

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Adapun pembukaan yang ingin dibahas dalam bagian ini meliputi sebagai berikut:

2.1.1 Sistem Tenaga Listrik

Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batu bara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi listrik. Generator sinkron merubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa.

Melalui transformator penaik tegangan (*Step-Up Transformator*) energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban. Ketika saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan tersebut kembali diturunkan menjadi tegangan menengah, melalui transformator penurun tegangan (*Step-Down Transformator*).

Generator sinkron dipusat pembangkit biasanya menghasilkan tenaga listrik dengan tegangan antara 6-20 kV, yang kemudian dengan bantuan transformator tegangan tersebut dinaikan menjadi 150-500 kV. Saluran tegangan tinggi (STT) menyalurkan tenaga listrik menuju pusat penerima, disini tegangan diturunkan. Tegangan subtransmisi 70 kV. Pada gardu induk (GI), tenaga listrik yang diterima kemudian dilepaskan menuju trafo distribusi (TD) dalam bentuk tegangan menengah 20 kV. Melalui trafo distribusi yang tersebar diberbagai pusat-pusat beban, tegangan distribusi primer ini diturunkan menjadi tegangan rendah 220/380 V yang akhirnya diterima pihak pemakai.

2.1.2 Daya Listrik

1. Pada sistem beban linier, konsep daya untuk sistem satu fasa dapat didefinisikan sebagai:

$$\text{Daya semu (S)} = V I [\text{VA}] \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Daya aktif (P)} = V I \cos \phi [\text{W}] \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{Daya reaktif (Q)} = V I \sin \phi \text{ [VAR]} \dots\dots\dots (2.3)$$

2. Konsep daya untuk sistem 3 fasa dapat didefinisikan sebagai:

$$\text{Daya semu (S)} = \sqrt{3} V I \text{ [VA]} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\text{Daya aktif (P)} = \sqrt{3} V I \cos \phi \text{ [W]} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\text{Daya reaktif (Q)} = \sqrt{3} V I \sin \phi \text{ [VAR]} \dots\dots\dots (2.6)$$

2.2 Generator Sinkron^[4]

Generator arus bolak-balik, yang kadang-kadang disebut generator sinkron atau alternator, memberikan hubungan penting dalam proses yang lama dari perubahan energi dalam batu-bara, minyak, gas, atau uranium ke dalam bentuk yang bermanfaat untuk digunakan dalam industri dan rumah tangga.

Generator besar yang digunakan untuk mencatu jala-jala daya listrik digerakkan oleh turbin uap atau kincir air. Generator yang digunakan untuk mencatu sistem daya terpisah, atau sistem yang lebih kecil atau untuk memperlengkapi daya beban puncak tambahan terhadap jala-jala listrik yang lebih besar kerap kali digerakkan oleh mesin diesel atau turbin bakar.



Gambar 2.1 Generator Sinkron^[13]

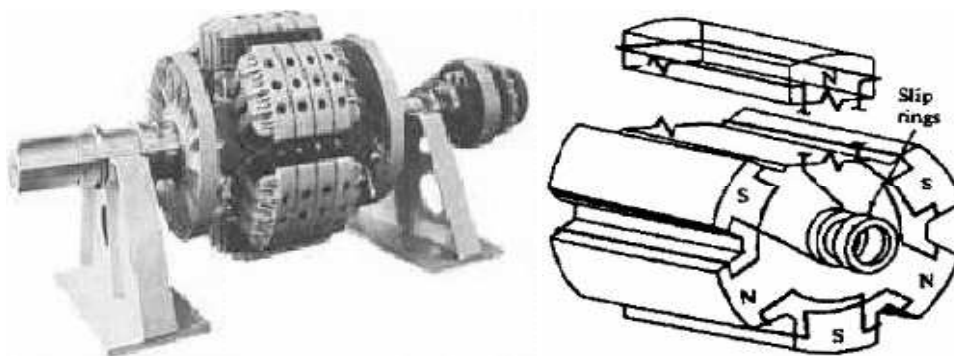
2.2.1 Konstruksi Generator Sinkron^[4]

Dalam generator dc, lilitan jangkar dipasang pada bagian mesin yang berputar agar memungkinkan perubahan tegangan bolak-balik yang dibangkitkan dalam lilitan menjadi tegangan searah pada terminal melalui penggunaan komutator yang berputar. Kutub medan diletakkan pada bagian mesin yang diam.

Dalam semua generator arus bolak-balik bertegangan rendah yang kecil, medan diletakkan pada bagian yang berputar atau rotor, dan lilitan jangkar pada bagian yang diam atau stator dari mesin. Konstruksi medan yang berputar dan jangkar-diam menyederhanakan masalah isolasi generator ac. Karena tegangan yang biasanya dibangkitkan adalah setinggi 18.000 sampai 24.000 V, maka tegangan tinggi ini tidak perlu dikeluarkan melalui cincin-slip (*slipring*) dan kontak geser tetapi dapat dikeluarkan langsung ke alat penghubung dan pembagi (*switchgear*) melalui kawat berisolasi dari jangkar diam. Konstruksi ini juga mempunyai keuntungan mekanis yaitu getaran lilitan jangkar berkurang dan gaya sentrifugal menjadi lebih baik. Medan yang berputar dicatu dengan arus searah pada tegangan 125, 250, atau 375 V melalui cincin slip dan sikat-sikat, atau melalui hubungan kabel langsung antara medan dan penyearah yang berputar jika digunakan sistem eksitasi tanpa sikat-sikat.

