

Pengaruh Harmonisa Pada Gardu Trafo Tiang Daya 100 kVA di PLN APJ Surabaya Selatan

Julius Sentosa Setiadji¹, Tabrani Machmudsyah², Yohanes Cipta Wijaya³

¹&³Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra

²PT. PLN(Persero) Distribusi Jawa Timur

E-mail : julius@petra.ac.id

ABSTRAK

Dengan kemajuan teknologi informasi maka komputer dan printer semakin banyak digunakan di rumah tinggal. Di sisi lain, krisis energi menjadi pemicu meningkatnya penggunaan Lampu Hemat Energi (LHE). Komputer, printer & LHE merupakan beban non linier yang menjadi penyebab munculnya harmonisa yang dapat mengganggu sistem distribusi listrik termasuk Trafo Tiang (TT). Dengan melakukan pengukuran di TT maka dapat diketahui bahwa pada TT timbul arus harmonisa yang dapat meningkatkan rugi-rugi pada TT. Setelah dianalisa, diperoleh bahwa semakin besar pembebanan pada TT (83,14%) maka rugi-rugi beban akan semakin besar (6%) dan THD (Total Harmonic Distortion) arus akan naik (18,3%) & melebihi standard THD (8%)

Keywords: harmonisa, trafo tiang.

ABSTRACT

Increasing in Information Technology also increase the use of computer and printer at home. On other hand the energy crisis causing "Saving Energy Lamp" (LHE) become largely used nowadays. Computer, Printer and "Saving Energy Lamp" are non linear load that cause a power harmonic distortion in the power system distribution grid, including in the pole-mounted transformer. The harmonic current that can caused transformer losses can be measured at pole-mounted transformer. In conclusion, increasing load at pole-mounted transformer (83,14%) will raise losses at load (6%) and current THD (Total Harmonic Distortion) (18.3%). In this measurement the current harmonic is higher than standard THD (8%).

Keywords : harmonic, pole-mounted transformer

PENDAHULUAN

Pertumbuhan listrik dari suatu negara adalah dua kali dari pertumbuhan ekonominya. Dengan adanya pertumbuhan ekonomi, maka daya beli masyarakat juga meningkat. Meningkatnya daya beli ini ditandai dengan semakin banyaknya peralatan – peralatan elektronik yang dimiliki oleh seseorang salah satunya adalah komputer. Penggunaan komputer pada masa sekarang ini sangat penting karena dengan komputer suatu pekerjaan menjadi lebih mudah. Tetapi di sisi lain, penggunaan komputer mempunyai pengaruh dalam sistem distribusi listrik. Komputer merupakan salah satu contoh dari beban non linier, sedangkan beban non linier merupakan penyebab munculnya harmonisa yang dapat mengganggu sistem distribusi listrik. Adanya harmonisa ini menyebabkan gelombang arus dan tegangan menjadi cacat dan tidak sinusoidal lagi.

Harmonisa mempunyai pengaruh pada sistem distribusi listrik. Salah satu komponen dalam sistem distribusi listrik adalah transformator. Pengaruh

harmonisa pada transformator adalah bertambahnya rugi-rugi beban (P_{LL}), rugi I^2R dan rugi *Eddy Current*. Selain itu juga dapat menyebabkan pembebanan lebih pada kawat netral.

TEORI HARMONISA

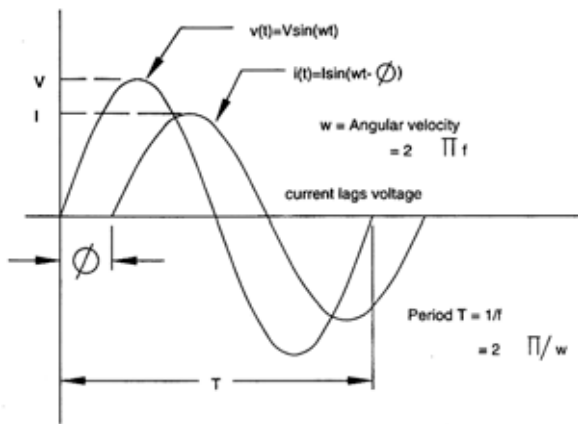
Dalam sistem tenaga listrik yang ideal, bentuk gelombang tegangan yang disalurkan ke peralatan konsumen dan bentuk gelombang arus yang dihasilkan adalah gelombang sinus murni.

