

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Kajian Pustaka**

Berikut ini adalah beberapa rujukan penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan tugas akhir ini, antara lain :

- 2.1.1.** T. Fakhrol Hadi, Zulkarnaen Pane (2014) melakukan penelitian yang berjudul Analisis Pengurangan Arus Netral Pada Sistem Distribusi Tiga Fasa Empat Kawat Menggunakan *Zero Sequence Blocking Transformer*. Dari penulisan yang Ia lakukan didapat kesimpulan bahwa penggunaan ZSBT (*Zero Sequence Blocking Transformer*) dengan belitan konvensional Trafo 1 (TR 1) pada kondisi beban yang seimbang mengurangi arus rms yang mengalir pada penghantar netral sebesar 93,7%. Dan pada beban variasi, penurunan tertinggi terjadi pada saat persentase beban 100%.
- 2.1.2.** Erwin Gunawan (2012) melakukan penelitian mengenai Analisis Pengaruh Harmonisa Terhadap Kualitas Daya Listrik Di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa dengan adanya pembeban non linier pada beberapa ruangan yang ada di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta menyebabkan timbulnya harmonisa, namun harmonisa tersebut memiliki THDV rata-rata  $< 5\%$ . Nilai THDV tersebut tergolong masih aman karena

kurang dari batas maksimum yang ditetapkan oleh *Institute of Electrical and Electronics Engineer* (IEEE) 192.1992 sebesar 5% untuk tegangan < 69kV atau 20 kV untuk sistem kelistrikan di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

**2.1.3.** Bico Maxtrada (2008) melakukan penelitian mengenai Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Antara Fasa-Fasa Menggunakan Transformator Dengan Fasa-Netral Terhadap Hasil Pengukuran. Dari penelitian ini di simpulkan bahwa distorsi harmonik yang dihasilkan oleh beban nonlinear akan menyebabkan perbedaan antara pengukuran daya yang terukur, pada kwh analog cenderung lebih kecil dibandingkan yang terserap oleh sistem.

**2.1.4.** Adrianto (2007) melakukan penelitian mengenai Analisis Optimalisasi Penempatan Filter Pasif Untuk Mereduksi Rugi-Rugi Daya Akibat Arus Harmonik Pada Industri Baja. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa keuntungan menempatkan filter pada TM (Tegangan Menengah) adalah kemudahan dalam perawatan karena hanya ada satu filter untuk seluruh sistem. Kekurangannya adalah bank kapasitor yang harus disediakan cukup besar karena mengakodimir kebutuhan akan daya reaktif dari seluruh beban sehingga biayanya menjadi lebih mahal.

Adapun penelitian yang penulis lakukan berjudul “Analisis dan Evaluasi Kerja Relay Differensial Main Transformer (87 GT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V PT. Pertamina Geothermal Energy”. Pada Penelitian tersebut penulis membuat simulasi pemasangan *single tuned filter* pada program ETAP 12.6 guna merekomendasikan perbaikan kerja relay differensial.

## **2.2. Landasan Teori**

### **2.2.1. Proteksi Trafo Daya**

Pengembangan sistem tenaga listrik modern sangat terkait dengan perkembangan dan majunya sistem rancangan trafo daya. Dengan teknologi yang semakin maju saat ini sudah tersedia berbagai ukuran trafo mulai dari ukuran yang kecil yang hanya beberapa kVA hingga dengan kapasitas beberapa ratus MVA yang diperlukan sesuai dengan berbagai aplikasinya dalam sistem tenaga listrik.

Sistem proteksi trafo daya pada prinsipnya dilakukan dengan menghindarkan trafo mengalami panas ataupun gaya-gaya elektrodinamis yang berlebihan berlangsung pada waktu yang cukup lama. Ini berarti, bila gangguan terjadi maka trafo tersebut harus diisolasi sesegera mungkin. Secara teknis dan ekonomis Trafo Distribusi yang kecil dapat diamankan dengan baik hanya menggunakan sekring-pengaman lebur atau rele arus lebih. Namun untuk Trafo Daya yang besar, setiap gangguan harus di isolasi dengan sesegera mungkin tanpa keterlembatan waktu. Hal ini mengingat besarnya pengaruh gangguan yang terjadi yang dapat memengaruhi stabilitas, keandalan operasi sistem tenaga listrik dan termasuk faktorekonomis mengingat harga trafo yang sangat mahal bila sampai mengalami kerusakan.

## **2.2.2. Gangguan-gangguan pada Proteksi Trafo Daya**

### **2.2.2.1. Gangguan pada Kumparan dan Terminal Trafo**

Faktor penting dalam merencanakan sistem proteksi suatu trafo adalah besar arus gangguan. Besar arus gangguan tergantung dari beberapa factor yaitu:

1. Impedansi Sumber
2. Reaktansi Bocor Trafo
3. Tegangan Gangguan
4. Jenis Hubungan Kumparan Trafo
5. Hubungan Kumparan.

### **2.2.2.2. Gangguan Eksternal Trafo (*Reliability*)**

Gangguan Eksternal merupakan gangguan yang disebabkan oleh gangguan di luar trafo, diantaranya :

1. Beban Lebih

Beban lebih dapat menaikkan rugi-rugi tembaga dan sekaligus dapat menyebabkan kenaikan temperature. Pembebanan trafo secara berlebihan dapat memperburuk isolasi yang pada akhirnya dapat mendahului kegagalan. Gangguan hubung singkat eksternal yang hanya dibatasi oleh besarnya reaktansi trafo bisa juga menimbulkan panas berlebihan bila tidak ditanggulangi dengan cepat. Cara pembebanan lebih trafo jenis *Oil Immersed* yang bisa dilakukan pada trafo dapat dilihat pada Standar IEC 60354.

## 2. Gangguan yang Dapat Ditahan

Arus hubung singkat relative sangat berperan dalam derajat kenaikan pemanasan suatu trafo penyulang. Di sini rugi-rugi tembaga naik sebanding dengan pangkat dua arus gangguan yang mengalir. Menurut IEC 600076 lama arus hubung singkat yang dapat ditahan oleh trafo tanpa merusak bila arus hanya dibatasi oleh reaktansi sendiri kumparan trafo tanpa merusak bila arus hanya dibatasi oleh reaktansi sendiri kumparan trafo dapat dilihat dari table tersebut.