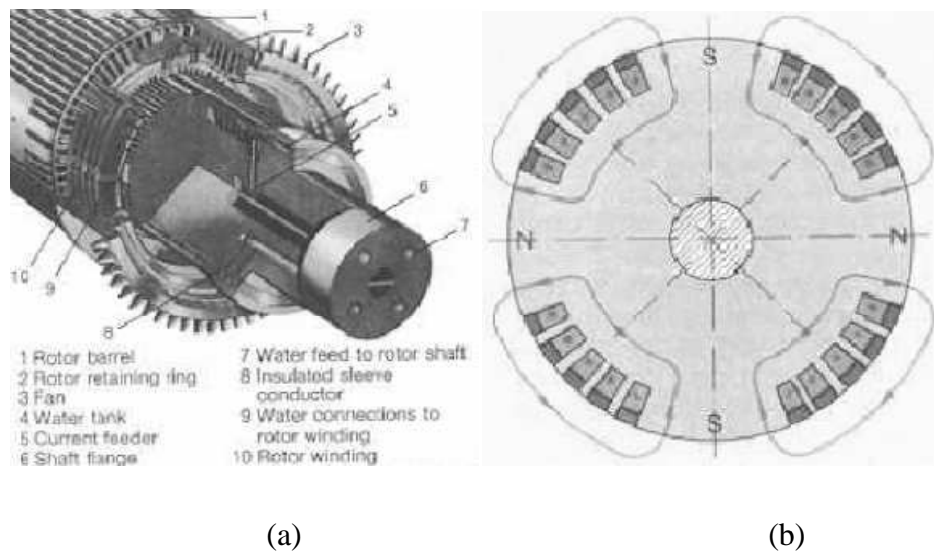
Lilitan jangkar atau stator bisa salah satu dari sekian banyak tipe. Tipe yang banyak digunakan adalah lilitan rangkaian terbuka yang dibentuk dari kumparan yang terisolasi terpisah mirip dengan lilitan sengkeli generator dc. Sebenarnya, lilitan yang demikian tersusun dari tiga lilitan terpisah (pada generator tiga phase), yang masing-masing terpisah satu dengan yang lain 120 derajat.

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa salient (kutub sepatu) dan non salient (rotor silinder). Gambaran bentuk kutub sepatu generator sinkron diperlihatkan pada gambar di bawah ini.^[3]



Gambar 2.2 Rotor salient (kutub sepatu) pada generator sinkron

Pada kutub salient, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor sedangkan pada kutub non salient (silinder), konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Rotor silinder umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar prime mover, frekuensi dan rating daya generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dan rating daya sekitar 10MVA menggunakan rotor silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu. Gambaran bentuk kutup silinder generator sinkron diperlihatkan pada gambar di bawah ini.^[10]



Gambar 2.3 Rotor Generator

(a) rotor Non-salient (rotor silinder)

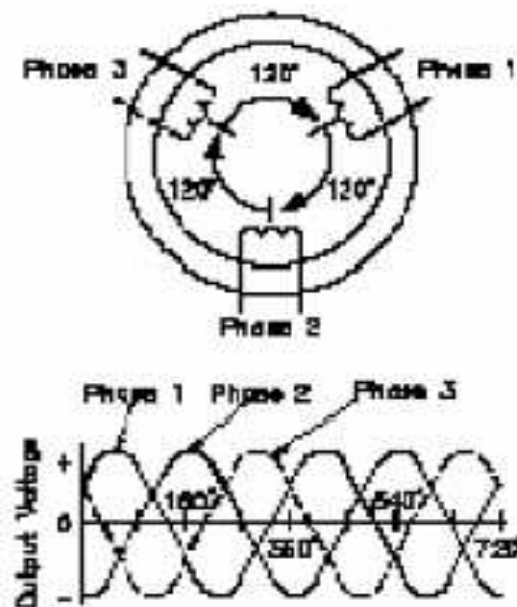
(b) penampang rotor pada generator sinkron

Arus DC disuplai ke rangkaian medan rotor dengan dua cara:

1. Menyuplai daya DC ke rangkaian dari sumber DC eksternal dengan sarana slip ring dan sikat.
2. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron.

2.2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron^[10]

Jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap. Pada mesin tipe ini medan magnet diletakkan pada stator (disebut generator kutub eksternal / external pole generator) yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor. Hal ini dapat menimbulkan kerusakan pada slipring dan karbon sikat, sehingga menimbulkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan tipe generator dengan kutub internal (internal pole generator), yang mana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan. Tegangan AC tiga fasa dibangkitkan pada mesin sinkron kutub internal pada tiga kumparan stator yang diset sedemikian rupa sehingga membentuk beda fasa dengan sudut 120° . Bentuk gambaran sederhana hubungan kumparan 3-fasa dengan tegangan yang dibangkitkan diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.4 Gambaran sederhana kumparan 3-fasa dan tegangan yang dibangkitkan

Pada rotor kutub sepatu, fluks terdistribusi sinusoidal didapatkan dengan mendesain bentuk sepatu kutub. Sedangkan pada rotor silinder, kumparan rotor disusun secara khusus untuk mendapatkan fluks terdistribusi secara sinusoidal. Untuk tipe generator dengan kutub internal (internal pole generator), suplai DC yang dihubungkan ke kumparan rotor melalui slip ring dan sikat untuk menghasilkan medan magnet merupakan eksitasi daya rendah. Jika rotor menggunakan magnet permanen, maka tidak slip ring dan sikat karbon tidak begitu diperlukan.

2.3 Kecepatan Putar Generator Sinkron

Frekuensi listrik yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC. Medan magnet rotor bergerak pada arah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator adalah:

$$f_e = \frac{n_r \cdot P}{120} \dots\dots\dots (2.7)$$

dimana:

f_e = frekuensi listrik (Hz)

n_r = kecepatan putar rotor = kecepatan medan magnet (rpm)

p = jumlah kutub magnet

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan 60 Hz pada mesin dua kutub, rotor harus berputar dengan kecepatan 3600 rpm. Untuk membangkitkan daya 50 Hz pada mesin empat kutub, rotor harus berputar pada 1500 rpm.