Harmonisa adalah gangguan yang terjadi dalam sistem distribusi tenaga listrik yang disebabkan adanya distorsi gelombang arus dan tegangan. Distorsi gelombang arus dan tegangan ini disebabkan adanya pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan bulat dari frekuensi fundamentalnya.[3]

Harmonisa bisa muncul akibat adanya beban-beban non linier yang terhubung ke sistem distribusi. Beban non liner ini umumnya adalah peralatan elektronik yang di dalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor, yang dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelom-

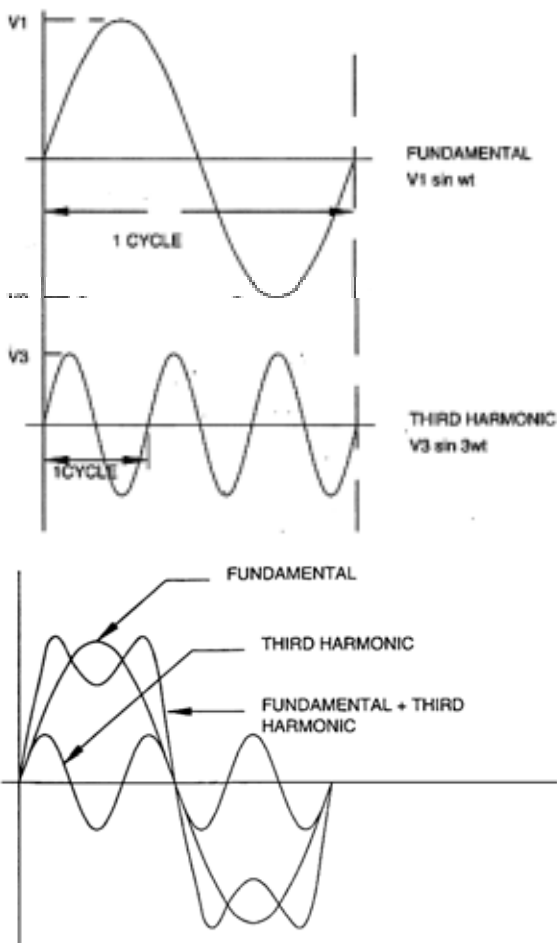
Catatan: Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juni 2007. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 7, nomor 1, September 2007.

bang dari sumber tegangan. Beberapa contoh beban non linear antara lain : *variable speed drive*, komputer, printer, lampu *fluorescent* yang menggunakan elektronik ballast.



Gambar 1. Gelombang Sinus Arus dan Tegangan

Gelombang non sinusoidal dapat terbentuk dengan menjumlahkan gelombang – gelombang sinusoidal, seperti terlihat pada gambar 2. [3]



Gambar 2. Gelombang Fundamental, Harmonik Ketiga & Hasil Penjumlahannya

Individual Harmonic Distortion (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari harmonisa individual dan nilai RMS dari fundamental.

Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai RMS dari komponen harmonisa dan nilai RMS dari fundamental. Hubungan antara THD dengan IHD dapat dilihat dari persamaan berikut : [3]

$$THD = \sqrt{IHD_2^2 + IHD_3^2 + IHD_4^2 + \dots + IHD_n^2} \quad (1)$$

Standar harmonisa berdasarkan standar IEEE 519. Ada dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa. Yaitu batasan untuk harmonisa arus, dan batasan untuk harmonisa tegangan. Untuk standard harmonisa arus, ditentukan oleh rasio I_{sc}/I_L . I_{sc} adalah arus hubung singkat yang ada pada PCC (*Point of Common Coupling*), sedangkan I_L adalah arus beban fundamental nominal. Sedangkan untuk standard harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai. [6]

