pada detik tersebut, daya reaktif juga mengalami penurunan, namun tidak sebesar daya aktif. Daya aktif turun hingga nilainya menjadi negatif sedangkan daya reaktif turun, namun tetap bernilai positif. Penurunan daya aktif dengan sangat curam, mengakibatkan *overshoot* dan osilasi sesaat dan kemudian *steady state* pada nilai -72 kW. Daya reaktif mengalami kondisi *steady state* pada nilai 72 kVar. Penurunan daya aktif hingga bernilai negatif, menyebabkan daya

aktif pernah menyentuh nilai nol. Pada saat tersebut, dapat dikatakan bahwa beban sedang bekerja pada kondisi beban reaktif 100% atau murni induktif yang sangat dihindari karena memiliki nilai *power factor* paling rendah yaitu bernilai nol.

Dengan nilai daya aktif dan daya reaktif pada gambar 3.5, dapat diketahui besarnya nilai *power factor* kedua mode operasi tersebut. Pada saat mode operasi *hoisting*, nilai *power factor*-nya adalah sebesar 0,8485. Sedangkan pada saat mode operasi *lowering* nilai *power factor*-nya sebesar 0,7071. *Power factor* kedua mode tersebut ditunjukkan pada gambar 3.6.



**Gambar 3.6** *Power factor* pada pengoperasian crane

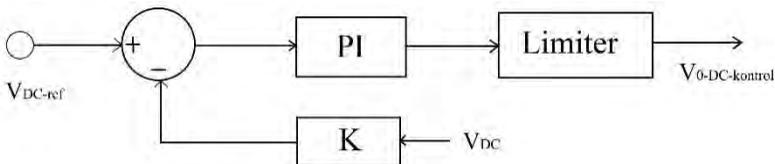
Gambar 3.6 menunjukkan bahwa *power factor* pada saat *hoisting* lebih tinggi dari pada *power factor* pada saat *lowering*. Pada saat *hoisting*, nilai *power factor* bernilai positif, kemudian nilai *power factor* turun drastis pada detik ke 0,5 menuju nol dan terus berkurang hingga bernilai negatif. Nilai *power factor* bernilai negatif pada saat mode *lowering* karena daya aktif berkebalikan arah dengan seharusnya. Pada saat *power factor* bernilai nol, menunjukkan bahwa sistem pernah mengalami kondisi bahwa beban 100% atau murni reaktif yang mana sangat dihindari karena dapat mengakibatkan *pinalty* oleh penyedia jasa listrik.

### 3.3.3. Kontrol PI Untuk Pengaturan Tegangan DC ( $V_{DC}$ )

Pengaturan tegangan DC ( $V_{DC}$ ) dilakukan dengan tiga tahap. Tahap pertama adalah mengontrol  $V_{DC}$  dengan menggunakan *kontroller* PI. Kemudian tahap kedua, *output* dari *kontroller* PI dikalikan dengan sinyal sinus. Tahap ketiga adalah *output* dari perkalian tersebut, dijumlahkan dengan *output kontroller* lainnya dalam proses *hybrid*.

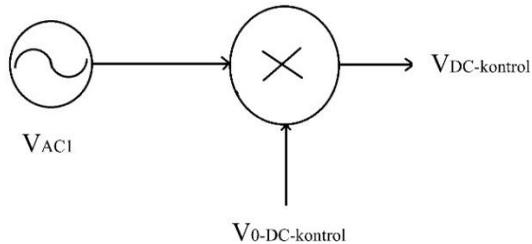
Pada gambar 3.7 terdapat tiga blok yaitu blok *Proportional* (K), *Proportional Integral* (PI), dan Limiter. Blok K digunakan untuk menurunkan  $V_{DC}$  dari sinyal aslinya. Sedangkan blok PI atau kontrol PI digunakan untuk memperkecil sinyal *error* agar sistem dapat mencapai *steady state*. Blok limiter digunakan untuk membatasi sinyal *output* PI jika sinyal yang keluar merupakan sinyal yang divergen. Limiter juga dapat mengontrol *output* dari alat yang dikontrol jika *output* harapan berbeda dengan tegangan referensi.

Gambar 3.7 merupakan skema kontrol  $V_{DC}$  tahap pertama yaitu skema kontrol PI. Digunakan  $V_{DC-ref}$  sebagai referensi nilai  $V_{DC}$  yang akan digunakan sebagai standar. Nilai dari  $V_{DC-ref}$  akan dikurangkan dengan nilai  $V_{DC}$  yang telah dikalikan dengan blok K. Blok K berfungsi sebagai pembagi nilai  $V_{DC}$  agar nilainya menjadi lebih kecil dan dapat digunakan sebagai pengurang nilai  $V_{DC-ref}$ . Hasil pengurangan tersebut akan menghasilkan sinyal *error*. Sinyal *error* akan memasuki *kontroller* PI. *Kontroller* PI akan menghasilkan sinyal yang dapat membuat sinyal *error* menjadi lebih kecil. Sebelumnya, sinyal *output* dari *kontroller* PI akan dibatasi oleh limiter agar sesuai dengan harapan. *Output* limiter menghasilkan sinyal  $V_{0-DC-kontrol}$  yang selanjutnya akan digunakan sebagai input untuk tahap berikutnya yaitu tahap kedua.



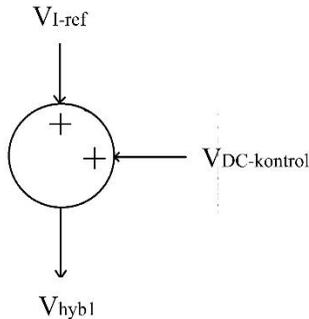
**Gambar 3.7** Skema kontrol  $V_{DC}$  tahap pertama

Gambar 3.8 adalah kontrol  $V_{DC}$  tahap kedua yaitu mengalikan *output* dari *kontroller* PI dengan sinyal sinus ( $V_{AC1}$ ). Sinyal  $V_{AC1}$  yang digunakan adalah sinyal sinus yang memiliki sudut pergeseran fasa sebesar nol derajat dan frekuensi fundamental. Frekuensi fundamental yang digunakan adalah frekuensi 50 Hz. Sinyal ini kemudian dikalikan dengan *output* dari *kontroller* PI ( $V_{0-DC-kontrol}$ ). Bentuk gelombang dari  $V_{0-DC-kontrol}$  adalah berupa tegangan DC yang memiliki *ripple*. Sehingga perkalian yang akan terjadi adalah perkalian antara tegangan DC yang memiliki *ripple* dan tegangan AC sinusoidal murni. Sinyal *output* hasil perkalian tersebut ( $V_{DC-kontrol}$ ) akan dijumlahkan dengan *output* sinyal kontrol lainnya dalam sistem *hybrid*.



**Gambar 3.8** Skema kontrol  $V_{DC}$  tahap kedua

Gambar 3.9 merupakan kontrol  $V_{DC}$  tahap terakhir atau tahap ketiga. Tahap ini merupakan bagian dari skema sistem *hybrid*. *Output* dari kontrol  $V_{DC}$  ( $V_{DC-kontrol}$ ) masuk ke dalam sistem *hybrid* untuk dijumlahkan oleh sinyal kontrol lainnya. Terdapat dua input yaitu  $V_{DC-kontrol}$  dan  $V_{I-ref}$ . Sinyal  $V_{I-ref}$  diperoleh dari pembangkitan arus referensi yang akan dibahas pada pembahasan selanjutnya. *Output* dari penjumlahan kedua sinyal ( $V_{hyb1}$ ) ini akan dijumlahkan dengan sinyal kontrol lainnya.