2.4 Alternator tanpa beban

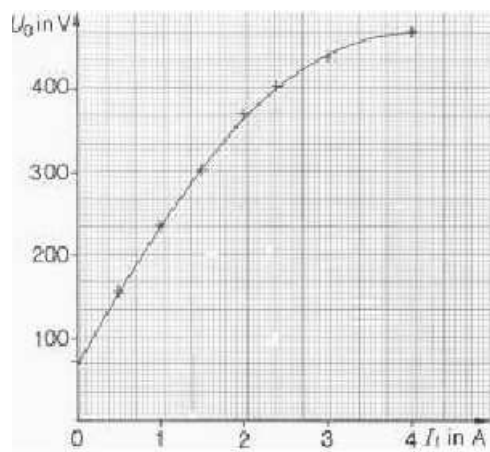
Dengan memutar alternator pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (IF), maka tegangan (E_a) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut.

$$E_a = c.n.\phi \dots\dots\dots (2.8)$$

yang mana:

- c = konstanta mesin
- n = putaran sinkron
- ϕ = fluks yang dihasilkan oleh IF

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (IF). Apabila arus medan (IF) diubah-ubah harganya, akan diperoleh harga E_a seperti yang terlihat pada kurva sebagai berikut.



Gambar 2.5 Karakteristik tanpa beban generator sinkron

2.5 Alternator Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi magnetisasi (X_m). Reaktansi pemagnet

(X_m) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s). Persamaan tegangan pada generator adalah:

$$E_a = V_t + I R_a + j I X_s \dots\dots\dots (2.9)$$

$$V_t = E_a - I R_a - j I X_s \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana:

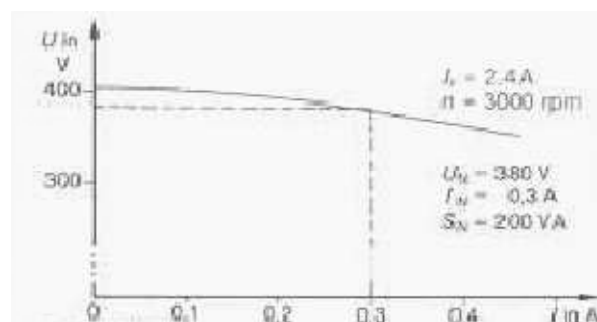
E_a = tegangan induksi pada jangkar

V_t = tegangan terminal output

R_a = resistansi jangkar

X_s = reaktansi sinkron

Karakteristik pembebanan dan diagram vektor dari alternator berbeban induktif (faktor kerja terbelakang) dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.6Karakteristik alternator berbeban induktif

2.6 Identifikasi dan Penentuan Parameter Generator Sinkron

Parameter generator sinkron dibutuhkan pada dasarnya untuk menggambarkan rangkaian ekuivalen beserta karakteristiknya. Parameter yang dibutuhkan pada penulisan ini yaitu impedansi sinkron Z_s , reaktansi sinkron X_s , tahanan jangkar R_a . Sehingga untuk memperoleh parameter-parameter tersebut maka diperlukan identifikasi ataupun pengujian-pengujian sebagai berikut:

a. Pengujian beban Nol

Pengujian beban nol terkait dengan karakteristik beban nol yaitu hubungan antara tegangan induksi E_a dengan arus/eksitasi I_f . Pada pengujian beban nol,

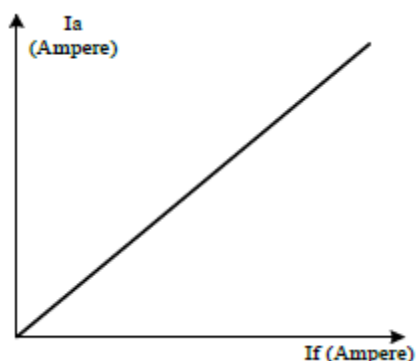
rotor generator diputar pada kecepatan nominal dan terminal jangkar dalam keadaan terbuka. Arus medan I_f diatur bertahap dari nol hingga diperoleh harga tegangan induksi E_a berkisar kurang lebih 125% dari tegangan nominal generator. Pada kondisi ini arus jangkar $I_a=0$ dan tegangan induksi $E_a=V_t$.

b. Pengujian hubung singkat

Pengujian hubung singkat terkait dengan karakteristik hubung singkat yaitu hubungan antara arus jangkar I_a dengan arus penguat/eksitasi I_f . Pada pengujian hubung singkat, mula-mula arus medan dibuat menjadi nol dan terminal jangkar dihubungkan singkat melalui amperemeter. Lalu arus jangkar diperbesar dengan menaikkan secara bertahap arus medan hingga tercapai nilai arus jangkar maksimum yang masih aman sekitar 125% - 150% dari arus nominal jangkar. Karakteristik hubung singkat merupakan garis lurus. Pada kondisi hubung singkat, tegangan terminal $V_t=0$ dan arus jangkar sama dengan arus hubung singkat ($I_a=I_{sc}$), sehingga dapat dirumuskan:

$$I_a = I_{sc} = \frac{E_a}{r_a + jX_s} \dots\dots\dots (2.11)$$

Pembacaan arus jangkar atau arus hubung singkat dengan pengaruh variasi medan eksitasi digambarkan dalam sebuah kurva yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Karakteristik Hubung Singkat

Kurva tersebut merupakan kurva linier karena tidak adanya efek saturasi. Saat tegangan terminal sama dengan nol, lebih dari 90% tegangan jatuh muncul akibat reaktansi sinkron.

c. Menentukan Impedansi dan Reaktansi Sinkron

Jika tidak terjadi saturasi, impedansi sinkron Z_s akan bernilai tetap. Secara aktual Z_s bervariasi saat terjadi saturasi. Untuk menghitung voltage regulation, hanya satu nilai Z_s yang digunakan. Umumnya nilai Z_s yang digunakan tersebut diperoleh dari arus hubung singkat I_{sc} yang terbesar dan besar tegangan induksi beban nol E_{bn} saat terjadi saturasi dengan arus medan penguat/eksitasi I_f yang sama. Nilai impedansi sinkron Z_s dan reaktansi sinkron X_s per fasa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.12 dan persamaan 2.13 berikut ini:

$$Z_s = \frac{E_0}{I_{sc}} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - r_a^2} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

E_0 = Tegangan induksi beban nol (Volt)

I_{sc} = Arus hubung singkat (A)

Z_s = Impedansi sinkron (ohm)

X_s = Reaktansi sinkron (ohm)

r_a = Tahanan jangkar (ohm)

2.7 Eksitasi Tegangan^[7]

Setelah generator AC mencapai kecepatan yang sebenarnya oleh penggerak mula, medan dieksitasi dari catu dc. Ketika kutub lewat di bawah konduktor menginduksikan ggl kepadanya. Ini adalah ggl bolak-balik, karena kutub dengan polaritas yang berubah-ubah terus-menerus melewati konduktor

tersebut. Karena tidak menggunakan komutator, ggl bolak-balik yang dibangkitkan keluar pada terminal lilitan stator.

