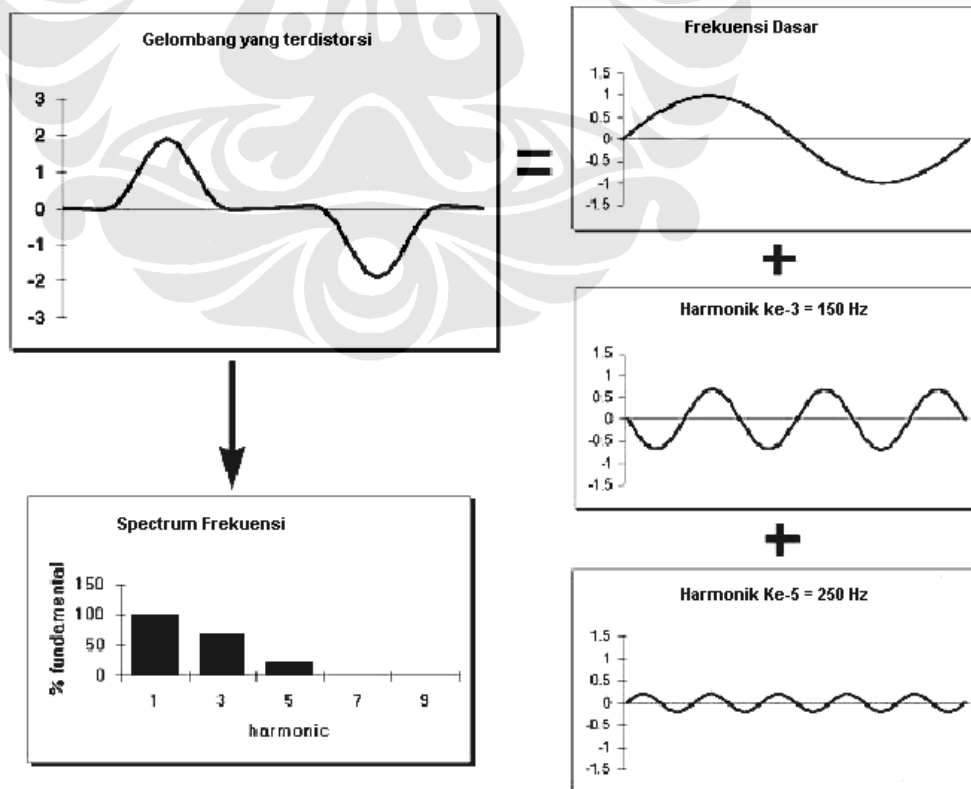


BAB 2 DASAR TEORI

2.1. Distorsi Harmonik

Pada dasarnya, gelombang tegangan dan arus yang ditransmisikan dan didistribusikan dari sumber ke beban berupa 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 2.1. Bentuk Gelombang Hasil Distorsi Harmonik [2]

Penjumlahan gelombang-gelombang sinusoidal tersebut menjadi gelombang non-sinusoidal dapat dianalisis menggunakan konsep deret fourier, dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n 2 \pi f t - \varphi_n) \quad (2.1)$$

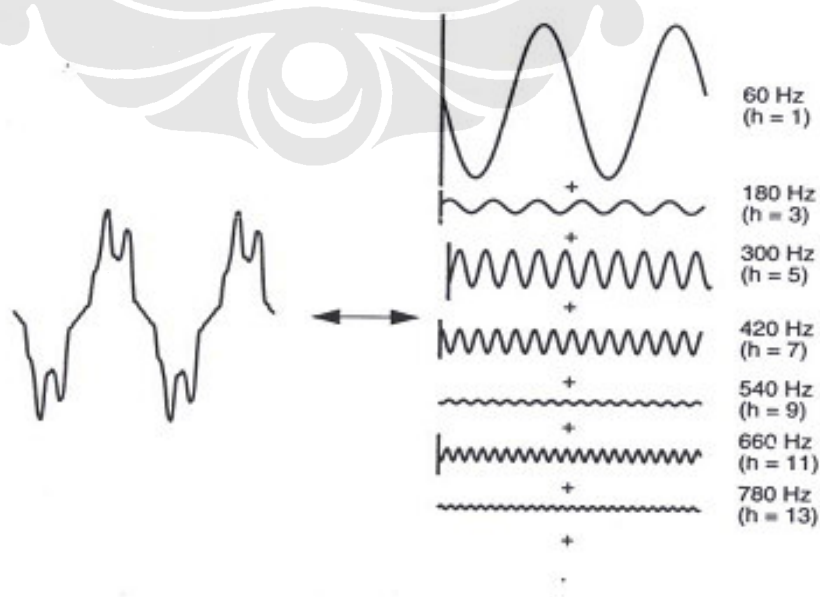
Keterangan: Y_0 = amplitudo dari komponen DC dimana biasanya dalam jaringan distribusi bernilai nol

Y_n = nilai rms dari harmonik komponen ke- n

f = frekuensi dasar (50 Hz)

φ_n = sudut fasa dari komponen harmonik ke- n

Persamaan Fourier di atas dapat digunakan untuk memecah gelombang yang telah terdistorsi menjadi gelombang dasar dan gelombang harmonik. Hal ini menjadi dasar dalam menganalisis harmonik pada sistem tenaga listrik. Bentuk tegangan dan arus yang terdistorsi dapat diperoleh dengan menjumlahkan secara aljabar gelombang dasar (yang dibangkitkan oleh pembangkit) dengan gelombang-gelombang harmonik yang mempunyai frekuensi, amplitudo, dan sudut fasa yang bervariasi. Analisis Fourier telah digunakan untuk menganalisis amplitudo dan frekuensi dari gelombang yang terdistorsi. Representasi deret fourier dari suatu gelombang yang terdistorsi dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.2. Representasi Deret Fourier dari Gelombang yang Terdistorsi [1]

