

Tabel 4.1. Daya terpasang di Laboratorium Teknik Elektro UMY

No	Data MCB Panel Listrik Laboratorium Teknik Elektro UMY	Nilai Ampere (A)	Kapasitas Daya (VA)
1.	Fasa R	16	3520
2.	Fasa S	32	7040
3.	Fasa T	32	7040
4.	Total Daya 3 Fasa	-	17600

4.1.1.2. Menghitung Arus Hubung Singkat Pada PCC

Data yang digunakan untuk menghitung arus hubung singkat pada PCC (*Point of Common Coupling*) gambar 4.1 adalah data yang tertera di *name plate* trafo gardu batang kampus utara Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Data-data trafo sebagai berikut :

Tabel 4.2. Data mekanis transformator kampus utara UMY

No	Data Pada <i>Name Plat</i> Transformator Zona Utara Gardu Batang UMY	Nilai dan Hubungan Trafo
1	Tegangan sisi primer	20 kV
2	Tegangan sisi sekunder	400 V
3	Daya tiga fasa	630 kVA
4	Arus pada tegangan tinggi	18.18 A
5	Arus pada tegangan rendah	909.32 A
6	Impedansi	4 Ohm
7	Phasa	3 Y

Jika diambil data-data sebagai berikut :

$$S_{basis3\phi} = 630 \text{ kVA}$$

$$V_{Lbasis} = 20 \text{ kV}$$

Dengan menggunakan persamaan [2.105] hingga [2.107] maka nilai basis daya semu, tegangan, dan impedansi dapat ditentukan.

$$S_{basis} = \frac{630}{3} = 210 \text{ kVA}$$

$$VL_{basis} = \frac{VLL}{\sqrt{3}} = \frac{20.000}{\sqrt{3}} = 11547 \text{ V}$$

$$I_{basis} = \frac{S_{basis}}{VL_{basis}} = \frac{210}{11547} = 18.18 \text{ A}$$

Nilai arus 18.18 A merupakan nilai arus pada sisi primer transformator.

Nilai impedansi basis dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan [2.107].

$$Z_{basis} = \frac{VL_{basis}}{I_{basis}} = \frac{11547}{18.18} = 635 \text{ } \Omega$$

Dengan mengambil nilai impedansi yang tertera di *name plate* trafo, maka dari persamaan [2.108], nilai impedansi per-unit adalah :

$$Z_{pu} = \frac{Z_{sebenarnya}}{Z_{basis}} = \frac{4}{635} = 0.006 \text{ pu}$$

Dari persamaan [2.109], nilai arus hubung singkat pada PCC gambar 4.1 dapat ditentukan nilainya :

$$I_{sc} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times kV \times \%Z} = \frac{630}{\sqrt{3} \times 20 \times 0.006} = 3031 \text{ A}$$

Karena rasio hubung singkat adalah perbandingan antara I_{sc}/I_L , maka nilai arus beban I_L juga dapat ditentukan melalui cara pendekatan menggunakan persamaan matematis atau dapat juga ditentukan langsung dari nilai arus maksimum yang ditarik beban kampus zona utara yang meliputi semua fakultas dan jurusan yang ada.

Karena penelitian tidak dilakukan di gardu UMY kampus eksak, maka nilai arus maksimum beban keseluruhan kampus tidak dapat diketahui dengan pasti. Untuk dapat mengetahui besarnya arus maksimum beban, hal ini dapat

dilakukan dengan cara pendekatan menggunakan persamaan matematis [2.110]

Dengan menggunakan data pada *name plat* transformator, maka arus beban maksimum dapat dihitung :

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} = \frac{630000}{\sqrt{3} \times 400} = 909.32 \text{ A} \Rightarrow I_L = \frac{S}{\sqrt{3} \times kV} = \frac{630000}{\sqrt{3} \times 0.4} = 909326 \text{ A}$$

Nilai arus 909.32 A merupakan nilai arus pada sisi sekunder transformator zona utara Universitas Muhammadiyah Yogyakarta seperti yang tertera pada tabel diatas.

Dari nilai perhitungan arus hubung singkat dan arus maksimum beban diatas, maka dapat ditentukan besarnya rasio hubung singkat dengan menggunakan persamaan [2.106].

$$\text{Rasio hubung singkat} = \frac{I_{sc}}{I_L} = \frac{3031}{909326} = 0.0033$$

Nilai rasio hubung singkat I_{SC}/I_L sebesar 0.0033 diatas masuk pada *range* $I_{SC}/I_L < 20$ menurut standar IEEE 519.1992. IEEE menetapkan nilai distorsi harmonisa arus maksimum yang di ijinakan untuk nilai $I_{SC}/I_L < 20$ adalah sebesar 5 % pada tegangan sistem < 69 kV atau 20 kV untuk sistem kelistrikan kampus Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Nilai ini berlaku untuk kampus zona utara, termasuk Fakultas Teknik, Fakultas Kedokteran, Fakultas Pertanian, Laboratorium Kedokteran, Laboratorium Pertanian dan Laboratorium Teknik

4.2. Analisis Pembebanan Non-Linier Data Hasil Pengukuran Dalam Kawasan Waktu dan Kawasan Fasa

Dalam melakukan analisis terhadap kualitas daya di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, analisa dan perhitungan akan dilakukan dalam kawasan waktu dan kawasan fasa. Dalam kawasan waktu, hal ini berlaku untuk semua perhitungan baik amplituda gelombang harmonisa, nilai rms, sudut fasa, THD, faktor daya dan lain-lain. Untuk tinjauan di kawasan fasa, hal ini hanya berlaku pada perhitungan ketidakseimbangan beban melalui diagram fasa, sebagai evaluasi kualitas daya di Laboratorium Teknik Elektro.

4.2.1. Perhitungan Fasa R Kondisi Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011

Sebagai langkah awal analisa dalam kawasan waktu, data pertama yang diambil sebagai sampel perhitungan adalah data pengukuran jam 09.00 sinyal non-sinus fasa R, S, T. Data tersebut ada pada lampiran A.1 pengukuran tanggal 27 Desember 2011. Dengan melihat spektrum amplituda harmonisa sinyal non-sinus fasa R lampiran A.1, harmonisa yang dominan adalah harmonisa ganjil. Dengan menggunakan persamaan [2.19] dan [2.32] amplituda dan sudut fasa masing-masing harmonisa dapat dihitung.

$$h = 1$$

$$h = 3$$

$$I_3 = \sqrt{0^2 + 0.9^2} = 0.9 \quad \theta_3 = \tan^{-1} \frac{B_3}{A_3} = \frac{0.9}{1} = 42^\circ = 0.73$$

$$h = 5$$

$$I_5 = \sqrt{0^2 + 0.7^2} = 0.7 \quad \theta_5 = \tan^{-1} \frac{B_5}{A_5} = \frac{0.7}{1} = 34.9^\circ = 0.61$$

$$h = 7$$

$$I_7 = \sqrt{0^2 + 0.3^2} = 0.3 \quad \theta_7 = \tan^{-1} \frac{B_7}{A_7} = \frac{0.3}{1} = 16.7^\circ = 0.29$$

$$h = 9$$

$$I_9 = \sqrt{0^2 + 0.1^2} = 0.1 \quad \theta_9 = \tan^{-1} \frac{B_9}{A_9} = \frac{0.1}{1} = 5.7^\circ = 0.099$$

$$h = 11$$

$$I_{11} = \sqrt{0^2 + 0.2^2} = 0.2 \quad \theta_{11} = \tan^{-1} \frac{B_{11}}{A_{11}} = \frac{0.2}{1} = 11.3^\circ = 0.197$$

$$h = 13$$

$$I_{13} = \sqrt{0^2 + 0.1^2} = 0.1 \quad \theta_{13} = \tan^{-1} \frac{B_{13}}{A_{13}} = \frac{0.1}{1} = 5.7^\circ = 0.099$$

$$h = 15$$

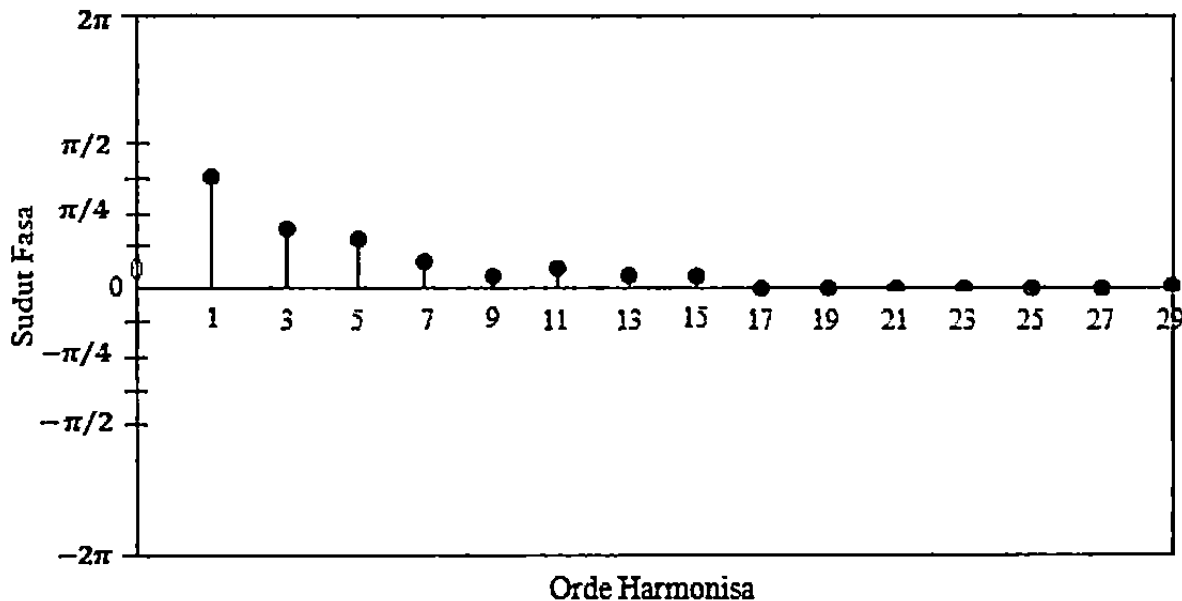
$$I_{15} = \sqrt{0^2 + 0.1^2} = 0.1 \quad \theta_{15} = \tan^{-1} \frac{B_{15}}{A_{15}} = \frac{0.1}{1} = 5.7^\circ = 0.099$$

Dari hasil perhitungan ini, maka sinyal periodik non-sinus pada lampiran A.1 pengukuran jam 09.00 fasa R dapat diurai dengan deret Fourier trigonometri persamaan [2.1], [2.18], [2.19] atau persamaan umum deret Fourier eksponensial

fungsi ganjil sinyal periodik non-sinus pada lampiran A.1 diberikan hingga harmonisa ke 15.

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sum_{h=1}^{15} I_n e^{j(h\omega_0 t - \theta + \theta_h)} \\
 &= 6.3e^{j(2\pi f t - 90^\circ + 1.41)} + 0.9e^{j(6\pi f t - 90^\circ + 0.73)} + 0.7e^{j(10\pi f t - 90^\circ + 0.61)} \\
 &+ 0.3e^{j(14\pi f t - 90^\circ + 0.29)} + 0.1e^{j(18\pi f t - 90^\circ + 0.099)} + 0.2e^{j(22\pi f t - 90^\circ + 0.197)} \\
 &+ 0.1e^{j(26\pi f t - 90^\circ + 0.099)} + 0.1e^{j(30\pi f t - 90^\circ + 0.099)}
 \end{aligned}$$

Antara arus dan tegangan ada perbedaan fasa sebesar θ_h . Jika digambarkan spektrum fasa dari sinyal periodik non-sinus pengukuran jam 09.00 pada lampiran A.1, didapatkan spektrum seperti gambar 4.2.



Gambar 4.2 Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa R kondisi penambahan 27

Hasil perhitungan diatas dapat ditabelkan seperti tabel 4.3.

Tabel 4.3. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental fasa R pembebanan tanggal 27 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa R	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	6.3	81	1.41	50
I_3	0.9	42	0.73	150
I_5	0.7	35	0.61	250
I_7	0.3	16.7	0.29	350
I_9	0.1	5.7	0.099	450
I_{11}	0.2	11.3	0.197	550
I_{13}	0.1	5.7	0.099	650
I_{15}	0.1	5.7	0.099	750

Untuk mendapatkan sinyal periodik masing-masing harmonisa, dapat juga melakukan simulasi melalui matlab atau *software* yang serupa.

4.2.1.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa R Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011

Pertama untuk mengitung daya pada masing-masing komponen fundamental dan harmonisa, bisa menggunakan nilai puncak spektrum amplituda. Tapi pengukuran harmonisa di Laboratorium Teknik Elektro selain memberikan spektrum harmonisa dalam % dan nilai puncak, juga memberikan nilai amplituda dalam rms baik arus maupun tegangan untuk komponen fundamental dan harmonisanya.

Dengan orde harmonisa $h = 1, 3, 5, \dots$ dan seterusnya, komponen Fourier harmonisa arus dan tegangan seperti tabel 4.4 dan 4.5

Tabel 4.4. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa R tanggal 27 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Arus Saluran Fasa R	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	4.5	50
I_3	0.7	150
I_5	0.5	250
I_7	0.2	350
I_9	0.1	450
I_{11}	0.1	550
I_{13}	0.1	650
I_{15}	0.1	750

Tabel 4.5. Nilai rms tegangan dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa R tanggal 27 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa R	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	213.86	50
V_2	0.1	100
V_3	7.5	150
V_4	0.1	200
V_5	4	250
V_6	0	-
V_7	3	350
V_8	0	-
V_9	1	450
V_{10}	0.1	500
V_{11}	1.1	550
V_{12}	0.1	600
V_{13}	0.2	650
V_{14}	0	-
V_{15}	0.2	750

Dengan menggunakan nilai tabel diatas, daya masing-masing harmonisa bisa langsung dihitung tanpa perlu menggunakan nilai puncak. Sebelum melakukan perhitungan daya masing-masing harmonisa, dapat ditentukan juga nilai tahanan masing-masing harmonisa.

masing-masing harmonisa. Dengan menggunakan persamaan [2.44], tahanan masing-masing harmonisa dapat dihitung.

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{213.7}{4.5} = 47.488 \Omega$$

Dari persamaan [2.47] dan [2.50] serta persamaan [2.56], maka daya nyata, daya kompleks dan daya reaktif yang diberikan oleh komponen fundamental dapat dihitung.

