

# ANALISA PENGARUH HARMONISA PADAPENGOPERASIAN BEBAN LISTRIK

Oleh:

Joslen Sinaga<sup>1</sup>

Ruth Meivera Siburian<sup>2)</sup>

Jamot Sirait<sup>3)</sup>

Universitas Darma Agung, Medan

Institut Sains dan Teknolog TD Pardede<sup>1,2,3)</sup>

E-mail:

[josinaga1977@gmail.com](mailto:josinaga1977@gmail.com)<sup>1)</sup>

[y\\_manut@yahoo.com](mailto:y_manut@yahoo.com)<sup>2)</sup>

[josi\\_sng@yahoo.com](mailto:josi_sng@yahoo.com)<sup>3)</sup>

## ABSTRACT

Harmonics are periodically distorted waves occurring in voltage, current, or power waves consisting of sine waves whose frequency is an integer multiple of the source / fundamental frequency, so that the shape is not sinusoidal. Harmonic distortion will result in losses to the network system, including the occurrence of parallel and series resonances. One of the causes is the installation of shunt capacitors in the network used to compensate reactive power. Capacitors are very sensitive to harmonic currents because the capacitor impedance will decrease proportionally to the order of harmonics in the system. In the use of capacitors must go through a safety called a detuned reactor. This study concludes: if you use a capacitor with a 54 kVAR / step unit at a voltage of 434,783V, and an 8% reactor is installed in series with a reactor impedance value of 0.695 ohms, then the maximum current that will flow is 10.25 A. It is necessary to adjust the voltage and current. harmonics, because they are connected in series with the reactor, a capacitor rating of 550 volts is required with a reactive power of 86.412 kVAR.

**Keywords: Harmonics, Capacitors, Operation of Electrical Loads**

## ABSTRAK

Harmonisa adalah gelombang yang terdistorsi secara periodic terjadi pada gelombang tegangan, arus, atau daya terdiri dari gelombang-gelombang sinus yang frekuensinya merupakan kelipatan bulat frekuensi sumber/fundamental, sehingga bentuknya tidak sinusoidal. Distorsi harmonis akan mengakibatkan kerugian pada system jaringan, diantaranya adalah terjadinya resonansi parallel maupun seri. Salah satu penyebabnya adalah pemasangan kapasitor shunt pada jaringan yang digunakan untuk kompesasi daya reaktif. Kapasitor sangat sensitive terhadap arus harmonisa dikarenakan impedansi kapasitor akan menurun secara proporsional ke urutan harmonisa yang ada pada sistem. Dalam penggunaan kapasitor harus melalui pengaman yang disebut dengan detuned reactor. Penelitian ini member kesimpulan : apabila menggunakan kapasitor dengan satuan 54 kVAR/step pada tegangan 434,783V, dan reactor 8% terpasang seri dengan nilai impedansi reaktor 0,695 ohm, maka arus maximum yang akan mengalir adalah 10,25 A. Perlu dilakukan penyesuaian terhadap tegangan dan arus harmonisa, dikarenakan terhubung seri dengan reaktor, diperlukan rating kapasitor sebesar 550 volt dengan daya reaktif sebesar 86,412 kVAR.

**Kata Kunci : Harmonisa, Kapasitor, Pengoperasian Beban Listrik**

## 1. PENDAHULUAN

Harmonisa adalah gelombang yang terdistorsi secara periodik yang terjadi pada gelombang tegangan, arus, atau daya terdiri dari gelombang-gelombang sinus yang frekuensinya merupakan kelipatan

bulat frekuensi sumber/fundamental, sehingga bentuknya tidak sinusoidal. Penggunaan beban-beban non linier, akan menimbulkan perubahan pada bentuk gelombangnya. Cacat gelombang yang disebabkan oleh interaksi antara bentuk

gelombang sinusoidal sistem dengan komponen gelombang lain lebih dikenal dengan harmonisa.

Distorsi harmonisa akan mengakibatkan kerugian pada sistem jaringan, diantaranya adalah terjadinya resonansi paralel maupun seri. Salah satu penyebabnya adalah pemasangan kapasitor shunt pada jaringan yang digunakan untuk kompensasi daya reaktif. Terjadinya resonansi ini akan meningkatkan tegangan - tegangan harmonisa yang cukup besar pada bus kapasitor yang bisa merusak kapasitor itu sendiri dan komponen jaringan lainnya, sehingga dalam upaya memperoleh efisiensi dan kualitas sistem tenaga listrik, maka pengaruh harmonisa harus diperhitungkan.

Harmonisa ini dapat diminimalisir dengan pemasangan filter harmonisa. Tujuan pemasangan filter harmonisa untuk mereduksi amplitudo frekuensi dari sebuah tegangan atau arus. Nilai harmonisa hasil pengukuran yang tinggi mengakibatkan kualitas daya listrik menurun. Dengan demikian perlu dilakukan pemasangan filter aktif untuk menangani distorsi harmonisa agar nantinya dapat memenuhi standar yang telah ditetapkan.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Harmonisa adalah cacat 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.

