

**IDENTIFIKASI LOKASI SUMBER HARMONIK
PADA SISTEM TENAGA LISTRIK**

*AN IDENTIFICATION OF THE LOCATION OF HARMONIC SOURCES
IN A POWER SISTEM*

**ABDUL HARIS MUBARAK
P2700211424**



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2013

**IDENTIFIKASI LOKASI SUMBER HARMONIK
PADA SISTEM TENAGA LISTRIK**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi
Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

ABDUL HARIS MUBARAK

Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2013

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Abdul Haris Mubarak

Nomor Mahasiswa : P2700211424

Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 1 Agustus 2013

Yang menyatakan

Abdul Haris Mubarak

KATA PENGANTAR

“Perjalanan panjang selalu diawali dari satu langkah kecil”

Segala puji atas karunia dan nikmat yang telah Tuhan berikan kepada penulis sehingga dengan segala keterbatasan yang penulis miliki pada akhirnya tesis yang berjudul *“Identifikasi Lokasi Sumber Harmonik pada Sistem Tenaga listrik”* dapat penulis selesaikan.

Shalawat dan salam juga senantiasa tercurahkan kepada Baginda Rasulullah *Shallallahu ‘alaihi Wasallam*, keluarga, para sahabat yang senantiasa setia kepada beliau dan orang – orang yang selalu memuliakan beliau.

Penulisan Tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam proses perkuliahan dan penyusunan tesis ini tidak terlepas dari bantuan baik materil, moral dan spiritual dari berbagai pihak. Olehnya itu, penulis ingin menghaturkan terima kasih yang sedalam – dalamnya kepada :

1. Teristimewa kedua orang tua, kedua saudara serta para keluarga yang tak henti – hentinya mendoakan dan mendukung penulis dalam segala hal.
2. Negara Republik Indonesia yang telah memberikan kesempatan berupa beasiswa untuk melanjutkan studi S2.

3. Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang selaku ketua Program Studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Unhas dan sekaligus sebagai pembimbing satu yang telah banyak memberikan bantuan dan masukannya.
4. Prof. Dr. Ir. H. Nadjamuddin Harun, MS selaku pembimbing dua yang banyak memberikan masukan dan motivasi kepada penulis.
5. Seluruh staf pengajar Program Studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Unhas atas ilmu yang telah mereka berikan.
6. Staf pegawai Program Program Studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Unhas atas bantuannya selama ini
7. Staf pegawai PT. PLN (Persero) Unit AP2B (Mbak Win, Pak Mudakkir, Pak Agus Riyadi, Pak Satpam, DII) yang banyak membantu penulis dalam memberikan data – data untuk penelitian ini.
8. Teman – teman Prodi Elekrto angkt 2011 yang tidak sempat penulis tuliskan namanya satu persatu. Terima kasih atas kebersamaan dan bantuannya selama dua tahun ini.
9. Adik Sartika Said yang banyak membantu penulis dalam pembuatan simulasi dengan menggunakan software ETAP Power Station.
10. Terkhusus kepada Sri Trisna Deni yang selalu menjadi motivasi bagi penulis dalam penyelesaian tesis ini.

Penulis juga menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, saran dan kritikan yang sifatnya membangun sangat dibutuhkan demi kesempurnaan tesis ini.

Akhir kata penulis sangat berharap agar tesis ini bisa bermanfaat bagi kita semua.

Makassar, Agustus 2013

Penulis

Abdul Haris Mubarak

ABSTRAK**ABSTRAK**

ABDUL HARIS MUBARAK, *Identifikasi lokasi sumber harmonik pada sistem tenaga listrik.* (Dibimbing oleh **Salama Manjang** dan **Nadjamuddin Harun**)

Gangguan harmonisa merupakan suatu fenomena di sistem tenaga listrik yang disebabkan oleh banyaknya pemakaian beban non linier yang membentuk gelombang sinus tak sempurna sehingga dapat menyebabkan peralatan menjadi lebih cepat panas, umur peralatan menjadi berkurang dan juga dapat menyebabkan *losses*.

Disamping penentuan lokasi sumber harmonisa dominan, mengantisipasi pengaruh harmonisa agar tidak masuk ke dalam sistem juga sangat penting. Maka dari itu, digunakanlah filter harmonisa passif *single tuned* yang dipasang di tiga bus secara bergantian dengan melakukan simulasi menggunakan software ETAP Power Station untuk memperoleh penempatan filter yang ideal. Hasil simulasi itu menunjukkan bahwa pemasangan filter single-tuned yang pasling ideal berada pada Bus tello2 karena harmonisa tegangan dan arusnya turun, sementara pada Bus brwaja dan Lbus brwja hanya terjadi penurunan harminisa tegangan sementara harmonisa arusnya naik.

Dengan dilakukannya pemasangan filter single tuned. Jumlah perubahan *losses* jika filter dipasang pada Bus tello2 yaitu terjadi penurunan sebesar 11,1 kw dan 218,3 kVar, sedangkan pada Bus barwja sebesar 28,6 kw dan 112,5 kVar, dan bila filter dipasang pada Lbus brwaja maka penurunan *losses* terjadi sebesar 18,6 kw dan 128,5 kVar.

Kata kunci: Harmonisa, filter harmonik

ABSTRACT

ABDUL HARIS MUBARAK, *An Identification of The Location of Harmonic Sources in a Power System*, (Supervised by **Salama Manjang** dan **Nadjamuddin Harun**)

The study aims determine the locations of harmonics and to analyse the contribution of the dominant harmonics at PCC on Barawaja substation by using the new method to prove that the contribution of the dominant harmonics at the PCC is on the consumer's side. It will also anticipate the effect of harmonics on the system.

The single-tuned passive harmonics filters were alternatingly installed in three buses in a simulation using ETAP power station software to obtain the ideal filter placement.

The simulation shows that the installation on the most ideal single-tuned filter is on Tello 2 bus because the voltage and current harmonics decrease while Barawaja bus and Lbus brwaja only experience a decrease in the voltage but in an increase in the current harmonics.

The single-tuned filter installed in Tello 2 reduces the losses in voltage and current harmonics as much as 11.1 kW and 218.3 kVar respectively, while in Barawaja bus indicates losses as much as 26.6 kW and 112.5 kVar. When the filter is installed in Lbus brwaja, the losses decrease as much as 18.6 kW and 128.5 kVar respectively.

Key-words: harmonic, harmonic filter.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	

BAB I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	2
C. Tujuan Penelitian	3
D. Manfaat Penelitian	3
E. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah	4
F. Roadmap Penelitian	4

BAB II. LANDASAN TEORI

A. Pengertian Harmonisa	6
B. Sumber Harmonisa	7
1. Sumber harmonik dari beban comersail	9
2. Sumber harmonik dari beban industri	15
C. Efek Harmonisa	23

D. Harmonisa pada sistem tenaga listrik	24
E. Metode penentuan lokasi harmonisa	25
F. Penentuan distorsi harmonisa	28
G. Konsep Point Of Common Coupling (PCC)	31
H. Mengatasi Harmonisa	32
I. Filter Harmonisa	33
1. Filter dengan penalaan tunggal	33
2. Filter dengan penalaan ganda	37
3. Damped Filter	38
J. Komponen Filter	30
1. Kapasitor	30
2. Induktor	30
K. Konsep Perancangan Filter	41
1. Kriteria Desain Filter Passif Harmonisa	43
2. Penempatan Filter	44
 BAB III. METODE PENELITIAN	
A. Rancangan penelitian	46
B. Tempat dan waktu penelitian	47
C. Jenis penelitian	47
D. Instrumen Penelitian	48
 BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Penentuan lokasi Sumber Harmonisa	49
B. Simulasi Pemasangan Filter Harmonisa	55

1. Perhitungan filter harmonisa	56
2. Analisa menggunakan ETAP Power Station	60

BAB V. PENUTUP

A. Kesimpulan	70
B. Saran	71

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Akibat dari polaritas komponen harmonic	24
2. Limit Distorsi Arus Harmonisa	29
3. Limit Distorsi Tegangan	30
4. Data pengukuran harmonisa tegangan di sisi utilitas	50
5. Data pengukuran harmonisa tegangan di sisi konsumen	51
6. Hasil perhitungan sumber harmonisa dominan pada fasa R	56
7. Hasil perhitungan sumber harmonisa dominan pada fasa S	57
8. Hasil perhitungan sumber harmonisa dominan pada fasa T	58
9. Hasil simulasi tanpa filter	60
10. Paramter Filter	64
11. Kemungkinan 1 : Filter dipasang di sisi Utilitas (Bus Tello)	68
12. Kemungkinan 2 : Filter dipasang di sisi Utilitas (Bus Barawaja)	70
13. Kemungkinan 3 : Filter dipasang di sisi konsumen (Lbus Barawaja)	71
14. Perubahan losses dengan pemasangan filter pada Bus Tello2	72
15. Perubahan losses dengan pemasangan filter pada Bus Brwaja	72
16. Perubahan losses dengan pemasangan filter pada Lbus Brwaja	73

DAFTAR GAMBAR

Nomor Halaman	
1. Bentuk gelombang terdistorsi harmonik.....	6
2. Fundamental, Third and Fifth Harmonic	7
3. Switch Mode Power Supplies	10
4. Harmonik pada SMPS	12
5. Harmonik Lampu <i>fluorescent</i>	14
6. Arus dan spectrum harmonik pada PWM-type ASD	17
7. dc ASD 6- pulsa (six-pulse dc ASD)	18
8. PWM ASD	19
9. AC ASD kapasitas besar	20
10. Dampak Kecepatan PWM ASD pada arus harmonisa	21
11. Rangkaian ekuivalen <i>arcing devices</i>	22
12. Karakteristik magnetisasi transformator	23
13. Rangkaian Equivalen untuk analisis harmonisa	27
14. Penentuan letak PCC berdasarkan dua kondisi	31
15. Grafik yang dihasilkan oleh single tuned shunt filter	33
16. Grafik yang dihasilkan oleh second-order damped shunt filter	35
17. Perbandingan filter single tuned dengan filter penalaan ganda.....	37
18. Jenis-jenis damped filter	39
19. Flowchart untuk mengevaluasi harmonic distortion	42
20. Sirkuit untuk menentukan distorsi tegangan harmonisa	44

21. Ilustrasi penempatan filter yang efektif	45
22. Pemasangan filter pada Bus Tello	65
23. Pemasangan filter Bus Barawaja	66
24. Pemasangan filter pada Lbus Barawaja	67
25. Grafik sebelum pemasangan filter	69
26. Grafik setelah pemasangan filter	69

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
1. Model simulasi Matlab Simulink PV, Genset, Baterai, kontrol Baterai dan control genset	76
2. Data hasil simulasi dengan menggunakan baterai yang berkapasitas 40 Ah	88
3. Data hasil simulasi dengan menggunakan baterai yang berkapasitas 80 Ah	107

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Salah satu permasalahan kualitas daya adalah permasalahan harmonik, harmonik adalah satu komponen sinusoidal dari satu periode gelombang yang mempunyai satu frekuensi yang merupakan kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya, harmonik ini sangat mengganggu bahkan merugikan sistem bila melebihi batas standar yang ditetapkan, peristilahan harmonik sebenarnya ditujukan untuk kandungan distorsi pada gelombang tegangan dan arus fundamental, harmonik ditimbulkan oleh beban nonlinear, beban linear dianggap dalam masalah harmonik sebagai sumber arus harmonik.