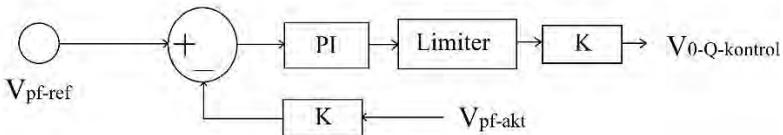


**Gambar 3.9** Skema kontrol  $V_{DC}$  tahap ketiga

### 3.3.4. Kontrol PI Untuk Pengaturan Daya Reaktif ( $V_{Q-kontrol}$ )

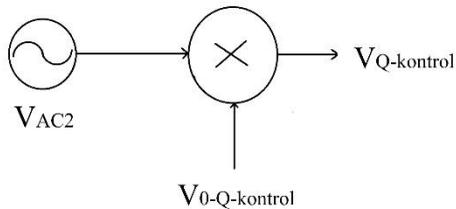
Pengaturan daya reaktif ( $V_{Q-kontrol}$ ) dilakukan dengan tiga tahap. Tahap pertama adalah mengontrol  $V_{Q-kontrol}$  dengan menggunakan *kontroller* PI. Kemudian tahap kedua, *output* dari *kontroller* PI dikalikan dengan sinyal sinus. Tahap ketiga adalah *output* dari perkalian tersebut, dijumlahkan dengan *output kontroller* lainnya dalam proses *hybrid*.

Pada gambar 3.10 terdapat empat blok yaitu blok *Proportional* (K), *Proportional Integral* (PI), Limiter, dan blok *Proportional* (K). Blok K hanya digunakan untuk melewati sinyal  $V_{pf-akt}$  karena nilai gain K adalah bernilai 1. Sedangkan blok PI atau kontrol PI digunakan untuk memperkecil sinyal *error* agar sistem dapat mencapai *steady state*. Blok limiter digunakan untuk membatasi sinyal *output* PI jika sinyal yang keluar merupakan sinyal yang divergen. Limiter juga dapat mengontrol *output* dari alat yang dikontrol jika *output* harapan berbeda dengan tegangan referensi. Blok *Proportional* (K) setelah limiter digunakan sebagai pembalik sinyal kontrol yang keluar dari limiter. Blok ini memiliki gain -1.



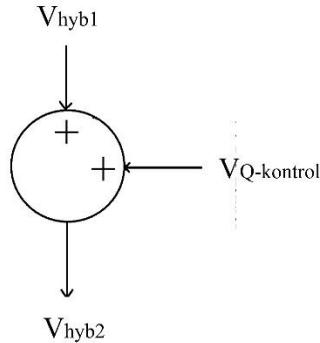
**Gambar 3.10** Skema kontrol  $V_{Q-kontrol}$  tahap pertama

Gambar 3.10 merupakan skema kontrol  $V_{Q\text{-kontrol}}$  tahap pertama yaitu skema kontrol PI. Digunakan  $V_{\text{pf-ref}}$  sebagai referensi nilai *power factor* yang akan digunakan sebagai standar. Nilai dari  $V_{\text{pf-ref}}$  akan dikurangkan dengan nilai  $V_{\text{pf-akt}}$  yang telah dilewatkan oleh blok K. Tidak ada perbedaan nilai  $V_{\text{pf-akt}}$  sebelum dan setelah melewati blok K. Hasil pengurangan tersebut akan menghasilkan sinyal error. Sinyal error akan memasuki *kontroller* PI. *Kontroller* PI akan menghasilkan sinyal yang dapat membuat sinyal error menjadi lebih kecil. Sebelumnya, sinyal *output* dari *kontroller* PI akan dibatasi oleh limiter agar sesuai dengan harapan. *Output* limiter menghasilkan sinyal  $V_{0\text{-}Q\text{-kontrol}}$  yang selanjutnya akan digunakan sebagai input untuk tahap berikutnya yaitu tahap kedua.



**Gambar 3.11** Skema kontrol  $V_{Q\text{-kontrol}}$  tahap kedua

Gambar 3.11 adalah kontrol  $V_{Q\text{-kontrol}}$  tahap kedua yaitu mengalikan *output* dari *kontroller* PI dengan sinyal sinus ( $V_{AC2}$ ). Sinyal  $V_{AC2}$  yang digunakan adalah sinyal sinus yang memiliki sudut pergeseran fasa sebesar  $-90$  derajat dan frekuensi fundamental. Sudut  $-90$  derajat dipilih karena pengaturan ini bersifat reaktif. Frekuensi fundamental yang digunakan adalah frekuensi 50 Hz. Sinyal ini kemudian dikalikan dengan *output* dari *kontroller* PI ( $V_{0\text{-}Q\text{-kontrol}}$ ). Bentuk gelombang dari  $V_{0\text{-}Q\text{-kontrol}}$  adalah berupa tegangan DC tanpa *ripple* pada kondisi *steady state*. Sehingga perkalian yang akan terjadi adalah perkalian antara tegangan DC tanpa *ripple* pada kondisi *steady state* dan tegangan AC sinusoidal murni. Sinyal *output* hasil perkalian tersebut ( $V_{Q\text{-kontrol}}$ ) akan dijumlahkan dengan *output* sinyal kontrol lainnya dalam sistem *hybrid*.



**Gambar 3.12** Skema kontrol  $V_{Q\text{-kontrol}}$  tahap ketiga

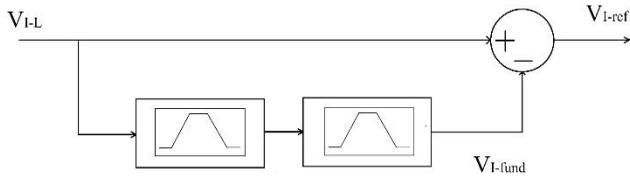
Gambar 3.12 merupakan kontrol  $V_{Q\text{-kontrol}}$  tahap terakhir atau tahap ketiga. Tahap ini merupakan bagian dari skema sistem *hybrid*. *Output* dari kontrol daya reaktif ( $V_{Q\text{-kontrol}}$ ) masuk ke dalam sistem *hybrid* untuk dijumlahkan oleh sinyal kontrol lainnya. Terdapat dua input yaitu  $V_{Q\text{-kontrol}}$  dan  $V_{hyb1}$ . Sinyal  $V_{hyb1}$  diperoleh dari penjumlahan sinyal kontrol sebelumnya yaitu sinyal kontrol  $V_{I\text{-ref}}$  ditambah dengan  $V_{DC\text{-kontrol}}$ . Hasil *output* sinyal penjumlahan antara  $V_{Q\text{-kontrol}}$  dan  $V_{hyb1}$  akan menghasilkan sinyal  $V_{hyb2}$  yang akan dikurangkan dengan  $V_{I\text{-inv}}$  untuk mendapatkan sinyal error ( $\epsilon_{hyb}$ ).

