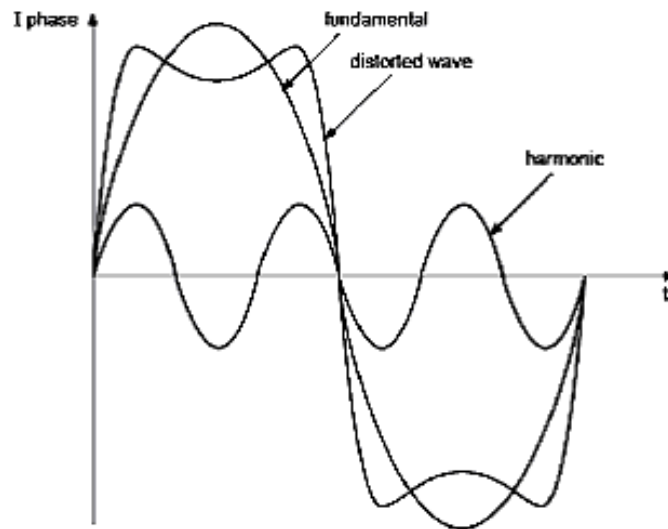


## 2. DASAR TEORI

### 2.1 Harmonisa

#### 2.1.1 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 100 Hz, harmonik ketiga adalah gelombang dengan frekuensi 150 Hz dan seterusnya. Gelombang-gelombang ini menumpang pada gelombang aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang asli dengan gelombang harmoniknya.

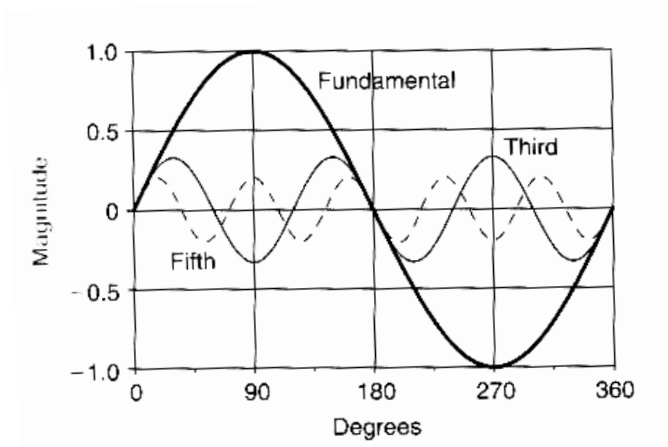


Gambar 2.1 Bentuk gelombang sinusoidal dan gelombang yg terdistorsi

Sumber : Noel, Qillon and Pierre, Roccia (2004, p.4)

Harmonisa ketiga dapat didefinisikan sebagai 3 periode gelombang yang terbentuk pada saat gelombang *fundamental*-nya masih berlangsung dalam satu periode. Harmonisa yang kelima juga terbentuk menjadi 5 periode gelombang

yang lebih kecil amplitudonya saat gelombang *fundamental* masih berlangsung dalam satu periode. Dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini :



Gambar 2.2 *Fundamental, Third, Dan Fifth Harmonics*

Sumber: Skvarenia, et al. (2001, p.51)

