



**SISTEM *FILTER AKTIF* DENGAN KONTROL *FUZZY LOGIC*  
BERBASIS METODE P Q UNTUK REDUKSI HARMONISA**

**SKRIPSI**

Oleh:

**Aqiyas Muhamad Dikri  
NIM 151910201117**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**



**SISTEM *FILTER AKTIF* DENGAN KONTROL *FUZZY LOGIC*  
BERBASIS METODE P Q UNTUK REDUKSI HARMONISA**

**SKRIPSI**

Oleh:

**Aqiyas Muhamad Dikri  
NIM 151910201117**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**

## PERSEMBAHAN

Alhamdulillah akhirnya penelitian ini dapat terselesaikan. Karya ini merupakan sebuah langkah kecil sebagai awal menuju lompatan besar guna menggapai kesuksesan yang lebih baik lagi. Penulis mempersembahkan karya ini kepada:

1. Allah SWT.
2. Muhammad Rasulullah SAW.
3. Ayahanda Suratno, Ibunda Kayatun dan kedua adiku tercinta Annisa Rusdiana dan Alfina Rohani.
4. Dosen Pembimbing Skripsi Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, MM., dan Bapak Ali Rizal Chaidir, S.T., M.T.
5. Keluarga Besar Teknik Elektro Angkatan 2015.
6. Rekan-rekan seperjuangan dan kakak-kakak di laboratorium CDAST RE.
7. PPM (Pondok Pesantren Mahasiswa) Syafi'ur Rohman baik teman-teman ASTRA maupun teman-teman ASTRI.
8. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

**MOTO**

يَتَأَيُّهَا الَّذِينَ ءَامَنُوا إِن تَنْصُرُوا اللَّهَ يَنْصُرْكُمْ وَيُثَبِّتْ أَقْدَامَكُمْ

“Hai orang-orang yang beriman, jika kamu menolong (agama) Allah, niscaya Allah akan menolongmu dan meneguhkan kedudukanmu”

(Q.S. Muhammad: 7)

وَيَرْجُونَ رَحْمَتَهُ وَيَخَافُونَ عَذَابَهُ

“Dan mengharapkanlah kalian pada rahmatNya Allah (Surga) dan takutlah pada siksaNya (Neraka)”

(Q.S. Al Isra’: 57)

“Lebih besarnya cita-citanya manusia adalah orang iman yang bercita-cita (sukses) urusan dunianya dan (sukses) urusan akhiratnya”

(H. R. Ibnu Majah)

“Ikutilah langkahmu, jangan pernah putus asa, semua sudah ada jalannya”

(Aqiyas Muhamad Dikri)

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aqiyas Muhamad Dikri

NIM : 151910201117

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Sistem Filter Aktif Dengan Kontrol Fuzzy Logic Berbasis Metode P Q Untuk Reduksi Harmonisa” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan dalam institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 24 Mei 2019

Yang menyatakan,

Aqiyas Muhamad Dikri  
NIM 151910201117

**SKRIPSI**

**SISTEM *FILTER AKTIF* DENGAN KONTROL *FUZZY LOGIC*  
BERBASIS METODE P Q UNTUK REDUKSI HARMONISA**

Oleh

Aqiyas Muhamad Dikri  
NIM 151910201117

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.

Dosen Pembimbing Anggota : Ali Rizal Chaidir, S.T., M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Sistem *Filter Aktif* Dengan Kontrol *Fuzzy Logic* Berbasis Metode P Q Untuk Reduksi Harmonisa” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Rabu, 29 Mei 2019

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

**Tim Penguji:**

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.  
NIP 196312011994021002

Ali Rizal Chaidir, S.T., M.T.  
NIP 760015754

Penguji I,

Penguji II,

Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.  
NIP 197104022003121001

Samsul Bachri M., S.T., MM.T.  
NIP 196403171998021001

Mengesahkan  
Dekan Fakultas Teknik,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM.  
NIP 196612151995032001

## RINGKASAN

**Sistem Filter Aktif Dengan Kontrol Fuzzy Logic Berbasis Metode P Q Untuk Reduksi Harmonisa**; Aqiyas Muhamad Dikri, 151910201117; 2019; 75 halaman; Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Dalam tugas akhir ini dijelaskan tentang suatu penerapan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p q$  untuk pengendalian *shunt-active power filter* (APF) dalam perbaikan kualitas daya. Sistem pengendalian ini berfungsi sebagai kompensator harmonisa dan faktor daya. Pengendalian dilakukan dengan arus dari sumber diproses menggunakan metode  $p q$  yang mana arus dipaksa agar sesuai dengan arus referensi yang sinusoidal, seimbang dan sefasa dengan tegangan sumber. Hasil strategi pengendalian metode  $p q$  adalah sinyal PWM yang akan digunakan untuk kontrol *Voltage Source Inverter* (VSI) yang tersusun dengan 6 buah IGBT. *Fuzzy Logic Controller* (FLC) diterapkan untuk mengatur tegangan DC dari *Voltage Source Inverter* (VSI) pada *shunt-active power filter* (APF) agar konstan yaitu dengan mengukur tegangan DC kapasitor ( $V_{dc}$ ) dan kemudian dibandingkan dengan nilai tegangan DC referensi ( $V_{dc}^*$ ). *Error* dan *delta error* yang diperoleh digunakan sebagai *input*, sedangkan untuk *output* dari *Fuzzy Logic Controller* merupakan amplitudo arus referensi  $I_{max}$ . Setelah proses pengendalian selesai maka tegangan dan arus pada jaringan diukur nilai dari faktor dayanya menggunakan blok *power factor measurement*. Sistem penerapan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p q$  untuk pengendalian *Shunt-APF* dapat memperbaiki kualitas daya listrik berupa reduksi harmonisa arus dengan nilai THD memenuhi standar dari IEEE Std. 519-1992 dan memperbaiki nilai faktor daya, Pada pengujian reduksi harmonisa arus sistem dengan pengendali FLC cukup efektif untuk semua beban pengujian, dimana sistem pengendali FLC mampu mereduksi harmonisa dari 26,06% menjadi 3,92% untuk beban nonlinier konstan dan dari 22,36% menjadi 7,36% untuk beban non linear fluktuatif.



## PRAKATA

*Bismillahirrohmanirrohim,*

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Sistem *Filter Aktif* Dengan Kontrol *Fuzzy Logic* Berbasis Metode P Q Untuk Reduksi Harmonisa”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember;
3. Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M., selaku Dosen Pembimbing Utama, Ali Rizal Chaidir, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
4. Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji I, Samsul Bachri M., S.T., MM.T., selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat membangun demi penyempurnaan skripsi ini;
5. Widya Cahyadi, S.T.,M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
6. Widya Cahyadi, S.T.,M.T., selaku Komisi Bimbingan S1 yang telah membantu penulisan skripsi secara administratif;
7. Ayahanda Kastolan dan Ibunda Endang Moestika Ningsih tercinta, yang telah membantu baik moril dan materiil, mendoakan, mendidik, dan memberi kasih sayang serta pengorbanan yang tidak terhingga selama ini;

8. Ketiga kakak ku tercinta Aqiyas Aulia Prabowo, Palupi Nisa dan Aulia Kusumawardani yang selalu menemani dalam canda dan tawa;
9. Keluarga Besar Teknik Elektro Angkatan 2015, terima kasih atas semangat dukungan dan motivasi yang kalian berikan;
10. Tim Futsal HME Universitas Jember yang telah berjuang dalam lapangan dengan penuh semangat;
11. Rekan-rekan seperjuangan dan kakak-kakak tingkat di Laboratorium CDAST RE yang senantiasa memberikan informasi-informasi penting;
12. PPM (Pondok Pesantren Mahasiswa) Syafi'ur Rohman baik teman-teman ASTRA maupun teman-teman ASTRI, terima kasih atas kenyamanan dan bantuan dalam segala hal serta motivasi yang kalian berikan;
13. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 24 Mei 2019

Penulis

**DAFTAR ISI**

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN</b> .....	vi
<b>HALAMAN PEMNGESAHAN</b> .....	vii
<b>ABSTRAK</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	3
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	3
<b>1.4 Tujuan</b> .....	3
<b>1.5 Manfaat</b> .....	4
<b>1.6 Sistematika Penulisan</b> .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
<b>2.1 Sistem Kelistrikan</b> .....	6
<b>2.2 Permasalahan Sistem Kelistrikan</b> .....	7
<b>2.3 Faktor-faktor Kualitas Daya Listrik</b> .....	8
2.3.1 Frekuensi .....	8
2.3.2 Tegangan .....	8
2.3.3 Arus .....	9
2.3.4 Daya dan Faktor Daya .....	9
2.3.5 Beban Listrik .....	11
2.3.6 Harmonisa .....	13

2.3.7 Daya Pada Sistem Tenaga Listrik .....	16
<b>2.4 Shunt-Active Power Filter (APF)</b> .....	17
<b>2.5 Pengendalian Shunt- Active Power Filter</b> .....	21
2.5.1 Metode FBD .....	21
2.5.2 Metode Refrensi Sinkron .....	21
2.5.3 Metode P Q Teori .....	21
<b>2.6 Fuzzy Logic Controller</b> .....	22
2.6.1 Himpunan Fuzzy .....	22
2.6.2 Fuzzyfikasi .....	23
2.6.3 <i>Interferencing</i> (Rule Base).....	24
2.6.4 Defuzzyfikasi .....	25
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	26
<b>3.1 Simulasi dengan MATLAB</b> .....	26
<b>3.2 Gambaran Umum Penelitian</b> .....	26
<b>3.3 Perancangan Sistem</b> .....	27
3.3.1 Sumber 3 Fasa dan Sumber DC .....	29
3.3.2 Beban dengan Harmonisa Arus.....	31
3.3.3 Sistem Pengendalian <i>Shunt-APF</i> .....	32
3.3.3.1 <i>Voltage Source Inverter</i> (VSI).....	33
3.3.3.2 <i>Coupling Inductor</i> .....	34
3.3.3.3 <i>Pulse Generator</i> .....	35
3.3.3.4 Kontroler Metode <i>p q</i> .....	36
a. Blok <i>Instataneous Power</i> .....	36
b. Blok <i>Compensating Current</i> .....	37
3.3.3.5 <i>Fuzzy Logic Controller</i> (FLC).....	38
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	43
<b>4.1 Hasil Perancangan Simulasi Pengendalian Filter Aktif Shunt</b> .....	43
<b>4.2 Sistem Pengujian Beban Dengan Harmonisa Arus</b> .....	44
4.2.1 Beban Nonlinear Konstan .....	44
4.2.1.1 Tanpa Kontrol .....	45

4.2.1.2 Dengan Kontrol Fuzzy Logic .....	47
4.2.2 Beban Nonlinear Fluktuatif .....	50
4.2.2.1 Tanpa Kontrol .....	50
4.2.2.2 Dengan Kontrol Fuzzy Logic .....	53
<b>4.3 Perancangan Alat .....</b>	<b>56</b>
4.3.1 Inverter 3 fasa .....	57
4.3.2 Pengujian Inverter 3 Fasa .....	59
<b>4.4 Pengujian Metode P Q .....</b>	<b>62</b>
4.4.1 Instanteneus Power .....	62
4.4.1.1 Gelombang Arus Beban .....	63
4.4.1.2 Gelombang P Q .....	66
4.4.2 Compensating Power .....	68
4.4.2.1 Gelombang Icompensating .....	71
4.4.3 Pulse Generator .....	73
<b>4.5 Kontrol Fuzzy .....</b>	<b>79</b>
<b>BAB 5. PENUTUP .....</b>	<b>85</b>
5.1 Kesimpulan .....	85
5.2 Saran .....	85
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>86</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>87</b>

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PT. PLN Persero merupakan penyedia energi listrik di Indonesia, dari waktu ke waktu konsumen listrik di Indonesia semakin besar, pemenuhan permintaan listrik yang besar menuntut penyedia layanan dalam hal ini PT. PLN tentunya terus melakukan berbagai penyempurnaan guna melayani konsumen dengan baik, faktor kualitas pelayanan sangat diperhatikan, yang utama yaitu keandalan sistem kelistrikan yang baik, sehingga ketika kualitas keandalan sistem kelistrikan ini terjaga maka konsumen tidak akan dirugikan. Tingkat keandalan sistem dapat ditinjau dari kualitas daya yang disalurkan ke konsumen, kualitas daya dipengaruhi oleh beban yang digunakan, dalam sistem tenaga listrik ada dua jenis beban yang banyak digunakan konsumen yaitu beban linier dan beban nonlinear. Pada sistem tenaga listrik yang ideal energi yang disalurkan dalam tegangan yang konstan dan frekuensi konstan dengan bentuk gelombang sinusoidal. Pada sistem kelistrikan penggunaan beban-beban nonlinier dapat menimbulkan perubahan bentuk gelombang asli yang disebabkan oleh interaksi antara bentuk gelombang sinusoidal dengan gelombang lain sehingga dapat menyebabkan harmonisa. Pada saat ini sebagian besar pemakaian beban listrik di masyarakat Indonesia hampir 90% memakai beban nonlinier (Hardi, 2013). Beban nonlinear inilah yang banyak timbul permasalahan dalam kualitas daya mengingat banyak sekali beban berbasis elektronika daya yang dapat menurunkan kualitas daya. pada dasarnya dalam dunia kelistrikan, beban berbasis elektronika daya merupakan trobosan yang sangat baik, dengan dapat mengatur dan menyesuaikan bentuk dan nilai tegangan sesuai dengan yang diinginkan, namun disisi lain keadaan ini dapat permasalahan yang sangat serius dalam dunia tenaga listrik yakni dapat menimbulkan distorsi gelombang tegangan maupun arus listrik, mengingat hal tersebut dapat menurunkan kualitas daya sehingga antara konsumen dan produsen pun mengalami kerugian, fenomena tersebut dinamakan harmonisa.

Permasalahan harmonisa ini akibat dari penggunaan beban beban nonlinier yang dapat menimbulkan gelombang dengan frekuensi-frekuensi tinggi, sedangkan batas frekuensi yang dapat digunakan di Indonesia adalah 50 Hz. Harmonisa muncul sejak tahun 1980-an yang mana menjadi ancaman operasi normal sistem kelistrikan dan peralatan-peralatan listrik, dengan demikian peralatan listrik mudah rusak dan menyebabkan kerugian ekonomi yang sangat besar setiap tahun (Mikkili, 2011). Harmonisa dapat menimbulkan permasalahan misalnya rendahnya faktor daya, *overheating*, meningkatkan rugi-rugi energi, gangguan elektromagnetik, dan dapat menurunkan kualitas sistem kelistrikan yang dapat berdampak buruk terhadap peralatan instalasi listrik (Syah, 2015).

Adanya dampak harmonisa dapat merugikan baik PLN di sisi transmisi dan distribusi ataupun konsumen pada alat-alat elektronik yang ada, oleh sebab itu perlu adanya reduksi atau eliminasi harmonisa. Banyak penelitian yang telah dikembangkan untuk melakukan hal ini. Teknologi yang telah dikembangkan adalah dengan memasang filter harmonisa pada jaringan. Filter harmonisa yang digunakan dapat berupa filter aktif maupun filter pasif. Penggunaan filter harmonisa ini selain dapat untuk meredam harmonisa juga dapat memperbaiki faktor daya (Hardi, 2013). Mengacu perkembangan teknologi saat ini, penggunaan filter aktif jauh lebih banyak ketimbang filter pasif. Pada filter aktif sebuah inverter bekerja dengan cara menginjeksikan anti-phase arus maupun tegangan harmonisa sehingga dapat mengurangi pengaruh harmonisa (Syah, 2015).