Tabel 1. Standard Harmonisa Arus

| I_{sc}/I_{LOAD} | HARMONIC ORDER | | | | | Total Harmonic Distortion |
|-------------------|----------------|-------|-------|-------|-----|---------------------------|
| | <11 | 11-16 | 17-22 | 23-24 | >35 | |
| < 20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20-50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50-100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100-1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| > 1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

Where I_{sc} = Maximum short circuit current at point of common coupling.
 And I_L = Maximum demand load current (fundamental frequency) at point of common coupling.
 TDD = Total demand distortion (RMS) in % of maximum demand

$$TDD = \sum_{h=2}^H \left(\frac{I_h^2}{I_L^2} \right)^{1/2} \times 100\% = \text{Total harmonic distortion}$$

Tabel 2. Standard Harmonisa Tegangan

| Maximum Distortion (in %) | SYSTEM VOLTAGE | | |
|---------------------------|----------------|-------------|----------|
| | Below 69 kV | 69 - 138 kV | > 138 kV |
| Individual Harmonic | 3.0 | 1.5 | 1.0 |
| Total Harmonic | 5.0 | 2.5 | 1.5 |

(For conditione lasling more than one hour. Shortarperiode increase limit by 50%)

PENGARUH HARMONISA PADA TRANSFORMATOR

Transformator dirancang untuk menyalurkan daya yang dibutuhkan ke beban dengan rugi-rugi minimum pada frekuensi fundamentalnya. Arus harmonisa dan tegangan secara signifikan akan menyebabkan panas lebih. Ada 3 pengaruh yang menimbulkan panas lebih pada transformator ketika arus beban mengandung komponen harmonisa: [2]

- *Arus rms*. Jika transformator kapasitasnya hanya untuk kVA yang dibutuhkan beban, arus harmonisa dapat mengakibatkan arus rms trafo menjadi lebih besar dari kapasitasnya. Meningkatnya arus

rms menyebabkan rugi-rugi pada penghantar juga bertambah.

- *Eddy-current losses*. Arus induksi di dalam trafo yang disebabkan oleh fluks magnetik. Arus induksi ini mengalir di belitan, di inti, dan di badan penghantar lain yang terlindungi oleh medan magnet dari transformator dan menyebabkan panas lebih. Komponen rugi-rugi trafo ini meningkat dengan kuadrat dari frekuensi arus penyebab *eddy current*. Oleh karena itu, ini menjadi komponen yang sangat penting dari rugi-rugi trafo yang menyebabkan pemanasan oleh harmonisa.
- *Rugi Inti*. Peningkatan rugi inti yang disebabkan oleh harmonisa bergantung pada pengaruh harmonisa pada tegangan yang diberikan dan rancangan dari inti trafo. Semakin besar distorsi tegangan maka semakin tinggi pula *eddy current* di laminasi inti. Peningkatan rugi inti karena harmonisa tidak sekritis dua rugi – rugi di atas

TEORI PERHITUNGAN LOAD LOSS (P_{LL}) TRAFO

Untuk menghitung *load loss* trafo dalam per unit, dapat dicari dengan rumus sebagai berikut : [5]

$$P_{LL} = \sum I_h^2 + (\sum I_h^2 \times h^2) P_{EC-R} \quad (\text{p.u}) \quad (2)$$

dimana:

P_{EC-R} = faktor *eddy current loss*

h = angka harmonisa

I_h = arus harmonisa

$\sum I_h^2$ merupakan komponen rugi I R dalam p.u,

sedangkan $(\sum I_h^2 \times h^2) P_{EC-R}$ merupakan komponen rugi *eddy current* dalam p.u.