Daya nyata fundamental :

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 4.5^2 \times 47.488 = 961.632 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 213.7 \times 4.5 = 961.65 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental :

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{961.65^2 - 961.632^2} = \sqrt{34.619} = 5.884 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{7.5}{0.7} = 10.7 \Omega \quad P_3 = I_{3rms}^2 R_{3rms} = 4.7^2 \times 10.7 = 5.243 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{4}{0.5} = 8 \Omega \quad P_5 = I_{5rms}^2 R_{5rms} = 0.5^2 \times 8 = 2 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{3}{0.2} = 15 \Omega \quad P_7 = I_{7rms}^2 R_{7rms} = 0.2^2 \times 15 = 0.6 \text{ W}$$

$$R_9 = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1}{0.1} = 10 \Omega \quad P_9 = I_{9rms}^2 R_{9rms} = 0.1^2 \times 10 = 0.1 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{11rms}}{I_{11rms}} = \frac{1.1}{0.1} = 11 \Omega \quad P_{11} = I_{11rms}^2 R_{11rms} = 0.1^2 \times 11 = 0.11 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.2}{0.1} = 2 \Omega \quad P_{13} = I_{13rms}^2 R_{13rms} = 0.1^2 \times 2 = 0.02 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.2}{0.1} = 2 \Omega \quad P_{15} = I_{15rms}^2 R_{15rms} = 0.1^2 \times 2 = 0.02 \text{ W}$$

Jika nilai reaktansi diketahui maka, impedansi masing-masing harmonisa akan diketahui, karena baik komponen fundamental ataupun harmonisa, masing-masing memiliki impedansi sendiri dan menyerap daya aktif. Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$P_b = I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R$$

$$= 961.632 + 5.243 + 2 + 0.6 + 0.1 + 0.11 + 0.02 + 0.02 = 969.725 \text{ W}$$

Dengan demikian, diketahui bahwa daya nyata total yang diberikan ke beban adalah penjumlahan daya nyata dari masing-masing komponen harmonisa.

Jika pada saat sistem tidak terdistorsi harmonisa, daya nyata yang diserap hanya pada komponen fundamental saja. Dengan adanya harmonisa, maka sebagian daya diserap beban harmonisa, ini menunjukkan bahwa harmonisa mempengaruhi daya aktif walaupun kecil.

Dari persamaan [2.74] dan [2.75] atau [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan sistem terdistorsi harmonisa dapat dihitung, sedangkan daya kompleks beban dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.54].

Arus harmonisa :

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2}$$

$$= \sqrt{0.7^2 + 0.5^2 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2} = 0.95 \text{ A}$$

Arus total beban :

$$I_{brms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{hrms}^2} = \sqrt{4.5^2 + 0.95^2} = 4.599 \text{ A}$$

Tegangan harmonisa :

$$V_{hrms} = \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2}$$

$$= \sqrt{7.5^2 + 4^2 + 3^2 + 1^2 + 1.1^2 + 0.2^2 + 0.2^2} = 9.14 \text{ V}$$

Tegangan total beban :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{213.7^2 + 9.14^2} = 213.89 \text{ V}$$

Daya kompleks beban :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 213.7 \times 4.599 = 982.806 \text{ VA}$$

Dari persamaan [2.102] dan nilai amplituda arus serta sudut fasa harmonisa hasil perhitungan diatas, nilai arus fasa R menjadi $I_{Rh} = 6.3 \cos(\omega_1 t - 9^\circ)$ dengan nilai faktor daya yang dapat diketahui. Dengan menggunakan persamaan [2.45], daya nyata yang diberikan sumber dapat dihitung.

$$P_s = 220 \times 4.5 \times 0.98 = 970.2 \text{ W}$$

Nilai faktor daya diatas bernilai minus, tapi tidak mengapa jika ditulis

mempunyai nilai antara -90° sampai $+90^\circ$. Tetapi kedua faktor daya adalah $\cos \theta$, maka nilainya selalu positif. (Sudirham, 2010)

Dengan adanya sudut fasa antara arus fundamental dan tegangan sumber, maka nilai daya sumber lebih kecil karena sistem mengkonsumsi beban induktif. Adapun untuk daya kompleks sumber dapat dihitung menggunakan persamaan [2.49].

$$|S_s| = V_{Srms} I_{brms} = 220 \times 4.599 = 1011.78 \text{ VA}$$

4.2.1.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa R Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, Crest Factor, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.1.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan Crest Factor

Dengan menggunakan persamaan [2.37] dan [2.38], THDI dan THDV dapat dihitung. Untuk total distorsi harmonisa arus dihitung hingga harmonisa ke 17 dengan menggunakan persamaan [2.37].

$$\begin{aligned}
 THDI &= 100\% \times \frac{1}{I_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{17} I_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}}{I_{1rms}} \\
 &= \dots \sqrt{0.7^2 + 0.5^2 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2} \dots
 \end{aligned}$$

Nilai THDI terhitung ini mendekati nilai THDI hasil pengukuran pada lampiran A tabel hasil pengukuran tanggal 27 jam.09.00 fasa R sebesar 19 %. Distorsi arus diatas melampaui standar IEEE untuk sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Pada saat pengukuran berlangsung, ada beberapa beban non-linear yang aktif antara lain, 2 perangkat komputer dan 1 perangkat monitor, serta satu unit kulkas pendingin. Dengan aktifnya beberapa beban non-linear tersebut, distorsi harmonisa di Laboratorium Teknik Elektro melampaui standar IEEE. Untuk lebih jelas beban-beban yang aktif saat pengukuran berlangsung selengkapnya ada pada data tabel hasil pengukuran lampiran A.

Untuk memastikan adanya THDI di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, dapat juga diketahui dengan perbandingan nilai amplituda arus dan nilai rms melalui persamaan [2.39].

$$CF_i = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{6.3 \text{ A}}{4.5 \text{ A}} = 1.4$$

Dari definisi didasar teori, bahwa sistem yang terdistorsi harmonisa dapat memiliki nilai *crest factor* yang lebih besar atau lebih kecil dari 1/0.707. Untuk cacat gelombang snus, dapat dilihat pada lampiran A.1.

Dengan cara yang sama THDV juga dapat dihitung dengan persamaan

$$\begin{aligned}
&= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{2rms}^2 + V_{3rms}^2 + V_{4rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{10rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{12rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2}}{V_{1rms}} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{0.1^2 + 7.5^2 + 0.1^2 + 0.4^2 + 0.3^2 + 1^2 + 0.1^2 + 1.1^2 + 0.1^2 + 0.2^2 + 0.2^2}}{213.7} \\
&= 3.59\%
\end{aligned}$$

Nilai THDV terhitung mendekati nilai hasil pengukuran sebesar 4.27 %. THDV masih dalam batasan yang ditetapkan IEEE pada tabel 2.4 sehingga dianggap aman. Distorsi tegangan dapat juga ditentukan dari persamaan [2.39].

$$CFV = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{302.2 \text{ A}}{213.7 \text{ A}} = 1.4141$$

Gelombang tegangan mendekati sempurna seperti pada lampiran A.1.

4.2.1.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Adapun untuk masing-masing faktor daya, dapat ditentukan dari hasil perhitungan diatas sebagai evaluasi kualitas daya. Dengan menggunakan persamaan [2.58] dan [2.65] untuk faktor daya *displacement*, dan persamaan [2.59], [2.60], [2.63], [2.64], [2.68], [2.69], [2.70] dan [2.71] untuk faktor daya *true*, sedangkan faktor daya beban adalah faktor daya yang hanya ditinjau dari sisi beban, karena faktor daya hanya ada dua, *displacement* dan faktor daya *true*. Dengan demikian, faktor daya dapat dituliskan.

Faktor daya *displacement* :

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{961.632}{961.65} = 0.99$$

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{969.725}{982.806} = 0.98$$

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{961.632}{1011.78} = 0.95$$

Faktor daya masing-masing dapat dituliskan kembali, baik DPF (*displacement power factor*) maupun faktor daya *true* sebagai evaluasi kualitas daya listrik Laboratorium Teknik Elektro.

Faktor daya hasil pengukuran :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.97$$

Faktor daya hasil perhitungan :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.95$$

Faktor daya *displacemant* terhitung sama dengan nilai yang terukur. Standar faktor daya untuk THDI 20 % adalah 0.98 seperti yang tertera pada tabel 2.5. Tabel tersebut tetap dijadikan sebagai bahan evaluasi, walaupun tidak bisa dijadikan acuan secara mutlak, karena standar faktor daya minimum belum diketahui secara pasti. Jika tabel 2.5 dijadikan sebagai bahan evaluasi faktor daya hasil pengukuran dan hasil perhitungan, maka faktor daya sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta masih

walaupun kecil, karena baik faktor daya *displacement* maupun faktor daya *true* lebih kecil dari faktor daya maksimum tabel 2.5.

Tetap disarankan untuk memperbaiki faktor daya dan memasang filter harmonisa.

4.2.1.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Untuk melihat kualitas daya, dapat juga dilihat dari besarnya nilai daya reaktif yang dikonsumsi dalam kondisi fundamental maupun harmonisa.

Perbandingan daya reaktif :

Fundamental = 5.884 VAR

Harmonisa = 236.6 VAR

Dalam kondisi tidak ada harmonisa, faktor daya hanya sebesar 5.884 VAR sedangkan ketika terjadi harmonisa, daya reaktif sebesar 236.6 VAR. daya reaktif sebesar 236,6 VAR adalah nilai yang terukur, karena untuk menghitung nilai daya reaktif harmonisa tidak bisa dilakukan. Nilai daya reaktif terukur dapat dilihat pada lampiran A.1 pengukuran jam 09.00 tanggal 27 Desember 2011. Dengan adanya harmonisa, daya reaktif meningkat dan faktor daya lebih kecil dari nilai maksimum. Disarankan tetap memfilter harmonisa dan investasi pemasangan

4.2.2. Perhitungan Fasa S Kondisi Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011

Dari sinyal non-sinus fasa S pada lampiran A.1 maka amplituda, sudut fasa dan frekuensi harmonisa dapat ditentukan dengan cara yang sama menggunakan persamaan [2.32]. Hasil perhitungan dapat ditabelkan seperti tabel 4.6.

Tabel 4.6. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental Fasa S Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa S	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	9.7	84	1.468	50
I_3	3.2	72.6	1.268	150
I_5	1.1	47.7	0.833	250
I_7	0.5	26.57	0.464	350
I_9	0.4	21.8	0.381	450
I_{11}	0	-	-	-
I_{13}	0.2	11.31	0.197	650
I_{15}	0.1	5.7	0.099	750
I_{17}	0.1	5.7	0.099	850
I_{19}	0	-	-	-
I_{21}	0.1	5.7	0.099	1050
I_{23}	0.1	5.7	0.099	1150
I_{25}	0.1	5.7	0.099	1250
I_{27}	0.1	5.7	0.099	1350
I_{29}	0.1	5.7	0.099	1450

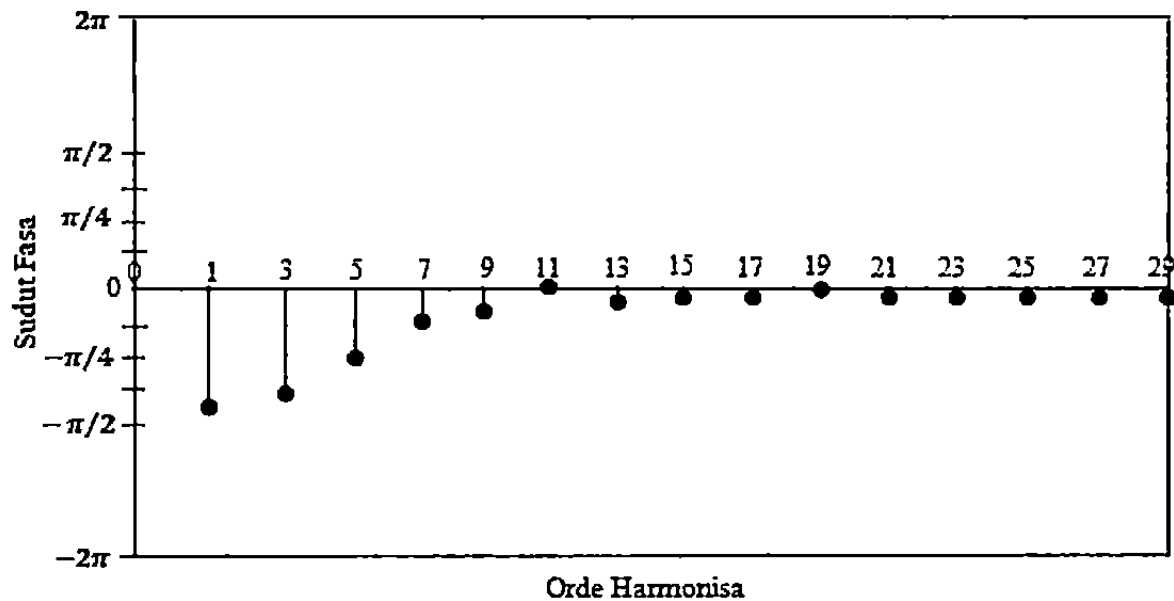
Dengan menggunakan persamaan [2.35], uraian deret Fourier sinyal non-sinus fasa S pada lampiran A.1 diberikan hingga harmonisa ke 29 :

$$I(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_n e^{j(n\omega t - \theta - \theta_n)}$$

$$= 9.7e^{j(2\pi ft - 240^\circ - 1.468)} + 3.2e^{j(6\pi ft - 240^\circ - 1.268)} + 1.1e^{j(10\pi ft - 240^\circ - 0.833)}$$

$$\begin{aligned}
&+ 0.1e^{j(30\pi ft - 240^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(34\pi ft - 240^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(42\pi ft - 240^\circ - 0.099)} \\
&+ 0.1e^{j(46\pi ft - 240^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(50\pi ft - 240^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(54\pi ft - 240^\circ - 0.099)} \\
&+ 0.1e^{j(58\pi ft - 240^\circ - 0.099)}
\end{aligned}$$

Dengan mengambil nilai sudut fasa harmonisa, spektrum fasa harmonisa dari sinyal non-sinus fasa S dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4.3. Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa S kondisi pembebanan 27

Desember 2011

Dengan melihat pada spektrum amplituda harmonisa tabel 4.3, harmonisa yang dominan yaitu harmonisa ganjil.

4.2.2.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa S Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011

Dengan $h = 1, 3, 5, \dots$, maka komponen harmonisa dan nilai frekuensi

Tabel 4.7. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa S tanggal 27 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Arus rms Saluran Fasa S	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	6.8	50
I_3	2.3	150
I_5	0.8	250
I_7	0.3	350
I_9	0.3	450
I_{11}	0	-
I_{13}	0.2	650
I_{15}	0.1	750
I_{17}	0.1	850
I_{19}	0	-
I_{21}	0.1	1050
I_{23}	0.1	1150

Untuk distorsi tegangan dengan $h = 1, 2, 3, 4, \dots$, maka nilai tegangan dan frekuensi harmonisa seperti tabel 4.8.

Tabel 4.8. Nilai rms tegangan, orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa S tanggal 27 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa S	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	214.8	50
V_2	0.3	100
V_3	7.7	150
V_4	0.1	200
V_5	4.7	250
V_7	2.7	350
V_8	0.1	400
V_9	1.2	450
V_{10}	0.1	500
V_{11}	1.6	550
V_{12}	0.1	600
V_{13}	0.2	650
V_{14}	0.1	700

V_{15}	0.2	750
V_{17}	0.2	850
V_{19}	0.2	950
V_{21}	0.1	1050
V_{23}	0.1	1150
V_{25}	0.1	1250

Dengan mengambil nilai arus dan tegangan yang tertera pada tabel 4.7 dan 4.8 diatas, tahanan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.44].

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{214.8}{6.8} = 31.588 \Omega$$

Dari persamaan [2.47] dan [2.50] serta persamaan [2.56], daya nyata, daya kompleks dan daya reaktif fundamental dapat dihitung.