Pengendalian terhadap filter aktif diperlukan guna menghasilkan reduksi harmonisa terbaik. Salah satu pengendalian terhadap filter aktif adalah pengendalian terhadap *active power filter* (APF). Pengendalian *active power filter* (APF) dalam perbaikan kualitas daya memiliki beberapa metode, yaitu menggunakan metode FBD (Frize-Buchholz-Depenbrock), metode Id-Iq dan *P-Q* teori. Pada metode *P-Q* berdasarkan pada daya sesaat yaitu daya aktif ( $p$ ) dan daya reaktif ( $q$ ) dengan menggunakan transformasi aljabar koordinat abc pada arus dan tegangan sistem tiga fasa ke dalam koordinat  $\alpha - \beta$  (Setiyono, 2009).

Pada penelitian ini dilakukan penerapan Kontrol Fuzzy Logic (FLC) pada metode *P-Q* untuk pengendalian *active power filter* (APF) dengan yang bertujuan

agar perbaikan kualitas daya baik pada beban ataupun pada jaringan dapat dilakukan. Dengan adanya penerapan Kontrol Fuzzy Logic (FLC) pada metode  $P-Q$  untuk pengendalian *active power filter* (APF) ini diharapkan dapat menjadi solusi yang dapat memperbaiki penelitian yang telah dilakukan sebelumnya terhadap perbaikan kualitas daya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dipaparkan, dalam penelitian ini permasalahan yang akan dibahas meliputi:

1. Bagaimana merancang dan menganalisis *active power filter* (APF) dengan menerapkan Kontrol *Fuzzy Logic* untuk mereduksi *Total Harmonics Distortion* (THD)?
2. Bagaimana tingkat keefektifan penerapan Kontrol *Fuzzy Logic* pada pengendalian *active power filter* (APF) ?
3. Bagaimana Pengaruh Kinerja *active power filter* (APF) terhadap Beban Non Linier ?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah dalam penelitian penerapan *Kontrol Fuzzy Logic* untuk pengendalian *active power filter* (APF) dalam perbaikan kualitas daya adalah:

1. Simulasi dilakukan dengan *software simulink* MATLAB 2013a.
2. Perbaikan kualitas daya adalah reduksi harmonisa arus pada sisi jaringan dan beban pengujian telah ditentukan.
3. Penelitian hanya membuktikan konsep dasar dari penerapan *Shunt-active power filter* yang diaplikasikan pada sistem.
4. Perbaikan kualitas daya listrik yang dimaksudkan dalam penelitian ini adalah reduksi harmonisa arus, dan reduksi THD.
5. Hanya membahas keefektifan penerapan Kontrol *Fuzzy Logic* untuk pengendalian *active power filter* (APF) terhadap nilai dari THD.



#### 1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan menganalisis *active power filter* (APF) dalam perbaikan kualitas daya sistem kelistrikan juga menerapkan Kontrol *Fuzzy Logic* untuk pengendalian. Selain itu juga untuk mengetahui tingkat keefektifan penerapan Kontrol *Fuzzy Logic* untuk pengendalian *active power filter* (APF).

#### 1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah membuat penerapan *active power filter* (APF) dalam perbaikan kualitas daya dalam sistem kelistrikan. Penggunaan pengendalian terhadap *active power filter* (APF) ini dapat menyelesaikan permasalahan harmonisa dalam industri dengan berbagai kondisi kualitas daya listrik.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

##### BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan.

##### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi kualitas daya dan permasalahannya, filter, *active power filter* (APF), strategi pengendalian metode *P-Q*, dan *Kontrol Fuzzy Logic*.

##### BAB III METODE PENELITIAN

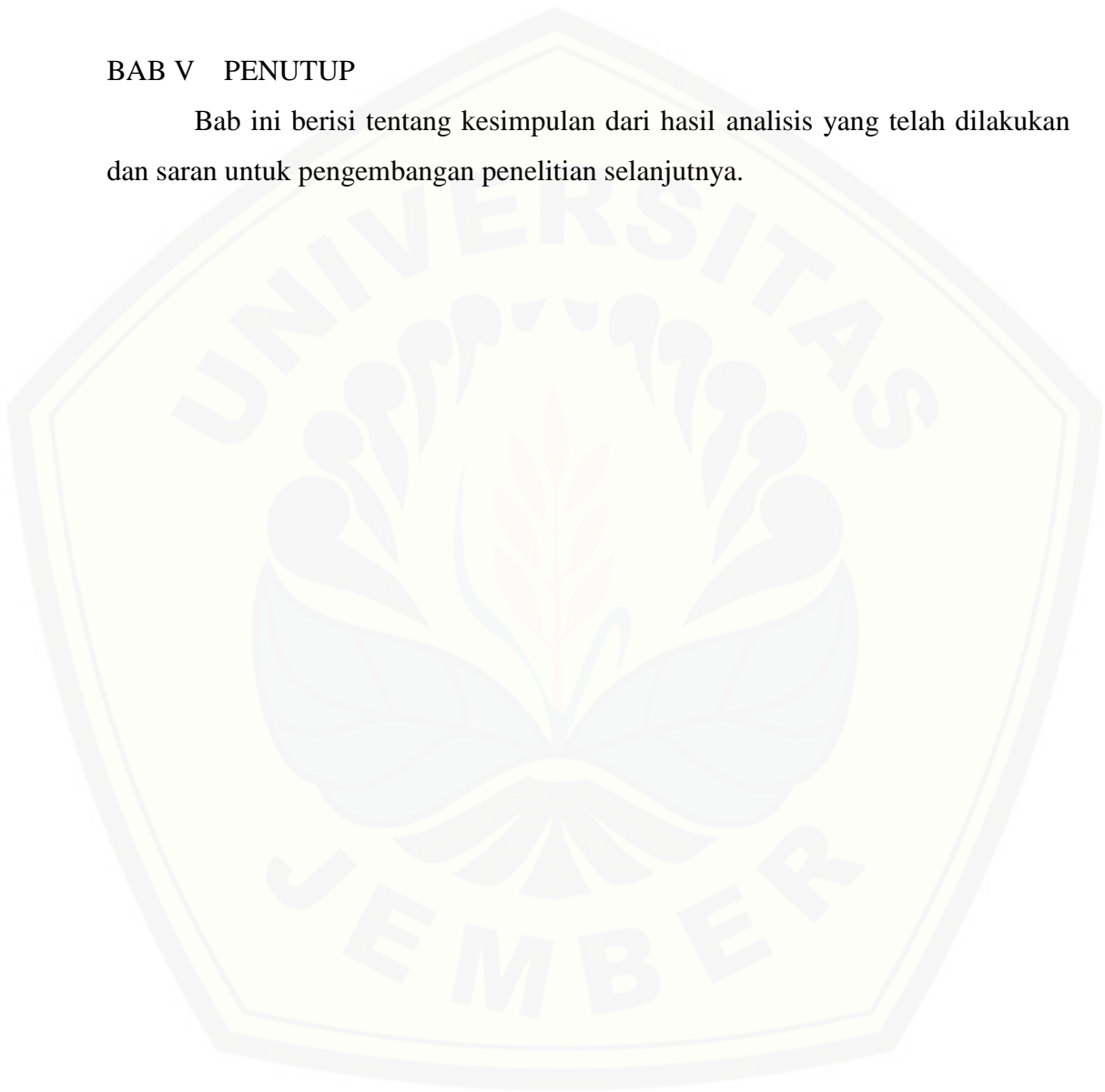
Bab ini berisi tentang gambaran umum perancangan sistem penerapan *Kontrol Fuzzy Logic* pada metode *P-Q* untuk pengendalian *active power filter* (APF) dalam perbaikan kualitas daya sistem kelistrikan.

##### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai analisis hasil simulasi penerapan Kontrol *Fuzzy Logic* pada metode *P-Q* untuk pengendalian *active power filter* (APF) dalam perbaikan kualitas daya sistem kelistrikan dan dengan perbandingan pengendalian *active power filter* (APF) metode *P-Q* dengan metode konvensional.

## BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil analisis yang telah dilakukan dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.



## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Kelistrikan

Sistem kelistrikan di dunia sebagian besar dimulai dari pembangkit, transmisi, distribusi dan ke konsumen, kualitas sistem kelistrikan merupakan suatu persoalan perubahan bentuk arus, tegangan atau frekuensi yang bisa menyebabkan kegagalan operasi baik dari peralatan PLN maupun milik konsumen, artinya keandalan sistem kelistrikan ini jika menurun akan dapat merugikan konsumen, jauhnya sistem transmisi hingga tersalurkan ke konsumen juga menjadi permasalahan yang dapat menurunkan kualitas kelistrikan, permasalahan kualitas daya listrik yang tersalurkan ke konsumen dewasa ini menjadi salah satu permasalahan yang masih terus dilakukan penelitian, Kualitas daya listrik dapat diartikan sebagai tingkat kualitas dari jaringan listrik dan tingkat efisiensi dari penggunaan energi (Syah, 2015). Kualitas daya listrik adalah setiap masalah daya listrik yang berbentuk penyimpangan tegangan, arus atau frekuensi yang mengakibatkan kegagalan ataupun kesalahan operasi pada peralatan-peralatan yang terjadi pada konsumen energi listrik (Roger C. Dugan, 1996). Daya adalah suatu nilai dari energi listrik yang dikirimkan dan didistribusikan, di mana besarnya daya listrik tersebut sebanding dengan perkalian besarnya tegangan dan arus listriknya. Sistem suplai daya listrik dapat dikendalikan oleh kualitas dari tegangan, dan tidak dapat dikendalikan oleh arus listrik karena arus listrik berada pada sisi beban yang bersifat individual, sehingga pada dasarnya kualitas daya adalah kualitas dari tegangan itu sendiri (Roger C. Dugan, 1996). Terutama untuk keperluan produksi dari industri sangatlah membutuhkan kualitas kelistrikan yang ideal, selain berpengaruh pada proses sistem produksi juga untuk menjaga peralatan elektronika daya yang digunakan. Secara umum, kualitas daya listrik terdiri dari tiga komponen utama yaitu :

- a. Kontinuitas (bebas dari permasalahan perubahan tegangan), yaitu tingkat dimana semua konsumen bisa menggunakan energi listrik yang tersedia sepanjang waktu.

- b. Level tegangan, yaitu level dimana tegangan yang digunakan pada sistem dijaga tetap pada range yang diijinkan.
- c. Efisiensi, yaitu nilai dimana pemakaian energi bisa dioptimalkan.

Salah satu faktor yang menyebabkan menurunnya kualitas kelistrikan adalah beban yang dipakai dewasa ini telah banyak yang menggunakan komponen komponen elektronika daya namun disisi lain kita tidak dapat mencegah perkembangan penggunaan beban disisi konsumen, maka dari itu banyak sekali penelitian yang merujuk pada perbaikan daya disisi transmisi ataupun distribusi, salah satunya yang masih terus berkembang yaitu pemasangan filter aktif yang ideal.

## 2.2 Permasalahan Sistem Kelistrikan.

Permasalahan kualitas daya listrik disebabkan oleh gejala-gejala atau fenomena-fenomena elektromagnetik yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Gejala elektromagnetik yang menyebabkan permasalahan kualitas daya adalah (Roger C. Dugan, 1996):

1. Gejala Peralihan (Transient), yaitu suatu gejala perubahan variable (tegangan, arus dan lain-lain) yang terjadi selama masa transisi dari keadaan operasi tunak (steady state) menjadi keadaan yang lain.
2. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Pendek (Short-Duration Variations), yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan dalam waktu yang singkat yaitu kurang dari 1 (satu) menit.
3. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Panjang (Long-Duration Variations), yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan, dalam waktu yang lama yaitu lebih dari 1 (satu) menit.
4. Ketidakseimbangan Tegangan, adalah gejala perbedaan besarnya tegangan dalam sistem tiga fasa serta sudut fasanya.
5. Distorsi Gelombang, adalah gejala penyimpangan dari suatu gelombang (tegangan dan arus) dari bentuk idealnya berupa gelombang sinusoidal.
6. Fluktuasi Tegangan, adalah gejala perubahan besarnya tegangan secara sistematis.

7. Gejala Perubahan Frekuensi Daya yaitu gejala penyimpangan frekuensi daya listrik pada suatu sistem tenaga listrik.

### 2.3 Faktor-faktor Kualitas Daya Listrik

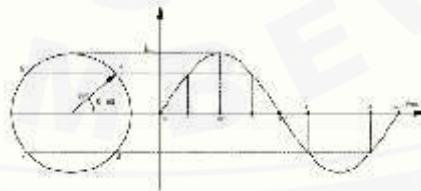
Dalam kelistrikan terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas listrik ditempat tersebut mulai dari frekuensi, arus, tegangan, beban, daya dan faktor daya dari listrik yang disalurkan.

#### 2.3.1 Frekuensi

Tegangan dan arus listrik yang digunakan pada sistem kelistrikan merupakan listrik bolak-balik yang berbentuk sinusoidal. Tegangan dan arus listrik sinusoidal merupakan gelombang yang berulang, sehingga gelombang sinusoidal mempunyai frekuensi. Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang per peristiwa dalam selang waktu yang diberikan. Satuan frekuensi dinyatakan dalam hertz (Hz) yaitu nama pakar fisika Jerman Heinrich Rudolf Hertz yang menemukan fenomena ini pertama kali. Frekuensi sebesar 1 Hz menyatakan peristiwa yang terjadi satu kali per detik, di mana frekuensi ( $f$ ) sebagai hasil kebalikan dari periode ( $T$ ), seperti rumus di bawah ini :

$$f = \frac{1}{T}$$

Di setiap negara mempunyai frekuensi tegangan listrik yang berbeda-beda. Frekuensi tegangan listrik yang berlaku di Indonesia adalah 50 Hz, sedangkan di Amerika berlaku frekuensi 60 Hz.