2.2. Istilah-Istilah Harmonik

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

2.2.1. Komponen Harmonik

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

2.2.2. Orde Harmonik

Orde harmonik adalah perbandingan frekuensi harmonik dengan frekuensi dasar, dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$n = \frac{f_n}{F} \quad (2.2)$$

keterangan : n = orde harmonik

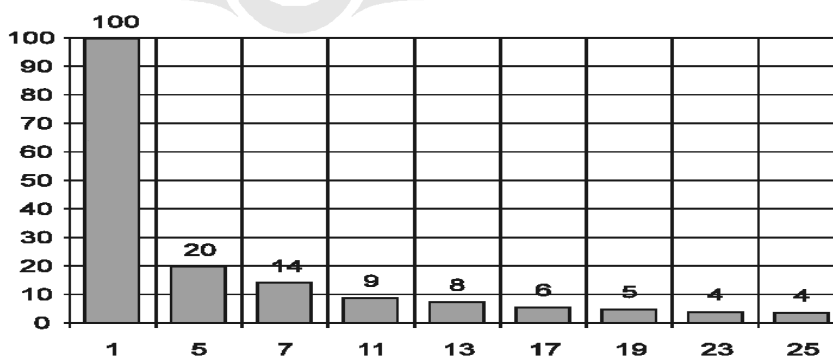
f_n = frekuensi harmonik ke-n

F = frekuensi dasar

Gelombang dengan frekuensi dasar tidak dianggap sebagai harmonik, yang dianggap sebagai harmonik adalah orde ke-2 sampai ke-n

2.2.3. Spektrum

Spektrum adalah distribusi dari semua amplitudo komponen harmonik sebagai fungsi dari orde harmoniknya, dan diilustrasikan menggunakan histogram.



Gambar 2.3. Bentuk spektrum harmonik [2]

Dari gambar tersebut dapat dikatakan bahwa spektrum merupakan perbandingan arus atau tegangan frekuensi harmonik terhadap arus atau tegangan

frekuensi dasar. Spektrum digunakan sebagai dasar merencanakan filter yang akan digunakan untuk mereduksi harmonik.

2.2.4. Total Harmonic Distortion (THD)

THD menyatakan besarnya distorsi yang ditimbulkan oleh semua komponen harmonik, dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_n^2}}{M_1} \quad (2.3)$$

keterangan: THD = Total Harmonic Distortion

M_n = nilai rms arus atau tegangan harmonik ke-n

M_1 = nilai rms arus atau tegangan pada frekuensi dasar.

THD dapat dinyatakan sebagai suatu nilai potensi pemanasan akibat harmonik relatif terhadap gelombang frekuensi dasar.

2.2.5. Total Demand Distortion (TDD)

Tingkat distorsi arus dapat dilihat dari nilai THD, namun hal tersebut dapat saja salah saat diinterpretasikan. Aliran arus yang kecil dapat memiliki nilai THD yang tinggi namun tidak menjadi ancaman yang dapat merusak sistem. Beberapa analisis mencoba untuk menghindari kesulitan seperti ini dengan melihat THD pada arus beban puncak frekuensi dasar dan bukan melihat sampel sesaat pada frekuensi dasar. Hal ini disebut total demand distortion atau distorsi permintaan total (TDD) dan masuk dalam Standar IEEE 519-1992, tentang "*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*". TDD dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$TDD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{h_{\max}} I_n^2}{I_L}} \quad (2.4)$$

keterangan: I_n = arus harmonik orde ke-n

I_L = arus beban puncak pada frekuensi dasar yang diukur pada PCC (*Point of Common Coupling*)

Terdapat dua cara untuk mengukur I_L , pertama yaitu pada beban yang telah terpasang pada sistem lalu dihitung nilai rata-rata dari arus beban maksimum dari 12 bulan pengukuran. Sedangkan untuk sistem yang baru, I_L harus diperkirakan berdasarkan profil beban yang akan dipasang.

2.2.6. Nilai rms

Nilai rms yang dihasilkan oleh gelombang arus/tegangan yang terdistorsi harmonik dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (2.5)$$

keterangan: M_h = nilai rms dari arus atau tegangan ke-h

2.3. Kuantitas Listrik Pada Kondisi Non-Sinusoidal

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, bahwa distorsi harmonik dapat menghasilkan gelombang non-sinusoidal hasil superposisi gelombang pada frekuensi dasar dengan gelombang harmoniknya. Oleh karena itu, kuantitas listrik seperti arus dan tegangan pada kondisi non-sinusoidal juga harus diperhitungkan komponen harmoniknya. Untuk nilai rms arus dan tegangan saat kondisi non-sinusoidal dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2} = \sqrt{Y_1^2 + Y_h^2} \quad (2.6)$$

keterangan: Y_{rms} = tegangan atau arus pada kondisi non sinusoidal

T = periode $v(t)$ dan $i(t)$ (detik)

Y_1 = tegangan atau arus rms pada frekuensi dasar

Pada dasarnya, daya listrik yang dikirimkan dari sumber ke beban adalah daya kompleks. Dalam daya kompleks itu terdapat komponen daya aktif (daya nyata) yaitu daya yang diserap oleh beban untuk melakukan kerja yang sesungguhnya dan daya reaktif yaitu daya yang tidak terlihat sebagai kerja nyata dan biasanya dipengaruhi oleh komponen reaktif seperti induktor.

Daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya kompleks (S) pada kondisi non-sinusoidal dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \text{ Watt} \quad (2.7)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \text{ VAR} \quad (2.8)$$

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (2.9)$$

keterangan: P = daya aktif pada kondisi non-sinusoidal (Watt)

Q = daya reaktif pada kondisi non-sinusoidal (VAR)

S = daya kompleks pada kondisi non-sinusoidal (VA)

P1= daya aktif pada frekuensi dasar (Watt)

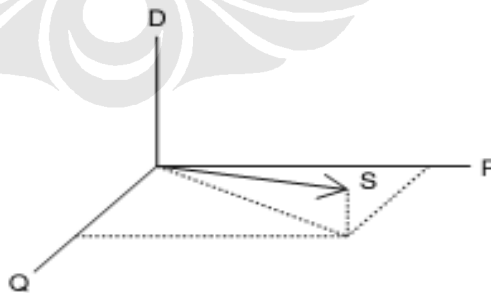
Q1= daya reaktif pada frekuensi dasar (VAR)

D = distorsi daya akibat harmonik (VA)

Untuk faktor daya pada kondisi non-sinusoidal dapat didefinisikan dengan persamaan berikut [1]:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.10)$$

Untuk menunjukkan hubungan antara daya-daya pada kondisi non-sinusoidal tersebut, dapat digunakan diagram vektor tiga dimensi seperti berikut:

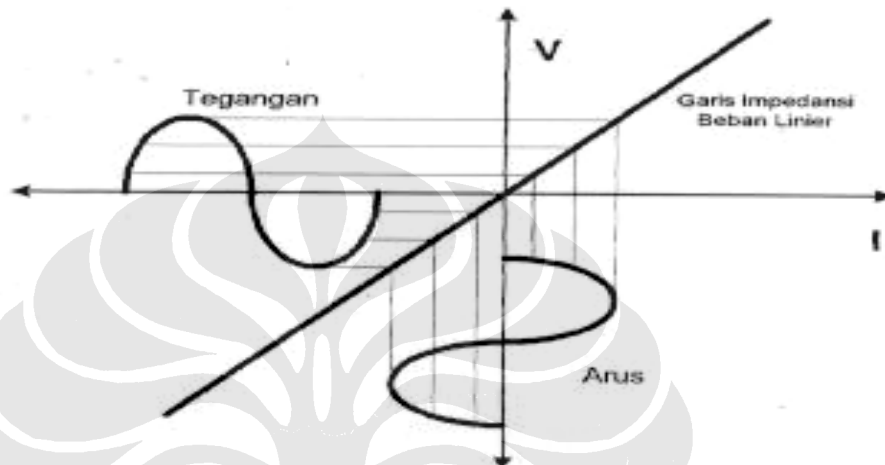


Gambar 2.4. Hubungan Komponen Daya pada Kondisi Non-sinusoidal [1]

P dan Q mewakili komponen S yang biasa terdapat pada kondisi sinusoidal murni, sedangkan D menunjukkan kontribusi tambahan terhadap daya kompleks akibat harmonik.

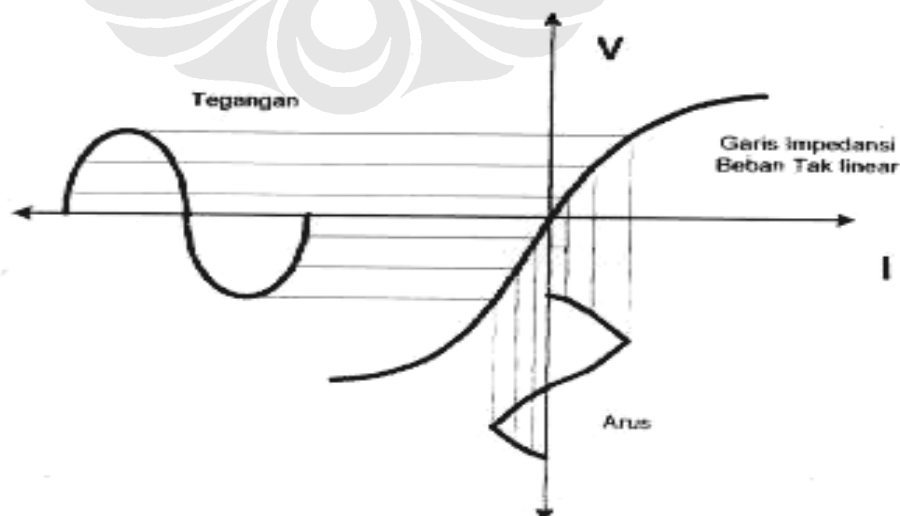
2.4. Penyebab Timbulnya Harmonik

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. Hal ini dapat dijelaskan pada gambar berikut:



Gambar 2.5. Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Linier [2]

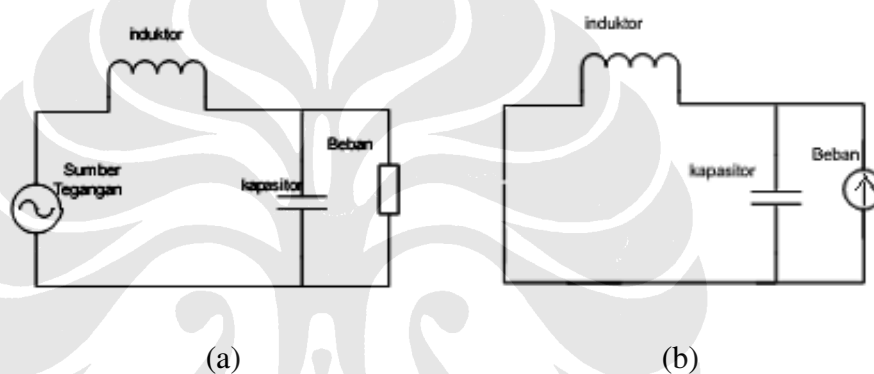
Sedangkan beban non-linier memberikan bentuk gelombang keluaran arus yang tidak sebanding dengan tegangan dasar sehingga gelombang arus maupun tegangannya tidak sama dengan gelombang masukannya. Hal ini dapat dijelaskan pada gambar berikut:



Gambar 2.6. Karakteristik Gelombang Arus pada Beban Non linier [2]

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.

Beban non linier dapat dimodelkan sebagai sumber arus harmonik seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.7. Permodelan beban non-linier sebagai sumber harmonik [2]

(a). Model gelombang dasar

(b). Model gelombang harmonik

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 magnetik 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 non-linier terdapat pada peralatan seperti lampu hemat energi, televisi, video player, ac, komputer, dan kulkas/dispenser.