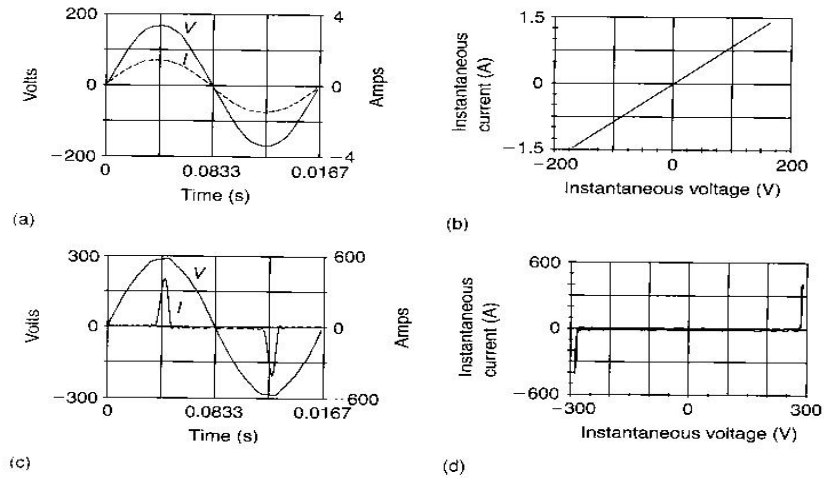
### 2.1.2 Harmonisa Ganjil dan Genap

Harmonisa berdasarkan urutan ordenya dapat dibedakan menjadi 2 macam yaitu harmonisa ganjil dan harmonisa genap (Sankaran 75). Sesuai dengan namanya harmonisa ganjil adalah harmonisa ke 3, 5, 7, 9, dan seterusnya. Sedangkan harmonisa genap adalah harmonisa ke 2, 4, 6, 8, dan seterusnya. Harmonisa pertama merupakan komponen frekuensi *fundamental* dari gelombang periodik.

### 2.1.3 Sumber Harmonisa

Sumber utama harmonisa adalah beban non linier. Beban-beban non linier adalah jenis beban yang memiliki bentuk gelombang yang keluarannya tidak sebanding dengan masukannya, artinya gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya. Contoh beban non linier adalah konverter, *rectifier*, *variable speed drives*, komputer, *uninterruptible power supplies* (UPS), lampu *fluorescent*, dan lain-lain. Beban non linier menyebabkan arus menjadi pulsa yang tidak beraturan dan menyebabkan

tegangan menjadi terdistorsi sehingga menimbulkan arus harmonisa pada peralatan.



Gambar 2.3 Gelombang tegangan dan arus untuk beban linier dan non linier  
 (a) Gelombang Arus Dan Tegangan Beban Linier. (b) Hubungan Antara Arus Dan Tegangan Yang Linier. (c) Gelombang Tegangan Dan Arus Beban Non Linier. (d) Hubungan Antara Arus Dan Tegangan Yang Non Linier

Sumber: Skvarenia, et al. (2001, p.55)

#### 2.1.4 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 lebih panas.

Tabel 2.1 Akibat Dari Polaritas Komponen Harmonik

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

Sumber: Tribuana, Wanhar. (1999, tabel. 2)

#### 2.1.4.1 Pengaruh Harmonisa Pada Komponen Listrik

Beberapa komponen yang terpengaruhi oleh harmonisa, antara lain:

- Konduktor

Konduktor merupakan media yang dipakai untuk mentransferkan energi listrik. Arus harmonisa dapat menyebabkan penambahan rugi-rugi pada kawat penghantar bertambah dan juga akan menyebabkan panas pada konduktor. Panas tersebut semakin lama mengurangi daya hantarnya yang pada akhirnya meningkatkan rugi-rugi daya dan menurunkan efisiensi.

- Transformator

Pada transformator, yang mengalami rugi-rugi pada kumparannya dan inti besi. Telah diketahui bahwa arus harmonisa menambah rugi-rugi pada konduktor, termasuk lilitan pada transformator. Penginduksian terjadi dimana bila arus harmonisa mengalir melewati kumparannya, maka fluks magnetik pada kumparan transformatornya akan menghasilkan rugi-rugi histerisis dan *Eddy current*. Gabungan dari rugi-rugi tembaga dan inti besi akan menyebabkan transformator menjadi *overheat*, dan pada akhirnya panas tersebut akan membuat kemampuan isolasi menjadi berkurang.

- *Circuit Breaker*

Pada *circuit breaker* (CB) menggunakan panas untuk men-*trip*-kan bimetal yang ada di dalam CB jika arus yang melewatinya melebihi ratingnya. Jika ada arus yang tidak normal, *breaker* akan menganggap arus yang melewatinya tinggi, sehingga *breaker* akan trip, dikarenakan *circuit breaker* langsung mendapatkan arus *peak*-nya.