Beberapa akibat yang ditimbulkan oleh adanya harmonisa :

1. Temperatur pada transformator lebih meningkat dari normalnya.
2. Terlalu panasnya motor-motor yang dioperasikan (karena eddy current yang timbul sehingga menambah kerugian daya).
3. Terjadinya kesalahan pada penunjukan alat ukur.
4. Putusnya pengaman (fuse) pada kapasitor bank atau isolasi kapasitor menjadi lebih panas, sehingga bila terlalu melampaui batas dapat mengalami kerusakan pada kapasitor itu sendiri.

5. Terjadinya kesalahan operasi pada peralatan-peralatan kontrol dan pemutus yang terhubung dengan bus yang telah terganggu.

Hubungan antara frekuensi harmonik dan fundamental dapat ditulis sebagai berikut :

$$f_h = n f_i \dots\dots\dots 2.1$$

dimana :

$f_h$  = adalah frekuensi harmonik  
 $n$  = adalah kelipatan gelombang  
 (bilangan bulat)

$f_i$  = adalah frekuensi fundamental  
 Gelombang harmonik ini akan

menumpang pada gelombang fundamental sehingga akan terbentuk gelombang yang terdistorsi. Hal ini dikarenakan efek penjumlahan dari gelombang harmonisa dengan gelombang fundamentalnya. Gelombang harmonisa ini dapat dijabarkan pada deret Fourier berikut ini :

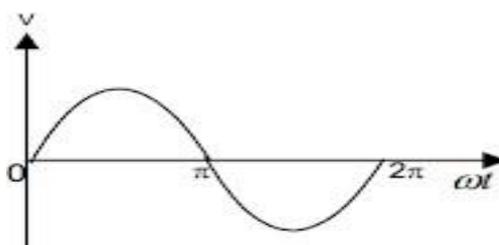
$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)) \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana :  $a = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$

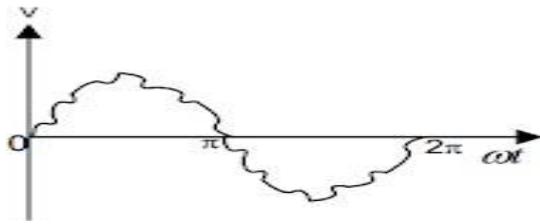
$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt ; b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt$$

$a_0$  adalah komponen DC, sedangkan  $a_h$  dan  $b_h$  adalah komponen AC.

Pada sistem tenaga listrik AC ideal, energi listrik disalurkan dalam frekuensi tunggal yang konstan dan pada level tegangan yang konstan pula. Tetapi dengan perkembangan beban listrik yang semakin besar dan kompleks, terutama penggunaan beban-beban tak linier, akan menimbulkan perubahan pada bentuk gelombangnya seperti terlihat pada gambar berikut.

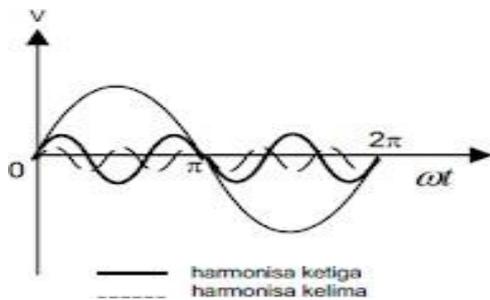


Gambar 2.1. Bentuk gelombang pada frekuensi fundamental



Gambar 2.2. Bentuk gelombang terdistorsi

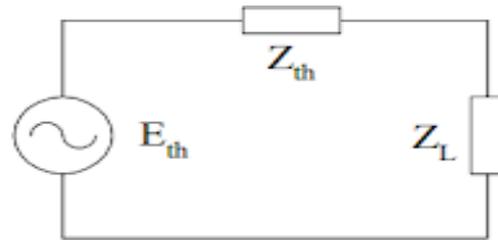
Frekuensi kelipatan integer dari komponen fundamentalnya seperti ditunjukkan pada gambar di bawah.



Gambar 2.3. Bentuk Gelombang Pada Frekwensi

Distorsi harmonisa akan mengakibatkan kerugian pada sistem jaringan, diantaranya adalah terjadinya resonansi paralel maupun seri. Salah satu penyebabnya adalah pemasangan kapasitor shunt pada jaringan yang digunakan untuk kompesasi daya reaktif. Terjadinya resonansi ini akan meningkatkan tegangan - tegangan harmonisa yang cukup besar pada bus kapasitor yang bisa merusak kapasitor itu sendiri dan komponen jaringan lainnya, sehingga dalam upaya memperoleh efisiensi dan kualitas sistem tenaga listrik, maka pengaruh harmonisa harus diperhitungkan.

Harmonisa yang timbul pada sistem tenaga listrik dapat dijelaskan sebagai berikut. Misalnya suatu sistem tenaga listrik seperti dalam gambar dibawah ini merupakan rangkaian pengganti Thevenin dari suatu jaringan sistem tenaga listrik AC. Eth adalah sumber tegangan yang hanya menghasilkan tegangan sinusoidal. Zth adalah beban linier dan ZL adalah elemen tak linier.