2.5. Akibat Yang Ditimbulkan Harmonik.

Tegangan dan arus harmonik dapat menimbulkan efek yang berbeda-beda pada peralatan listrik yang terhubung dengan jaringan listrik tergantung karakteristik listrik beban itu sendiri. Akan tetapi, secara umum pengaruh harmonik pada peralatan tenaga listrik ada tiga, yaitu :

1. Nilai rms baik tegangan dan arus lebih besar
2. Nilai puncak (*peak value*) tegangan dan arus lebih besar
3. Frekuensi sistem turun.

Masing-masing elemen membangkitkan distorsi yang spesifik. Nilai rms lebih besar dapat menyebabkan pemanasan yang lebih tinggi pada konduktor. Nilai puncak lebih besar dapat mengganggu kerja alat ukur sehingga terjadi kesalahan pembacaan. Sedangkan frekuensi mempengaruhi impedansi kabel dimana semakin tinggi frekuensi (biasanya pada frekuensi diatas 400 Hz) berarti semakin sering kabel menerima tegangan puncak sehingga semakin besar tegangan jatuh yang terjadi. Fenomena resonansi dapat terjadi pada frekuensi tertentu dan dapat menyebabkan arus meningkat.

2.5.1. Efek Khusus Harmonik Pada Sistem Tenaga Listrik

Secara khusus, efek yang ditimbulkan oleh harmonik pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi:

2.5.1.1. Efek Negatif Jangka Pendek

1. Tegangan harmonik dapat mengganggu kontrol yang digunakan pada sistem elektronik. Sebagai contoh, harmonik mengganggu *controller* yang digunakan pada elektronika daya. Yang terganggu adalah pada saat kondisi putus hubungan dari tiristor.
2. Harmonik dapat menyebabkan kesalahan pada peralatan pengukuran listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik. Sebagai contoh, kesalahan dari alat ukur kelas 2 akan meningkat 0.3% sebagai akibat dari harmonik ke-5 dengan ratio tegangan dan arus 5 %. Sebuah alat ukur didesain dan disesuaikan untuk beroperasi pada rangkaian yang mempunyai frekuensi dan tegangan standar dengan sedikit atau tidak ada distorsi bentuk gelombang.

Pengaruh harmonik terhadap akurasi alat ukur adalah:

- Alat ukur menjadi sensitif terhadap frekuensi.
 - Medan magnet dari koil tegangan dalam sebuah alat ukur non-linier dan mengandung beberapa komponen harmonik yang seharusnya dari kompensasi alat. Diyakini bahwa torsi tambahan akan terbentuk, meskipun tidak ada tegangan dan arus harmonik pada jaringan distribusi.
 - Alat ukur tidak mengukur komponen energi DC yang seharusnya.
3. Harmonik juga dapat mengganggu alat-alat pengaman dalam sistem tenaga listrik seperti relay. Karena sifat relay yang sensitif terhadap perubahan arus dan frekuensi maka relay bisa salah beroperasi karena terjadi perubahan frekuensi ataupun arus walaupun tidak ada gangguan. Selain itu, harmonik dapat menyebabkan perubahan impedansi, arus dan tegangan dari sistem. Sedangkan relay jarak bekerja berdasarkan prinsip impedansi dan arus.
 4. Pada mesin-mesin berputar seperti generator dan motor, torsi mekanik yang diakibatkan oleh arus harmonik dapat menyebabkan getaran dan suara pada mesin-mesin tersebut. Torsi sesaat dihasilkan oleh interaksi antara fluks celah udara (sebagian besar komponen dasar) dan fluks yang dihasilkan oleh arus harmonik didalam rotor. Torsi ini dapat mempengaruhi bentuk kurva torsi-kecepatan pada motor.
 5. Bila ada sistem komunikasi yang dekat dengan sistem tenaga listrik maka sistem tersebut dapat terganggu oleh harmonik. Biasanya sistem kontrol dari sistem telekomunikasi yang terganggu oleh harmonik.

2.5.1.2. Efek Yang Bersifat Kontinu

Efek yang bersifat kontinu ini dapat menyebabkan pemanasan pada peralatan listrik.

1. Pemanasan kapasitor

Kapasitor sangat sensitif terhadap perubahan beban. Jika terjadi harmonik maka rugi-rugi meningkat. Ketika harmonik terjadi, beban akan semakin reaktif sehingga kapasitor harus mencatu lebih banyak daya reaktif kepada sistem. Dan satu lagi yang harus diperhatikan adalah terjadinya resonansi. Saat terjadi resonansi, impedansi sistem hanya dilihat resistif yang sangat kecil.

Sehingga arus yang masuk akan sangat besar dan dapat mengakibatkan kerusakan.

2. Pemanasan pada mesin-mesin listrik

Tegangan non-sinusoidal yang diterapkan pada mesin listrik dapat menimbulkan masalah-masalah sebagai berikut :

- Meningkatkan rugi inti dan rugi belitan
- Pemanasan lebih

Tegangan atau arus harmonik meningkatkan rugi daya pada gulungan stator, rangkaian rotor, dan laminasi stator dan rotor. Rugi pada penghantar stator dan rotor lebih besar daripada resistansi DC-nya, karena adanya efek arus eddy dan efek kulit. Rugi daya tambahan merupakan efek harmonik yang paling serius dalam mesin arus bolak-balik. Rugi-rugi ini tergantung pada spektrum frekuensi dari tegangan yang diterapkan.

Arus harmonik menimbulkan panas lebih. Bila mesin dioperasikan terus-menerus pada kondisi ini, maka umur mesin akan berkurang dan lebih jauh dapat mengakibatkan kerusakan.

3. Pemanasan pada Transformator

Transformator sangat rentan terhadap pengaruh harmonik. Transformator dirancang sesuai dengan frekuensi kerjanya. Frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi dan pada akhirnya mengakibatkan kerugian daya.