#### 2.1.4.2 Pengaruh Harmonisa Pada Motor

Harmonisa pada tegangan dan arus memberikan tambahan kerugian energi pada kumparan stator, rotor dan juga pada inti besi rotor maupun statornya. Macam-macam akibat yang timbul adalah :

1. Rugi-rugi arus bocor

Kerugian arus bocor yang dialami pada kumparan stator dan rotor jauh lebih besar dibanding yang disebabkan *eddy current* dan *skin effect*. Hal ini disebabkan oleh arus harmonisa yang memperbesar arus bocor yang telah terjadi pada stator dan rotor.

2. Beda Fasa

Motor induksi yang biasa disebut motor asinkron merupakan motor yang kecepatan putarnya tidak sesuai atau tidak sama dengan medan putar dari stator. Melihat kenyataan ini, maka akan timbul beda fasa antara tegangan dan arus. Karena motor induksi ini termasuk beban induktif, maka arus yang mengalir *lagging* terhadap tegangannya. Apabila sumber yang men-yuplai motor ini mengandung harmonisa maka beda fasa yang terjadi pada motor induksi ini menjadi lebih besar lagi.

#### 2.1.4.3 Pengaruh Harmonisa Pada Kapasitor Bank

Kapasitor bank biasanya ditemukan pada sistem tenaga listrik bidang komersial atau industri untuk memperbaiki kondisi faktor daya yang rendah. Kapasitor bank didisain untuk beroperasi pada tegangan maksimum 110 % dari rating tegangan dan 135 % dari rating tegangan kVAr. Ketika harmonisa arus dan tegangan muncul, ratingnya seringkali terlampaui dan menimbulkan kegagalan/gangguan.

### 2.1.5 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 Distortion* (THD). Definisi THD adalah total nilai persentase komponen harmonisa terhadap komponen fundamental. Ada dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa, yang pertama adalah batas harmonisa untuk arus ( $I_{THD}$ ) dan yang kedua adalah batasan untuk tegangan ( $V_{THD}$ ). Untuk menentukan nilai THD dituliskan sebagai berikut (Arrillaga, 2003, p.11):

$$\text{Faktor Distorsi Arus} \quad \text{THD}_{\text{arus}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} \quad (2.1)$$

$$\text{Faktor Distorsi Tegangan} \quad \text{THD}_{\text{tegangan}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \quad (2.2)$$

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

Tabel 2.2 Voltage Distortion Limits

| 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                             |

Sumber: Carnovale, Daniel, Blooming (2006, p.2)

Tabel 2.3 Limit Distorsi Arus Harmonisa

| Maximum Harmonics Current Distortion In % IL |     |                 |                 |                 |              |     |
|----------------------------------------------|-----|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|-----|
| Individual Harmonic Order (odd harmonics)    |     |                 |                 |                 |              |     |
| Isc/I <sub>L</sub>                           | <11 | 11= $\leq$ h<17 | 17= $\leq$ h<23 | 23= $\leq$ h<35 | 35= $\leq$ 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  |
| 100-1000                                     | 12  | 5.5             | 5               | 2               | 1            | 15  |
| >1000                                        | 15  | 7               | 6               | 2.5             | 1.4          | 20  |

Sumber: Carnovale, Daniel, Blooming (2006, p.2)

Batas untuk harmonisa arus ditentukan oleh perbandingan dari  $\frac{I_{SC}}{I_L}$ .