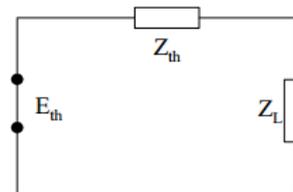
Gambar 2.4. Rangkaian Ekvivalen Jaringan Sistem Tenaga Listrik Untuk n=1

Karena ZL adalah beban non linier, maka beban ZL akan menyerap arus yang mengandung komponen - komponen harmonisa tersebut. Misalkan  $E_{th} = E \sin n(t)$ . Arus yang diserap komponen tak linier adalah :

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \dots\dots\dots(2.3)$$

Karena Eth tidak ada komponen harmonisa atau sumber hanya pada frekuensi fundamental maka, untuk  $n > 1$  harga Eth = 0 dan arus sebagai berikut :

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(\omega_n t + \phi_n) \dots\dots\dots(2.4)$$



Gambar 2.5 : Rangkaian Pengganti Untuk n >1

Pada transformator daya, arus urutan nol yang bersirkulasi pada belitan delta dapat menyebabkan arus yang besar dan pemanasan berlebih. Untuk mengatasi pemanasan berlebih akibat harmonisa, seringkali kapasitas daya transformator diperbesar untuk memperbesar kapasitas pendinginan. Tetapi konduktor yang lebih besar menyebabkan pemanasan yang lebih besar juga, yang diakibatkan harmonisa frekuensi tinggi. Selain itu, memperbesar kapasitas transformator berarti memperbesar arus harmonisa yang mungkin mengalir dalam sistem.

Penurunan efisiensi transformator akibat harmonisa dapat mencapai sekitar 6%. Pada sisi transformator dampak yang bisa diketahui adalah transformator mengalami kenaikan suhu. Naiknya suhu transformator akan menyebabkan :

1. Penambahan rugi-rugi daya akan mengurangi kapasitas pembebanan transformator. Misal: pada transformator 750 kVA, dengan 10% rugi arus eddy dan rugi arus harmonisa akan bekerja hanya pada 77,5%-nya atau menjadi 578 KVA.
2. Mengurangi kemampuan arus maksimum.
3. Mengurangi umur transformator.

Peran harmonisa pada sistem tenaga listrik cukup besar, terutama pada alat-alat yang terdapat pada sistem tenaga. Harmonisa akan menimbulkan beberapa dampak seperti panas berlebih pada beberapa alat seperti generator dan transformator karena kecenderungan harmonisa mengalir ke tempat dengan impedansi yang lebih rendah.

Berdasarkan kesepakatan yang disepakati dunia internasional, *THD* yang diterima adalah apabila bernilai dibawah 5% dari tegangan atau arus fundamentalnya. Apabila diatas batas tersebut maka alat elektronik tersebut tidak boleh digunakan. Efek harmonisa tidak dapat dihilangkan secara sepenuhnya, tetapi dapat dikurangi. Ada beberapa cara yang biasa digunakan dalam mengurangi harmonisa, yaitu dengan penggunaan filter pasif seperti pemasangan kapasitor, penambahan jumlah fasa, dan kompensasi atau injeksi harmonisa negatif. Ada tiga macam urutan fasa serta urutan harmonisa yaitu :

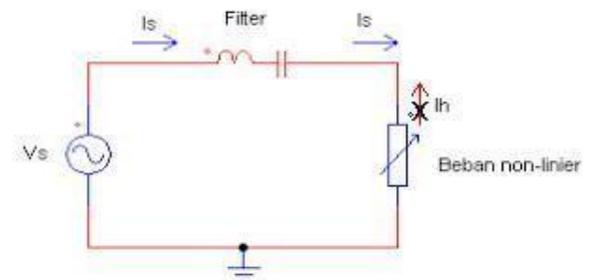
1. Urutan fasa positif, urutan fasanya adalah R-S-T yang antar fasanya terpisah  $120^\circ$ . Orde harmonisanya adalah  $n = 1, 7, 13, \dots$
2. Urutan fasa negatif, urutan fasanya adalah R-T-S yang antar fasanya terpisah  $120^\circ$ . Orde harmonisanya adalah  $n = 5, 11, 17, \dots$
3. Urutan nol yang mempunyai beda fasa sama dengan nol (sefasa). Orde harmonisanya adalah  $n = 3, 9, 15, \dots$

### Cara Mengatasi Harmonisa

Untuk mengatasi harmonisa, dapat dilakukan dengan menggunakan filter harmonisa. Tujuan pokok dari filter harmonisa adalah untuk mereduksi amplitudo frekuensi-frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus. Dengan penambahan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga listrik yang mengandung sumber-sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa keseluruhan jaringan dapat ditekan sekecil mungkin.

Arus harmonisa muncul akibat beban non linier. Untuk menghilangkan arus harmonisa digunakan filter harmonisa. Filter harmonisa tersusun dari rangkaian aktif maupun pasif. Gabungan keduanya disebut filter hybrid. Berdasarkan pemasangan pada jala-jala, filter ini dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu paralel dan seri. Tipe paralel bekerja dengan mengalirkan arus harmonisa. Tipe seri bekerja dengan menghambat aliran arus harmonisa.

Prinsip kerja filter harmonisa tipe paralel ditunjukkan pada gambar 2.7. Arus  $I_s$  adalah arus fundamental dan arus  $I_h$  adalah arus harmonisa. Dua arus ini disebabkan oleh beban non linier. Filter berfungsi untuk mengalirkan arus  $I_h$  agar tidak masuk ke jala-jala  $V_s$ . Prinsip kerja filter harmonisa tipe seri ditunjukkan pada gambar



Gambar 2.6 Prinsip kerja filter harmonisa tipe Seri

Filter berfungsi menahan arus harmonisa  $I_h$  dan melewati arus fundamental  $I_s$ . Arus harmonisa ditandai dengan silang untuk menggambarkan arus tidak dapat mengalir karena adanya filter seri.