Tabel 2.1. Level ketahanan gangguan.

| Reaktansi Trafo (%) | Arus Gangguan (Perkalian Arus Rating) | Lama Gangguan yang Diizinkan (Detik) |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 4                   | 25                                    | 2                                    |
| 5                   | 20                                    | 2                                    |
| 6                   | 16.6                                  | 2                                    |
| 7                   | 14.2                                  | 2                                    |

Dapat dicatat bahwa tekanan mekanis maksimum pada kumparan terjadi pada periode siklus pertama arus gangguan. Hal ini sangat perlu diperhatikan pada waktu perencanaan, desain dan rekayasa produksi suatu trafo.

### 3. Gangguan Tegangan Lebih

Ada dua jenis tegangan lebih yang mungkin terjadi pada trafo yaitu tegangan surja peralihan dan tegangan lebih frekuensi daya. Tegangan lebih surja (*surge voltage*) dapat bersumber dari gangguan-gangguan, switching dan karena sambaran petir yang sering menimbulkan gangguan antar gulungan pada kumparan. Tegangan-tegangan lebih ini biasanya dapat dibatasi dengan mem-bypass terminal tegangan tinggi ke tanah seperti dengan menggunakan sela batang yang dibuat seri dengan tahaa nonlinear atau dengan surge diverter.

Tegangan lebih frekuensi daya bisa timbul sebagai akibat gagalnya isolasi atau karena secara proposional karena kenaikan fluks kerja. Pengaruh yang terakhir ini mengakibatkan rugi-rugi inti besi dan yang secara tidak proposional menaikkan arus magnetisasi.

### 4. Frekuensi Turun

Pengaruh frekuensi turun mempunyai pengaruh pada kerapatan (*density*) fluks, sama sebagaimana pengaruh tegangan lebih.

Suatu trafo pada dasarnya dapat dioperasikan pada level tegangan lebih tertentu sesuai dengan kenaikan frekuensi, tetapi frekuensi pada terminal masukan tegangan trafo yang terlalu rendah tidak dapat dibiarkan terjadi secara terus-menerus. Kriteria trafo antara lain adalah perbandingan tegangan terhadap frekuensi dalam per unit,

misalnya bila kondisi  $v/f > 1$  maka pengoperasian trafo harus dihentikan. Biasanya tegangan tertinggi yang dapat ditahan trafo sesuai dengan rancangannya digunakan base unit voltage.

### 2.2.3. Relay Differensial pada Saluran Transmisi

#### 2.2.3.1. Relay Differensial

Relay differensial adalah relay pengaman pada sistem tenaga listrik yang bekerja seketika ada gangguan tanpa koordinasi relay yang lain disekitar sehingga waktu operasi kerja dibuat secepat mungkin. Pengamanan daerah relay differensial dibatasi oleh pasangan trafo arus dimana relay differensial dipasang sehingga relay differensial tidak dapat dijadikan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya. Proteksi relay differensial bekerja dengan prinsip keseimbangan arus.

Prinsip ini berdasarkan hukum *kirchhoff* yaitu membandingkan jumlah arus masuk ke primer ( $I_p$ ) sama dengan jumlah arus yang keluar dari sekunder ( $I_s$ ).

$$I_{differensial} = I_d = |I_p^{\rightarrow}| + |I_s^{\rightarrow}|$$

Di mana:

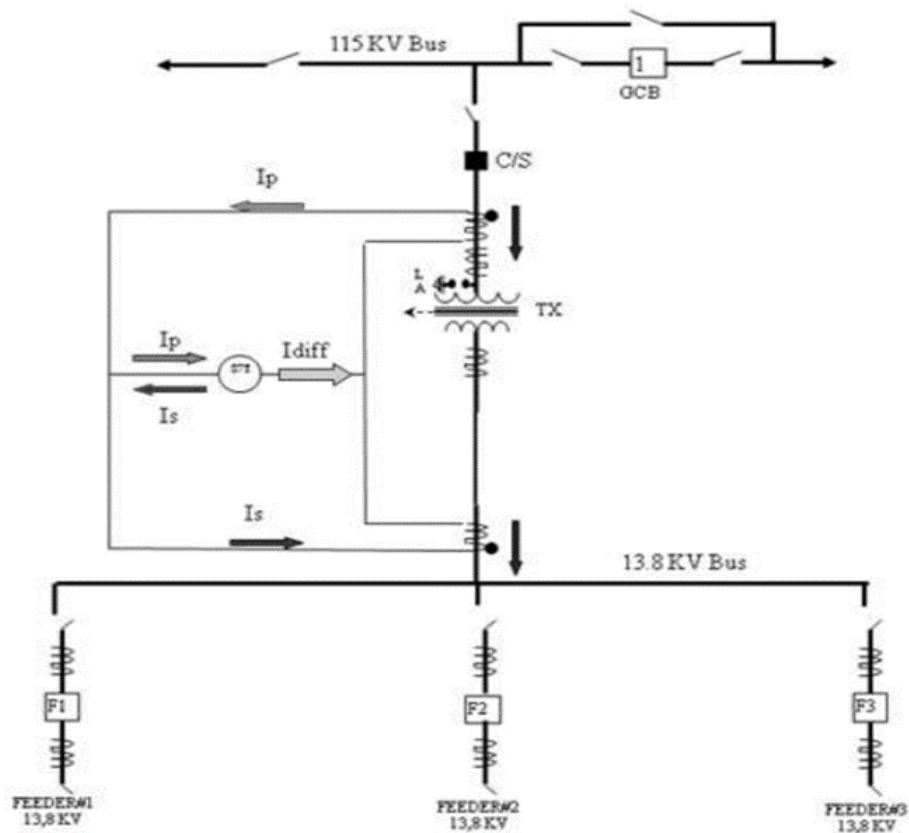
$I_d$  = Arus Diferensial (A)

$I_p$  = Arus Sisi Masuk (A)

$I_s$  = Arus Sisi Keluar (A)

(sumber :Liem Ek Biem dan Dita Helna, 2007)

Gambar 2.1. Menunjukkan relay differensial dalam keadaan arus normal, dimana  $I_p$  dan  $I_s$  sama besar dan berlawanan arah.



(sumber :Liem Ek Biem dan Dita Helna, 2007)

Gambar 2.1. Relay differensial dalam keadaan arus normal.

$$I_d = I_p + I_s = 0 \text{ Ampere}$$

$$I_{dif} = I_p + I_s = 0 \text{ Ampere}$$

Maka tidak ada tegangan yang melintasi coil relay dan tidak ada arus yang mengalir pada relai tersebut, sehingga relay differensial tidak bekerja.

