

LAPORAN RESEARCH GRANT

MILIK PERPUSTAKAAN  
UNIV. NEGERI PADANG

MINIMISASI HARMONISA TEGANGAN DAN ARUS  
PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA



PERPUSTAKAAN UNIV. NEGERI PADANG
NO. TERIMA: 24-2-09
SURAT/NO. Hd. /
KOLEKSI: KFI
NO. INVENTARIS: 67/HA/2009 - M. (1)
OLEH: 621-3 Ars M.1

Drs. CHAIDIR ARSYAD  
MULDI YUHENDRI, SPd

Penelitian ini dibiayai oleh:  
Technological and Professional Skill Development Sector Project  
(ADB Loan No. 1792-NO  
Nomor : 573/TPSDP-UNP/RS/X/2006  
Tanggal : 9 Oktober 2006

FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO  
UNIVERSITAS NEGERI PADANG  
2006

# MINIMISASI HARMONISA TEGANGAN DAN ARUS PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Drs. Chaidir Arsyad<sup>1)</sup>; Muldi Yuhendri, SPd<sup>2)</sup>

Dosen Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang  
Research Grant TPSDP Batch III tahun 2006

## Abstrak

Hamonisa merupakan salah satu gangguan yang terjadi dalam system tenaga listrik, akibat memberikan distorsi harmonic pada geombang tegangan dan arus. Frekuensi harmonic yang lebih tinggi dari frekuensi fundamentalnya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya motor induksi disamping motor induksi sendiri membangkitkan harmonic. Hasil pengamatan terhadap motor induksi dengan Power Harmonics Analyzer Fluke 41B terdapat distorsi harmonic total pada tegangan  $V_{THD}$  berkisar 1,2 s.d 1,46%, untuk arus  $I_{THD}$  berkisar 2,56 s.d 4,65% dan Dpf berkisar 0,67 s.d 1,00. Dalam hal ini sangat kecil bila dibandingkan dengan batas distorsi yang diizinkan, tetapi pengaruh harmonic bersifat kumulatif. Usaha untuk mengurangi atau meredam pengaruh harmonic dapat dilakukan beberapa cara, tapi dalam penelitian ini penulis malakukan dengan memasang filter hamonik.

Fiter harmonic yang peneliti mengusulka adalah hybrid filter aktif, dimana gabungan antara filter pasif dengan filter aktif. Pada hybrid filter aktif terdapat beberapa metoda, dalam hal ini penulis menggunakan hybrid filter aktif antara filter pasif (interface filter) dihubungkan seri dengan fiter aktif.

Untuk pengetahui performen dari hybrid filter aktif tersebut, lewat simulasi menggunakan perangkat lunak PSIM. Hasil simulasi didapatkan kesimpulan bawah dengan menggunakan jenis filter ini, arus harmonic dapat diredam dengan baik.

Ujicoba hybrid filter aktif, pada interface filter besar kapasitor  $38 \mu F/308V_{ac}$  dan konduktor  $0,002mH$ , sedangkan pada Mosfet inverter kapasitor  $20 \mu F/300V_{dc}$ . Pengukuran dengan Power Harmonic Analyzer Fluke 41B, diperoleh  $V_{THD} = 0,08\%$  lebih kecil,  $I_{THD} = 0,48\%$  lebih kecil, Dpf = 0,09 lebih besar dan Tpf = 0,28 lebih besar..

Dengan demikian hasil penelitian Minimisasi Harmonisa Tegangan Dan Arus Pada Motor Induksi Tiga Fasa, menggunakan peralatan hybrid filter aktif dapat meredam atau mengurangi harmonisa orde  $3^{th}$ ,  $5^{th}$ ,  $7^{th}$ ,  $9^{th}$  dan  $13^{th}$  dengan baik.

Keywords: Harmonisa, Interface Filter, PI, PWM, Mosfet Inverter.

## LEMBARAN IDENTITAS

### MINIMISASI HARMONISA TEGANGAN DAN ARUS PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Ketua Peneliti : Drs. Chaidir Arsyad  
Jenis kelamin : Laki-laki  
Pangkat/Golongan : Lektor Kepala / IVb  
NIP : 130353270  
Perguruan Tinggi : Universitas Negeri Padang  
Kantor/Unit Kerja : Fakultas Teknik / Teknik Elektro  
Alamat Kantor : Jl. Prof. Dr. Hamka Air Tawar Padang 25131

## LEMBAR PENGESAHAN

### MINIMISASI HARMONISA TEGANGAN DAN ARUS PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Ketua Peneliti : Drs. Chaidir Arsyad  
Anggota : Muldi Yuhendri, SPd  
Mahasiswa 1 : Mhd Palid Hsb  
Mahasiswa 2 : M Teguh Ferdian  
Mahasiswa 3 : Fajri Sugendhi  
Total Biaya : Rp 29.690.000,- (Dua puluh sembilan juta enam ratus sembilan  
Puluh ribu rupiah)  
Waktu Penelitian : 6 (enam) bulan

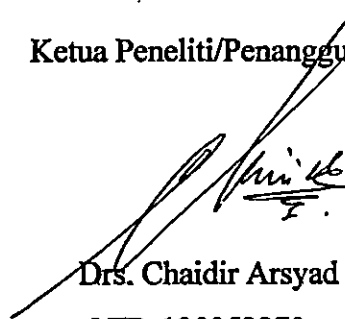
Menyetujui:

Ketua program Studi,

Ketua Peneliti/Penanggung Jawab,



Drs. Amirin Supriyatno, M.Pd  
NIP. 130806176



Drs. Chaidir Arsyad  
NIP. 130353270

Mengetahui:



Drs. Ahyanuardi. MT  
NIP. 131474854

## DAFTAR ISI

	Hal
ABSTARK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	v
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakag	1
B. Perumusan Masalah	3
C. Tujuan	3
D. Manfaat Penelitian	4
BAB II. Tinjauan Pustaka	5
A. Harmonisa Pada Motor Induksi	5
B. Meredam Harmonisa Yang Dibangkitkan Motor Induksi	8
1. Gelombang Genap	10
2. Gelombang Ganjil	12
C. Konsep Deret Fourier	13
D. Konsep Daya Listrik	15
E. Hibrid Filter Aktif	16
1. Filter Aktif	16
2. Filter Pasif	18
3. Pulse Width Modulation (PWM)	19
a). Single Pulse Width Modulation	19
b). Multiple Pulse Width Modulation	20
c). Sinusoidal Pulse Width Modulation	21
BAB III. Pendekatan Fungsional Dan Struktural	23
A. Metoda Penelitian	23
B. Pendekatan Fungsional.	23
1. Standar Kualitas Energi Listrik Terhadap Harmonisa	24
2. Hasil Pengukuran Kandungan Harmonik Dengan Analyzer	24
3. Fungsi Komponen Terbentuk Hibrid Filter Aktif	28
C. Pendekatan Struktural.	32
BAB IV. Prototipe, Hasil Ujicoba Dan Pembahasan.	36
BAB V. Kesimpulan Dan Saran	
A. Kesimpulan	
B. Saran	
PERPUSTAKAAN.	

## Daftar Tabel

	Hal
1. Tabel 3.1 Standar Distorsi Harmonik IEC 555/IEEE 519-1992	24
2. Tabel 3.2 Standar Voltage Distortion Limit (in %f V)	24
3. Tabel 3.3 Motor Induksi Dalam Hubungan Star (Y)	25
4. Tabel 3.4 Spektrum Amplitudo Harmonisa Arus Orde Ganjil $h_1$ s.d $h_{20}$	25
5. Tabel 3.5 Motor Induksi Dalam Hubungan Delta ( $\Delta$ )	26
6. Tabel 3.6 Spektrum Amplitudo Harmonisa Arus Orde Ganjil $h_1$ s.d $h_{20}$	27

## Daftar Gambar

	Hal
1. Gambar 2.1 Distribusi Kerapatan Flux	6
2. Gambar 2.2 Bentuk Gelombang Tegangan	9
3. Gambar 2.3a Bentuk Gelombang Genap	10
4. Gambar 2.3b Bentuk Gelombang Ganjil	10
5. Gambar 2.4 Rangkaian Low Pass Filter	16
6. Gambar 2.5 Rangkaian High Pass Filter	17
7. Gambar 2.6 Single Pulse Width Modulation	20
8. Gambar 2.7 Multiple Pulse Width Modulation	20
9. Gambar 2.8 Sinusoidal Pulse Width Modulation Segitiga	22
10. Gambar 3.1 Spektrum Tegangan Hubungan Star Harmonisa Ganjil	25
11. Gambar 3.2 Spektrum Arus Hubungan Star Harmonisa Ganjil	26
12. Gambar 3.3 Spektrum Tegangan Hubungan Delta Harmonisa Ganjil	27
13. Gambar 3.4 Spetrum Arus Hubungan Delta Harmonisa Ganil	27
14. Gambar 3.5 Diagram Hibrid Filter Aktif	28
15. Gambar 3.6 Power Supply	28
16. Gambar 3.7 Rangkaian IC Sensor	29
17. Gambar 3.8 Rangkaian IC Komparator	30
18. Gambar 3.9 Rangkaian IC Op-amp	30
19. Gambar 3.10 Rangkaian IC Drive Gate Mosfet	30
20. Gambar 3.11 Rangkaian Mosfet Inverter	31
21. Gambar 3.12 Rangkaian Interface Filter	32
22. Gambar 3.13 Gelombang Arus Fundamental Tanpa Hibrid Filter Aktif	33
23. Gambar 3.14 Gelombang Arus Cacat Tanpa Hibrid Filter Aktif	33
24. Gambar 3.15 Rangkaian Simulasi Model Hibrid Filter Aktif	34
25. Gambar 3.16 Gelombang Arus Injeksi Telah Pasang Hibrid Filter Aktif	35
26. Gambar 3.17 Gelombang Arus Line Beban Telah Pasang Filter	35
27. Gambar 3.18 Gelombang Arus Terminal Sumber Talah Pasang Filter	35

# BAB I

## PENDAHULUAN

### A. Latar belakang

Harmonisa merupakan salah satu gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik akibat distorsi gelombang tegangan dan arus. Gangguan terjadi disebabkan pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda dari frekuensi dasarnya (frequency fundamental). Gelombang-gelombang ini menempel pada gelombang dasar sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang dasar dengan gelombang harmonisanya. Timbulnya gelombang harmonisa dalam sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi jenis beban. Jenis beban sistem tenaga listrik dikenal dua jenis yaitu beban linier dan beban non linier.

Beban linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linier artinya daya yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Sedangkan beban non linier adalah bentuk gelombang keluaran tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap siklus, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya balik melalui kawat netral tidak sama dengan nol (mengalami distorsi).

Pada dasarnya, harmonik adalah gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat (harmonisa orde ke  $h$ ) dengan frekuensi dasarnya. Hal ini disebut frekuensi harmonisa yang timbul dalam bentuk gelombang aslinya, sedangkan harmonisa orde ( $h$ ) pengali frekuensi dasar yang disebut angka urutan harmonisa. Bila suatu sistem tenaga listrik yang mempunyai frekuensi dasar 50 Hz, maka frekuensi harmonisa keduanya adalah gelombang dengan frekuensi sebesar  $(2 \times 50 \text{ Hz}) = 100 \text{ Hz}$ . Untuk harmonisa ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar  $(3 \times 50 \text{ Hz}) = 150 \text{ Hz}$  dan demikian seterusnya.

Sumber-sumber harmonik disebabkan peralatan listrik seperti magnetisasi transformator yang tidak linier, putaran motor induksi, electroplating, lampu fluorescent dan lain-lain. Akibat polaritas dari komponen harmonik urutan berpengaruh pada motor induksi pada sistem distribusi medan magnet putar arah maju (forward) timbul panas, sedangkan komponen harmonik urutan negatif menimbulkan magnet putar arah mundur (reverse) arah putaran motor berubah nol dan tidak akan timbul panas, tetapi menambah arus pada kawat netral.



Frekuensi harmonisa yang lebih tinggi dari fekuensi dasarnya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya motor induksi disamping motor induksi sendiri membangkitkan juga harmonisa. Adanya harmonisa tegangan dan arus suatu sumber dapat menyebabkan kerugian-kerugian sebagai berikut, Syafrudin. [18];

1. Dapat memperpendek usia (umur) isolasi motor induksi.
2. Berubah-ubahnya reaktansi induktif motor akan rendahnya faktor daya dan berbeda hasil pengukuran daya, torsi motor induksi bila menggunakan alat ukur jenis elektromekanis dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.
3. Motor induksi sebagai beban, akan menimbulkan resonansi mekanik yang menyebabkan suara bising (riuh) dan perputaran motor yang tersendat-sendat.
4. Merusak sistem pengaman karena bekerja dibawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenal. Pemutusan relai pengaman beban yang dapat terhindar dari gangguan harmonik pada umumnya adalah pemutus beban yang mempunyai respon terhadap arus rms sebenarnya (true-rms-current) atau kenaikan temperatur karena arus lebih.

Usaha untuk mengurangi (minimisasi) harmonisa dapat dilakukan beberapa cara pada peralatan sistem tenaga listrik (motor induksi) antara lain;

- a. Memperbesar kawat netral
- b. Menurunkan kapasitas suplay daya listrik (deating transformator).
- c. Memasang peralatan proteksi filter harmonisa (harmonic filter).
- d. Memasang peralatan proteksi reaktor blok (bloking reactor) atau
- e. Memasang peralatan bank kapasitor (capacitor bank).

Hasil pengamatan oleh Agung Nugroho [11] terhadap lima jenis motor induksi dari berbagai merek, berdasarkan pengukuran amplitudo harmonis arus yang muncul pada order harmonis ke 3, ke 5, ke 7 dan ke9. Amplitudo harmonis ke 5 mempunyai besaran tertinggi setelah amplitudo harmonis arus ke 1 yaitu arus fundamental. Sedangkan total harmonic distortion (THD) tidak meningkat sebanding dengan meningkatnya tegangan dan harganya cukup kecil. Penelitian tentang peredaman harmonisa pada Vacuum Casting Induction Furnace dengan daya 9 kW simulasi Active Filter oleh Yusak Tanodo Cs [20]. Dengan menggunakan active filter dimana tanpa menggunakan active filter  $\%I_{THD}$  yaitu 32,85%, sedangkan saat menggunakan active

filter diperoleh  $\%I_{THD}$  menjadi 5,14%, Sedangkan untuk  $\%V_{THD}$  yaitu 3,82% hal ini dapat diterima karena standart THD untuk tegangan yaitu 5%.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan masalah gelombang tegangan dan arus harmonisa, untuk minimisasi harmonisa yang ditimbulkan oleh motor induksi tiga fasa, peneliti mencoba melakukan penelitian dengan judul "*Minimisasi Harmonisa Tegangan Dan Arus Pada Motor Induksi Tiga Fasa*". Penelitian ini untuk minimisasi distorsi harmonisa dengan hybrid filter aktif, sehingga bentuk gelombang tegangan maupun arus yang idealnya mendekati sinusoidal murni.