Seiring dengan pertumbuhan teknologi modern yang ditandai dengan peningkatan penggunaan komponen semikonduktor, masalah - masalah harmonisa menjadi meningkat. Yang menjadi tantangan saat ini adalah bagaimana cara membuktikan sumber harmonisa tersebut, siapa yang bertanggung-jawab terhadap gangguan harmonisa tersebut dan bagaimana cara penanganan harmonisa tersebut.

Dalam penentuan sumber harmonisa, beberapa metode telah ditemukan untuk mengidentifikasi sumber harmonisa. *The real power direction method* merupakan metode yang pertama kali diusulkan untuk mengidentifikasi sumber harmonisa. Beberapa kualitas daya dimonitor dengan menggunakan metode ini untuk menemukan sumber harmonisa

dari sisi utilitas atau sisi konsumen. Tetapi hasil metode ini kurang akurat dalam mengidentifikasi sumber harmonisa sehingga tidak dapat diandalkan.

Selain metode di atas, masih ada beberapa metode lagi yang telah ditemukan untuk mengidentifikasi sumber harmonisa, diantaranya metode berdasarkan *Teorema Thevenin*, Superposisi dan *Critical Impedance Method*. Masing – masing metode tersebut di atas memiliki keterbatasan sehingga metode ini tidak praktis untuk diterapkan.

Penelitian ini mencoba menggunakan metode yang disebut dengan *New Method* (Tomasz Pyzalski, dkk) yang mempertimbangkan peningkatan efisiensi sumber-sumber harmonisa. Metode ini juga mampu menentukan kontribusi besarnya tegangan harmonisa pada sisi utilitas dan sisi konsumen pada Point of Common Coupling (PCC).

Selanjutnya penelitian ini akan membahas tentang penanganan dengan melakukan pemasangan filter harmonisa. selain diharapkan mampu mencegah agar efek harmonisa tidak masuk ke dalam sistem, filter harmonisa didesain pula agar dapat mengkompensasi daya reaktif.

B. Rumusan Masalah

Dari latarbelakang di atas, jika suatu sistem banyak menggunakan beban non linear, maka menimbulkan distorsi/polusi harmonisa, sehingga rumusan masalah yang akan dikaji pada penelitian ini adalah :

1. Identifikasi sumber harmonisa di PCC dengan menggunakan new method.
2. Penentuan letak kontribusi sumber harmonisa dari utilitas atau konsumen pada Gardu Induk Barawaja.
3. Perancangan filter harmonisa yang tepat secara teknis dan ekonomis.
4. Seberapa besar pengaruh filter harmonisa terhadap losses pada sistem di Gardu Induk Barawaja.

C. Tujuan Penelitian

1. Mengidentifikasi sumber harmonisa dominan di Point of Common Coupling (PCC).
2. Menentukan kontribusi sumber harmonisa dari utilitas atau konsumen pada Gardu Induk Barawaja.
3. Melakukan simulasi pemasangan filter harmonisa.
4. Menentukan pengaruh filter harmonisa terhadap losses pada sistem di Gardu Induk Barawaja.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam penentuan lokasi sumber harmonisa yang tepat secara teknis dan ekonomis sesuai dengan kontribusi harmonisa (komponen harmonisa dan tipe harmonisa) yang dibangkitkan utilitas dan konsumen dalam rangka pengendalian distorsi harmonisa khususnya di sistem distribusi.

E. Ruang Lingkup Masalah

Pada penelitian ini, batasan masalah dirumuskan sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan pada sistem distribusi (Tegangan 20 dan 30 KV).
2. Pengukuran dilakukan pada salah satu penyulang (Feeder) di sistem distribusi yang diduga merupakan sumber harmonisa, yakni feeder Barawaja.

F. Roadmap Penelitian

Guna mendukung langkah – langkah penelitian yang akan kami lakukan, berikut kami tuliskan secara ringkas roadmap penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya yang khusus membahas tentang masalah identifikasi sumber harmonic.

1. *“Identifikasi Sumber Harmonisa pada Sistem Distribusi Industri dengan Menggunakan Metode Harmonic Current Vektor”*. Penelitian ini mengidentifikasi sumber harmonic dengan metode harmonic current vector dengan impedansi referensi untuk pemisahan kontribusi harmonisa arus dan tegangan dapat diketahui sisi mana yang memberikan kontribusi harmonisa terbesar pada PCC.
2. *“Aplikasi Metode Gradien Daya Reaktif dalam Pemisahan Kontribusi Harmonisa Konsumen dan Utilitas pada Point of Common Coupling”*. Penelitian ini mengidentifikasi sumber harmonisa dengan menggunakan metode gradien daya reaktif terhadap waktu ($\Delta Q/\Delta t$).

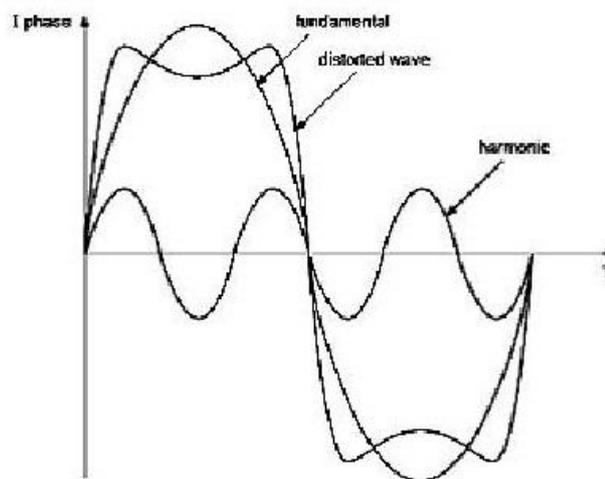
3. "*Identification of Harmonic Sources in a Power System: A New Method*" Penelitian ini menemukan suatu metode baru untuk mengidentifikasi lokasi sumber harmonisa pada sisi utilitas maupun konsumen di *Point of Common Coupling*. Namun dalam penelitian hanya membahas tentang pembuktian akurasi metodenya dalam mengidentifikasi lokasi sumber harmonisa.

BAB II

LANDASAN TEORI

A. Pengertian Harmonisa

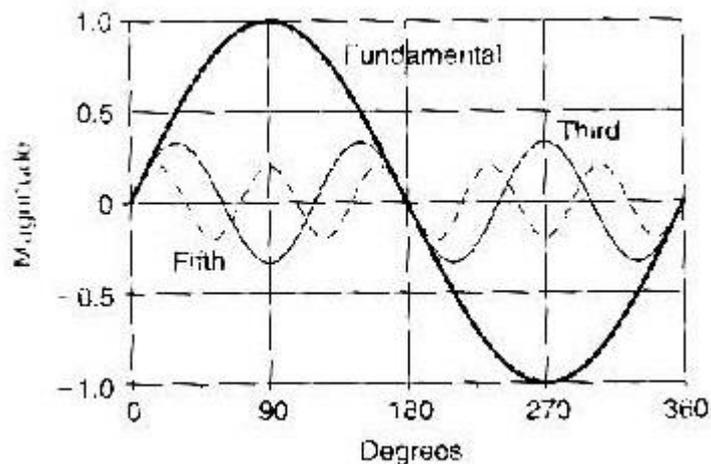
Harmonisa didefinisikan sebagai cacat gelombang sinus yang terjadi yang disebabkan oleh interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem dengan gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi *fundamental-nya*. Frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz (di Indonesia), maka harmonik kedua adalah gelombang dengan frekuensi 100Hz, harmonik ketiga adalah gelombang dengan frekuensi 150 Hz dan seterusnya. Gelomhang-gelombang ini menumpang pada gelombang aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang asli dengan gelombang harnioniknya.



Gambar 2.1. Bentuk gelombang sinusoidal dan gelombang yang terdistorsi.

Harmonisa ketiga dapat didefinisikan sebagai 3 periodik gelombang yang terbentuk pada saat gelombang fundamental-nya masih berlangsung

dalam satu periode. Harmonisa yang kelima juga terbentuk menjadi 5 periode gelombang yang kecil amplitudonya saat gelombang fundamentalnya masih berlangsung dalam satu periode. Dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Fundamental, Third and Fifth Harmonic

B. Sumber Harmonisa

Pada sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier memberikan bentuk gelombang keluaran linier artinya arus yang mengalir sebanding dengan perubahan tegangan, Sedangkan beban non-linier memberikan bentuk gelombang keluaran arus yang tidak sebanding dengan tegangan dasar sehingga gelombang arus maupun tegangannya tidak sama dengan gelombang masukannya.

Beban non-linier umumnya merupakan komponen semikonduktor yang pada proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap setengah siklus gelombang atau beban yang membutuhkan arus

yang tidak tetap pada setiap periode waktunya. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan/distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. Bentuk gelombang ini tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter beban-beban non-linier yang terpasang. Perubahan bentuk gelombang ini tidak berkaitan dengan sumber tegangannya.