Pengaruh utama harmonik pada transformator adalah :

- Panas lebih yang dibangkitkan oleh arus beban yang mengandung harmonik.
- Kemungkinan resonansi paralel transformator dengan kapasitansi sistem.

Transformator distribusi yang mencatu daya ke beban non linier menimbulkan arus harmonik kelipatan tiga ganjil. Harmonik ini dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa. Akibatnya terjadi peningkatan temperatur pada kawat netral. Sebagai dampak lanjutnya, akan terjadi sirkulasi arus urutan nol pada belitan delta transformator sehingga temperaturnya akan meningkat. Peningkatan temperatur ini akan menurunkan efisiensi transformator dan lebih jauh lagi dapat mengakibatkan kerusakan.

Rugi-rugi yang terjadi pada transformator adalah rugi-rugi inti dan rugi-rugi belitan. Rugi-rugi inti karena fluks yang dibangkitkan didalam inti bila transformator dieksitasi. Rugi-rugi belitan yang terdiri dari $I^2 R$ dan *stray losses* dibangkitkan oleh arus yang mengalir melalui transformator.

4. Pemanasan pada kabel dan peralatan lainnya.

Rugi-rugi kabel yang dilewati oleh arus harmonik akan semakin besar. Hal ini disebabkan meningkatnya resistansi dari tembaga akibat meningkatnya frekuensi (efek kulit). Akibatnya akan terjadi pemanasan pada kawat penghantar.

Ada dua mekanisme dimana arus harmonik dapat menyebabkan pemanasan dalam penghantar yang lebih besar dari nilai arus rms yang diharapkan. Mekanisme pertama disebabkan distribusi arus dalam penghantar, termasuk efek kulit (*Skin Effect*) dan efek kedekatan (*Proximity Effect*). Skin effect disebabkan distribusi arus dipermukaan lebih besar daripada didalam penghantar, sehingga resistansi efektif meningkat. Skin efek meningkat dengan kenaikan frekuensi dan diameter penghantar. Sedangkan *Proximity effect* disebabkan medan magnet penghantar mengganggu distribusi arus pada penghantar-penghantar yang berdekatan.

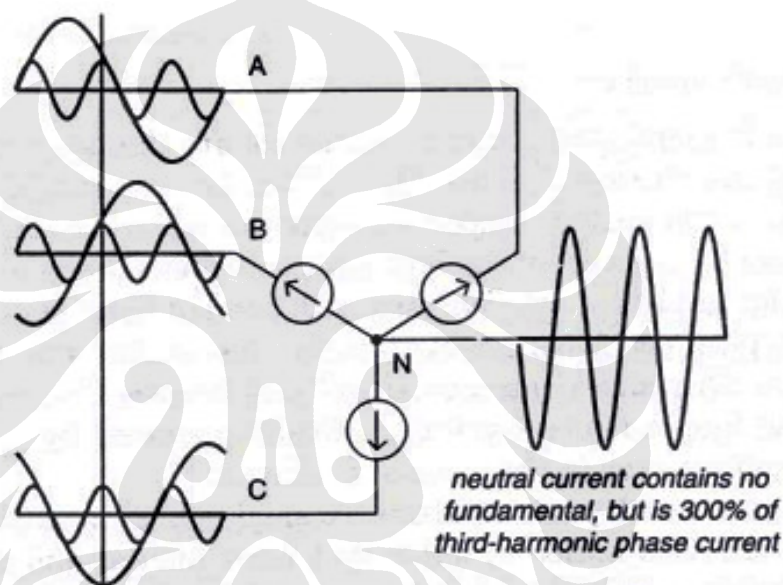
Mekanisme kedua disebabkan arus yang tinggi pada penghantar netral pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat yang menyuplai beban-beban satu fasa. Beberapa beban seperti *power suplai switch mode* menghasilkan arus harmonik ketiga yang cukup berarti. Untuk beban konverter, arus harmonik ketiga dalam rangkaian tiga fasa menghasilkan arus netral yang lebih besar dari arus fasanya. Karena penghantar netral biasanya sama ukurannya dengan penghantar fasa, maka penghantar netral menjadi berbeban lebih dan akhirnya terjadi panas lebih. Cara yang paling umum untuk mengatasi hal ini adalah dengan memperbesar ukuran penghantar netral dua kali atau lebih besar dari penghantar fasanya.

2.5.2. Triplen Harmonik

Triplen harmonik merupakan kelipatan ganjil dari harmonik ketiga ($h = 3, 9, 15, 21, \dots$). Triplen harmonik harus mendapat perhatian khusus, karena respon

sistem yang terjadi saat triplen harmonik umumnya berbeda dengan respon dari orde harmonik yang lain. Triplen harmonik menjadi persoalan yang penting bagi sistem jaringan bintang yang ditanahkan (grounded wye systems) dengan arus yang mengalir pada netral sistem tersebut. Arus pada netral menjadi *overload*, karena arus antar fasanya tidak saling menghilangkan melainkan saling menjumlahkan. Terkadang, peralatan dapat salah beroperasi karena tegangan fasa yang terdistorsi cukup parah oleh triplen harmonik pada konduktor netral.

Untuk lebih memahami triplen harmonik, berikut adalah gambar arus yang mengalir pada netral sistem akibat triplen harmonik:



Gambar 2.8. Arus Netral pada Sistem Wye-Grounded Akibat Triplen Harmonik [1]

Sistem pada gambar ini merupakan sistem yang seimbang, diasumsikan komponen harmonik ketiga hadir dalam sistem. Komponen arus fundamental dari setiap fasa yang mengalir pada konduktor netral sistem akan saling menghilangkan, namun ternyata pada sistem ditemukan bahwa arus pada konduktor netral tidak nol, melainkan ada komponen arus triplen harmonik dari ketiga fasa yang saling menjumlahkan. Sehingga arus triplen harmonik yang mengalir pada konduktor netral adalah tiga kali dari arus triplen pada setiap fasanya. Hal ini disebabkan karena fasa dan waktu dari arus triplen yang sama dari setiap fasanya.