Dimana I<sub>SC</sub> adalah hubung singkat yang ada pada PCC (*Point Of Common Coupling*), sedangkan I<sub>L</sub> adalah arus beban *fundamental* nominal. Sedangkan batas untuk harmonisa tegangan ditentukan dari besarnya tegangan sistem yang dipakai/terpasang. Menentukan nilai I<sub>SC</sub> menggunakan rumus sebagai berikut :

$$I_{SC} = \frac{S}{\sqrt{3} \times Z\% \times V_{LL}} \quad (2.3)$$

dimana

- S : daya trafo (MVA)
- Z% : impedansi trafo (%)
- V<sub>LL</sub> : tegangan fasa-fasa (V)
- I<sub>SC</sub> : Arus short circuit (A)

## 2.2 Teori Daya listrik

### 2.2.1 Daya Listrik

Daya listrik dibagi menjadi tiga jenis, yaitu daya aktif, daya reaktif dan daya nyata.

#### 1. Daya Aktif

Daya aktif merupakan daya yang dinyatakan dalam Watt. Rumusnya adalah (Geradino 35):

$$P = V \times I \times \cos \theta \quad (2.4)$$

Dengan:

P = Daya aktif (watt)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

#### 2. Daya Reaktif

Daya Reaktif merupakan daya yang dinyatakan dalam VAR. Rumusnya adalah (Geradino 35):

$$Q = V \times I \times \sin \theta \quad (2.5)$$

Dengan:

Q = Daya Reaktif (VAR)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

#### 3. Daya Nyata

Penjumlahan vektor daya aktif dan reaktif merupakan daya nyata yang dinyatakan dalam VA.

Rumusnya adalah (Geradino 35):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.6)$$

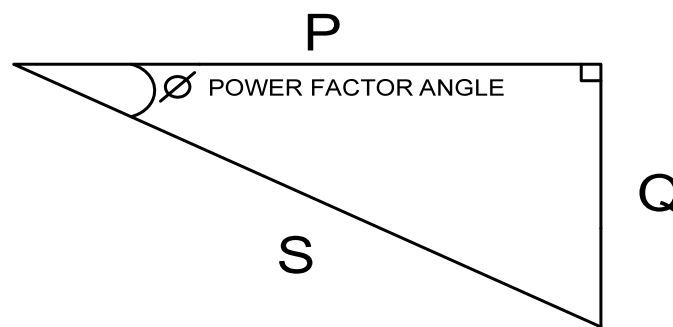
$$S = V \times I \quad (2.7)$$

Dengan:

S = Daya nyata (VA)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)



Gambar 2.4. Segitiga daya

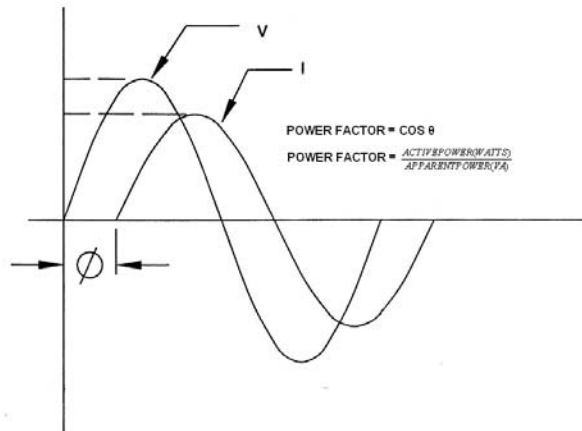
Sumber : Sankaran (2002,p.134)

### 2.2.2 Faktor Daya

Faktor Daya atau yang biasanya disebut  $\cos \theta$  adalah perbandingan antara daya aktif (Watt) dengan daya nyata (VA). Faktor daya juga dapat didefinisikan sebagai cosinus dari sudut beda fasa antara tegangan dan arus dimana arus *leading* atau *lagging* terhadap tegangan.

$$\text{Faktor Daya} = \frac{P \text{ (Watt)}}{S \text{ (VA)}} = \cos \theta \quad (2.8)$$

Faktor daya yang baik adalah faktor daya yang bernilai besar. Berdasarkan teori, faktor daya dapat mencapai 100 %, tapi dalam kenyataannya faktor daya tidak dapat mencapai 100 % tanpa adanya peralatan untuk mengoreksi faktor daya tersebut. Faktor daya yang tinggi sangat penting untuk keseluruhan sistem kelistrikan.