Gambar 2.1 Gelombang Tegangan Sinusoidal

#### 2.3.2 Tegangan

Ketika suatu muatan listrik ( $q$ ) positif mengalami perpindahan sepanjang lintasan ( $d$ ) di dalam medan listrik ( $E$ ), maka energi potensial ( $W$ ) elektrostatisnya adalah:

$$W = -q \int E \cdot d\ell$$

Dengan :

- W = Perubahan energi potensial (J)
- q = Muatan Listrik (C)
- E = Medan Listrik (N/C)
- d = Panjang Lintasan (m)

### 2.3.3 Arus

Arus listrik didefinisikan sebagai laju aliran sejumlah muatan listrik yang melalui suatu luasan penampang melintang. Menurut konvensi, arah arus listrik dianggap searah dengan aliran muatan positif. Arus listrik diukur dalam satuan Ampere (A), adalah satu Coulomb per detik. Arus listrik dirumuskan :

$$I = \frac{d}{d}$$

Dengan :

- I = Arus listrik (A)
- d = Sejumlah muatan (C)
- d = Waktu (detik)

### 2.3.4 Daya dan Faktor Daya

Daya listrik (*P*) adalah suatu ukuran terhadap penggunaan energi listrik yang dialirkan pada rangkaian tertutup dalam suatu waktu tertentu, di mana :

$$P = \frac{E}{t}$$

Terdapat tiga macam daya listrik yang digunakan untuk menggambarkan penggunaan energi listrik, yaitu daya nyata atau daya aktif, daya reaktif serta daya semu atau daya kompleks. Daya nyata atau daya aktif adalah daya listrik yang digunakan secara nyata, misalnya untuk menghasilkan panas, cahaya atau putaran pada motor listrik. Daya nyata dihasilkan oleh beban - beban listrik yang bersifat resistif murni. Besarnya daya nyata sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban resistif dan dinyatakan dalam satuan Watt, di mana :

$$P = I^2 R$$

Daya reaktif dinyatakan dengan satuan *VAR* (Volt Ampere Reaktan) adalah daya listrik yang dihasilkan oleh beban-beban yang bersifat reaktansi. Terdapat dua jenis beban reaktansi, yaitu reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Beban-beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan magnet. Contoh beban listrik yang bersifat induktif antara lain transformator, motor induksi satu fasa maupun tiga fasa yang biasa digunakan untuk menggerakkan kipas angin, pompa air, lift, eskalator, kompresor, konveyor dan lain-lain. Beban-beban yang bersifat kapasitif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan listrik. Contoh beban yang bersifat kapasitif adalah kapasitor. Besarnya daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban reaktansi, di mana:

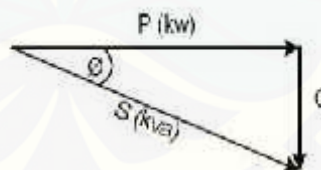
$$Q = I^2 X$$

$$X = X_L - X_C$$

Daya kompleks dinyatakan dengan satuan *VA* (Volt Ampere) adalah hasil kali antara besarnya tegangan dan arus listrik yang mengalir pada beban, di mana :

$$S = V \times I$$

Hubungan ketiga buah daya listrik yaitu daya aktif (*P*), daya reaktif (*Q*) serta daya kompleks (*S*), dinyatakan dengan sebuah segitiga yang disebut segitiga daya seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Segitiga Daya

Dari gambar segitiga daya tersebut, hubungan antara ketiga daya listrik dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$P = S \cos \phi$$

$$P = V I \cos \phi$$

$$Q = S \sin \phi$$

$$Q = V I \sin \phi$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S}$$

$\phi$  adalah sudut antara daya aktif dan daya kompleks ( $S$ ), sehingga  $\cos \phi$  didefinisikan sebagai faktor daya ( $P$ ). Untuk beban yang bersifat induktif,  $P$  lagging di mana arusnya tertinggal dari tegangannya. Dan untuk beban yang bersifat kapasitif,  $P$  leading di mana arusnya mendahului tegangannya.

### 2.3.5 Beban Listrik

Dalam suatu rangkaian listrik selalu dijumpai suatu sumber dan beban. Bila sumber listrik DC, maka sifat beban hanya bersifat resistif murni, karena frekuensi sumber DC adalah nol. Dalam arus bolak-balik AC terdapat tiga jenis beban yaitu beban resistif, beban induktif, dan beban kapasitif. Pada beban resistif murni tegangan dan arus mempunyai fasa yang sama (sefasa), sedangkan pada beban induktif menyebabkan arus tertinggal terhadap tegangan dengan sudut  $90^\circ$ . Penggunaan beban kapasitif mengakibatkan arus mendahului tegangan sebesar  $90^\circ$ . (Tim Fakultas Teknik UNY, 2001) dalam sumber listrik AC maka beban dibedakan menjadi beberapa, yaitu:

#### 1. Beban Resistif

Beban resistif yang merupakan suatu resistor murni. Beban ini hanya menyerap daya aktif dan tidak menyerap daya reaktif sama sekali. Tegangan dan arus se-fasa. Secara matematis dinyatakan:

$$R = V / I$$

#### 2. Beban Induktif

Beban induktif adalah beban yang mengandung kumparan kawat yang dililitkan pada sebuah inti biasanya inti besi, contoh : motor-motor listrik, induktor dan transformator. Beban ini mempunyai faktor daya antara 0 – 1 “lagging”. Beban ini menyerap daya aktif (kW) dan daya reaktif (kVAR). Tegangan mendahului arus sebesar  $90^\circ$ .

#### 3. Beban Kapasitif

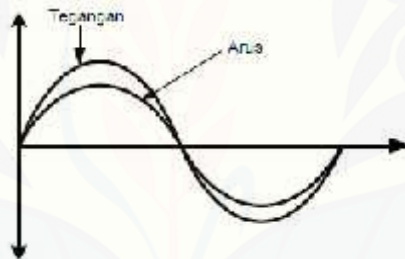
Beban kapasitif adalah beban yang mengandung suatu rangkaian kapasitor. Beban ini mempunyai faktor daya antara 0 – 1 “leading”. Beban ini menyerap daya



aktif (kW) dan mengeluarkan daya reaktif (kVAR). Arus mendahului tegangan sebesar  $^{\circ}$ . Secara matematis dinyatakan:

#### 4. Beban Linier

Beban linier adalah beban yang impedansinya selalu konstan sehingga arus selalu berbanding lurus dengan tegangan setiap waktu. Beban linier ini mematuhi hukum ohm yang menyatakan bahwa arus berbanding lurus dengan tegangan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linier akan sama dengan bentuk gelombang tegangan. Apabila diberi tegangan sinusoidal, maka arus yang mengalir ke beban linier juga merupakan sinusoidal sehingga tidak terjadi distorsi dan tidak menimbulkan harmonisa. Beban ini berupa elemen pasif seperti resistor, komputer dan kapasitor. Beberapa contoh beban linier adalah lampu pijar, pemanas, resistor, dan lain-lain. Gambar 2.3 berikut adalah contoh bentuk gelombang arus dan tegangan dengan beban linier.



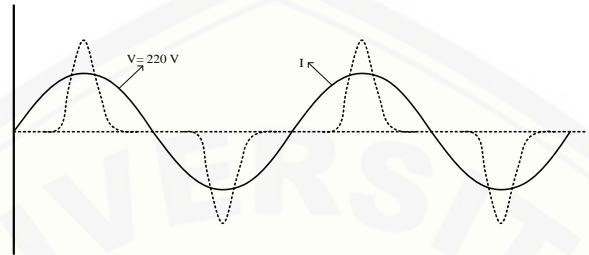
Gambar 2.3 Bentuk gelombang arus dan tegangan dengan beban linier

#### 5. Beban Nonlinier

Beban nonlinier adalah beban yang impedansinya tidak konstan dalam setiap periode tegangan masukan. Dengan impedansinya yang tidak konstan, maka arus yang dihasilkan tidaklah berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan, sehingga beban nonlinier tidaklah mematuhi hukum ohm yang menyatakan arus berbanding lurus dengan tegangan.

Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban nonlinear tidak sama dengan bentuk gelombang tegangan sehingga terjadi cacat (distorsi). Dengan meluasnya pemakaian beban nonlinier, gelombang sinusoidal ini dapat mengalami distorsi. Beberapa contoh beban nonlinier untuk keperluan rumah tangga maupun industri:

- a. Peralatan dengan ferromagnetik yaitu transformator, balast magnetik, motor induksi dll.
- b. Peralatan yang menggunakan busur api listrik yaitu mesin las, *electric arc furnace*, *induction furnace* dll.
- c. Konverter elektronik seperti penyearah, *charger*, balast elektronik dll.



Gambar 2.4 Gelombang tegangan dan arus beban nonlinier

Kecendrungan penggunaan beban-beban elektronika dalam jumlah besar akan menimbulkan masalah yang tidak terelakkan sebelumnya. Berbeda dengan beban-beban listrik yang menarik arus sinusoidal (sebentuk dengan tegangan yang mensuplainya), beban-beban elektronik menarik arus dengan bentuk *non* sinusoidal walaupun disuplai oleh tegangan sinusoidal. Beban yang memiliki sifat ini disebut sebagai beban nonlinier .

Peralatan yang menghasilkan gelombang-gelombang arus yang berbentuk sinusoidal berfrekuensi tinggi yang disebut dengan arus harmonisa. Arus harmonisa ini menimbulkan banyak implikasi pada peralatan sistem tenaga listrik. Misal rugi-rugi jaringan akan meningkat, pemanasan yang tinggi pada kapasitor, transformator, dan pada mesin-mesin listrik yang berputar serta kesalahan pada pembacaan alat ukur RMS.

### 2.3.6 Harmonisa

Secara umum, tenaga listrik didistribusikan dalam sistem tegangan sinusoidal 3 fasa. Seiring dengan semakin meluasnya penggunaan beban-beban non-linier, gelombang arus maupun tegangan sinusoidal tersebut dapat terdistorsi dan bentuknya menjadi cacat (Syah, 2015). Berbeda dengan beban beban listrik linier yang menarik arus sinusoidal (sebentuk dengan tegangan yang

menyuplainya), kebanyakan beban non-linier menarik arus non sinusoidal walaupun disuplai dari sumber tegangan sinusoidal.

Dalam harmonisa khususnya pada sistem tenaga listrik dipakai istilah *Total Harmonic Distortion* (THD) yang didefinisikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{THD} = \frac{\left[ \sum_{n=2}^k U_n \right]^{\frac{1}{2}}}{U_1} \times 100\%$$

Dengan:

$U_n$  = komponen harmonisa

$U_1$  = komponen fundamental

$k$  = komponen harmonisa maksimum yang diamati

harmonisa orde pertama merupakan urutan positif, harmonisa orde kedua merupakan urutan negatif, harmonisa orde ketiga adalah urutan nol, dan berulang untuk harmonisa orde berikutnya. Setiap urutan harmonisa memiliki efek yang berbeda-beda terhadap sistem tenaga listrik dan peralatan-peralatan listrik lainnya. Harmonisa urutan nol yang umumnya berupa harmonisa kelipatan orde tiga (*triplen harmonics*) dapat menimbulkan efek tambahan kontribusi arus pada kawat netral. Harmonisa urutan negatif umumnya menimbulkan torsi lawan pada motor listrik yang menyebabkan motor berlawanan arah putarannya, hal ini dapat merusak motor. Sedangkan harmonisa urutan positif umumnya menimbulkan panas tambahan pada konduktor. Sehingga dapat diperoleh suatu tabel urutan harmonisa:

Tabel 2.1 Orde Harmonisa berdasarkan urutan

Harmonisa	Urutan
1,4,7,10,13,.....,3n+1	Positif
2,5,8,11,.....,3n-1	Negatif
3,6,9,12,15,.....,3n	Nol

Dari tabel 2.1 tersebut dapat diketahui urutan-urutan fasa harmonisa, namun urutan sederhana tersebut tidak diperuntukkan untuk sistem tenaga listrik yang tidak seimbang, karena harmonisa tiap orde mengandung tiga urutan yang berbeda, sehingga membutuhkan analisis yang lebih kompleks.

Pemakaian komponen elektronika yang dapat menyebabkan sumber sumber harmonisa antara lain:

1. Pemakaian komponen semikonduktor seperti diode dalam konversi energi listrik yang dipakai pada peralatan konverter seperti untuk penyearah (*rectifier*), inverter dan lainnya serta peralatan elektronika yang dipergunakan untuk mengatur tegangan maupun kecepatan putaran motor seperti dimmer, komputer, TV, *charger* baterai, dan *Uninterruptible Power Supply* (UPS).
2. Tanur busur listrik

Berikut akan dipaparkan beberapa pengaruh yang diakibatkan oleh adanya harmonisa:

1. Resonansi pada sistem tenaga listrik yang menyebabkan tegangan lebih dan meningkatkan rugi rugi serta panas lebih pada *capasitor bank*.
2. Meningkatnya rugi transmisi yang disebabkan oleh meningkatnya nilai *rms* gelombang arus.
3. Meningkatkan rugi-rugi histerisis dan arus *Eddy* pada transformator.
4. Mempengaruhi kerja rele pengaman yang bekerja bergantung pada nilai puncak tegangan atau arus.
5. Arus lebih (*overload current*) pada konduktor netral untuk sistem tiga fasa empat kawat.

Perhitungan tersebut tidak sama untuk setiap negara tergantung standar yang dipakai. Dalam hal ini diberikan contoh standar dari IEEE Std. 519-1992. Ada dua kriteria yang digunakan dalam analisa distorsi harmonisa. Salah satunya adalah limitasi, seperti pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Limit Distorsi Harmonisa Berdasarkan IEEE Std. 519-1992

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	THD (%)
69 kV and below	3,0	5,0
69,001 kV through 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV and above	1,0	1,5

Catatan : sistem tegangan tinggi dapat memiliki hingga 2,0 % THD dimana penyebabnya adalah HVDC

### 2.3.7 Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Tanpa Harmonisa

Dalam penentuan daya listrik pada jaringan ada dua sistem, yaitu untuk jenis satu fasa dan tiga fasa. Dari sistem itu mempunyai persamaan yang berbeda-beda untuk mencari nilai kualitas daya listriknya (Syah, 2015). Pada sistem tenaga listrik dengan sumber *Alternating Current* (AC), tegangan suplai berupa gelombang sinusoidal murni, yaitu:

$$v(\omega) = v_m \sin(\omega t)$$

$v(\omega)$  = tegangan sesaat (Volt)

$v_m$  = tegangan maksimum (volt)

$\omega$  = sudut (derajat atau radian)

Besar atau magnitude dari tegangan yang terukur pada suatu sistem tenaga listrik adalah nilai dari efektif atau tegangan *root mean square* (rms). Nilai rms dari suatu tegangan berarti nilai dari tegangan AC yang dibutuhkan untuk menghasilkan nilai yang sama dengan nilai tegangan yang dihasilkan oleh tegangan DC. Tegangan rms dari suatu sinyal tegangan sinusoidal adalah :

$$V_r = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(\omega) dt}$$

$$V_r = \frac{v_m}{\sqrt{2}}$$

Arus pada sistem tenaga listrik dengan sumber berupa sinusoidal murni dapat ditulis dengan persamaan berikut:

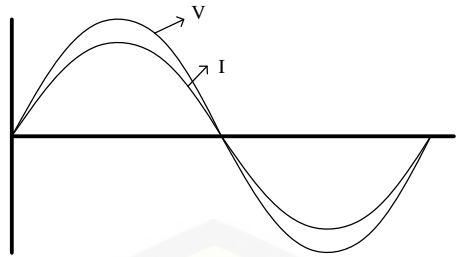
$$i(\omega) = I_m \sin(\omega t - \phi)$$

$$I_r = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(\omega) dt}$$

$$I_r = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

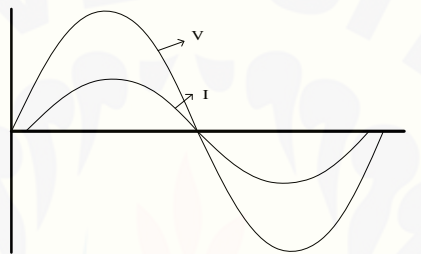
Dilihat dari sudut fasanya, arus dan tegangan pada sistem tenaga listrik dapat dibedakan menjadi 3 kondisi:

1. Arus dan tegangan sefasa, kondisi ini diakibatkan beban resistif sehingga nilai arus dan tegangan menjadi sefasa, seperti ditunjukkan gambar 2.5:



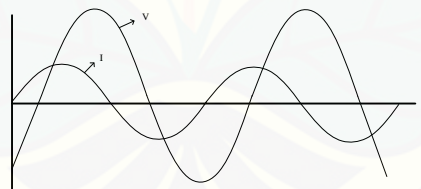
Gambar 2.5 Hubungan arus dan tegangan sefasa

- Arus tertinggal terhadap tegangan (*lagging*), kondisi seperti ini diakibatkan karena penggunaan beban induktif, sehingga arus tertinggal terhadap tegangan dengan sudut  $90^\circ$ . Seperti yang ditunjukkan gambar 2.6 berikut:



Gambar 2.6 Hubungan arus tertinggal terhadap tegangan

- Arus mendahului terhadap tegangan (*leading*). Biasanya kondisi ini diakibatkan karena beban kapasitif. Sehingga arus mendahului tegangan sebesar  $90^\circ$ . Sebagaimana yang ditunjukkan seperti gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.7 Hubungan arus mendahului tegangan

#### 2.4 Shunt – Active Power Filter

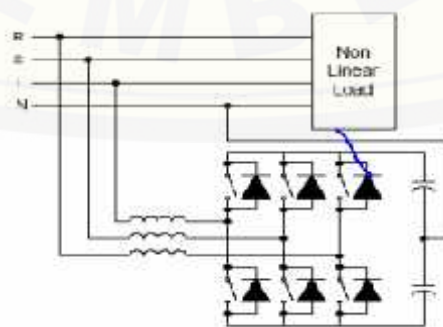
Filter adalah rangkaian elektronik yang dirancang untuk meneruskan isyarat sinusoida dalam daerah frekuensi tertentu. Ada dua macam jenis filter, yaitu filter aktif dan filter pasif. Sebuah filter dikatakan filter aktif jika menggunakan komponen aktif dan jika sebaliknya filter tersebut dikatakan filter pasif. Untuk membuat filter pasif orde satu kita dapat menggunakan rangkaian RC, dan untuk membuat filter pasif orde dua kita dapat menggunakan R, L, dan C. Sedangkan

untuk membuat filter aktif menggunakan komponen-komponen aktif seperti transistor atau op-amp (Setiyono, 2009). Prinsip kerja dari *active power filter* (APF) adalah membangkitkan arus yang sesuai dengan harmonisa pada sistem tetapi berbeda fase  $180^\circ$  sehingga penjumlahan total adalah nol, dengan konsep inilah harmonisa pada sistem dapat direduksi. Untuk membangkitkan arus atau tegangan kompensasi yang sesuai (mendekati) komponen harmonisa sistem digunakan inverter.

Penggunaan filter aktif mempunyai keuntungan dibandingkan filter pasif yaitu: penguatan dan frekuensinya mudah diatur, selama devais elektronika transistor ataupun op amp masih memberikan penguatan dan sinyal input tidak sekaku seperti pada filter pasif. Pada dasarnya filter aktif lebih mudah diatur antara lain:

- Tidak ada masalah beban, karena tahanan input tinggi dan tahanan output rendah. Filter aktif tidak membebani sumber input.
- Harga, umumnya filter aktif lebih ekonomis dari pada filter pasif, karena pemilihan variasai dari transistor atau op-amp yang murah dan tanpa induktor yang biasanya harganya mahal.

Untuk itu pemecahan gangguan yang disebabkan oleh kehadiran harmonisa ini dapat diambil dengan penambahan kompensator harmonisa yang umumnya berupa filter aktif dalam sistem. Umumnya kompensator harmonisa bekerja secara paralel. Pada gambar 2.13 ditunjukkan prinsip kerja kompensator paralel. Dan tampak bahwa arus yang ditarik dari jala-jala dapat dikembalikan menjadi bentuk sinusoidal dengan cara menginjeksikan arus kompensasi.



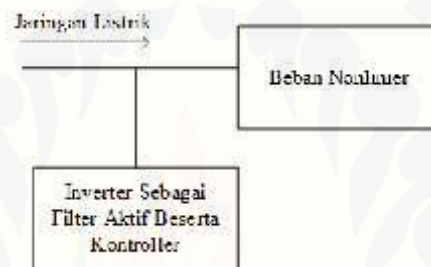
Gambar 2.8 Prinsip kerja kompensator *active power filter* (APF)

(sumber: Setiyono, 2009)

Filter aktif merupakan tipe baru untuk peralatan filter eliminasi harmonisa dalam sistem tenaga. Filter ini disusun dari peralatan-peralatan elektronika daya. Komponen utama yang terdapat pada filter aktif adalah (Odinanto, 2013):

1. Inverter digunakan sebagai filter aktif yang dihubungkan paralel dengan sumber tegangan beban untuk mengkompensasi harmonisa.
2. Kontroller digunakan dalam rangkaian filter aktif untuk memper kecil sinyal error pada sumber tegangan beban terdapat harmonisa. Keluaran kontroller digunakan untuk memicu inverter.

Pemakaian umum dari filter aktif dalam sistem tenaga listrik dapat dilihat seperti gambar:



Gambar 2.9 Pemasangan filter aktif

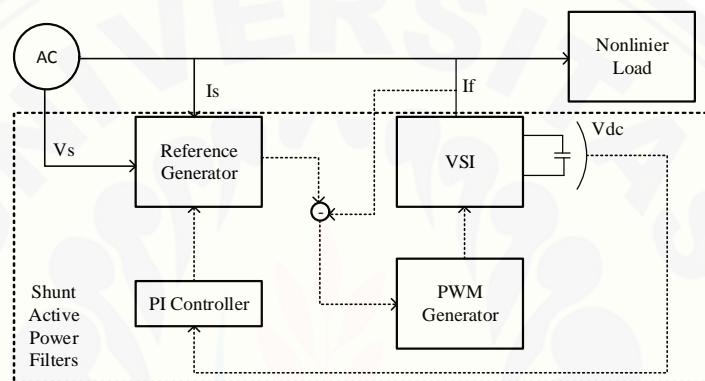
(sumber: Setiyono, 2009)

Rangkaian ekuivalen untuk *active power filter* (APF) dapat dilihat pada gambar 2.15. Sebagai sinyal *active power filter* (APF) adalah tegangan sumber dan arus beban. Kedua sinyal tersebut akan melalui suatu skema kontrol pada filter untuk memperoleh arus referensi harmonisa. Teori daya aktif-reaktif sesaat dipilih sebagai sistem kontrol karena unjuk kerjanya yang cukup baik serta kemudahan dalam pengontrolan untuk mendapatkan arus referensi harmonisa. Arus referensi harmonisa ini kemudian akan dijadikan referensi pembangkit sinyal PWM. Perbandingan antara sinyal referensi dengan sinyal *carrier* berupa gelombang segitiga akan menghasilkan pulsa. Pulsa ini yang akan digunakan sebagai pemicu inverter, dalam hal ini IGBT, yang kemudian akan membangkitkan gelombang arus filter untuk diinjeksikan ke dalam sistem.

Rangkaian ekuivalen untuk *active power filter* (APF) dapat dilihat pada gambar 2.15. Sebagai sinyal *active power filter* (APF) adalah tegangan sumber dan arus beban. Kedua sinyal tersebut akan melalui suatu skema kontrol pada filter

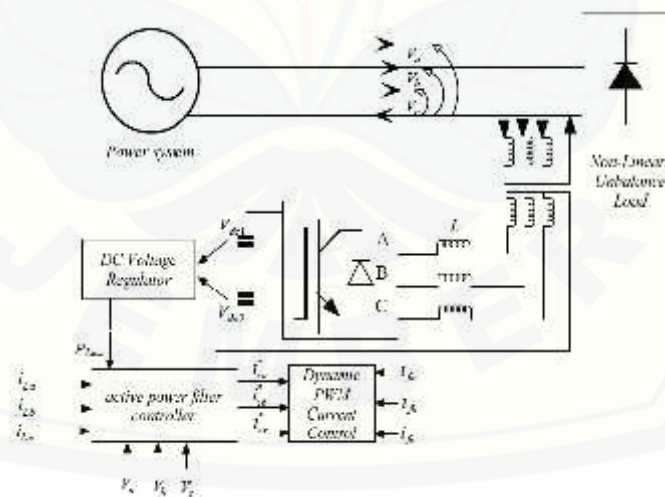


untuk memperoleh arus referensi harmonisa. Teori daya aktif-reaktif sesaat dipilih sebagai sistem kontrol karena unjuk kerjanya yang cukup baik serta kemudahan dalam pengontrolan untuk mendapatkan arus referensi harmonisa. Arus referensi harmonisa ini kemudian akan dijadikan referensi pembangkit sinyal PWM. Perbandingan antara sinyal referensi dengan sinyal *carrier* berupa gelombang segitiga akan menghasilkan pulsa. Pulsa ini yang akan digunakan sebagai pemacu inverter, dalam hal ini IGBT, yang kemudian akan membangkitkan gelombang arus filter untuk diinjeksikan ke dalam sistem.



Gambar 2.10 Rangkaian ekuivalen *shunt active filter*

(sumber: Putra, 2013)



Gambar 2.11 Arsitektur *active power filter* (APF) pada jaringan tiga fasa

(sumber: Mikkili, 2011)

## 2.5 Pengendalian *Active power filter* (APF)

### a. Metode FBD (Frize- Buchholz-Depenbrock)

Diajukan oleh Depenbrock yaitu memisahkan atau mengurai arus beban di dalam komponen daya dan komponen rugi rugi daya. Tujuannya adalah mengkompensasi semua komponen yang tidak dihasilkan oleh power system, tetapi memberikan factor daya yang kurang dari 1. Metode ini mengatakan bahwa rasio daya rata rata yang dikonsumsi oleh bebab dan nilai tegangan RMS diberikan pernyataan sebagai

$G = \frac{P_3}{V_s^2}$  Dimana  $V_s^2$  adalah tegangan rms.  $V_r^2 = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}$  dan  $V_a, V_b, V_c$  Adalah nilai tegangan rms pada fasa a, b dan c.  $P_3$  adalah nilai rata rata daya sesaat tiga fasa yang dihitung dari daya aktif. Besarnya arus refrensi dapat dihitung dengan:

$$i_{s,a}(t) = G \cdot v_a(t) - i_a(t)$$

$$i_{s,b}(t) = G \cdot v_b(t) - i_b(t)$$

$$i_{s,c}(t) = G \cdot v_c(t) - i_c(t)$$

### b. Metode Referensi Sinkron

Metode ini menggunakan Transformasi Park. Komponen arus injeksi Park sebuah tiga fasa dapat ditemukan melalui penerapan Clark Transform yang menyebabkan arus  $I_a, I_b, I_c$  direpresentasikan kedalam dua koordinat  $I_\alpha$  dan  $I_\beta$  kemudian dengan refrensi sistem sudut dimasukkan kedalam koordinat  $I_d$  dan  $I_q$ . Kemudian dengan adanya komponen nol, maka nilai arus pada koordinat  $0 - d - q$  dapat diperoleh :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

### c. Metode *P-Q Theory*

Metode *P-Q* teori ini juga dikenal dengan “instantaneous power theory” yang ditulis oleh Akagi pada tahun 1983 untuk mengontrol aktif filter. *P-Q* teori

mengandung transformasi aljabar tegangan dan arus sistem 3 fasa dari koordinat a-b-c ke koordinat  $\alpha - \beta$  yang diikuti perhitungan komponen teori daya sesaat

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \\ v_{\rho} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_{\rho} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

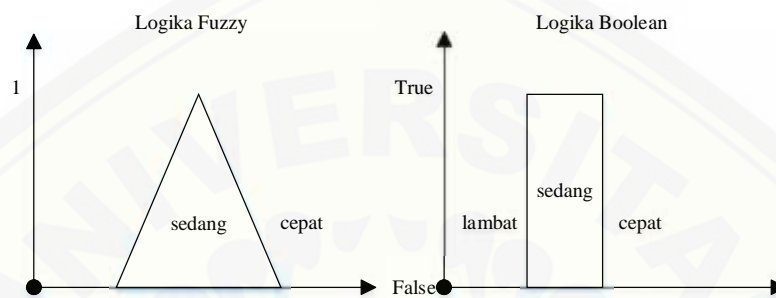
## 2.6 Fuzzy Logic Controller (FLC)

Logika fuzzy adalah cabang dari sistem kecerdasan buatan (*Artificial Inteligent*) yang mengemulasi kemampuan manusia dalam berfikir ke dalam bentuk algoritma yang kemudian dijalankan oleh mesin. Algoritma ini digunakan dalam berbagai aplikasi pemrosesan data yang tidak dapat direpresentasikan dalam bentuk biner (Abdullah). Logika fuzzy menginterpretasikan statemen yang samar menjadi sebuah pengertian yang logis. Logika Fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Zadeh seorang kebangsaan Iran yang menjadi guru besar di *University of California at Berkeley* pada tahun 1965 dalam papernya yang monumental (Abdullah). Dalam paper tersebut dipaparkan ide dasar fuzzy set yang meliputi *inclusion, union, intersection, complement, relation* dan *convexity*. Pelopor aplikasi fuzzy set dalam bidang kontrol, yang merupakan aplikasi pertama dan utama dari fuzzy set adalah Prof. Ebrahim Mamdani dan kawan-kawan dari *Queen Mary College London*. Penerapan kontrol fuzzy secara nyata di industri banyak dipelopori para ahli dari Jepang, misalnya Prof. Sugeno dari *Tokyo Institute of Technology*, Prof. Yamakawa dari *Kyusu Institute of Technology*, Togay dan Watanabe dari *Bell Telephone Labs*.