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 6.8^2 \times 31.588 = 1460.629 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 214.8 \times 6.8 = 1460.64 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental :

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{1460.64^2 - 1460.629^2} = \sqrt{63.939} = 5.669 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{7.7}{2.3} = 3.35 \Omega \quad P_3 = 2.3^2 \times 3.35 = 17.722 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{4.7}{0.8} = 5.88 \Omega \quad P_5 = 0.8^2 \times 5.88 = 3.76 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{2.7}{0.3} = 9 \Omega \quad P_7 = 0.3^2 \times 9 = 0.81 \text{ W}$$

$$V_{9rms} \quad 1.2$$

$$R_{11} = 0 \Omega$$

$$P_{11} = 0 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.2}{0.2} = 1 \Omega$$

$$P_{13} = 0.2^2 \times 1 = 0.04 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.2}{0.1} = 2 \Omega$$

$$P_{15} = 0.1^2 \times 2 = 0.02 \text{ W}$$

$$R_{17} = \frac{V_{17rms}}{I_{17rms}} = \frac{0.2}{0.1} = 2 \Omega$$

$$P_{17} = 0.1^2 \times 2 = 0.02 \text{ W}$$

$$R_{19} = 0 \Omega$$

$$P_{19} = 0 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban hingga harmonisa ke 19 adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$= I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R \\ + I_{17rms}^2 R + I_{19rms}^2 R$$

$$= 1460.629 + 17.722 + 3.76 + 0.81 + 1.2 + 0 + 0.04 + 0.02 + 0.02 + 0$$

$$= 1484.210 \text{ W}$$

Dari daya total terhitung ini, terlihat bahwa harmonisa mempengaruhi daya aktif walaupun kecil pengaruhnya.

Arus dan tegangan harmonisa dapat dihitung dengan persamaan [2.76] dan [2.77]. Arus harmonisa diambil hingga harmonisa 17 :

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}$$

$$\sqrt{0.2^2 + 0.02^2 + 0.02^2 + 0.02^2 + 0 + 0.02^2 + 0.02^2 + 0.02^2} = 2.484 \text{ A}$$

Arus beban total dengan persamaan [2.76] :

$$I_{brms} = \sqrt{6.8^2 + 2.484^2} = 7.239 \text{ A}$$

Nilai tegangan sampai harmonisa ke 17 :

$$\begin{aligned} V_{hrms} &= \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2} \\ &= \sqrt{7.7^2 + 4.7^2 + 2.7^2 + 1.2^2 + 1.6^2 + 0.2^2 + 0.3^2 + 0.2^2} = 9.635 \text{ V} \end{aligned}$$

Tegangan harmonisa total dengan persamaan [2.75] :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{214.8^2 + 9.635^2} = 215.016 \text{ V}$$

Daya kompleks beban dengan persamaan [2.54] :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 215.016 \times 7.239 = 1556.5 \text{ VA}$$

Dengan persamaan [2.103] nilai arus $9.7 \cos(\omega t - 324^\circ)$ A, sehingga daya nyata yang diberikan sumber dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.45].

$$P_s = 220 \times 6.8 \times 0.81 = 1211.76$$

Daya kompleks menggunakan persamaan [2.49] :

$$|S| = V \cdot I = 220 \times 7.239 = 1592.58 \text{ VA}$$

4.2.2.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa S Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, Crest Factor, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.2.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan Crest Factor

Dengan menggunakan persamaan [2.37] dan [2.38], THDI dan THDV dapat dihitung sebagai evaluasi daya. Untuk total distorsi harmonisa arus dihitung dengan menggunakan persamaan [2.37] hingga harmonisa ke 17.

$$\begin{aligned}
 THDI &= 100\% \times \frac{1}{I_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{17} I_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}}{I_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{2.3^2 + 0.8^2 + 0.3^2 + 0.3^2 + 0 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.1^2}}{6.8} \\
 &= 36.53 \%
 \end{aligned}$$

THDV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.38] hingga harmonisa ke 19.

$$\begin{aligned}
 THDV &= 100\% \times \frac{1}{V_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{19} V_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2}}{V_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{7.7^2 + 4.7^2 + 2.7^2 + 1.2^2 + 1.6^2 + 0.2^2 + 0.3^2 + 0.2^2 + 0.2^2}}{214.8}
 \end{aligned}$$

= 4.49 %

Nilai THDI terhitung mendekati nilai terukur sebesar 36.11 %. Nilai THDI fasa S juga melampaui batas yang ditetapkan IEEE. Sedangkan untuk THDV mendekati nilai terukur sebesar 4.47 %. Baik THDV terukur maupun terhitung masih dalam batas yang ditetapkan. Untuk melihat cacat gelombang pada fasa S akibat THDI dan THDV, dapat menggunakan persamaan [2.39].

$$CFi = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{9.7 \text{ A}}{6.8 \text{ A}} = 1.426$$

Distorsi harmonisa membuat cacat gelombang arus pada fasa S seperti terlihat pada lampiran A.1.

Nilai *crest factor* tegangan fasa S juga dapat dihitung :

$$CFv = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{303.8 \text{ A}}{214.8 \text{ A}} = 1.4143$$

Nilai *crest factor* tegangan mendekati sempurna.

4.2.2.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Dengan menggunakan persamaan [2.58] dan [2.65] faktor daya masing-masing dapat ditentukan.

Faktor daya *displacement* :

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{1460.629}{1460.64} = 0.99$$

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{1484.210}{1556.5} = 0.95$$

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{1460.629}{1592.58} = 0.92$$

Faktor daya *displacemant* terhitung sama dengan nilai yang terukur demikian juga faktor daya *true*. Faktor daya masing-masing dapat dituliskan kembali.

Faktor daya hasil pengukuran :

$$DPF = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.93$$

Faktor daya hasil perhitungan :

$$DPF = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.92$$

Nilai faktor daya fasa S mendekati hasil pengukuran sebesar 0.93, dan faktor daya ini lebih kecil dari faktor daya maksimum, walaupun demikian faktor daya 0.92 tetap masih dianggap aman, tapi sebaiknya permasalahan harmonisa tetap harus diperhatikan dan ditangani dengan serius oleh Jurusan Teknik Elektro secara khusus dan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta secara umum.

4.2.1.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Kualitas daya dapat juga ditunjukkan dengan adanya daya reaktif yang pada sistem. Dalam penelitian harmonisa di Laboratorium Teknik Elektro, daya reaktifnya ditimbulkan oleh beban non linear lebih besar dari daya reaktif ketika

Perbandingan daya reaktif :

$$\text{Fundamental} = 5.669 \text{ VAR}$$

$$\text{Harmonisa} = 584 \text{ VAR}$$

Pada kondisi fundamental, daya reaktif hanya sebesar 5.669 VAR sedangkan pada saat harmonisa, daya reaktif sebesar 584 VAR. Hasil perbandingan ini menunjukkan adanya harmonisa pada Laboratorium Teknik Elektro, akibat beban-beban non-linear yang dioperasikan.

4.2.3. Perhitungan Fasa T Kondisi Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011

Dengan melihat spektrum amplituda fasa T pada lampiran A.1, harmonisa yang dominan adalah harmonisa ganjil. Dengan menggunakan persamaan [2.32] amplituda dan sudut fasa dan frekuensi masing-masing harmonisa dapat dihitung dengan cara yang sama. Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel 4.9.

Tabel 4.9. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental Fasa T Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011

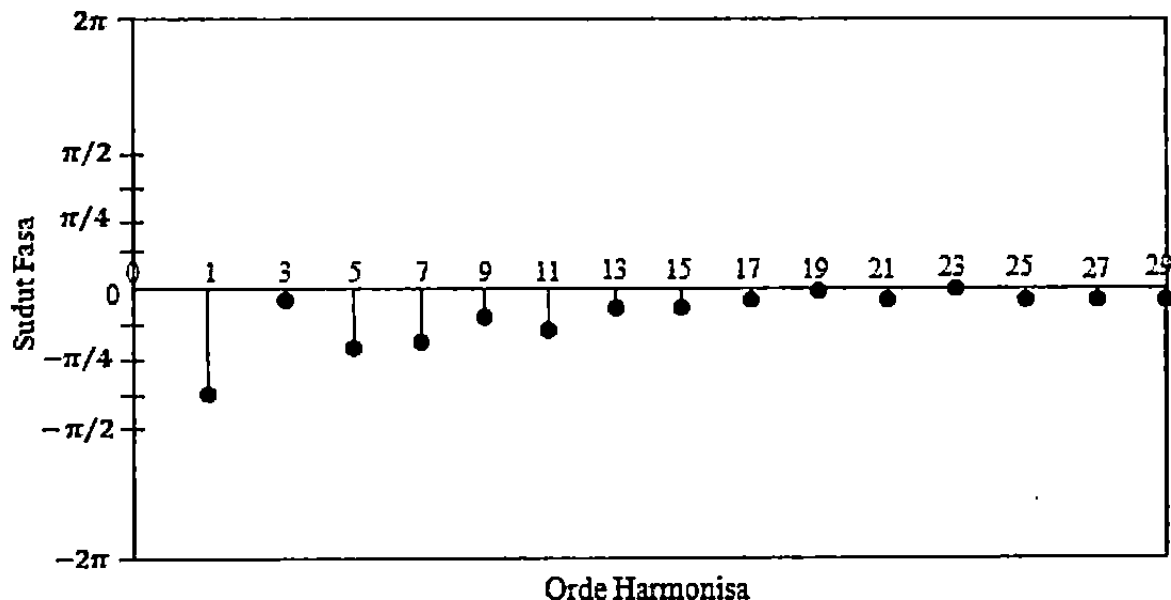
Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa T	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi (Hz)
I_1	7.3	82.19	1.43	50
I_3	0.1	5.7	0.099	150
I_5	1	45	0.79	250
I_7	0.7	35	0.6	350
I_9	0.2	11.31	0.197	450
I_{11}	0.6	32	0.54	550
I_{13}	0.2	11.31	0.197	650
I_{15}	0.2	11.31	0.197	750
I_{17}	0.1	5.7	0.099	850
I_{19}	0	-	-	-
I_{21}	0.1	5.7	0.099	1050
I_{23}	0	-	-	-
I_{25}	0.1	5.7	0.099	1250
I_{27}	0.1	5.7	0.099	1350

I_{29}	0.1	5.7	0.099	1450
----------	-----	-----	-------	------

Dengan menggunakan nilai hasil perhitungan, sinyal periodik non-sinus pada lampiran A.1 pengukuran jam 09.00 fasa T dapat diurai dengan deret Fourier eksponensial persamaan [2.35]. Uraian deret Fourier fungsi ganjil sinyal periodik diatas diberikan hingga harmonisa ke 29.

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sum_{h=1}^{29} I_h e^{j(n\omega t + \theta - \theta_h)} \\
 &= 7.3e^{j(2\pi ft + 120^\circ - 1.43)} + 0.1e^{j(6\pi ft + 120^\circ - 0.099)} + e^{j(10\pi ft + 120^\circ - 0.79)} \\
 &+ 0.7e^{j(14\pi ft + 120^\circ - 0.6)} + 0.2e^{j(18\pi ft + 120^\circ - 0.197)} + 0.6e^{j(22\pi ft + 120^\circ - 0.54)} \\
 &+ 0.2e^{j(26\pi ft + 120^\circ - 0.197)} + 0.2e^{j(30\pi ft + 120^\circ - 0.197)} + 0.1e^{j(34\pi ft + 120^\circ - 0.099)} \\
 &+ 0.1e^{j(42\pi ft + 120^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(50\pi ft + 120^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(54\pi ft + 120^\circ - 0.099)} \\
 &+ 0.1e^{j(58\pi ft + 120^\circ - 0.099)}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, spektrum fasa dari sinyal non-sinus fasa T dapat digambarkan.



Gambar 4.4. Spektrum fasa sinyal non sinus fasa T kondisi pembebanan 27

4.2.3.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa T Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011

Dengan $h = 1, 3, 5, \dots$, untuk arus dan $h = 1, 2, 3, 4, \dots$, maka frekuensi harmonisa arus dan tegangan seperti tabel 4.10 dan 4.11.

Tabel 4.10. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa T tanggal 27 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Arus rms Saluran Fasa T	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	5.2	50
I_3	0.1	150
I_5	0.7	250
I_7	0.5	350
I_9	0.2	450
I_{11}	0.4	550
I_{13}	0.1	650
I_{15}	0.1	750
I_{17}	0.1	850

Tabel 4.11. Nilai rms tegangan dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa T tanggal 27 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa T	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	216	50
V_2	0.4	100
V_3	0.5	150
V_4	0	200
V_5	4.1	250
V_6	0.1	300
V_7	2.2	350
V_8	0.2	400
V_9	1.1	450
V_{10}	0.1	500
V_{11}	1.3	550
V_{12}	0.1	600
V_{13}	0.2	650

V_{15}	0.4	750
V_{17}	0.2	850
V_{19}	0	-
V_{21}	0.1	1150

Nilai tahanan masing-masing harmonisa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.44].

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{216}{5.2} = 41.538 \Omega$$

Daya nyata, daya kompleks dan daya reaktif yang diberikan oleh komponen fundamental dihitung menggunakan persamaan [2.47], [2.50] and [2.56].

Daya aktif fundamental :

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 5.2^2 \times 41.538 = 1123.188 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 216 \times 5.2 = 1123.2 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental :

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{1123.2^2 - 1123.188^2} = \sqrt{26.957} = 4.192 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{4.5}{0.1} = 45 \Omega$$

$$P_3 = 0.1^2 \times 45 = 0.45 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{4.1}{0.7} = 5.86 \Omega$$

$$P_5 = 0.7^2 \times 5.86 = 2.87 \text{ W}$$

$$R = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.1}{0.2} = 5.5 \Omega$$

$$P_9 = 0.2^2 \times 5.5 = 0.22 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{11rms}}{I_{11rms}} = \frac{1.3}{0.4} = 3.25 \Omega$$

$$P_{11} = 0.4^2 \times 3.25 = 0.52 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.2}{0.1} = 2 \Omega$$

$$P_{13} = 0.1^2 \times 2 = 0.02 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.4}{0.1} = 4 \Omega$$

$$P_{15} = 0.1^2 \times 4 = 0.04 \text{ W}$$

$$R_{17} = \frac{V_{17rms}}{I_{17rms}} = \frac{0.2}{0.1} = 2 \Omega$$

$$P_{17} = 0.1^2 \times 2 = 0.02 \text{ W}$$

Dari persamaan suku pertama [2.47] dan [2.48] daya nyata total yang diserap beban adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$P_b = I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R + I_{17rms}^2 R$$

$$= 1123.188 + 0.45 + 2.87 + 1.1 + 0.22 + 0.52 + 0.02 + 0.04 + 0.02$$

$$= 1128.428 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan harmonisa dapat dihitung.