## **B. Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang masalah seringkali terjadi gangguan disebabkan pengaruh harmonik pada motor-motor induksi menurunnya efisiensi atau terjadinya kerugian daya. Dengan beberapa masalah yang terdapat pada motor-motor induksi akibat timbulnya gelombang harmonisa tegangan dan arus dapat dilakukan mereduksi (pengurangan atau menghilangkan) dari harmonisa ganjil saja dengan pemasangan filter harmonik, maka dapat dirumuskan masalah dengan pemberian filter reaktor blok (bloking reactor filter) pada beban non linier, dapat dirumuskan ;

1. Berapa besar nilai gelombang harmonisa tegangan dan arus yang ditimbulkan oleh motor-motor induksi dalam kondisi fasa tak seimbang.
2. Berapa besar total harmonic derating factor (THDF) pengaruh kinerja motor induksi terhadap kinerja, efisiensi dan kenaikan temperatur.
3. Berapa besar pengaruh meningkatnya tegangan suplai motor induksi, harmonisa ke (h) juga meningkat sebanding dengan besarnya tegangan.

## **C. Tujuan**

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Dapat dilakukan untuk mengurangi harmonik pada motor induksi yang akan mempengaruhi sistem distribusi tenaga listrik.
2. Pada sistem 3 fasa empat kawat mendapat beban non linier, sehingga pengaruh harmonik lebih dominan maka timbul panas berlebihan pada kawat netral.
3. Dengan mereduksi pengaruh harmonik yang ditimbulkan oleh motor-motor induksi juga dapat memperbaiki faktor kerja dari motor-motor tersebut.

4. Menentukan daya penghantar, efisiensi dan pengaruh harmonisa pada instalasi tenaga listrik di Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.

#### **D. Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan informasi kepada Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang tentang :

1. Motor-motor induksi yang digunakan pada laboratorium, work shop dan bengkel tidak terjadi kesalahan ukur kWh meter pada rekening UNP pembayaran listrik ke PLN..
2. Sistem distribusi tenaga listrik pada UNP terutama pada FT akan memberikan kualitas listrik yang lebih baik dan handal dengan mengurangi pengaruh harmonik pada sistem instalasi tenaga listrik, bila setiap motor-motor dipasang hybrid aktif filter harmonik.
3. Dapat lebih meningkatkan pengetahuan tentang harmonik pada peralatan-peralatan yang mengkonsumsi tenaga listrik.
4. Dengan melakukan perbaikan sistem distribusi listrik terhadap pengaruh harmonik, maka sistem instalasi yang ada tidak perlu mengadakan pergantian kawat netral karena mendapat panas yang berlebihan saat operasi.

## BAB II

### Tinjauan Pustaka

#### A. Harmonisa Pada Motor Induksi.

Motor induksi adalah suatu peralatan listrik yang merubah energi listrik menjadikan energi mekanik dalam bentuk mekanik putar. Energi listrik yang suplay ke motor induksi tiga fasa adalah arus ac (arus bolak balik) dalam bentuk sinusoidal murni. Motor induksi tiga fasa yang terdiri dari stator dan rotor, saat motor beroperasi timbul suatu proses magnetisasi di stator maupun di rotor. Hal ini akan menimbulkan suatu injeksi gelombang magnetisasi ke jaringan sumber daya, sehingga akan timbulnya kecacatan gelombang tegangan dan arus pada jaringan tersebut. Kecacatan (gangguan) gelombang tegangan dan arus dari suatu sumber energi listrik yang biasa disebut harmonisa tegangan dan arus.

Hamonisa tegangan dan arus ini akan lebih meningkatnya rugi-rugi yang dikandung pada motor induksi (motor listrik) dalam rangkaian motor seperti terdapat pada laminasi stator dan rotor sehingga efisiensi mesin menurun akibat panas yang berlebihan karena pengaruh harmonisa. Pengaruh harmonisa tegangan dan arus pada motor induksi akan mengakibatkan efek kulit laminasi inti besi (stator and rotor iron) seperti arus eddy (eddy current), rugi-rugi inti (losses iron) ini lebih besar dibandingkan rugi-rugi yang disebabkan arus searah (direct current).

Menurut P C.Sen [13], motor induksi terbangkitnya harmonisa terjadi pada alur-alur (slots) antara stator dan rotor yang disebabkan adanya kejenuhan dari rangkaian magnetic dalam inti motor tersebut.

Sedangkan muncul mengahasikan . Harmonisa yang timbul bisa menimbulkan panas pada peralatan listrik, hal ini terjadi karena adanya energi listrik yang berlebihan. Munculnya harmonisa karena peralatan, hal ini karena adanya sirkulasi arus akibat panas yang berlebihan. Sehingga bisa mengurangi kemampuan peralatan proteksi yang menggunakan power line carrier sebagai detektor kondisi normal. Dalam hal ini ketepatan dan kehandalan dalam mendekteksi kualitas daya listrik bisa diperoleh. Apabila terdapat ketidak seimbangan antara fasa satu dengan fasa yang lainnya sebesar 3% saja dapat menimbulkan meningkatnya suhu motor, suara bising karena motor dengan kecepatan tinggi, Yusmin Sutanto [15].

Timbulnya arus harmonisa pada motor induksi diasumsikan saat arus yang dilalui belitan fasa akan menghasilkan magnetomotive force (mmf) tidak sinusoidal pada celah

udara antara stator dan rotor, arus fasa dalam mesin induksi tiga fasa sebagai berikut, P.C Sen[13];

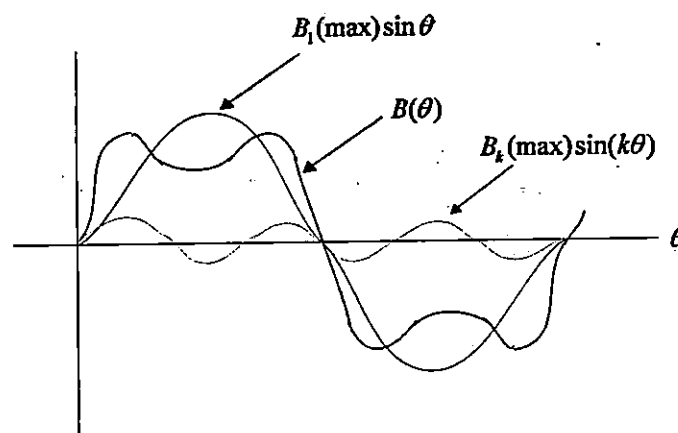
$$i_a = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\max)} \cos(h\omega t) \quad (2.1)$$

$$i_b = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\max)} \cos(h\omega t - 120^\circ) \quad (2.2)$$

$$i_c = \sum_{h=1}^{\infty} I_{h(\max)} \cos(h\omega t + 120^\circ) \quad (2.3)$$

Magnetomotive force (mmf) dalam kondisi fundamental dapat diperoleh sebagai berikut:

$$F_1(\theta, t) = F_{1(\max)} [\cos \omega t \cos \theta + \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) + \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ)] \\ = 3/2 F_{1(\max)} \cos(\theta - \omega t) \quad (2.4)$$



Gambar 2.1. Distribusi kerapatan flux

Sedangkan persamaan gelombang mmf harmonisa tiga fasa sebagai berikut :

$$F_h = 3/2 F_{h(\max)} \cos(\theta \pm h\omega t) \text{ dan } h = km \pm 1 \quad (2.5)$$

Dimana, h = orde harmonisa

k = konstanta bilangan bulat 1,2,3,..dan selanjutnya

m = merupakan jumlah pulsa yang diperlukan

Dengan sumber tegangan yang mengandung harmonisa akan terjadi perubahan kecepatan sinkron motor sehingga pada harmonisa  $h^{th}$  gelombang harmonisa diperoleh kecepatan sebagai berikut:

$$n_{s(h)} = \frac{n_s}{n_h} = \frac{120 \cdot f}{hp} \quad (2.6)$$

Faktor belitan ( $K_w$ ) dari motor induksi kondisi fundamental adalah:

$$1. \text{ Faktor diatribusi belitan stator motor } (K_d) = \frac{\text{Sin}(g_{s/p} \alpha / 2)}{g_{s/p} \text{Sin}(\alpha / 2)} \quad (2.7)$$

$$2. \text{ Faktor kisar belitan } (K_p) = \text{Cos}(y/2)$$

Dimana:

$$\alpha = \frac{180^\circ}{\text{Slot / pole / fasa}} = \frac{180^\circ}{g_{s/p}}$$

$y$  = Perpendekan kisar belitan kumparan stator motor

$$\text{Maka diperoleh faktor belitan } K_w = K_d \cdot K_p \quad (2.8)$$

Bila sumber tegangan mengandung harmonisa akan memberikan pengaruh pada motor induksi, terutama akan terjadi perubahan nilai pada faktor belitan. Faktor belitan yang terdiri dari factor distribusi belitan dan factor kisar belitan yaitu:

a. Faktor diatribusi belitan distorsi stator motor

$$(K_{dh}) = \frac{\text{Sin}(hg_{s/p} \alpha / 2)}{g_{s/p} \text{Sin}(h\alpha / 2)} \quad (2.9)$$

b. Faktor kisar belitan distorsi

$$(K_{ph}) = \text{Cos}(hy/2) \quad (2.10)$$

Untuk mengeliminir  $h^{\text{th}}$  tegangan harmonisa dengan mengubah faktor kisar penuh belitan stator motor ( $y$ ), maka faktor kisar  $h^{\text{th}}$  tegangan sama dengan nol:

$$\text{Cos}(hy/2) = 0, \text{ atau } \frac{hy}{2} = 90^\circ$$

$$\text{Diperoleh } \gamma = \frac{180^\circ}{h}$$

Maka terjadi perubahan nilai faktor belitan yang disebabkan adanya distorsi harmonisa dari sumber tegangan menjadi,  $K_{wh} = K_{dh} \cdot K_{ph}$  (2.11)

## B. Meredam Harmonisa Yang Dibangkitkan Motor Induksi.

Disini kerapatan fluks harmonik menginduksi tegangan harmonik kedalan belitan stator motor induksi. Hal ini terlihat (Gambar 2.1.) pada belitan stator mesin induksi tiga fasa gelombang mmf fundamental yang cacat kerana adanya mmf harmonik. Dengan perhatikan tegangan induksi rms pada belitan dengan N belitan per fasa, dan faktor belitan Kw adalah:

$$E_h = 4,44 hf.N.\phi.Kwh. \quad (2.12)$$

Untuk meningkatkan kualitas tenaga listrik yang lebih baik dan handal dari pengaruh harmonisa yang dibangkitkan oleh motor-motor induksi. Hal ini dapat diredam dengan memberikan filter reaktor blok (bloking reactor filter) pada sistem. Dengan adanya distorsi harmonic dapat meningkatkan nilai rms dari tegangan dan arus sesuai dengan rumus :

$$rms = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1+THD^2} \quad (2.13)$$

Sehingga nilai tegangan dan arus rms terukur mengalami peningkatan maka otomatis konsumsi tenaga listrik yang tercatat dalam kWh juga mengalami peningkatan, dalam hal ini sesuai dengan rumus :

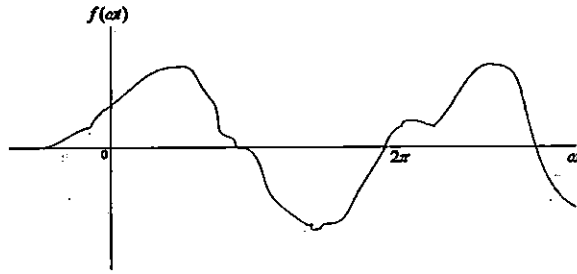
$$KWh = |V|.|I|.Cos\phi t \quad (2.14)$$

Nilai rms terukur pada gelombang yang terdistorsi harmonik terdiri dari nilai rms fundamental dan nilai rms harmonik, sesuai dengan rumus sebagai berikut :

$$rms_{terukur} = rms_{fund} + rms_{THD} \quad (2.15)$$

Sehingga jelas terlihat bahwa dengan mereduksi harmonik maka rms terukur yang dirukur terdiri rms fundamental sistem, maka pengurangan konsumsi tenaga listrik dapat berkurang setelah pemasangan filter reaktor blok.

Harmonisa tegangan dapat diuraikan dengan bentuk gelombang tegangan mempergunakan deret Fourier. Bentuk gelombang tegangan dan menentukan besar amplitudo harmonisnya.



Gambar 2.2. Bentuk gelombang tegangan

Fungsi periodik  $f(\omega t)$  dapat diuraikan menjadi deret trigonometri tak terhingga dan disebut deret Fourier. Fungsi periodik memenuhi relasi  $f(\omega t) = f(\omega t + 2\pi)$  dengan periode  $2\pi$ , integral  $\int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t)$ . Fungsi periodik  $f(\omega t)$ . Maka deret Fourier sebagai berikut, Agus Sugiyono [16].

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t) + A_2 \cos(2\omega t) + A_3 \cos(3\omega t) + \dots \\ + B_1 \sin(\omega t) + B_2 \sin(2\omega t) + B_3 \sin(3\omega t) + \dots$$

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)]$$

Dimana  $A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t)$

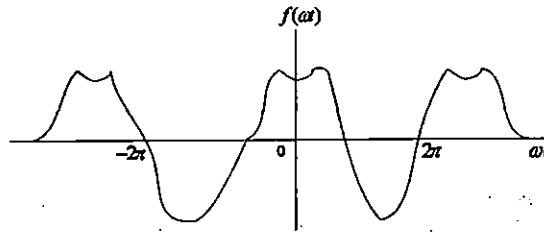
$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.16)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.17)$$

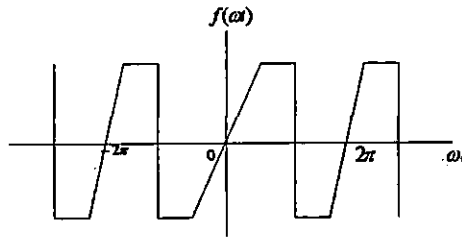
$$n = 1, 2, 3, \dots$$

Dalam kondisi khusus bentuk fungsi deret Fourier yang mempunyai bentuk simetris genap dan simetris ganjil, dengan bentuk gelombang sebagai berikut:





(a). Bentuk Gelombang genap



(b). Bentuk Gelombang ganjil

Gambar 2.3. Bentuk gelombang fungsi deret fourier

### 1. Gelombang genap

Suatu fungsi dikatakan gelombang genap bila memenuhi persamaan sebagai berikut:

$$f(\omega t) = f(-\omega t).$$

Fungsi ini disebut simetris terhadap sumbu vertikal, untuk itu dapat dibuktikan bahwa koefisien  $B_n$  sama dengan nol.