Sumber harmonik secara garis besar terdiri dari 2 jenis yaitu peralatan yang memiliki kondisi saturasi dan peralatan elektronika daya. Peralatan yang memiliki kondisi saturasi biasanya memiliki komponen yang bersifat magnetic seperti transformator, mesin-mesin listrik, tanur busur listrik, peralatan yang menggunakan *power supply*, dan *magnetic ballast*. Peralatan elektronika daya biasanya menggunakan komponen-komponen elektronika daya seperti tiristor, dioda, dan lain-lain. Contoh peralatan yang menggunakan komponen elektronika daya adalah konverter statik, konverter PWM, inverter, pengendali motor listrik, *electronic ballast*, dan sebagainya. Pada rumah tangga, beban nonlinier terdapat pada peralatan seperti lampu hemat energi, televisi, video player, ac, komputer, dan kulkas/dispenser.

C. Dugan Roger, 2004, membagi sumber-sumber harmonisa berdasarkan sumber harmonik dari beban komersial dan sumber harmonik dari beban industri sebagai berikut :

1. Sumber Harmonik dari Beban Komersil

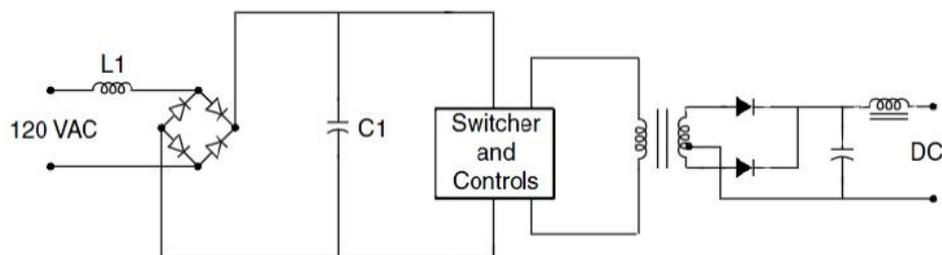
Fasilitas komersial seperti kantor yang kompleks, pusat perbelanjaan, rumah sakit, dan akses internet data didominasi oleh lampu flourecent dengan ballast elektronik, Pengatur kecepatan (*adjustable-speed driver*) digunakan pada pemanasan (*heating*), Ventilasi (*Ventilation*), dan pendingin ruangan (AC) disingkat HVAC, elevator, dan peralatan elektronik sensitive lainnya pada umumnya disuplai dari *single-phase switch-mode power supplies*. Beban komersial merupakan beban dengan produksi harmonik yang kecil, tergantung pada keragaman jenis beban, karakteristik beban non linear komersial diuraikan secara detail sebagai berikut.

1. Single-Phase Power Suplies

Beban-beban *electronic power converter* dengan sifat kapasitifnya akan menghasilkan arus harmonik yang merupakan jenis yang sangat penting pada beban-beban nonlinear di sistem tenaga listrik. Kemajuan pada teknologi perangkat semikonduktor merupakan pendorong revolusi elektronik daya dibandingkan dekade yang lalu, dan kecenderungan kemajuan teknologi ini akan terus berlanjut. Yang termasuk dalam klasifikasi beban *single-phase power supplies* ini seperti *adjustable-speed motor drives*, *electronic power supplies*, *dc motor drives*, *battery chargers*, *electronic ballast* dan peralatan *rectifier* serta *inverter*.

Pada gedung-gedung perkantoran, *DC power* untuk peralatan-peralatan elektronik modern dan *microprocessor-based* biasanya dipasok

dari *single-phase full-wave diode bridge rectifiers*. Persentase beban yang mengandung *electronic power supplies* semakin meningkat seiring dengan penggunaan komputer pada setiap sektor komersial. Pada umumnya dapat dijumpai dua jenis *single-phase power supplies*. Teknologi yang lama menggunakan metoda pengendalian tegangan sisi-AC untuk menurunkan tegangan sesuai dengari tingkat yang dibutuhkan pada DC-bus. Teknologi yang terbaru adalah peralatan *switch-mode power supplies* yang menggunakan teknik konversi DC-ke-DC untuk mencapai keluaran DC yang *smooth* dengan komponen-komponen yang kecil dan ringan, seperti yang diperlihatkan pada gambar 3 di bawah ini.

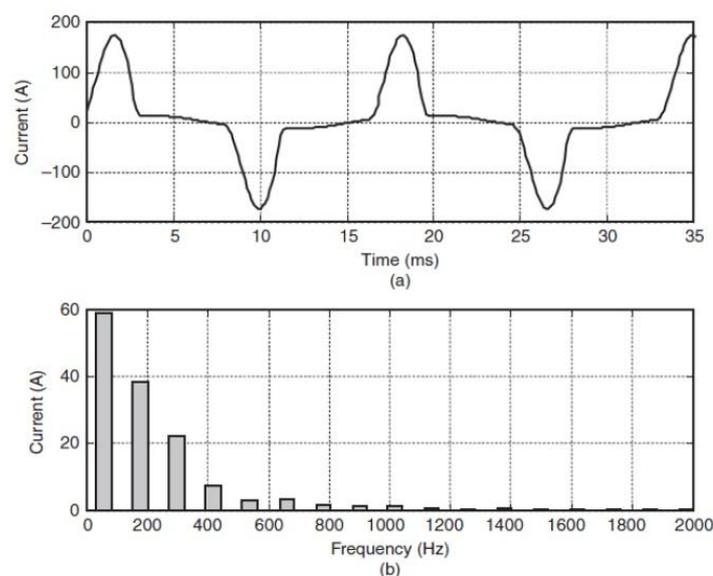


Gambar 2.3 Switch Mode Power Supplies

Pada gambar 3 di atas, masukan jembatan dioda terhubung langsung dengan jaringan listrik AC, mengeliminasi keberadaan trafo. Keluaran dari jembatan dioda masuk kedalam pengaturan tegangan dc di kapasitor. Arus searah DC ini kemudian dikonversi kembali menjadi arus bolak balik dengan frekwensi yang sangat tinggi dengan bantuan switcher dan setelah itu disearahkan kembali. Personal computer, printer, mesin

fotocopy, dan banyak lagi peralatan elektronika satu-fasa yang sekarang hampir secara universal menggunakan *switch-mode power supplies* (SMPS) ini. Keuntungan menggunakan SMPS ini adalah peralatan dapat lebih ringan, ukurannya ringkas, operasinya lebih efisien dan tidak membutuhkan trafo. SMPS biasanya dapat tahan terhadap variasi tegangan input. Gambar 4 memperlihatkan gelombang arus dan spektrum untuk keseluruhan rangkaian yang memasok berbagai peralatan elektronik dengan menggunakan SMPS.

Karakteristik yang khusus dari *switch-mode power supplies* ini adalah arus harmonisanya mengandung harmonisa orde ke-3 yang sangat tinggi. Komponen arus harmonisa orde ke-3 ini *additive* pada netral sistem tiga fasa. Peningkatan penggunaan SMPS menyebabkan perhatian pada kelebihan beban (*overloading*) pada konduktor netral.



(a) Gelombang Arus SMPS, (b) Spektrum harmonisa SMPS,
Gambar 2.4. Harmonik pada SMPS

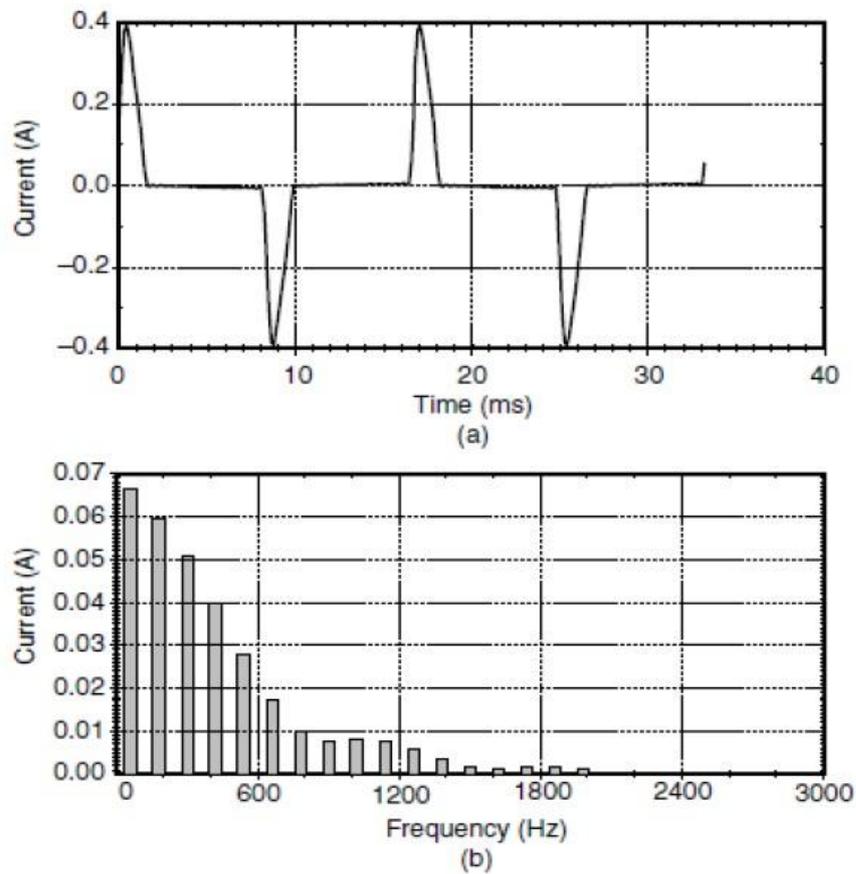
Hal ini khususnya terjadi pada gedung-gedung lama yang mungkin menggunakan penghantar netral yang kecil.. Selain *overloading* pada konduktor netral, terjadi juga *overheating* pada trafo berkaitan dengan kandungan harmonisa arus, stray flux dan arus netral yang tinggi.

➤ Lampu Flourescent

Penggunaan lampu pada umumnya sebesar 40% - 60% dari beban gedung-gedung komersial. Sebelum munculnya penggunaan lampu hemat energi (LHE), lampu *flourescent* merupakan merupakan pilihan populer untuk penghematan energi. Lampu *flourescent* merupakan lampu yang menggunakan sistem pelepasan muatan yang membutuhkan sebuah ballast agar dapat melakukan *high initial voltage* untuk memicu pelepasan muatan sehingga arus listrik mengalir diantara dua elektroda yang berada di dalam tabung *flourescent*. Setelah pelepasan muatan stabil, tegangan berkurang seiring dengan peningkatan arus busur. Sangatlah penting adanya *short-circuit* diantara dua elektroda tersebut yang kemudian perangkat *ballast* secara cepat mengurangi arus pada level yang sesuai dengan nilai output lumen yang telah ditentukan. Dengan demikian, *ballast* pada lampu *flourescent* berfungsi sebagai peralatan pembatas arus pada aplikasi lampu.