Untuk mencari faktor *eddy current loss* dapat dilihat pada tabel 3.[5]

Tabel 3. Nilai dari P_{EC-R}

| Type | MVA | Voltage | % P_{EC-R} |
|------------|------------|----------|--------------|
| Dry | ≤ 1 | | 3 – 8 |
| | ≥ 1.5 | 5 kV HV | 12 – 20 |
| | ≤ 1.5 | 15 kV HV | 9 – 15 |
| Oil-filled | ≤ 2.5 | 480 V LV | 1 |
| | 2.5 to 5 | 480 V LV | 1 – 5 |
| | > 5 | 480 V LV | 9 – 15 |

Pengumpulan Data

Spesifikasi Trafo Tiang adalah sebagai berikut :

Buatan Pabrik : UNINDO

Tipe : Outdoor

Daya : 100 kVA

Tegangan Kerja : 21/20,5/20/19,5/19 kV //400 V
 Arus : 3,1 – 186 A
 Hubungan : Dyn5
 Impedansi : 4%
 Trafo : 1 x 3 fasa

Tabel 4. Data Hasil Pengukuran Trafo Tiang

| Phasa | Tegangan (V) | Arus (A) | Daya Aktif (kW) | Daya Nyata (kVA) | Cos ϕ | VTHD (%) | ITHD (%) |
|-------|--------------|----------|-----------------|------------------|------------|----------|----------|
| R | 223 | 115.3 | 24 | 26 | 0.94 | 3.1 | 12.5 |
| S | 224 | 113 | 23 | 25 | 0.92 | 2.4 | 18.3 |
| T | 221 | 120 | 24 | 26 | 0.92 | 2.4 | 18.3 |

Tabel 5. Kandungan Harmonisa Arus Ganjil

| Phasa | Harmonik ke : | IHD (%) | Arus (A) | Urutan |
|--------------|---------------|---------|----------|---------|
| R | 3 | 10.7 | 12.34 | Nol |
| | 5 | 5.3 | 6.11 | Negatif |
| | 7 | 2.4 | 2.77 | Positif |
| | 9 | 2.6 | 3.00 | Nol |
| | 11 | 0.7 | 0.81 | Negatif |
| | 13 | 0.6 | 0.69 | Positif |
| | 15 | 0.9 | 1.04 | Nol |
| S | 3 | 13.9 | 15.71 | Nol |
| | 5 | 8.6 | 10.51 | Negatif |
| | 7 | 6.7 | 7.57 | Positif |
| | 9 | 4.1 | 4.63 | Nol |
| | 11 | 0.6 | 0.68 | Negatif |
| | 13 | 0.3 | 0.34 | Positif |
| | 15 | 0.8 | 0.90 | Nol |
| T | 3 | 12.4 | 14.88 | Nol |
| | 5 | 10.2 | 12.24 | Negatif |
| | 7 | 7.1 | 8.52 | Positif |
| | 9 | 4.9 | 5.88 | Nol |
| | 11 | 1.1 | 1.32 | Negatif |
| | 13 | 0.9 | 1.08 | Positif |
| | 15 | 1.4 | 1.08 | Nol |
| Netral | 3 | 58.1 | 36.26 | Nol |
| In = 62.41 A | 5 | 10.6 | 6.62 | Negatif |
| | 7 | 8.1 | 5.06 | Positif |
| | 9 | 21.3 | 13.29 | Nol |
| THD = 6601% | 11 | 5.7 | 3.56 | Negatif |
| | 13 | 4.6 | 2.87 | Positif |
| | 15 | 17.2 | 10.73 | Nol |

Analisa Perhitungan Arus Hubung Singkat

$Z = 4\%$

$S = 100 \text{ kVA}$

$V = 0,4 \text{ kV}$ fasa - fasa

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{100000}{\sqrt{3} \times 400} = 144,34 \text{ Ampere}$$

$$I_{SC} = \frac{kVA \times 100}{\%Z \times \sqrt{3} \times kV} = \frac{100 \times 100}{4 \times \sqrt{3} \times 0,4} = 3608,44 \text{ Ampere}$$

Analisa Pembebanan Pada Trafo

Tabel 6. Analisa Pembebanan pada Trafo Tiang

| Phasa | Arus nominal (A) | Arus Full load (A) | % Pembebanan |
|-------|------------------|--------------------|--------------|
| R | 115,3 | 144,34 | 79,88 |
| S | 113 | 144,34 | 78,29 |
| T | 120 | 144,34 | 83,14 |

Dari tabel di atas terlihat bahwa pembebanan pada ketiga fasa di Trafo tiang hampir seimbang (rata-rata pembebanan ketiga fasa adalah 80.43 %).