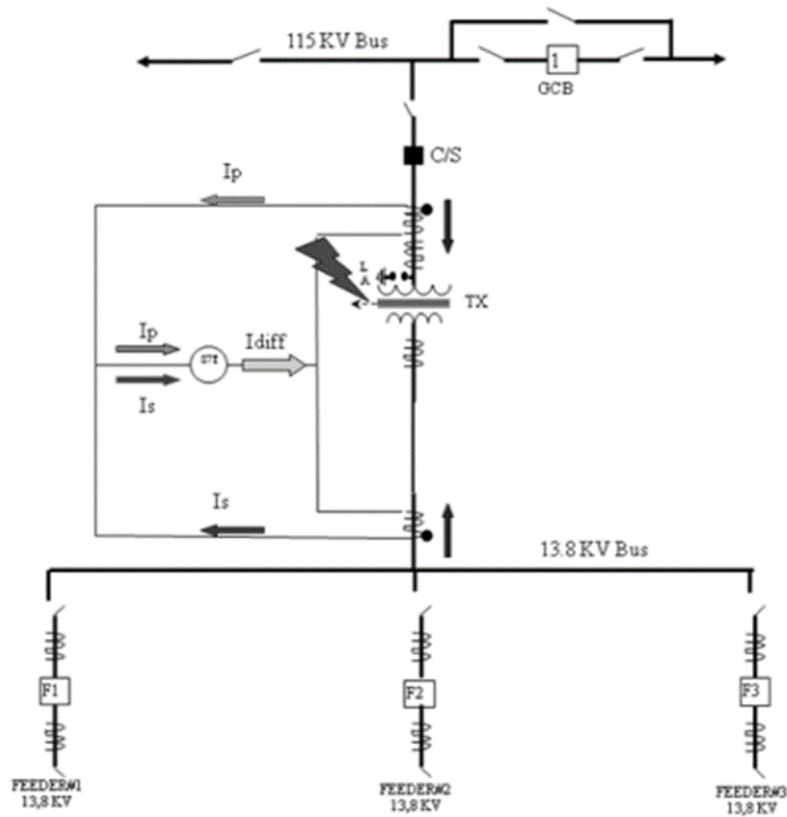


### 2.2.3.2. Gangguan di dalam Daerah yang dilindungi

Untuk gangguan di dalam (internal) daerah proteksi relay difrensial (di antara kedua trafo arus),  $I_p$  dan  $I_s$  searah.

$$I_d = I_p + I_s > 0 \text{ Ampere}$$

$$I_{dif} = I_p + I_s > 0 \text{ Ampere}$$



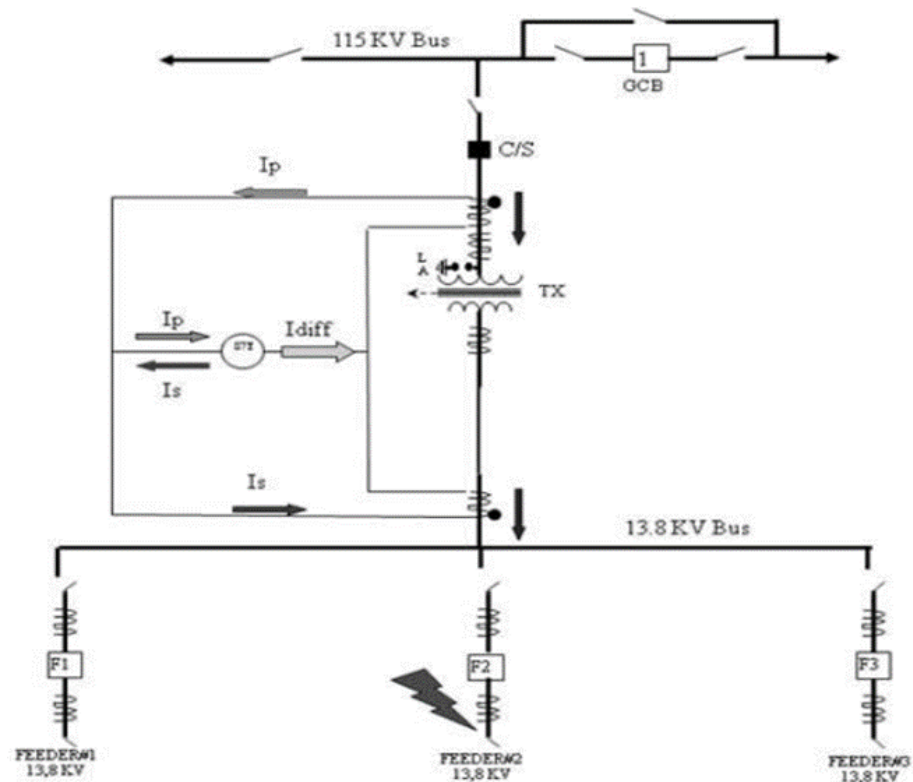
(sumber :Liem Ek Biem dan Dita Helna, 2007)

Gambar 2.2. Relay differensial saat gangguan internal

Pada saat ada arus yang mengalir lewat relay, maka relay akan mengirim sinyal pada *lock out relay*. Sinyal ini akan diteruskan ke C/S dan memerintahkannya untuk *lock out* sehingga aliran energi listrik terputus, maka transformator tenaga yang diamankan bebas dari pengaruh gangguan yang ada.

### 2.2.3.3. Gangguan di luar Daerah yang dilindungi

Pada gangguan di luar (eksternal) daerah proteksi relay differensial (di luar kedua trafo arus), relay differensial tidak akan bekerja, karena  $I_p$  dan  $I_s$  sama besar dan berlawanan arah ( $I_d = I_p + I_s = 0$  Ampere,  $I_{dif} = I_p + I_s = 0$  Ampere), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2.3.3 berikut.