Ada dua jenis *ballast*, yaitu jenis magnetik dan jenis elektronik. Suatu standar *ballast* magnetik secara sederhana dibuat dari sebuah inti besi trafo dengan kapasitor yang dibungkus dengan material isolasi. Sebuah *ballast* magnetik tunggal dapat mengendalikan satu atau dua

lampu *flourescent*, dan beroperasi pada frekwensi fundamental. inti besi dari ballast jenis magnetik ini memberikan tambahan susut panas yang menyebabkan ketidakefisienan dibandingkan ballast jenis elektronik. Sebuah ballast jenis elektronik menggunakan *switch-mode-type power supply (SMPS)* untuk mengkonversikan *incoming* tegangan frekwensi fundamental menjadi tegangan frekwensi yang sangat tinggi yang secara khas berada dalam range 25 - 40 kHz. Frekwensi yang tinggi ini mempunyai dua buah keuntungan. Keuntungan yang pertama adalah sebuah induktor yang kecil cukup untuk membatasi busur arus. Keuntungan yang kedua adalah frekwensi yang tinggi dapat mengeliminasi ataupun mengurangi sebagian besar *flicker* 100 Hz atau 120 Hz yang muncul pada *ballast* jenis inti besi. Sebuah *ballast* elektronik dapat mengendalikan hingga empat lampu flourescent.



Gambar 2.5. Harmonik lampu *fluorescent* (a). Bentuk Gelombang Arus ballast elektronik, (b). Harmonik Spektrum Ballast elektronik

Ballast elektronik lainnya telah secara khusus dirancang untuk meminimalisasi harmonisa dan dapat benar-benar menghasilkan distorsi harmonisa yang rendah dibandingkan dengan lampu yang menggunakan *ballast* magnetik. *Ballast* elektronik pada umumnya menghasilkan THDI pada range antara 10 - 32%. Menurut ANSI C82.II-1993, THDI arus untuk ballast lampu *fluorescent* tidak diperkenankan lebih dari 32%. Kebanyakan ballast elektronik dilengkapi dengan filter pasif untuk mengurangi distorsi arus harmonisa inputnya sehingga dapat kurang dari 120%.

➤ Pengatur Kecepatan Motor (*Adjustable-Speed drives/ASD*)

Aplikasi umum pengatur kecepatan motor pada beban komersial ditemukan pada motor-motor elevator, pompa, kipas angin dan pendingin ruangan. ASD terdiri dari peralatan elektronika daya yang mengkonversi tegangan dan frekuensi untuk mengontrol kecepatan motor yang terdapat pada pompa, kipas angin dan pendingin udara (AC). ASD banyak juga diaplikasikan pada beban industri.

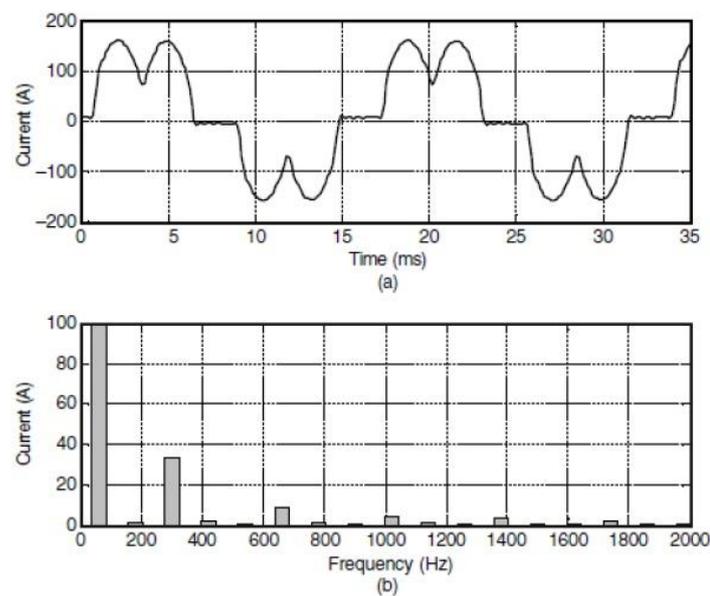
2. Sumber Harmonik dari Beban Industri

Fasilitas industri modern dicirikan oleh aplikasi luas beban nonlinier. Sumber harmonisa dari kelompok beban industri ini merupakan sumber harmonisa yang sangat penting, karena beban industri pada umumnya menghasilkan harmonisa yang cukup besar dibandingkan dengan beban komersial. Industri sering memanfaatkan fasilitas kapasitor bank untuk memperbaiki faktor daya untuk menghindari biaya penalti. Aplikasi kapasitor untuk perbaikan faktor daya memperbesar harmonik arus dari beban nonlinier, sehingga menimbulkan resonansi. Distorsi tegangan tertinggi biasanya terjadi pada bus fasilitas tegangan rendah di mana kapasitor diterapkan. Resonansi menyebabkan kondisi motor dan transformator *overheating*, dan kesalahan operasi pada peralatan elektronik yang sensitif. Beban nonlinear industri secara umum dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori : Konverter daya tiga fasa (*three-phase power converters*), peralatan tungku (*arcing devices*) dan

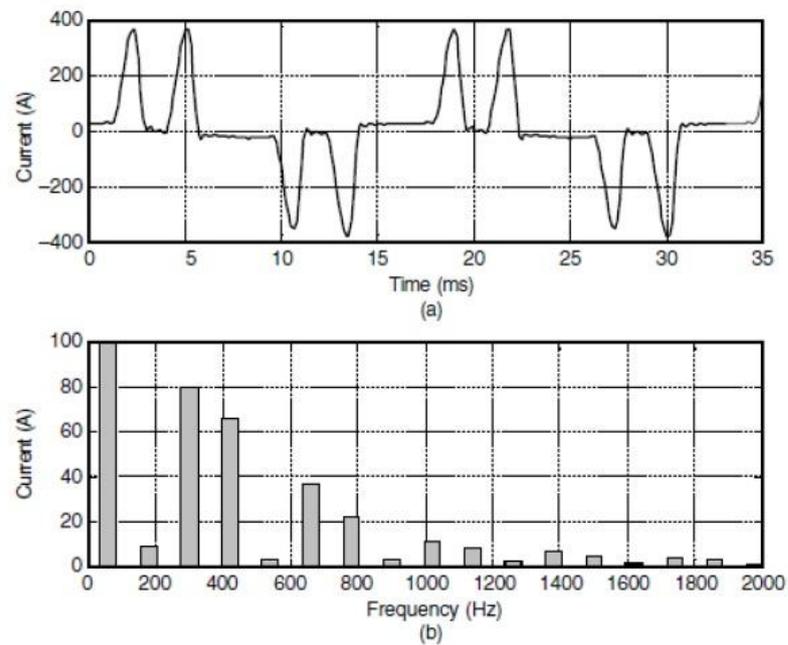
perangkat saturasi (*saturable devices*). Secara detail karakteristik beban industri adalah sebagai berikut :

➤ Three-Phase Power Converters

Konverter elektronika daya tiga fasa berbeda dari konverter satu fasa terutama karena tidak menghasilkan arus harmonik ketiga. Ini adalah keuntungan besar karena arus harmonisa ketiga adalah komponen terbesar harmonisa. Namun demikian, converter ini masih signifikan sebagai sumber harmonisa pada frekuensi karakteristiknya. Gambar 6 adalah jenis sumber arus ASD (*current source inverter driver*) dan spectrum harmoniknya, sedangkan *voltage source inverte drives* (tipe PWM) ditunjukkan pada gambar 7



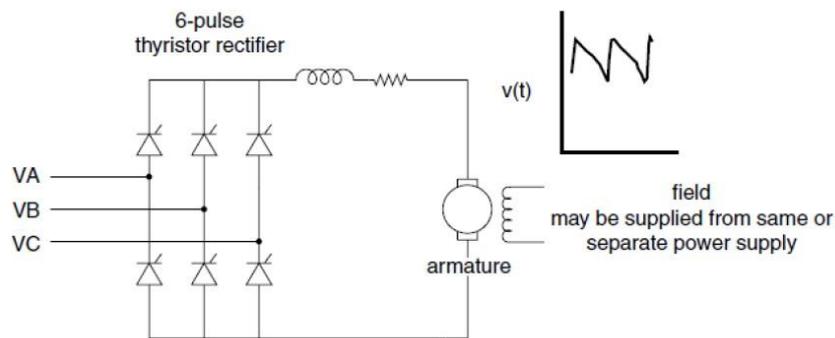
Gambar 2.6 Arus dan spectrum harmonic pada CSI-type ASD



Gambar 2.7 Arus dan spectrum harmonik pada PWM-type ASD

DC drive, DC drive merupakan peralatan sistem kontrol yang relatif sederhana. Dibandingkan dengan sistem penggerak AC (*AC drive*), *dc drive* menawarkan lebih luas pengaturan kecepatan dan menghasilkan torsi tinggi. Namun, pembelian dan biaya pemeliharaan untuk motor dc yang tinggi, sedangkan biaya perangkat elektronika daya dari tahun ke tahun semakin turun. Dengan demikian, pertimbangan ekonomi membatasi penggunaan *dc drive* untuk aplikasi yang membutuhkan kecepatan dan karakteristik torsi motor dc. Kebanyakan *dc drive* menggunakan penyearah enam pulsa ditunjukkan pada Gambar 8, *dc drive* besar dapat menggunakan penyearah 12-pulsa. Harmonisa tertinggi pada penyearah 6-pulsa yaitu komponen harmonisa ke-5 dan ke-7. Penyearah 12-pulsa dalam praktek untuk menghilangkan sekitar 90 persen

dari harmonisa kelima dan ketujuh, tergantung pada ketidakseimbangan sistem. Kelemahan dari drive 12-pulsa biaya yang lebih besar untuk komponen elektronika daya dan peralatan transformatornya.