Sinyal  $\epsilon_{hyb}$  akan di-*input*-kan ke dalam *kontroller* PI sehingga sinyal  $\epsilon_{hyb}$  akan semakin kecil. *Output* PI ( $V_{pi}$ ) akan memasuki modulator. Modulator akan membentuk sinyal yang akan membuat *output* inverter sesuai dengan harapan.

### 3.4. Desain Arus Referensi *Shunt Active Power Filter*

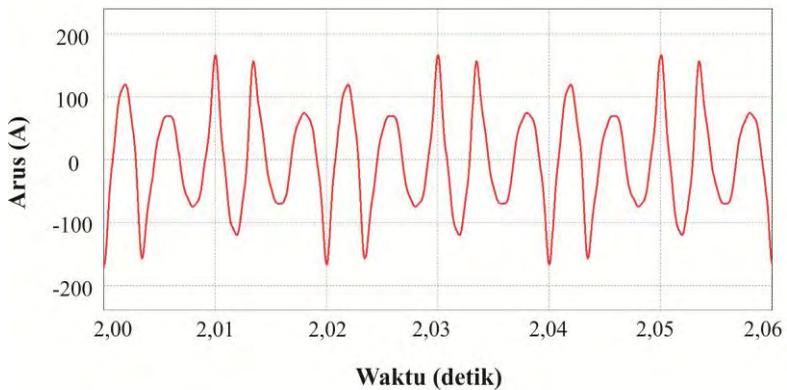
*Shunt Active Power Filter* membutuhkan arus referensi untuk mengeliminasi harmonisa. Arus referensi diperoleh dari *sensing* arus *load* secara langsung [3]. Pada gambar 3.13, arus *load* mengandung sinyal fundamental dan sinyal harmonisa. Sinyal tersebut dimasukkan ke dalam *bandpass filter* untuk mendapatkan arus fundamental murni. Arus *load* dikurangkan dengan arus fundamental murni akan menghasilkan arus

harmonik murni. Arus inilah yang digunakan sebagai arus referensi *Shunt Active Power Filter*.



**Gambar 3.13** Desain Arus Referensi

Gambar 3.14 merupakan arus referensi dari *Shunt Active Power Filter* yang akan dimasukkan dalam sistem *hybrid*. Sinyal ini merupakan sinyal harmonik murni yang akan digunakan untuk mengeliminasi sinyal harmonik pada rangkaian. Sinyal ini memiliki orde dan *amplitude* yang hampir sama dengan sinyal harmonik pada sistem.



**Gambar 3.14** Arus Referensi *Shunt Active Power Filter*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

#### 4.1. Proses Simulasi

Pengoperasian *crane* akan dimodelkan dalam bentuk simulasi. *Crane* akan bekerja dengan dua mode yaitu mode *hoisting* dan mode *lowering*. Mode *hoisting* adalah mode saat *crane* mengangkat beban sedangkan mode *lowering* adalah saat *crane* menurunkan beban. Mode *hoisting* akan disimulasikan selama satu detik sedangkan mode *lowering* akan disimulasikan selama 1,5 detik sehingga total simulasi adalah 2,5 detik. Data yang dicari adalah data daya aktif dan daya reaktif, harmonisa pada saluran sumber, dan *power factor* pada saluran sumber.

#### 4.2. Operasi Crane Dengan *Shunt Active Power Filter*

Berikut akan dibahas pengaplikasian *Active Power Filter* sebagai eliminitor harmonik dan kompensator daya reaktif. Rating *Active Power Filter* ditentukan oleh beberapa parameter yaitu  $C_{DC}$ ,  $V_{DC}$ , dan L. Nilai  $C_{DC}$  ditentukan sesuai dengan persamaan yang ada pada ref[9]:

$$C_{DC} = \frac{(\pi I_{1, rated})}{(\sqrt{3}\omega V_{DC \text{ peak-peak}})} \quad (4.1)$$

Keterangan:

$C_{DC}$	= Kapasitor (F)
$I_{1, rated}$	= Arus fundamental (A)
$\omega$	= frekuensi sudut (rad/s)
$V_{DC \text{ peak-peak}}$	= <i>ripple</i> DC pada $V_{DC}$ (V)

Sedangkan  $V_{DC}$  diperoleh dari persamaan yang ada pada ref[10]:

$$V_{inv} = m_a \sqrt{3} \frac{V_{dc}}{2} \quad 0 < m_a \leq 1 \quad (4.2)$$

Sehingga  $V_{DC}$  dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{inv} \frac{2}{m_a \sqrt{3}} = V_{DC} \quad (4.3)$$

Dapat ditulis sebagai:

$$V_{DC} = \frac{2}{m_a \sqrt{3}} V_{inv} \quad (4.4)$$

Keterangan:

$V_{DC}$  = Tegangan DC pada  $V_{DC}$  (V)

$m_a$  = Rasio *magnitude* antara frekuensi kontrol dan frekuensi karier

$V_{inv}$  = Tegangan Inverter (V)

Nilai L diperoleh dari persamaan yang ada pada ref[11]:

$$\tau = \frac{3V_{\phi inv} V_{\phi grid}}{\omega L} \sin \delta \quad (4.5)$$

Perkalian antara  $\tau$  dengan  $\omega$  menghasilkan daya aktif (P) sehingga dapat ditulis sebagai:

$$P = \frac{3V_{\phi inv} V_{\phi grid}}{L} \sin \delta \quad (4.6)$$

Dengan demikian, nilai L dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$L = \frac{3V_{\phi inv} V_{\phi grid}}{P} \sin \delta \quad (4.7)$$

Keterangan:

$\tau$  = Torsi elektrik (Nm)

$V_{\phi inv}$  = Tegangan inverter *line-to-neutral* (V)

$V_{\phi grid}$  = Tegangan grid *line-to-neutral* (V)

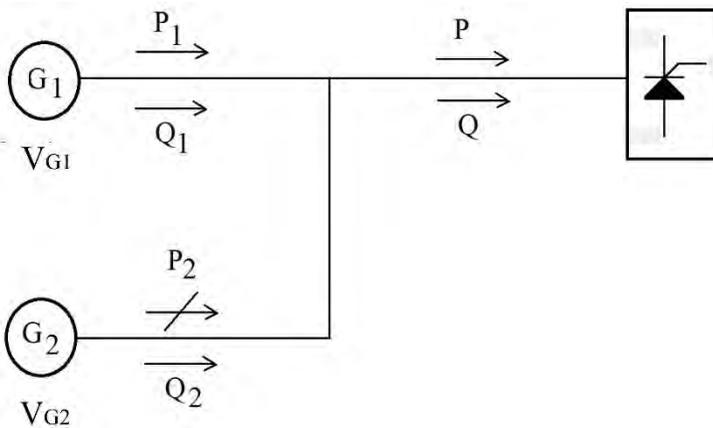
- $\sin \delta$  = Sudut antara  $V_{\phi_{inv}}$  dengan  $V_{\phi_{grid}}$   
 $\omega$  = Frekuensi sudut (rad/s)  
 $L$  = Induktor (H)  
 $P$  = Daya aktif (Watt)

Nilai  $L$  sangat sulit dicari sehingga nilai  $L$  ditentukan terlebih dahulu [12]. Disisi grid, tegangan RMS *line-to-line* sebesar 400 V sedangkan disisi tegangan *Active Power Filter* adalah  $V_{inv}$  dengan perhitungan tersendiri yang akan dibahas pada ulasan berikutnya.