Arus dihitung hingga harmonisa ke 17 :

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}$$

$$I_{brms} = \sqrt{5.2^2 + 0.99^2} = 5.293 \text{ A}$$

Tegangan dihitung hingga harmonisa 17 :

$$\begin{aligned} V_{hrms} &= \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2} \\ &= \sqrt{4.5^2 + 4.1^2 + 2.2^2 + 1.1^2 + 1.3^2 + 0.2^2 + 0.4^2 + 0.2^2} = 6.711 \text{ V} \end{aligned}$$

Tegangan beban :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{216^2 + 6.711^2} = 216.104 \text{ V}$$

Daya kompleks beban :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 216.104 \times 5.293 = 1143.838 \text{ VA}$$

Nilai arus fasa T dari [2.104] adalah sebesar $7.3 \cos(\omega t + 37.81^\circ)$ A

Dengan demikian, dari [2.45] daya sumber menjadi :

$$P_s = 220 \times 5.2 \times 0.79 = 903.76 \text{ W}$$

Daya kompleks sumber menggunakan persamaan [2.49] :

$$|S_s| = V_{srms} I_{brms} = 220 \times 5.293 = 1164.46 \text{ VA}$$

Pada pembebanan non-linear diatas, daya hanya diserap oleh komponen fundamental sedangkan piranti pengubah arus dan yang lainnya tidak menyerap daya secara langsung dari sumber. Sudaryanto Sudirham mengatakan bahwa, "Piranti yang ada di sisi beban selain resistor adalah saklar sinkron ataupun penyearah yang merupakan piranti-piranti pengubah arus, piranti pengubah arus tidak mungkin menyerap daya nyata sebab jika demikian halnya maka piranti ini akan menjadi sangat panas. Dengan demikian, piranti pengubah arus menyerap

daya nyata yang diberikan sumber melalui arus fundamental dan segera

meneruskannya ke resistor sehingga resistor menerima daya nyata total sebesar yang dikirim oleh sumber. Dalam meneruskan daya nyata tersebut, terjadi konversi arus dari frekuensi fundamental yang diberikan oleh sumber menjadi frekuensi harmonisa menuju beban. (Sudirham, 2010)

4.2.3.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa T Pembebanan Tanggal 27 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, *Crest Factor*, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.3.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan *Crest Factor*

Dengan menggunakan persamaan [2.37] dan [2.38], THDI dan THDV dapat dihitung sebagai evaluasi daya. Untuk total distorsi harmonisa arus dihitung dengan menggunakan persamaan [2.37] hingga harmonisa ke 17.

$$\begin{aligned}
 THDI &= 100\% \times \frac{1}{I_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{17} I_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}}{I_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{0.1^2 + 0.7^2 + 0.5^2 + 0.2^2 + 0.4 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2}}{5.2} = 18\%
 \end{aligned}$$

Nilai THDI terhitung sama dengan nilai THDI terukur, dan nilai ini melampaui standar yang ditetapkan IEEE sebesar 5 %.

THDV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.38] hingga

$$\begin{aligned}
THDV &= 100\% \times \frac{1}{V_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{17} V_h^2} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2}}{V_{1rms}} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{4.5^2 + 4.1^2 + 2.2^2 + 1.1^2 + 1.3^2 + 0.2^2 + 0.4^2 + 0.2^2}}{216} \\
&= 3.107\%
\end{aligned}$$

Nilai THDV masih dalam batas yang ditetapkan IEEE tabel 2.4..

Untuk memastikan adanya THD maka dengan persamaan [2.39] :

$$CFi = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{7.3 \text{ A}}{5.2 \text{ A}} = 1.403$$

Pada fasa T memang terjadi distorsi harmonisa akibat aktifnya beberapa beban non-linear seperti terlihat dari gelombang non-sinus lampiran A.1.

Nilai *crest factor* tegangan juga dapat dihitung :

$$CFv = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{302.2 \text{ A}}{213.7 \text{ A}} = 1.4141$$

Gelombang tegangan mendekati sempurna.

4.2.3.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Untuk menghitung nilai faktor daya *displacement* dan faktor daya *true*, dapat menggunakan persamaan [2.58] atau [2.65] sedangkan faktor daya *true* dapat dihitung menggunakan persamaan [2.71] dan yang lainnya

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{1123.188}{1123.2} = 0.99$$

Faktor daya *displacement* bagus karena daya reaktif yang dikirim sumber melalui arus fundamental hanya 4.192 VAR dan nilai ini sangat kecil sehingga faktor daya mendekati 1 dan kualitas daya untuk fundamental dianggap baik.

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{1128.428}{1143.838} = 0.99$$

Faktor daya beban adalah faktor yang dilihat oleh beban.

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{1123.188}{1164.46} = 0.96$$

Nilai faktor daya *true* mendekati nilai yang terukur. Faktor daya *true* adalah faktor daya yang dilihat oleh sumber dan merupakan faktor daya total. F

Dengan melihat nilai faktor daya diatas, baik faktor daya terukur maupun terhitung nilainya lebih rendah dari nilai maksimum tapi nilai faktor daya diatas masih dalam toleransi yang diijinkan jika dianggap faktor daya minimum adalah 0.85. Nilai faktor daya bisa jadi akan lebih rendah jika penelitian dilakukan pada hari-hari kuliah, karena beban-beban non-linear yang dioperasikan akan lebih banyak. Tetap disarankan untuk memperbaiki faktor daya dan investasi pemasangan kapasitor bank.

4.2.3.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Dari hasil penelitian, besarnya daya reaktif fundamental dan harmonisa dapat ditentukan.

Perbandingan daya reaktif :

Fundamental = 4.192 VAR

Saat harmonisa = 553.4 VAR

Pada fasa T, nilai daya reaktif untuk kondisi fundamental adalah sebesar 4.192 VAR sedangkan pada saat harmonisa daya reaktif sebesar 553.4 VAR, ada peningkatan daya reaktif ketika beberapa beban non-linear seperti dua unit komputer dan beberapa beban non-linear lainnya dioperasikan. Disarankan sistem

1. Untuk meningkatkan faktor daya di fasa T, dapat dilakukan dengan cara

Dengan mengambil nilai daya total masing-masing fasa maka dapat di tentukan daya total 3 fasa. Dengan menggunakan persamaan [2.98] daya total dapat dituliskan sebagai :

Daya aktif tiga fasa hasil perhitungan :

$$P_{3\varphi} = P_R + P_S + P_T = 969.725 + 1484.210 + 1128.428 = 3582.363 \text{ W}$$

Daya kompleks tiga fasa hasil perhitungan :

$$|S_{3\varphi}| = 982.806 + 1556.5 + 1143.838 = 3683.144 \text{ VA}$$

Daya aktif tiga fasa hasil pengukuran :

$$P_{3\varphi} = P_R + P_S + P_T = 959.6 + 1458 + 1001 = 3418.6 \text{ W}$$

Daya kompleks tiga fasa hasil pengukuran :

$$|S_{3\varphi}| = S_R + S_S + S_T = 988.3 + 1570 + 1144 = 3702.3 \text{ VA}$$

Daya reaktif tiga fasa hasil pengukuran :

$$Q_{3\varphi} = Q_R + Q_S + Q_T = 236.6 + 584.0 + 553.4 = 1374 \text{ VAR}$$

4.2.3.4. Kualitas Daya Ditinjau Dari Ketidak Seimbangan Diagram Fasor

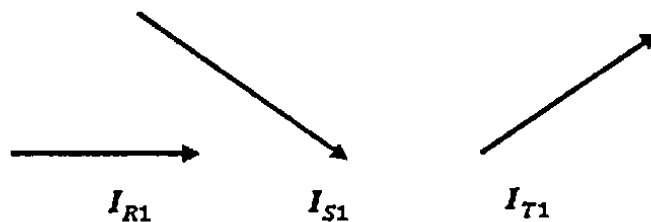
Untuk melihat kualitas daya dapat juga diketahui dari diagram fasor. Bila mengambil nilai deret Fourier $I(t)$ masing-masing fasa R, S, T yang telah dijabarkan diatas, maka dapat ditentukan pergeseran fasor masing-masing fasa akibat pengaruh harmonisa.

Dengan melihat kembali nilai masing-masing arus fasa I_{1R}, I_{1S}, I_{1T} pada masing-masing fasa hasil perhitungan, maka dapat ditentukan besarnya pergeseran fasor masing-masing fasa. Dengan persamaan [2.105] nilai masing-

masing arus dapat dituliskan dalam bentuk fasor urutan (c, b, a) sebagai $\bar{I}_{1R} = 6.3\angle 0^\circ$, $\bar{I}_{1S} = 9.7\angle 324^\circ$, $\bar{I}_{1T} = 7.3\angle 37.81^\circ$.

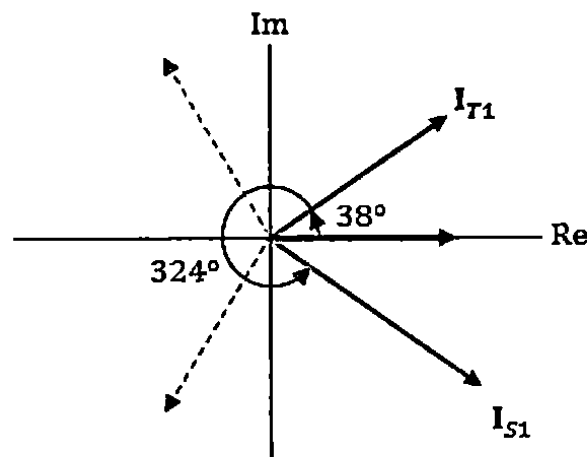
Dengan nilai fasor arus fasa R, S dan T diatas, terlihat dengan jelas adanya ketidak seimbangan beban, baik untuk nilai amplituda arus masing-masing fasa maupun sudut fasanya. Pada sistem yang seimbang, nilai arus R, S, T masing-masing saluran harus-lah identik secara fasor seperti yang ditunjukkan oleh persamaan [2.85], [2.91], [2.92] hingga [2.93], demikian juga sudut fasa harus terpisah secara listrik serbesar 120° antara R, S dan T.

Dari ketiga nilai arus dalam fasor fasa R, S, T diatas dapat di gambarkan tanpa menggunakan skala besar dan arah masing-masing fasornya.



Gambar 4.5. Diagram fasor arus fasa R, S, T

Gambar 4.5 dapat dituliskan kembali dalam sumbu real dan imajiner seperti gambar 4.6.



Gambar 4.6. Diagram fasor beban tidak seimbang hasil perhitungan

Garis putus-putus gambar 4.6 adalah letak awal fasor dalam keadaan seimbang urutan c, b, a. Karena adanya distorsi harmonisa pada sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, fasa S bergeser menuju kuadran IV sebesar $\angle 324^\circ$ dari titik $\angle 0^\circ$ atau sebesar $\angle 204^\circ$ dari titik awal fasa S. Untuk fasa T pergeseran dari titik awalnya sebesar 157.81° menuju kuadran I dengan arah masing-masing berlawanan arah jarum jam. Dengan adanya pergeseran fasor ini, maka $I_{1R} \neq I_{1S} \neq I_{1T}$ dan diagram fasor tidak seperti uraian pada gambar 2.12, 2.18 dan 2.19, 2.20 sehingga pada konduktor netral mengalir arus harmonisa. Dengan demikian, pada ketiga fasa R, S, T tersebut berlaku hubungan $\bar{I}_N = \bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T \neq 0$ dan kualitas daya dapat ditinjau dari hal ini. Dengan melihat kembali diagram fasor data hasil pengukuran di panel listrik Laboratorium Teknik Elektro pada lampiran A.1, maka terlihat adanya arus netral akibat adanya harmonisa pada sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta^[*].

* Harmonisa ini tidak ada kaitannya dengan penggunaan beban non-linear pada fakultas lain seperti Kedokteran dan Pertanian yang berdekatan dengan Laboratorium Teknik Elektro, karena saat melakukan peneliitiian, sempat dinyalakan semua lampu yang ada di Fakultas Kedokteran dan Pertanian dan tidak terlihat adanya kenaikan THDI atau THDV. Justru sebaliknya, dengan menghidupkan beberapa lampu di lorong Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, beberapa saat kemudian nilai THDI dan THDV berubah naik. Sebagai tolak ukur adanya aktifitas beban non-linear dapat dilihat dari perubahan nilai THDV. Jadi, sangat kecil kemungkinan bila besarnya THD di Laboratorium Teknik Elektro dipengaruhi oleh adanya pemakaian beban non-linear pada fakultas lain, karena terbukti dari data hasil penelitian di Laboratorium Teknik Elektro, dengan aktifnya beberapa beban non linear seperti beberapa unit komputer saja misalnya, bisa menimbulkan THDI > 50 %. Adapun *interference* harmonisa akibat penggunaan beban non linear dari Laboratorium Teknik Sipil yang merupakan satu bangunan dengan Laboratorium Teknik Elektro, maka hal ini tidak mungkin terjadi, karena saat melakukan penelitian di Laboratorium, suasana kampus sedang libur, sehingga semua kegiatan Praktikum khususnya praktikum yang melibatkan beban non linear di Laboratorium Teknik Sipil sama sekali tidak terjadi. Itu terbukti setiap 1 Jam melakukan penelitian dan pengukuran harmonisa, penulis selalu melakukan pengecekan pada setiap ruangan Laboratorium Teknik Sipil baik lantai dasar maupun lantai satu. Dengan demikian, harmonisa ini murni dari

Untuk perhitungan arus netral akibat harmonisa dapat menggunakan persamaan [2.101].

$$\bar{I}_N = \bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T \neq 0$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_N &= 6.3\angle 0^\circ + 9.7\angle 234^\circ + 7.3\angle 37.81^\circ \\ &= 6.3(\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + 9.7(\cos 324^\circ + j \sin 324^\circ) \\ &\quad + 7.3(\cos 37.81^\circ + j \sin 37.81^\circ) \\ &= 6.3 + 9.7(0.8 - j0.58) + 7.3(0.79 + j0.613) \\ &= 19.83 - j1.156 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\bar{I}_{Nmaks} = \sqrt{19.83^2 + 1.156^2} = 19.86 \text{ A}$$

$$\theta_N = \tan^{-1} \frac{1.123}{19.86} = 3.33^\circ \quad \Rightarrow \quad 360^\circ - \theta_N = 356.67^\circ \approx 357^\circ$$

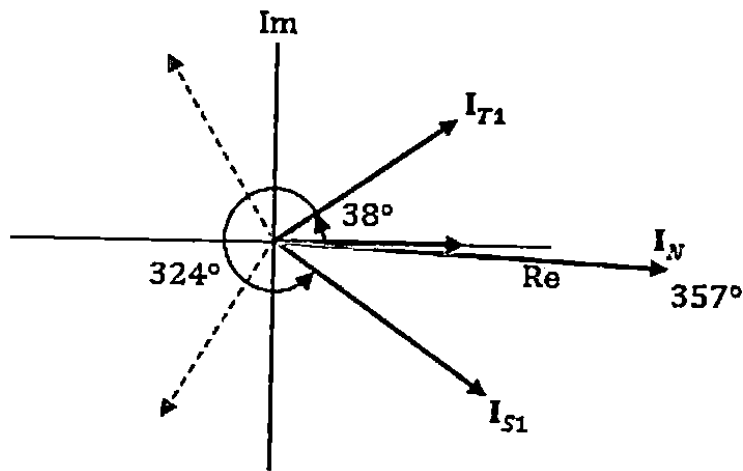
dengan demikian nilai rms arus pada konduktor netral :

$$\bar{I}_{Nrms} = \frac{19.86}{\sqrt{2}} \angle 357^\circ = 14.04 \angle 357^\circ$$

Dari hasil perhitungan diatas $\bar{I}_{Nrms} = \bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T = 14.04 \angle 357^\circ$. Nilai arus rms netral hasil perhitungan mendekati hasil yang terukur pada data hasil pengukuran jam 09.00 lampiran A dengan nilai arus netral sebesar 9.3723 A.

