

2. DASAR TEORI

2.1 Daya Listrik

2.1.1 Jenis Daya Listrik

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

a. Daya aktif

Daya aktif merupakan daya yang berupa daya kerja seperti daya mekanik, panas, cahaya, dan sebagainya. Daya ini diperlukan supaya mesin dapat melakukan kerja *real* sesuai kapasitas dayanya. Daya aktif dinyatakan dalam satuan watt (W). Rumusnya adalah (Geradino 35):

$$P = V \times I \times \cos \theta \quad (2.1)$$

dengan:

P = Daya aktif (watt)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

b. Daya reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang diperlukan oleh peralatan listrik yang bekerja dengan sistem elektromagnet. Daya ini dibutuhkan oleh mesin untuk mempertahankan medan magnetnya agar mesin dapat beroperasi dengan baik. Daya reaktif dinyatakan dalam satuan VAR. Rumusnya adalah (Geradino 35):

$$Q = V \times I \times \sin \theta \quad (2.2)$$

dengan:

Q = Daya reaktif (VAR)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

c. Daya nyata

Daya nyata merupakan penjumlahan vektor dari daya aktif dan daya reaktif.

Daya ini dinyatakan dalam satuan VA. Rumusnya adalah (Geradino 35):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$$

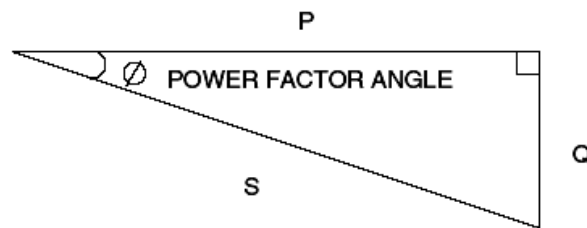
$$S = V \times I \quad (2.4)$$

dengan:

S = Daya nyata (VA)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)



Gambar 2.1. Segitiga Daya

Sumber: Sankaran (2002, p. 134)

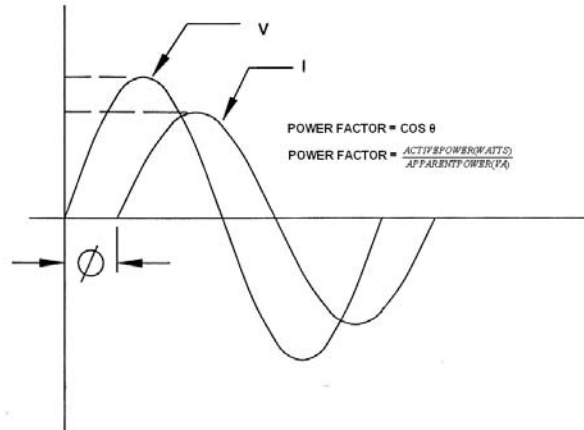
2.1.2 Faktor Daya

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.

$$\text{Faktor Daya} = \frac{P (\text{Watt})}{S (\text{VA})} = \cos \theta \quad (2.5)$$

Faktor daya yang baik adalah faktor daya yang bernilai besar. Pada teorinya, 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. Selain dapat meningkatkan efisiensi, faktor daya yang tinggi juga akan membuat biaya listrik menjadi lebih ekonomis dan meningkatkan *life time* suatu peralatan.



Gambar 2.2. Cos Θ Antara Arus Dan Tegangan

Sumber: Sankaran (2002, p.10)

Pada rangkaian beban non-linier dimana 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.

$$DPF = \frac{kW}{kVA} = \frac{P_{fundament}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (2.6)$$

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 linear maupun beban tak linear.

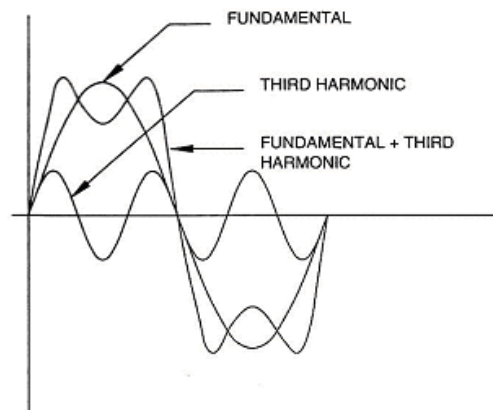
$$PF = \frac{kW}{kVA} = \frac{P_{total\ seluruh\ frekuensi}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \quad (2.7)$$

2.2 Harmonisa

Suatu pergeseran faktor daya didapatkan dari kosinus sudut antara tegangan fundamental dan gelombang arus. Gelombang yang dimaksud adalah gelombang sinusoidal yang murni. Namun, gelombang yang murni ini akan terdistorsi dengan adanya harmonisa, sehingga sudut faktor daya pun berubah.