#### 4.2.1. Daya Aktif dan Reaktif

Setelah pemasangan *Shunt Active Power Filter*, nilai daya aktif cenderung tetap sedangkan nilai daya reaktif berkurang. Hal ini karena ada daya reaktif yang ditambahkan dari *Shunt Active Power Filter* ke grid sehingga sumber tenaga tidak perlu mengeluarkan daya reaktif yang sangat besar. Terdapat dua mode operasi yaitu *hoisting* dan *lowering* yang akan dijelaskan secara terpisah proses kompensasi daya reaktif masing – masing mode tersebut.

Perbandingan antara daya aktif dan daya reaktif mempengaruhi nilai *power factor*. Pada saat *Shunt Active Power Filter* terpasang pada saluran, nilai daya aktif pada saluran cenderung tetap karena kebutuhan daya aktif sesuai dengan kebutuhan daya yang akan dikonversi untuk melakukan kerja atau gerak dengan kecepatan tertentu pada kondisi tertentu pula. Sedangkan daya reaktif cenderung berubah dengan signifikan karena daya reaktif timbul karena perbedaan sudut antara tegangan dengan arus. *Shunt Active Power Filter* sepenuhnya memberikan daya reaktif pada saluran, sehingga kebutuhan daya reaktif yang besar dan cenderung konstan oleh motor dapat di suplai dari dua sumber, yaitu dari *Shunt Active Power Filter* dan dari grid. Dengan penambahan *Shunt Active Power Filter* pada saluran yang dapat menyuplai daya reaktif, beban grid untuk menyuplai daya reaktif berkurang. Keadaan ini dapat diilustrasikan sebagai *paralleling generator* seperti pada gambar berikut:



**Gambar 4.1** Ilustrasi *paralleling generator*

Pada gambar 4.1, Generator 1 ( $G_1$ ) sebagai grid, menyuplai daya aktif ( $P_1$ ) dan daya reaktif ( $Q_1$ ). Begitu pula dengan generator 2 ( $G_2$ ). Generator 2 menyuplai daya reaktif ( $Q_2$ ) namun tidak menyuplai daya aktif ( $P_2$ ). Generator 2 sebagai *Shunt Active Power Filter*, tidak menyuplai daya aktif namun hanya menyuplai daya reaktif karena digunakan untuk memperbaiki *power factor* dari saluran. Nilai daya  $P$  merupakan hasil penjumlahan antara daya aktif generator 1 ( $P_1$ ) dengan daya aktif generator 2 ( $P_2$ ). Karena nilai  $P_2$  bernilai 0, maka nilai  $P$  merupakan nilai  $P_1$ . Nilai  $Q$  merupakan penjumlahan antara daya reaktif dari generator 1 ( $Q_1$ ) ditambah dengan daya reaktif dari generator 2 ( $Q_2$ ). Nilai  $P$  dan  $Q$  bersifat konstan sesuai dengan kondisi beban. Dengan demikian, nilai  $Q_1$  yang harus disuplai oleh generator 1 menjadi lebih rendah karena nilai  $Q$  mendapat tambahan dari  $Q_2$ . Dengan demikian, perbandingan antara  $Q_1$  dengan  $P_1$  menjadi sangat kecil dan nilai *power factor* meningkat. Untuk mencari nilai *power factor*, dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\text{power factor}_1 = \cos\left(\arctan \frac{Q_1}{P_1}\right) \quad (4.8)$$

Keterangan:

$power\ factor_1$  = *Power factor* pada generator 1 atau grid

$Q_1$  = Daya reaktif pada saluran generator 1 atau grid (V)

$P_1$  = Daya aktif pada saluran generator 1 atau grid (V)

#### 4.2.1.1. *Daya Aktif dan Reaktif Pada saat Hoisting*

Pada saat *hoisting*, beban menyerap daya aktif dan daya reaktif. Pada gambar 2.6, grafik menunjukkan nilai daya aktif lebih besar dari pada daya reaktif. Nilai daya aktif dan reaktif pada saat *hoisting* sebelum pemasangan *Shunt Active Power Filter* adalah sebagai berikut:

$$P_{oh} = 194\ kW$$

$$Q_{oh} = 121\ kVar$$

Keterangan:

$P_{oh}$  = daya aktif saat *hoisting* sebelum pemasangan filter (kW)

$Q_{oh}$  = daya reaktif saat *hoisting* sebelum pemasangan filter (kVar)

Sedangkan nilai daya aktif dan reaktif pada saat *hoisting* setelah pemasangan *Shunt Active Power Filter* adalah sebagai berikut:

$$P_h = 194\ kW$$

$$Q_h = 48,62\ kVar$$

Keterangan:

$P_h$  = daya aktif saat *hoisting* setelah pemasangan filter (kW)

$Q_h$  = daya reaktif saat *hoisting* setelah pemasangan filter (kVar)

Dapat dilihat bahwa tidak ada perubahan pada nilai daya aktif, yaitu sebesar 194 kW, sedangkan nilai daya reaktif mengalami perubahan cukup signifikan yaitu sebesar 72,4 kVar. Berikut adalah perhitungannya:

$$\begin{aligned}\Delta P_h &= P_{oh} - P_h \\ &= 194 - 194 \\ &= 0\ kW\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta Q_h &= Q_{oh} - Q_h \\ &= 121 - 48,62 \\ &= 72,4 \text{ kVar}\end{aligned}$$

Keterangan:

$\Delta P_h$  = selisih daya aktif saat *hoisting* sebelum dan setelah pemasangan filter (kW)

$\Delta Q_h$  = selisih daya reaktif saat *hoisting* sebelum dan setelah pemasangan filter (kVar)

Nilai  $\Delta P_h$  menunjukkan nilai 0 kW dan nilai  $\Delta Q_h$  menunjukkan nilai 72,4 kVar. Hal ini menunjukkan bahwa *Shunt Active Power Filter* hanya menghasilkan nilai daya reaktif murni. Daya reaktif ini, digunakan untuk mengurangi nilai daya reaktif pada saluran sumber sehingga berpengaruh pada nilai *power factor* saluran sumber. Perhitungan nilai *power factor* akan dibahas pada sub bab *power factor*.

#### 4.2.1.2. Daya Aktif dan Reaktif Pada saat Lowering

Pada saat *lowering*, beban menyuplai daya aktif dan menyerap daya reaktif dari grid. Pada gambar 2.6, grafik menunjukkan nilai daya aktif sama besar dari daya reaktif namun berbeda tanda. Perbedaan tanda ini menunjukkan bahwa aliran daya aktif yang terbalik. Hal tersebut disebabkan oleh adanya aktifitas pengereman pada saat penurunan beban. Teknik pengereman dengan menggunakan konsep *regeneratif braking*, dapat menghasilkan arus listrik. Dapat dikatakan bahwa motor telah berubah mejadi generator pada proses ini. Nilai daya aktif dan reaktif pada saat *lowering* sebelum pemasangan *Shunt Active Power Filter* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}P_{ol} &= -72 \text{ kW} \\ Q_{ol} &= 72 \text{ kVar}\end{aligned}$$

Keterangan:

$P_{ol}$  = daya aktif saat *lowering* sebelum pemasangan filter (kW)

$Q_{ol}$  = daya reaktif saat *lowering* sebelum pemasangan filter (kVar)