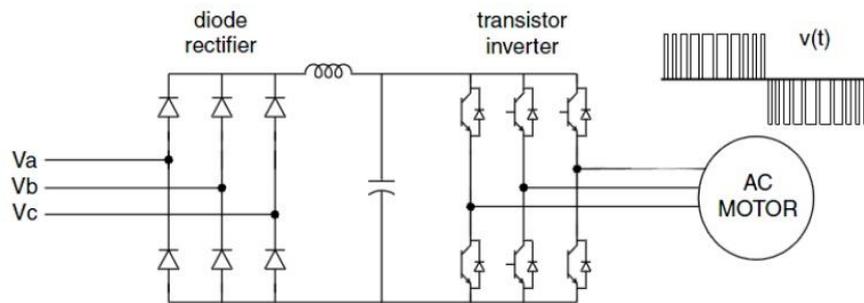


Gambar 2.8. dc ASD 6- pulsa (six-pulse dc ASD)

AC Drives, Pada *AC drives*, output dari rectifier dibalik (*inverted*) agar menghasilkan tegangan arus bolak-balik yang frekwensinya dapat bervariasi (*variable frequency AC motor*) pada motor-motor. Inverter-inverter tersebut diklasifikasikan sebagai *voltage source inverter (VSI)* atau *current source inverter (CSI)*. Sebuah *voltage source inverter* memerlukan tegangan input DC yang konstan (*low-ripple*) pada tahapannya. Hal ini dapat dicapai dengan sebuah kapasitor atau filter LC pada *DC link*. *Voltage source inverter* memerlukan arus input yang konstan, karenanya digunakanlah induktor seri pada dc link.

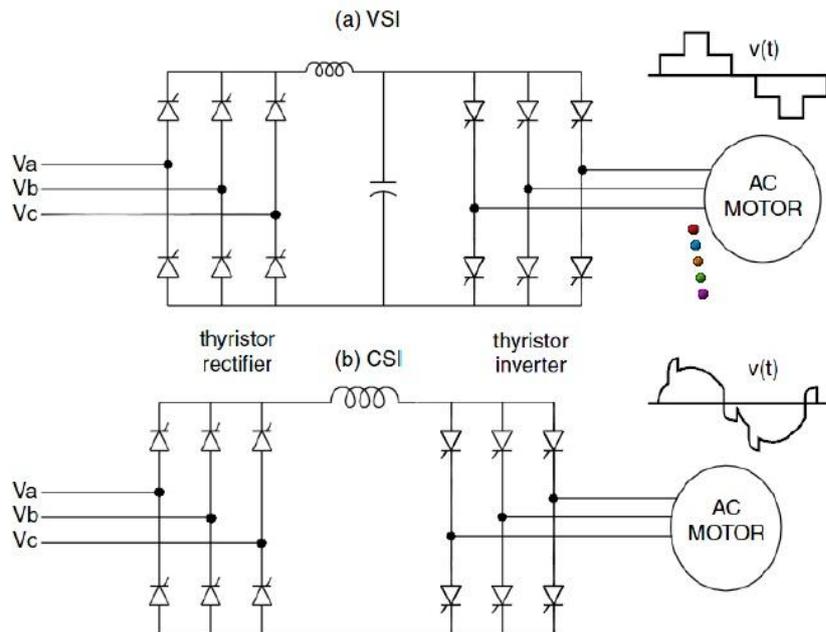
AC drives pada umumnya menggunakan *squirrel cage induction motor*. Motor-motor jenis ini mempunyai karakteristik kasar putarannya, relatif memerlukan biaya yang rendah dan membutuhkan sedikit pemeliharaan. Sebuah konfigurasi AC drives yang banyak digunakan,

memakai *voltage source inverter* dalam memanfaatkan teknik PWM untuk menyatukan deretan variable width dc pulse (lihat Gambar 2.9).



Gambar 2.9. PWM ASD

Untuk tujuan tersebut, inverternya menggunakan SCR, *gate turnoff* (GTO) *thyristor*, atau *power transistor*. Dewasa ini, *voltage source inverter PWM drive* menawarkan efisiensi energi yang terbaik untuk digunakan dalam bermacam-macam kecepatan pengendalian hingga 500 hp. Keuntungan lain dari *PWM drives* adalah tidak membutuhkan penyearah (*rectifier*) tegangan output untuk mengendalikan kecepatan motor. Caranya adalah dengan menggantikan *rectifier thyristor* dengan dioda dan rangkaian pengendali thyristor dihilangkan.

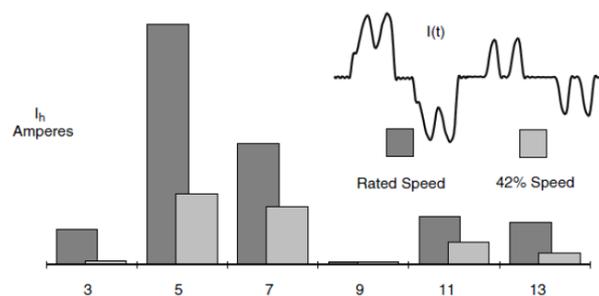


Gambar 2.10. AC ASD kapasitas besar

Power drive yang berkapasitas besar menggunakan SCR dan inverter. Dapat saja menggunakan 6-pulse (seperti tampak pada Gambar 10) *12-pulse dc drive*. Pada Gambar 10(a) terlihat bahwa *voltage source inverter drive* penggunaannya terbatas karena tidak membutuhkan perubahan kecepatan yang tinggi. Gambar 10(b) memperlihatkan bahwa *current source inverter drive* memiliki karakteristik percepatan/perlambatan yang baik, namun memerlukan motor dengan *leading power factor* (motor sinkron ataupun induksi yang dilengkapi dengan kapasitor) atau dilengkapi dengan rangkaian kendali untuk komutasi inverter thyristor. Dengan kata lain, *current source inverter drive* harus dirancang untuk penggunaan dengan motor yang khusus.

Dampak pengoperasian *AC drives* ini adalah distorsi arus harmonisa pada *adjustable-speed drive (ASD)* tidaklah konstan.

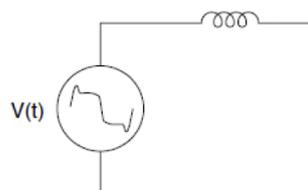
Gelombang berubah secara signifikan untuk kecepatan dan nilai torsi yang berbeda. Gambar 11 memperlihatkan dua kondisi pengoperasian PWM *adjustable-speed drive*. Saat gelombang berada pada kecepatan 42%, secara proporsional lebih terdistorsi, AC drive meng-injeksi arus harmonisa yang cukup besar dibandingkan pada kecepatan nominalnya.



Gambar 2.11. Dampak Kecepatan PWM ASD pada arus harmonisa
Spektrum amplitudo harmonisa memperlihatkan besar arus yang di-injeksi. Hal ini dapat dibatasi dengan *design factor*.

➤ Peralatan Peleburan (*Arcing Devices*)

Kategori peralatan ini seperti tungku busur, las busur, dan jenis lampu (*neon, sodium vapor, mercury*) dengan ballast magnet (bukan elektronik ballast). Rangkaian ekuivalen *arcing devices* ditunjukkan dalam Gambar 2.12

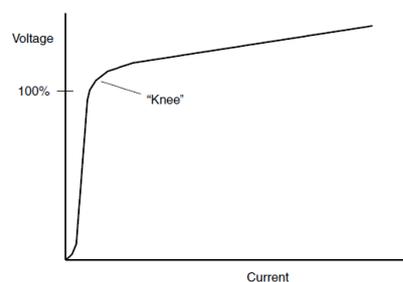


Gambar 2.12. Rangkaian ekuivalen *arcing devices*

Beban arc furnace ini menghasilkan secara acak berbagai orde harmonisa dan interharmonisa yang tidak ekonomis jika langkah eliminasinya dilakukan dengan filter konvensional. Beban *arc furnace* ini juga menghasiikan fluktuasi tegangan. Langkah untuk mengurangi dampak kualitas dayanya adalah dengan cara menghubungkan sistem beban ini ke tingkat tegangan yang tertinggi yang memungkinkan dan penggunaan reaktansi seri.

➤ Peralatan Saturasi (*saturable devices*)

Peralatan dalam kategori ini termasuk transformator dan elektromagnetik lainnya, perangkat dengan inti baja, termasuk motor. Harmonik dihasilkan karena karakteristik magnetisasi nonlinear dari baja (lihat Gambar 2.13)



Gambar 2.13. Karakteristik magnetisasi transformator

Tranformator tenaga dirancang untuk umumnya beroperasi tepat di bawah karakteristik titik jenuh magnetisnya. Operasional kerapatan fluks transformator dipilih berdasarkan optimasi biaya baja, rugi tanpa beban kebisingan, dan banyak faktor lainnya.

C. Efek Harmonisa

Efek harmonisa yang timbul pada sistem tenaga listrik tergantung pada sumber harmonisa, letak sumber harmonisa, dan karakteristik jaringan listrik. Harmonisa menimbulkan pengaruh seperti : Over voltage, interferensi sinyal, isolasi menjadi panas, menjadikan peralatan menjadi panas.

Tabel 2.1 Akibat dari polaritas komponen harmonic

Utama	Pengaruh pada motor	Pengaruh pada sistem distribusi
Positif	Menimbulkan medan magnet putar arah maju (forward)	- Panas
	Menimbulkan medan magnet putar arah mundur (reverse)	- Panas
Negatif	Menimbulkan medan magnet putar arah maju (forward)	- Arah putaran motor berubah
	Menimbulkan medan magnet putar arah mundur (reverse)	- Panas
Nol	Tidak ada	- Menimbulkan / menambah arus pada kawat netral.

D. Harmonisa pada Sistem Tenaga Listrik

Dalam sistem Tenaga listrik yang ideal, bentuk gelombang tegangan yang disalurkan ke peralatan konsumen dan bentuk gelombang arus yang dihasilkan adalah gelombang sinus murni, yang mana dalam frekuensi tunggal yang konstan dan pada level tegangan yang konstan pula. Namun dalam perkembangan beban listrik yang semakin besar dan kompleks, terutama penggunaan beban-beban tak linier, akan menimbulkan perubahan pada bentuk gelombangnya. Sehingga menyebabkan terdistorsinya gelombang arus maupun tegangan dan bentuknya menjadi cacat. Cacat gelombang (gelombang non sinusoidal) yang disebabkan oleh interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem dengan komponen gelombang lain lebih dikenal dengan harmonisa, yaitu komponen gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan integer dari komponen fundamentalnya.