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \end{aligned}$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^0 f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) + \int_0^{\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \right]$$

Bila variabel  $\omega t$  dapat diintegrasikan dengan mengganti  $-\tau$  dan dilakukan perubahan batas integral diperoleh:

$$B_n = \frac{1}{\pi} \left[ - \int_{\pi}^0 f(\tau) \text{Sin}(-n\tau) d(\tau) + \int_0^{\pi} f(\omega t) \text{Sin}(n\omega t) d(\omega t) \right]$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \left[ - \int_0^{\pi} f(\tau) \text{Sin}(n\tau) d(\tau) + \int_0^{\pi} f(\omega t) \text{Sin}(n\omega t) d(\omega t) \right] \quad (2.18)$$

Karena simbol yang digunakan pada variabel integral tidak mempengaruhi nilai integralnya sehingga  $B_n = 0$ .

Fungsi gelombang genap untuk koefisien  $A_0$  dan  $A_n$  dapat ditentukan sebagai berikut

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \text{Cos}(n\omega t) d(\omega t)$$

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \text{Cos}(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.19)$$

Maka bentuk fungsi gelombang genap berlaku.

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \text{Cos}(n\omega t)]$$

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) d(\omega t)$$

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \text{Cos}(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.20)$$

## 2. Gelombang ganjil

Fungsi gelombang ganjil mempunyai sifat simetri terhadap titik awal dan mempunyai hubungan, Agus Sugiyono[16]:

$$f(\omega t) = -f(-\omega t)$$

Untuk fungsi gelombang ganjil dapat dibuktikan bahwa koefisien  $A_0 = 0$  atau komponen sinusnya hilang.

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \end{aligned}$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^0 f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) + \int_0^{\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \right] \quad (2.21)$$

Dengan mengganti variabel  $\omega t$  dengan  $-\tau$ , maka perubahan batas integral didapat:

$$A_n = \frac{1}{\pi} \left[ - \int_{-\pi}^0 f(-\tau) \cos(-n\tau) d(\tau) + \int_0^{\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \right]$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^0 f(-\tau) \cos(n\tau) d(\tau) + \int_0^{\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \right]$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \left[ - \int_0^{\pi} f(\tau) \cos(n\tau) d(\tau) + \int_0^{\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \right]$$

$$A_n = 0 \quad (2.22)$$

Karena fungsi gelombang ganjil, maka koefisien  $B_n$  dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \end{aligned}$$

Sehingga untuk fungsi gelombang ganjil berlaku:

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [B_n \sin(n\omega t)]$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.23)$$

Serie Fourier untuk priodik fungsi dengan frekuensi fundamental  $\omega_0 = 2\pi f_0$  dapat dinyatakan dalam persamaan;

$$F(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (2.24)$$

Dimana;

$C_0$  = Komponen dc

$\theta_n$  = Sudut fasa

Nilai kapasitor dc diperoleh dengan persamaan sebagai berikut;

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Magnitudes  $C_n$  diperoleh dari nilai  $A_n$  dan  $B_n$  dengan persamaan sebagai berikut;

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad (2.25)$$

Daya aktif untuk non sinusoidal dapat dinyatakan dalam persamaan;

$$P_{og} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_{v_n} - \theta_{i_n}) \quad (2.26)$$

Daya reaktif untuk non sinusoidal dapat dinyatakan sebagai berikut;

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_{v_n} - \theta_{i_n}) \quad (2.27)$$

Menurut Natasha Yvette Nation [10], yang menghasilkan harmonic pada jaringan disebabkan ada dua bagian, yaitu bagian saklar (switching) piranti elektronik dan bagian tegangan dan arus non linear seperti piranti transtormer dan beban arcing. Salah satu dari beberapa yang penting piranti menghasil harmonic piranti saklar (solid state) adalah converter, chopper, inverter, relay dan sebagainya. Seperti converter yang dapat menghasilkan harmonic pada jaringan listrik dalam bentuk perubahan elektrik antara lain converter ac ke dc atau dc ke dc. Perobahan daya dalam kategori bergerak, yang dimaksud perobahan gerak yang menggunakan motor-motor listrik dan generator set, perobahan statis tidak termasuk gerakan dan hanya berbasis perobahan solid state.

### C. Konsep Deret Fourier.

Setiap gelombang periodik, yaitu yang memiliki bentuk  $f(t) = f(t + T)$  dapat dinyatakan sebuah deret Fourier dimana harus memenuhi persyaratan adalah;

1. Gelombang diskontinu, hanya terdapat jumlah diskontinuitas yang terbatas dalam periode T.
2. Gelombang memiliki nilai rata-rata yang terbatas dalam periode T.
3. Gelombang memiliki jumlah maksimum dan minimum yang terbatas dalam periode T.

Dari persyaratan tersebut diatas maka deret Forier dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan adalah;

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

Secara umum gelombang tegangan dan gelombang arus yang dinyatakan dalam deret Fourier sebagai berikut;

$$\text{Untuk tegangan } v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(h\omega_0 + \phi_h) \quad (2.28)$$

$$\text{Untuk arus } i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} b_h \cos(h\omega_0 + \theta_h) \quad (2.29)$$

Dimana:

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

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cosh \omega t dt$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sinh \omega t dt$$

Gelombang yang cacat (distorsi) memiliki koefisien dengan indeks h, amplitude harmonisa biasanya dinyatakan yaitu;

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, h \geq 1.$$

#### D. Konsep Daya Listrik.

Tegangan dan arus yang distorsi dapat dinyatakan secara umum persamaan (2.28) dan (2.29) yang berhubungan dengan daya aktif sebagai berikut;

$$P_{akt} = \sum_{h=1}^{\infty} a_h b_h \cos(\phi_h - \theta_h) \quad (2.30)$$

Sebagai daya nyata yang terdistorsi dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut;

$$S_{tot} = \sum_{h=1}^{\infty} a_h b_h \quad (2.31)$$

Daya reaktif yang terdistorsi diperoleh dari persamaan (2.30) dan (2.31) sebagai berikut;

$$Q_{tot} = \sum_{h=1}^{\infty} a_h b_h \sin(\phi_h - \theta_h) \quad (2.32)$$

Untuk mengukur gelombang yang mengandung harmonisa, terjadinya kondisi resonansi tegangan atau arus, daya total yang semestinya pada alat ukur kWh meter adalah:

$$\begin{aligned} P_{tot} &= V_{dc} I_{dc} + V_1 I_1 \cos \phi_1 + V_n I_n \cos \phi_n \\ (P_T) &= (P_{dc}) + (P_1) + (P_{harmonik}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Dimana:

$(P_{dc})$  = Daya arus searah tidak dapat diukur dengan meter.

$(P_1)$  = Daya fundamental dapat diukur secara akurat.

$(P_{harmonik})$  = Daya harmonisa tidak dapat diukur secara akurat.

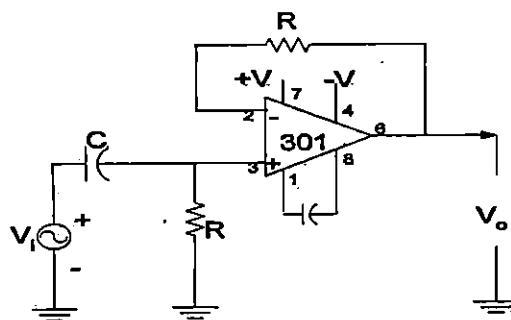
## E. Hibrid Filter Aktif.

Hibrid filter aktif merupakan gabungan penggunaan filter pasif dan filter aktif yang dihubungkan serie tanpa menggunakan transformator. Komponen yang diperlukan hibrid filter aktif yang terdiri dari rangkaian interface filter, MOSFET PWM inverter dan kendali & pembangkit sinyal gate. Rangkaian interface filter merupakan filter pasif LC, sedangkan rangkaian MOSFET PWM inverter yang terdiri dari komponen penggerak gate MOSFET (MOSFET gate drive for bridge inverter). Pada kendali & pembangkit sinyal gate yang terdiri dari komponen sensor arus, Op-amp, komperator.

### 1. Filter Aktif.

Dari beberapa tipe filter aktif peneliti mencoba melakukan pembahasan dan menganalisa tipe filter aktif yang tepat untuk digunakan dalam meredam harmonisa tegangan dan arus. Tipe band reject filter ini terdiri dari 2 (dua) macam yaitu band reject filter bidang sempit dan band reject filter bidang lebar. Untuk ke dua jenis ini hanya dibedakan dalam rangkaian low pasa filter dan high pass filter yang dimasukan ke rangkaian penjumlahan. Sedangkan band reject bidang sempit yang dikenal dengan rangkaian Notch Filter, yaitu menolak frekuensi tertentu. Dalam rancangan ini menggunakan Band Reject Filter bidang lebar yang terdiri dari rangkaian High Pass Filter dan Low Pass Filter yang dimasukan ke rangkaian penjumlahan.

Low pass filter adalah sebuah rangkaian yang tegangan keluarannya tetap sumber arus dc ke suatu frekuensi cut-off ( $f_c$ ). Jangkauan frekuensi yang pancarkan dikenal sebagai pita lewat, frekuensi  $f_c$  disebut juga frekuensi 0,707, frekuensi 3-dB, frekuensi pojok atau frekuensi putus. Gambar 2.4, memperlihatkan perbedaan tegangan antara pin 2 dan pin 3 pada dasarnya 0 Volt, karena itu tegangan yang melewati kapasitor C sama dengan tegangan keluaran  $V_o$ , merupakan rangkaian pengikut tegangan  $V_i$  yang terbagi antara R dan C berdasarkan perhitungan sebagai berikut, Herman Widodo [14].



Gambar 2.4. Rangkaian Low Pass Filter.

$$\text{Tegangan terminal } V_1 = \frac{-jX_c}{R - jX_c} V_{in} \quad (2.34)$$

Dimana;  $j = \sqrt{-1}$  dan  $-jX_c = \frac{1}{j2\pi fC}$

Maka diperoleh  $V_1 = \frac{V_{in}}{1 + j2\pi fRC}$

Tegangan output  $V_o = \left[ 1 + \frac{R_f}{R_1} \right] V_1$

Jadi untuk persamaan tegangan output;  $V_o = \left[ 1 + \frac{R_f}{R_1} \right] \frac{V_{in}}{1 + j(f/f_h)}$  (2.35)

Dimana;  $\frac{V_o}{V_1}$  = penguatan filter fungsi frekuensi

$$A_f = 1 + \frac{R_f}{R_1} = \text{penguatan pass band dari filter}$$

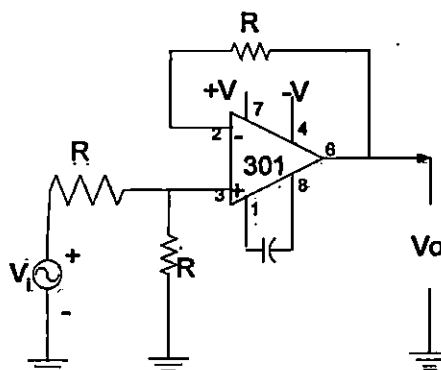
$f$  = frekuensi sinyal input

$$f_h = \frac{1}{2\pi RC} = \text{cut off frekuensi tinggi dari filter}$$

Sudut fasa yang terjadi pada Low Pass Filter ini dengan persamaan sebagai berikut:

$$\left| \frac{V_o}{V_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_h)^2}}, \text{ sehingga sudutnya adalah ; } \Phi = -\tan^{-1} \left( \frac{f}{f_h} \right)$$

High pass filter adalah suatu rangkaian yang memperlemah semua isyarat dibawah suatu frekuensi cut-off ( $f_c$ ) dan melewatkan semua isyarat yang frekuensinya diatas frekuensi cut-off tersebut., sedangkan frekuensi di atas  $f_c$  besarnya tegangan keluaran tetap. Rangkaian High pass filter (HPF) gambar 2.5, ini berbeda dengan Low pass filter hanya perpindahan tempat resistan (R) dan kapasitor (C), maka perhitungan outputnya sebagai berikut, Herman Widodo [14].



Gambar 2.5. Rangkaian High Pass Filter



$$V_o = \left(1 - \frac{Rf}{Rl}\right) \frac{j2\pi fRC}{1 + j2\pi fRC} V_i \quad \text{atau} \quad \frac{V_o}{V_i} = Af \left[ \frac{j(f/f_l)}{1 + j(f/f_l)} \right] \quad (2.36)$$

Dimana;  $Af = 1 + \frac{Rf}{Rl}$  = penguatan pass band filter

$$f_l = \frac{1}{2\pi RC} = \text{frekuensi sinyal input}$$

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{Af(f/f_l)}{\sqrt{1 + (f/f_l)^2}} = \text{penguatan tegangan absolute}$$

## 2. Filter Pasif.

Filter pasif adalah suatu filter yang dirangkai dalam gabungan komponen pasif, yaitu resistor, inductor dan kapasitor. Filter pasif yang dihubungkan parallel dengan rangkaian beban, yang berfungsi untuk memperkecil komponen daya reaktif. Komponen daya reaktif yang bersifat induktif harus dikurangi dalam suatu system jaringan tenaga listrik untuk mengurangi hal ini diperlukan kompensasi daya reaktif. Filter pasif, mengkoordinir system jaringan tenaga listrik yang dipengaruhi beban, sehingga mengakibatkan terjadinya factor kerja ( $\cos \phi$ ) yang rendah. Bila system jaringan tenaga listrik mengandung distorsi harmonik, peranan filter pasif dapat juga meredam harmonik yang berfrekuensi rendah, seperti harmonisa ke 5 dan ke 7.

Untuk memperbaiki factor kerja dan meredam distorsi harmonik dengan menggunakan filter pasif dimana menggunakan rumus resonansi paralel R, L dan C adalah sebagai berikut, Yusmin Sutanto [15].

$$\text{Daya reaktif } Q_n = V_o^2 2\pi f C$$

Dimana;  $Q_n$  = Daya reaktif dalam VAR

$V_o$  = Tegangan jaringan dalam Volt

C = Kapasitas dalam  $\mu F$

f = Frekuensi dalam Hz

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \text{ untuk nilai } L = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2}{C} \text{ dan } C = \frac{\left(\frac{1}{2\pi f}\right)^2}{L}$$

Umumnya perbandingan  $L/C = 7\%$ .

$$\text{Faktor kualitas } Q_o = \frac{2\pi f L}{R}$$

$$\text{Lebar pita } \beta = \frac{f_0}{Q_0}$$

Dimana; R = resistor dalam  $\Omega$

L = induktansi dalam mH

C = kapasitansi dalam  $\mu F$

$f_0$  = frekuensi kerja filter dalam Hz

$Q_0$  = factor kualitas

$\beta$  = lebar pita.

Hibrid filter aktif berfungsi untuk meredam harmonisa tegangan dan arus juga dapat memperbaiki factor kerja pada jaringan listrik dengan beban motor listrik induksi tiga fasa. Hibrid filter aktif merupakan gabungan filter pasif dan filter aktif yang dihubungi secara shunt pada jaringan beban. Untuk mengetahui performen dari hybrid filter aktif yang dirancang dalam simulasi menggunakan perangkat lunak PSIM. Dari hasil simulasi didapatkan unit-unit rangkaian hybrid filter aktif dalam pengendalian meredam arus harmonic, sehingga Total Harmonic Distortion (THD) arus diturunkan.