Sedangkan nilai daya aktif dan reaktif pada saat *lowering* setelah pemasangan *Shunt Active Power Filter* adalah sebagai berikut:

$$P_1 = -72 \text{ kW}$$

$$Q_1 = 43 \times 10^{-3} \text{ kVar}$$

Keterangan:

$P_1$  = daya aktif saat *lowering* setelah pemasangan filter (kW)

$Q_1$  = daya reaktif saat *lowering* setelah pemasangan filter (kVar)

Dapat dilihat bahwa tidak ada perubahan pada nilai daya aktif, yaitu sebesar 194 kW, sedangkan nilai daya reaktif mengalami perubahan cukup signifikan yaitu sebesar 72,4 kVar. Berikut adalah perhitungannya:

$$\begin{aligned}\Delta P_1 &= P_{o1} - P_1 \\ &= -72 - (-72) \\ &= 0 \text{ kW}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta Q_1 &= Q_{o1} - Q_1 \\ &= 72 - 43 \times 10^{-3} \\ &= 71,95 \text{ kVar}\end{aligned}$$

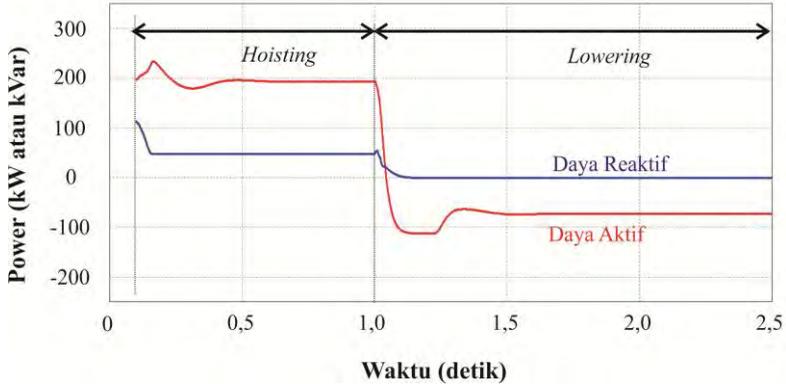
Keterangan:

$\Delta P_1$  = selisih daya aktif saat *lowering* sebelum dan setelah pemasangan filter (kW)

$\Delta Q_1$  = selisih daya reaktif saat *lowering* sebelum dan setelah pemasangan filter (kVar)

Nilai  $\Delta P_1$  menunjukkan nilai 0 kW dan nilai  $\Delta Q_1$  menunjukkan nilai 71,95 kVar. Hal ini menunjukkan bahwa *Shunt Active Power Filter* hanya menghasilkan nilai daya reaktif murni. Daya reaktif ini, digunakan untuk mengurangi nilai daya reaktif pada saluran sumber sehingga berpengaruh pada nilai *power factor* saluran sumber. Keadaan ini memiliki sifat yang sama pada saat mode *hoisting*, yaitu *Shunt Active Power Filter* hanya menghasilkan daya reaktif untuk memperbaiki *power factor*. Perhitungan nilai *power factor* akan dibahas pada sub bab *power*

factor. Berikut adalah gambar grafik daya aktif dan daya reaktif pada saluran sumber pada saat *hoisting* dan *lowering*:



**Gambar 4.2** Daya aktif dan daya reaktif setelah pemasangan filter

Pada gambar 4.2, daya aktif mengalami ketidakstabilan pada saat awal *hoisting*. Hal ini disebabkan oleh beberapa sebab. Diantaranya adalah arus awal atau arus *start* motor yang besar yang mengakibatkan ketidakstabilan daya pada waktu awal beroperasi. Selain itu, aktifitas dari *kontroller* juga mempengaruhi ketidakstabilan dari daya aktif tersebut. Setiap kontrol, memiliki *overshoot* dan osilasi tertentu. Keduanya jika ditambahkan dengan arus *start* motor, akan menambah pola tidak menentu sebelum sistem menjadi stabil. Hal ini juga dialami oleh daya reaktif pada saat awal beroperasi yaitu pada saat *hoisting*. Daya aktif mengalami *steady state* pada nilai 194 kW atau dengan nilai daya aktif yang tetap seperti sebelum pemasangan filter. Gangguan nilai daya reaktif tidak sebanyak gangguan nilai pada daya aktif karena daya reaktif langsung mendapatkan suplai dari dua sumber yaitu dari grid dan dari *Shunt Active Power Filter* sehingga nilainya lebih stabil. Daya reaktif mencapai *steady state* pada nilai 48,62 kVar.

Pada detik ke 1,0 terjadi perubahan mode operasi dari operasi *hoisting* menjadi operasi *lowering*. Perubahan ini menyebabkan nilai daya aktif berkurang secara drastis menuju nilai negatif sedangkan daya reaktif

hanya berkurang sedikit, tidak sebesar daya aktif. Daya aktif berubah arah dari semula mengalir menuju beban kemudian berbalik arah mengalir menuju grid. Hal tersebut terjadi karena proses pengereman yang dapat menghasilkan daya listrik sehingga motor berubah fungsi menjadi sebuah generator (*regeneratif braking*). Nilai daya aktif yang masuk kembali ke grid tidak sebesar nilai daya aktif yang diberikan grid pada saat menjalankan motor. Daya aktif mengalami gangguan nilai sesaat setelah perubahan mode karena penyesuaian nilai oleh kontrol yang digunakan. Kemudian nilai daya aktif mengalami *steady state* pada nilai -72 kW. Daya reaktif hanya sedikit mengalami gangguan. Hal ini karena daya reaktif mendapatkan suplai dari dua sumber yaitu dari grid dan dari *Shunt Active Power Filter* sehingga lebih stabil. Nilai daya reaktif mengalami *steady state* pada nilai 72 kVar.

#### 4.2.2. Tegangan $V_{DC}$ dan Arus Grid

Untuk menjaga agar operasi inverter tetap *linier*, maka nilai  $m_a$  berada pada rentang 0 sampai dengan 1. Agar arus  $I_{inv}$  dapat mengalir dari inverter menuju ke grid, maka tegangan pada  $V_{inv}$  harus lebih besar dari pada tegangan pada  $V_{grid}$ . Sesuai dengan teorema *Kirchoff Voltage Law* (KVL), dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_{inv} = V_{grid} + V_{induktor} \quad (4.9)$$

Keterangan :

$V_{inv}$  = Tegangan inverter (V)

$V_{grid}$  = Tegangan grid (V)

$V_{induktor}$  = Tegangan Induktor atau drop tegangan (V)

Tegangan induktor atau drop tegangan ditimbulkan oleh arus yang melalui induktor. Arus yang mengalir akan mengalami ketertinggalan terhadap tegangan atau *lagging*. Kemudian rumus di atas dapat ditulis kembali seperti dibawah ini:

$$V_{inv} = V_{grid} + jX_L I_{inv} \quad (4.10)$$

Keterangan:

$I_{inv}$  = Arus inverter yang mengalir pada induktor (A)

$X_L$  = Reaktansi saluran ( $\Omega$ )

Arus  $I_{inv}$  yang mengalir adalah arus yang mengkompensasi daya reaktif sehingga memiliki pergeseran sudut yang besar, mendekati  $-90^\circ$ . Karena pergeseran sudutnya yang besar, maka *power factor*-nya kecil. Besar arus  $I_{inv}$  adalah sebagai berikut:

Nilai *power factor* secara ideal adalah 0. Namun untuk memudahkan perhitungan nilai *power factor* dapat diasumsikan sebesar  $10^{-3}$ . Sehingga sudut fasa adalah:

$$\theta = \arccos 10^{-3}$$

$$\theta = 89,42^\circ$$

Pada saat *hoisting* maupun *lowering*, nilai daya reaktif yang dikompensasi atau yang dihasilkan oleh *Shunt Active Power Filter* memiliki nilai yang hampir sama, yaitu sebesar 72,4 kVar, sehingga nilai  $I_{inv}$  yang mengalir adalah:

$$I_{inv} = \frac{Q}{\sqrt{3} V_{grid} \sin \theta}$$

$$I_{inv} = \frac{72,4 \text{ kVar}}{\sqrt{3} 400 0,99}$$

$$I_{inv} = 105,5 \text{ A}$$

Dengan memilih nilai  $X_s$  (nilai L sebesar 6,75 mH) adalah  $2,12 \Omega$ , maka tegangan  $V_{inv}$  dapat dihitung sehingga didapatkan:

$$V_{inv} = 400 + (2,12 \angle 90^\circ \times 105,5 \angle -89,42^\circ)$$

$$V_{inv} = 400 + 223,66 \angle 0,58^\circ$$

$$V_{inv} = 400 + 223,64 + j2,26$$

$$V_{inv} = 623,64 + j2,26$$

$$V_{inv} = 632,6 \angle 0,2^\circ V$$

Jadi, nilai  $V_{inv}$  adalah 632,6 V. Dengan memilih  $m_a = 0,81$  maka nilai  $V_{DC}$  dapat ditentukan, sehingga diperoleh:

$$V_{DC} = \frac{2 \times 632,6}{0,81 \sqrt{3}}$$

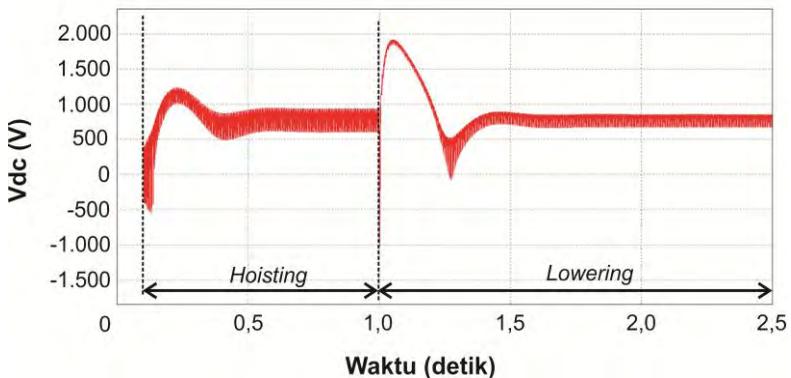
$$V_{DC} = 901,8 V$$

Nilai  $C_{DC}$  dapat dihitung dengan menggunakan rumus (4.1). Dengan memilih *ripple* tegangan sebesar 287 V maka diperoleh:

$$C_{DC} = \frac{(3,14 \times 105,5)}{(\sqrt{3} \times 314 \times 287)}$$

$$C_{DC} = 2,12 \text{ mF}$$

Berikut adalah gambar grafik dari  $V_{DC}$



**Gambar 4.3** Tegangan  $V_{DC}$

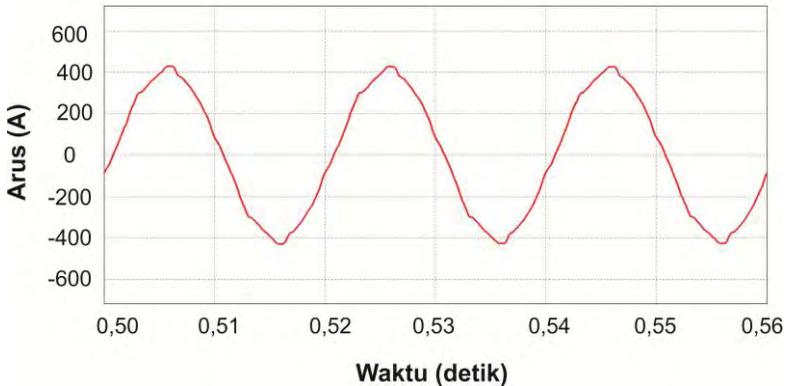
Pada gambar 4.3, tegangan DC ( $V_{DC}$ ) mengalami gangguan pada saat awal beroperasi yaitu pada saat *hoisting*. Gangguan tersebut adalah nilai  $V_{DC}$  yang berada dibawah nol dan terus naik hingga pada nilai 901,8 V. Gangguan lain juga terjadi yaitu terjadinya osilasi diantara nilai 901,8 V. Nilai  $V_{DC}$  tidak menunjukkan nilai yang pasti karena dalam keadaan memiliki *ripple* tegangan. Namun demikian, nilai tengah  $V_{DC}$  berada disekitar nilai 901,8 V. Pada saat *lowering*, nilai  $V_{DC}$  mengalami gangguan. Gangguan yang terjadi adaah lonjakan nilai  $V_{DC}$  hingga mencapai 1800 V. Setelah beberapa saat, nilai  $V_{DC}$  menjadi *steady state* dengan memiliki *ripple* tegangan yang lebih kecil dari pada saat *hosting*. Nilai *ripple* menjadi lebih kecil karena, nilai daya yang harus dikompensasi oleh *Shunt Active Power Filter* tidak sebesar nilai daya yang harus dikompensasi pada saat *lowering*.

#### 4.2.3. Harmonisa

Harmonisa terjadi akibat dari interferensi gelombang lain yang menumpang pada gelombang frekuensi fundamental. Setelah pemasangan *Shunt Active Power Filter*, frekuensi harmonik mengalami pelemahan sehingga persentase total frekuensi harmonik atau THDi menjadi kurang dari 5%. Besarnya pelemahan untuk masing – masing IHD berbeda – beda. Besarnya pelemahan bergantung pada bentuk gelombang referensi yang diperoleh. Jika *filtering* gelombang arus load menjadi gelombang arus fundamental sangat baik sehingga diperoleh gelombang arus fundamental yang mendekati murni, maka pelemahan terhadap frekuensi harmonik akan semakin baik. Pada tugas akhir ini digunakan dua rangkaian *bandpass filter* yang digunakan untuk membangkitkan gelombang arus fundamental. *Bandpass filter* memiliki pelemahan terhadap frekuensi diluar frekuensi yang dilewatkan atau frekuensi *band* dengan pelemahan tertentu. Keadaan ini memberikan peluang frekuensi lain selain frekuensi dalam *band*, lolos dalam *filtering*, walaupun nilainya sangat kecil karena telah mengalami pelemahan.