Besarnya ggl yang dibangkitkan bergantung pada laju pemotongan garis gaya atau dalam hal generator, besarnya ggl bergantung pada eksitasi medan. Ini berarti bahwa besarnya ggl yang dibangkitkan dapat dikendalikan dengan mengatur besarnya eksitasi medan yang diberikan pada generator. Eksitasi medan dapat langsung dikendalikan dengan mengubah besarnya tegangan eksitasi yang dikenakan pada medan generator.

Faktor daya dari generator dapat ditentukan dengan karakteristik beban yang sedang dicatu (kecuali generator bekerja secara paralel dengan generator lain).



Gambar 2.8 kurva pengaturan generator AC pada faktor daya yang berbeda

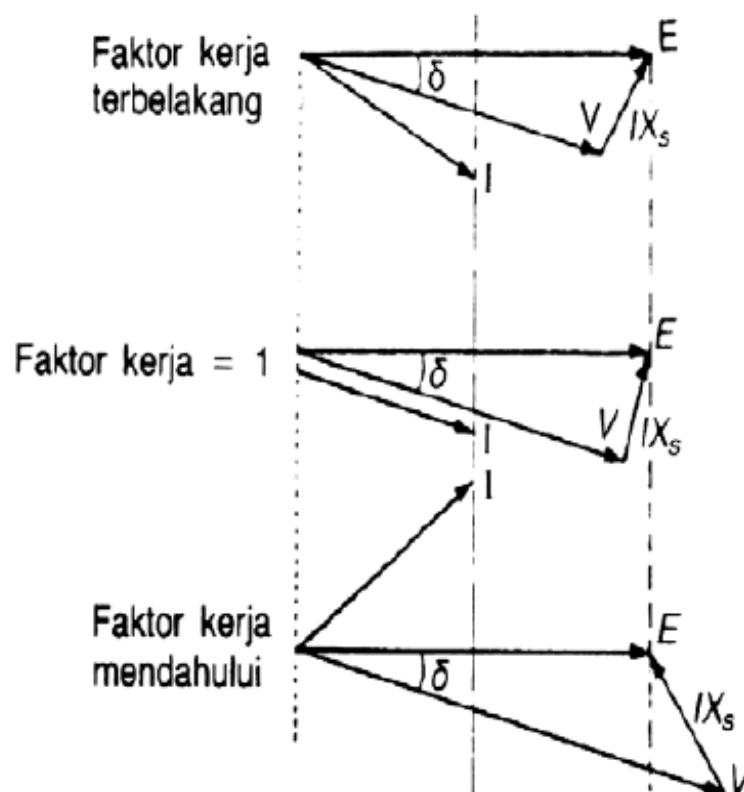
Frekuensi ggl yang dibangkitkan bergantung pada jumlah kutub medan dan kecepatan generator. Pada kumparan tertentu, akan dibangkitkan tegangan satu siklus lengkap bila sepasang kutub rotor (kutub utara dan selatan) digerakkan melewati kumparan. Maka jumlah siklus yang dibangkitkan dalam satu putaran rotor sama dengan jumlah pasangan kutub rotor atau $p/2$, diaman p adalah jumlah total kutub. Jika n adalah kecepatan rotor dalam putaran per menit, maka $n/60$ adalah putaran per sekon. Frekuensi dalam hertz atau siklus per sekon, maka:

$$f = \frac{p}{2} \times \frac{n}{60} = \frac{pn}{120} \dots\dots\dots (2.14)$$

sejauh ini frekuensi jala-jala yang paling umum digunakan di Amerika adalah 60 Hz, dan ada juga sedikit yang menggunakan 25 Hz, dan frekuensi yang biasa digunakan di Eropa adalah 50 Hz.

2.8 Pengaturan Tegangan^[7]

Diagram vektor pada gambar 2.9 memperlihatkan bahwa terjadinya perbedaan tegangan terminal V dalam keadaan berbeban, dengan tegangan E_0 pada saat tidak berbeban, dipengaruhi selain oleh faktor kerja juga oleh besarnya arus jangkar (I) yang mengalir.

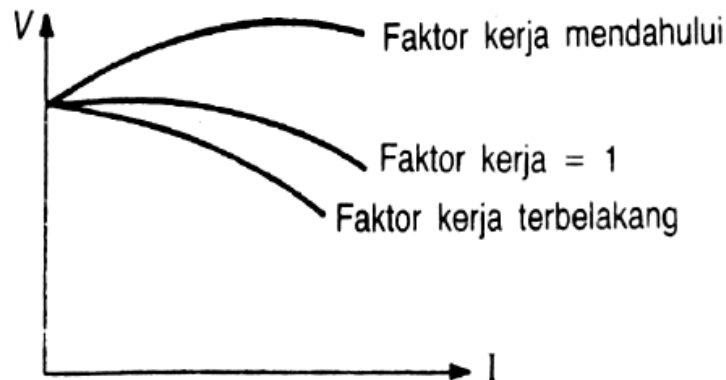


Gambar 2.9 Diagram Vektor Pengaturan Tegangan

Dengan memperlihatkan perubahan tegangan V untuk faktor kerja berbeda-beda pada gambar 2.10 karakteristik tegangan terminal V terhadap arus jangkar I dapat digambarkan seperti 2.10. pengaturan tegangan adalah perubahan

tegangan terminal generator antara keadaan beban tak berbeban dengan beban penuh dan dinyatakan:

$$\text{Pengaturan tegangan} = \frac{E_0 - V}{V} \dots\dots\dots(2.15)$$



Gambar 2.10 Karakteristik tegangan terminal V terhadap arus jangkar I

2.9 Lampu Compact Flourescent^[6]

Lampu compact flourescent adalah salah satu bentuk pengembangan dari lampu flourescent. Lampu hemat energi ini terdiri dari ballast elektronik dan tabung gelas. Ballast elektronik terdiri dari komponen-komponen semikonduktor yang berfungsi sebagai:

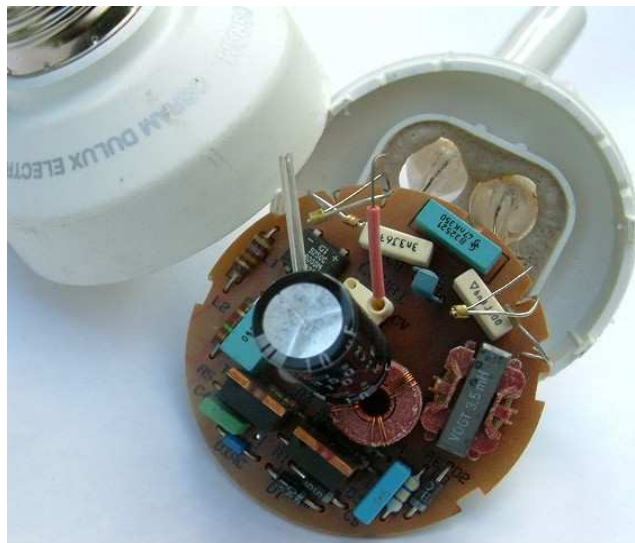
- Pembangkit tegangan induksi yang tinggi agar terjadi pelepasan elektron di dalam tabung.
- Membatasi arus yang melalui tabung setelah lampu bekerja normal.

Dimana proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan dan dirancang untuk menggunakan arus listrik secara hemat dan efisien selama periode pengaturan yang telah ditentukan. Proses kerja ballast elektronik dimana menggunakan prinsip switching akan menghasilkan gangguan atau distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. Yaitu arus/ elektron-elektron yang mengalir dari sisi elektroda "positif" menuju elektroda "negatif" yang berbenturan dengan gas argon dan merkuri yang

terionisasi tentu mempunyai besaran-besaran yang berubah-ubah setiap saat sesuai kondisi benturan sehingga impedansi lampu yang terdiri dari unsur-unsur R-L-C merupakan fungsi waktu yang tidak linier.

2.9.1 Konstruksi Lampu Compact Fluorescent

Lampu compact fluorescent ini memiliki bentuk yang lebih kecil dari lebih sederhana jika dibandingkan dengan lampu fluorescent. Dikatakan lebih kecil karena ukuran tabung lampu yang digunakan relatif lebih kecil dan lebih sederhana karena pada umumnya pada sebuah rangkaian lampu ini telah terdapat ballast dengan bentuk yang lebih kecil dan praktis (integral ballast) baik itu magnetis maupun elektronik, dan ballast tersebut dipasang permanent dengan lampu.



Gambar 2.11 Konstruksi Lampu compact fluorescent dengan Ballast Elektronik^[11]

Kelebihan dari lampu Compact Fluorescent ini adalah sebagai berikut:

- a. 80 % hemat konsumsi listrik dibandingkan dengan lampu pijar yang memiliki kadar terang yang sama.
- b. menghasilkan cahaya 2 hingga 4 kali lebih besar.

Tahan lama dimana masa kerja aktif 10000 jam hingga 20000 jam jika dibandingkan dengan lampu incandescent yang memiliki masa kerja aktif 750 hingga 1000 jam.

2.9.2 Cara kerja lampu compact fluorescent^[6]

Lampu LED terbuat dari pencampuran galium nitrida (GaN) dengan fosfor kuning. Warna kuning yang dihasilkan merangsang penerima warna merah dan hijau di mata manusia. Kombinasi antara warna kuning dari fosfor dan warna biru dari substrat akan memberikan kesan warna putih bagi mata manusia. Dengan segala kelebihanannya itu, tak heran bila LED kerap dipakai untuk alat-alat penerangan yang berada diruang terbuka. Misalnya papan iklan raksasa (billboard), lampu kendaraan, lampu taman, hingga lampu lalu lintas, bahkan handphone, televisi serta laptop pun sudah menggunakan lampu jenis ini.

Lampu pijar dan neon tidak berguna lagi setelah bohlamnya (Kaca pelindungnya) pecah, namun tidak demikian dengan lampu LED. Lampu ini merupakan jenis *solid state lighting* (SSL), artinya lampu yang menggunakan kumpulan LED serta benda padat lainnya sebagai sumber pencahayaannya, sehingga lampu LED tidak mudah rusak bila terjatuh atau bohlamnya (kaca pelindung) pecah. Kumpulan LED diletakkan dengan jarak yang rapat untuk memperterang cahaya umumnya lampu LED memiliki 4 macam warna yang kasat mata, yaitu merah, kuning, hijau, dan biru. Untuk menghasilkan sinar putih yang sempurna, spektrum cahaya dari warna-warna tersebut digabungkan. Yang paling umum dilakukan adalah penggabungan warna merah, hijau, dan biru yang disebut RGB. Sampai saat ini, pengembangan terus dilakukan untuk menghasilkan lampu LED dengan komposisi warna seimbang dan berdaya tahan lama.

2.9.3 Keunggulan dan Kelemahan lampu compact fluorescent

Apabila dibandingkan antara lampu LED dengan lampu pijar, lampu LED memiliki keunggulan sebagai berikut.