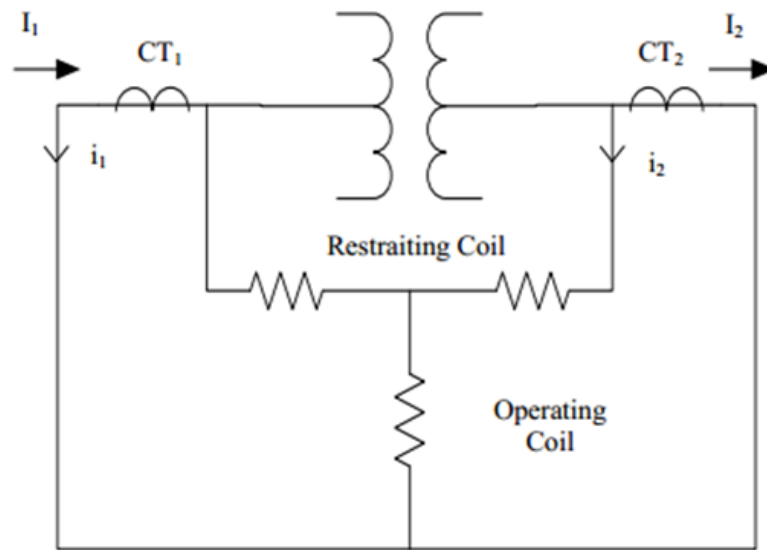


(sumber :Liem Ek Biem dan Dita Helna, 2007)

Gambar 2.3. Relay differensial saat gangguan eksternal

#### 2.2.3.4. Karakteristik Relay Differensial

Karakteristik differensial dibuat seiring dengan keseimbangan arus ( $I_{\mu}$ ), untuk terhindar dari kesalahan kerja. Kesalahan kerja yang disebabkan oleh CT (*Current Transformer*) ratio *mismatch*, terdapat pergeseran fasa yang diakibatkan oleh belitan transformator tenaga hubungan Y –  $\Delta$  (*star – delta*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



(sumber :Liem Ek Biem dan Dita Helna, 2007)

Gambar 2.4. Prinsip pengoperasian relay differensial

CT (*Current Transformer*) *mismatch* dapat juga berubah karena adanya perubahan tap tegangan (perubahan posisi *tap changer*) pada transformator tenaga oleh *On Load Tap Changer* (OLTC).

Ketidakseimbangan arus ( $I_{\mu}$ ) yang bersifat transient disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya, kesalahan akurasi CT (*Current Transformer*), *Inrush current* pada saat *transformator energize* dan perbedaan kesalahan CT di daerah jenuh (saturasi CT).

Untuk mengatasi masalah keseimbangan arus ( $I_{\mu}$ ) pada relay differensial dengan cara menambah kumparan *Restraining Coil* dan *Operating Coil* agar menahan bekerjanya relay di daerah ( $I_{\mu}$ ) dan mengerjakan pada relay tersebut.

Arus relay differensial didapat dari penjumlahan komponen arus sekunder perfasa di belitan 1 ( $|I_1|$ ) dan belitan 2 ( $|I_2|$ ) secara vektor perfasa.

Nilai arus akan saling mengurangi jika satu arus menuju relay dan salah satu arus tersebut meninggalkan relay. Namun jika arah arus searah yang berarti keduanya menuju relay atau saling meninggalkan relay, maka nilai arus akan saling menjumlahkan .

Arus penahan (*restrain*) didapat dari arus maksimal komponen arus sekunder perfasa di belitan 1 ( $|I_1|$ ) dan belitan 2 ( $|I_2|$ ).

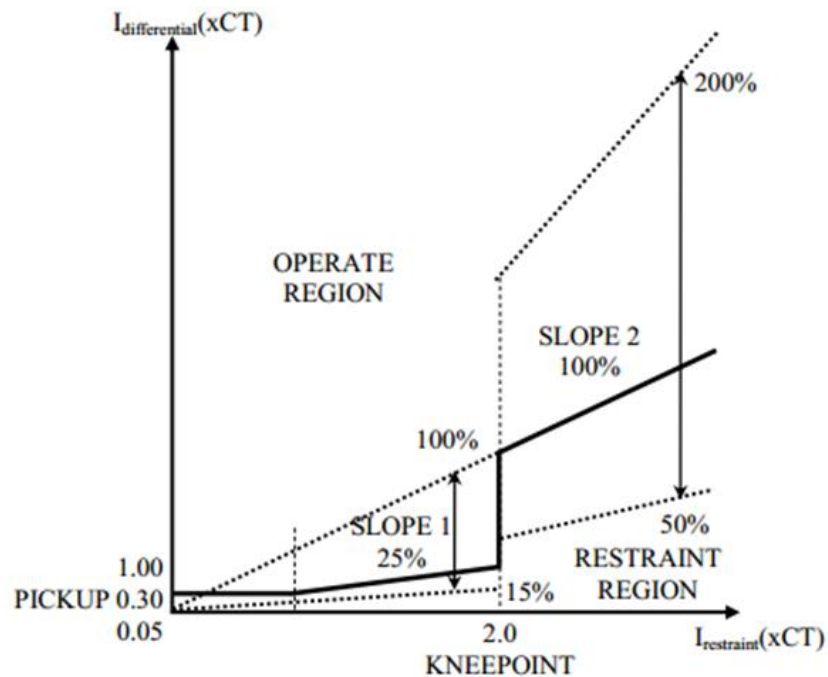
$$I_{restrain} = I_r$$

$$= \max |I_1^{\rightarrow}| \cdot |I_2^{\rightarrow}|$$

*Slope* didapat dengan membagi antara komponen arus differensial dengan arus penahan. *Slope* 1 akan menentukan arus differensial dan arus penahan pada saat kondisi normal dan memastikan sensitifitas relay pada saat gangguan internal dengan arus gangguan yang kecil. Sedangkan *Slope* 2 berguna supaya relay tidak kerja oleh gangguan eksternal yang berarus sangat besar sehingga salah satu CT mengalami saturasi (diset dengan *slope* lebih dari 50%).

$$\% \text{ Slope} = \frac{I_d}{I_r} \times 100\%$$

Pada Gambar 2.5. halaman berikut merupakan karakteristik relay differensial. Daerah di atas kurva adalah daerah kerja relay differensial, sedangkan pada daerah di bawah kurva, relay tidak akan bekerja.



(sumber :Liem Ek Biem dan Dita Helna, 2007)

Gambar 2.5. Karakteristik relay differensial

## 2.2.4. Harmonik dan Komponen Simetris pada Saluran Transmisi

### 2.2.4.1. Harmonik

Harmonik pada sistem tenaga listrik adalah distorsi gelombang tegangan dan arus yang dapat membuat trafo, motor listrik dan kabel menjadi panas. Transformator akan meledak atau terbakar jika panas yang diakibatkan oleh adanya harmonik terlalu besar .