Analisa THD (Total Harmonic Distortion) pada Trafo Tiang

Tabel 7. Analisa THD Arus pada Trafo Tiang

| Phasa | I _L | I _{sc} / I _L | Range | Pengukuran h < 11 (%) | Standard h (%) | Melebihi standard/ Tidak | Lebih (%) |
|--|----------------|----------------------------------|-------|-----------------------|----------------|--------------------------|-----------|
| Analisa THD Arus Orde < 11 | | | | | | | |
| R | 79,88 % | I _f 31,296 | 20-50 | 12.45 | 7 | Melebihi | 5.45 |
| S | 78,29 % | I _f 31,933 | 20-50 | 18.13 | 7 | Melebihi | 11.13 |
| T | 83,14 % | I _f 30,070 | 20-50 | 18.23 | 7 | Melebihi | 11.23 |
| Analisa THD Arus Orde 11 s/d 16 | | | | | | | |
| R | 79,88 % | I _f 31,296 | 20-50 | 1.29 | 3.5 | Tidak Melebihi | |
| S | 78,29 % | I _f 31,933 | 20-50 | 1.04 | 3.5 | Tidak Melebihi | |
| T | 83,14 % | I _f 30,070 | 20-50 | 1.99 | 3.5 | Tidak Melebihi | |
| THD Arus Total | | | | | | | |
| R | 79,88 % | I _f 31,296 | 20-50 | 12.5 | 8 | Melebihi | 4.5 |
| S | 78,29 % | I _f 31,933 | 20-50 | 18.3 | 8 | Melebihi | 10.3 |
| T | 83,14 % | I _f 30,070 | 20-50 | 18.3 | 8 | Melebihi | 10.3 |

Dari tabel di atas terlihat bahwa THD Arus pada orde 11 s/d 16 tidak melebihi standard sedangkan THD Arus pada orde < 11 dan THD Arus total melebihi standard. Hal ini tidak terlalu bermasalah karena rata-rata pembebanan ketiga fasa adalah 80.43 % sedangkan rata-rata THD Arus pada orde < 11 adalah 16.29 % dan rata-rata THD Arus total adalah 16.37 % sehingga belum melewati kapasitas trafo.

Analisa THD Tegangan

Tabel 8. Analisa THD Tegangan pada Trafo Tiang

| Phasa | VTHD Pengukuran (%) | VTHD Standard (%) | Keterangan |
|-------|---------------------|-------------------|-------------------------|
| R | 2.4 | 5 | Tidak melebihi standard |
| S | 2.4 | 5 | Tidak melebihi standard |
| T | 2.4 | 5 | Tidak melebihi standard |

Dari tabel di atas terlihat bahwa THD tegangan pada ketiga fasa masih di bawah Standard

Analisa Pengaruh Harmonisa pada Transformator

- Terhadap Netral Traformator

THD arus urutan nol fasa

$$R = (I_{HD_3}^2 + I_{HD_9}^2 + I_{HD_{15}}^2)^{1/2}$$

$$= (10,7^2 + 2,6^2 + 0,9^2)^{1/2} = 11,05\%$$

$$I_{urutan\ nol\ R} = 11,05\% \times I_R = 11,05\% \times 115,3 = 12,74\text{ A}$$

Tabel 9. Pengaruh Harmonisa pada Trafo Tiang

| Phasa | I _{urutan nol} (A) | THD Arus _{urutan nol} (%) |
|--------|-----------------------------|------------------------------------|
| R | 12.74 | 11.05 |
| S | 16.40 | 14.51 |
| T | 16.09 | 13.41 |
| Netral | 45.23 | 64.23 |

Dari tabel di atas terlihat bahwa arus harmonisa urutan nol pada masing – masing fasa saling menjumlah di netral trafo.