2.2.1 Definisi Harmonisa

Harmonisa merupakan suatu fenomena yang timbul akibat pengoperasian beban listrik tak linear, sehingga terbentuklah gelombang frekuensi tinggi yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya. Gelombang-gelombang frekuensi tinggi menumpang pada gelombang aslinya (*fundamental wave*) sehingga terbentuk gelombang cacat (*distorted sine wave*) yang merupakan penjumlahan antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmoniknya.



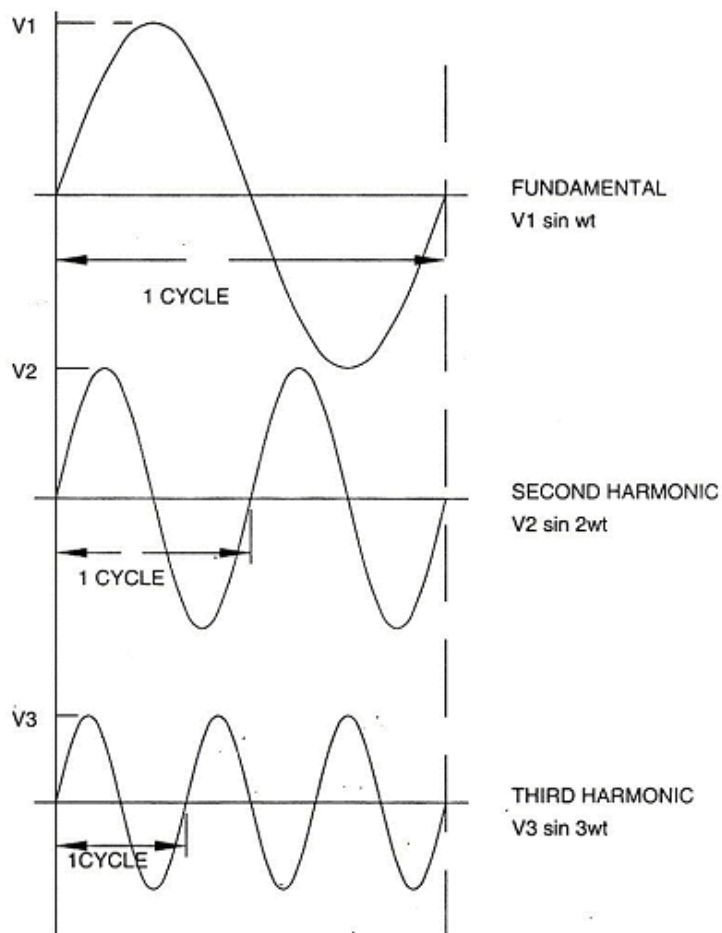
Gambar 2.3. Gelombang Non Sinusoidal

Sumber: Sankaran (2002, p. 74)

Kata harmonisa berasal dari istilah dalam dunia musik akustik yang artinya adalah getaran dari senar atau kolom udara pada suatu frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasarnya. Sebuah komponen harmonisa dalam

sistem AC didefinisikan sebagai komponen sinusoidal dari gelombang periodik yang memiliki frekuensi sama dengan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar sistem. Harmonisa dalam gelombang tegangan atau arus dapat dipahami sebagai komponen sinusoidal frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasarnya.

Jika frekuensi dasar (di Indonesia 50 Hz) memiliki frekuensi f , harmonisa kedua memiliki frekuensi $2 \times f$, dan harmonisa ketiga memiliki frekuensi $3 \times f$, maka harmonisa ke- n memiliki frekuensi $n \times f$.



Gambar 2.4. Fundamental, Harmonik Kedua, Dan Harmonik Ketiga

Sumber: Sankaran (2002, p. 73)

2.2.2 Sumber Harmonisa

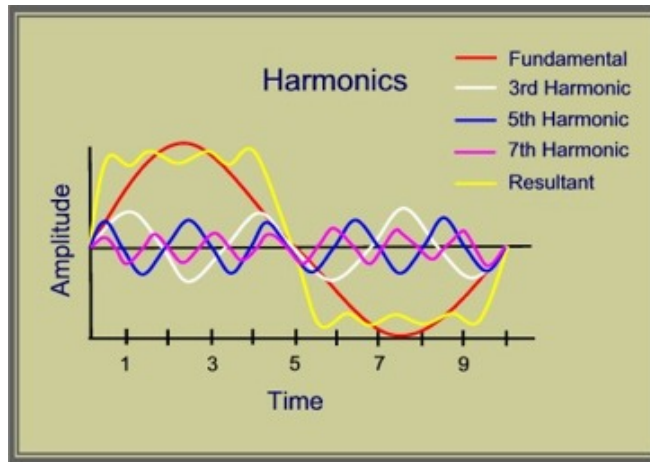
Sumber utama harmonisa adalah beban tak linear yang menyebabkan arus menjadi pulsa yang tidak beraturan. Pulsa ini kemudian melewati sistem impedansi yang kemudian menyebabkan terjadinya distorsi tegangan. Tegangan yang terdistorsi ini menyebabkan munculnya arus harmonisa pada peralatan lainnya.