Arus netral diatas ditimbulkan oleh harmonisa urutan nol seperti tabel 2.2.a dan 2.2.b. Dengan adanya arus netral tersebut, maka pada netral transformator UMY terjadi *losses* sebesar $P_N = I_N^2 R_N$. Jika diketahui nilai tahanan konduktor netral, maka dapat diketahui besarnya *losses* pada netral transformator.

Dari data perhitungan diatas, maka dapat diagram fasor arus netral dalam



Gambar 4.7. Diagram fasor arus netral hasil perhitungan

Fasor gambar 4.7 serupa dengan arah fasor netral hasil penelitian pada lampiran A.1 dengan sudut fasa netral sebesar 354.5°.

4.2.4. Perhitungan Fasa R Kondisi Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011

Dengan $h = 1, 3, 5, \dots$, maka nilai amplituda dan sudut fasa dihitung dengan cara yang sama menggunakan persamaan [2.32], dan hasil perhitungannya ditabelkan seperti pada tabel 4.12.

Tabel 4.12. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental Fasa R Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011

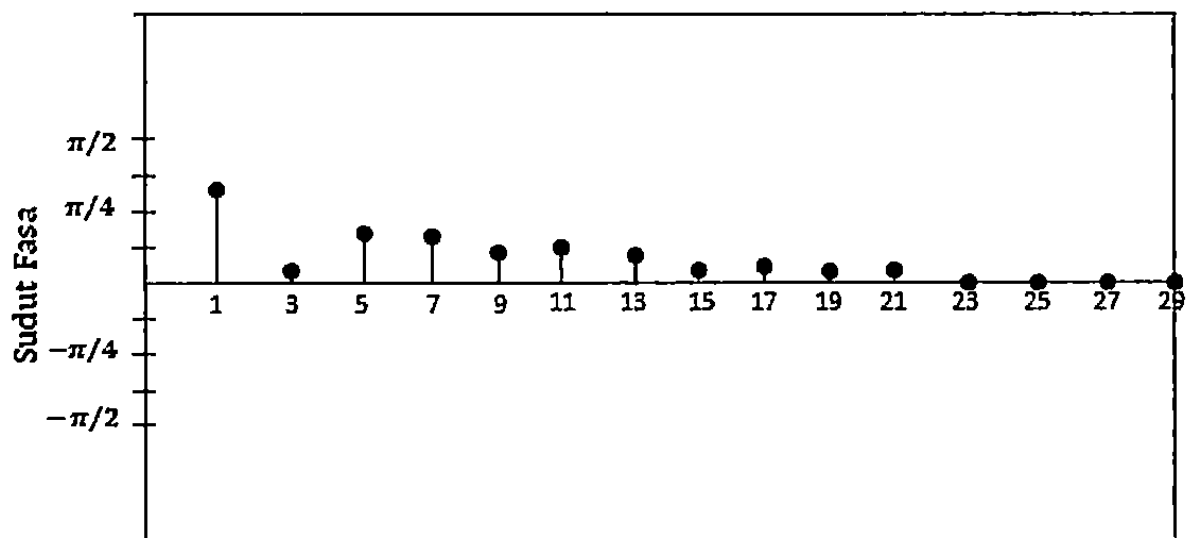
Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa R	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	6.5	81.25	1.418	50
I_3	0.1	5.7	0.099	150
I_5	0.9	42	0.733	250
I_7	0.8	38.6	0.675	350
I_9	0.4	21.8	0.381	450
I_{11}	0.6	31	0.540	550
I_{13}	0.3	17	0.291	650
I_{15}	0.1	5.7	0.099	750
I_{17}	0.2	11.31	0.197	850

I_{19}	0.1	5.7	0.099	950
I_{21}	0.1	5.7	0.099	1050
I_{23}	0	0	0	1150
I_{25}	0.1	5.7	0.099	1250
I_{27}	0	0	0	1350
I_{29}	0.1	5.7	0.099	1450

Uraian deret Fourier sinyal periodik lampiran B.1 diberikan hingga harmonisa ke 29 :

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sum_{h=1}^{29} I_n e^{j(n\omega_0 t + \theta)} \\
 &= 6.5e^{j(2\pi ft - 90^\circ + 1.418)} + 0.1e^{j(6\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.9e^{j(10\pi ft - 90^\circ + 0.733)} \\
 &\quad + 0.8e^{j(14\pi ft - 90^\circ + 0.675)} + 0.4e^{j(18\pi ft - 90^\circ + 0.381)} + 0.6e^{j(22\pi ft - 90^\circ + 0.540)} \\
 &\quad + 0.3e^{j(26\pi ft - 90^\circ + 0.291)} + 0.1e^{j(30\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.2e^{j(34\pi ft - 90^\circ + 0.197)} \\
 &\quad + 0.1e^{j(38\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.1e^{j(42\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.1e^{j(46\pi ft - 90^\circ + 0.099)} \\
 &\quad + 0.1e^{j(50\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.1e^{j(58\pi ft - 90^\circ + 0.099)}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, spektrum fasa dari sinyal non-sinus harmonisa pada lampiran B.2 dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4.8. Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa R kondisi pembebanan 29

Desember 2011

4.2.4.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa R Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011

Untuk melihat nilai frekuensi pada arus dan tegangan harmonisa dan untuk keperluan menghitung daya, dari lampiran B.2 seperti tabel 4.13 dan 4.14.

Tabel 4.13. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa R tanggal 29 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Arus Saluran Fasa R	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	4.6	50
I_3	0.1	150
I_5	0.6	250
I_7	0.6	350
I_9	0.2	450
I_{11}	0.4	550
I_{13}	0.2	650
I_{15}	0.1	750
I_{17}	0.1	850

Tabel 4.14. Nilai rms tegangan dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa R tanggal 29 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa R	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	211.3	50
V_2	0.1	100
V_3	7.8	150
V_4	0.1	200
V_5	3.7	250
V_6	0.1	300
V_7	2.6	350
V_8	0	-

V_9	1.2	450
V_{10}	0.1	500
V_{11}	1.4	550
V_{13}	0.6	650
V_{15}	0.1	750
V_{17}	0.2	850
V_{21}	0.1	950
V_{25}	0.1	1050

Dengan mengambil nilai arus dan tegangan yang tertera pada tabel diatas maka resistansi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.44].

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{211.3}{4.6} = 45.9 \Omega$$

Daya nyata, daya kompleks dan daya reaktif yang diberikan oleh komponen fundamental pada beban dihitung menggunakan suku pertama persamaan [2.47], [2.50], dan persamaan [2.56].

Daya nyata fundamental :

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 4.6^2 \times 45.9 = 971.244 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 211.3 \times 4.6 = 971.98 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental :

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{971.98^2 - 971.244^2} = \sqrt{1430.21} = 37.818 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{7.8}{0.1} = 78 \Omega \quad P_3 = 0.1^2 \times 78 = 0.78 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{3.7}{0.1} = 37 \Omega \quad P_5 = 0.1^2 \times 37 = 0.37 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{2.6}{0.6} = 4.33 \Omega \quad P_7 = 0.6^2 \times 4.33 = 1.56 \text{ W}$$

$$R_9 = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.2}{0.2} = 6 \Omega \quad P_9 = 0.6^2 \times 6 = 2.16 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.4}{0.4} = 3.5 \Omega \quad P_{11} = 0.4^2 \times 3.5 = 0.56 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.6}{0.2} = 3 \Omega \quad P_{13} = 0.2^2 \times 3 = 0.12 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.1}{0.1} = 1 \Omega \quad P_{15} = 0.1^2 \times 1 = 0.01 \text{ W}$$

$$R_{17} = \frac{V_{17rms}}{I_{17rms}} = \frac{0.2}{0.1} = 2 \Omega \quad P_{17} = 0.1^2 \times 2 = 0.02 \text{ W}$$

$$R_{19} = 0 \Omega \quad P_{19} = 0 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban adalah :

$$\begin{aligned} P_b &= P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R \\ &= I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R \\ &\quad + I_{17rms}^2 R \\ &= 917.244 + 0.78 + 2.22 + 1.56 + 2.16 + 0.56 + 0.12 + 0.01 + 0.02 \\ &= 978.674 \text{ W} \end{aligned}$$

Dari persamaan [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan sistem terdistorsi

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}$$

$$= \sqrt{0.1^2 + 0.6^2 + 0.6^2 + 0.2^2 + 0.4^2 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.1^2} = 0.99 \text{ A}$$

Arus beban total :

$$I_{brms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{hrms}^2} = \sqrt{4.6^2 + 0.99^2} = 4.705 \text{ A}$$

Nilai tegangan :

$$V_{hrms} = \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2}$$

$$= \sqrt{7.8^2 + 3.7^2 + 2.6^2 + 1.2^2 + 1.4^2 + 0.6^2 + 0.1^2 + 0.2^2} = 9.225 \text{ V}$$

Tegangan harmonisa total :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{211.3^2 + 9.225^2} = 211.5 \text{ V}$$

Daya kompleks beban :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 211.5 \times 4.705 = 995.12 \text{ VA}$$

Dengan persamaan [2.102] nilai arus fasa $I_{Rh} = 6.5 \cos(\omega t - 8.75^\circ) \text{ A}$

maka dari persamaan [2.45] daya nyata yang diberikan sumber :

$$P_s = 220 \times 4.6 \times 0.98 = 991.76 \text{ W}$$

Daya kompleks menggunakan persamaan [2.49] :

$$|S_s| = V_{srms} I_{brms} = 220 \times 4.705 = 1035.1 \text{ VA}$$

4.2.4.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa R Pembebanan Tanggal 29 Desember

4.2.4.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan Crest Factor

Untuk total distorsi harmonisa dihitung dengan persamaan [2.37] diambil hingga deret ke 17 :

$$\begin{aligned}
 THDI &= 100\% \times \frac{1}{I_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{17} I_h^2} \\
 &= 100 \times \frac{\sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}}{I_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{0.1^2 + 0.6^2 + 0.6^2 + 0.2^2 + 0.4^2 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.1^2}}{4.6} = 22 \%
 \end{aligned}$$

Nilai THDI terhitung diatas sama dengan hasil pengukuran. THDI melampaui standar IEEE untuk sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Dengan cara yang sama, nilai THDV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.38] hingga deret 21.

$$\begin{aligned}
 THDV &= 100\% \times \sqrt{\sum_{h=3}^{21} V_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2 + V_{21rms}^2}}{V_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{7.8^2 + 3.7^2 + 2.6^2 + 1.2^2 + 1.4^2 + 0.6^2 + 0.1^2 + 0.2^2 + 0.2^2}}{211.3} = 4.37\%
 \end{aligned}$$

Nilai THDV masih dalam batas yang ditetapkan IEEE. Bila menggunakan

$$CF_i = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{6.5 \text{ A}}{4.6 \text{ A}} = 1.430$$

Dengan melihat nilai *crest factor* untuk gelombang arus diatas, gelombang arus tidak sempurna sinusoidal akibat pengaruh harmonisa.

Untuk nilai *crest factor* tegangan :

$$CF_v = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{298.8 \text{ A}}{211.3 \text{ A}} = 1.4141$$

Gelombang tegangan mendekati sempurna. Dari hasil pengukuran di Laboratorium nilai THDV selalu lebih kecil dari standar IEEE sehingga THDV dianggap aman.

4.2.4.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Dengan menggunakan persamaan [2.53] atau [2.65] dan [2.71] faktor daya masing-masing dapat ditentukan.

Faktor daya *displacement* :

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{971.244}{971.98} = 0.99$$

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{978.674}{995.12} = 0.98$$

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{971.244}{1035.1} = 0.93$$

Faktor daya masing-masing dapat dituliskan kembali. Baik untuk DPF

(*displacement power factor*) maupun faktor daya sebenarnya

Faktor daya hasil pengukuran :

$$\text{DPF} = 0.98$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.96$$

Faktor daya hasil perhitungan :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.93$$

Dengan THDI terukur 22.69 % atau terhitung sebesar 22 %, nilai faktor daya *true* lebih kecil dari nilai maksimum. Jika mengambil nilai 0.85 sebagai nilai faktor daya minimum, maka nilai tersebut masih dianggap baik, tapi sebagai bentuk kehati-hatian, tetap disarankan untuk memperbaiki faktor daya dan memasang filter harmonisa.

4.2.4.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Untuk melihat pengaruh harmonisa pada sistem, dapat ditinjau juga dari nilai daya reaktif.

Perbandingan daya reaktif :

$$\text{Fundamental} = 37.818 \text{ VAR}$$

$$\text{Saat harmonisa} = 263.7 \text{ VAR}$$

Dari perbandingan ini, daya reaktif terhitung untuk fundamental lebih kecil dari daya reaktif terukur dalam harmonisa. Pada saat kondisi fundamental, nilai daya reaktif hanya sebesar 37.818 VAR sedangkan saat kondisi harmonisa

daya reaktif sebesar 263.7 VAR, daya ini merupakan daya reaktif total beban. Pada analisa daya reaktif beban tidak dapat dihitung, sehingga untuk perbandingan diambil nilai daya reaktif beban dalam hasil pengukuran. Nilai ini dapat dilihat pada tabel hasil pengukuran tanggal 29 Desember 2011 fasa R jam 10.00 pada lampiran B.2. Pada saat pengukuran berlangsung, beban non-linear yang dioperasikan adalah 8 lampu TL, 1 lampu philips dan 18 perangkat komputer di Laboratorium Komputer dan Perancangan serta adanya kegiatan praktikum di Laboratorium Instrumentasi dan Telekomunikasi. Dengan demikian, harmonisa pada sistem kelistrikan dapat menimbulkan nilai daya reaktif yang besar.

4.2.5. Perhitungan Fasa S Kondisi Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011

Dengan melihat spektrum amplituda harmonisa pada lampiran B.2, harmonisa yang dominan yaitu harmonisa ganjil dengan $h = 1, 3, 5, \dots$, dengan cara yang sama, nilai perhitungan amplituda dan sudut fasa serta frekuensi harmonisa dapat ditunjukkan pada tabel 4.15.