- Terhadap Rugi-rugi Transformator
Berdasarkan hasil pengukuran maka perhitungan rugi-rugi beban (P_{LL}) dalam per unit pada fasa R adalah sebagai berikut :

| h | I _h (A) | I _h (pu) | I _h ² | I _h ² x h ² |
|----------|--------------------|---------------------|-----------------------------|--|
| 1 | 115.3 | 1.00 | 1.0000 | 1.0000 |
| 3 | 12.34 | 0.14 | 0.0196 | 0.1764 |
| 5 | 6.11 | 0.07 | 0.0049 | 0.1225 |
| 7 | 2.77 | 0.03 | 0.0009 | 0.0441 |
| 9 | 3.00 | 0.03 | 0.0009 | 0.0729 |
| 11 | 0.81 | 0.01 | 0.0001 | 0.0121 |
| 13 | 0.69 | 0.01 | 0.0001 | 0.0169 |
| 15 | 1.04 | 0.01 | 0.0001 | 0.0225 |
| Jumlah : | | | 1.0266 | 1.4674 |

$$P_{LL} = \sum I_h^2 + (\sum I_h^2 \times h^2) P_{ECR}$$

dimana nilai P_{ECR} sesuai tabel 3 adalah 0,01

$$= 1,0266 + 1,4674 \times 0,01$$

$$= 1,04 \text{ p.u}$$

Sesuai rumus 2, akibat adanya komponen harmonisa maka Rugi I² R bertambah sebesar 0,0266 p.u dan Rugi eddy current bertambah sebesar 0,0047 p.u.

Tabel 10. Perhitungan rugi-rugi beban (P_{LL}) dalam per unit

| Phasa | ∑ I _h ² (p.u) | ∑ I _h ² x h ² (p.u) | P _{EC-R} (p.u) | P _{LL} (p.u) | Pertambahan I ² R bahan (p.u) | Pertambahan Eddy Current (p.u) |
|-------|-------------------------------------|--|-------------------------|-----------------------|--|--------------------------------|
| R | 1,0266 | 1,4674 | 0,01 | 1,04 | 0,0266 | 0,0047 |
| S | 1,0344 | 1,7832 | 0,01 | 1,05 | 0,0344 | 0,0078 |
| T | 1,0382 | 2,0222 | 0,01 | 1,06 | 0,0382 | 0,0102 |

Dari tabel di atas terlihat bahwa semakin tinggi total arus harmonisa pada tiap fasa maka semakin tinggi pula rugi-rugi beban (P_{LL}), pertambahan rugi I²R dan pertambahan rugi Eddy Current.

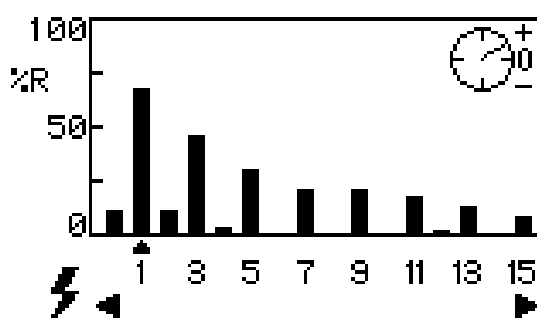
Tabel 11. Rangkuman Analisa Pembebanan, Standard THD Arus, dan Rugi-rugi Trafo Tiang

| Phasa | % Load | I _{sc} / I _L Standard Arus (%) | THD Arus (%) | Rugi-rugi (pu) |
|-------|--------|--|--------------|----------------|
| R | 79,88 | 31,296 | 8 | 12.5 |
| S | 78,29 | 31,933 | 8 | 18.3 |
| T | 83,14 | 30,070 | 8 | 18.3 |