2.5.3 Urutan Fasa Harmonik

Komponen-komponen simetris dapat digunakan untuk memberikan gambaran perilaku sistem tiga fasa. Sistem tiga fasa di transformasikan menjadi tiga sistem satu fasa yang lebih sederhana untuk dapat dianalisis. Metode komponen simetris dapat juga digunakan untuk analisis respon sistem terhadap arus harmonik. Berikut adalah tabel urutan fasa harmonik:

Tabel 2.1. Urutan Fasa Harmonik [3]

Orde Harmonik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...
Urutan Fasa Harmonik	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	...

2.6. Dasar Pengontrolan Harmonik

Ketika sebuah sistem tenaga listrik mengalami permasalahan distorsi harmonik, ada beberapa cara dasar untuk mengatasinya, yaitu dengan:

1. Mengurangi arus harmonik yang dihasilkan oleh beban.
2. Menambah filter untuk mengalihkan arus harmonik dari sistem, memblokir arus yang memasuki sistem, atau melokalisasi arus harmonik.
3. Merubah respon frekuensi dengan menggunakan filter, induktor, dan kapasitor.

2.6.1. Mengurangi Arus Harmonik Pada Beban

Sedikit sekali yang dapat dilakukan terhadap peralatan beban yang ada untuk mengurangi kuantitas harmonik yang dihasilkan. Suatu transformator yang overeksitasi dapat dikembalikan kepada kondisi normal dengan menurunkan tegangan yang diberikan kepadanya, sedangkan peralatan arcing dan kebanyakan konverter elektronika daya sudah fix kondisinya sesuai dengan karakteristik rancangannya. Berbeda dengan PWM drives yang men-charge dc bus kapasitor langsung dari line tanpa ada impedansi tambahan, menambahkan suatu reaktor pada line secara seri dapat secara signifikan mengurangi harmonik.

Hubungan transformator dapat digunakan untuk mengurangi harmonik pada sistem tiga fasa. Hubungan delta pada transformator dapat memblokir aliran arus urutan nol harmonik (khususnya triplen harmonik) dari line.

2.6.2. Memfilter Harmonik

Filter Shunt bekerja dengan menshort-circuitkan arus harmonik sedekat mungkin kepada sumber distorsi secara praktis. Hal ini menjaga arus agar tetap jauh dari sistem. Ini merupakan tipe filter yang banyak diaplikasikan karena pertimbangan ekonomis dan juga karena filter cenderung memperhalus tegangan pada sisi beban sebaik cara memindahkan/meredam arus harmonik.

Pendekatan lain adalah dengan memakai filter seri yang dapat memblok arus harmonik. Cara semacam ini merupakan rangkaian parallel-tuned yang memberikan impedansi yang besar kepada arus harmonik. Filter semacam ini jarang digunakan karena sulit untuk mengisolasinya dari jalur listrik dan tegangan pada sisi beban dapat sangat terdistorsi. Aplikasi yang umum adalah pada sisi netral kapasitor terhubung bintang yang ditanahkan yang dapat memblok aliran dari arus triplen harmonik.

2.6.3. Memodifikasi Respon Frekuensi Sistem

Respon sistem yang merugikan terhadap harmonik dapat dimodifikasi dengan beberapa metoda :

- Menambah filter shunt. Filter ini tidak hanya meredam arus harmonik, tetapi juga seringkali merubah respon sistem.
- Menambah reaktor untuk memperbaiki sistem. Resonansi yang merugikan biasanya terjadi antara induktansi sistem dengan kapasitor yang digunakan sebagai perbaikan faktor daya sistem. Reaktor harus diletakkan diantara kapasitor dan sistem. Metoda untuk meletakkan reaktor secara seri dengan kapasitor dapat menghindari terjadinya resonansi sistem tanpa menyatel kapasitor untuk membuat filter.
- Mengubah ukuran dari kapasitor. Hal ini merupakan pilihan terakhir yang mahal bagi kedua sisi, penyedia listrik dan pelanggan industri.
- Memindahkan kapasitor pada titik dengan impedansi hubung singkat yang berbeda atau pada titik dengan losses terbesar. Bagi penyedia listrik hal ini dapat menimbulkan masalah yakni menimbulkan interferensi telepon walaupun hal ini dapat mengatasi masalah respon sistem.

2.7 Filter Harmonik

Didalam merancang suatu filter, perlu dilakukan studi untuk menentukan kompensasi daya reaktif yang diperlukan oleh sistem. Filter harus didesain untuk menyediakan daya reaktif dalam jumlah yang tepat. Jika tidak diperlukan daya reaktif, filter harus didesain minimum, artinya filter harus cukup menekan harmonik pada biaya yang paling rendah dan mensuplai beberapa daya reaktif, tapi tidak semua yang diperlukan.

Besarnya daya reaktif yang disuplai oleh kapasitor ditentukan oleh [2]:

$$Q_{VAR} = \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF_0}\right]^2 - P_1^2} - \sqrt{\left[\frac{P_1}{PF}\right]^2 - P_1^2} \quad (2.11)$$

keterangan: P_1 = daya aktif sistem
 PF_0 = faktor daya sebelum ada kompensasi daya reaktif
 PF = faktor daya setelah ada kompensasi daya reaktif

Prosedur umum dalam menganalisis harmonik adalah sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi kondisi harmonik
2. Mendesain skema filter untuk menekan harmonik
3. Menganalisis unjuk kerja filter

Beberapa metode yang digunakan untuk mengatasi masalah harmonik adalah kompensasi fluks magnetik (*Magnetic flux compensation*), injeksi harmonik (*harmonic injection*), shunt filter, injeksi riak DC (*D.C. ripple injection*). Shunt filter memiliki keuntungan dibandingkan dengan metode yang lain, yaitu bahwa shunt filter juga menyediakan daya reaktif pada frekuensi dasar, yang diperlukan oleh sumber harmonik dan beban-beban lain.