Tabel 4.15. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental Fasa S Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa S	Sudut Fasa Harmonisa ($^{\circ}$)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	4.6	78	1.35	50
I_3	3	71.6	1.25	150
I_5	1.2	50.2	0.88	250
I_7	0.4	21.8	0.38	350
I_9	0.4	21.8	0.38	450
I_{11}	0.1	5.7	0.099	550
I_{13}	0.2	11.31	0.197	650

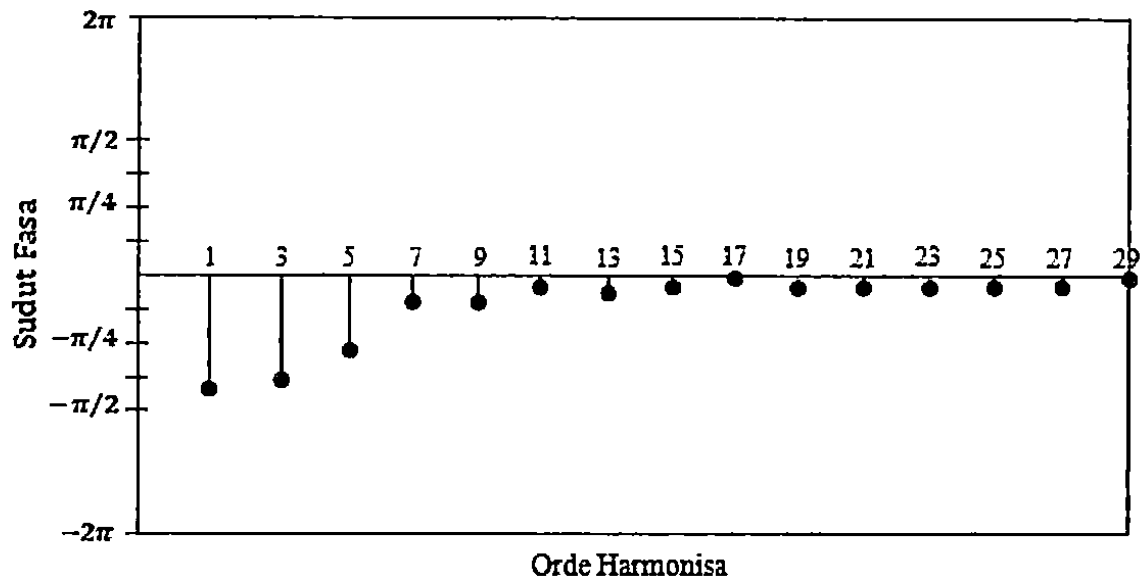
I_{15}	0.1	5.7	0.099	750
I_{17}	0	0	0	-
I_{19}	0.1	5.7	0.099	950
I_{21}	0.1	5.7	0.099	1050
I_{23}	0.1	5.7	0.099	1150
I_{25}	0.1	5.7	0.099	1250
I_{27}	0.1	5.7	0.099	1350
I_{29}	0	0	0	-

Dari hasil ini, maka sinyal non-sinus pada lampiran B.2 fasa S dapat diurai dengan deret Fourier eksponensial [2.35] atau persamaan yang lain. Uraian deret Fourier fungsi ganjil sinyal non-sinus lampiran B.2 diberikan hingga harmonisa ke 29.

$$I(t) = \sum_{h=1}^{29} I_h e^{j(n\omega t - \theta - \theta_h)}$$

$$\begin{aligned}
I(t) = & 4.6e^{j(2\pi ft - 240^\circ - 1.35)} + 3e^{j(6\pi ft - 240^\circ - 1.25)} + 1.2e^{j(10\pi ft - 240^\circ - 0.88)} \\
& + 0.4e^{j(17\pi ft - 240^\circ - 0.38)} + 0.4e^{j(18\pi ft - 240^\circ - 0.38)} + 0.1e^{j(22\pi ft - 240^\circ - 0.099)} \\
& + 0.2e^{j(26\pi ft - 240^\circ - 0.197)} + 0.1e^{j(30\pi ft - 240^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(38\pi ft - 240^\circ - 0.099)} \\
& + 0.1e^{j(42\pi ft - 240^\circ - 0.099)} \\
& + 0.1e^{j(46\pi ft - 240^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(50\pi ft - 240^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(54\pi ft - 240^\circ - 0.099)} \\
& + 0.1e^{j(58\pi ft - 240^\circ - 0.099)}
\end{aligned}$$

Jika digambarkan spektrum fasa dari sinyal non-sinus lampiran B.2 fasa S, maka didapatkan sebuah spektrum seperti gambar 4.0



Gambar 4.9. Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa S kondisi pembebanan 29

Desember 2011

4.2.5.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa S Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011

Dari data hasil pengukuran dapat dituliskan nilai frekuensi, arus dan tegangan harmonisa dengan orde ganjil dan genap seperti pada tabel 4.14 dan 4.15.

Tabel 4.16. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa S tanggal 29 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Arus rms Saluran Fasa S	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	3.3	50
I_2	0.1	100
I_3	2.1	150
I_4	0.1	200
I_5	0.9	250
I_7	0.3	350

I_9	0.3	450
I_{11}	0.1	550
I_{13}	0.1	650
I_{15}	0.1	750
I_{17}	0	-
I_{19}	0	-
I_{21}	0.1	1050
I_{23}	0	-
I_{25}	0.1	1250
I_{27}	0.1	1350

Tabel 4.17. Nilai rms tegangan dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa S tanggal 29 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa S	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	215.6	50
V_2	0.3	100
V_3	8.1	150
V_4	0.1	200
V_5	5.8	250
V_6	0.1	300
V_7	2.9	350
V_8	0.1	400
V_9	1.6	450
V_{10}	0.1	500
V_{11}	2	550
V_{13}	0.5	650
V_{15}	0.1	750
V_{17}	0.3	850
V_{19}	0.2	950
V_{21}	0.1	1050
V_{23}	0.1	1150

Dengan mengambil nilai arus dan tegangan diatas atau pada lampairan B.2

maka bebanan masing-masing dapat dihitung dengan persamaan [2.44]

Daya nyata dan daya kompleks yang diberikan oleh komponen fundamental pada beban dihitung dengan suku pertama persamaan [2.47] dan [2.50].

Daya nyata fundamental :

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 3.3^2 \times 65.33 = 711.44 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 215.6 \times 3.3 = 711.48 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental dihitung menggunakan persamaan [2.56].

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{711.48^2 - 711.44^2} = \sqrt{56.917} = 7.544 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{8.1}{2.1} = 3.857 \Omega$$

$$P_3 = 2.1^2 \times 3.857 = 17.009 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{5.8}{0.9} = 6.444 \Omega$$

$$P_5 = 0.9^2 \times 6.444 = 5.799 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{2.9}{0.3} = 9.666 \Omega$$

$$P_7 = 0.3^2 \times 9.666 = 0.869 \text{ W}$$

$$R_9 = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.6}{0.3} = 5.333 \Omega$$

$$P_9 = 0.3^2 \times 5.333 = 0.479 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{11rms}}{I_{11rms}} = \frac{2}{0.1} = 20 \Omega$$

$$P_{11} = 0.1^2 \times 20 = 0.2 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.5}{0.1} = 5 \Omega$$

$$P_{13} = 0.1^2 \times 5 = 0.05 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.1}{0.1} = 1 \Omega$$

$$P_{15} = 0.1^2 \times 1 = 0.01 \text{ W}$$

$$R_{17} = 0$$

$$P_{17} = 0$$

$$R_{19} = 0 \Omega$$

$$P_{19} = 0 \text{ W}$$

$$R_{21} = \frac{V_{21rms}}{I_{21rms}} = \frac{0.1}{0.1} = 0.1 \Omega$$

$$P_{21} = 0.1^2 \times 0.1 = 0.001 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$P_b = I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R + I_{21rms}^2 R$$

$$= 711.44 + 17.009 + 5.799 + 0.869 + 0.479 + 0.2 + 0.05 + 0.001$$

$$= 735.848 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan sistem terdistorsi dapat dihitung. Untuk arus dihitung hingga harmonisa 21.

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2 + I_{19rms}^2 + I_{21rms}^2}$$

$$= \sqrt{2.1^2 + 0.9^2 + 0.3^2 + 0.3^2 + 0.1 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0^2 + 0^2 + 0.1^2} = 2.36 \text{ A}$$

Arus beban total :

$$I_{brms} = \sqrt{3.3^2 + 2.36^2} = 4.057 \text{ A}$$

Nilai tegangan hingga harmonisa ke 21 dengan mengabaikan harmonisa ke 17 dan ke 19 :

$$= \sqrt{8.1^2 + 5.8^2 + 2.9^2 + 1.6^2 + 2^2 + 0.5^2 + 0.1^2 + 0.1^2} = 10.7 \text{ V}$$

Tegangan harmonisa total :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}} = \sqrt{215.66^2 + 10.7^2} = 215.925 \text{ V}$$

Daya kompleks beban dihitung dengan [2.54] :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 215.925 \times 4.057 = 876 \text{ VA}$$

Nilai ini mendekati nilai yang terukur.

Dengan persamaan [2.103] nilai sudut fasa dan arus fasa S adalah $I_{1S} = 4.6 \cos(\omega t - 318^\circ)$ A. Dengan demikian daya nyata yang diberikan sumber dihitung dengan [2.45].

$$P_S = 220 \times 3.3 \times 0.743 = 539.418$$

Daya kompleks dihitung menggunakan persamaan [2.49].

$$|S_S| = V_{srms} I_{brms} = 220 \times 4.057 = 892.54 \text{ VA}$$

4.2.5.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa S Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, Crest Factor, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.5.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan Crest Factor

Jika diambil nilai harmonisa sampai orde ke 15, THDI dapat dihitung

$$\begin{aligned}
&= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{2rms}^2 + I_{3rms}^2 + I_{4rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2}}{I_{1rms}} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{0.1^2 + 2.1^2 + 0.1^2 + 0.9^2 + 0.3^2 + 0.1^2 + 0.3^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2}}{3.3} \\
&= 71\%
\end{aligned}$$

Nilai THDI terhitung mendekati nilai THDI terukur 70.96 %. Nilai THDI baik terhitung senilai 71 % atau terukur senilai 70.96 % adalah nilai THD yang sangat besar untuk Laboratorium Teknik Elektro sedangkan standar THDI untuk kampus utara sistem kelistrikan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta hanya sebesar 5%. THDI 71 % atau 70.96 % terjadi saat adanya kegiatan inhal praktikum diruangan Laboratorium Instrumentasi Elektronis. Pada pengukuran tanggal 29 Desember jam 10.00, nilai arus harmonisa kedua juga terukur, walaupun arus harmonisa kedua merupakan harmonisa urutan negatif yang dapat merubah arah putaran motor, tapi karena nilainya kecil, harmonisa kedua dapat diabaikan karena tidak mampu memberikan kontribusi yang berarti bagi sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, tapi bisa berdampak buruk apabila beban-beban non-linear lebih banyak lagi di gunakan.

Dengan mengambil nilai harmonisa genil dan genap, nilai THDV hingga

$$\begin{aligned}
&= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{2rms}^2 + V_{3rms}^2 + V_{4rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{6rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{8rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{10rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2}}{V_{1rms}} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{0.3^2 + 8.1^2 + 0.1^2 + 5.8^2 + 0.1^2 + 2.9^2 + 0.1^2 + 1.6^2 + 0.1^2 + 2^2 + 0.5^2 + 0.1^2}}{215.6} \\
&= 4.97\%
\end{aligned}$$

Nilai THDV masih dalam batas yang ditetapkan IEEE. Untuk melihat gelombang arus dan tegangan dapat menggunakan persamaan [2.39].

$$CFi = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{4.6 \text{ A}}{3.3 \text{ A}} = 1.394$$

Dengan melihat nilai *crest factor* diatas, gelombang sinusoidal tidak sempurna sesuai yang terukur pada lampiran B.2.

Nilai *crest factor* tegangan :

$$CFv = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{305 \text{ A}}{215.6 \text{ A}} = 1.4147$$

Gelombang tegangan sempurna.

4.2.5.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Untuk menghitung faktor daya, dapat menggunakan persamaan [2.58] atau [2.65] dan [2.71] dengan demikian, faktor daya masing-masing dapat dihitung.

Faktor daya *displacement* :

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{711.44}{711.48} = 0.99$$

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{735.848}{876} = 0.84$$

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{711.44}{892.54} = 0.79$$

Faktor daya *displacemant* terhitung mendekati nilai yang terukur demikian juga faktor daya sebenarnya. Tapi dengan THDI 71 % atau 70.96 %, faktor daya terhitung dan terukur sama-sama dibawah nilai maksimum tabel 2.5 tapi masih diatas batas minimumnya. Daya masing-masing dapat dituliskan kembali, baik DPF (*displacement power factor*) maupun faktor daya *true*.

Faktor daya hasil pengukuran :

$$\text{DPF} = 0.98$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.80$$

Faktor daya hasil perhitungan :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.79$$

Faktor daya dengan THDI 71 % atau 70.96 % lebih rendah dibanding dengan nilai faktor daya pada penelitian tanggal 27 Desember 2011 karena pada pengukuran tanggal 29 Desember ini beban non-linear yang dioperasikan lebih banyak, THDI ≥ 70 %, sehingga berpengaruh pada nilai faktor daya. Dengan mempertimbangkan faktor keamanan, Laboratorium Teknik Elektro disarankan

4.2.5.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Dengan perbandingan daya reaktif ini, kualitas daya dapat diketahui.

Perbandingan daya reaktif :

$$\text{Fundamental} = 7.544 \text{ VAR}$$

$$\text{Saat harmonisa} = 518.7 \text{ VAR}$$

Daya reaktif yang dihasilkan dengan THDI terukur 70.96 % adalah sebesar 518.7 VAR. Nilai daya reaktif tersebut cukup besar bila dibandingkan dengan daya reaktif fundamental sebesar 7.544 VAR. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan nilai daya reaktif akibat pembebanan non-linear di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Dari fakta yang ada, harmonisa dapat meningkatkan nilai daya reaktif sistem atau dan juga dapat merusak peralatan yang ada di Laboratorium Teknik Elektro. Disarankan Laboratorium Teknik Elektro di filter dari harmonisa dan memperbaiki faktor daya dengan memasang kapasitor bank.

4.2.6. Perhitungan Fasa T Kondisi Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011

Pada lampiran B.1 fasa T, nilai amplituda dan sudut fasa dan nilai frekuensi dapat ditentukan.