Pelemahan frekuensi harmonik, menghasilkan bentuk gelombang arus pada saluran yang memiliki bentuk gelombang hampir sama dengan bentuk gelombang arus fundamental. Tingkat kerusakan akibat dari

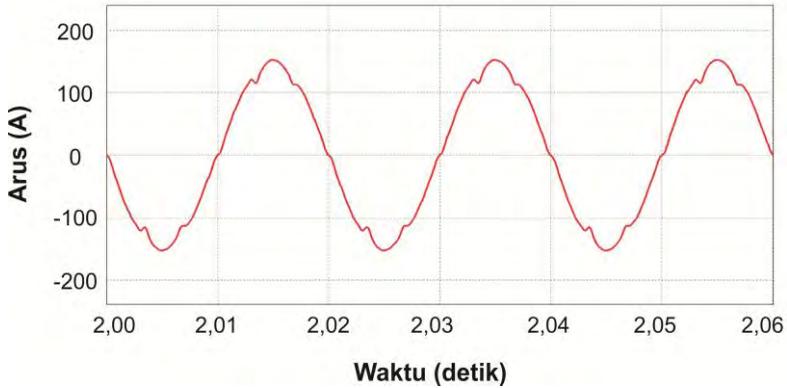
harmonisa atau THDi menjadi kurang dari 5%. Berikut adalah gambar gelombang arus sumber yang memiliki THDi harmonisa dibawah 5% pada saat *crane hoisting*.



**Gambar 4.4** Bentuk arus saat *hoisting* setelah pemasangan filter

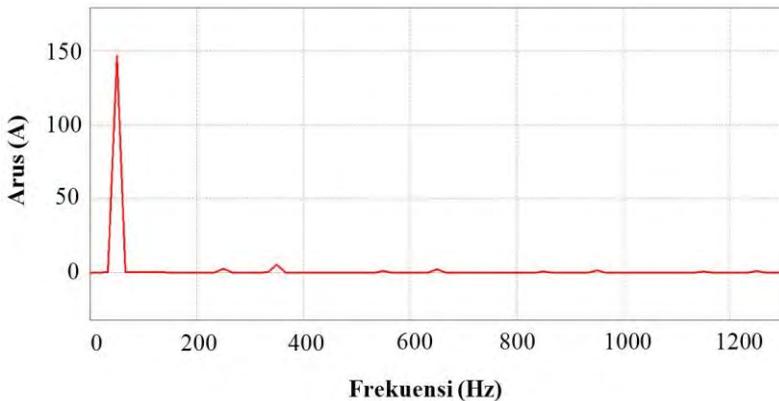
Pada saat *hoisting*, tingkat kerusakan arus sumber akibat harmonisa atau THDi adalah sebesar 52,69%. Kondisi tersebut mengakibatkan bentuk gelombang arus yang tidak sinusoidal seperti pada gambar 3.2. Setelah frekuensi harmonik mendapatkan pelemahan, bentuk gelombang arus pada saat *hoisting* menjadi seperti pada gambar 4.4. Dengan nilai harmonisa yang kecil, kerugian akibat harmonisa dapat diminimalisir.

Pada saat *lowering*, tingkat kerusakan arus sumber akibat harmonisa atau THDi adalah sebesar 52,69%. Kondisi tersebut mengakibatkan bentuk gelombang arus yang tidak sinusoidal seperti pada gambar 3.2. Keadaan ini sama dengan pada saat *hoisting*. Setelah frekuensi harmonik mendapatkan pelemahan, bentuk gelombang arus pada saat *lowering* menjadi seperti pada gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Bentuk arus saat *lowering* setelah pemasangan filter

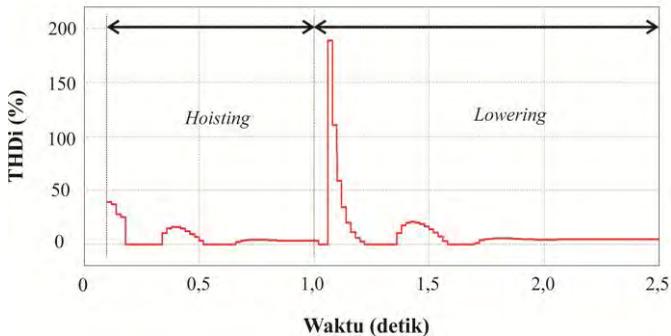
Kedua bentuk gelombang di atas (gambar 4.4 dan gambar 4.5) tetap memiliki nilai frekuensi harmonisa, namun dengan jumlah yang kecil. Jika gelombang tersebut ditransformasi dari domain waktu ke domain frekuensi (FFT), maka akan diperoleh nilai frekuensi lain selain frekuensi fundamental beserta nilai *magnitude*-nya. Grafik FFT salah satu gambar dari dua gambar di atas (gambar 4.4 dan gambar 4.5) yaitu gambar 4.5 dapat dilihat pada gambar 4.6.



**Gambar 4.6** FFT orde harmonik setelah pemasangan filter

Pada gambar 4.6, terdapat nilai *magnitude* terbesar pada kolom antara frekuensi 0 – 200 Hz. Frekuensi dengan nilai *magnitude* tertinggi tersebut adalah frekuensi dengan nilai 50 Hz atau frekuensi fundamental. Sedangkan frekuensi lainnya menunjukkan nilai *magnitude* yang sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *magnitude* frekuensi selain frekuensi fundamental telah mengalami pelemahan dan sistem telah dominan dengan frekuensi fundamental.

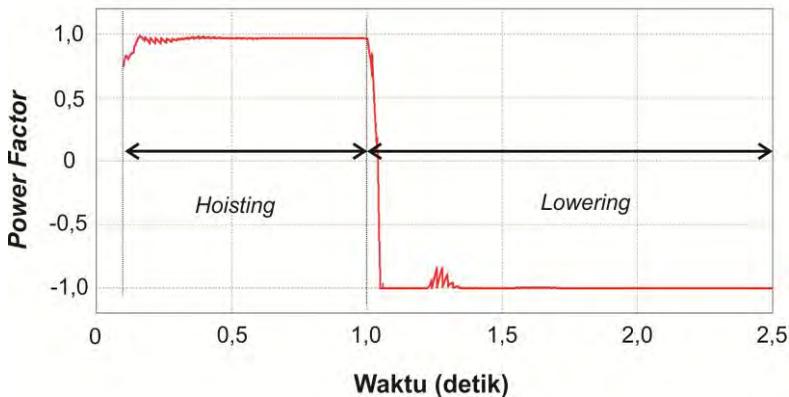
Berdasarkan hasil simulasi, nilai THDi pada saat *hoisting* adalah sebesar 2,79% dan pada saat *lowering* sebesar 4,1%. Nilai THDi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.7. Nilai tersebut diperoleh pada saat sistem dalam keadaan *steady state* pada masing – masing mode operasi. Dari kedua mode operasi, nilai harmonisa pada saat *lowering* lebih besar dari pada pada saat *hoisting*. Hal ini karena pada saat *hoisting*, daya reaktif yang dimasukkan ke grid sedikit lebih besar dari pada pada saat *lowering*. Hal ini mempengaruhi *magnitude* dari sinyal eliminasi harmonik. Jika *magnitude*-nya semakin besar maka harmonisa yang akan tereleminasi semakin besar dan nilai THDi semakin kecil. Akibat dari THDi saat *hoisting* maupun saat *lowering* yang tidak sama, menyebabkan bentuk gelombang arus yang tidak sama setelah *filtering*, walaupun nilai THDi antara *hoisting* dan *lowering* sama sebelum *filtering*. Perbedaan bentuk gelombang arus keduanya dapat dilihat pada gambar 4.4 dan gambar 4.5. Berikut adalah gambar grafik nilai THDi mulai dari awal operasi hingga *steady state*.