### 2.6.1 Himpunan Fuzzy

Himpunan fuzzy merupakan suatu pengembangan lebih lanjut tentang konsep himpunan dalam matematika. Himpunan Fuzzy adalah rentang nilai-nilai,

masing-masing nilai mempunyai derajat keanggotaan (membership) antara 0 sampai dengan 1 (Abdullah). Ungkapan logika *Boolean* menggambarkan nilai-nilai “benar” atau “salah”. Logika fuzzy menggunakan ungkapan misalnya: “sangat lambat”, “agak sedang”, “sangat cepat” dan lain-lain untuk mengungkapkan derajat intensitasnya. Ilustrasi antara keanggotaan fuzzy dengan *Boolean set* dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.12 Pendefinisian kecepatan dalam bentuk logika fuzzy dan logika *Boolean*  
(sumber: Abdullah)

### 2.6.2 Fuzzyfikasi

Proses fuzzyfikasi merupakan proses untuk mengubah variabel *non fuzzy* (variabel numerik) menjadi variabel *fuzzy* (variabel linguistik). Nilai masukan-masukan yang masih dalam bentuk variabel numerik yang telah dikuantisasi sebelum diolah oleh pengendali *fuzzy* harus diubah terlebih dahulu ke dalam variabel *fuzzy*. Melalui fungsi keanggotaan yang telah disusun maka nilai-nilai masukan tersebut menjadi informasi *fuzzy* yang berguna nantinya untuk proses pengolahan secara *fuzzy* pula maka proses ini disebut dengan fuzzyfikasi. Dengan kata lain fuzzyfikasi merupakan pemetaan titik-titik numerik (*crisp point*)  $\underline{x} = (x^1, \dots, x^n)^T \in U$  ke  $U$  himpunan fuzzy  $A$  di  $U$ .  $U$  adalah semesta pembicaraan. Paling tidak ada dua kemungkinan pemetaan, yaitu:

- Fuzzyfikasi *singleton*:  $A$  adalah *fuzzy singleton* dengan support  $\underline{x}$ , artinya  $\mu_A(x') = 1$  untuk  $\underline{x}' = \underline{x}$  dan  $\mu_A(x') = 0$  untuk  $x' \in U$  yang lain dengan  $\underline{x}' = \underline{x}$ .
- Fuzzyfikasi *nonsingleton*:  $\mu_A(x) = 1$  dan  $\mu_A(\underline{x}')$  menurun dari 1 sebagaimana  $\underline{x}'$  bergerak menjauh dari  $\underline{x}$ .

Sejauh ini yang paling banyak digunakan adalah fuzzyfikasi *singleton*, tetapi pemakaian *nonsingleton* juga telah dirintis terutama untuk masukan-masukan yang banyak dimasuki oleh derau (*noise*).

### 2.6.3 Inferencing (Rule Base)

Pada umumnya, aturan-aturan *fuzzy* dinyatakan dalam bentuk “*IF... THEN*” yang merupakan inti dari relasi *fuzzy*. Relasi *fuzzy*, dinyatakan dengan  $R$ , juga disebut implikasi *fuzzy*. Untuk mendapatkan aturan “*IF.....THEN*” ada dua cara utama:

1. Menanyakan ke operator manusia yang dengan cara manual telah mampu mengendalikan sistem tersebut, dikenal dengan “*human expert*”.
2. Dengan menggunakan algoritma pelatihan berdasarkan data-data masukan dan keluaran.

Dalam penalaran logika *fuzzy*, ada dua tipe utama untuk pengambilan keputusan *fuzzy* yaitu: *Generalized Modus Ponens (GMP)* dan *Generalized Modus Tolens (GMT)*. *GMP* disebut juga dengan *direct reasoning*, sedangkan *GMT* disebut juga *indirect reasoning*. Jika himpunan *fuzzy* dinotasikan dengan  $A, A', B, B'$  dan variabel linguistik dinotasikan dengan  $x$  dan  $y$ , maka *GMP* dan *GMT* dapat dinyatakan sebagai berikut:

#### a. *Generalized Modus Ponens (GMP)*

Pernyataan 1 (aturan) : if  $x$  is  $A$  then  $y$  is  $B$

Pernyataan 2 (fakta) :  $x$  is  $A'$

Penyelesaian :  $y$  is  $A'$

Dalam hal ini penyelesaian  $B'$  dapat dinotasikan dengan :

$$B' = A' \circ R$$

Dengan  $R$  adalah relasi *fuzzy* dari implikasi *fuzzy* ‘if  $A$  then  $B$ ’, tanda  $\circ$  adalah operator komposisi, dan  $A'$  adalah himpunan *fuzzy* yang mempunyai bentuk: sangat  $A$ , lebih atau kurang  $A$ , tidak  $A$  dan sebagainya.

#### b. *Generalized Modus Tolens (GMT)*

Pernyataan 1 (aturan) : if  $x$  is  $A$  then  $y$  is  $B$

Pernyataan 2 (fakta) :  $x$  is  $B'$

Penyelesaian :  $y$  is  $A'$

Dalam hal ini penyelesaian  $B'$  dapat dinotasikan dengan:

$$A' = R \circ B'$$

#### 2.6.4 Defuzzifikasi

Keputusan yang dihasilkan dari proses penalaran masih dalam bentuk *fuzzy*, yaitu berupa derajat keanggotaan keluaran. Hasil ini harus diubah kembali menjadi variabel numerik *non fuzzy* melalui proses defuzzifikasi.

##### a. Model Defuzzifikasi Metode Mamdani

Dua metode defuzzifikasi metode yang umum digunakan ada dua metode yaitu *Maksimum of Mean (MOM)* dan *Centre of Area (COA)*.

##### 1. *Maksimum of Mean (MOM)*

Metode ini didefinisikan sebagai :

$$v_0 = \sum_{j=1}^J \frac{v_j}{J}$$

$$v_j = v \mu_v(v)$$

$v_0$  : nilai keluaran

$J$  : jumlah harga maksimum

$v_j$  : nilai keluaran maksimum ke- $j$

$\mu_v(v)$  : derajat keanggotaan elemen-elemen pada *fuzzy set*  $v$

$v$  : semesta pembicaraan

##### 2. *Centre of Area (COA)*

Metode ini didefinisikan sebagai :

$$v_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)}$$

$v_0$  : nilai keluaran

$m$  : tingkat kuantisasi

$v_k$  : elemen ke- $k$

$\mu_v(v_k)$  : derajat keanggotaan elemen-elemen pada *fuzzy set*  $v$

$v$  : semesta pembicaraan

##### b. Model Defuzzifikasi Metode Sugeno

Penalaran *fuzzy* dengan metode Sugeno tidak berupa himpunan *fuzzy*, melainkan berupa konstanta atau persamaan linier yang diperkenalkan oleh Takagi Sugeno Kang pada tahun 1985. Secara umum model *fuzzy* Sugeno terdiri dari dua jenis:

1. Model *fuzzy* Sugeno orde-nol:

*If* input1 = x dan input2 = y, *Then* Outputnya adalah  $z = k$ .

2. Model *fuzzy* Sugeno orde-satu:

*If* input1 = x dan input2 = y, *Then* Outputnya adalah  $z = ax+by+c$

Defuzzyfikasi dilakukan dengan cara mencari rata-ratanya (*weight average/wtaver*):

$$\text{Final Output} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Simulasi dengan MATLAB

Proses penelitian penerapan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p q$  untuk pengendalian filter aktif dalam perbaikan kualitas daya dengan menggunakan MATLAB secara umum dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pemodelan sistem penerapan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p q$  untuk pengendalian *Shunt-APF* dalam simulink MATLAB mencakup blok: sumber AC 3 fasa, beban, *Shunt-APF* dan sumber DC.
2. Pemodelan sistem pengendalian *Shunt-APF* dalam simulink MATLAB yang mencakup blok: VSI, *coupling inductor*, *pulse generator*, blok metode  $p q$ , sumber AC 3 fasa, sumber DC, beban dan blok kontrol.
3. Pembuatan model *Fuzzy Logic Controller* (FLC) untuk membuat *error* tegangan menjadi seimbang dan mengkonversikan tegangan menjadi arus referensi.
4. Melakukan simulasi pada sistem dengan tanpa pengendali, dan menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC).
5. Analisis hasil simulasi pada sistem dengan tanpa pengendali, dan menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (FLC).
6. Penyusunan laporan dan membuat kesimpulan.

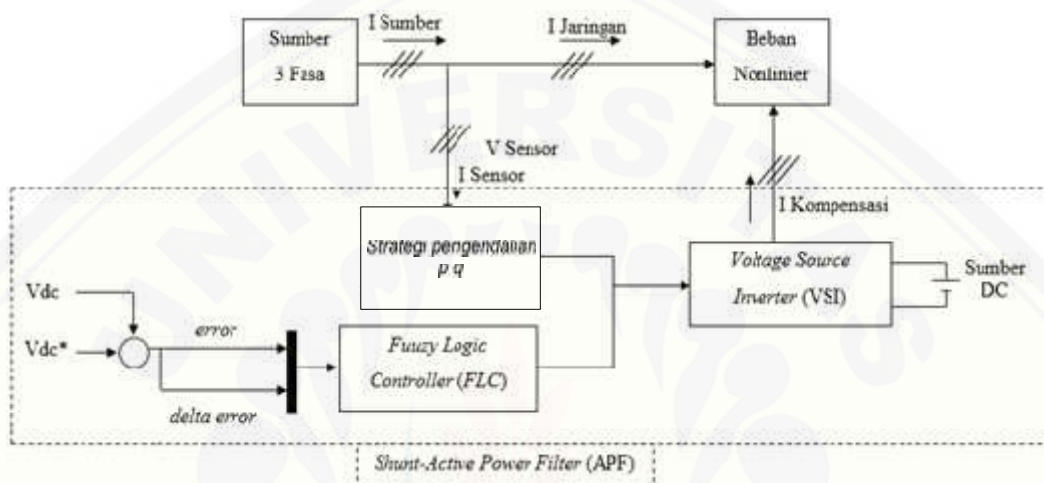
#### 3.2 Gambaran Umum Penelitian

Konsep dari pemikiran penelitian ini adalah merancang, menguji dan menganalisa *Shunt-APF* dengan menerapkan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p q$  dalam perbaikan kualitas daya. Hasil yang didapatkan dianalisa perubahan raduksi harmonisa dari sebelum dan sesudah di filter. Pada dasarnya penelitian dilakukan untuk mendapatkan pengendalian *Shunt-APF* yang dapat menghasilkan perbaikan kualitas daya yang terbaik.



### 3.3 Perancangan Sistem

Penelitian merupakan simulasi merancang, menguji dan mengalisa *Shunt-APF* dengan menerapkan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p q$  dalam perbaikan kualitas daya sebagai kompensasi harmonisa. Dalam proses pengendalian *Shunt-APF* pada metode  $p q$  kalkulasi perhitungannya menggunakan transformasi clark.



Gambar 3.1 Diagram blok sistem kompensasi harmonisa

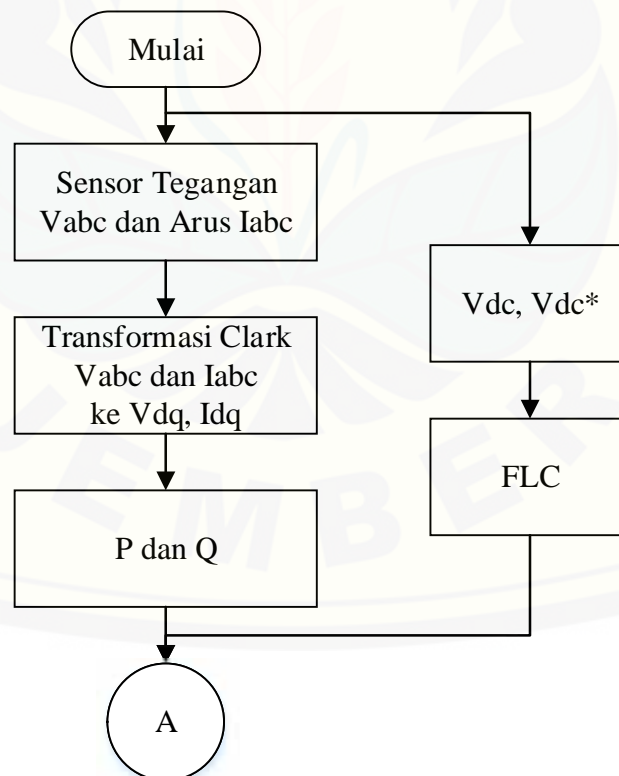
Sistem penerapan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p q$  untuk pengendalian *Shunt-APF* dalam perbaikan kualitas daya sebagai kompensasi harmonisa bekerja sebagai berikut:

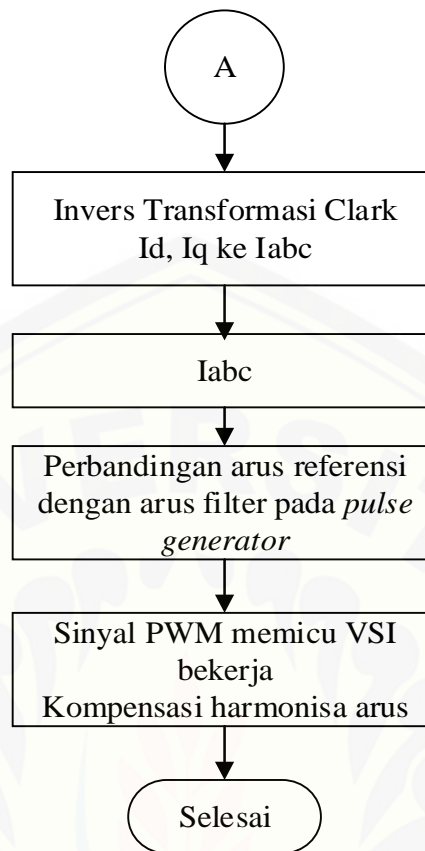
1. Sumber dibebani dengan beban nonlinier yang menyebabkan harmonisa arus.
2. Tegangan dan arus dari sumber yang menuju akan diproses dalam strategi pengendalian dengan menggunakan metode  $p q$  untuk mendapatkan arus kompensasi.
3. Hasil strategi pengendalian metode  $p q$  adalah arus kompensasi yang berupa sinyal PWM yang akan digunakan untuk kontrol *voltage source inverter* (VSI) yang tersusun dengan 6 buah IGBT yang akan menghasilkan arus anti harmonisa sesuai.
4. *Fuzzy Logic Controller* (FLC) diterapkan untuk mengatur tegangan DC dari *voltage source inverter* (VSI) pada *Shunt-APF* agar konstan yaitu dengan

mengukur tegangan DC kapasitor ( $V_{dc}$ ) dan kemudian dibandingkan dengan nilai tegangan DC referensi ( $V_{dc}^*$ ).

5. *Error* dan *delta error* yang diperoleh digunakan sebagai *input* untuk pengolahan *Fuzzy Logic Controller* (FLC), sedangkan untuk *output* dari *Fuzzy Logic Controller* merupakan amplitudo arus referensi  $I_{max}$ .
6. Arus referensi  $I_{max}$  yang diperoleh akan dibandingkan dengan arus kompensasi penyearing sebenarnya dan dipaksa untuk mengikuti referensi sehingga dapat memberikan arus kompensasi yang diperlukan untuk menghilangkan harmonisa arus.

Langkah penelitian tersebut dapat dilihat secara rinci pada *flowchart* sistem yang merancang *Shunt-APF* dengan menerapkan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p-q$  dalam perbaikan kualitas daya sebagai kompensasi harmonisa yang ditunjukkan pada gambar 3.2 berikut.





Gambar 3.2 Flowchart sistem kompensasi harmonisa

### 3.3.1 Sumber 3 Fasa dan Sumber DC

Pada penelitian ini digunakan dua macam sumber yang berbeda yaitu sumber AC dan sumber DC. Sumber AC digunakan sebagai sumber jaringan tiga fasa yang mana sistem diasumsikan sebagai sistem distribusi tiga fasa yang mensuplai beban nonlinier, sedangkan sumber DC yang digunakan adalah sumber untuk mensuplai energi *voltage source inverter* (VSI).