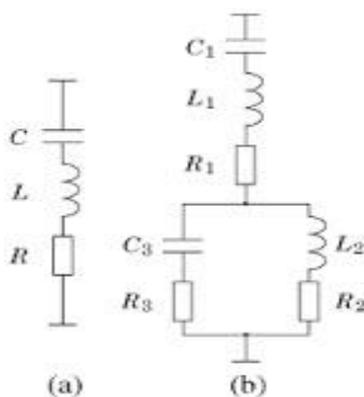
Selain itu filter harmonisa pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya reaktif dan dipergunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem. Selain itu penggunaan filter harmonisa pada frekuensi dasarnya 50 Hz dapat mengkompensasi daya reaktif dan memperbaiki faktor daya mencapai

rata-rata 0.80 – 0.94. Filter harmonisa itu sendiri menjadi 2, yaitu

### 1. Filter Pasif

Filter pasif bekerja dengan harmonisa dengan frekuensi ini tidak dapat menghilangkan ensi harmonisa yang ada. ama dari filter ini adalah induktor dan kapasitor. Induktor dan kapasitor yang digunakan pada filter pasif dipilih yang memiliki nilai yang ketika terjadi resonansi, maka frekuensi resonansi tersebut terjadi ketika tepat pada frekuensi harmonisa yang ingin kita hilangkan. Resonansi mengakibatkan induktor dan kapasitor akan saling menghilangkan. Sehingga bila rangkaian filter akan bertindak sebagai short circuit. Ketika terjadi short circuit, maka harmonisa pada frekuensi resonansi akan dibuang ke ground.

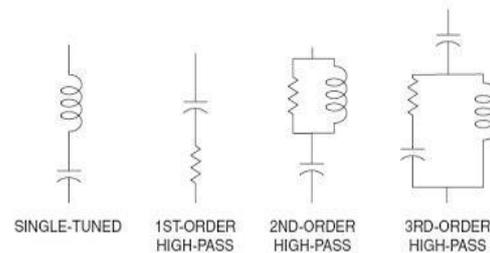
Filter pasif terdiri dari komponen pasif, sehingga dipengaruhi oleh jala-jala. Oleh sebab itu pemasangan filter pasif mempertimbangkan impedansi jala-jala. Filter pasif juga menginjeksikan daya reaktif karena terdiri dari komponen induktor dan kapasitor. Gambar 2.9 menunjukkan betuk rangkaian filter pasif singel tuned dan double tuned. Yang dimaksud dengan singel tuned adalah filter yang mempunyai frekwensi kerja pada satu frekwensi. Sedangkan double tuned punya dua frekwensi kerja.



Gambar 2.7 Singel Tuned dan b). Double Tuned

Filter pasif mempunyai karakteristik yag disebut *Quality Factor* ( $Q$ ). *Quality Factor* menentukan ketajaman pem-filteran. Semakin tinggi nilai  $Q$  maka bandwidth akan semakin kecil. Karakter  $Q$  tinggi dapat dimanfaatkan untuk melewati frekuensi yang diinginkan tanpa mengikutkan frekuensi lainnya. Secara garis besar, filter pasif dibagi menjadi 3

kelompok, yaitu : single-tuned filter, double-tuned filter, dan high-pass filter



Gambar 2.8 Filter Pasif Umum

### 2. Filter Aktif :

Filter aktif bekerja dengan menginduksikan arus induktif dan arus kapasitif ke sistem. Filter aktif adalah suatu perangkat elektronik yang dapat memperbaiki kualitas daya yang dikirimkan dari sumber ke beban. Filter sistem tenaga listrik biasanya terdiri dari Filter Aktif dan Filter Pasif. Pemakaian filter aktif pada sistem tenaga listrik lebih fleksibel dari pada filter pasif karena dari segi penggunaan dan unjuk kerja (performance) filter aktif lebih ekonomis. Untuk mengurangi permasalahan yang ditimbulkan oleh kualitas daya pada sistem tenaga tergantung pada koneksi filter aktif

Filter Aktif biasanya menggunakan perangkat switching berupa pengatur modulasi lebar pulsa tegangan atau arus yang disebut Pulse Width Modulation Voltage Source Inverter (PWM VSI) atau Current Source Inverter (PWM CSI) yang dihubungkan ke level sistem tegangan rendah dan juga tegangan tinggi tergantung pada permasalahan kualitas daya. Pada dasarnya Filter Aktif dalam sistem tenaga dibagi dalam 2 topologi yaitu topologi secara paralel disebut Shunt Active Filter dan secara seri disebut Series Active Filter

#### Filter Aktif Paralel (*Shunt Active Filter*)

Prinsip dasar Filter Aktif Paralel adalah memfilter arus harmonisa dengan menghasilkan arus filter kompensasi (ifilter) yang berbanding secara terbalik arus harmonisa beban (ibeban). Saat fasa arus Filter Aktif Shunt dan fasa arus beban mempunyai fasa yang sama ataupun fasanya berlawanan pada frekwensi harmonisa maka kedua fasa akan saling meniadakan sehingga jumlah vektor arus menjadi nol pada suplai arus (isuplai) di Point of Common Coupling (PCC) sehingga arus suplai mendekati sinusoidal. Filter Aktif Paralel terdiri dari inverter, output inverter

dihubung dengan L ataupun LC dipasang secara paralel dengan beban yang mengandung arus harmonisa sehingga terjadi kompensasi arus.