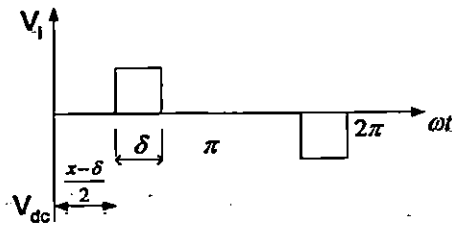
Unit rangkaian hybrid filter aktif yang terdiri dari angkaian sumber tegangan dc (power supply), rangkaian sensor, rangkaian komperator, rangkaian Op-Amp, rangkaian driver gate MOSFET, rangkaian converter MOSFET, rangkaian filter C dan reactor (konduktor). filbridge untuk meredam atau memperkecil distorsi harmonik pada jaringan terhadap mengoperasikan motor listrik induksi. Filter dapat berupa filter pasif dan filter aktif. Gabungan antara filter pasif dan filter aktif disebut filter aktif hybrid. peroleh tegangan dan arus untuk melawan atau meredam distorsi harmonisa tegangan dan arus yang ada jaringan sumber daya.

#### a. Pulse Width Modulation (PWM).

Rangkaian elektronik sebagai pembangkit sinyal yang digunakan untuk pengendalian peralatan listrik dalam mengatur suatu proses kerja dengan pulse width modulation yang akan diinginkan. Adanya beberapa teknik PWM yang paling umum digunakan yaitu;

##### 1). Single Pulse Width Modulation

Ciri-ciri single pulse width modulation ini hanya terdapat 1 pulsa dalam setengah periode dan memvariasikan lebar pulsa sesuai grafik gambar 2.6 dibawah ini;

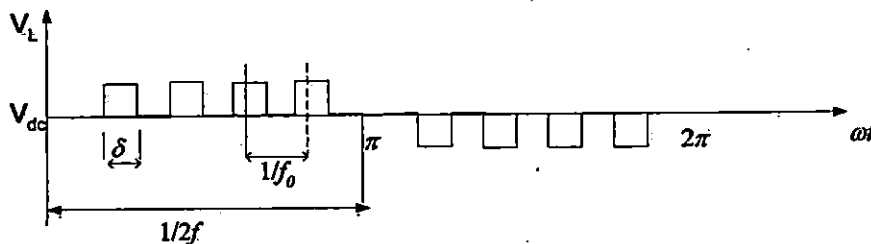


Gambar 2.6 Single Pulse Width Modulation

Teknik single pulse width modulation ini memberikan square wave yang baik dan sesuai dengan deret Fourier. Nilai rata-rata dari distorsi harmonic tergantung pada lebar pulsa  $\delta$  atau sudut tunda  $\alpha$ . Hal ini berarti distorsi harmonic tergantung dari magnitude dari output tegangan.

## 2). Multiple Pulse Width Modulation.

Ciri-ciri multiple pulse width modulation jenis ini hanya terdapat n pulsa dalam setengah periode dan mampu memvariasi lebar pulsa serta jumlah pulsa sesuai grafik gambar 2.7 dibawah ini;



Gambar 2.7 Multiple Pulse Width Modulation

Multiple pulse width modulation ini sangat efektif untuk mengurangi distorsi harmonic dari tegangan output, secara khusus pada level output rendah. Jumlah pulsa setiap setengah periode merupakan bilangan integer, dengan persamaan sebagai berikut;

$$n = \frac{f_o}{2f}$$

Dimana:

$f_o$  = frekuensi pulsa perdetik

$f$  = frekuensi tegangan fundamental

Nilai maksimum dari  $n$  dibatasi oleh nilai maksimum yang diijinkan untuk turn-on dan turn-off. Multiple pulse width modulation ini tegangan output dapat bervariasi dari 0 s.d  $V_{dc}$  dengan memasukkan lebar pulsa  $\delta$  pada areal 0 s.d  $\frac{\pi}{n}$ . Nilai  $n$  yang rendah distorsi harmonic tegangan pada lebar pulsa  $\delta$  lebih tinggi dari pada nilai  $n$  yang tinggi. Magnitude distorsi harmonic akan tinggi pada nilai  $n$  yang besar, tetapi efek yang disebabkan oleh beban adalah kecil terutama jika fasilitas filter digunakan pada output.

### 3). Sinusoidal Pulse Width Modulation.

Ciri-ciri sinusoidal pulse width modulation ini lebih banyak digunakan dibandingkan teknik lain, karena dapat mengurangi distorsi harmonic lebih baik dari teknik yang lainnya. Teknik sinusoidal pulse width modulation ini memiliki banyak variasi diantaranya adalah, Herman Widodo [14].

- a). Sinusoidal Pulse Width Modulation membangkit sinyal segitiga.
- b). Sinusoidal Pulse Width Modulation membangkit sinyal gergaji.
- c). Sinusoidal Pulse Width Modulation membangkit sinyal trapezoidal.

Secara umum untuk mengatasi distorsi harmonic dilakukan dengan memasang filter dari distorsi harmonic ke 3, 5, 7, 9, 11 dan seterusnya (asumsi  $p = 6$ ) dengan persamaan sebagai berikut;

$$n = k \cdot p \pm 1$$

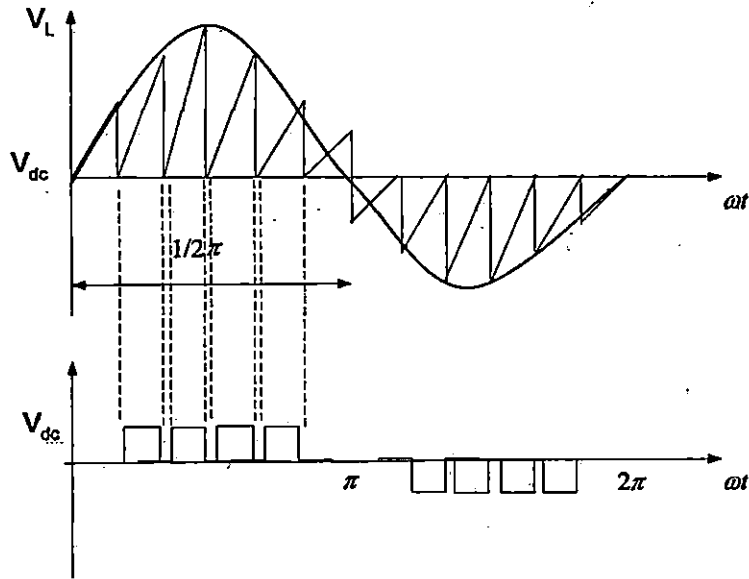
Dimana:

$n$  = harmonic orde ke

$p$  = jumlah pulsa yang terjadi

$k$  = konstanta mulai dari 1,2,3 dan seterusnya

Dengan mendesain jenis sinusoidal pulse width modulation (SPWM) yang sesuai dengan karakteristik beban, maka peran filter dapat ditiadakan. Modulasi dilakukan dengan menggabungkan sinyal sinusoidal dengan sinyal pemodulasi, adapun dalam penelitian ini sinyal pemodulasi yang akan digunakan untuk membangkitkan sinusoidal pulse width modulation adalah sinyal gergaji dan sinyal segitiga. Modulasi antara sinyal sinus- gergaji dan sinyal segitiga, dimana frekuensi dasar sinyal ini ditentukan berapa banyak sinyal counter. Untuk menggambarkan sinyal sinusoidal yang berbeda fasa  $360^\circ$ . Hal ini dapat dijelaskan pada gambar 2.8 sebagai berikut;



Gambar 2.8. Sinusoidal pulsa width modulation segi tiga

Meredam harmonisa dari persamaan, 
$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{Sin} \frac{n\beta}{2} \text{Cos} n(\omega t - \frac{\beta}{2})$$

Nilai rms dari tegangan output fundamental adalah;

$$V_f = \frac{4V_s}{\sqrt{2}} \text{Sin} \frac{\beta}{2}$$

Untuk  $n^{\text{th}}$  menunjukkan harmonisa dapat dieliminir dengan memilih pilihan dari penggantian sudut  $\beta$ , jika  $\text{Sin} \frac{n\beta}{2} = 0$  atau  $\beta = \frac{360^\circ}{n}$ .

## BAB III

### **Pendekatan Fungsional Dan Struktural**

#### **A. Metoda Penelitian**

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah metoda eksperimen yang dilakukan pada Laboratorium Konversi Energy Listrik di Jurusan Elektro Universitas Negeri Padang (FT-UNP). sebagai berikut :

1. Studi literatur mengenai harmonisa tegangan dan arus pada motor induksi tiga fasa, Band Pass Filter Orde ke 3 sebagai pengurai harmonisa dan Rangkaian pemodelan active filter untuk meredam harmonisa
2. Merancang serta menguji rangkaian Band Pass Filter Orde ke 3 sebagai pengurai harmonisa
3. Merancang serta menguji rangkaian Proportional Integral (PI) yang digunakan untuk mengontrol output band pulse frequency (BPF) dan output Injeksi dari MOSFET agar sesuai dengan yang diinginkan.
4. Merancang serta menguji rangkaian Pulsa Width Modulation (PWM) yang digunakan untuk mengontrol jumlah daya yang mengalir ke beban tanpa membuang daya pada drive beban
5. Merancang serta menguji rangkaian active filter yang digunakan sebagai peredam harmonisa
6. Menguji kinerja sistem secara keseluruhan serta mengambil data dari hasil pengujian
7. Menganalisa hasil dan membuat kesimpulan

#### **B. Pendekatan Fungsional.**

Untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimum dalam rancangan hybrid filter aktif sangat diperlukan data yang akurat. Data yang mendukung rancangan hybrid filter aktif untuk memperoleh kinerja motor induksi terhadap factor kerja dan distorsi harmonisa yang dibangkitkan motor induksi sendiri maupun distorsi harmonisa dari sumber system jaringan tenaga listrik. Data yang diperlukan, seperti standar tegangan dan arus terhadap distorsi harmonic, data hasil pengukuran kandungan harmonisa dan komponen yang diperlukan terbentuknya hybrid filter aktif sebagai berikut;

## 1. Standar Kualitas Energi Listrik Terhadap Harmonisa

Standar untuk menetapkan tingkat harmonisa yang dibangkitkan oleh peralatan listrik yang mengganggu dalam system jaringan distribusi tenaga listrik. Standar ini telah digunakan di Amerika sebagai standard IEEE 519-1992 terhadap tegangan atau arus harmonisa dalam jaringan system tenaga listrik, seperti tabel 3.1 dan tabel 3.2 dibawah ini.

**Tabel 3.1 Standar Distorsi Harmonik IEC 555 / IEEE 519-1992  
Current Distortion Limits ( in % of  $I_L$  ) for General  
Distribution System ( 120 - 69000 V ) [ 1 ]**

$I_{sc}/I_L$	< 11	11 < h < 17	17 < h < 23	23 < h < 35	$\leq 35 > h$	TDD
<20	4.00	2.00	1.50	0.60	0.30	5.00
20-50	7.00	3.50	2.50	1.00	0.50	8.00
50-100	10.00	4.50	4.00	1.50	0.70	12.00
100-1000	12.00	5.50	5.00	2.00	1.00	15.00
>1000	15.00	7.00	6.00	2.50	1.40	20.00

**Tabel 3.2 Standar Voltage Distortion Limits (in % of V) [1]**

PCC Voltage	Individual Harmonic Magnitude (%)	THDv (%)
69 kV	3.0	5.0
69 – 161 kV	1.5	2.5
161 kV	10.0	4.5

Sebagai pedoman tentang kandungan distorsi harmonisa untuk tegangan dan arus, tabel 3.1 kandungan yang diperbolehkan untuk tegangan 120 s.d 69.000 Volt dan  $I_{sc}/I_L$  20 s.d 50, untuk arus kandungan distorsi total harmonisa ( $I_{THD}$ ) diizinkan 8,0%. Sedangkan tabel 3.2 kandungan distorsi harmonisa untuk tegangan < 69 kV, pada tegangan kandungan distorsi total harmonisa ( $V_{THD}$ ) diizinkan 5,0%.

## 2. Hasil Pengukuran Kandungan Harmonik Dengan Analyzer

Pengukuran kandungan harmonisa menggunakan alat ukur Power Harmonic Analyzer Fluke-41B. Spesifikasi motor induksi yang diamati adalah FBE.Three-Phase Induction Motor, Type Y100LI-4, 2,2kW/3 Hp, 50 Hz, 220/380 Volt, 8,7/5,0 Amp, 1430 Rpm, Ins Cl B/GU Cl IP 44, Duty S1/Conn  $\Delta/Y$ , No RO13/34 kg, made in

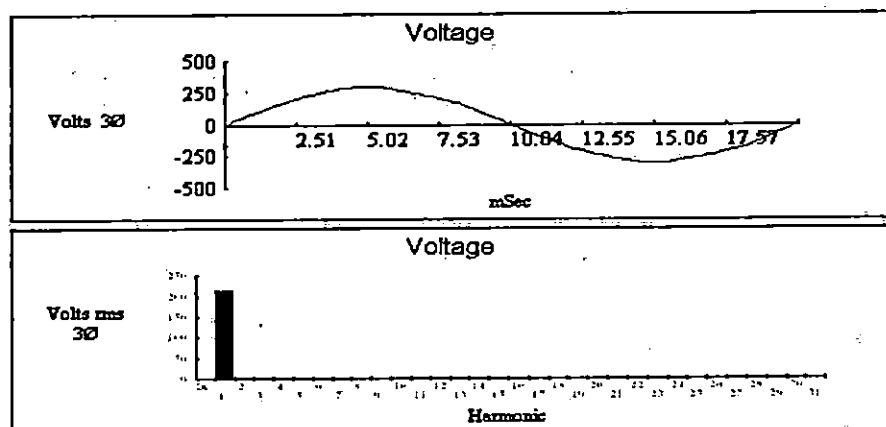
China. Pengukuran dilakukan dalam hubungan Star (Y) dan hubungan Delta ( $\Delta$ ) tanpa menggunakan hybrid filter aktif sebagai berikut:

Tabel 3.3. Motor induksi dalam hubungan Star (Y):

Parameter	Beban 0%	Beban 25%	Beban 50%	Beban 75%	Beban 100%
Frequency	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz
Vrms	218,2 V	216,0 V	214,4 V	211,7 V	208,1 V
Arms	1,30 A	1,92 A	2,60 A	3,41 A	4,38 A
Vpeak	317,7 V	313,9 V	311,0 V	307,6 V	301,9 V
Apeak	1,81 A	2,82 A	3,76 A	4,86 A	6,21 A
V THD	2,14 %	1,93 %	1,83 %	1,84 %	1,81 %
A THD	4,40 %	4,60 %	3,81 %	3,38 %	2,88 %
kWatts	0,23	0,41	0,56	0,72	0,91
kVA	0,28	0,41	0,56	0,72	0,91
Tpf	0,80	0,98	1,00	1,00	1,00
Dpf	0,80	0,98	1,00	1,00	1,00