Pada intinya , harmonik adalah pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi tinggi dari hasil perkalian bulat dengan frekuensi dasarnya yang dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$f_h = h \cdot f_d$$

dengan :  $f_h$  = frekuensi harmonik (Hertz)  
 $h$  = orde harmonik  
 $f_d$  = frekuensi dasar (Hertz)

(sumber : Ardianto, 2007)

Gelombang dasar sinusoidal murni akan terdistorsi karena adanya gelombang harmonik, karena adanya distorsi kedua gelombang tersebut maka kedua gelombang dijumlahkan. Hasil penjumlahan gelombang tersebut mengakibatkan gelombang memiliki frekuensi yang sangat tinggi.

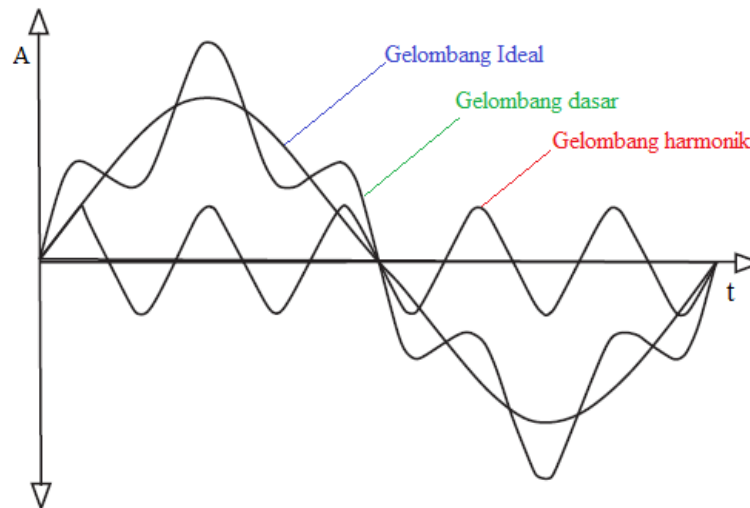
Menurut teorema Fourier, gelombang terdistorsi dapat diuraikan menjadi gelombang dasar dan beberapa gelombang berfrekuensi lebih tinggi dari frekuensi dasar yang dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(h2\pi f_t - \varphi_h)$$

dengan :  $Y_0$  = amplitudo komponen arus searah (nol)  
 $Y_h$  = tegangan harmonik ke-h atau nilai rms arus  
 $F$  = frekuensi dasar (50 Hertz)  
 $\varphi_h$  = sudut fasa harmonik

(sumber : Ardianto, 2007)

Gelombang harmonik yang dapat mendistorsi gelombang dasar hanya harmonik kelipatan ganjil dari frekuensi dasarnya, ini dikarenakan pada saat setengah siklus positif dan negatif pada gelombang tegangan atau arus memiliki bentuk yang identik, deret *Fourier*-nya hanya terdiri atas harmonik ganjil. Berikut ini gambar 2.6. merupakan gambar gelombang dasar yang terdistorsi oleh harmonik kelipatan ganjil.



(sumber : Ardianto, 2007)

Gambar 2.6. Gelombang asli terdistorsi akibat harmonisa kelipatan ganjil

Pada umumnya, harmonik orde tinggi (sekitar orde-25 hingga orde-50) dapat diabaikan dalam analisa sistem tenaga listrik. Meskipun harmonik tersebut dapat menyebabkan interferensi terhadap peralatan elektronik berdaya rendah, namun tidak akan merusak sistem karena harmoniknya sangat kecil.

#### 2.2.4.2. Istilah- Istilah Pada Harmonik

Sebelum membahas lebih lanjut, maka perlu diketahui terlebih dahulu beberapa istilah penting mengenai harmonisa.

##### 1. Orde Harmonik

Orde dari harmonisa merupakan perbandingan frekuensi harmonic dengan frekuensi dasar, dimana :

$$n = \frac{f_n}{F}$$

Keterangan : n = orde harmonik

$f_n$  = frekuensi harmonisa ke-n

F = frekuensi dasar

(sumber : Ardianto, 2007)

Sesuai dengan definisi di atas maka orde harmonik frekuensi dasar F adalah 1. Artinya orde ke-1 bukan harmonisa melainkan orde ke-2 sampai orde ke-n.

##### 2. Spektrum

Spektrum adalah distribusi dari semua amplitudo komponen harmonik sebagai fungsi dari orde harmoniknya, dan diilustrasikan menggunakan histogram. Bisa 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, terutama bila yang digunakan filter pasif.

##### 3. Total Harmonic Distortion (THD)

THD adalah ukuran nilai efektif dari komponen-komponen harmonik pada suatu gelombang yang terdistorsi. Hal ini dapat dinyatakan sebagai suatu nilai potensi pemanasan akibat harmonik relatif terhadap gelombang frekuensi dasar. Nilai ini dapat dihitung baik untuk tegangan maupun untuk



arus :

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n>1}^{h_{max}} M_n^2}{M_1}}$$

Keterangan:  $M_n$  = nilai rms dari komponen harmonik ke-n (arus atau tegangan)

$M_1$  = nilai rms dari arus atau tegangan pada frekuensi dasar

(sumber : Ardianto, 2007)

#### 4. Nilai RMS

Nilai RMS yang dihasilkan oleh gelombang tegangan atau arus yang terdistorsi harmonik dapat dinyatakan dengan :

$$RMS = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + THD^2}$$

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

(sumber : Ardianto, 2007)

#### 5. Hubungan Komponen Daya pada Kondisi Non Sinusoidal

Daya aktif (daya nyata) adalah daya yang diserap oleh beban untuk melakukan kerja yang sesungguhnya. Daya reaktif adalah daya yang tidak terlihat sebagai kerja nyata dan biasanya dipengaruhi oleh komponen reaktif seperti induktor. Berikut adalah persamaan daya aktif (P) dan reaktif (Q) rata-rata pada kondisi non sinusoidal.