Sumber AC yang digunakan pada penelitian ini adalah sumber AC 3 fasa yang ada pada Matlab R2013a yaitu *Three-Phase Source* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5. Dengan asumsi bahwa sistem kelistrikan distribusi 3 fasa ini disuplai melalui sebuah sumber AC 3 fasa dengan spesifikasi daya 5 MVA,  $Z = 6,75\%$  dan  $X/R = 12,14$ ,  $V_{L-N} = 220$  volt,  $V_{L-L_{rms}} = 380$  volt,  $f = 50$  Hz dan tegangan maksimum *line to neutral*  $V_{LN \max} = 311,16$  Volt, sehingga dapat diketahui besarnya  $R_s$  dan  $L_s$  sebagai berikut:

$$Z_T = \frac{(K_{VLL})^2}{M_{VA3\Phi}} \times Z_{TX} (\%) \quad (3.1)$$

$$= \frac{(0,38)^2}{5} \times 0,0675 = 0,00194$$

$$Z_T^2 = X^2 + R^2 \quad (3.2)$$

$$= (12,14R)^2 + R^2 = 148,38R^2$$

Sehingga,

$$Z_T = R\sqrt{148,38}$$

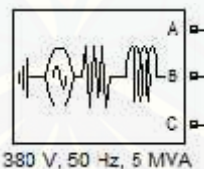
$$R_s = \frac{0,00194}{\sqrt{148,38}} = 15,926m\Omega$$

$$X = 12,14R = 193,34m\Omega$$

$$L_s = \frac{X}{2ff} \quad (3.3)$$

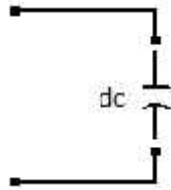
$$= 0,615mH$$

Dari perhitungan di atas, dapat diketahui impedansi dari sumber utama 3 fasa yang terdiri dari resistansi  $R_s = 15,926 m\Omega$  dan induktansi  $L_s = 0,615 mH$ .



Gambar 3.3 Blok sumber AC 3 fasa

Sumber DC yang digunakan pada penelitian ini adalah sumber DC yang ada pada Matlab R2013a yaitu *Branch Type C* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4. Sumber DC pada sistem digunakan sebagai penyuplai energi dari *voltage source inverter* (VSI). Sumber DC yang digunakan adalah sumber DC dari kapasitor yang diatur dengan nilai  $35 \mu F$ .



Gambar 3.4 Blok sumber DC

### 3.3.2 Beban dengan Harmonisa Arus

Pembebanan pada sistem ini dirancang dengan menggunakan tipe beban untuk pengujian yaitu beban dengan harmonisa arus,. Beban dengan harmonisa arus menggunakan beban nonlinier. Beban dengan harmonisa arus dimaksudkan untuk pengujian reduksi harmonisa arus yaitu dengan menggunakan beban nonlinier. Pada sistem ini nantinya akan difokuskan untuk meredam harmonisa pada saat terjadi perubahan beban. Pengujian terhadap beban pada Simulink ini yaitu dengan poengujian terhadap beban nonlinier dengan 2 fariasi beban berbeda. Adapun pengujian dengan 2 fariasi beban yang berbeda yakni sebagai berikut:

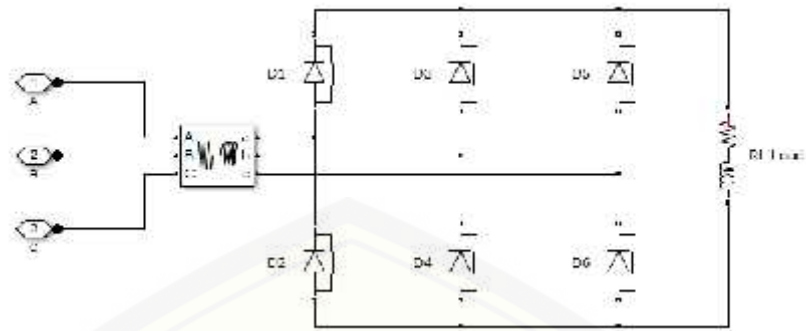
1. Pada beban nonlinier konstan

Rangkaian untuk beban nonlinier terdapat rangkaian RLC yang diparalel dengan rectifier 3 lengan dan pada sisi rectifier dibebani berupa resistor dan induktor yang diparalel seperti pada gambar 3.5 yang disertai dengan nilai rangkaiannya. dengan beban resistor 60 ohm dan inductor 20 mH

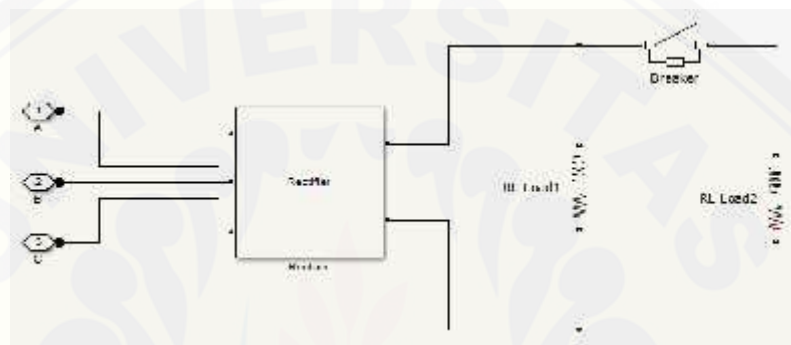
2. Pada beban nonlinier fluktuatif

Beban nonlinier fluktuatif merupakan beban yang terdiri dari rectifier dengan resistor 7 ohm inductor 200mH dan pada waktu 0,2 sekon mengalami penambahan beban beban 7 ohm dan inductor 20mH yang terhubung pada sistem.

Pada kondisi beban seperti yang telah disebutkan, maka akan menimbulkan distorsi harmonisa yaitu pada harmonisa orde ke-5, ke-7, ke-11, ke-13 dan seterusnya yang memenuhi persamaan  $3k+1$ , dimana k adalah bilangan integer. Besarnya distorsi harmonisa yang muncul di setiap fasa pun sama satu sama lain.



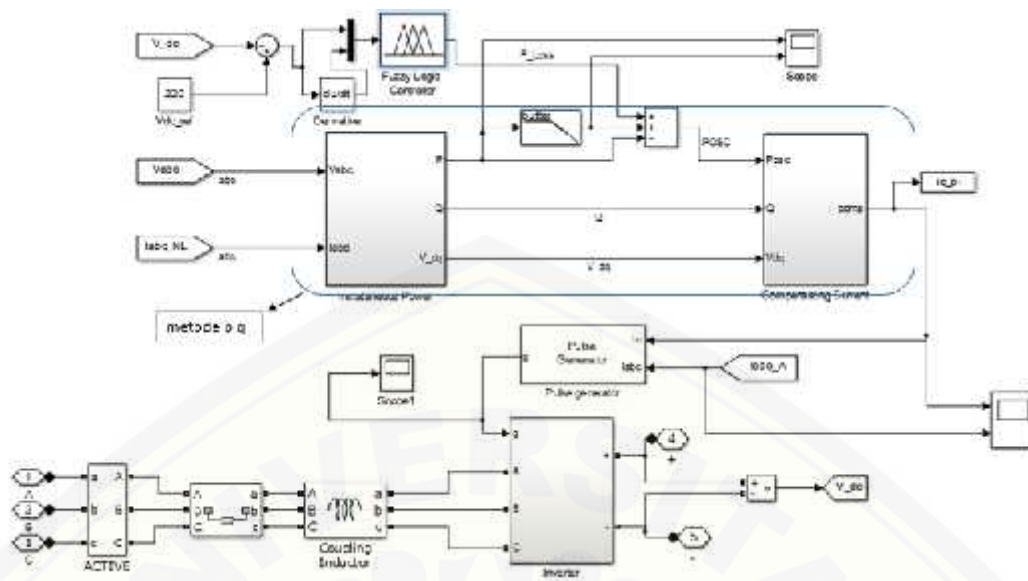
Gambar 3.5 Pemodelan beban nonlinier konstan



Gambar 3.6 Pemodelan beban nonlinier fluktuatif

### 3.3.3 Sistem Pengendalian *Shunt-APF*

Penelitian ini bertujuan merancang, menguji dan menganalisa *Shunt-APF* dengan menerapkan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p-q$  dalam perbaikan kualitas daya sebagai kompensasi harmonisa. Pada penelitian ini pemodelan sistem pengendalian *Shunt-APF* dalam simulink MATLAB R2013a yang mencakup blok: VSI, *coupling inductor*, *pulse generator*, blok metode  $p-q$ , sumber AC 3 fasa, sumber DC, beban dan blok kontrol FLC. Pemodelan sistem ditunjukkan pada gambar 3.7 berikut.

Gambar 3.7 Pemodelan sistem pengendalian *Shunt- APF*

### 3.3.3.1 Voltage Source Inverter (VSI)

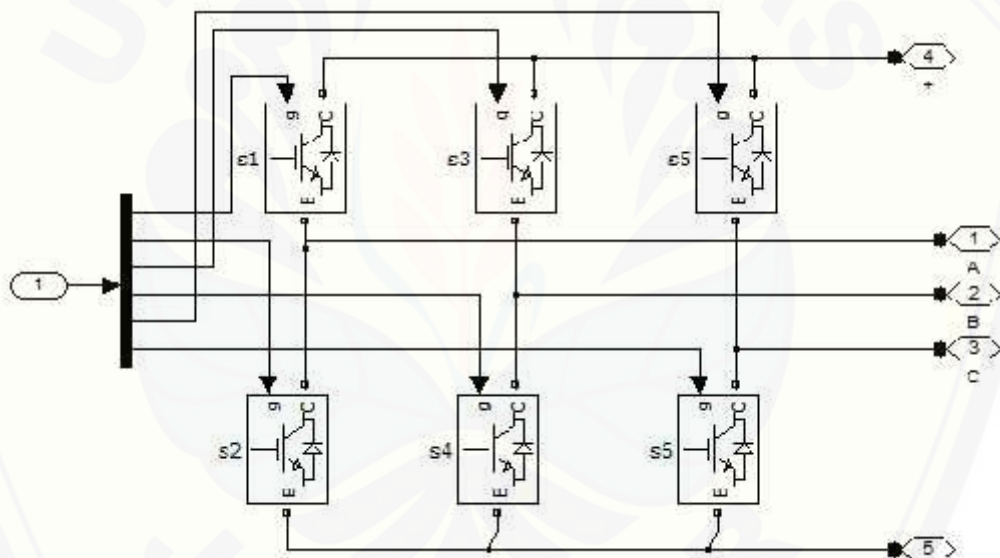
Pada sistem pengendalian *Shunt-APF* ini digunakan *voltage source inverter* (VSI). Penggunaan VSI didasarkan karena lebih sesuai sebagai inverter untuk filter aktif jika dibandingkan dengan *current source inverter* (CSI) dimana VSI memiliki efisiensi lebih tinggi, lebih rendah dalam biaya, dan lebih kecil dalam ukuran fisik.

Penggunaan VSI untuk memungkinkan pengaturan arus harmonisa pada filter aktif. Inverter ini menggunakan kapasitor dc sebagai suplai dan dapat melakukan proses *switching* pada frekuensi yang tinggi untuk menghasilkan sinyal yang mampu mengatasi arus harmonisa yang dihasilkan beban nonlinear. VSI yang digunakan pada sistem adalah rangkaian inverter dengan 6 buah IGBT. Inverter ini digunakan untuk melakukan proses *switching* pada IGBT untuk mereduksi harmonisa yang timbul pada beban. Penelitian ini dirancang dengan menggunakan beban nonlinier.

Kerja dari VSI sebagai filter daya aktif adalah dengan membangkitkan gelombang harmonisa sistem. Gelombang harmonisa dari sistem menjadi referensi dari inverter ini, dengan harapan rangkaian inverter dapat membangkitkan gelombang yang sama bentuk dan amplitudonya dengan gelombang harmonisa

sistem. Keluaran dari inverter akan diinjeksikan ke sistem sebagai kompensasi harmonisa.

Sistem berawal dari sensor arus yang berfungsi untuk untuk mengetahui bagaimana bentuk gelombang arus sumber yang mengalir ke beban non linier. Gelombang keluaran sensor arus akan mejadi referensi, tetapi harus difilter terlebih dahulu agar menjadi gelombang harmonisa saja tanpa fudamental. Untuk mendapatkan komponen harmonisa atau gelombang referensi, maka harus mengurangi arus beban sistem (arus terdistorsi) dengan komponen fundamental. Setelah itu didapatkan gelombang harmonisa yang menjadi referensi inverter. Pada penelitian ini rangkaian inverter yang digunakan pada Matlab R2013a seperti pada gambar 3.8 berikut.



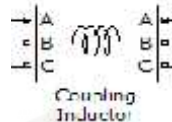
Gambar 3.8 Rangkaian VSI dengan 6 IGBT

### 3.3.3.2 Coupling Inductor

Pada rangkaian ekuivalen *Shunt-APF coupling inductor* berfungsi untuk menghubungkan antara *voltage source inverter* (VSI) dengan jaringan. Pada penelitian ini digunakan *Three-Phase Series RLC Branch* sebagai *coupling inductor* dengan *branch type L* dimana besar nilai induktasinya sebesar 15 mH. Blok



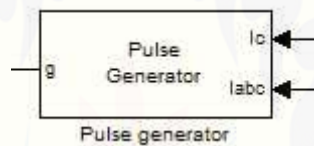
*coupling inductor* yang digunakan pada Matlab R2009a seperti pada gambar 3.9 berikut.



Gambar 3.9 Blok *coupling inductor*

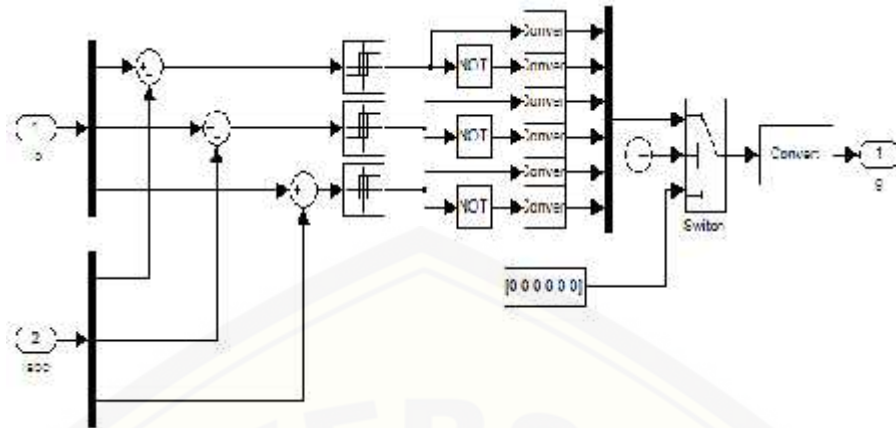
### 3.3.3.3 Pulse Generator

Pada rangkaian ekivalen sistem menerapkan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p$   $q$  untuk pengendalian *Shunt-APF* dalam perbaikan kualitas daya digunakan blok *pulse generator* yang ditunjukkan seperti gambar 3.10 berikut.