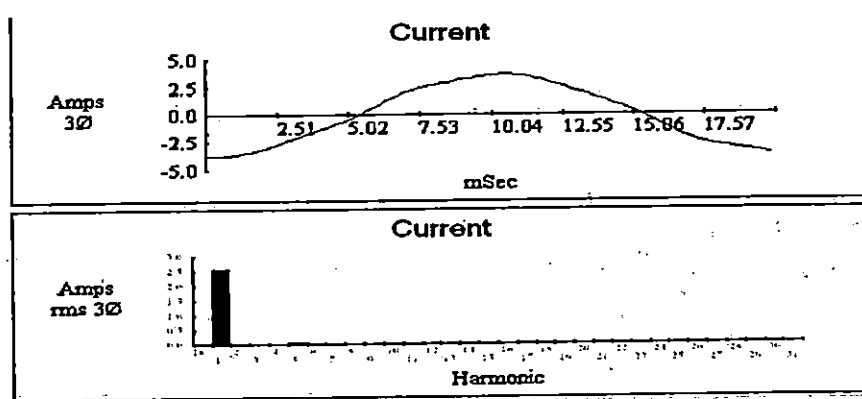
Tabel 3.4. Spektrum Amplitudo Harmonisa Arus Orde Ganjil  $h_1$  s.d  $h_{20}$

Harm ke	Freg Hz	I Mag	%I RMS
$h_1$	49,81	1,30	99,91
$h_3$	149,44	0,02	1,74
$h_5$	249,07	0,04	3,37
$h_7$	348,70	0,02	1,88
$h_9$	448,33	0,00	0,19
$h_{11}$	547,96	0,01	0,48
$h_{13}$	647,58	0,01	0,48
$h_{15}$	747,21	0,00	0,14
$h_{17}$	846,84	0,00	0,34
$h_{19}$	946,47	0,00	0,05
$h_{20}$	996,28	0,00	0,05



Gambar 3.1. Spektrum Tegangan Motor Induksi Hubungan Star Harmonisa Orde Ganjil





Gambar 3.2. Spektrum Arus Motor Induksi Hubungan Star Harmonisa Orde Ganjil

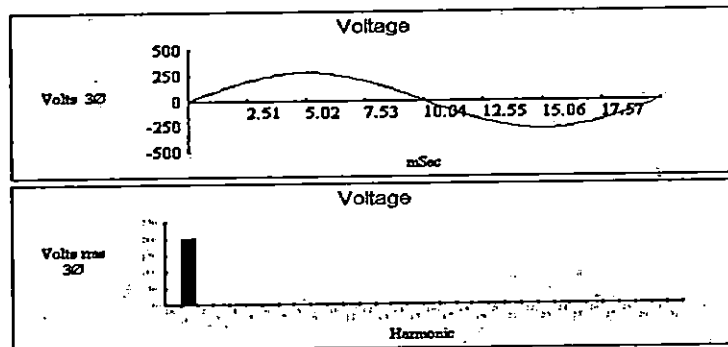
Hasil pengukuran motor induksi hubungan Star (Y) dalam kondisi berbeban seperti terlihat dari Tabel 3.3 pengaruh terhadap bekerja pada frekuensi  $f = 49,81\text{Hz}$ ,  $V_{rms}$  218,2 s.d 208,1 Volt,  $V_{peak}$  317,7 s.d 301,9 Volt, distorsi total harmonisa tegangan  $V_{THD}$  2,14% s.d 1,81%. Pengaruh terhadap arus  $I_{rms}$  1,30 s.d 4,38A,  $I_{peak}$  1,81 s.d 6,21A, distorsi total harmonisa arus  $I_{THD}$  4,40% s.d 2,88%. Bentuk gelombang dan spectrum pada Table 3.4., Gambar 3.1 dan Gambar 3.2, yang terdistribusi pada harmonisa tegangan dan arus orde ke 3<sup>th</sup>, ke 5<sup>th</sup> dan ke 7<sup>th</sup>.

Tabel 3.5. Motor induksi dalam hubungan delta ( $\Delta$ ):

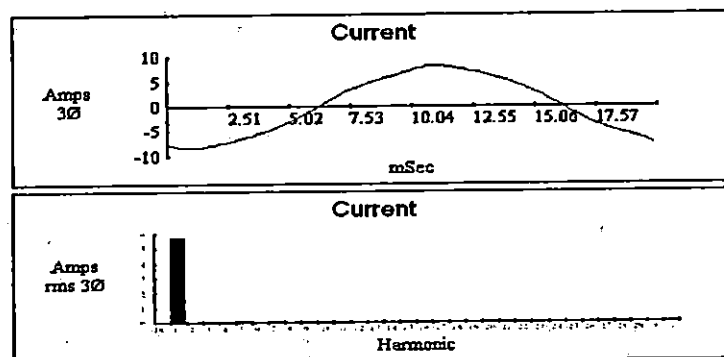
Parameter	Beban 0%	Beban 25%	Beban 50%	Beban 75%	Beban 100%
Frequency	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz
Vrms	204,3 V	202,6 V	201,1 V	198,5 V	194,4 V
Arms	4,88 A	5,15 A	5,78 A	6,75 A	7,85 A
Vpeak	291,6 V	291,1 V	288,9 V	286,0 V	280,4 V
Apeak	6,74 A	7,40 A	8,45 A	9,87 A	11,42 A
V THD	1,05%	0,93 %	0,99 %	1,20 %	1,46 %
A THD	4,65%	3,95 %	3,30%	2,56 %	2,06 %
kWatts	0,67	0,89	1,09	1,31	1,52
kVA	1,00	1,04	1,16	1,34	1,53
Tpf	0,67	0,85	0,94	0,98	1,00
Dpf	0,67	0,85	0,93	0,98	1,00

Tabel 3.6. Spektrum Amplitudo Hamonisa Arus Orde Ganjil  $h_1$  s.d  $h_{20}$

Harm ke	Freg Hz	I Mag	%I RMS
h1	49.81	4.88	99,88
h3	149.44	0.02	0.32
h5	249.07	0.22	4.51
h7	348.70	0.04	0.85
h9	448.33	0.00	0.09
h11	547.96	0.01	0.20
h13	647.58	0.00	0.06
h15	747.21	0.00	0.09
h17	846.84	0.01	0.27
h19	946.47	0.01	0.14
h20	996.28	0.00	0.03



Gambar 3.3. Spektrum Tegangan Motor Induksi Hubungan Delta Harmonisa Orde Ganjil



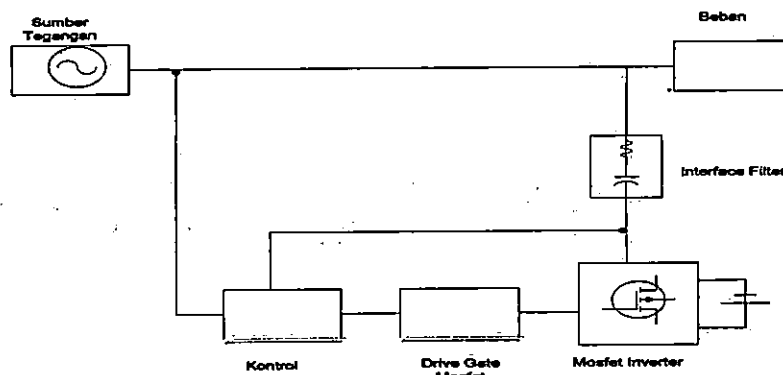
Gambar 3.4. Spektrum Arus Motor Induksi Hubungan Delta Harmonisa Orde Ganjil

Hasil pengukuran motor induksi hubungan Star ( $\Delta$ ) dalam kondisi berbeban seperti terlihat dari Tabel 3.5 pengaruh terhadap bekerja pada frekuensi  $f = 49,81\text{Hz}$ ,  $V_{\text{rms}}$  204,3 s.d 194,4 Volt,  $V_{\text{peak}}$  291,6 s.d 280,4 Volt, distorsi total harmonisa tegangan  $V_{\text{THD}}$  1,05% s.d 1,46%. Pengaruh terhadap arus  $I_{\text{rms}}$  4,88A s.d 7,85A,  $I_{\text{peak}}$  6,74A s.d 11,42A, distorsi total harmonisa arus  $I_{\text{THD}}$  4,65% s.d 2,06%. Bentuk gelombang dan

spectrum pada Table 3.6., Gambar 3.3 dan Gambar 3.4, yang terdistribusi pada harmonisa tegangan dan arus orde ke 3<sup>th</sup>, ke 5<sup>th</sup> dan ke 7<sup>th</sup>

### 3. Fungsi Komponen Perancangan Hibrid Filter Aktif.

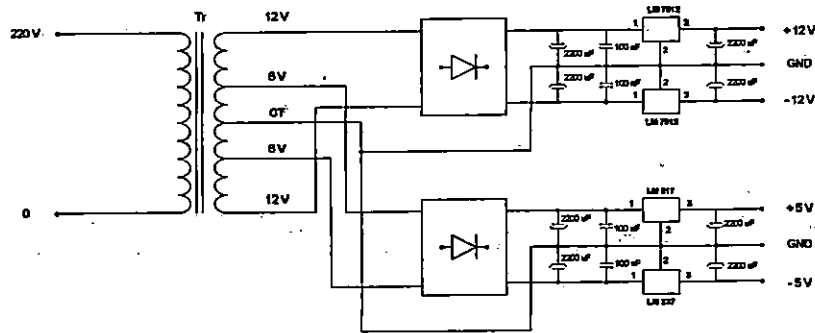
Langkah-langkah yang diambil untuk merancang suatu peralatan sangat diperlukan topology dari hybrid filtr aktif yang diinginkan. Dari topology dari hybrid filter aktif adalah gabungan antara filter pasif dengan filter aktif. Filter pasif dan filter aktif yang terdiri dari berbagai tipe dan karakteristiknya. Dalam hal ini peneliti lebih cenderung pada hybrid filter aktif antara filter pasif serie terhadap filter aktif. Dengan demikian diperlukan piranti yang dirangkai sedemikian rupa, dari piranti power supply, interface filter, Mosfet PWM inverter dan kontrol & pembangkit sinyal gate. Diagram hybrid filter aktif dimana satu antara lain seperti gambar 3.5.



Gambar 3.5. Diagram hybrid filter aktif

#### a. Power Supply

Power supply adalah persediaan daya sebagai sumber tegangan untuk semua piranti kendali dari hybrid filter aktif yang dirancang dalam keperluan meredam pengaruh harmonisa terhadap kinerja motor induksi. Sebagai penyediaan daya dalam kendali hybrid filter aktif yang mempunyai spesifikasi yaitu tegangan input 220 V/ac, tegangan output +12V, -12V dan +5V, -5V, seperti gambar 3.6 dibawah ini.



Gambar 3.6 Power Supply

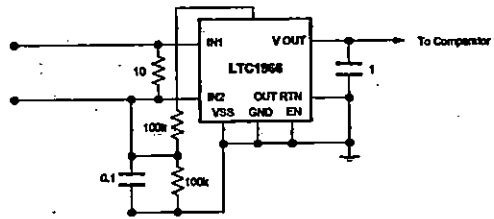
#### b. Rangkaian Sensor

Sensor arus adalah suatu alat yang berfungsi untuk mendeteksi perubahan arus pada rangkaian beban (motor induksi) digunakan sebagai akibat adanya perubahan arus pada beban, kemudian akan dibandingkan dengan harga referensi yang telah ditetapkan. Rangkaian control akan memberikan aksi atas perubahan arus tersebut dengan memberikan trigger pada converter MOSFET sesuai perubahan yang terjadi. Sensor arus pada setiap fasa beban komplemen akan memberikan beban yang tetap konstan dan seimbang.

Arus sensor berperan sebagai input pada rangkaian control, besarnya arus sensor biasa sebanding dengan besar arus beban motor induksi. Fungsi arus sensor diubah dari yang semula fungsi arus menjadi fungsi tegangan, kemudian dimasukkan kerangkaian converter MOSFET. Disini tegangan diubah menjadi tegangan searah sinus setengah gelombang. Sedangkan rangkaian operational amplifier (Op-Amp) bentuk tegangan akan diubah menjadi gelombang segitiga dan selanjutnya akan dibandingkan dengan gelombang gergaji yang nilainya konstan. Gelombang gergaji dan gelombang segitiga mempunyai periode yang sama, karena keduanya berasal dari sumber jala-jala yang sama 50 Hz. Besar tegangan gelombang segitiga akan dipengaruhi oleh perbandingan besar arus sensor dan tegangan referensi pada rangkaian setting kapasitor. Hasil perbandingan ini akan menentukan apakah outputnya berupa pulsa lebar atau sempit.

Sensor yang digunakan pada hybrid filter aktif ini adalah sensor arus yang berfungsi untuk mendeteksi perubahan arus pada rangkaian beban yang digunakan oleh motor induksi. Perubahan arus beban kemudian akan dibandingkan dengan harga referensi telah ditentukan. Sensor arus dilengkapi rangkaian IC sensor dan

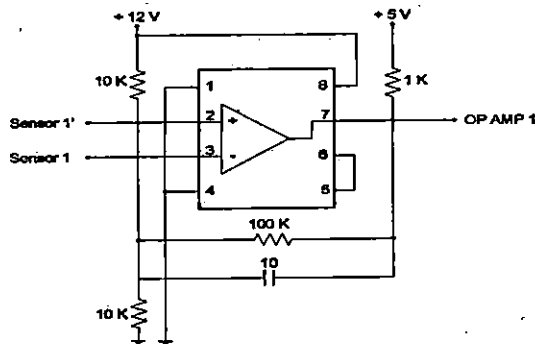
coil CT, spesifikasi IC sensor adalah LTC1966 dan coil CT adalah DT3316 1 s.d 100  $\mu$ H, 0.25 s.d 5A, seperti gambar 3.7.



Gambar 3.7 Rangkaian IC Sensor

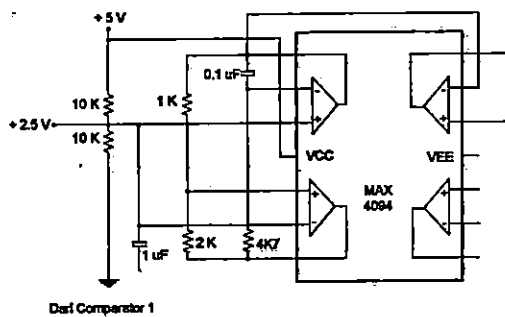
c. Rangkaian Komparator

Komparator yang digunakan untuk rancangan hybrid filter aktif adalah suatu rangkaian dengan dua tegangan masukan dan satu tegangan keluaran. Komparator dalam rangkaian Op-amp banyak diproduksi dengan berbagai typee, seperti komparator IC 741C. Komparator yang digunakan dalam penelitian ini type LM 311, tagangan masukan +12 V dan +5 V untuk menghasilkan penjenuhan positif dan -12V untuk memperoleh kejenuhan negative, seperti gambar 3.8.