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

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

Secara umum, daya kompleks (S) dapat dinyatakan dengan:

$$S = V \times I \quad \text{VA}$$

Dalam kondisi non sinusoidal, daya kompleks dapat dinyatakan dengan:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \text{VA}$$

Keterangan: S = daya kompleks pada kondisi non sinusoidal (VA)

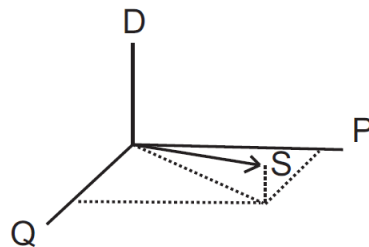
P1 = daya aktif pada frekuensi dasar (watt)

Q1 = daya reaktif pada frekuensi dasar (VAR)

D = distorsi daya akibat harmonik (VA)

(sumber : Ardianto, 2007)

Beberapa pendapat memilih untuk menggunakan diagram vektor tiga dimensi untuk menunjukkan hubungan antara daya-daya tersebut seperti gambar 2.7. P dan Q mewakili komponen S yang biasa terdapat pada kondisi sinusoidal murni, sedangkan D menunjukkan kontribusi tambahan terhadap daya kompleks akibat harmonik.

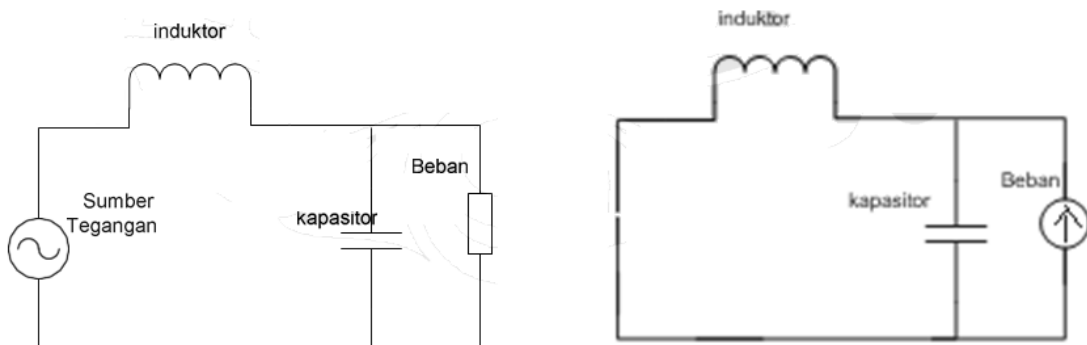


Gambar 2.7. Hubungan komponen daya pada kondisi non sinusoidal.

## 6. Penyebab Timbulnya Harmonik

Seperti telah disebutkan di atas, munculnya harmonik disebabkan oleh beban non linear. Beban non linear 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 gelombang arus yang tidak sinusoidal. Bentuk gelombang tersebut tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter beban-beban non linear yang terpasang. Perubahan bentuk gelombang tersebut tidak berhubungan dengan sumber tegangannya.

Beban non linear dapat dimodelkan sebagai sumber arus harmonik seperti gambar 2.8. berikut ini.



(sumber :Franky, 2008)

(a) Model beban harmonik dengan sumber

(b) Model beban harmonik tanpa sumber

Gambar 2.8. Model ketika ada beban harmonik

Sumber harmonik pada umumnya terdiri dari 2 jenis yaitu peralatan elektronika daya dan peralatan yang memiliki kondisi saturasi. Peralatan elektronika daya biasanya menggunakan komponen-komponen elektronika

daya seperti dioda, tiristor, dan sebagainya. Contoh peralatan yang menggunakan komponen elektronika daya adalah electronic ballast, pengendali motor listrik, PWM *converter* dan sebagainya. Peralatan yang memiliki kondisi saturasi biasanya memiliki komponen bersifat magnetik seperti magnetic ballast, transformator, dan mesin-mesin listrik.

### **7. Akibat Yang Ditimbulkannya Harmonik**

Pengaruh harmonik pada peralatan tenaga listrik secara umum terbagi menjadi tiga, yaitu:

1. Nilai RMS baik tegangan maupun arus meningkat.
2. Nilai puncak (peak value) tegangan dan arus meningkat.
3. Frekuensi sistem menurun.

Masing-masing elemen membangkitkan distorsi yang spesifik. Nilai rms lebih besar dapat menyebabkan pemanasan lebih dan nilai puncak lebih besar yang dapat membuat alat ukur terganggu kinerjanya sehingga memberikan indikasi yang salah. Frekuensi mempengaruhi impedansi kabel dan dengan frekuensi 400 Hz atau lebih maka akan sulit untuk mengatasi jatuh tegangan. Fenomena resonansi dapat terjadi pada frekuensi tertentu dan dapat menyebabkan arus meningkat.

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

- a. Efek negatif jangka pendek
  1. Tegangan harmonik dapat mengganggu pengendalian yang digunakan pada sistem elektronik.
  2. Harmonik dapat menyebabkan kesalahan pada peralatan pengukuran listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik.

b. Efek yang bersifat kontinu dan yang dapat mengakibatkan pemanasan.

1. Pemanasan kapasitor

Kapasitor sensitif terhadap perubahan beban maka ketika terjadi harmonik akan menyebabkan rugi-rugi meningkat. Ketika terjadi harmonik, beban semakin reaktif sehingga kapasitor harus mencatu lebih banyak daya reaktif kepada sistem.

2. Pemanasan pada mesin-mesin listrik

Akibat harmonik pada mesin adalah bertambahnya rugi-rugi pada mesin. Hal ini diakibatkan oleh meningkatnya rugi-rugi pada stator dan perbedaan kecepatan yang diakibatkan oleh medan yang dihasilkan oleh harmonik dengan rotor. Arus harmonik juga menimbulkan panas lebih dan apabila mesin terus-menerus dioperasikan pada kondisi ini akan mengurangi umur dan merusak mesin.

3. Transformator

Transformator distribusi yang mencatu daya beban non linear akan menimbulkan tegangan harmonik dan arus harmonik kelipatan tiga ganjil. Harmonik ini akan menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa. Akibatnya terjadi peningkatan temperatur pada kawat netral. Dampak lanjutannya, akan terjadi sirkulasi arus urutan nol pada belitan delta sehingga temperatur meningkat. Hal ini akan mengakibatkan penurunan efisiensi transformator dan dapat mengakibatkan kerusakan.

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

Akibat dari harmonik lain ialah interferensi frekuensi pada sistem telekomunikasi karena biasanya sistem komunikasi letaknya berdekatan dengan sistem tenaga listrik. Sistem pengamanan seperti relay dapat berkurang kemampuannya untuk merasakan gangguan ketika terjadi harmonik karena sifar relay itu sendiri yang sensitif terhadap perubahan frekuensi dan arus.