Gambar 3.10 Blok *pulse generator*

*Pulse generator* pada sistem digunakan untuk membangkitkan pulsa sebagai masukan dari *voltage source inverter* (VSI), yaitu dengan cara membandingkan nilai dari arus referensi dan arus yang terukur. Keluaran dari blok *pulse generator* ini adalah berupa pulsa yang akan membangkitkan VSI apakah harus bekerja (*On*) atau tidak bekerja (*Off*). Apabila arus yang terukur lebih besar dari arus referensi, maka *switch* akan diperintahkan untuk bekerja (*On*), demikian juga sebaliknya apabila arus yang terukur lebih kecil dari arus referensi maka *switch* akan diperintahkan untuk tidak bekerja (*Off*). Rangkaian ekivalen *pulse generator* ditunjukkan seperti gambar 3.11 berikut.



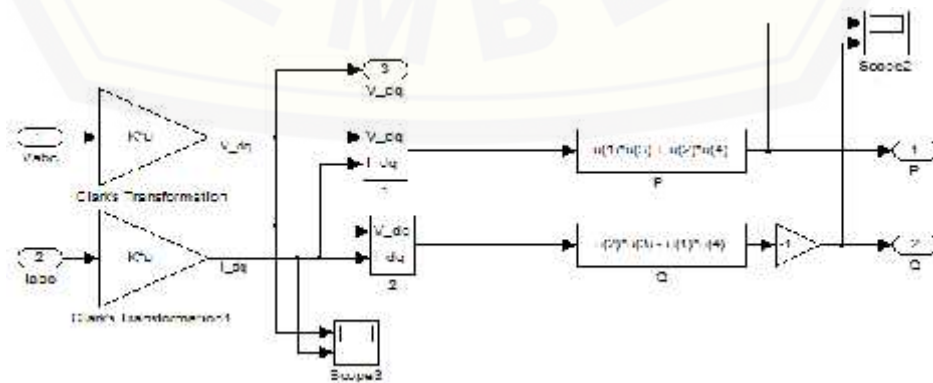
Gambar 3.11 Rangkaian ekivalen *pulse generator*

### 3.3.3.4 Kontroler Metode $p q$

Pengendalian terhadap *Shunt-APF* dilakukan dengan menggunakan penerapan *Fuzzy Logic Controller* pada metode  $p q$ . Metode  $p q$  yang digunakan dalam sistem terbagi menjadi dua blok yaitu blok *instataneous power* dan blok *compensating current*.

#### a. Blok *Instataneous Power*

Pada blok *instataneous power* dilakukan perhitungan untuk mendapatkan arus  $I_d$  dan arus  $I_q$ . Arus  $I_d$  dan arus  $I_q$  pada sistem dapat ditemukan melalui penerapan transformasi clark yang menyebabkan arus  $i_a, i_b, i_c$  direpresentasikan kedalam dua koordinat  $i$  dan  $q$  kemudian dengan rotasi referensi sistem sudut dimasukan ke dalam koordinat  $I_d$  dan  $I_q$  dengan perhitungan seperti pada rangkaian ekivalen blok *instataneous power* yang ditunjukkan pada gambar 3.12 berikut.



Gambar 3.12 Rangkaian ekivalen blok *instataneous power*

Pada rangkaian ekivalen blok *instataneous power* di atas, dapat diketahui bahwa nilai  $V_{dq}$  dan nilai  $I_{dq}$  diperoleh dari perkalian matrik  $k^*u$  yaitu dengan proses transformasi clark seperti persamaan 3.4 dan 3.5 berikut.

$$V_{dq} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

$$I_{dq} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

Hasil dari nilai  $V_{dq}$  dan nilai  $I_{dq}$  digunakan untuk mendapatkan nilai  $P$  dan  $Q$  dengan persamaan 3.6 dan 3.7 berikut.

$$P = (u(1) \times u(3)) + (u(2) \times u(4)) \quad (3.6)$$

$$Q = (u(2) \times u(3)) - (u(1) \times u(4)) \quad (3.7)$$

keterangan:

$$u(1) = V_{dq} (1)$$

$$u(2) = V_{dq} (2)$$

$$u(3) = I_{dq} (1)$$

$$u(4) = I_{dq} (2)$$

#### b. Blok *Compensating Current*

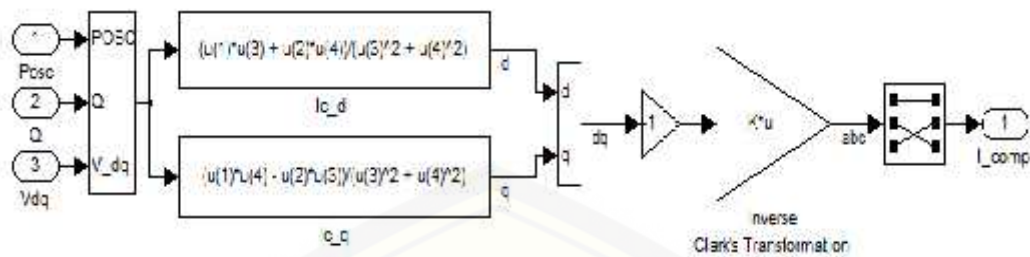
Pada blok *compensating current* ini hasil nilai  $P$ ,  $Q$  dan  $V_{dq}$  dari hasil blok *instataneous power* diolah sehingga menghasilkan nilai  $I_d$  dan  $I_q$  yang ditunjukkan pada persamaan 3.8 dan 3.9 berikut.

$$I_d = (u(1) \times u(3) + u(2) \times u(4)) / (u(3)^2 + u(4)^2) \quad (3.8)$$

$$I_q = (u(1) \times u(4) - u(2) \times u(3)) / (u(3)^2 + u(4)^2) \quad (3.9)$$

Dari persamaan  $I_d$  dan  $I_q$ , nilai  $I_d$  dan  $I_q$  ditransfomasikan menjadi  $i_a$ ,  $i_b$ , dan  $i_c$  dengan invers transformasi clark dengan perhitungan matrik perkalian  $k^*u$  seperti persamaan 3.10, sehingga akan menghasilkan arus kompensasi  $I_{comp}$ .

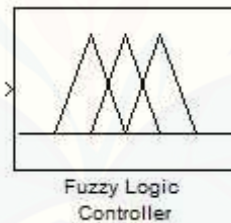
$$I_{abc} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$



Gambar 3.13 Rangkaian ekivalen blok *compensating current*

### 3.3.3.5 Fuzzy Logic Controller (FLC)

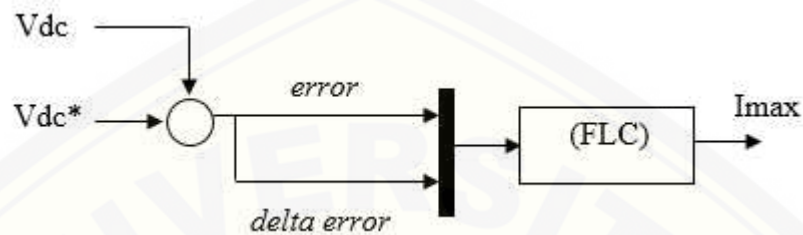
Pada penelitian ini *Fuzzy Logic Controller* (FLC) digunakan sebagai kontrol untuk mengendalikan metode  $p q$ . Dengan pengendalian pada metode  $p q$  arus kompensasi yang dihasilkan oleh *Shunt-APF* dapat menghasilkan reduksi harmonisa dan perbaikan faktor daya yang baik. Pada penelitian ini blok *simulink Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang digunakan pada Matlab R2013a seperti pada gambar 3.14.



Gambar 3.14 Blok *simulink Fuzzy Logic Controller* (FLC)

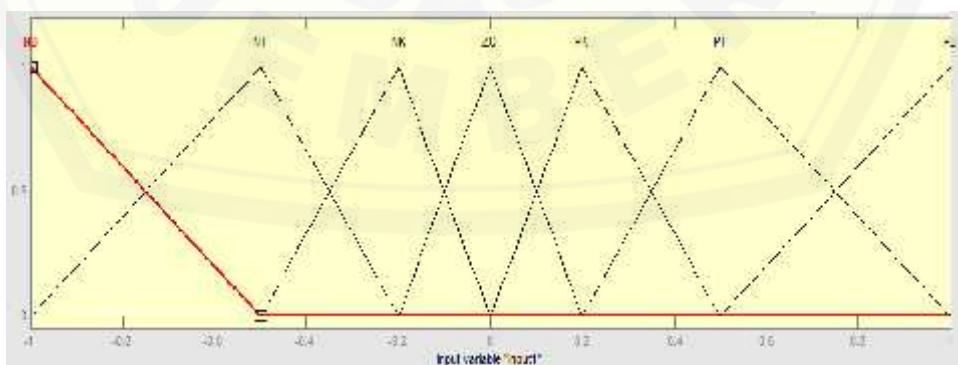
Dalam regulasi tegangan yang berbasis pada *Shunt-APF*, *Fuzzy Logic Controller* (FLC) bekerja dalam koordinat nilai  $dq$ , karena lebih konstan maka akan dapat memberikan kompensasi *error* lebih mudah dan cepat daripada jika *Fuzzy Logic Controller* (FLC) bekerja dalam koordinat nilai  $abc$ . *Fuzzy Logic Controller* (FLC) diterapkan untuk mengatur tegangan DC dari VSI pada *Shunt-APF* agar konstan yaitu dengan mengukur tegangan DC kapasitor ( $V_{dc}$ ) dan kemudian dibandingkan dengan nilai tegangan DC referensi ( $V_{dc}^*$ ). *Error* dan *delta error* yang diperoleh digunakan sebagai *input* untuk pengolahan *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Sedangkan untuk *output* dari *Fuzzy Logic Controller* (FLC) merupakan

amplitudo arus referensi  $I_{max}$  seperti pada diagram blok 3.15. Arus referensi  $I_{max}$  yang diperoleh akan dibandingkan dengan arus kompensasi penyangin sebenarnya dalam komparator histeresis, yang mana dipaksa untuk mengikuti referensi sehingga dapat memberikan arus kompensasi yang diperlukan untuk menghilangkan harmonisa arus.

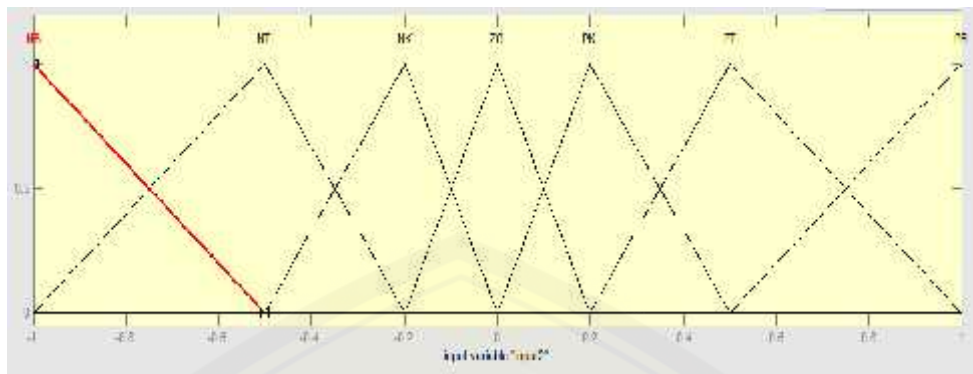


Gambar 3.15 Diagram blok *Fuzzy Logic Controller* (FLC)

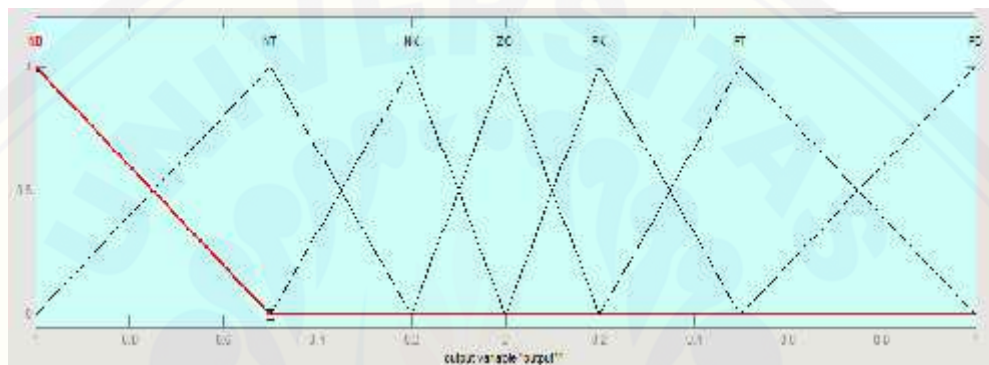
Pada sistem pengendalian ini, *Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang digunakan adalah tipe mamdani. Penggunaan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) diatur dengan menggunakan dua *input* dan satu *output*. *Input* dan *output* dari *Fuzzy Logic Controller* (FLC) ditentukan dengan pembuatan *membership function* yang ditunjukkan pada gambar 3.20. *Input1* sebagai *error*, *input2* sebagai *delta error* dan *output* amplitudo arus referensi  $I_{max}$  dimana ketiga *membership function* diatur dengan sama. Hal ini dimaksudkan untuk memperkecil atau menghilangkan *error* dari sistem sehingga sistem dapat bekerja secara optimal. Dimana *range* yang digunakan adalah -1 samapai 1 dengan tipe *membership function* adalah *trmf*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.20 Membership function (a) *input1* sebagai *error*, (b) *input2* sebagai *delta error*, (c) *output* sebagai amplitudo arus referensi *I<sub>max</sub>*

Persamaan *membership function* untuk *input1*, *input2* dan *output* diatur dengan sama yang ditunjukkan pada persamaan 3.11; 3.12 dan 3.13 berikut.

a. Fungsi keanggotaan NB:

$$\mu[x] = \begin{cases} (b - x) / (b - a); \\ 0; \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\mu[x] = \begin{cases} ((-0.5) - x) / ((-0.5) - (-1)); \\ 0; \end{cases}$$

b. Fungsi keanggotaan untuk NT, NK, ZO, PK, PT:

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x < a \text{ atau } x > c \\ (x - a) / (b - a); & a \leq x \leq b \\ (b - x) / (c - b); & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (3.12)$$

1. Fungsi keanggotaan NT

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & -1 \leq x \leq -0.5 \text{ atau } -0.5 \leq x \leq -0.2 \\ (x - (-1)) / ((-0.5) - (-1)); & -1 < x < -0.5 \\ ((-0.5) - x) / ((-0.2) - (-0.5)); & -0.5 < x < -0.2 \end{cases}$$

2. Fungsi keanggotaan NK

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & -1 \leq x \leq -0.5 \text{ atau } -0.2 \leq x \leq 0 \\ (x - (-0.5)) / ((-0.2) - (-0.5)); & -1 < x < -0.5 \\ ((-0.2) - x) / (0 - (-0.2)); & -0.2 < x < 0 \end{cases}$$

3. Fungsi keanggotaan ZO

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & -1 \leq x \leq -0.2 \text{ atau } 0 \leq x \leq 0.2 \\ (x - (-0.2)) / (0 - (-0.2)); & -0.2 < x < 0 \\ (0 - x) / (0.2 - 0); & 0 < x < 0.2 \end{cases}$$

4. Fungsi keanggotaan PK

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & -1 \leq x \leq 0 \text{ atau } 0.2 \leq x \leq 0.5 \\ (x - 0) / (0.2 - 0); & 0 < x < 0.2 \\ (0.2 - x) / (0.5 - 0.2); & 0.2 < x < 0.5 \end{cases}$$