Tabel 4.18. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental Fasa T Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011

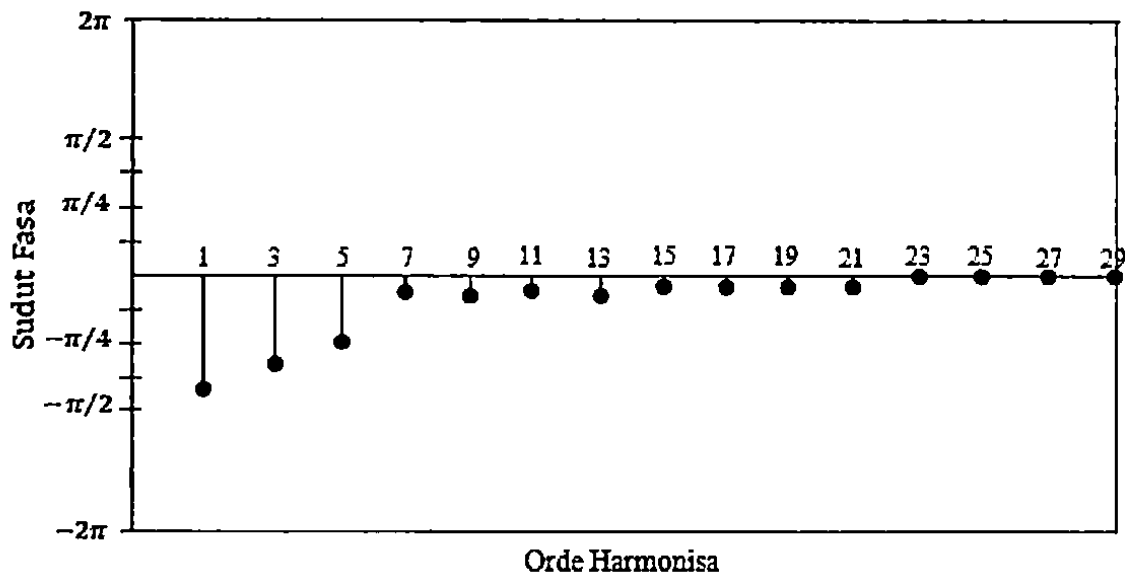
Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa T	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	7.3	82.19	1.435	50
I_3	1.9	62.24	1.09	150
I_5	1	45	0.785	250
I_7	0.2	11.31	0.197	350
I_9	0.3	16.69	0.29	450
I_{11}	0.2	11.31	0.197	550
I_{13}	0.3	16.69	0.29	650
I_{15}	0.1	5.7	0.099	750
I_{17}	0.1	5.7	0.099	850
I_{19}	0.1	5.7	0.099	950
I_{21}	0.1	5.7	0.099	1050

Uraian deret Fourier fungsi ganjil sinyal non-sinus pada lampiran B. dihitung dengan menggunakan persamaan [2.35] hingga harmonisa ke 21.

$$I(t) = \sum_{h=1}^{21} I_h e^{j(n\omega t + \theta - \theta_h)}$$

$$\begin{aligned}
 I(t) = & 7.3e^{j(2\pi ft + 120^\circ - 1.435)} + 1.9e^{j(6\pi ft + 120^\circ - 1.09)} + 1e^{j(10\pi ft + 120^\circ - 0.785)} \\
 & + 0.2e^{j(14\pi ft + 120^\circ - 0.197)} + 0.3e^{j(18\pi ft + 120^\circ - 0.29)} + 0.2e^{j(22\pi ft + 120^\circ - 0.197)} \\
 & + 0.3e^{j(26\pi ft + 120^\circ - 0.29)} + 0.1e^{j(30\pi ft + 120^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(38\pi ft + 120^\circ - 0.099)} \\
 & + 0.1e^{j(42\pi ft + 120^\circ - 0.099)}
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas spektrum fasa dari sinyal periodik ini dapat



Gambar 4.10. Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa T kondisi pembebanan 29

Desember 2011

4.2.6.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa T Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011

Dari data hasil pengukuran dapat dituliskan nilai frekuensi arus dan tegangan harmonisa dengan orde ganjil atau orde ganji/genap seperti pada tabel 4.19 dan 4.20.

Tabel 4.19. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa T tanggal 29 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Arus rms Saluran Fasa T	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	5.2	50
I_3	1.3	150
I_5	0.7	250
I_7	0.1	350
I_9	0.2	450
I_{11}	0.1	550
I_{13}	0.2	650
I_{15}	0	-
I_{17}	0.1	850

Dengan $h = 1, 2, 3, 4, \dots$, maka komponen harmonisa dapat ditabelkan sebagai :

Tabel 4.20. Nilai rms tegangan dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa T tanggal 29 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa T	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	218.7	50
V_2	0.1	100
V_3	5	150
V_4	0	-
V_5	5.1	250
V_6	0	-
V_7	2.2	350
V_8	0.1	400
V_9	1.3	450
V_{10}	0.1	500
V_{11}	1.5	550
V_{13}	0.3	650
V_{15}	0.4	750
V_{17}	0.3	850
V_{19}	0.1	950
V_{21}	0.1	1050

Dengan persamaan [2.44] nilai tahanan masing-masing komponen harmonisa dapat dihitung.

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{218.7}{5.2} = 42.058 \Omega$$

Dari persamaan [2.47] dan [2.50], daya nyata dan daya kompleks yang diberikan oleh komponen fundamental pada beban sebagai berikut :

Daya nyata fundamental :

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 5.2^2 \times 42.05 = 1137.032 \text{ W}$$

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 218.7 \times 5.2 = 1137.24 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental dihitung menggunakan persamaan [2.56].

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{1137.24^2 - 1137.032^2} = \sqrt{473.05} = 21.749 \text{ VAR}$$

Daya aktif masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{5}{1.3} = 3.85 \Omega$$

$$P_3 = 1.3^2 \times 3.85 = 6.507 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{5.1}{0.7} = 7.29 \Omega$$

$$P_5 = 0.7^2 \times 7.29 = 5.103 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{2.2}{0.1} = 22 \Omega$$

$$P_7 = 0.1^2 \times 22 = 0.22 \text{ W}$$

$$R = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.3}{0.2} = 6.5 \Omega$$

$$P_9 = 0.2^2 \times 6.5 = 0.26 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{11rms}}{I_{11rms}} = \frac{1.5}{0.1} = 15 \Omega$$

$$P_{11} = 0.1^2 \times 15 = 0.15 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.3}{0.2} = 1.5 \Omega$$

$$P_{13} = 0.2^2 \times 1.5 = 0.06 \text{ W}$$

$$R_{15} = 0$$

$$P_{15} = 0$$

$$R_{17} = \frac{V_{17rms}}{I_{17rms}} = \frac{0.3}{0.1} = 3 \Omega$$

$$P_{17} = 0.1^2 \times 3 = 0.03 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban

adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{h rms}^2 R$$

$$P_b = I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R + I_{17rms}^2 R$$

$$= 1137.032 + 6.507 + 5.103 + 0.22 + 0.26 + 0.15 + 0.06 + 0 + 0.03$$

$$= 1149.362 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan sistem terdistorsi harmonisa juga dapat dihitung.

Arus dihitung hingga harmonisa ke 17 :

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}$$

$$= \sqrt{1.3^2 + 0.7^2 + 0.1^2 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.2^2 + 0^2 + 0.1^2} = 1.513 \text{ A}$$

Arus beban total :

$$I_{brms} = \sqrt{5.2^2 + 1.513^2} = 5.416 \text{ A}$$

Tegangan dihitung hingga harmonisa 17 dengan mengabaikan harmonisa ke 15 :

$$V_{hrms} = \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{17rms}^2}$$

$$= \sqrt{5^2 + 5.1^2 + 2.2^2 + 1.3^2 + 1.5^2 + 0.3^2 + 0.3^2} = 59.97 \text{ V}$$

Tegangan harmonisa total atau tegangan harmonisa beban :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{218.7^2 + 59.97^2} = 226.77 \text{ V}$$

Daya kompleks beban :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 226.77 \times 5.416 = 1228.186 \text{ VA}$$

Dari persamaan [2.104] nilai arus $I_{1T} = 7.3 \cos(\omega_1 t + 37.81^\circ) \text{ A}$,

... dan daya nyata yang dihasilkan sumber dapat dihitung dengan menggunakan

$$P_S = 220 \times 5.2 \times 0.79 = 903.76 \text{ W}$$

Daya kompleks menggunakan persamaan [2.49] :

$$|S_S| = V_{srms} I_{brms} = 220 \times 5.416 = 1191.52 \text{ VA}$$

4.2.6.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa T Pembebanan Tanggal 29 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, *Crest Factor*, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.6.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan *Crest Factor*

Dengan menggunakan persamaan [2.37], total distorsi harmonisa arus dapat dihitung hingga harmonisa ke 17.

$$\begin{aligned} THDI &= 100\% \frac{1}{I_{1rms}} \times \sqrt{\sum_{h=3}^{17} I_h^2} \\ &= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}}{I_{1rms}} \\ &= 100\% \times \frac{\sqrt{1.3^2 + 0.7^2 + 0.1^2 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.2^2 + 0^2 + 0.1^2}}{5.2} = 29\% \end{aligned}$$

Nilai THDI terhitung mendekati nilai THDI terukur sebesar 30.32 %, tapi baik THDI 29 % atau 30.32 % melampaui batas yang ditetapkan IEEE untuk sistem kelistrikan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta seperti tabel 2.3.

Nilai THDV juga dapat dihitung hingga harmonisa ke 21 dengan

$$\begin{aligned}
THDV &= 100\% \frac{1}{V_{1rms}} \times \sqrt{\sum_{h=3}^{21} V_h^2} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2 + V_{21rms}^2}}{V_{1rms}} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{5^2 + 5.1^2 + 2.2^2 + 1.3^2 + 1.5^2 + 0.3^2 + 0.4^2 + 0.3^2 + 0.1^2 + 0.1^2}}{218.7} \\
&= 3.54 \%
\end{aligned}$$

THDV masih dalam batas yang ditetapkan IEEE untuk sistem kelistrikan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta seperti pada tabel 2.3.

Untuk memastikan ada tidaknya THDI dan THDV maka dapat menggunakan persamaan [2.39] :

$$CFI = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{7.3 \text{ A}}{5.2 \text{ A}} = 1.403$$

Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa pada fasa T terjadi distorsi harmonis ketika aktifitas 2 perangkat komputer pada Lab. Pengukuran dan

4.2.6.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Untuk melihat faktor daya masing-masing, dapat menggunakan persamaan [2.58] dan [2.65] serta [2.71].

Faktor daya *displacement* :

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{1137.032}{1137.24} = 0.99$$

Faktor daya *displacement* tidak bernilai 1 menunjukkan adanya daya reaktif yang dikirim sumber melalui arus fundamental walaupun kecil.

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{1149.362}{1228.186} = 0.93$$

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{1137.032}{1191.52} = 0.95$$

Faktor daya masing-masing dapat dituliskan kembali, baik DPF (*displacement power factor*) maupun faktor daya *true*.

Faktor daya hasil pengukuran :

$$\text{DPF} = 0.98$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.90$$

Faktor daya hasil perhitungan :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.95$$

Nilai faktor daya masih dianggap baik, tapi lebih baik lagi jika faktor daya mencapai nilai maksimumnya. Untuk lebih amannya, investasi kapasitor bank

4.2.6.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Dengan adanya harmonisa, kualitas daya pada sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro menjadi buruk dan daya reaktif saat harmonisa terukur nilainya lebih besar, jika dibandingkan saat sistem tidak mengalami distorsi harmonisa.

Perbandingan daya reaktif :

$$\text{Fundamental} = 21.749 \text{ VAR}$$

$$\text{Saat harmonisa} = 518 \text{ VAR}$$

Daya reaktif akibat adanya harmonisa adalah sebesar 518 VAR sedangkan dalam kondisi normal daya reaktif terhitung hanya sebesar 21.749 VAR. Dengan besarnya daya reaktif, nilai faktor daya lebih kecil dari nilai maksimum tapi masih dianggap baik. Disarankan THDI tersebut harus diminimalkan dengan memfilter frekuensi tinggi harmonisa untuk menjaga kualitas daya listrik atau memasang kapasitor bank di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

4.2.6.3. Daya 3 Fasa

Dengan mengambil nilai daya total masing-masing fasa maka dapat di tentukan daya total 3 fasa. Dengan menggunakan persamaan [2.74] daya total 3

$$= 978.674 + 735.848 + 1149.362 = 2128.036 \text{ W}$$

Daya kompleks tiga fasa hasil perhitungan :

$$\begin{aligned} |S_T| &= S_{bR} + S_{bS} + S_{bT} \\ &= 995.12 + 876 + 1228.186 = 3101.306 \text{ VA} \end{aligned}$$

Daya tiga fasa hasil pengukuran :

$$\begin{aligned} P_T &= P_{bR} + P_{bS} + P_{bT} \\ &= 965.3 + 701.2 + 1069 = 2735.5 \text{ W} \end{aligned}$$

Daya kompleks 3 fasa hasil pengukuran :

$$\begin{aligned} |S_T| &= S_{bR} + S_{bS} + S_{bT} \\ &= 1001 + 872.2 + 1188 = 3061.2 \text{ VA} \end{aligned}$$

Daya reaktif 3 fasa hasil pengukuran :

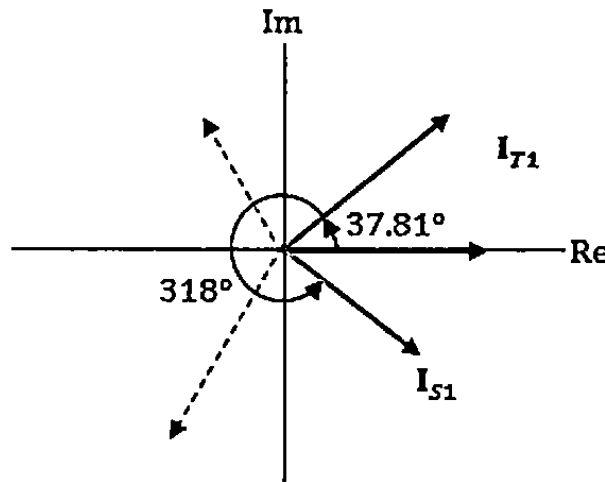
$$\begin{aligned} Q_T &= Q_{bR} + Q_{bS} + Q_{bT} \\ &= 263.7 + 518.7 + 518.0 = 1300.4 \text{ VAR} \end{aligned}$$

4.2.6.4. Kualitas Daya Ditinjau Dari Ketidakseimbangan Diagram Fasor

Untuk melihat kualitas daya dapat juga ditinjau dari diagram fasornya. Dengan mengambil nilai deret Fourier $I(t)$ masing-masing fasa R, S, T yang telah dibahas, maka dengan persamaan [2.105] nilai fasor arus dalam urutan (c, b, a) sebagai $\bar{I}_{1R} = 6.5 \angle 0^\circ$, $\bar{I}_{1S} = 4.6 \angle 318^\circ$, $\bar{I}_{1T} = 7.3 \angle 37.81^\circ$. Dengan demikian,
 ... dan ... masing-masing fasornya fundamental dapat dicamburkan

Gambar 4.11. Besar dan arah fasor fasa R, S, T fundamental hasil perhitungan

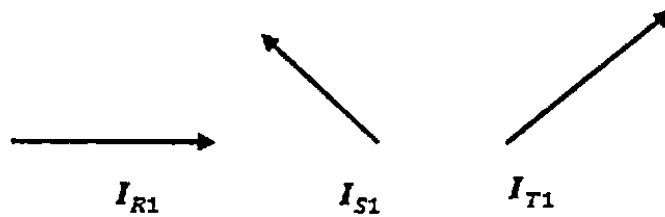
Dari gambar 4.11 diagram fasor tidak seimbang masing-masing fasa dapat digambarkan tanpa menggunakan skala.



Gambar 4.12. Diagram fasor beban tidak seimbang hasil perhitungan

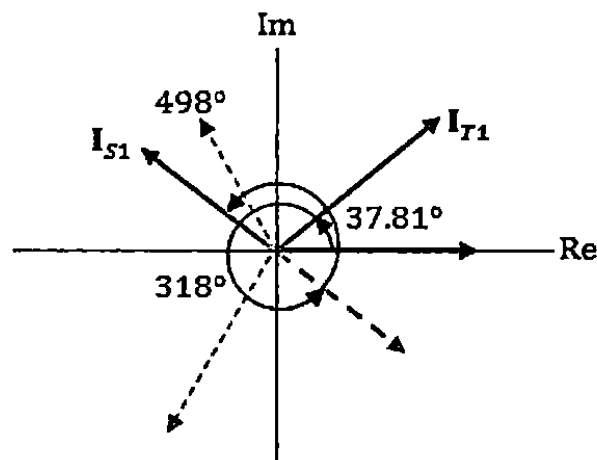
Dari gambar 4.12, fasor fasa S bergeser menuju kuadran IV sebesar 318° dari titik $\angle 0^\circ$ atau 198° dari titik awal fasa S. Sedangkan fasor fasa T bergeser dari fasor awal kuadran III ke kuadran I sebesar 157.81° . Antara diagram fasor hasil perhitungan dan hasil pengukuran, pada langkah awal ini sebatas terkesan tidak sama, tapi hasil perhitungan juga menunjukkan hasil yang benar.