1. Menghasilkan cahaya yang terang

2. Tidak membuat suhu ruangan meningkat dibandingkan dengan menggunakan lampu pijar.
3. Lampu LED mampu menekan pemanasan global dan mengurangi jumlah emisi karbon di dunia. Lampu ini berasal dari bahan semikonduktor, jika tidak diproduksi dari bahan karbon.
4. Salah satu alternatif untuk melakukan penghematan energi listrik. Apabila lampu LED digunakan di seluruh dunia, total energi listrik untuk penerangan dapat berkurang hingga 50%.
5. Lampu LED tidak mengandung Mercury.
6. Daya tahan lebih lama, yaitu 60x lebih lama dibanding dengan tipe lampu Incandescent dan 10x lebih lama dibanding tipe Flourescent.

2.10 Definisi Harmonisa^[6]

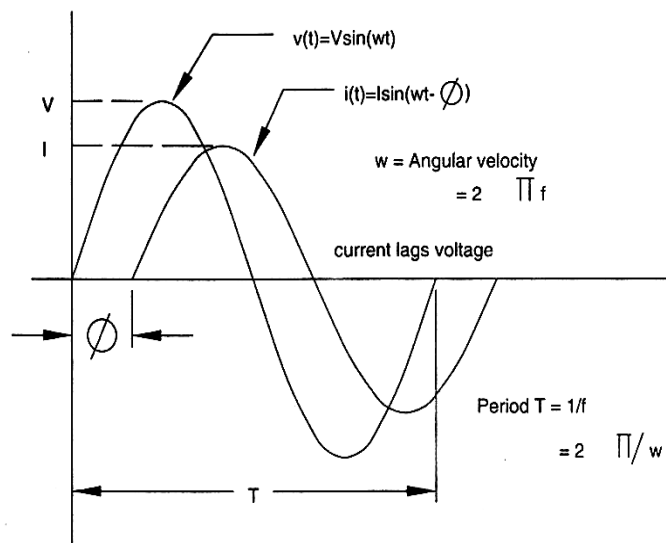
Harmonisa atau harmonik adalah gelombang yang disebabkan oleh interaksi antara gelombang sinusoidal sistem dengan komponen gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan integer dari komponen fundamentalnya. Pada sistem tenaga listrik AC yang ideal, energi listrik disalurkan dalam frekuensi tunggal yang konstan serta pada level tegangan yang juga konstan. Tetapi dengan perkembangan beban listrik yang semakin maju, terutama penggunaan beban-beban non linier, akan menimbulkan perubahan pada bentuk gelombangnya. Suatu fenomena yang timbul akibat pengoperasian beban listrik non linier 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 jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmoniknya.

Perlu diketahui bahwa dalam sistem tenaga listrik yang ideal, bentuk gelombang tegangan yang disalurkan ke peralatan konsumen dan bentuk gelombang arus yang dihasilkan adalah bentuk sinusoidal murni. Fungsi tegangan dan arus yang bergantung pada waktu t dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

Fungsi tegangan, $v(t) = V \cdot \sin(\omega \cdot t)$ (2.16)

Fungsi arus, $i(t) = I \cdot \sin(\omega \cdot t \pm \theta)$ (2.17)

Dimana ω adalah kecepatan sudut dari gelombang periodik dan θ beda sudut fasa antara gelombang tegangan dan arus. Sudut fasa θ bertanda positif jika arus mendahului tegangan dan akan negatif jika arus tertinggal dari tegangan. Gambar 2.12 berisi gelombang arus dan tegangan dari persamaan (2.16) dan (2.17) yang merupakan gelombang sinusoidal murni.

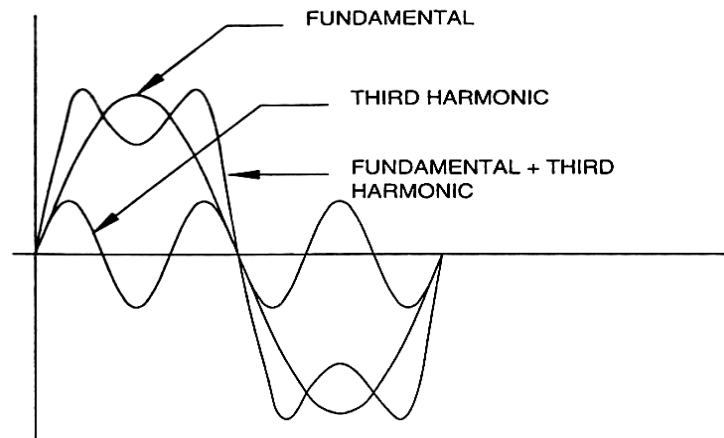


Gambar 2.12 Gelombang Sinus Arus dan Tegangan^[8]

Untuk gelombang yang non sinusoidal, ditunjukkan dalam gambar 2.13 yang dinyatakan dalam deret fourier yang disederhanakan berikut ini :

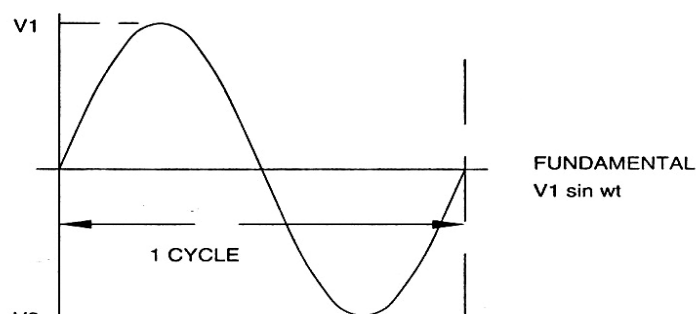
$$V(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega \cdot t) + V_2 \sin(2\omega \cdot t) + V_3 \sin(3\omega \cdot t) + V_n \sin(n\omega \cdot t) + \dots + V_{n+1} \sin((n+1)\omega \cdot t) \dots \dots \dots (2.18)$$