Filter Aktif Seri (Series Active Filter) Filter Aktif Seri banyak digunakan untuk memfilter harmonisa dan memkompensasi distorsi tegangan seperti tegangan kedip, flicker tegangan dan tegangan tidak seimbang pada level sistem tegangan tinggi dan tegangan rendah. Filter aktif seri terdiri dari

inverter dan keluaran (output) inverter dihubungkan dengan filter L atau LC kemudian dikopling dengan transformator. Filter Aktif Seri dihubungkan secara seri diantara suplai dengan beban.

Dalam memfilter arus harmonisa, inverter menghasilkan tegangan keluaran (vfilter) yang sebanding terhadap arus harmonisa sumber (isuplai). Pada tegangan keluaran kopling transformator sisi sekunder sebanding terhadap rasio transformator kopling. Pada dasarnya bentuk gelombang tegangan dan arus listrik dalam sistem tenaga merupakan gelombang sinusoidal murni. Dengan perkembangan beban listrik semakin kompleks terutama penggunaan beban listrik tak linear sehingga menimbulkan terjadi perubahan distorsi bentuk gelombang tegangan dan arus.

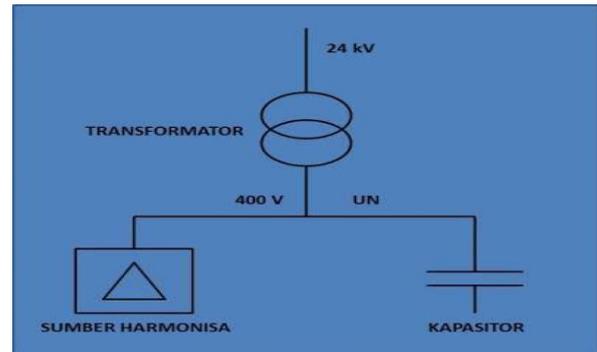
Tegangan sisi sekunder transformator kopling adalah sebanding terhadap arus mengalir melalui transformator kopling atau disebut tahanan aktif pada frekwensi harmonisa. Arus harmonisa pada sumber akan berkurang dengan naiknya impedansi frekwensi harmonisa sumber yang disebabkan oleh tahanan aktif.

Filter Aktif Seri juga digunakan untuk memfilter harmonisa tegangan dan kompensasi kedip tegangan. Tegangan suplai mendekati tegangan gelombang sinusoidal dan tegangan beban non linear mendekati bentuk gelombang square wave. Sedangkan tegangan filter aktif seri mempunyai bentuk gelombang output kompensasinya terdistorsi

### 3. METODE PELAKSANAAN

Detuned reaktor yang dipasang secara seri bertujuan untuk melindungi kapasitor dengan mencegah kenaikan harmonisa yang timbul pada jaringan. Namun hal ini berakibat naiknya tegangan pada terminal kapasitor. Sehingga rating tegangan kapasitor yang digunakan harus menyesuaikan dengan

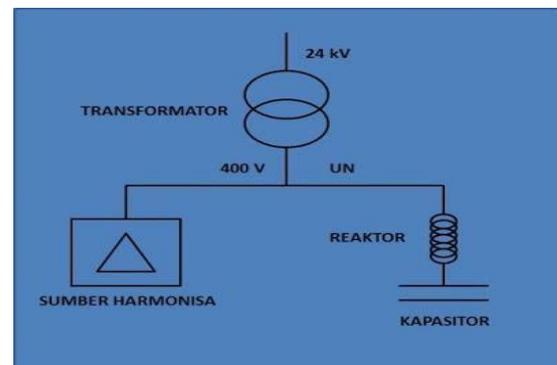
kenaikan tegangan akibat dipasangnya reactor tersebut. Seperti gambar berikut :



Gambar 3.1 Kapasitor 400 V Dalam Jaringan

Seperti gambar 3.1, sebuah jaringan dengan tegangan 400 V, terpasang kapasitor 400 V, 72 A, 50 kVAR/step. Untuk meningkatkan kinerja kapasitor, dipasang detuned reactor sebesar 8 % sehingga rangkaian menjadi seperti gambar 3.2 dibawah ini.

Dari penjelasan diawal, telah disebutkan bahwa pemasangan detuned reactor yang dihubungkan secara seri dengan kapasitor akan meningkatkan level tegangan pada terminal kapasitor.



Gambar 3.2. Detuned Reaktor Pada Kapasitor

Untuk mengetahui besarnya kenaikan tegangan yang terjadi setelah ditambahkan reactor dapat digunakan formula sebagai berikut :

- $U1 = Un / (1-p)$
- $U1 = 400 / (1 - 0.08)$
- $U1 = 400 / 0.92$
- $U1 = 434.783$

Terlihat bahwa ketika kapasitor dengan rating tegangan operasional 400 V dipasangkan seri dengan reactor kapasitas 8 %, maka akan terjadi kenaikan tegangan pada terminal kapasitor 400 V tersebut menjadi 434.783 V.