### 8. 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 harmonisa.

Tabel 2.2. Urutan fasa harmonik

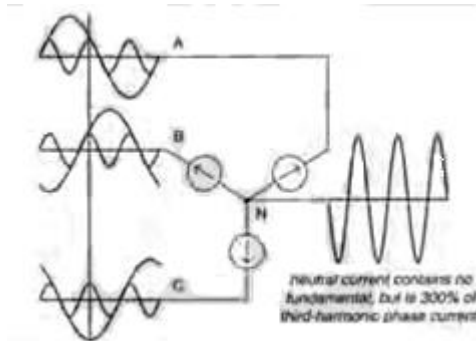
|                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |
|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| Orde harmonik        | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Urutan fasa harmonik | + | - | 0 | + | - | 0 | + | - | 0 | +  | -  | 0  |

Pola urutan fasa setiap orde harmonik dapat dinyatakan sebagai berikut:

- i. Urutan fasa positif (positive sequence) =  $3h+1$
- ii. Urutan fasa negatif (negative sequence) =  $3h-1$
- iii. Urutan fasa nol (zero sequence) =  $3h$

### 9. Triplen Harmonik

Triplen harmonik merupakan kelipatan ganjil dari harmonik ketiga ( $h = 3, 9, 11, 15, 21, \dots$ ). Pada sistem 3 fasa 4 kawat seimbang seperti gambar 2.5, arus urutan nol atau arus triplen harmonik akan tetap ada dan mengalir melalui kawat netral. Hal ini dikarenakan triplen harmonik memiliki fasa dan waktu yang sama antara ketiga fasanya sehingga pada kawat netral akan ditemukan arus harmonik urutan nol yang besarnya tiga kali lipat dari arus harmonik urutan nol pada salah satu fasa.



(sumber :Adrianto, 2008)

Gambar 2.9. Ilustrasi triplen harmonik pada sistem 3 fasa 4 kawat.

### 10. Batasan Harmonik

Beberapa standar batasan harmonik pada sistem tenaga listrik telah dipublikasikan diantaranya adalah standar IEEE std. 519 – 1992, IEEE std. 519-1992, IEC 61000-3-4, IEC61000-3-6, dan lain-lain. IEC biasanya digunakan untuk daerah Eropa dan standar ANSI banyak digunakan di Amerika. Berikut adalah standar yang digunakan dalam skripsi ini:

Tabel 2.3. Batasan Harmonik IEC 61000-3-4

| Orde | Maksimum arus harmonik yang diizinkan* | Orde | Maksimum arus harmonik yang diizinkan* |
|------|--|------|--|
| 3    | 21.6                                   | 19   | 1.1                                    |
| 5    | 10.7                                   | 21   | 0.6                                    |
| 7    | 7.2                                    | 23   | 0.9                                    |
| 9    | 3.8                                    | 25   | 0.8                                    |
| 11   | 3.1                                    | 27   | 0.6                                    |
| 13   | 2                                      | 29   | 0.7                                    |
| 15   | 0.7                                    | 31   | 0.7                                    |
| 17   | 1.2                                    | 33   | 0.6                                    |

Ket: \* % dari arus fundamental masukan

Tabel Tabel 2.4.Batasan Harmonik IEC 61000-3-6

| Harmonik ganjil   |                         |             |                       | Harmonik genap |                       |
|-------------------|-------------------------|-------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| Bukan kelipatan 3 |                         | Kelipatan 3 |                       | Orde           | Tegangan harmonik (%) |
| Orde              | Tegangan harmonik (%)   | Orde        | Tegangan harmonik (%) |                |                       |
| 5                 | 6                       | 3           | 3                     | 2              | 2                     |
| 7                 | 5                       | 9           | 9                     | 4              | 1                     |
| 11                | 3.5                     | 15          | 15                    | 6              | 0.5                   |
| 13                | 3                       | 21          | 21                    | 8              | 0.5                   |
| 17                | 2                       | >21         | 1                     | 10             | 0.5                   |
| 19                | 1.5                     |             |                       | 12             | 0.2                   |
| 23                | 1.5                     |             |                       | >12            | 0.2                   |
| 25                | 1.5                     |             |                       |                |                       |
| >25               | $0.2 + 1.3 \times 25/h$ |             |                       |                |                       |

\* Batasan untuk THD sebesar 8 %

## 11. Mengatasi Harmonik

Pada dasarnya, harmonik dapat menjadi masalah jika:

- Sumber dari arus yang mengandung harmonik sangat besar.
- Jalur yang dilalui secara elektrik sangat panjang menyebabkan distorsi tegangan yang besar.
- Respon dari sistem yang menimbulkan satu atau lebih harmonik.

Saat suatu permasalahan ditimbulkan oleh harmonik, cara dasar mengatasinya adalah sebagai berikut:

- Mengurangi arus harmonik yang dihasilkan oleh beban.

Hanya sedikit yang dapat dilakukan terhadap peralatan beban yang ada untuk mengurangi kuantitas harmonik yang dihasilkan. Hubungan transformator delta dapat digunakan untuk memblok triplen harmonic

- Menambah filter untuk mengalihkan arus harmonik dari sistem, memblok arus yang memasuki sistem, atau melokalisir harmonik.

Filter shunt bekerja dengan menghubungsingkatkan arus harmonik sedekat mungkin kepada sumber distorsi untuk menjaga agar arus harmonik tetap jauh dari sistem.



- c. Merubah respon frekuensi dengan menggunakan filter, induktor, dan kapasitor.

Beberapa metodenya adalah menambah filter shunt, menambah reaktor, mengubah ukuran kapasitor, memindahkan kapasitor pada titik dengan losses terbesar, dan melepas kapasitor jika memungkinkan.ada sistem tiga fasa.

### 2.2.5. Desain Filter

Terdapat dua jenis filter, filter aktif dan filter pasif. Filter pasif banyak digunakan di industri namun memiliki kelemahan, yaitu bergantung pada impedansi, frekuensi sistem, dan toleransi komponen. Pemasangan filter memiliki dua tujuan, yaitu:

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

Terdapat dua jenis filter pasif, yaitu filter parallel (*shunt*) dan filter shunt. Filter parallel (*shunt*) hanya membawa arus harmonik dan sebagian arus fundamental yang jauh lebih kecil dari rangkaian utamanya. Sedangkan, Filter seri harus didesain untuk arus maksimum dari rangkaian utama. Karena itu filter parallel (*shunt*) lebih murah daripada filter seri untuk efektifitas yang sama. Filter parallel (*shunt*) juga mampu menyuplai daya reaktif pada frekuensi dasar. Dalam banyak aplikasi, biasanya filter parallel (*shunt*) yang digunakan.