Gambar 2.5.  $\cos \theta$  antara arus dan tegangan

Sumber: Sankaran (2002, p.10)

Pada rangkaian beban non-linier yang menyebabkan arus harmonisa timbul, maka nilai faktor daya dibedakan menjadi 2 (dua), yaitu :

a. *Displacement Power Factor (DPF)* :

Rasio ini membandingkan antara daya aktif dengan daya nyata pada frekuensi *fundamental*. Rasio ini ekuivalen dengan nilai  $\cos \phi$  pada frekuensi *fundamental* tersebut.

$$DPF = \frac{kW}{kVA} = \frac{P_{fundamental}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (2.9)$$

b. *Power Factor (PF)* :

Rasio ini membandingkan daya aktif dengan daya nyata, termasuk semua harmonisa yang ada. Faktor daya ini merupakan faktor daya sebenarnya dari seluruh beban, baik beban linier maupun beban non-linier.

$$PF = \frac{kW}{kVA} = \frac{P_{total \text{ seluruh frekuensi}}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (2.10)$$

Faktor daya dari suatu sistem listrik dikatakan bagus apabila nilai *Power Factor* mendekati angka 1.

*Displacement Power Factor* merupakan rasio perbandingan daya aktif (kW) dengan daya nyata (kVA) pada frekuensi *fundamental*. Dikatakan suatu sistem listrik terdapat harmonisa apabila hasil pengukuran *Power Factor* memiliki selisih dengan *Displacement Power Factor*. Semakin besar selisih *Displacement Power Factor* dengan *Power Factor* maka semakin besar harmonisa yang terjadi pada sistem.

### 2.3 Penghilang Harmonisa (*Harmonic Elimination*)

Gangguan harmonisa yang cukup besar dapat mengakibatkan kualitas listrik menjadi jelek. Dalam usaha meredam gangguan harmonisa tersebut ke bagian lain dari sistem listrik adalah dengan cara memasang filter harmonisa. Obyek utama dari filter harmonisa adalah untuk menurunkan satu amplitudo atau lebih arus dan tegangan pada frekuensi tertentu. Pada saat digunakan untuk mencegah frekuensi tertentu dari pemasukan komponen atau bagian sistem tenaga sangatlah mungkin menggunakan rangkaian penyaring (filter) yang berisi induktor paralel dan kapasitor dimana memberikan impedansi yang besar untuk frekuensi yang relevan. Kombinasi seri dan jajaran filter dapat di desain untuk mengecilkan arus dan tegangan harmonisa dalam sistem AC.

Filter harmonisa mempunyai beberapa model untuk mengoptimalkan peredaman terhadap harmonisa, yaitu filter pasif dan filter aktif. Selain itu filter aktif dapat dikombinasikan dengan filter pasif atau yang disebut sebagai topologi filter hybrid.

#### 2.3.1 Filter Pasif (*Passive Filter*)

Rangkaian *Passive Filter* terdiri dari komponen R, L, dan C. *Passive Filter* banyak digunakan untuk mengkompensasi kerugian daya reaktif akibat adanya harmonisa. *Passive Filter* memiliki beberapa batasan dalam mengkompensasi kerugian daya reaktif tersebut, yaitu :

- a. *Passive Filter* hanya akan memfilter frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya,
- b. Operasinya terbatas pada beban tertentu.
- c. Dapat menyebabkan resonansi pada sistem tenaga.

- d. Memiliki karakteristik filter L-C yang sangat dipengaruhi oleh impedansi sistem yang sulit diketahui secara pasti karena selalu berubah terhadap konfigurasi jaringan.
- e. Memiliki desain ukuran dan berat induktor L dan C yang cukup besar untuk memfilter arus harmonisa pada orde frekuensi rendah.
- f. Memerlukan sejumlah filter L-C dengan ukuran yang berbeda untuk memfilter sejumlah arus harmonisa dengan masing-masing ordenya.