Beban tak linear adalah beban yang memiliki bentuk gelombang arus yang tidak sama dengan gelombang tegangan. Contoh beban tak linear adalah :

- a. Peralatan industri : mesin las, *arc furnace*, konverter, UPS, dan sebagainya.
- b. Perlengkapan kantor : Komputer, mesin fotocopy, pesawat fax, dan sebagainya.
- c. Perlengkapan rumah tangga : televisi, *microwave*, lampu pijar, dan sebagainya.

2.2.3 Jenis Harmonisa

Harmonisa memiliki dua orde yaitu harmonisa genap dan harmonisa ganjil. Sesuai namanya, harmonisa genap memiliki nomor yang genap (2, 4, 6, 8, 10, dan seterusnya), sedangkan harmonisa ganjil memiliki nomor yang ganjil (1, 3, 5, 7, 9, dan seterusnya). Namun harmonisa pertama tidak dapat disebut harmonisa ganjil karena merupakan komponen frekuensi fundamental dari gelombang periodik. Di Indonesia frekuensi fundamentalnya adalah 50 Hz. Harmonisa ke 0 (nol) adalah komponen DC dari gelombang sehingga bernilai konstan. Pada kenyataannya, sebagian besar beban tak linear menghasilkan harmonisa dengan kelipatan ganjil dari frekuensi dasarnya.



Gambar 2.5. Gelombang Harmonisa Fundamental
Dan Harmonisa Kelipatan Ganjil
Sumber: Hershey Energy Systems (2009, p.1)

Sedangkan menurut urutan fasanya, harmonisa dapat dibedakan menjadi 3 yaitu harmonisa urutan positif (*positive sequence*), urutan negatif (*negative sequence*), dan urutan nol (*zero sequence*).

Harmonisa urutan positif mempunyai urutan fasa yang sama dengan harmonisa dasarnya. Harmonisa ini menyebabkan penambahan panas di konduktor, *Circuit Breaker* dan panel-panel yang terdapat pada sistem distribusi listrik. Harmonisa urutan negatif mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan harmonisa dasarnya. Seperti urutan positif, urutan negatif juga menyebabkan penambahan panas di berbagai peralatan. Selain itu, urutan negatif juga menyebabkan masalah di motor induksi karena urutan negatifnya berputar berlawanan arah. Perputaran ini tidak dapat membuat motor berputar melawan arah yang dikehendaki, namun dapat mengurangi laju kecepatan motor karena menyebabkan motor lebih panas dari semestinya. Sedangkan harmonisa urutan nol tidak memproduksi suatu perputaran medan di kedua arah, sehingga menghasilkan panas yang lebih dibandingkan urutan positif dan urutan negatif. Bahaya yang dapat terjadi dari harmonisa urutan nol adalah besarnya arus yang mengalir, yang dapat mengakibatkan terjadinya kebakaran.

Tabel 2.1. Tabel Polaritas Komponen Harmonisa

Harmonisa	Frekuensi (Hz)	Urutan
Fundamental (1)	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
7	350	+
8	400	-
9	450	0
10	500	+

Sumber: Mazur (1998, p. 48)

2.2.4 Indeks Harmonisa

Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai rms dari seluruh komponen harmonisa dan nilai rms dari komponen *fundamental* yang biasanya dinyatakan dalam persen (%). Indeks ini digunakan untuk mengukur deviasi dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa dari gelombang sinusoidal sempurna. Untuk gelombang sinusoidal sempurna, THD bernilai nol persen. Berikut merupakan rumus THD untuk tegangan dan arus (Sankaran 82):

$$V_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.8)$$

dengan:

- V_n = Tegangan rms frekuensi tunggal pada harmonisa n (volt)
- N = Harmonisa maksimum
- V_1 = Komponen tegangan fundamental (volt)

$$I_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.9)$$

dengan:

I_n = Arus rms frekuensi tunggal pada harmonisa n (volt)

N = Harmonisa maksimum

I_1 = Komponen arus fundamental (volt)

2.2.5 Standar Harmonisa

Ada dua standar yang biasanya digunakan untuk kontrol harmonisa, yaitu IEEE (Sistem Amerika) dan IEC (Sistem Eropa).

Kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa, yaitu batasan untuk harmonisa arus, dan batasan untuk harmonisa tegangan. Untuk standar harmonisa arus, ditentukan oleh rasio I_{SC}/I_L . I_{SC} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan untuk standar harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai.

Tabel 2.2. *Current Distortion Limits* untuk *General Distribution System*

<i>Maximum Harmonics Current Distortion $I_n \% I_L$</i>						
<i>Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)</i>						
I_{sc}/ I_L	< 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, Blooming (2006, p. 2)

dengan :

I_{sc} = Max short circuit current di PCC (*Point of Common Coupling*)

I_L = Max load current (Frekuensi fundamental) di PCC

Tabel 2.3. *Voltage Distortion Limits*

Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Harmonic 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, Blooming (2006, p. 2)

2.2.6 Pengaruh Harmonisa

Harmonisa memiliki pengaruh yang sangat besar dalam sistem kelistrikan, khususnya untuk peralatan listrik. Pengaruh dari harmonisa seringkali baru diketahui setelah terjadi kerusakan ataupun gangguan, sehingga sangat berbahaya dan harus dicegah. Pengaruh yang ditimbulkan oleh harmonisa secara umum adalah panas, kegagalan operasi peralatan listrik, getaran mekanis pada mesin, kegagalan sistem proteksi, sistem pengukuran tidak akurat, kerusakan peralatan-peralatan elektronik, dan sebagainya. Pada sistem distribusi listrik, pengaruh harmonisa dapat menyebabkan penurunan kinerja dan bahkan kerusakan dari komponen dalam sistem distribusi seperti transformator, motor, kapasitor, *circuit breaker* dan *fuse*.

2.2.6.1 Pengaruh Harmonisa pada Transformator

Transformator dirancang untuk menyalurkan daya yang dibutuhkan oleh beban dengan rugi-rugi minimum. Adanya harmonisa menyebabkan rugi-rugi pada transformator meningkat. Akibatnya, transformator menjadi lebih panas bahkan bisa meledak dan menyebabkan kebakaran.

Harmonisa dapat mempengaruhi transformator dalam dua cara. Harmonisa tegangan menghasilkan penambahan rugi-rugi pada inti transformator. Yang kedua dan yang lebih berbahaya adalah frekuensi arus harmonisa di

kumparan transformator. Arus harmonisa meningkatkan arus RMS yang mengalir di kumparan transformator yang menghasilkan penambahan rugi-rugi I^2R . Rugi-rugi *eddy current* juga bertambah dan mengakibatkan peningkatan temperatur pada transformator.

2.2.6.2 Pengaruh Harmonisa pada Motor

Harmonisa pada motor menyebabkan penambahan rugi-rugi histerisis, *eddy current* dan I^2R pada kumparan motor. Rugi-rugi histerisis meningkat seiring peningkatan frekuensi dan rugi-rugi *eddy current* meningkat sebagai hasil dari frekuensi pangkat dua.

Tegangan non-sinusoidal pada mesin dapat mengakibatkan panas berlebih (*overheating*). Tegangan dan arus harmonisa meningkatkan rugi-rugi pada kumparan stator, rotor dan laminasi stator dan rotor.

2.2.6.3 Pengaruh Harmonisa pada Kapasitor

Pengaruh utama dari harmonisa pada kapasitor adalah kondisi resonansi akibat reaktansi induktif dan kapasitif menjadi sama dengan salah satu frekuensi harmonisa.

Capasitor bank biasanya ditemukan pada sistem tenaga listrik bidang komersial atau industri untuk memperbaiki kondisi faktor daya yang rendah. *Capasitor bank* didesain 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.

2.2.6.4 Pengaruh Harmonisa pada *Circuit Breaker* dan *Fuse*

Komponen harmonisa dapat mempengaruhi kemampuan interupsi arus dari *circuit breaker*. *Circuit breaker* akan mengalami kesulitan untuk memutuskan arus saat terjadi gangguan pada sistem.

Harmonisa juga mengurangi kapasitas *current carrying* dari *fuse*, merubah karakteristik arus-waktu dan waktu lebur (*melting time*) serta

mempengaruhi *rating interrupting* dari *fuse*. Akibatnya, *surge arrester* dan kapasitor gagal berfungsi dengan baik.

2.2.6.5 Pengaruh Harmonisa pada Kabel

Aliran arus pada kabel menghasilkan rugi-rugi I^2R . Jika arus mengandung harmonisa, maka rugi-rugi pun bertambah. Selain itu, pengaruh *skin effect* pada kabel semakin diperparah dengan kehadiran harmonisa.