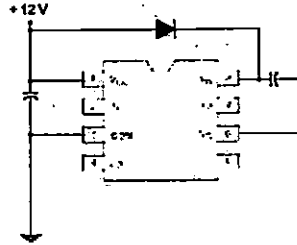
Gambar 3.8 Rangkaian IC Komparator

d. Rangkaian Op-amp



Gambar 3.9 Rangkaian IC Op-amp

e. Rangkaian Penggerak Gate Mosfet

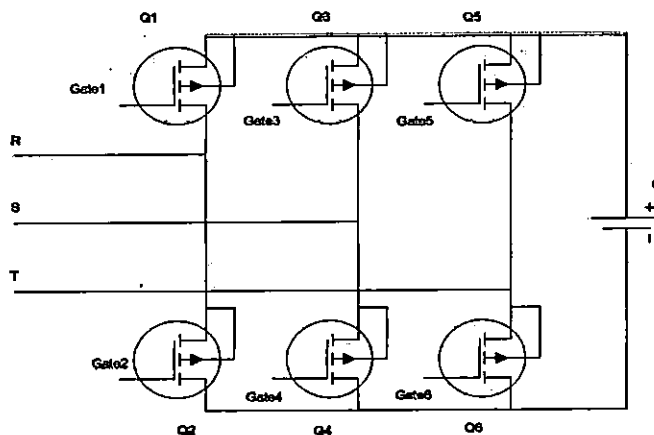


Gambar 3.10 Rangkaian IC Drive Gate Mosfet

f. Mosfet inverter.

Pengaturan besarnya daya keluaran melalui komponen switch dikendalikan dengan metoda modulasi lebar pulsa atau PWM (Pulse Width Modulation) dimana semakin lama swidth berstatus on semalin banyak energi yang disimpan dalam transformator dan semakin besar pula daya yang dikirim ke beban. Untuk menghasilkan tegangan keluaran yang stabil, maka tegangan tersebut dapat diumpun balik dan dibandingkan dengan tegangan referensi dan selisihnya kemudian dapat digunakan untuk mengendalikan lamanya swidth berstatus on dan off.

Sinusiodal Pulse Width Modulation (SPWM) adalah teknik yang lebih banyak digunakan dibandingkan eknik yang lain, karena sinusoidal PWM akan meredam harmonic lebih baik dibandingkan teknik yang lainnya. Dalam rancangan pengendalian SPWM yang digunakan type pembangkit sinyal gergaji. Rangkaian Mosfet Inverter dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Rangkaian Mosfet Inverter

g. **Interface filter (Filter Pasif).**

Interface filter adalah rangkaian filter pasif yang terdiri dari komponen inductor (L) dan kapasitor (C), seperti gambar 3.11. Berdasarkan beban motor induksi 3 fasa rotor sangkar diperoleh data sebagai berikut;

Test beban nol;

$$V_o = 218,2 \text{ Volt}, I_o = 1,3 \text{ Amp}, P_o = 230 \text{ W}, R_1 = 3 \Omega \text{ dan } \text{Cos } \varphi = 0,8.$$

Test H Singkat;

$$V_{sc} = 97 \text{ Volt}, I_{sc} = 3 \text{ Amp dan } P_{sc} = 230 \text{ W}$$

Hasil perhitungan diperoleh parameter ekivalent motor;

$$R_1 = 3 \Omega, X_2' = 5,718 \Omega, R_i = 222,2 \Omega, X_m = 107,76 \Omega, R_2' = 11,759 \Omega.$$

$$X_1 = X_2' = 5,718 \Omega.$$

Perbaikan factor kerja motor menggunakan filter pasif LC, untuk perhitungan besaran kapasitor (C) dan reactor (L) sebagai berikut;

Frekuensi fundamental (f) = 50 Hz,  $I_s = 3,41 \text{ Amp}$ ,  $V_s = 220 \text{ Volt}$ ,  $\text{Cos } \varphi_1 = 0,67$  dan  $\text{Cos } \varphi_2 = 0,95$ .

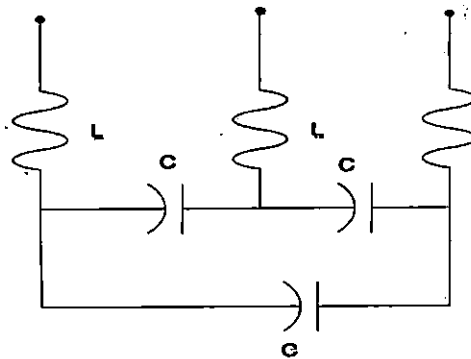
$$Q_1 = \sqrt{3} \cdot V_s \cdot I_s \sin \varphi_1 = 0,987 \text{ kVAR}$$

$$Q_2 = \sqrt{3} \cdot V_s \cdot I_s \sin \varphi_2 = 0,4059 \text{ kVAR}$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = 0,987 - 0,4059 = 0,5811 \text{ kVAR}$$

$$Q_n = Q_c = V_s^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C$$

$$C = 38,218 \text{ uF dan } L = \frac{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f}\right)^2}{C} = 0,000265 \text{ mH}$$

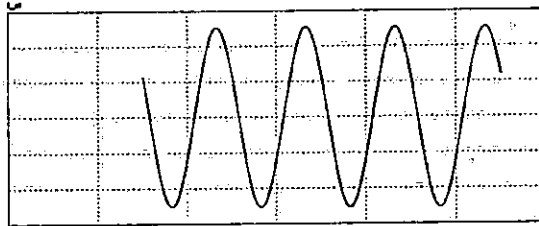


Gambar 3.12 Interface Filter (Filter Pasif)

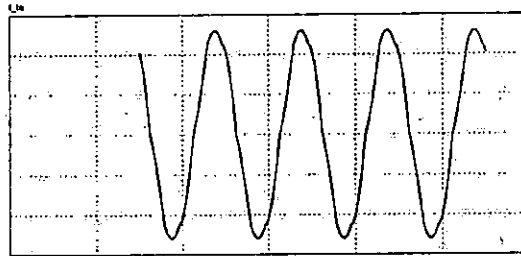
**B. Pendekatan Struktural.**

Rancangan rangkaian simulasi pemodelan yang dipresentasikan sebagai rangkaian pengganti dari motor induksi tiga fasa. Beban simulasi pemodelan disetting sesuai beban

motor induksi rotor sangkar sebesar 6,75A, untuk menghasilkan harmonic ke 5 dan harmonic ke 7 dengan beban R, L dan C. Setelah pemodelan simulasi dilakukan pengujian dengan hasil bentuk gelombang arus fundamental dan gelombang arus distorsi harmonic seperti pada gambar 3.12 dan gambar 3.13. Gelombang arus karena distorsi harmonic terjadi cacat bagian peak to peak gelombang. Kecacatan gelombang arus dapat diasumsikan disebabkan factor belitan ( $k_w$ ) dan besarnya slip putaran ( $n_{slip}$ ).



Gambar 3.13 Gelombang Arus Fundamental Tanpa Memasang Hibrid Filter Aktif

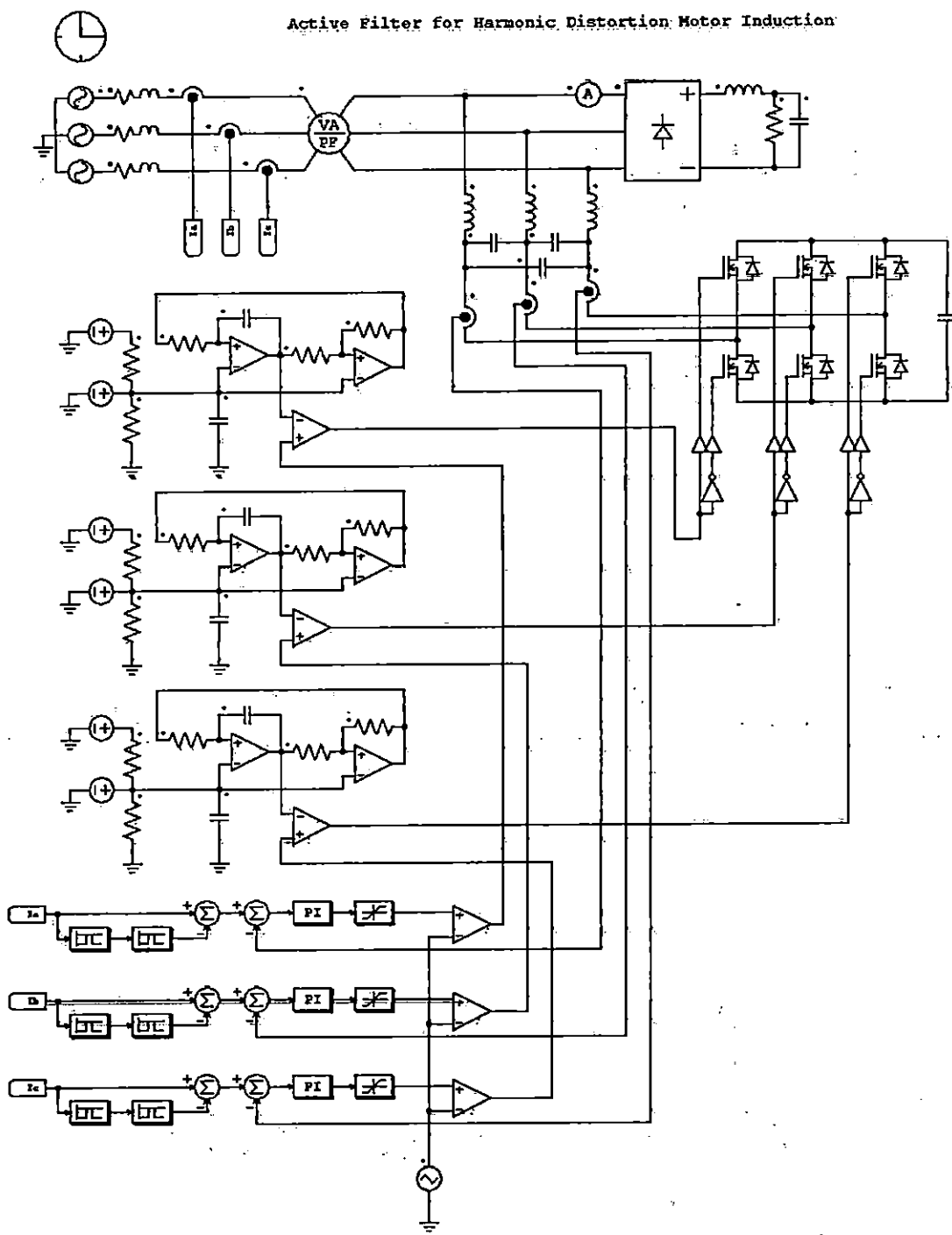


Gambar 3.14 Gelombang Arus Harmonik Tanpa Memasang Hibrid Filter Aktif

Rangkaian simulasi pemodelan dipasang filter yang direncanakan untuk meredam atau mengurangi distorsi harmonic yaitu hybrid filter aktif dapat dilihat pada gambar 3.15. Parameter ditentukan pada hybrid filter aktif untuk interface filter  $C = 20 \mu F$ ,  $L = 0.0003$  mH, dan pada Mosfet inverter  $C_{DC} = 20 \mu F$ , sedangkan tegangan untuk kendali + 12V.

Hasil simulasi untuk peredam harmonic dengan hybrid filter aktif, pada gambar 3.16 bentuk gelombang arus injeksi dari Mosfet inverter. Bentuk gelombang arus yang keluar dari interface filter pada gambar 3.17. Bentuk gelombang arus sinusoidal berfungsi melawan atau meredam harmonisa frekuensi tinggi. Gambar 3.18 gelombang arus pada sumber tegangan merupakan gelombang sinusoidal yang bagian puncak (peak to peak) kelihatan adanya cacat, hal ini mungkin ada besaran komponen simulasi yang tidak cocok. atau menentukan skala grafik.

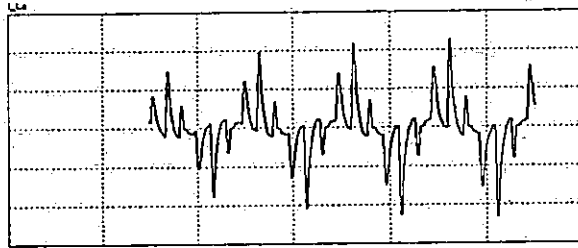




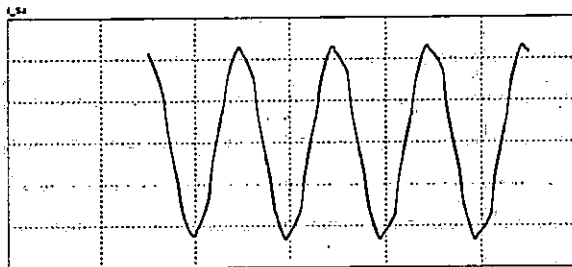
Gambar 3.15 Rangkaian Simulasi Model Hibrid Filter Aktif



**Gambar 3.16 Gelombang arus injeksi setelah pasang hybrid filter aktif**



**Gambar 3.17 Gelombang arus hybrid filter aktif telah dipasang filter**



- **Gambar 3.18 Gelombang arus pada terminal sumber setelah pasang hybrid filter aktif**

## BAB IV

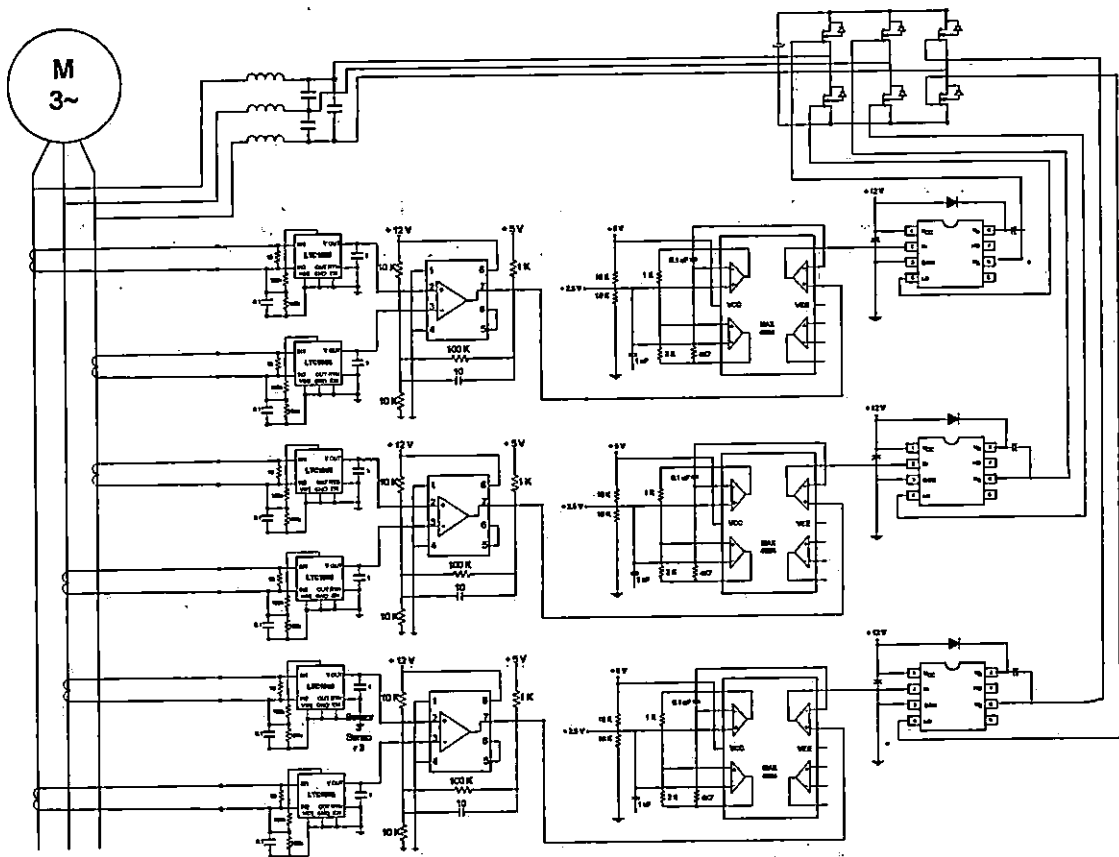
### Prototipe, Hasil Ujicoba Dan Pembahasan