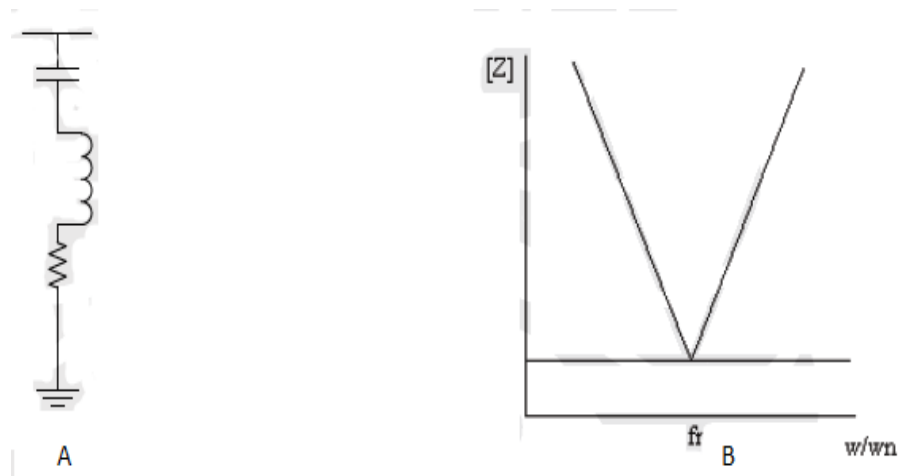
Filter parallel (*shunt*) yang paling sering digunakan adalah *single tuned filter* dan *damped filter* orde kedua. Kedua jenis filter ini paling sederhana dalam desainnya dan paling murah diimplementasikan.

### 2.2.5.1. Filter Pasif

Pasif filter terdiri dari induktansi, kapasitansi, dan elemen reaktansi yang diatur untuk mengontrol harmonik. Filter pasif sangat umum digunakan dan tidak mahal dibandingkan pengeliminasi distorsi harmonik yang lain. Kekurangannya adalah adanya kemungkinan untuk berinteraksi dengan sistem tenaga listrik yang dapat merugikan dan penting untuk memeriksa kemungkinan semua interaksi pada saat didesain.

### 2.2.5.2. Desain *Single Tuned Filter*

Berikut ini adalah gambar 2.10. rangkaian *single tuned filter* dan kurva impedansi terhadap frekuensi terlihat pada gambar berikut:



(sumber :Adrianto, 2008)

Gambar 2.10. (A) Rangkaian *single tuned filter*

(B) kurva impedansi terhadap frekuensi

Impedansi *single tuned filter* diberikan oleh persamaan:

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

Untuk *magnitude* impedansi *single tuned filter* adalah:

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

Resonansi terjadi pada saat nilai reaktansi sama dengan kapasitansi. Filter diatur pada frekuensi  $f_r$  yang menghasilkan resonansi seri. Berikut adalah persamaanya:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Pada frekuensi  $f_r$ , *single tuned filter* akan memiliki impedansi minimum yang dimana besarnya adalah resistansi R dari induktor. Filter ini akan menyerap semua arus harmonik yang dekat dengan frekuensi  $f_r$  yang diinjeksikan.

Prinsip dasarnya ialah *single tuned filter* ini dipasang untuk setiap harmonik yang akan dihilangkan. Filter-filter ini dihubungkan pada busbar dimana pengurangan tegangan harmonik ditentukan dan membentuk suatu filter bank.

Dua parameter yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan nilai R, L, dan C adalah:

a. Faktor kualitas (Q)

Kualitas dari filter menunjukkan ketajaman pengaturan filter dalam mengeliminasi harmonik. Dalam *single tuned filter*, faktor kualitas Q didefinisikan sebagai perbandingan antara induktansi atau kapasitansi pada frekuensi resonansi terhadap resistansi. Persamaannya bisa dinyatakan sebagai berikut:

$$Q = \frac{X_0}{R}$$

Fiter yang efektif harus memiliki induktor dengan kualitas yang besar, oleh karena itu  $R \ll X_o$  pada frekuensi resonansi. Filter dengan Q tinggi diatur pada frekuensi rendah dan nilainya biasanya berkisar antara 30 dan 60. Perkiraan nilai Q untuk reaktor inti udara adalah 75 dan untuk reaktor inti besi di atasnya.

b. Penyimpangan frekuensi relative ( $\delta$ )

Penyimpangan frekuensi relative menyatakan perubahan frekuensi dari frekuensi nominal pengaturannya yang dinyatakan oleh:

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega}$$

Faktor  $\delta$  dipengaruhi oleh:

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

### 2.2.5.3. Batasan Komponen Filter

1. Kapasitor

Berikut adalah batas beban yang diperbolehkan berdasarkan standard ANSI/IEEE 18- 1980 adalah sebagai berikut

|                        |         |
|------------------------|---------|
| Arus efektif           | = 180 % |
| Tegangan efektif       | = 110 % |
| kVAR                   | = 135 % |
| Jumlah tegangan puncak | = 120 % |

Aplikasi dalam batas arus efektif kemungkinan lebih rendah dari batasan arus efektif yang telah ditetapkan standar ANSI/IEE 18-1980 yaitu sebesar 180%, karena masing-masing unit kapasitor diproteksi pada 125-165 % dari rating arusnya.

Dalam mendesain filter, batas tegangan dan arus efektif dan jumlah tegangan puncak pada kapasitor bank sebaiknya berkisar 100 % dari rating kondisi normal. Dengan hal tersebut kapasitor dapat mengkompensasi tegangan lebih tersistem dan kondisi tidak seimbang pada kapasitor. Komponen harmonik bertumbuh secara signifikan dalam kondisi ketidakseimbangan pada kapasitor bank.

## 2. Induktor

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

1. Arus pada frekuensi dasar
2. Arus hubung singkat
3. BIL (*Basic Insulation Level*)
4. Rasio X/R
5. Spektrum arus harmonik
6. Tegangan sistem