**Gambar 4.7** Nilai THDi setelah pemasangan filter

#### 4.2.4. Power factor

Setelah mendapatkan kompensasi daya reaktif, maka nilai *power factor* saluran sumber meningkat. Diketahui sebelumnya, yaitu pada pembahasan sub sub sub bab 4.2.1.1 dan sub sub sub bab 4.2.1.2 tentang nilai daya aktif dan daya reaktif pada kedua mode sebelum dan sesudah terpasang filter aktif, bahwa nilai daya reaktif pada saluran sumber berkurang secara signifikan, sedangkan nilai daya aktif yang diberikan oleh grid konstan. Hal ini menyebabkan nilai *power factor* meningkat mendekati nilai *unity* atau satu. Berikut adalah gambar grafik *power factor* pada kedua mode operasi:



**Gambar 4.8** Nilai *power factor* setelah pemasangan filter

Pada gambar 4.8 terlihat bahwa nilai *power factor* mengalami *ripple* atau gangguan sesaat sebelum steady state. Hal ini karena pengaruh dari arus start motor dan efek dari kontrol yang digunakan. Pada saat detik ke 1,0 *power factor* mengalami penurunan sangat tajam hingga menyentuh nilai negatif. Hal ini karena sistem mengalami perubahan mode operasi dari mode operasi *hoisting* menuju operasi *lowering*. Pergerakan nilai *power factor* dari nilai positif menuju nilai negatif menunjukkan bahwa *power factor* pernah menyentuh angka nol walaupun hanya sesaat. Keadaan tersebut menunjukkan bahwa sistem pernah

mengalami nilai *power factor* terendah yaitu nilai *power factor* nol. Dengan demikian, pada saat tersebut sistem dalam keadaan beban induktif murni. Namun, keadaan ini tidak berlangsung lama. Nilai *power factor* terus menurun hingga mendekati nilai negatif satu. Nilai *power factor* bernilai negatif karena arah aliran daya aktif yang terbalik yang seharusnya dari grid menuju beban berubah arah dari beban menuju grid. Nilai *power factor* sempat mengalami gangguan pada awal *steady state* karena efek dari gangguan yang dialami oleh daya aktif pada saat *lowering*.

Nilai *power factor* pada saat mode *hoisting* adalah sebesar 0,97 ketika sistem telah *steady state*. Nilai *power factor* pada saat *lowering* adalah sebesar -0,999. Tanda minus pada nilai *power factor* ini adalah karena pada saat mode *lowering* terjadi *regeneratif braking*. Proses ini menyebabkan arus yang disuplai ke beban, kembali ke grid. Perubahan arah arus inilah yang menyebabkan nilai *power factor* pada saat *lowering* ini bernilai negatif.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada rangkaian *Shunt Active Power Filter* Untuk Eliminasi Harmonik dan Kompensasi Daya Reaktif Pada Pengoperasian *Crane* dapat disimpulkan menjadi beberapa hal sebagai berikut:

1. Sinyal referensi harmonik yang diperoleh dari pembangkit sinyal referensi digunakan untuk menghasilkan sinyal harmonik pada *output Shunt Active Power Filter* yang memiliki *magnitude* dan frekuensi sama namun dengan *magnitude* yang terbalik
2. *Shunt Active Power Filter* dapat menurunkan harmonisa dari 52,69% menjadi 2,7% pada saat mode *hoisting* dan 4,1% pada saat *lowering*
3. *Shunt Active Power Filter* menghasilkan daya reaktif murni yang digunakan untuk mengkompensasi daya reaktif saluran
4. *Shunt Active Power Filter* dapat memperbaiki *power factordari* 0,84 menjadi 0,97 dan 0,7 menjadi 0,99

#### **5.2. Saran**

Saran yang diberikan pada penelitian ini adalah.

1. Pemodelan *Shunt Active Power Filter* pada Tugas Akhir ini hanya mampu memperbaiki *power factory* yang tidak terlalu rendah. Diperlukan algoritma rangkaian baru yang memiliki keandalan tinggi dalam memperbaiki *power factory* yang lebih rendah.
2. Pemodelan *Shunt Active Power Filter* menggunakan nilai komponen C dan L yang sangat besar. Diperlukan segmentasi C agar C yang dibutuhkan lebih kecil sehingga kebutuhan L juga kecil
3. Kontrol PI sangat tergantung dengan limiter. Tanpa limiter, keluaran PI divergen, sedangkan limiter di-*setting* secara manual. Diperlukan *setting* limiter otomatis agar *range* kerja *Shunt Active Power Filter* bertambah.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Warsito and Karnoto, "Peralatan Kontrol dan *Driver* Motor Pada Crane PT Krakatau Bandar Samudera," *Univ. Diponegoro*, pp. 1–12, Mei 2012.
- [2] M. Kale and E. Özdemir, "Harmonic and reactive power compensation with *Shunt Active Power Filter* under non-ideal mains voltage," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 74, no. 3, pp. 363–370, Jun. 2005.
- [3] M. H. Rashid, Ed., *Power electronics handbook*. San Diego: Academic Press, 2001.
- [4] IEEE Energy Conversion Congress and Exposition and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *ECCE 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: September 15-20, 2012, Raleigh Convention Center, Raleigh, NC*. Piscataway, NJ: IEEE, 2012.
- [5] S. K. Khadem, M. Basu, and M. F. Conlon, "Harmonic power compensation capacity of *Shunt Active Power Filter* and its relationship with design parameters," *IET Power Electron.*, vol. 7, no. 2, pp. 418–430, Feb. 2014.
- [6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, ICPE, and International Conference on Power Electronics, *7th International Conference on Power Electronics, 2007: ICPE '07; 22 - 26 Oct. 2007, Daegu, Korea*. Piscataway, NJ: IEEE, 2007.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Industrial Electronics Society, and Zhejiang da xue, Eds., *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2012): Hangzhou, China, 28 - 31 May 2012; [proceedings]*. Piscataway, NJ: IEEE, 2012.
- [8] E. Acha, Ed., *Power electronic control in electrical systems*. Oxford; Boston: Newnes, 2002.
- [9] D. P. Kumar, "INVESTIGATIONS ON *SHUNT ACTIVE POWER FILTER* FOR POWER QUALITY IMPROVEMENT," National Institute of Technology, Rourkela, 2007.
- [10] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*, 2nd ed. New York: Wiley, 1995.
- [11] S. J. Chapman, *ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2005.

- [12] M. A. El-Sharkawi, *Fundamentals of electric drives*. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 2000.

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



**Muhammad Fahmi Hasan**, lahir di Demak pada tanggal 02 Desember 1992. Memulai pendidikan di TK Kartini Mijen, kemudian melanjutkan ke tingkat dasar di SDN Mijen 2. Setelah lulus tingkat dasar tahun 2005, melanjutkan ke tingkat menengah pertama di SMPN 1 Mijen. Tiga tahun kemudian melanjutkan ke SMAN 1 Demak. Setelah lulus dari bangku sekolah, kemudian melanjutkan ke bangku perguruan tinggi pada tahun 2012 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya jurusan Teknik Elektro dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga pada tahun ketiga. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email: **fahmi.mjn@gmail.com**