E. Metode penentuan lokasi sumber harmonisa

1. Asumsi metode

Adapun yang menjadi asumsi dalam metode ini yaitu :

1. Dalam analisis, sisi utilitas dan konsumen dibedakan.
2. Distorsi harmonisa tegangan pada titik PCC diperhitungkan.
3. Mencari penyelesaian masalah-masalah dari penglokasian sumber harmonisa yang dominan dan menentukan kontribusi relatif dari

sisi utilitas dan konsumen serta besar tegangan harmonisa pada titik PCC

4. Sisi utilitas dan konsumen direpresentasikan dengan rangkaian ekuivalen norton (gambar 2.14). Sumber U mewakili sisi utilitas. \mathbf{I}_C dan \mathbf{I}_U adalah arus sumber harmonisa sisi konsumen dan sisi utilitas. \mathbf{Y}_C ($\mathbf{Y}_C = Y_C e^{j\beta_{\gamma c}}$) dan \mathbf{Y}_U ($\mathbf{Y}_U = Y_U e^{j\beta_{\gamma c}}$) adalah admitansi harmonisa sisi konsumen dan utilitas.
5. Diukurnya tegangan V dan arus \mathbf{I} pada titik PCC.

Asumsi-asumsi tersebut sama dengan yang digunakan pada metode critical impedance.

2. Ide Metode

Tegangan V pada titik PCC dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\mathbf{V} = \frac{(\mathbf{I}_C + \mathbf{I}_U)}{(\mathbf{Y}_C + \mathbf{Y}_U)} \quad (2.1)$$

Rumus (3) di atas dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{I}_C}{(\mathbf{Y}_C + \mathbf{Y}_U)} + \frac{\mathbf{I}_U}{(\mathbf{Y}_C + \mathbf{Y}_U)} \quad (2.2)$$

Dan

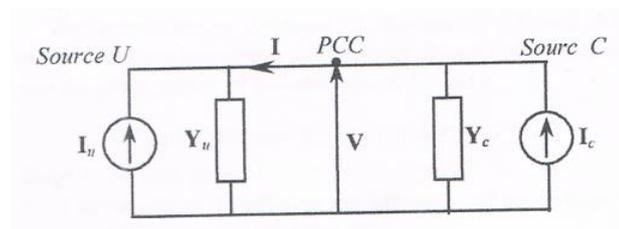
$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_{C_PCC} + \mathbf{V}_{U_PCC} \quad (2.3)$$

Di mana

$$\mathbf{V}_{C_PCC} = \frac{\mathbf{I}_C}{(\mathbf{Y}_C + \mathbf{Y}_U)} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{V}_{U_PCC} = \frac{\mathbf{I}_U}{(\mathbf{Y}_C + \mathbf{Y}_U)} \quad (2.5)$$

V_{C_PCC} dan V_{U_PCC} adalah kontribusi dari sumber c dan sumber u terhadap tegangan V. Untuk membandingkan kontribusi sumber c dan sumber u terhadap tegangan V, maka proyeksi vector V_{C_PCC} dan V_{U_PCC} terhadap vector V harus diperhitungkan. Hubungan antara proyeksi yang disebutkan adalah sama antara besaran vector V_{C_PCC} dan V_{U_PCC} dan juga sama antara hubungan I_C dan I_U (lihat persamaan 2.4 dan 2.5). Dalam situasi ini pertimbangan sudut :



Gambar. 2.14 Rangkaian Equivalen untuk analisis harmonisa

$$\theta_I = \frac{I_C}{I_U} \quad (2.6)$$

Dimana I_C, I_U adalah magnetudo arus I_C, I_U . Dan $I_C = I_C e^{j\beta_{Ic}}, I_U = I_U e^{j\beta_{Iu}}$.

Kriteria dari sumber harmonisa dominan :

$$D = \begin{cases} D_C & \text{if } \theta_I > 1 \\ D_n & \text{if } \theta_I = 1 \\ D_U & \text{if } \theta_I < 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

Dimana D_C, D_n, D_U adalah keputusan – keputusan. Sumber c adalah dominan, keputusan netral (contoh : tidak adanya yang dominan dari sumber c dan sumber u), atau sumber u yang lebih dominan.

Dengan mempertimbangkan sudut θ_I juga memungkinkan menentukan kontribusi besar tegangan V dari utilitas dan sisi konsumen, karena :

$$\theta_I = \frac{V_{C_PCC}}{V_{U_PCC}} \quad (2.8)$$

Dimana V_{C_PCC} , V_{U_PCC} adalah magnetudo tegangan V_{C_PCC} , V_{U_PCC}

Ketika arus I_C , I_U diketahui, sudut θ_I dapat dihitung dari persamaan 8. Biasanya, I_C , I_U tidak diketahui, namun ketika tegangan V , arus I pada titik PCC dan admitansi Y_C dan Y_U diketahui, sudut θ_I dapat dihitung dari persamaan (5).

$$\theta_I = \frac{|Y_C + Y|}{|Y_U + Y|} \quad (2.9)$$

Dimana $Y = I / V$

F. Penentuan Distorsi Harmonisa

Untuk mengetahui nilai distorsi harmonisa di industri sudah memenuhi persyaratan limit yang diperbolehkan, maka perlu dilakukan perhitungan yang biasanya disebut dengan Total Harmonic Distorsion (THD). Definisi THD adalah total nilai persentase komponen harmonisa terhadap komponen fundamental. Untuk menuliskan nilai THD dituliskan sebagai berikut (Arrillaga,2003,p.11):

Faktor distorsi arus:

$$THD_{arus} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^N I_h^2}{I_h^2}} \quad (2.10)$$

Faktor distorsi tegangan:

$$THD_{tegangsan} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^N V_h^2}{V_h^2}} \quad (2.11)$$

Persyaratan tentang limit harmonisa yang diperbolehkan tertulis dalam IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System Std. 519-1992.

Tabel 2.2 Limit Distorsi Arus Harmonisa

Maximum Harmonics Current Distortion In % IL						
Individual Harmonic Order (odd harmonics)						
I _{sc} /I _L	<11	11=<h<17	17=<h<23	23=<h<35	35=<h	THD
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Ada dua criteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa, yang pertama adalah batas harmonisa untuk arus (I_{THD}) dan yang kedua adalah batasan untuk tegangan (V_{THD}). Batas untuk harmonisa arus ditentukan oleh perbandingan dari $\frac{I_{SC}}{I_L}$. I_{SC} adalah hubung singkat yang ada pada PCC (Point Of Common Coupling), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan batas harmonisa tegangan ditentukan dari besarnya tegangan sistem yang terpakai/dipasang. Menentukan I_{SC} menggunakan rumus sebagai berikut :

$$I_{SC} = \frac{S}{\sqrt{3} \times Z\% \times V_{LL}} \quad (2.12)$$

Dimana

S = daya trafo (MVA)

Z% = Impedansi trafo (%)

V_{LL} = tegangan fasa-fasa (V)

I_{SC} = Arus short circuit (A)

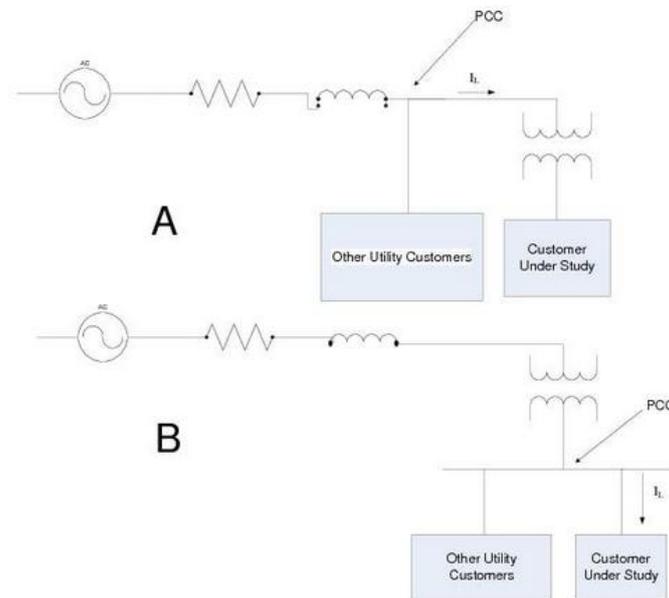
Tabel 2.3 Limit Distorsi Tegangan

Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD(%)
69 kV and below	3.0	5.0
69 kV – 161 kV	1.5	2.5
161 kV	1.0	1.5

G. Konsep Point Of Common Coupling (PCC)

Mengevaluasi distorsi harmonisa biasanya dilihat pada sebuah titik diantara sisi pelanggan dan sisi utilitas. Titik itu yang bias disebut dengan Point Of Common Coupling.

PCC dapat diletakkan pada sisi primer atau sisi sekunder dari trafo pelanggan tergantung pada banyak atau tidak jumlah pelanggan yang disuplai dari trafo. Dengan kata lain, jika pelanggan banyak pada sisi primer trafo maka PCC dapat diletakkan pada sisi primer. Maka sebaliknya, jika pelanggan banya pada sisi sekunder trafo maka PCC dapat diletakkan pada sisi sekunder, gambar 2.14 mengilustrasikan kedua kemungkinan di atas.



Gambar 2.14 Penentuan letak PCC berdasarkan dua kondisi

- (a) PCC pada sisi primer trafo karena beban pelanggan banyak di sisi primer.
- (b) PCC pada sisi sekunder trafo karena beban pelanggan banyak di sisi sekunder.

Sumber : Dugan, Roger C. (1996,p.227)

H. Mengatasi Harmonisa

Distorsi harmonisa muncul dengan berbagai tingkatan pada seluruh sistem tenaga listrik. Pada dasarnya, harmonisa dikendalikan jika harmonisa tersebut menjadi sebuah masalah. Umumnya harmonisa dapat menjadi sebuah problema disebabkan antara lain oleh karena :

1. Sumber arus harmonisnya terlampau besar.

2. Arus harmonisa mengalir terlampau rneluas
(secara kelistrikan) ataupun interferensi saluran telephone.
3. Respon dari sistem terhadap pembesaran harmonisa sangatlah tinggi dibandingkan nilai yang dapat ditoleransi.