Jika dibiarkan akan memperpendek umur pakai kapasitor. Dalam hal ini, rating tegangan kapasitor 400 V tidak cocok dipasangkan dengan reactor 8%, sehingga perlu disesuaikan dengan mengganti kapasitor tersebut dengan rating tegangan yang sesuai yaitu 434.783 V atau yang lebih besar.

Dikarenakan adanya penyesuaian terhadap perubahan tegangan, maka untuk mendapatkan nilai kompensasi yang sama dengan kapasitor sebelumnya yaitu 400 V, 50 kVAR/step, nilai kapasitor sebesar 50 kVAR tersebut harus disesuaikan kembali dengan tegangan yang baru 434,783 V. Sehingga Daya Reaktif (Q1) menjadi sebagai berikut :

$$Q1 = Q / (1-p)$$

$$Q1 = 50 / 1-0,08$$

$$Q1 = 50 / 0,92 = 54,347 = 54$$

VAR/step

Dari hasil perhitungan di atas didapat data spesifikasi kapasitor yang baru yaitu sebesar :

434,783 V ; 54 kVAR/step. Namun data yang didapat dari hasil perhitungan tersebut masih berdasarkan frekuensi fundamental 50 Hz.

Besaran frekuensi untuk setiap tingkatan harmonisa adalah 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz, 350

Hz, untuk harmonisa pertama, ketiga, kelima, dan ketujuh. Agar kapasitor dapat bekerja di level aman untuk setiap tingkatan harmonisa. Perlu dilakukan evaluasi tegangan, arus, dan Nilai kVAR untuk setiap tingkatan harmonisa.\

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan standar International Electrotechnical Commission (IEC), kenaikan tegangan pada suatu sistim jaringan disebabkan karena mengalirnya arus harmonisa pada jaringan tersebut. Untuk perhitungan besarnya arus yang akan mengalir ke kapasitor untuk setiap tingkatan harmonisa, yang pertama kita tentukan adalah nilai impedansi kapasitor dan

impedansi induktor (reaktor) dengan menggunakan rumus :

- $X_C = 1 / (2 \times \pi \times f \times C)$
- $X_L = 2 \times \pi \times f \times L$

Total impedansi dikarenakan Reaktor dan Kapasitor yang terhubung seri adalah :

- $|X_L - X_C|$

Nilai  $X_C$  dan  $X_L$  yang didapat dari kedua rumus diatas sangat dipegaruhi oleh nilai frekuensi, dan pada kasus harmonisa ini, untuk setiap tingkatan harmonisa, nilai  $X_C$  dan  $X_L$  akan berubah. Mencari Nilai Impedansi Kapasitor ( $X_C$ ) dan Reaktor ( $X_L$ ).

Sekarang akan kita coba hitung nilai  $X_L$  dan  $X_C$ . Pada contoh diawal telah didapatkan nilai kVAR baru sebesar 54 kVAR pada tegangan

434,783 V dengan nilai reactor 8

%. Dengan menggunakan rumus :

- $X_C = (U_2)^2 / Q$ ,

Sehingga nilai  $X_C = 434,783 / 54 \text{ k} = 3,5006 \text{ ohm}$

Dengan diketahuinya nilai reactor  $P = 8$  %, nilai impedansi  $X_L$  dapat dihitung, sebagai berikut :

- $P = X_L / X_C$
- $0,08 = X_L / 8,696$
- $X_L = 8,696 \times 0,08$
- $X_L = 0,695 \text{ ohm}$

Setelah nilai  $X_C$  dan  $X_L$  didapat, yaitu 3,5006 ohm dan 0,695 ohm, langkah berikutnya adalah menghitung nilai impedansi kapasitor ( $X_C$ ) dan reaktor ( $X_L$ ) untuk setiap frekuensi tingkatan harmonisa.

Nilai Impedansi Kapasitor ( $X_C$ ) dan Reaktor ( $X_L$ ) Pada Tiap Tingkat Harmonisa Besarnya frekuensi harmonisa adalah : Nilai frekuensi untuk setiap tingkatan harmonisa adalah kelipatan tingkatan harmonisa dikali dengan nilai frekuensi fundamental. Sehingga jika frekuensi 50 Hz maka besarnya frekuensi untuk harmonisa ke 5 adalah :

$$= 5 \times 50 = 250 \text{ Hz.}$$

Sedangkan untuk harmonisa ke 3 besarnya frekuensi untuk harmonisa ke 3 adalah :  $= 3 \times 50 = 150 \text{ Hz.}$

Formula untuk  $X_C$  dan  $X_L$

- $X_C = 1 / (2 \times \pi \times f \times C)$

- $X_L = 2 \times \pi \times f \times L$

Misalkan sekarang kita mengukur nilai XC dan XL untuk harmonisa ke 3, maka dari formula diatas nilai frekuensi untuk setiap tingkatan harmonisa yaitu 3 x 50 Hz, sehingga untuk tingkatan harmonisa ke 3, nilai XC adalah :

- $X_C = 1 / ( 2 \times \pi \times f \times C )$ ..... pada 50 Hz
- $X_{C3} = 1 / ( 2 \times \pi \times 3 \times f \times C )$ .pada 150 Hz (harmonisa ketiga)
- Atau  $X_{C3} = X_C / 3$