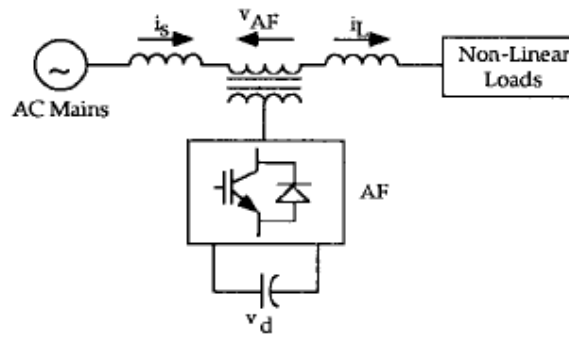
### **2.3.2 Filter Aktif (Active Filter)**

*Active Power Filter* adalah suatu rangkaian elektronika yang dirancang untuk meredam harmonisa pada beban non linier dalam sistem tenaga. *Active Power Filter* menginjeksikan arus untuk membatalkan arus harmonisa yang disebabkan oleh beban non linier.

*Active Power Filter* memiliki beberapa keuntungan dibandingkan *Passive Filter*, yaitu : *Active Power Filter* bisa mengkompensasi kerugian akibat harmonisa secara otomatis, tidak ada resiko terjadi resonansi, dapat mengkompensasi kerugian untuk phasa yang tidak seimbang, dan memperoleh hasil yang lebih baik. *Active Power Filter* dibagi menjadi dua bagian, yaitu : *Shunt Active Power Filter* dan *Series Active Power Filter*.

#### **2.3.2.1 Series Active Power Filter**

*Series Active Power Filter* dirancang untuk memfilter tegangan harmonisa yang disebabkan beban harmonisa dengan sumber tegangan. *Series Active Power Filter* memiliki konfigurasi sistem yang serupa dengan *Shunt Active Power Filter* di mana pada sisi kiri *Shunt Active Power Filter* yang berisi induktor diganti dengan *interfacing transformer*.

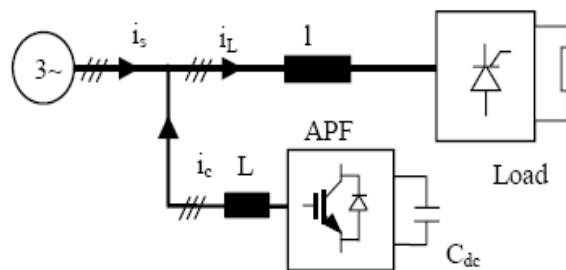


Gambar 2.6 *Series Active Power Filter*

Sumber : Singh, Al-Haddad, Chandra (1999)

### 2.3.2.2 *Shunt Active Power Filter*

Dalam kaitannya dengan bentuk dan fungsi *Shunt Active Power Filter* memiliki induktor pada sisi AC output dan kapasitor pada sisi DC dengan nilai tegangan DC yang konstan.



Gambar 2.7 *Shunt Active Power Filter*

Sumber : Özdemir, et al. (2001, p.2)

Dengan memaksa arus  $i_s$  menjadi gelombang yang sinusoidal, *Active Power Filter* memberikan arus harmonisa, arus reaktif dan arus *negative and zero sequence* ke beban. Persamaan yang didapat dari rangkaian tersebut adalah sebagai berikut:

$$i_s = i_c + i_L \quad (2.11)$$

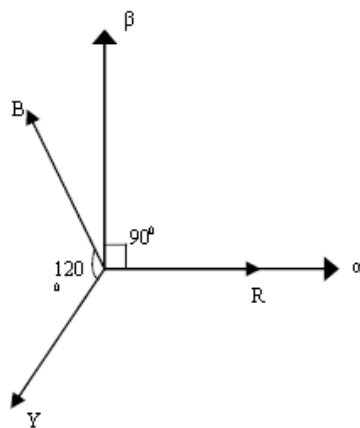
Dimana :