2.7.1. Identifikasi Harmonik

Untuk mengantisipasi harmonik, perlu dilakukan langkah-langkah pengidentifikasian masalah dengan peralatan ukur yang memadai. Ada dua cara untuk membentuk transformasi fourier dari gelombang tegangan dan arus pada sistem tenaga listrik. Cara pertama adalah dengan menggunakan penganalisis spektrum (*spectrum analyzer*) dan mengukur harmonik pada kondisi on-line. Namun cara ini tidak memberikan informasi sudut fasa harmonik. Metode lain

adalah dengan mengukur contoh gelombang dan menyimpan gelombang tersebut dalam daerah waktu (*time domain*) sebagai data diskrit dan menghitung komponen harmonik secara digital dengan menggunakan mikroprocessor dalam kondisi off-line.

Selain cara-cara lain di atas, keberadaan harmonik dapat diidentifikasi dengan cara sederhana, yaitu :

1. Identifikasi jenis beban
2. Pemeriksaan arus sekunder transformator
3. Pemeriksaan tegangan netral-tanah

Bila banyak peralatan yang mempunyai komponen utama terbuat dari bahan semikonduktor seperti : komputer, pengatur kecepatan motor, dan peralatan lain yang menggunakan arus searah, maka diperkirakan masalah harmonik ada di instalasi itu.

Pengukuran arus sekunder transformator perlu dilakukan, baik fasa maupun netral. Bila arus netral lebih besar dari arus fasa, maka dapat diperkirakan adanya triplen harmonik dan kemungkinan turunnya efisiensi transformator.

Dengan melakukan pengukuran tegangan netral-tanah pada keadaan berbeban maka terjadinya arus lebih pada kawat netral (untuk system 3 fasa 4 kawat) dapat diketahui. Bila tegangan terukur lebih besar dari dua volt, maka terdapat indikasi adanya masalah harmonik pada beban.

2.7.2. Desain Filter

Ada dua jenis filter, yaitu filter aktif dan filter pasif. Filter pasif banyak digunakan di industri. Namun, filter ini memiliki beberapa kelemahan, terutama filter pasif tergantung pada impedansi sumber sistem tenaga, frekuensi sistem dan toleransi komponen. Lebih jauh, filter ini menarik harmonik dari beban lain dalam sistem.

Pemasangan filter memiliki dua tujuan, yaitu :

1. Untuk mengurangi tegangan harmonik dan injeksi arus harmonik dalam jaringan AC sampai ke level yang dapat diterima,
2. Untuk menyediakan semua atau sebagian daya rektif yang dikonsumsi oleh sumber harmonik atau yang dikonsumsi oleh beban-beban lainnya.

Ada dua jenis filter pasif, yaitu filter seri dan filter shunt. Filter seri harus didesain untuk arus maksimum dari rangkaian utama. Sedangkan filter shunt hanya membawa arus harmonik dan sebagian arus fundamental yang jauh lebih kecil dari arus di rangkaian utama. Karena itu filter shunt lebih murah daripada filter seri untuk efektifitas yang sama. Filter shunt memiliki keuntungan lain daripada filter seri, yaitu filter shunt dapat mensuplai daya reaktif pada frekuensi dasar. Dalam banyak aplikasi, biasanya dipakai filter shunt.

Filter shunt yang paling umum digunakan adalah *single tuned filter* dan *damped filter orde kedua*. Kedua jenis filter ini adalah paling sederhana dalam desainnya dan paling murah untuk diimplementasikan.

2.7.3. Kriteria Desain Filter

Ukuran Filter didefinisikan sebagai daya reaktif yang disuplai oleh filter pada frekuensi dasar. Pada pokoknya sama dengan daya reaktif pada frekuensi dasar yang disuplai oleh kapasitor. Ukuran total dari semua cabang filter ditentukan oleh daya reaktif yang dibutuhkan oleh sumber harmonik dan oleh berapa banyak kebutuhan ini dapat disuplai dari jaringan AC.

Kriteria desain filter yang ideal adalah dapat mengeliminasi semua pengaruh buruk yang disebabkan oleh distorsi gelombang, termasuk interferensi telepon yang merupakan efek yang sulit dieliminasi secara lengkap. Namun, kriteria ideal tersebut tidak realistis, baik dari alasan teknis maupun ekonomis. Kriteria desain yang lebih praktis mengusulkan pengurangan masalah ke suatu level yang dapat diterima pada titik hubung bersama dengan konsumen lain, masalah tersebut dinyatakan dalam bentuk tegangan harmonik, arus harmonik atau keduanya. Kriteria yang didasarkan pada tegangan harmonik lebih tepat untuk desain filter, karena lebih mudah menjamin berada dalam batas tegangan yang layak daripada membatasi tingkat arus karena adanya perubahan impedansi jaringan AC.

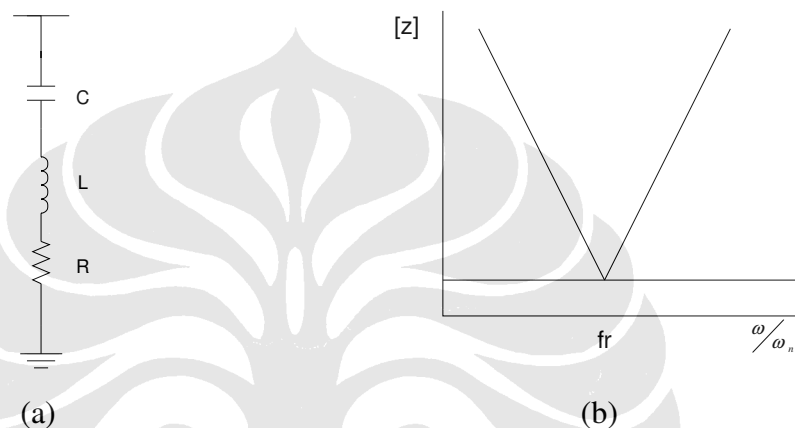
Faktor-faktor yang perlu diperhatikan ketika mendesain filter untuk mengatasi masalah-masalah harmonik adalah :