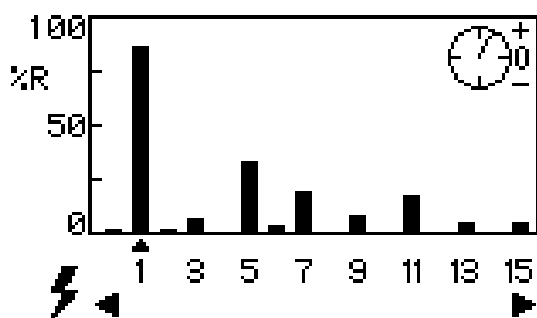
EVALUASI BEBAN NON LINIER

Spektrum harmonisa pada beberapa jenis beban non linier adalah sebagai berikut:

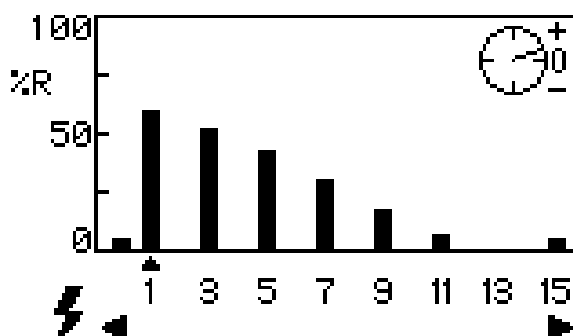
- Peralatan elektronik dengan SMPS (*Switch Mode Power Supply*) dan lampu *fluorescent* menghasilkan spektrum harmonisa dengan harmonisa ketiga yang dominan kemudian terus turun untuk harmonisa berikutnya.



- PWM *drive*, konverter menghasilkan spektrum harmonisa dengan harmonisa kelima yang dominan, sedangkan harmonisa ketiga cukup kecil.



Sedangkan spektrum harmonisa pada masing – masing trafo tiang berdasarkan pengukuran yaitu harmonisa ketiga yang dominan kemudian terus turun untuk harmonisa berikutnya. Jadi dapat disimpulkan bahwa beban non linier yang dominan pada trafo tiang adalah lampu *fluorescent* dan peralatan elektronik dengan SMPS seperti komputer, *printer*, mesin foto kopi, dan sejenisnya.



KESIMPULAN

Berdasarkan analisa data di atas, terlihat bahwa THD arus pada trafo tiang melebihi standar sedangkan THD tegangan pada trafo tiang tidak ada yang melebihi standar.

Sesuai tabel 11, semakin besar pembebanan pada trafo (83,14%), maka Rugi-rugi trafo tiang akan semakin besar (6%), dan THD arus akan naik (18,3%) & melebihi standar (8%).

Beban non linier yang dominan pada trafo tiang adalah lampu *fluorescent* dan peralatan elektronik seperti komputer, *printer*, mesin foto kopi, dan sejenisnya.

DAFTAR PUSKATA

- [1] Bharat Heavy Electrical, *Transformers*, New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., 2003.
- [2] J. Arrilaga, Bradley D.A., Bodger P.S., *Power System Harmonics*, New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [3] C. Sankaran, *Power Quality*, USA : CRC Press LLC, 2002.
- [4] Glen A. Mazur, *Power Quality. Measurement And Troubleshooting*, Illinois: American Technical Publisher Inc., 1999.
- [5] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, *Electrical Power System Quality*, New York: McGraw-Hill, 1996.
- [6] James J. Burke, *Power Distribution Engineering – Fundamentals And Applications*, New York: Marcel Dekker Inc., 1994.
- [7] Abdul Kadir, *Transformator*, Jakarta: PT. Elex Media Komputindo, 1989.
- [8] Anthony J. Pansini, *Electrical Distribution Engineering*, Singapore : McGraw-Hill, 1986.
- [9] Turan Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering*, Singapore: McGraw-Hill, Inc., 1986.