- $i_s$  = Arus harmonisa.
- $i_c$  = Arus yang diinjeksikan ke arus harmonisa.
- $i_L$  = Arus yang mengalir ke beban

## 2.4 Metode *Synchronous Reference Frame*

Dasar dari metode ini adalah untuk mendapatkan arus anti harmonisa dengan cara arus beban yang terdistorsi oleh harmonisa dilewatkan band pass filter 50Hz. Tetapi dengan menggunakan band pass ini masih ada masalah yang terjadi antara lain, *quality filter*, *time delay*, *transient*. Karena itu proses filter disempurnakan dengan menggunakan *Synchronous Reference Frame*. Dimana metode ini menggunakan transformasi ABC – DQ dan filter tidak menggunakan band pass melainkan menggunakan high pass filter.

Transformasi ABC – DQ adalah mengubah sistem tiga fasa menjadi sistem dua fasa. Baik sistem tiga fasa yang simetris maupun yang tidak simetris bisa di tunjukan menjadi sistem dua fasa. Awalnya sistem tiga fasa (ABC) dirubah menjadi  $\alpha$ - $\beta$  sebagai referensinya. Berdasarkan gambar vektor sebagai berikut:

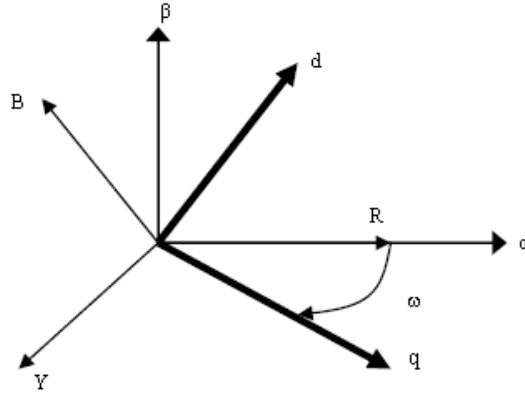


Gambar 2.8 Transformasi koordinat dari abc (RYB) menjadi  $\alpha$ - $\beta$

Sumber : Chelladurai, J., et al. (2008, p.193)

Transformasi vektor ini bisa digunakan berdasarkan tegangan (*voltage*) ataupun arus (*current*). Dari tegangan dan arus dalam referensi  $\alpha$ - $\beta$  di

transformasikan lagi menjadi d-q sebagai referensinya. Dimana gambar vektornya menjadi:



Gambar 2.9 Transformasi  $\alpha$ - $\beta$  menjadi d-q

Sumber : Chelladurai, J., et al. (2008, p.193)

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

*Space vector* (vektor arah) diatas mengubah koordinat dari ABC menjadi DQ dengan menggunakan persamaan 2.12 untuk perubahan besaran tegangan sedangkan persamaan 2.13 untuk perubahan besaran arus. Persamaan diatas biasa disebut dengan sebutan *Park Transformation*.

Dimana setelah didapatkan hasil DQ hasil tersebut dilewatkan *High Pass Filter* dan kemudian setelah melalui *High Pass Filter* hasil tersebut diolah lagi menggunakan *DQ-ABC transformation block*.

Dipilihnya *High Pass Filter* karena pada metode *Synchronous Reference Frame* komponen arus fundamental dapat terlihat sebagai komponen dc, dimana harmonisa yang ada dapat di uraikan oleh *high pass filter*.

Pengubahan koordinat dari DQ menjadi ABC dengan *DQ-ABC transformation block* dapat diterjemahkan dengan persamaan 2.14 untuk perubahan besaran tegangan sedangkan persamaan 2.15 untuk perubahan besaran arus.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{bmatrix} \quad (2.15)$$