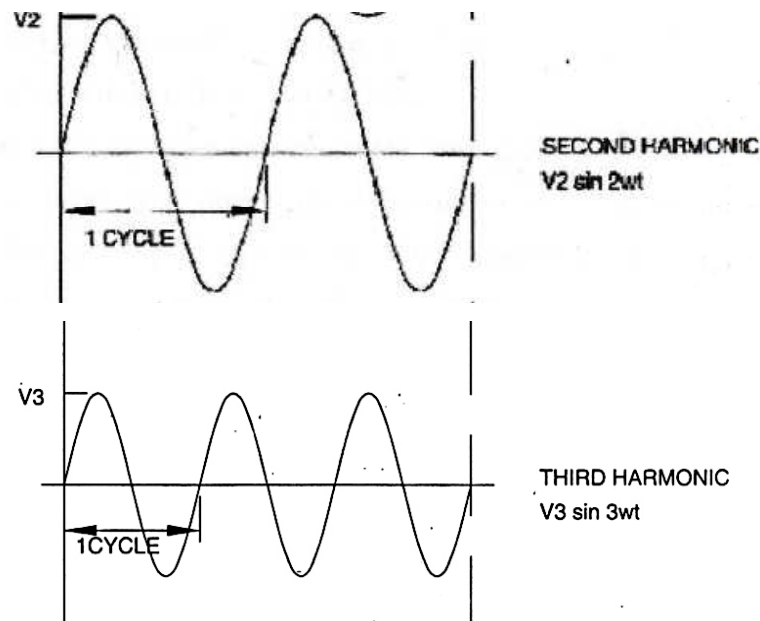
Dimana V_0 adalah konstanta atau komponen dc bentuk gelombang $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ adalah harga puncaknya.



Gambar 2.13 Gelombang Non Sinusoidal^[1]

Gelombang sinusoidal dapat terbentuk dengan menjumlahkan gelombang gelombang sinusoidal pada gambar 2.13. Sebagai contoh, gelombang non sinusoidal hasil penjumlahan gelombang *fundamental* dan gelombang harmonisa ketiga dapat dilihat pada gambar 2.13. Misalnya frekuensi *fundamental* (harmonisa pertama) adalah f , harmonisa kedua adalah $2f$, maka harmonisa ketiga adalah $3f$ dan harmonisa ke- n memiliki frekuensi nf . Jika frekuensi *fundamental* adalah 50 Hz, harmonisa kedua 100Hz, maka harmonisa ketiga memiliki frekuensi 150 Hz dan seterusnya. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada gambar 2.14 sebagai berikut:





Gambar 2.14 Gelombang *Fundamental*, Harmonik kedua dan Harmonik Ketiga^[8]

2.11 Sumber Harmonik pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik^[6]

Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban tidak linier. Harmonisa muncul akibat adanya beban-beban tidak linier yang terhubung ke sistem distribusi. Beban tidak linier adalah bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Beban non-linier yang umumnya merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor, dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan atau distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. Bentuk gelombang ini tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter komponen semi konduktor dalam peralatan elektronik. Perubahan bentuk gelombang ini terkait dengan sumber tegangannya.

Peralatan-peralatan elektronik tersebut adalah sebagai berikut:

1. Peralatan rumah tangga:

- a) Lampu *flourescent* dengan *ballast* elektronik
 - b) Lampu *compacy flourescent* (LHE)
 - c) *Oven Microwave*
 - d) Televisi
2. Peralatan Kantor:
 - a) Komputer
 - b) Printer
 - c) Mesin Fotokopi
 - d) Mesin Fax
 3. Peralatan Industri:
 - a) Mesin Las
 - b) Kontrol kecepatan motor
 - c) Electroplating
 - d) Dapur busur listrik (Tanur Listrik)
 4. UPS (*Uninterruptible Power Supplies*)

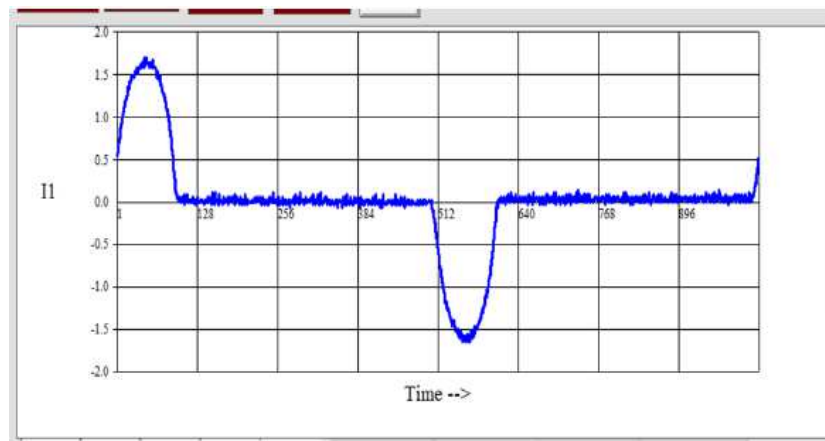
Peralatan-peralatan elektronik ini dirancang untuk menggunakan arus listrik secara hemat energi dan efisien karena hanya dapat melalui komponen semikonduktor selama periode pengaturan yang telah ditentukan. Disisi lain hal ini akan menyebabkan gelombang mengalami gangguan, oleh karena itu gelombang arus dan tegangan yang pada akhirnya akan kembali ke bagian lain sistem tenaga listrik. Hal ini yang menyebabkan terjadinya harmonisa.

2.12 Distorsi Harmonik^[3]

Pada dasarnya gelombang tegangan dan arus yang ditransmisikan dan di distribusikan dari sumber ke beban berupad gelombang sinusoidal murni. Akan tetapi pada proses transmisi dan distribusi ini terjadi berbagai macam gangguan sehingga bentuk gelombang tidak lagi sinusoidal murni. Salah satu fenomena penyimpangan bentuk gelombang sinusoidal ini adalah distorsi harmonik.

Harmonik adalah gejala pembentukan gelombang sinusoidal dengan frekuensi yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya.