Jika harmonisa menjadi sebuah problema dasar-dasar pilihan dalam mengendalikan harmonisa adalah sebagai berikut:

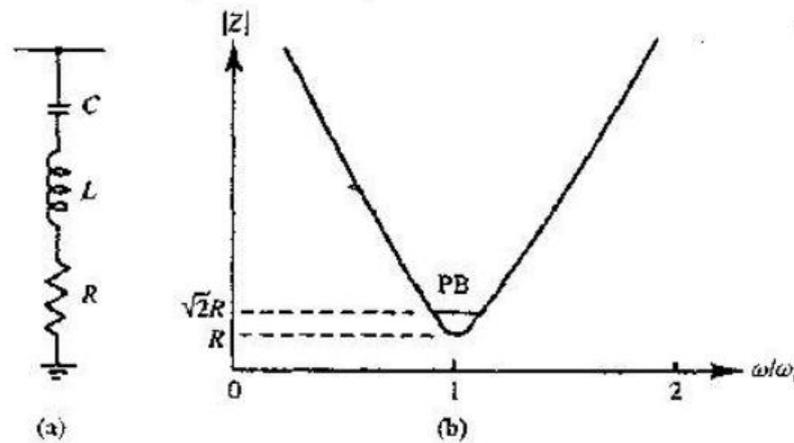
1. Tambahkan filter untuk meng- kompensasikan arus harmonisa dari sistem dan memblokir arus harmonisa agar tidak masuk kedalam sistem.
2. Melakukan rekonfigurasi jaringan sistem tenaga listrik.

I. Filter Harmonisa

Dalam usaha meredam gangguan harmonisa tersebut ke bagian lain dari sistem tenaga listrik maka dipasang filter harmonisa. filter tersebut diharapkan mampu mereduksi amplitude frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus harmonisa tersebut. Selain itu, penggunaan filter harmonisa yang mengandung komponen kapasitor diharapkan pula dapat mengkompensasi daya reaktif dan memperbaiki faktor daya sistem.

Secara umum filter harmonisa ada tiga jenis, yaitu :

1. Filter dengan Penalaan Tunggal (Single Tuned Shunt Filter)
 2. Filter dengan Penalaan Ganda (Double Tunes Filter)
 3. Damped Filter.
1. Filter dengan Penalaan Tunggal



Gambar 2.15 (a) Single-tuned shunt filter (b) Grafik antara impedansi dan frekuensi yang dihasilkan oleh single tuned shunt filter

Filter penalaan tunggal (Single Tuned Filter) disusun dengan rangkaian seri RLC. Reaktor dari Single Tuned Filter dapat dinyatakan dengan (Dugan, p.226)

$$X_{\text{filter}} = \frac{V^2(1000)}{Q_C} \quad (2.13)$$

Di mana :

X_{filter} = Reaktansi filter (Ω)

V = Tegangan Line – line (kV)

Q_C = Daya reaktif yang dikompensasi (kVar)

Mencari besaran reaktansi kapasitif dengan rumus berikut ini :

$$X_C = \frac{X_{\text{filter}} h^2}{h^2 - 1} \quad (2.14)$$

Di mana :

X_C = Reaktansi dari kapasitor (Ω)

h = Orde harmonisa yang akan ditala, mental filter harmonisa pada 3% - 15% di bawah frekuensi yang ditala (IEEE Std 1531, 2003, p,42)

Perhitungan rating kapasitor dan induktor yang dibutuhkan dapat dicari dengan rumus (Dugan,p.266-267) :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (2.15)$$

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad (2.16)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.17)$$

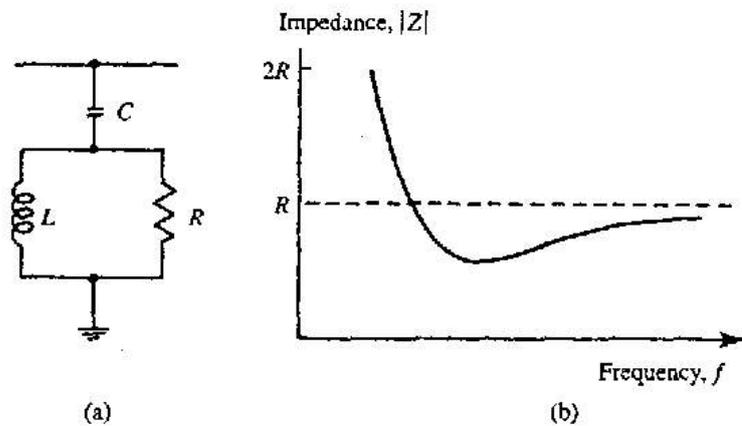
Di mana :

X_L = Reaktansi Induktor

C = Kapasitor (μF)

L = Induktor (mH)

Single Tuned Filter ini dirancang untuk menala hanya pada frekuensi tertentu. Pada umumnya, filter ini menala pada suatu frekuensi harmonisa yang paling rendah. Sebuah filter dikatakan ditala pada sebuah frekuensi, jika reaktansi induktif dan kapasitifnya bernilai sama dengan nol.



Gambar 2.16 (a) second-order damped shunt (b) Grafik antara impedansi dan frekuensi yang dihasilkan oleh second-order damped shunt filter

Sumber : Arrillaga, Jos & Neville R. Watson (2003,p.220)

Kualitas dari filter (Q) menunjukkan ketajaman penalaan. Dalam penalaan filter, kualitas dari filter (Q) dapat didefinisikan sebagai perbandingan impedansi (induktansi/kapasitansi) terhadap resistansi di frekuensi resonansinya. Kualitas tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan (Arrillaga,2003,p.229 ; Dugan, 1996,p.272)

$$Q = \frac{X_{\text{filter}}}{R} \quad (2.18)$$

$$X_{\text{filter}} = n X_L = \frac{X_C}{n} \quad (2.19)$$

Di mana :

X_{filter} = Reaktansi induktif atau kapasitif (Ω)

R = Resistansi (Ω)

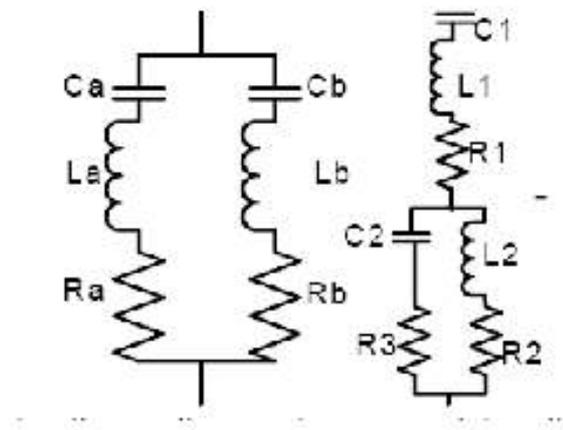
n = Orde harmonisa

Q = Kualitas filter (20 – 100)

X_C = Reaktansi kapasitor (Ω)

X_L = Reaktansi Induktor (Ω)

2. Filter dengan Penalaan Ganda



Gambar. 2.17 Perbandingan filter penalaan tunggal dengan filter penalaan ganda

Sebuah impedansi ekuivalen dari dua buah filter penalaan tunggal yang mempunyai frekuensi resonansi yang berdekatan dalam kenyataannya bernilai sama dengan konfigurasi sebuah filter penalaan ganda. Hubungan dari kedua rangkaian tersebut adalah : (Arrillaga,2003,p.233)

$$C_1 = C_a + C_b \quad (2.20)$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2} \quad (2.21)$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad (2.22)$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)^2} \quad (2.23)$$

$$R_2 = R_a \left[\frac{a^2(1-x^2)}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right] + R_b \left[\frac{1-x^2}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right] \\ + R_1 \left[\frac{(1-x^2)(1-ax^2)}{(1+x^2)(1+ax^2)} \right] \quad (2.24)$$

$$a = \frac{C_a}{C_b} \quad (2.25)$$

$$X = \sqrt{\frac{L_b C_b}{L_a C_a}} \quad (2.26)$$

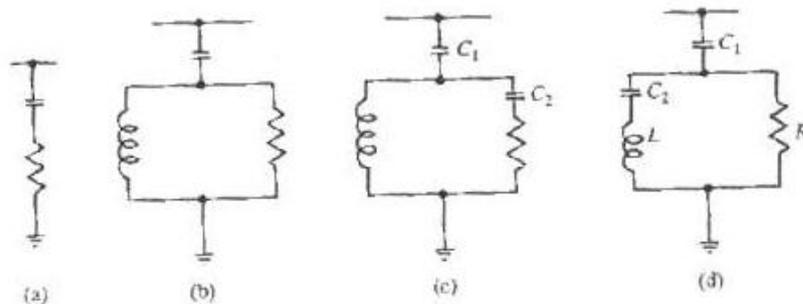
3. Damped Filter

Damped filter mempunyai beberapa keuntungan, yaitu :

- Pemanfaatan dan pembebanannya tidak begitu sensitive terhadap perubahan temperature, perubahan frekuensi, toleransi komponen dari perusahaan, dan rugi-rugi kapasitor.
- Memberikan impedansi yang rendah untuk spectrum frekuensi harmonisa yang lebar, tanpa memerlukan subdivisi parallel.
- Penggunaan filter penalaan dapat menghasilkan resonansi parallel antara filter dengan admitansi dari sistem di frekuensi orde harmonik di bawah penalaan filter yang lebih rendah. Dalam sejumlah kasus, penggunaan satu atau lebih damped filter dapat menjadi alternatif yang dapat diterima.

Selain itu, damped filter juga memiliki beberapa kerugian, yaitu :

- Dengan level filter yang sama dengan perancangan damped filter untuk VA rating yang besar (VA rating pada frekuensi fundamentalnya) akan mengalami kesulitan. Namun dalam hal ini, unjuk kerja yang baik dari suatu peralatan filter termasuk juga faktor koreksi faktor kerja.
- Kerugian yang terjadi pada resistor dan reaktansi pada umumnya lebih besar.