Sedangkan untuk XL adalah :

- $X_L = 2 \times \pi \times f \times L$  ..... ada 50 Hz
- $X_{L3} = 2 \times \pi \times 3 \times f \times L$ .... pada 150 Hz (harmonisa ketiga)
- Atau  $X_{L3} = X_L \times 3$

Berdasarkan hal diatas, untuk tingkatan harmonisa yang lainnya dapat kita hitung nilai impedansi kapasitor XC dan nilai impedansi reaktor XL sbb :

- Harmonisa tingkat 1;  $X_{C1} = 3,5006$  ;  $X_{L1} = 0,695$
- Harmonisa tingkat 3;  $X_{C3} = 3,5006 / 3 = 1,167$  ;  $X_{L3} = 0,695 \times 3 = 2,085$
- Harmonisa tingkat 5;  $X_{C5} = 3,5006 / 5 = 0,7$  ;  $X_{L5} = 0,695 \times 5 = 3,475$
- Harmonisa tingkat 7;  $X_{C7} = 3,5006 / 7 = 0,5$  ;  $X_{L7} = 0,695 \times 7 = 4,865$

Dari hasil perhitungan diatas telah didapat nilai impedansi XC dan XL untuk setiap tingkatan harmonisa.

Telah disebutkan diawal, standar IEC EN

61000-2-2, kenaikan tegangan untuk setiap tingkatan harmonisa adalah :

- $U_1 = \%106 \times U_N = 1,06 \times 400 = 424$  V
- $U_3 = \%0.5 \times U_N = 0,005 \times 400 = 2$  V
- $U_5 = \%5 \times U_N = 0,05 \times 400 = 20$  V
- $U_7 = \%5 \times U_N = 0,05 \times 400 = 20$  V

Nilai Arus untuk setiap tingkatan harmonisa diatas adalah :

- $I_{h1} = U_1 / (1,732 \times |X_L - X_C|)$

Sehingga :

- Harmonisa tingkat 1 :  
 $U_1 = 106 \% (106 \% \text{ of fundamental})$  ;  $I_1 = 1,06 * 400 / (1,732 * |3,5006 - 0,695|) = 87,257$  A
- Harmonisa tingkat 3 :  
 $U_3 = 0,5\%$   $I_3 = 0,005 \times 400 / (1,732 \times |1,167 - 2,085|) = 1,258$  A
- Harmonisa tingkat 5 :

$$U_5 = 5\% I_5 = 0,05 \times 400 / (1,732 \times |0,7 - 3,475|) = 4,161$$
 A

- Harmonisa tingkat 7 :

$$U_7 = 5\% I_7 = 0,05 \times 400 / (1,732 \times |0,5 - 4,865|) = 2,645$$
 A

Untuk arus total harmonisa adalah :

- $I_S$  (Arus total Harmonisa) =  $\sqrt{(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2)} = \sqrt{(87,257^2 + 1,258^2 + 4,161^2 + 2,645^2)} = 9,763$  A

Dengan demikian, arus maksimum yang mengalir ke kapasitor adalah 9,763 A. dan dikarenakan terpasang seri dengan reactor sebesar 8 %, maka reactor harus dapat menahan arus maksimum sekitar  $1,05 \times I_S = 1,05 \times 9,763$  A = 10,25 A ( 1,05 adalah safety factor ).

Untuk menghitung Tegangan pada kapasitor tersebut digunakan formula berikut :

$$U_h = 1,732 \times I_h \times X_C / h$$

dimana :

$U_h$  = Tegangan pada kapasitor pada tingkatan harmonisa h

$I_h$  = Arus harmonisa pada tingkatan harmonisa h

$X_C$  = Impedansi kapasitor

$h$  = Tingkatan harmonisa

Sehingga dari rumus diatas didapat hasil perhitungan sebagai berikut :

- Harmonisa tingkat 1 :  
 $U_1 = 8 \%$  ;  $I_1 = 87,257$  A ; maka  $U_1 = 1,732 \times 87,257 \times 3,5006 / 1 = 529,042$  V
- Harmonisa tingkat 3 :  
 $U_3 = 0,5 \%$  ;  $I_3 = 1,258$  A ; maka  $U_3 = 1,732 \times 1,258 \times 3,5006 / 3 = 2,542$  V
- Harmonisa tingkat 5 :  
 $U_5 = 5 \%$  ;  $I_5 = 4,161$  A ; maka  $U_5 = 1,732 \times 4,161 \times 3,5006 / 5 = 5,046$  V
- Harmonisa tingkat 7 :  
 $U_7 = 5 \%$  ;  $I_7 = 2,645$  A ; maka  $U_7 = 1,732 \times 2,645 \times 3,5006 / 7 = 2,291$  V

Sehingga Tegangan maksimum kapasitor

$$= U_1 + U_3 + U_5 + U_7 = 529,042 + 2,542 + 5,046 + 2,291 = 538,921$$
 V

Untuk perbaikan faktor daya dengan kapasitor yang terpasang seri dengan reactor, maka tegangan kapasitor yang dipakai adalah 538,921 V. Apabila nilai kapasitor dengan tegangan 538,921 V tidak ada dipasaran, maka

dipilih nilai tegangan kapasitor yang lebih besar dan mendekati nilai 538,921 V tersebut.