5. Fungsi keanggotaan PT

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & -1 \leq x \leq 0.2 \text{ atau } 0.5 \leq x \leq 1 \\ (x - 0.2) / (0.5 - 1); & 0.2 < x < 0.5 \\ (0.5 - x) / (1 - 0.5); & 0.5 < x < 1 \end{cases}$$

c. Fungsi Keanggotaan PB

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x < a \\ (x - a) / (b - a); & a \leq x \leq b \\ 1; & x > b \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x < 0.5 \\ (x - 0.5) / (1 - 0.5); & 0.5 \leq x \leq 1 \\ 1; & x > 1 \end{cases}$$

Pada sistem untuk menjalankan FLC, *membership function* yang telah diatur dengan *rule base* dari *membership function* tersebut. Adapun *rule base* dari *membership function* FLC ditunjukkan pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 *Rule Base Fuzzy Logic Controller (FLC)*

<i>error/ error</i>	<b>NB</b>	<b>NT</b>	<b>NK</b>	<b>ZO</b>	<b>PK</b>	<b>PK</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	NB	NB	NB	NB	NT	NK	ZO
<b>NT</b>	NB	NB	NB	NT	NK	ZO	PK
<b>NK</b>	NB	NB	NT	NK	ZO	PK	PT
<b>ZO</b>	NB	NT	NK	ZO	PK	PT	PB
<b>PK</b>	NT	NK	ZO	PK	PT	PB	PB
<b>PT</b>	NK	ZO	PK	PT	PB	PB	PB
<b>PB</b>	ZO	PK	PT	PB	PB	PB	PB

keterangan:

NB: negatif besar, NT: negatif tengah, NK: negatif kecil, ZO: nol, PK: positif kecil, PT: positif tengah, PB: positif besar



## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari simulasi yang telah dilakukan menggunakan software MATLAB (2013a) dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

1. Sistem penerapan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p$   $q$  untuk pengendalian *Shunt-APF* dapat memperbaiki kualitas daya listrik berupa reduksi harmonisa arus dengan nilai THD memenuhi standar dari IEEE Std. 519-1992 dan memperbaiki nilai faktor daya.
2. Pada pengujian reduksi harmonisa arus sistem dengan pengendali FLC cukup efektif untuk semua beban pengujian, dimana sistem pengendali FLC mampu mereduksi harmonisa dari 26,06% menjadi 3,92% untuk beban nonlinier konstan dan dari 22,36% menjadi 7,36% untuk beban non linear fluktuatif.
3. Jumlah Switching pada MOSFET mempengaruhi frekuensi keluaran dari inverter, untuk mengatasi tetap sine wave modified maka dilakukan perubahan pada program delay sebesar 4 ms dengan frekuensi sebesar 50-60 hz

### 5.2 Saran

Sistem penerapan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada metode  $p$   $q$  untuk pengendalian *Shunt-APF* dalam perbaikan kualitas daya berupa reduksi harmonisa arus dan memperbaiki nilai faktor daya sudah mempunyai performansi yang sudah bagus, tetapi perlu digunakan metode yang lainnya sebagai alternatif pada permasalahan sistem ini, pengembangan ke arah implementasi dalam skala besar secara nyata sangat terbuka, karena dengan kemajuan teknologi baru serta dapat menjadikan produk yang langsung digunakan oleh konsumen.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Panchbhai, A, Parmar, S dan Prajapati, N. 2017. *Shunt Active Filter for Harmonic And Reactive Power Compensation Using p-q Theory*. Gujarat: Enggenius Classes dan Elect. Dept.
- Mikkili, S dan Panda, A.K. 2011. *Fuzzy and PI Controller Based SHAF for Mitigation of Current Harmonics with P-Q Method Using Matlab and RTDS Hardware*. Rourkela: National Institute of Technology.
- Setiyono. 2009. *Simulasi Perbaikan Kualitas Suplai Daya Beban Takseimbang Menggunakan Teori Instantaneous Power p-q dengan Matlab Simulink*. Jakarta: Teknik Elektro Universitas Gunadarma Jakarta.
- Syah, B. N. 2015. *Sistem Pengendalian Inverter Tiga Fasa Sebagai Ups, Kompensator Harmonisa Dan Faktor Daya Menggunakan Modified Synchronous Reference Frame*. Jember: Teknik Elektro Universitas Jember.
- Bin, Alias Azuan. 2007. *Modeling And Simulation Of Single Phase Inverter With PWM Using Matlab/Simulink*. Universitas Malaysia
- Dickson Ntoni, Amakye. 2014. "Control Of Inverter To support Bidirectional Power Flow In Grid Connected System". College of Engineering, Guindy, Anna University, Chennai
- IGNA Dwijaya S., M.Ashari, Imam Robandi. 2003. "Application of Fuzzy Logic Controller for Single Phase Multifunction Inverter". *Proceeding of CECI & SITIA*, Surabaya, Indonesia
- Kim, Kyung-Hwan. 2005. "Advanced Synchronous Reference Frame Controller For Three-Phase UPS Powering Unbalanced And Nonlinear Loads. Hanyang University. Korea
- Kurnia, Setiawan Dedy. 2010. "Diagonal Recurrent Neural Network Control of Four-Leg Inverter for Hybrid Power System Under Fluctuating Unbalanced Loads". Graduate School of Electrical Dept., ITS

## Lampiran

Tabel 1 arus ABC

IA	IB	IC
24,60695	0,027362	-24,6343
-0,02792	24,62416	-24,5962
-24,6113	24,58521	0,026085
-24,6199	20,24439	4,375528
-24,6313	-0,0266	24,65786
0,027486	-24,6449	24,61746
24,6309	-24,6046	-0,02634
24,63734	-20,2557	-4,38163
24,64662	0,026642	-24,6733
-0,02793	24,66035	-24,6324
-24,6436	24,6176	0,025966
-24,6487	20,27093	4,377797
-24,6576	-0,02681	24,68437
0,027885	-24,6695	24,64164
24,65275	-24,6259	-0,02689
24,65698	-20,2703	-4,38669
24,66434	0,026666	-24,691
-0,02793	24,67644	-24,6485
-24,6586	24,63189	0,026712
-24,6623	20,27231	4,390014
-24,6689	-0,027	24,69587
0,027296	-24,6801	24,65282
38,0011	-37,9744	-0,02666
43,22399	-32,0295	-11,1945
45,22436	0,02611	-45,2505
-0,02774	45,51306	-45,4853
-45,2234	45,19665	0,026795

IA	IB	IC
-45,282	33,18305	12,09897
-45,4054	-0,02629	45,43169
0,026862	-45,0899	45,06308
44,68929	-44,6633	-0,02602
44,82409	-32,936	-11,8881
45,06745	0,026794	-45,0942
-0,0268	44,84208	-44,8153
-44,4825	44,45593	0,026591
-44,6195	32,83546	11,78408
-44,8457	-0,02636	44,87207
0,027492	-44,6049	44,57736
44,24624	-44,2195	-0,02676
44,39829	-32,7004	-11,6978
44,65121	0,026796	-44,678
-0,02645	44,43624	-44,4098
-44,0991	44,07245	0,026677
-44,2683	32,62897	11,63935
-44,5316	-0,02634	44,55799
0,027207	-44,3243	44,2971
43,9946	-43,9679	-0,02668
44,172	-32,5738	-11,5982
44,44512	0,026696	-44,4718
-0,02679	44,24608	-44,2193

Tabel 2 tegangan ABC

VA	VB	VC
82,86621	30,4187	-113,285
-0,05107	101,5976	-101,546
-82,9341	113,3559	-30,4218
-117,308	58,63166	58,6766
-82,97	-30,3114	113,2814
-0,00548	-101,538	101,5439
82,94324	-113,332	30,38849
117,3023	-58,6759	-58,6264
82,93148	30,28304	-113,215
-0,04776	101,643	-101,595
-82,896	113,338	-30,442
-117,273	58,71618	58,55695
-82,9543	-30,3399	113,2942
0,073181	-101,6	101,5265
82,98736	-113,278	30,29095
117,2974	-58,6742	-58,6232
82,92786	30,28313	-113,211
-0,04895	101,6422	-101,593
-82,9791	113,3047	-30,3256
-117,306	58,63505	58,67125
-82,888	-30,3716	113,2596
-0,06171	-101,53	101,5922
82,6867	-112,916	30,22974
116,2733	-58,1962	-58,0771
81,74354	29,83718	-111,581
-0,10932	99,73989	-99,6306
-81,1526	110,7449	-29,5923
-114,361	57,25943	57,10196

VA	VB	VC
-80,7687	-29,5884	110,3571
81,03576	-110,717	29,68145
114,8927	-57,4724	-57,4202
81,26759	29,83256	-111,1
0,048838	99,75193	-99,8008
-81,462	111,2021	-29,7401
-115,112	57,57786	57,5341
-81,3268	-29,7695	111,0963
0,068458	-99,738	99,66952
81,48493	-111,193	29,70829
115,0745	-57,5137	-57,5608
81,32448	29,84101	-111,165
0,102248	99,62762	-99,7299
-81,3959	111,1183	-29,7224
-115,088	57,55337	57,5342
-81,3483	-29,7454	111,0938
0,009928	-99,7125	99,70253
81,51381	-111,241	29,7268
115,1505	-57,5661	-57,5844
81,40997	29,83776	-111,248
0,04332	99,6631	-99,7064

Tabel 3 Input dan Output pulse generator

<b>ICOM A</b>	<b>ICOM B</b>	<b>ICOM C</b>	<b>IF A</b>	<b>IF B</b>	<b>IF C</b>	<b>S1</b>	<b>S3</b>	<b>S5</b>
-0,016	1,417	-1,401	-0,872	1,375	-0,503	1	1	0
-5,768	-1,171	6,938	-5,368	-1,255	6,623	0	1	1
2,297	6,791	-9,088	2,241	6,843	-9,084	1	0	1
-5,479	6,970	-1,491	-5,412	7,007	-1,595	0	0	1
0,029	-1,415	1,386	0,307	-0,805	0,498	0	0	1
5,768	1,170	-6,937	5,477	1,479	-6,956	1	0	1
-2,289	-6,787	9,076	-2,616	-6,633	9,250	1	0	0
5,479	-6,973	1,494	5,376	-6,960	1,584	1	0	0
-0,017	1,421	-1,404	-0,171	1,531	-1,360	1	0	0
-5,784	-1,168	6,952	-5,685	-1,071	6,755	0	0	1
2,281	6,788	-9,069	2,563	6,722	-9,285	0	1	1
-5,492	6,983	-1,490	-5,615	7,388	-1,773	1	0	1
0,011	-1,422	1,410	0,094	-1,441	1,347	0	0	1
5,766	1,155	-6,921	5,607	1,658	-7,265	1	0	1
-2,297	-6,788	9,084	-2,646	-6,631	9,277	1	0	0
5,484	-6,978	1,494	5,358	-6,959	1,601	1	0	0
-0,017	1,425	-1,408	-0,183	1,540	-1,356	1	0	0
-5,778	-1,149	6,927	-5,530	-1,388	6,918	0	1	1
2,297	6,797	-9,094	2,218	6,905	-9,123	1	0	1
-5,504	6,995	-1,491	-4,964	7,071	-2,107	0	0	1
0,041	-1,434	1,393	0,076	-1,425	1,348	0	1	1
16,124	-8,099	-8,025	16,304	-7,765	-8,539	0	0	1
5,596	-13,196	7,600	5,709	-13,551	7,842	0	1	0
14,085	-11,340	-2,745	14,093	-11,461	-2,632	1	1	0
0,018	3,498	-3,516	-0,500	3,705	-3,205	1	0	0
-7,936	-5,687	13,624	-7,868	-6,406	14,274	0	1	0
<b>ICOM A</b>	<b>ICOM B</b>	<b>ICOM C</b>	<b>IF A</b>	<b>IF B</b>	<b>IF C</b>	<b>S1</b>	<b>S3</b>	<b>S5</b>

---

10,917	5,045	-15,962	11,356	5,333	-16,688	0	0	1
-4,799	14,849	-10,050	-4,513	14,893	-10,381	0	0	1
0,032	3,138	-3,170	0,255	2,949	-3,204	0	1	1
6,967	6,876	-13,843	7,120	7,238	-14,359	0	0	1
-6,446	-7,289	13,736	-6,536	-7,195	13,730	1	0	0
9,931	-12,872	2,941	9,819	-12,799	2,980	1	0	0
-0,047	3,174	-3,127	0,127	3,131	-3,258	0	1	1
-10,636	-1,748	12,383	-10,511	-1,930	12,441	0	1	0
3,950	8,542	-12,491	4,213	8,815	-13,028	0	0	1
-9,962	12,743	-2,780	-9,526	13,095	-3,568	0	0	1
-0,002	-2,276	2,278	0,379	-2,421	2,043	0	1	1
9,795	2,792	-12,587	10,171	2,922	-13,093	0	0	1
-4,461	-8,281	12,742	-4,809	-8,036	12,846	1	0	0
10,020	-12,681	2,660	9,308	-12,380	3,073	1	0	0
-0,069	2,706	-2,637	0,327	2,151	-2,478	0	1	0
-10,131	-2,300	12,431	-10,135	-2,817	12,952	1	1	0
4,149	8,416	-12,565	4,143	8,697	-12,840	1	0	1
-10,003	12,599	-2,596	-9,425	12,338	-2,913	0	1	1
0,023	-2,552	2,529	0,460	-2,221	1,761	0	0	1
9,972	2,462	-12,434	10,208	2,700	-12,908	0	0	1
-4,270	-8,357	12,626	-4,277	-8,434	12,711	1	1	0
9,964	-12,611	2,647	9,955	-12,412	2,457	1	0	1
-0,045	2,590	-2,545	0,072	1,647	-1,719	0	1	0
-10,031	-2,419	12,450	-9,830	-2,461	12,291	0	1	1
4,227	8,363	-12,590	4,522	8,478	-13,000	0	0	1

---



Tabel 4 Tegangan DC

---

V dc
0,0394847732586030
0,0405409921385798
0,0405850000948851
0,0406289812694880
0,0409368840611198
0,0506719800065354
0,0507124666296543
0,0507529274205410
0,265704807806289
0,265746210398987
0,265870322717267
0,265911661334071
7,17153188077430
7,58066671976942
8,00145843843070
8,43388093340309
8,87790770766343
9,33351187145088
9,80066614320738
10,2793428505283
10,7695139311231
11,2711509337864
11,7842250193792
12,3087069618207
42,2603217713412
43,2227343972085
44,1949926780211

---

---

V dc

---

130,669164288899

132,195874424417

133,728580834130

135,267219488269

136,811726148565

138,362036370307

139,918085504400

141,479808699431

143,047140903750

144,620016867540

146,198371144913

147,782138095996

948,857372895931

946,911698486742

944,946300048215

942,961223196450

940,956514127401

2564,67127955921

2560,86270742281

2556,98055338941

2553,03382398978

2551,54503350963

2551,26416383066

2550,93705777782

4903,76023983341

4903,87802035055

4904,15842271147

4904,02243509645