Bila terjadi superposisi antara gelombang frekuensi dasar dengan gelombang frekuensi harmonik maka terbentuklah gelombang yang terdistorsi sehingga bentuk gelombang tidak lagi sinusoidal. Fenomena ini disebut dengan distorsi harmonik. Pembentukan gelombang non-sinusoidal hasil distorsi harmonik dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.15 Bentuk Gelombang Hasil Distorsi Harmonik

2.13 Standar Harmonisa

Standar harmonisa berdasarkan standar IEEE 519. Ada dua 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 untuk standard harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai.

Standar harmonisa arus dapat dilihat pada tabel 2.1, sedangkan standar harmonisa tegangan dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.1 Standar Harmonisa Arus^[9]

I_{sc}/I_L	Harmonic Orde (Odd Harmonics)					THD (%)
	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
< 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

Dimana:

I_{sc} = Arus Maksimum Hubung Singkat pada *PCC* (*Point of Common Coupling*)

I_L = Arus Beban Maksimum (*Fundamental Frequency*) pada *PCC*

Tabel 2.2 Standar Harmonisa Tegangan^[9]

Maximum Voltage Distortion			
Maximum Distortion	System Voltage		
	Below 69 kV	69 - 138 kV	> 138 kV
Individual Harmonics (%)	3	1.5	1
Total Harmonics (%)	5	2.5	1.5

2.14 Pengaruh Harmonisa^[6]

Pada sistem distribusi listrik aliran harmonisa menurunkan kualitas daya listrik sehingga akan menimbulkan beberapa masalah. Secara garis besar pengaruh harmonisa terdapat sistem tergantung dari sumber harmonisa, letak sumber harmonisa, dan karakter jaringan.

Umumnya harmonisa pada arus membawa dampak lebih jika dibandingkan dengan harmonisa pada tegangan. Pada sistem distribusi listrik, dampak utama yang ditimbulkan dari pengaruh harmonisa pada arus adalah mengakibatkan bertambahnya harga nilai rms fundamental.

Beberapa dampak lain yang dapat ditimbulkan akibat adanya harmonisa dalam sistem tenaga listrik adalah:

1. Panas berlebihan pada kawat netral sebagai akibat timbulnya harmonisa ketiga yang dibangkitkan oleh peralatan listrik satu fasa. Pada keadaan

- normal, arus beban setiap fasa dari beban linier yang seimbang pada frekuensi dasarnya akan saling mengurangi sehingga arus netralnya menjadi nol. Sebaliknya beban tidak linier satu fasa akan menimbulkan harmonisa kelipatan ganjil yang disebut *triplen harmonic* (harmonik ke-3, ke-9, ke-15 dan seterusnya) yang sering disebut *zero sequence* harmonisa.
2. Harmonisa dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWh meter jenis elektomekanis yang menggunakan piringan induksi berputar. Akibatnya putaran piringan akan lebih cepat atau terjadi kesalahan ukur kWh meter, karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.
 3. Interferensi frekuensi pada sistem telekomunikasi, karena biasanya kabel untuk keperluan telekomunikasi ditempatkan berdekatan dengan kawat netral. Harmonisa ketiga pada kawat netral dapat memberikan induksi harmonisa yang mengganggu sistem telekomunikasi.
 4. Pemutusan beban dapat bekerja tidak normal. Pemutusan beban yang dapat terhindar dari gangguan harmonisa pada umumnya adalah pemutus beban yang mempunyai respon terhadap arus rms sebenarnya (*true-rms current*).

2.15 Akibat yang Ditimbulkan Harmonik^[6]

Efek harmonisa yang timbul pada sistem tenaga listrik tergantung pada sumber harmonisa, letak sumber harmonisa, dan karakteristik jaringan listrik. Pengaruh harmonisa pada peralatan-peralatan sistem tenaga secara umum adalah dapat menyebabkan peralatan menjadi panas, isolasi menjadi panas, life-time peralatan menjadi berkurang dan yang terburuk kondisi peralatan yang ada mengalami kerusakan. Secara teoritis dampak yang terjadi akibat adanya distorsi harmonisa tersebut antara lain:

1. Putusnya pengaman (fuse) pada kapasitor bank atau isolasi kapasitor menjadi lebih panas, sehingga bila terlalu melampaui batas dapat mengalami kerusakan pada kapasitor itu sendiri.

2. Timbulnya getaran mekanis pada panel listrik yang merupakan getaran resonansi mekanis akibat harmonik arus frekuensi tinggi. Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada kWh meter jenis elektromekanis yang menggunakan piringan induksi berputar. Sebagai akibatnya terjadi kesalahan penunjukan kWh meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya untuk beroperasi pada frekuensi dasar.
3. Interferensi frekuensi pada sistem telekomunikasi karena biasanya kabel untuk keperluan telekomunikasi ditempatkan berdekatan dengan kawat netral. Triplen harmonik pada kawat netral dapat memberikan induksi harmonik yang mengganggu sistem telekomunikasi.
4. Saluran transmisi: Aliran dari harmonisa arus pada konduktor akan menyebabkan bertambahnya rugi-rugi saluran sebagai akibat adanya pemanasan tambahan. Pemanasan tambahan ini disebabkan adanya arus harmonisa yang mengalir di saluran transmisi.

2.16 Istilah-Istilah Harmonik

Berikut ini adalah beberapa pengertian dan persamaan yang terdapat dalam analisis harmonik.

1. Komponen Harmonik

Komponen harmonik atau biasa disebut harmonik adalah gelombang sinusoidal yang mempunyai frekuensi perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya.

2. Orde Harmonik

Orde harmonik adalah perbandingan frekuensi harmonik dengan frekuensi dasarnya.

3. Indeks Harmonik

Secara umum, ada dua indeks penting yang digunakan untuk mengukur besarnya distorsi harmonik pada sistem tenaga listrik yaitu Total Harmonic Distortion Arus (THDi) dan Total Harmonic Distortion Tegangan

(THDv).Kedua indeks tersebut merupakan nilai efektif arus dan tegangan harmonik.