Gambar 2.18 jenis-jenis damped filter

(a) First order, (b) second order, (c) Third order, (d) C-type

Perhitungan penalaan dampet filter dapat dilakukan dengan perhitungan Single Tuned Filter pula. Penalaan filter pada harmonik ke-n dapat dinyatakan dengan (Arrillaga,2003,p.250)

$$S = \frac{V_s^2}{\left(X_C \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)\right)} = \left(\frac{V_s^2}{X_C}\right) \left(\frac{n^2}{n^2-1}\right) \text{ MVA} \quad (2.27)$$

J. Komponen Filter

1. Kapasitor

Kapasitor tersusun dalam unit standar yang dihubungkan secara seri atau parallel untuk memperoleh sebuah total rating tegangan dan kVA yang diinginkan. Hal-hal pokok dari kapasitor adalah :

- Daya reaktif dan komponen kapasitor
- Koefisien suhu dan komponen kapasitor
- Rugi-rugi daya
- Reliability
- Harga

Koefisien suhu yang sangat rendah dari kapasitor diharapkan untuk menala filter dalam orde penalaan dan menghindari penalaan ulang karena perubahan kapasitansi oleh perubahan suhu di sekeliling atau pemanasan sendiri oleh kapasitor tersebut. Kapasitor dipilih dengan daya reaktif yang besar dalam per unit volume, supaya rugi-rugi yang terjadi kecil dan mampu dioperasikan pada tegangan tinggi. Untuk mendapatkan rating daya reaktif dari kapasitor adalah dengan menjumlahkan semua daya reaktif pada masing-masing frekuensi.

2. Induktor

Induktor digunakan dalam rangkaian filter dirancang mampu menahan selubung frekuensi tinggi yaitu efek kulit. Rugi-rugi histerisis dapat dimasukkan dalam perhitungan rugi-rugi daya. Juga efek dari fluks besi, yaitu penalaan yang berubah yang disebabkan oleh magnetisasi

yang tidak linier dalam hal ini harus dipertimbangkan alternatif terbaik untuk komponen induktor pada filter adalah dirancang dengan nol – magnetic core.

K. Konsep Perancangan Filter

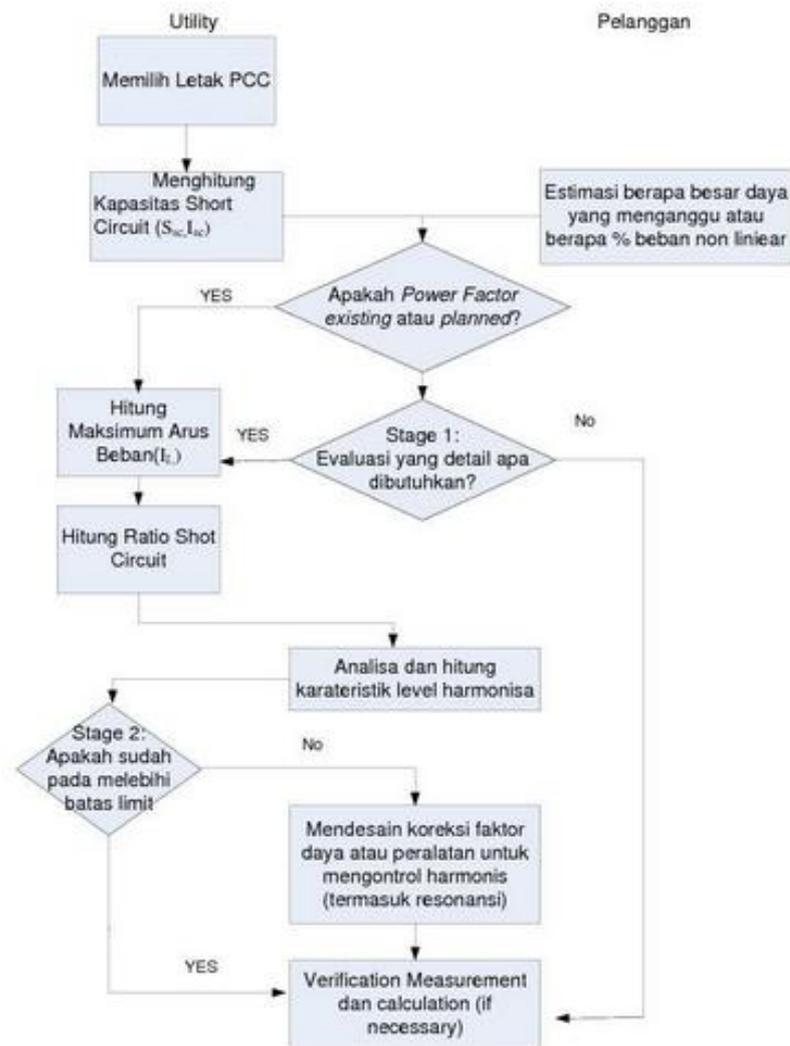
Untuk merencanakan filter harmonisa dengan baik, diperlukan pengukuran level tegangan harmonisa pada atau dekat output capacitor bank pada feeder. Persiapan pemodelan sebaiknya mempertimbangkan:

Pengidentifikasi feeder yang menunjukkan kenaikan tegangan yang paling besar, sehingga pengukuran dapat dikonsentrasikan pada feeder tersebut. Kedua, frekuensi sumber arus dapat digunakan referensi karakter sistem.

Harmonisa tegangan bus substation perlu direkam selama periode waktu tertentu untuk mendapatkan kondisi tegangan harmonisa. dua titik operasi yang paling penting adalah :

- Kondisi operasi yang menghasilkan tegangan harmonisa yang paling tinggi.
- Kondisi beban puncak dengan semua kapasitor dalam kondisi aktif (on line).

Menurut “Guide For Applying Harmonics Limits on Power Sistem P519A/D6 Jan 1999 mengenalkan beberapa aturan umum dalam mengevaluasi limit harmonisa pada industri. Prosedur dapat dilihat pada gambar 2.19 di bawah ini.



Gambar 2.19 Flowchart untuk mengevaluasi harmonic distortion

1. Kriteria Desain Filter Passif Harmonisa

Prinsip dari aliran arus harmonik dan resonansi digambar pada gambar 2.20 berikut, sumber harmonik biasa diasumsikan sebagai pembangkit dari arus harmonik konstan I_h , yang dapat dihitung dengan analisa fourier atau ditentukan dengan suatu tes dengan menggunakan

Harmonic Analyzer. Hubungan antara arus harmonisa (I_h) dengan arus filter (I_f) dan arus suplai (I_s), maka dapat dituliskan persamaan :

$$I_h = I_s + I_f \quad (2.28)$$

Dan impedansi filter diberikan oleh :

$$Z_f = Z_{fc} + Z_{fi} \quad (2.29)$$

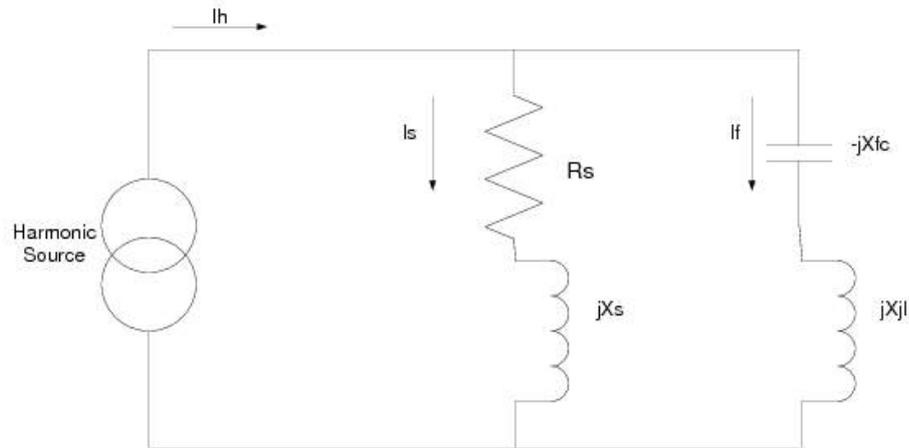
Dimana Z_{fc} adalah impedansi dari kapasitor dan Z_{fi} adalah impedansi dari induktor. Jika Z_s adalah impedansi dari suplai, maka:

$$I_f = \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} \times I_h = \rho_f + I_h \quad (2.30)$$

Dan

$$I_s = \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} \times I_h = \rho_s + I_h \quad (2.31)$$

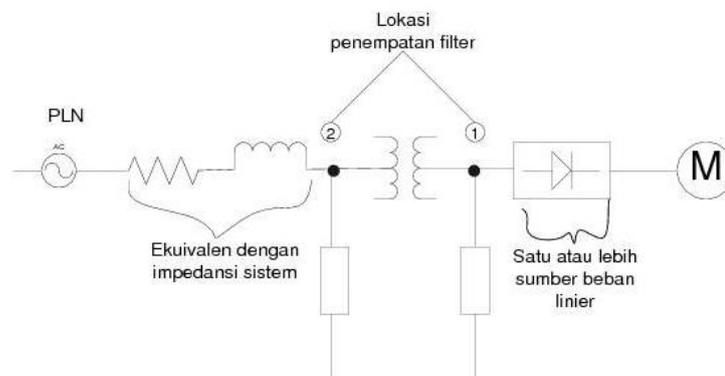
Fungsi dari induktor terukur yang diperlihatkan secara seri dengan kapasitor pada gambar 2.20 adalah bentuk resonansi seri dengan kapasitor atau filter, yang mana untuk mendapatkan Z_f mendekati nol, pada frekuensi resonansi (missal: harmonisa ke 5). Akibatnya ρ_s mendekati nol, karena itu arus harmonisa tidak masuk ke suplai dan bias dikurangi atau diredam juga ketika ρ_f mendekati nilai satu, akibatnya I_f dan I_h (pada kondisi ideal $I_f = I_h$, seluruh arus harmonisa mengalir ke filter).



Gambar 2.20 Sirkuit untuk menentukan distorsi tegangan harmonisa

2. Penempatan Filter

Dalam praktek ada 2 (dua) lokasi dimana filter harmonik pasif dapat ditentukan secara efektif, terlihat pada gambar 2.21. hampir sama dengan penempatan kapasitor bank untuk perbaiki factor daya, penempatan filter harmonisa sedapat mungkin menghasilkan pengurangan gangguan harmonisa yang maksimal. Penempatan filter sedapat mungkin dekat dengan beban non linier, karena dapat menghasilkan pengurangan harmonisa yang terbaik.



Gambar 2.21 Ilustrasi penempatan filter yang efektif