1. Daya reaktif yang diperlukan untuk perbaikan faktor daya

2. Puncak resonansi paralel yang dihasilkan dari interaksi antara filter dan impedansi sumber
3. Rating dan toleransi komponen-komponen filter
4. Rugi-rugi filter

2.7.4. Desain Single Tuned Filter

Rangkaian single tuned filter dan kurva impedansi terhadap frekuensi terlihat pada gambar berikut [2]:



Gambar 2.9. (a). Rangkaian Single Tuned Filter
(b). Kurva Impedansi terhadap Frekuensi

Impedansi single tuned filter diberikan oleh persamaan [2]:

$$Z_f = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.12)$$

Sedangkan magnitudo impedansi single tuned filter adalah [2]:

$$|Z_f| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (2.13)$$

Resonansi terjadi pada saat nilai reaktansi sama dengan kapasitansi. Filter disetel pada frekuensi f_r , yang menghasilkan resonansi seri. Frekuensi ini diberikan oleh persamaan [2]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.14)$$

Pada frekuensi f_r , single tuned filter memiliki impedansi minimum, sebesar nilai resistansi R dari induktor. Oleh karena itu, filter ini menyerap semua arus harmonik yang dekat dengan frekuensi F_r yang diinjeksikan, dengan distorsi tegangan harmonik yang rendah pada frekuensi ini.

Pada prinsipnya, sebuah single tuned filter dipasang untuk setiap harmonik yang akan dihilangkan. Filter-filter ini dihubungkan pada busbar dimana pengurangan tegangan harmonik ditentukan. Bersama-sama, filter-filter ini membentuk filter bank.

Ada dua parameter yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan nilai R , L dan C , yaitu :

1. faktor kualitas (*Quality factor, Q*)
2. Penyimpangan frekuensi relatif (*Relative Frequency Deviation, δ*)

Kualitas dari sebuah filter (Q) adalah ukuran ketajaman penyetelan filter tersebut dalam mengeliminasi harmonik. Filter dengan Q tinggi disetel pada frekuensi rendah (misalnya harmonik kelima), dan nilainya biasanya terletak antara 30 dan 60 . Dalam single tuned filter, faktor kualitas Q didefinisikan sebagai perbandingan antara induktansi atau kapasitansi pada frekuensi resonansi terhadap resistansi. Faktor kualitas ditentukan dengan persamaan berikut [1]:

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (2.15)$$

Filter yang efektif harus memiliki induktor dengan faktor kualitas yang besar, oleh karena itu $R \ll X_0$ pada frekuensi resonansi. Perkiraan nilai Q untuk reaktor inti udara (*air core reactors*) adalah 75 dan lebih besar 75 untuk reaktor inti besi (*iron-core reactors*)[1].

Penyimpangan frekuensi relatif (δ), disebut juga faktor de-tuning, menyatakan perubahan frekuensi dari frekuensi nominal penyetelannya, yang dinyatakan oleh [2]:

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega} \quad (2.16)$$

Faktor δ dipengaruhi oleh :

1. Variasi frekuensi dasar

2. Variasi kapasitansi dan induksi dari filter karena pengaruh suhu dan penuaan
3. Initial off-tuning yang disebabkan oleh toleransi pabrik dan batas ukuran langkah penyetelan

Selain itu, perubahan nilai L dan C juga mempengaruhi frekuensi, sehingga faktor de-tuning juga dinyatakan [2]:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (2.17)$$

Dengan menganggap bahwa nilai δ relatif kecil bila dibandingkan dengan satu, impedansi filter dapat dinyatakan dalam Q dan δ dalam persamaan berikut ini [2]:

$$Z_f \approx R(1 + j2\delta Q) = X_o(Q^{-1} + j2\delta) \quad (2.18)$$

$$|Z_f| = R\sqrt{1 + 4\delta^2 Q^2} \quad (2.19)$$

Nilai Q optimum yang menghasilkan tegangan harmonik terendah, yaitu [2]:

$$Q = \frac{1 + \cos \phi_{sn}}{2\delta \sin \phi_{sn}} \quad (2.20)$$

Untuk nilai tegangan harmonik [2]:

$$|V_n| = I_n \delta \omega_n L \left[\frac{4}{1 + \cos \phi_{sn}} \right] = \frac{2I_n R}{\sin \phi_{sn}} \quad (2.21)$$

2.7.5. Batasan Komponen Filter

1. Kapasitor

Batas beban yang diperbolehkan berdasarkan standard ANSI/IEEE 18-1980 adalah sebagai berikut [2]:

- kVAR = 135 %
- tegangan efektif = 110 %
- jumlah tegangan puncak = 120 %
- arus efektif = 180 %

Walaupun dalam standar batas arus efektif adalah 180 %, namun aplikasinya mungkin lebih rendah karena masing-masing unit kapasitor diproteksi pada 125-165 % dari rating arusnya. Dalam mendesain filter, batas arus dan tegangan efektif dan jumlah tegangan puncak pada kapasitor bank sebaiknya berkisar 100 % dari rating kondisi normal. Hal ini dilakukan agar kapasitor dapat mengkompensasi tegangan lebih sistem dan kondisi tidak seimbang pada kapasitor. Komponen harmonik meningkat secara signifikan untuk kondisi ketidakseimbangan kapasitor bank.

2. Induktor

Induktor yang digunakan untuk aplikasi filter biasanya dari tipe inti udara yang memberikan karakteristik linear berkenaan dengan frekuensi dan arus. Toleransi reaktansi ± 5 % dapat diterima untuk aplikasi sistem tenaga di industri. Parameter-parameter yang dipakai untuk menentukan spesifikasi induktor adalah:

- Arus pada frekuensi dasar
- Spektrum arus harmonik
- Arus hubung singkat
- Rasio X/R
- Tegangan sistem
- BIL (*Basic Insulation Level*)