#### A. Prototipe

Rangkaian kendali Hibrid Active Harmonic Filter (HAHF) untuk meredam harmonisa yang dibangkitkan leh motor induksi rotor sangkar tiga fasa dengan beberapa unit rangkaian kendali seperti:

Tabel 4.1 Unit komponen rangkaian HAHF

No	Rangkaian	Komponen	Spesifikasi	Jumlah
1.	Power Supply	1. Transformator	220/6V, CT, 12 V	1 buah
		2. Dioda bridge	3 A, 500 V	2 buah
		3. Kapasitor eleko	2200 uF	8 buah
		4. Kapasitor	100 nF	8 buah
		5. IC LM	LM 7812, 7912	2 buah
		6. IC LM	LM 317, 337	2 buah
		7. PCB	IC PCB	1 keping (Lbr)
2.	Sensor elektrik	1. IC LTC	LTC 1966	6 buah
		2. Resistor	10 $\Omega$ , ½ W	6 buah
		3. Resistor	100 k $\Omega$ , ½ W	12 buah
		4. Kapasitr	0,1uF	6 buah
		5. Kapasitor	1 uF	6 buah
3.	Komperator	1. IC LM	LM 311	3 buah
		2. Resistor	1 k $\Omega$ , ½ W	3 buah
		3. Resistor	10 k $\Omega$ , ½ W	6 buah
		4. Resistor	100 k $\Omega$ , ½ W	3 buah
		5. Kapasitor	10 uF	3 buah
4.	Op-Amp	1. IC Max	Max 4094	3 buah
		2. Resistor	1 k $\Omega$ , ½ W	3 buah
		3. Resistor	2 k $\Omega$ , ½ W	3 buah
		4. Resistor	10 k $\Omega$ , ½ W	6 buah
		5. Resistor	4,7 k $\Omega$ , ½ W	3 buah
		6. Kapasitor	0,1 uF	3 buah
		7. Kapasitor	1 uF	3 buah
5.	Driver MOSFET	1. IC IR	IR 2105, 8 pin	3 buah
		2. Kapasitor	0,1uF	3 buah
		3. Dioda		
6.	Mosfet Inverter	1. Mosfet		6 buah
		2. Kapasitor		1 buah



Gambar 4.1 Skema Rangkaian Prototype Hibrid Filter Aktif.

### B. Hasil Hybrid Filter Active

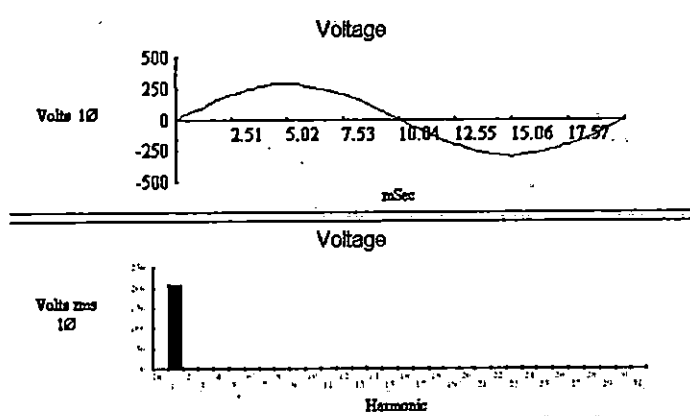
Setelah rancangan hybrid filter aktif dirakit, besar kapasitor dan konduktor pada interface filter  $C = 40 \mu\text{F}/380\text{V}_{ac}$  dan  $L = 0,0026\text{mH}$ , sedangkan pada Mosfet inverter kapasitor  $20 \mu\text{F}/220\text{V}_{ac}$ . Mengamati bentuk gelombang yang keluar dari interface filter diukur pakai CRO yang bentuknya mendekati hasil pada simulasi. Pengamatan selanjutnya diuji coba pada motor induksi 3 fasa, untuk mengetahui harmonia orde berapa saja yang dapat diredam oleh hybrid filter aktif tersebut. Dalam hal ini dilakukan pengukuran dengan Power Harmonic Analyzer Fluke 41B. Pengukuran dalam hubungan Star (Y) dan hubungan Delta ( $\Delta$ ) yang dirangkai dengan hybrid filter aktif sebagai berikut:

Tabel 4.2. Motor induksi hubungan Star (Y):

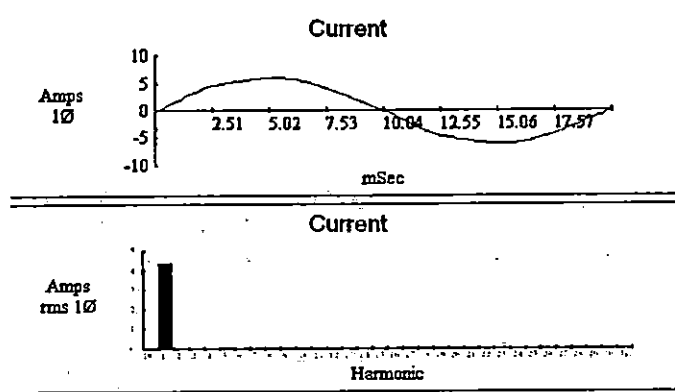
Parameter	Beban 0%	Beban 25%	Beban 50%	Beban 75%	Beban 100%
Frequency	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz
Vrms	220,7 V	218,5 V	216,9 V	214,2 V	210,0 V
Arms	0,53 A	1,15 A	1,83 A	2,64 A	3,61 A
Vpeak	321,6 V	316,8 V	313,9 V	310,5 V	304,8 V
Apeak	0,71 A	1,72 A	2,66 A	3,76 A	5,11 A
V_THD	2,06 %	1,85 %	1,75 %	1,76 %	1,73 %
A_THD	3,92 %	4,12 %	3,33 %	2,90 %	2,40 %
kWatts	0,10	0,24	0,39	0,65	0,74
kVA	0,11	0,24	0,39	0,65	0,74
Tpf	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00
Dpf	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabel 4.3. Spektrum Amplitudo Hamonisa Arus Orde Ganjil  $h_1$  s.d  $h_{20}$

Harm ke	Freg Hz	I Mag	%I RMS
h1	49.81	1.30	99.91
h3	149.44	0.00	0.74
h5	249.07	0.02	1.37
h7	348.70	0.00	1.88
h9	448.33	0.00	0.19
h11	547.96	0.01	0.48
h13	647.58	0.01	0.48
h15	747.21	0.00	0.14
h17	846.84	0.00	0.34
h19	946.47	0.00	0.05
h20	996.28	0.00	0.05



Gambar 4.2. Spektrum Tegangan Motor Induksi Hubungan Star Harmonisa Orde Ganjil



Gambar 4.3. Spektrum Arus Motor Induksi Hubungan Star Harmonisa Orde Ganjil

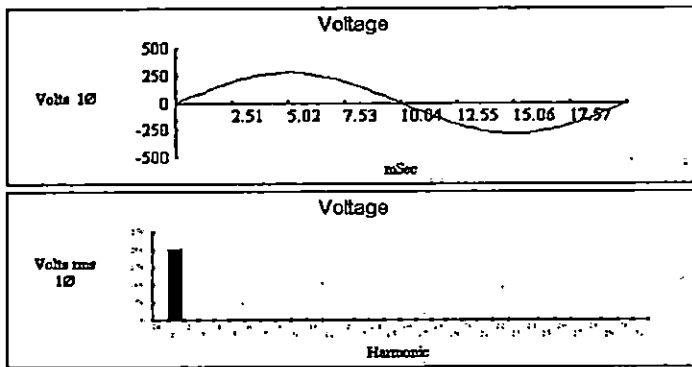
Hasil pengukuran motor induksi hubungan Star (Y) dalam kondisi berbeban seperti terlihat dari Tabel 4.2 pengaruh terhadap bekerja pada frekuensi  $f = 49,81\text{Hz}$ ,  $V_{rms}$  220,7 s.d 210,0 Volt,  $V_{peak}$  321,6 s.d 304,8 Volt, distorsi total harmonisa tegangan  $V_{THD}$  2,06% s.d 1,73%. Pengaruh terhadap arus  $I_{rms}$  0,53 s.d 3,61A,  $I_{peak}$  0,71 s.d 5,11A, distorsi total harmonisa arus  $I_{THD}$  3,92 s.d 2,40%: Bentuk gelombang dan spectrum pada Table 4.3, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3, yang terdistribusi pada harmonisa tegangan dan arus yang dapat diredam atau dikurangi adalah orde ke 3<sup>th</sup>, ke 5<sup>th</sup>, ke 7<sup>th</sup>, ke 9<sup>th</sup> dan ke 13<sup>th</sup>.

Tabel 4.4. Motor induksi hub delta ( $\Delta$ ):

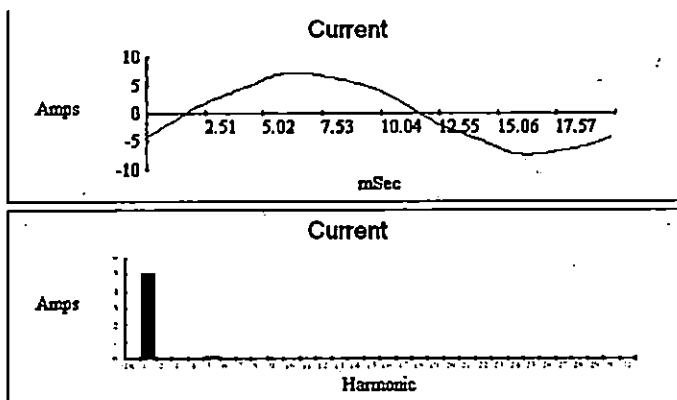
Parameter	Beban 0%	Beban 25%	Beban 50%	Beban 75%	Beban 100%
Frequency	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz	49,81 Hz
$V_{rms}$	206,7 V	205,0 V	203,5 V	200,9 V	196,8 V
$I_{rms}$	4,02 A	4,29 A	4,92 A	5,79 A	6,89 A
$V_{peak}$	294,1 V	293,6 V	291,4 V	288,5 V	282,9 V
$I_{peak}$	5,57 A	6,23 A	7,28 A	8,70 A	10,25 A
$V_{THD}$	0,89%	0,77 %	0,83 %	1,04 %	1,30 %
$I_{THD}$	3,99%	3,29 %	2,64%	1,90 %	1,40 %
kWatts	0,46	0,68	0,88	1,10	1,31
kVA	0,88	0,92	1,04	1,22	1,41
$\cos \phi$	0,75	0,95	1,00	1,00	1,00
$\text{Dpf}$	0,75	0,95	1,00	1,00	1,00

Tabel 4.5. Spektrum Amplitudo Hamonisa Arus Orde Ganjil  $h_1$  s.d  $h_{20}$

Harm ke	Freg Hz	I Mag	%I RMS
h1	49.81	4.88	99.88
h3	149.44	0.00	0.32
h5	249.07	0.02	4.51
h7	348.70	0.02	0.85
h9	448.33	0.00	0.09
h11	547.96	0.01	0.20
h13	647.58	0.00	0.06
h15	747.21	0.00	0.09
h17	846.84	0.01	0.27
h19	946.47	0.01	0.14
h20	996.28	0.00	0.03



Gambar 4.4. Spektrum Tegangan Motor Induksi Hubungan Delta Harmonisa Orde Ganjil.



Gambar 4.5. Spektrum Arus Motor Induksi Hubungan Delta Harmonisa Orde Ganjil

Hasil pengukuran motor induksi hubungan Star ( $\Delta$ ) dalam kondisi berbeban seperti terlihat dari Tabel 4.4 pengaruh terhadap bekerja pada frekuensi  $f = 49,81\text{Hz}$ ,  $V_{\text{rms}}$  206,7 s.d 196,8 Volt,  $V_{\text{peak}}$  294,1 s.d 282,9 Volt, distorsi total harmonisa tegangan  $V_{\text{THD}}$  0,89% s.d 1,30%. Pengaruh terhadap arus  $I_{\text{rms}}$  4,02 s.d 6,89A,  $I_{\text{peak}}$  5,57 s.d 10,25A, distorsi total harmonisa arus  $I_{\text{THD}}$  3,99 s.d 1,40%. Bentuk gelombang dan spectrum pada Table 4.5, Gambar 4.4 dan Gambar 4.5, yang terdistribusi pada harmonisa tegangan dan arus yang dapat diredam atau dikurangi adalah orde ke 3<sup>th</sup>, ke 5<sup>th</sup>, ke 7<sup>th</sup>, ke 9<sup>th</sup> dan ke 13<sup>th</sup>.

### C. Pembahasan.

Permasalahan yang terdapat pada motor-motor induksi tiga fasa rotor sangkar rendahnya factor kerja, resonansi mekanis yang menyebabkan suara biring (riuh), rusaknya system pengaman dan temperature kerja motor lebih tinggi dari kondisi normal. Hal ini disebabkan adanya gangguan (cacat) dari sumber daya atau motor induksi sendiri yang membangkitkan harmonic pada gelombang tegangan dan arus. Untuk minimisasi atau meredam harmonisa tegangan dan arus digunakan hybrid filter aktif.

Dalam pembahasan ini akan membandingkan hasil pengukuran dengan Power Harmonic Analyzer Fluke 41B saat motor induksi tiga fasa rotor sangkar dioperasikan tanpa hybrid filter aktif dan dipasang hybrid filter aktif sebagai berikut:

#### 1. Perubahan terhadap tegangan.

##### a. Tanpa filter.

Hubungan Star (Y) Tabel 3.3  $V_{\text{rms}}$  218,2 s.d 208,1 Volt,  $V_{\text{peak}}$  317,7 s.d 301,9 Volt, distorsi total harmonisa tegangan  $V_{\text{THD}}$  2,14% s.d 1,81%.

Hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 3.5  $V_{\text{rms}}$  204,3 s.d 194,4 Volt,  $V_{\text{peak}}$  291,6 s.d 280,4 Volt, distorsi total harmonisa tegangan  $V_{\text{THD}}$  1,05% s.d 1,46%.

##### b. Pasang filter.

Hubungan Star (Y) Tabel 4.2  $V_{\text{rms}}$  220,7 s.d 210,0 Volt,  $V_{\text{peak}}$  321,6 s.d 304,8 Volt, distorsi total harmonisa tegangan  $V_{\text{THD}}$  2,06% s.d 1,70%.

Hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 4.4  $V_{\text{rms}}$  206,7 s.d 196,8 Volt,  $V_{\text{peak}}$  294,1 s.d 282,9 Volt, distorsi total harmonisa tegangan  $V_{\text{THD}}$  0,89% s.d 1,30%.



c. Pengaruh hubungan Star (Y)

Tegangan rms naik sebesar 2,5V s.d 1,9V dan Teangan paek 3,9V s.d 2,9 V, hal ini sangat dipengaruhi adanya kompensasi reaktansi induktif dari kapasitor pada interface filter. Sedangkan distorsi total harmonisa tegangan berkurang atau dapat diredam sebesar  $V_{THD}$  0,08% s.d 0,35%, hal ini pengaruh interface filter dan Mosfet inverter mengenjeksikan gelombang sinusoidal gigi gergaji untuk minimisasi harmonisa tinggi.

d. Pengaruh hubungan Delta ( $\Delta$ )

Tegangan rms naik sebesar 2,4V dan Teangan paek 2,5V, hal ini sangat dipengaruhi adanya kompensasi reaktansi induktif dari kapasitor pada interface filter. Sedangkan distorsi total harmonisa tegangan berkurang atau dapat diredam sebesar  $V_{THD}$  0,26% s.d 0,16%, hal ini pengaruh interface filter dan Mosfet inverter mengenjeksikan gelombang sinusoidal gigi gergaji untuk minimisasi harmonisa tinggi.

2. Perubahan terhadap arus.

a. Tanpa filter

Hubungan Star (Y) Tabel 3.3 Irms 1,30 s.d 4,38A, Ipeak 1,81 s.d 6,21A, distorsi total harmonisa arus  $I_{THD}$  4,40 s.d 2,88%.

Hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 3.5 Irms 4,88 s.d 7,85A, Ipeak 6,74 s.d 11,42A, distorsi total harmonisa arus  $I_{THD}$  4,65% s.d 2,06%.

b. Pasang filter

Hubungan Star (Y) Tabel 4.2 Irms 0,53 s.d 3,61A, Ipeak 0,71 s.d 5,11A, distorsi total harmonisa arus  $I_{THD}$  3,92 s.d 2,40%.

Hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 4.4 Irms 4,02 s.d 6,89A, Ipeak 5,57 s.d 10,25A, distorsi total harmonisa arus  $I_{THD}$  3,99 s.d 1,40%.

c. Pengaruh hubungan Star (Y)

Arus rms berkurang sebesar 0,77A dan Arus paek 1,10A, hal ini sangat dipengaruhi adanya kompensasi reaktansi induktif dari kapasitor pada interface filter. Sedangkan distorsi total harmonisa arus berkurang atau dapat

diredam sebesar  $I_{THD}$  0,48%, hal ini pengaruh interface filter dan Mosfet inverter menggenjeksikan gelombang sinusoidal gigi gergaji untuk minimisasi harmonisa tinggi.

d. Pengaruh hubungan Delta ( $\Delta$ )

Arus rms berkurang sebesar 0,86A dan Arus paek 1,17A, hal ini sangat dipengaruhi adanya kompensasi reaktansi induktif dari kapasitor pada interface filter. Sedangkan distorsi total harmonisa arus berkurang atau dapat diredam sebesar  $V_{THD}$  0,66%, hal ini pengaruh interface filter dan Mosfet inverter menggenjeksikan gelombang sinusoidal gigi gergaji untuk minimisasi harmonisa tinggi.

3. Perubahan terhadap factor kerja.

a. Tanpa filter

Hubungan Star (Y) Tabel 3.3 Tpf 0,80 s.d 1,00, Dpf 0,80 s.d 1,00.

Hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 3.5 Tpf 0,67 s.d 1,00, Dpf 0,67 s.d 1,00

b. Pasang filter

Hubungan Star (Y) Tabel 4.2 Tpf 0,89 s.d 1,00, Dpf 0,89 s.d 1,00.

Hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 4.4 Tpf 0,75 s.d 1,00, Dpf 0,75 s.d 1,00

c. Pengaruh hubungan Star (Y)

Total factor kerja motor induksi membaik sebesar Tpf 0,09, sedangkan distorsi factor kerja motr juga membaik sebesar Dpf 0,09, hal ini sangat berpengaruh besar adanya kapasitor pada interface filter, disamping itu dapat minimisasi harmonisa orde rendah.

d. Pengaruh hubungan Delta ( $\Delta$ )

Total factor kerja motor induksi membaik sebesar Tpf 0,08, sedangkan distorsi factor kerja motr juga membaik sebesar Dpf 0,08, hal ini sangat berpengaruh besar adanya kapasitor pada interface filter, disamping itu dapat minimisasi harmonisa orde rendah.

4. Perubahan terhadap kVA

e. Tanpa filter

Hubungan Star (Y) Tabel 3.3 kVA 0,28 s.d 0,91

Hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 3.5 kVA 1,00 s.d 1,53.

b. Pasang filter

Hubungan Star (Y) Tabel 4.2 kVA 0,11 s.d 0,74.

Hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 4.4 kVA 0,88 s.d 1,41.

c. Pengaruh hubungan Star (Y)

Berkurangnya daya terpakai oleh motor induksi sebesar kVA 0,17, sangat ditentukan oleh kapasitas kapasitor yang digunakan pada interface filter.

d. Pengaruh hubungan Delta ( $\Delta$ )

Berkurangnya daya terpakai oleh motor induksi sebesar kVA 0,12, sangat ditentukan oleh kapasitas kapasitor yang digunakan pada interface filter.

5. Perubahan terhadap distribusi harmonisa tegangan dan arus pada orde.

a. Tanpa filter

Spektrum tegangan dan arus dalam hubungan Star (Y) Tabel 3.4 Distribusi harmonisa pada orde ke 3<sup>th</sup> s.d ke 20<sup>th</sup>.

Spektrum tegangan dan arus dalam hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 3.6. Distribusi harmonisa pada orde ke 3<sup>th</sup> s.d ke 20<sup>th</sup>.

b. Pasang filter

Spektrum tegangan dan arus dalam hubungan Star (Y) Tabel 4.3. Distribusi harmonisa yang dapat diminimisasi atau diredam oleh hybrid filter aktif adalah ke 3<sup>th</sup>, 5<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup> dan 13<sup>th</sup>.

Spektrum tegangan dan arus dalam hubungan Delta ( $\Delta$ ) Tabel 4.5. Distribusi harmonisa yang dapat diminimisasi atau diredam oleh hybrid filter aktif adalah ke 3<sup>th</sup>, 5<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup> dan 13<sup>th</sup>.

## BAB V

### Kesimpulan dan Saran

#### 1. Kesimpulan.

Kesimpulan yang diperoleh penelitian ini untuk meminimasi pengaruh harmonisa tegangan dan arus terhadap motor induksi tiga fasa rotor sangkar dengan memasang hybrid filter aktif di jala-jala sumber daya listrik sebagai berikut:

- a. Tegangan motor induksi dalam hubungan Star (Y). Tegangan rms naik sebesar 2,5V s.d 1,9V dan Teangan paek 3,9V s.d 2,9 V. Sedangkan distorsi total harmonisa tegangan berkurang atau dapat diredam sebesar  $V_{THD}$  0,08% s.d 0,35%.
- b. Tegangan motor induksi dalam hubungan Delta ( $\Delta$  ). Tegangan rms naik sebesar 2,4V dan Teangan paek 2,5V. Sedangkan distorsi total harmonisa tegangan berkurang atau dapat diredam sebesar  $V_{THD}$  0,26% s.d 0,16%.
- c. Arus motor induksi dalam hubungan Star (Y). Arus rms berkurang sebesar 0,77A dan Arus paek 1,10A. Sedangkan distorsi total harmonisa arus berkurang atau dapat diredam sebesar  $I_{THD}$  0,48%.
- d. Arus motor induksi dalam hubungan Delta ( $\Delta$  ). Arus rms berkurang sebesar 0,86A dan Arus paek 1,17A. Sedangkan distorsi total harmonisa arus berkurang atau dapat diredam sebesar  $V_{THD}$  0,66%.
- e. Faktor kerja motor induksi hubungan Star (Y). Total factor kerja motor induksi membaik sebesar Tpf 0,09, sedangkan distorsi factor kerja motr juga membaik sebesar Dpf 0,09.
- f. Faktor kerja motor indusi hubungan Delta ( $\Delta$  ). Total factor kerja motor induksi membaik sebesar Tpf 0,08, sedangkan distorsi factor kerja motr juga membaik sebesar Dpf 0,08.

- g. Daya terpakai motor induksi hubungan Star (Y). Berkurangnya daya terpakai oleh motor induksi sebesar kVA 0,17.
- h. Daya terpakai motor induksi hubungan Delta ( $\Delta$ ). Berkurangnya daya terpakai oleh motor induksi sebesar kVA 0,12.
- i. Harmonisa yang dapat diminimisasi kondisi motor induksi baik dalam hubungan Star (Y) maupun hubungan Delta ( $\Delta$ ) menggunakan hybrid filter aktif adalah orde ke 3<sup>th</sup>, 5<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup> dan 13<sup>th</sup>.

## 2. Saran-Saran.

Disamping kesimpulan yang dikemukakan diatas dapat pula diberikan beberapa saran sebagai berikut:

- a. Dalam mendisain sinusoidal pulse width modulation sangat diperlukan kecermatan yang tinggi untuk memperoleh sinyal gergaji ditentukan oleh frekuensi dasar sinyal dengan banyak sinyal counter.
- b. Diperlukan ketelitian dalam mensetting sensor arus pada rangkaian IC senros LTC 1966 dan Coil CT DT3316 bervariasi konduktur antara 1 s.d 100  $\mu$ H.
- c. Untuk mendapatkan pembangkit sinyal kendali Mosfet inverter sebaiknya menggunakan Mikroprosesor dan juga dapat memproteksi dari keseluruhan system hybrid filter aktif.

## Daftar Pustaka

1. Adarayana , "*Analytical Evaluation Of Harmonic Distortion In PWM AC Drives Using The Notion Of Stator Flux Ripple*", IEEE Trans action on Power Electronic, Vol 20, No 2, March 2005.
2. Almanda.Deni,"*Peraman Kapasitor Dalam Penggunaan Energi Listrik*", Elektro Energi No. 30 tahun VI, April 2000.
3. Bachtiar H.Awang Djohan,"*Studi Pemakaian Kapasitor 6,3kV Sebagai Filter Harmonik Pada Sistem Distribusi Listrik PT. Semen Gresik (Persero) Tbk.Pabrik Tuban III*", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, FTI, Universitas Kristen Petra, Surabaya, 2001.
4. Erichson Robert W,"*Advances in Averged Switch Modeling*", <http://ece-www.colorado.edu/~pwrelect>.
5. Dahono Pekik Argo,"*Menimisasi Riak Arus Keluaran Penyearah Daya Besar Dengan Menggunakan Filter Aktif*", Proceeding Institut Teknologi Bandung, revisi 7 Desember 1999.
6. Halpin S.Mark,"*Harmonic Limit Compliance Evaluations Using IEEE-519-1992*", Missisipi State University, Starkville, MS, Alabama Power Company, 2005.
7. Massara Robert.E,"*Active Filter, Chapter 29*", Boca Raton CRC Prees,2000.
8. Malvino Albert Paul,"*Aproksimasi Rangkaian Semikonduktor, Pengantar Transistor Dan Rangkaian Terpadu*", Edisi keempat Penerbit Erlangga, 1985.
9. Nagrath I.J Cs,"*Electric Machines*", McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1989.
10. Nation Natasha Yvette,"*A Framework For A Computer Simulation Tool For Harmonic Analysis Of Multi-Phase Power Systems*", Thesis, Mississippi State, August 1998.
11. Nugroho Agung,"*Harmonisa Arus Mesin Induksi*", Jurusan Teknik Elektro UNDIP, Transmisi, Vol 8, No 2, Desember 2004.
12. Rashid Muhammadh, "*Power Electronics Circuits Devices And Applications*", Second Edition, Prentice Hall.inc, 1988.
13. Sen P.C , "*Principles Of Electric Machines And Power Electronics*", Yohn Wiley&Sons inc, Canada, 1989.

MILIK PERPUSTAKAAN  
UNIV. NEGERI PADANG

14. Soemitro Herman Widodo, "Penguat Operasional Dan Rangkaian Terpadu-Linear", Edisi Kelima, Penerbit Erlangga, 1985.
15. Sutanto Yusmin Cs, "Implikasi Harmonisa Dalam Sistem Tenaga Listrik Dan Alternatif Solusinya", e-mail: [yusmin@unp.ac.id](mailto:yusmin@unp.ac.id)
16. Sugiyono Agus, "Teknik Penghilangan Harmonisa Pada Inverter Satu Fasa Dengan Mikroprosesor Sebagai Pembangkit Sinyal Kendali", Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro, ITB, 1988.
17. Syafrudin Cs, "Analisis Penggunaan Autotrafo Penggeser Fasa Sebagai Minimisator Harmonisa Arus Di Sistem Distribusi Tenaga listrik", Proceeding Institut Teknolgi Bandung, Revisi 7 Desember 1999.
18. Syafrudin, "Metoda Baru Pengurangan Arus Harmonisa Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik", Ganesha Digital Library, Publisher 2004.
19. Syamsuddin Erisman.Y Cs, "Sistem Kendali", Diktat Kuliah, Terbitan Jurusan Teknik Elektro ITB, Februari, 2001.
20. Tanoto Yusak, "Simulasi Active Filter Dan Sistem Kerja Rangkaian Dalam Meredam Harmonisa Pada Vaccum Carting Induction Furnace Dengan Daya 9kW, 13,8 kVA, 200V, 3 fasa, 50/60Hz", Jurnal Teknik Elektro Vol 5, No 1, Maret 2005.
21. Tribuana Nanan Cs, "Pengaruh Harmonik Pada Transformator Distribusi", Elektro Energi No. 25 tahun V, April 1999.
22. Tyastuti Juning Cs, "Analisis Dampak Terptusnya Kawat Netral Terhadap JTM 20 kV", Transmisi, Vol 10, No 2, Desember 2005.