Seandainya tegangan kapasitor yang mendekati adalah 550 V, maka nilai kVAR yang sebelumnya adalah 54 kVAR harus disesuaikan kembali dengan nilai tegangan kapasitor 550 V tersebut.

Untuk mendapatkan nilai kVAR dengan tegangan kapasitor 550 V, dilakukan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q2 &= Q1 \times (V^2 / V1^2) \\ &= 54 \text{ kVAR} \times (550^2 / 434,783^2) \\ &= 86,412 \text{ Kvar} \end{aligned}$$

Sehingga apabila menggunakan kapasitor dengan satuan 54 kVAR /step pada tegangan 434,783 V, dan reactor 8% terpasang seri dengan nilai impedansi reaktor 0,695 ohm, maka arus maximum yang akan mengalir adalah 10,25 A. Perlu dilakukan penyesuaian terhadap tegangan dan arus harmonisa sehingga untuk kapasitor tersebut, dikarenakan terhubung seri dengan reaktor, diperlukan rating kapasitor sebesar 550 volt dengan daya reaktif sebesar 86,412 kVAR.

Membandingkan nilai IHD dan THD sebelum ditambahkan Reaktor Filter dan Sesudah ditambahkan Reaktor Filter Berdasarkan standar IEEE 519-1992 untuk Batasan nilai dari IHD dan THD sudah ditentukan yaitu 3% untuk IHD dan 5% untuk THD, dari perhitungan tegangan Harmonisa sebelum dipasang raktor filter 8% dan setelah dipasang sudah diperhitungkan maka akan ditambahkan table dan barchart untuk mengetahui orde harmonisa mana saja yang melewati dari nilai Batasan menurut IEEE 519-1992.

## 5. SIMPULAN

Dari hasil uji coba yang dilakukan maka dapat disimpulkan, Nilai frekuensi untuk setiap tingkatan harmonisa adalah kelipatan tingkatan harmonisa dikali dengan nilai frekuensi fundamental. Nilai Impedansi Kapasitor XC dan nilai Impedansi Reaktor XL untuk tingkatan harmonisa sbb :

- a. Harmonisa tingkat 1;  
XC1 = 3,5006 ; XL1 = 0,695
- b. Harmonisa tingkat 3;  
XC3 = 3,5006 / 3  
= 1,167 ; XL3 = 0,695 x 3  
= 2,085
- c. Harmonisa tingkat 5;

$$\begin{aligned} XC5 &= 3,5006 / 5 \\ &= 0,7 ; XL5 = 0,695 \times 5 \\ &= 3,475 \end{aligned}$$

- d. Harmonisa tingkat 7;

$$\begin{aligned} XC7 &= 3,5006 / 7 \\ &= 0,5 ; XL7 = 0,695 \times 7 \\ &= 4,865 \end{aligned}$$

Perbaikan faktor daya dengan kapasitor yang terpasang seri dengan reaktor, maka tegangan kapasitor yang dipakai adalah 538,921 V dengan nilai reaktor 8 %. Apabilanilai kapasitor dengan tegangan 538,921 V tidak ada dipasaran, maka dipilih nilai tegangan kapasitor yang lebih besar dan mendekati nilai 538,921 V tersebut. Tegangan kapasitor yang mendekati adalah 550V, maka nilai kVAR yang sebelumnya adalah 54 kVAR harus disesuaikan kembali dengan nilai tegangan kapasitor 550 V tersebut. Dari hasil perhitungan didapat 86,412 kVAR.

Sehingga apabila menggunakan kapasitor dengan satuan 54 kVAR /step pada tegangan 434,783 V, dan reactor 8% terpasang seri dengan nilai impedansi reaktor 0,695 ohm, maka arus maximum yang akan mengalir adalah 10,25 A. Perlu dilakukan penyesuaian terhadap tegangan dan arus harmonisa sehingga untuk kapasitor tersebut, dikarenakan terhubung seri dengan reaktor, diperlukan rating kapasitor sebesar 550 volt dengan daya reaktif sebesar 86,412 kVAR.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

H. Fujita dan H. Akagi. "A practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems—Series Connection of Passive and Active Filters", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 27, no. 6, pp. 1020–1025, 1991.

Hubert, Charles. "Electric Circuits AC/DC". McGraw-Hill International. 1982.

Chen, Wai-Kai. "The Electrical Engineering Handbook". Elsevier Academic Press. 2004.

Penangsang, Ontoseno. "Diktat Kuliah

*Kualitas Daya Listrik*". ITS.  
2011.

Fourier, J.B.J. "*Theorie Analytique De La  
Chaleur*".  
Paris.1822.

Arrillaga, J, D. A. Bradley, P. S. Bodger.  
"*Power System Harmonics*". John Wiley  
& Sons. 1985.

IEEE Std. 1531-2003. "*Recommended  
Practises and Requirements for  
Harmonic Control in Electrical Power  
Systems*".

Sudiharto, Indhana, dkk. "*Teknik  
Pengurangan Arus Inrush dan  
Pengurangan Harmonisa pada  
Kapasitor Bank untuk Beban Non  
Linier*".2003

Hadi, Ir. Abdul. "*Sistem Distribusi Daya  
Listrik*" terjemahan dari AS Pabla  
*Electric Power Distribution Systems*  
McGraw-Hill. Erlangga. 1986