Jika melihat pada diagram fasor hasil pengukuran, fasor arus fasa S berputar hampir 360° dari titik asal fasa S akibat besarnya distorsi harmonisa. Karena putaran fasor fasa S mengikuti urutan sistem (c, b, a), maka fasor berputar dari kuadran II dan kembali ke kuadran II dengan arah berlawanan arah jarum jam sehingga dari hasil perhitungan, putaran fasor pada asalnya seperti gambar



Gambar 4.13. Besar dan arah fasor fundamental fasa R, S, T hasil perhitungan

Dari gambar 4.13, dapat digambarkan diagram fasor ketidak seimbangan beban akibat harmonisa.



Gambar 4.14. Diagram fasor beban tidak seimbang fundamental hasil perhitungan

Pada gambar 4.14 diatas, garis putus-putus fasor fasa S pada kuadran ke IV sama dengan nilai fasor fasa S pada kuadran II. Perubahan hanya pada tanda positif dan negatif untuk nilai cosinusnya. Karena adanya harmonisa pada fasa S dengan nilai THDI hasil pengukuran sebesar 70.96 % dan dari hasil perhitungan sebesar 71 %, mengakibatkan fasor fasa S bergeser sebesar $\angle 498^\circ$ dari titik $\angle 0^\circ$ atau sebesar $\angle 378^\circ$ dari titik asal fasor S.

Dengan adanya pembebanan non-linear saat Inhal Praktikum di Laboratorium Instrumentasi Elektronik, membangkitkan arus harmonisa yang

menimbulkan distorsi pada sinyal sinusoidal sebesar 70.96 % terukur atau 71 % terhitung. nilai THD tersebut jauh melampaui standar yang ditetapkan IEEE untuk sistem kelistrikan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta sebesar 5 %. Dengan adanya THDI tersebut, dipastikan $I_R \neq I_S \neq I_T$ sehingga pada konduktor netral mengalir arus tidak seimbang dengan nilai $I_N = I_R + I_S + I_T \neq 0$. Dengan menggunakan persamaan [2.77] arus netral dapat dihitung.

$$\begin{aligned}\bar{I}_N &= \bar{I}_{1R} + \bar{I}_{1S} + \bar{I}_{1T} \neq 0 \\ &= 6.5 \angle 0^\circ + 4.6 \angle 318^\circ + 7.3 \angle 37.81^\circ \\ &= 6.5(\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + 4.6(\cos 318^\circ + j \sin 318^\circ) \\ &\quad + 7.3(\cos 37.81^\circ + j \sin 37.81^\circ) \\ &= 6.5 + 3.418 - j3.078 + 5.767 + j4.475 \\ &= 15.685 + j1.397 \text{ A}\end{aligned}$$

$$\bar{I}_{Nmaks} = \sqrt{15.685^2 + 1.397^2} = 15.747 \text{ A}$$

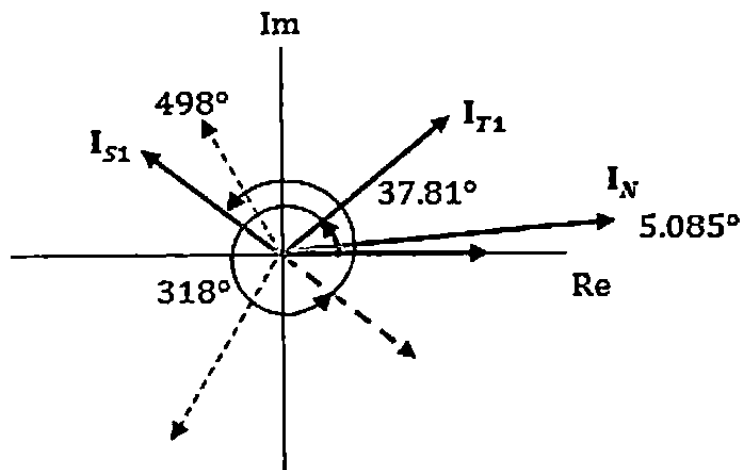
$$\theta_N = \tan^{-1} \frac{1.397}{15.685} = 5.085^\circ$$

Dengan demikian nilai rms arus pada konduktor netral :

$$\bar{I}_{Nrms} = \frac{15.747}{\sqrt{2}} \angle 4.67^\circ = 11.135 \angle 5.085^\circ$$

Dengan demikian, $\bar{I}_{Nrms} = \bar{I}_{1R} + \bar{I}_{1S} + \bar{I}_{1T} = 11.13 \angle 4.67^\circ$. Selisih nilai arus netral rms hasil perhitungan ini tidak terlalu besar dibanding dengan nilai arus netral yang terukur pada data hasil pengukuran jam 10.00 lampiran B sebesar 10.165 A.

Jika digambarkan dalam sumbu real dan imajiner, maka diagram fasor untuk arus netral diatas ditunjukkan oleh gambar 4.15



Gambar 4.15. Diagram fasor fundamental dan arus netral hasil perhitungan

Dari gambar 4.15, terlihat adanya arus netral akibat adanya harmonisa pada sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Arah fasor arus netral sesuai penjumlahan nilai arus diatas yang bernilai positif. Arah fasor netral ini juga, sesuai dengan arah fasor hasil pengukuran pada lampiran B.2.

4.2.7. Perhitungan Fasa R Kondisi Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011

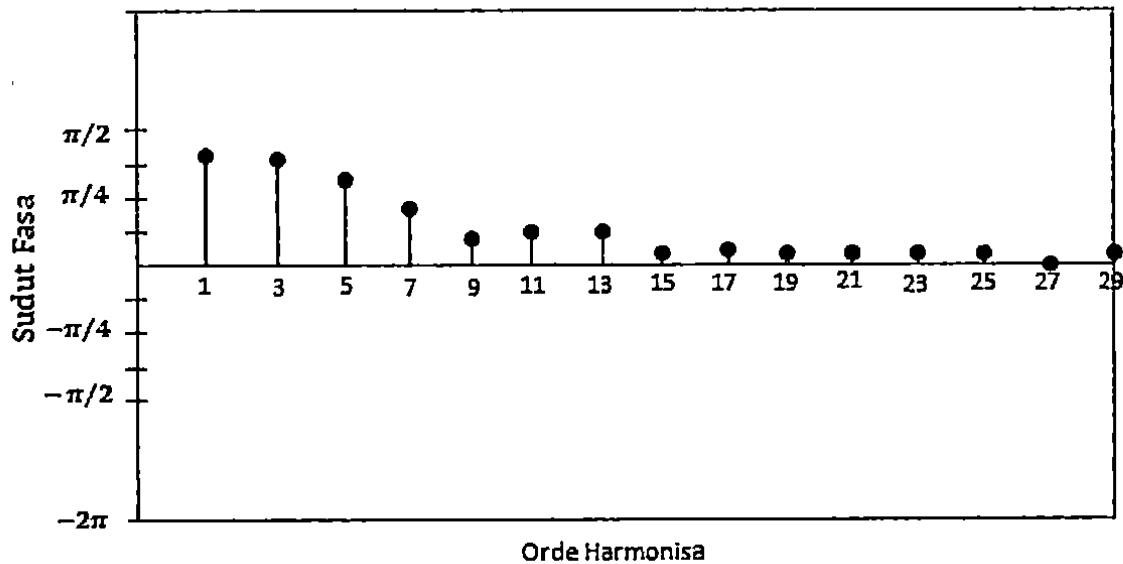
Dari data hasil pengukuran tanggal 30 Desember 2011 jam 13.00 lampiran C.5. Maka dapat dihitung nilai amplituda, sudut fasa dan frekuensi harmonisa

Tabel 4.21. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental Fasa R Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa R	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	10.2	84.4	1.473	50
I_3	5	78.7	1.373	150
I_5	1.6	58	1.012	250
I_7	1	45	0.785	350
I_9	0.4	21.8	0.381	450
I_{11}	0.6	31	0.540	-
I_{13}	0.6	31	0.540	650
I_{15}	0.1	5.7	0.099	750
I_{17}	0.2	11.31	0.197	850
I_{19}	0.1	5.7	0.099	-
I_{21}	0.1	5.7	0.099	1050
I_{23}	0.1	5.7	0.099	1150
I_{25}	0.1	5.7	0.099	1250
I_{27}	0	0	0	-
I_{29}	0.1	5.7	0.099	1450

Dengan menggunakan persamaan [2.35], uraian deret Fourier sinyal periodik pada lampiran C.5 diberikan hingga harmonisa ke 29 :

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sum_{h=1}^{29} I_n e^{j(n\omega_0 t - \theta + \theta_h)} \\
 &= 10.2e^{j(2\pi ft - 90^\circ + 1.473)} + 5e^{j(6\pi ft - 90^\circ + 1.373)} + 1.6e^{j(10\pi ft - 90^\circ + 1.012)} \\
 &\quad + 1e^{j(14\pi ft - 90^\circ + 0.785)} + 0.4e^{j(18\pi ft - 90^\circ + 0.381)} + 0.6e^{j(22\pi ft - 90^\circ + 0.540)} \\
 &\quad + 0.6e^{j(26\pi ft - 90^\circ + 0.540)} + 0.1e^{j(30\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.2e^{j(34\pi ft - 90^\circ + 0.197)} \\
 &\quad + 0.1e^{j(38\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.1e^{j(42\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.1e^{j(46\pi ft - 90^\circ + 0.099)}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.16. Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa R kondisi pembebanan 30

Desember 2011

4.2.7.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa R Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011

Dengan $h = 1, 3, 5, \dots$, maka komponen Fourier untuk harmonisa arus dan tegangan seperti tabel 4.20 dan 4.21.

Tabel 4.22. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa R tanggal 30 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Arus Saluran Fasa R	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	7.2	50
I_2	0.1	100
I_3	3.5	150
I_5	1.1	250
I_7	0.7	350
I_9	0.3	450
I_{11}	0.4	550
I_{13}	0.4	650
I_{15}	0.1	750

I_{17}	0.2	850
I_{19}	0.1	950
I_{21}	0.1	1050
I_{23}	0.1	1150
I_{25}	0.1	1240
I_{27}	0	1350
I_{29}	0.1	1450

Tabel 4.23. Nilai rms tegangan dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa R tanggal 30 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa R	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	217.5	50
V_2	0.1	100
V_3	9.3	150
V_4	0.1	200
V_5	5	250
V_6	0.1	300
V_7	2.1	350
V_8	0.1	400
V_9	1.1	450
V_{10}	0	-
V_{11}	1.5	550
V_{13}	0.6	650
V_{15}	0.3	750
V_{17}	0.4	850
V_{19}	0.1	950
V_{21}	0.1	1050
V_{25}	0.1	1250

Nilai R dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.44].

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{217.5}{7.2} = 30.208 \Omega$$

Daya nyata, daya kompleks dan daya reaktif yang diberikan oleh komponen fundamental dapat dihitung dengan [2.47], [2.50], dan [2.56].

Daya nyata fundamental :

$$P = I^2 R = 7.2^2 \times 30.208 = 1565.98 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 217.5 \times 7.2 = 1566 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental :

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{1566^2 - 1565.98^2} = \sqrt{62.639} = 7.915 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{9.3}{3.5} = 2.66 \Omega$$

$$P_3 = 3.5^2 \times 2.66 = 32.59 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{5}{1.1} = 4.55 \Omega$$

$$P_5 = 1.1^2 \times 4.55 = 5.51 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{2.1}{0.7} = 3 \Omega$$

$$P_7 = 0.7^2 \times 3 = 1.47 \text{ W}$$

$$R_9 = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.1}{0.3} = 3.67 \Omega$$

$$P_9 = 0.3^2 \times 3.67 = 0.33 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{11rms}}{I_{11rms}} = \frac{1.5}{0.4} = 0.75 \Omega$$

$$P_{11} = 0.4^2 \times 0.75 = 0.12 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.6}{0.4} = 1.5 \Omega$$

$$P_{13} = 0.4^2 \times 1.5 = 0.24 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.3}{0.1} = 3 \Omega$$

$$P_{15} = 0.1^2 \times 3 = 0.03 \text{ W}$$

$$R_{17} = \frac{V_{17rms}}{I_{17rms}} = \frac{0.4}{0.2} = 2 \Omega$$

$$P_{17} = 0.2^2 \times 2 = 0.08 \text{ W}$$

$$R_{19} = \frac{V_{19rms}}{I_{19rms}} = \frac{0.1}{0.1} = 1 \Omega$$

$$P_{19} = 0.1^2 \times 1 = 0.01 \text{ W}$$

$$R_{21} = \frac{V_{21rms}}{I_{21rms}} = \frac{0.1}{0.1} = 1 \Omega$$

$$P_{21} = 0.1^2 \times 1 = 0.01 \text{ W}$$

$$R_{23} = 0$$

$$P_{23} = 0$$

$$R_{25} = \frac{V_{25rms}}{I_{25rms}} = \frac{0.1}{0.1} = 1 \Omega$$

$$P_{25} = 0.1^2 \times 1 = 0.01 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$P_b = I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R + I_{17rms}^2 R + I_{19rms}^2 R$$

$$= 1565.98 + 32.59 + 5.51 + 1.47 + 0.33 + 0.12 + 0.24 + 0.03 + 0.08 + 0.01$$

$$= 1606.36 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan sistem terdistorsi harmonisa juga dapat dihitung. Arus harmonisa hitung hingga harmonisa 19 :

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2 + I_{19rms}^2}$$

$$= \sqrt{3.5^2 + 1.1^2 + 0.7^2 + 0.3^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 0.1^2 + 0.2^2 + 0.1^2} = 3.797 \text{ A}$$

Arus beban total :

$$I_{brms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{hrms}^2} = \sqrt{7.2^2 + 3.797^2} = 8.139 \text{ A}$$

Nilai tegangan harmonisa :

$$V_{hrms} = \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2}$$

$$= \sqrt{9.3^2 + 5^2 + 2.1^2 + 1.1^2 + 1.5^2 + 0.6^2 + 0.3^2 + 0.4^2 + 0.1^2} = 10.954 \text{ V}$$

Tegangan harmonisa total :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{217.5^2 + 10.954^2} = 217.776 \text{ V}$$

Daya kompleks beban atau daya kompleks total :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 217.776 \times 8.139 = 1772.48 \text{ VA}$$

Dengan persamaan [2.102] nilai arus dan sudut fasa $I_{1A} = 10.2 \cos(\omega t - 5.6^\circ) \text{ A}$, dengan demikian maka daya nyata yang diberikan sumber adalah :

$$P_s = 220 \times 7.2 \times (0.99) = 1568.16 \text{ W}$$

Daya kompleks sumber menggunakan persamaan [2.49] :

$$|S_s| = V_{srms} I_{brms} = 220 \times 8.139 = 1790.58 \text{ VA}$$

4.2.7.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa R Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, *Crest Factor*, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.7.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan *Crest Factor*

Nilai THDI dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.37], dengan demikian total distorsi harmonisa arus dihitung hingga deret ke 19.

$$\begin{aligned}
 THDI &= 100\% \times \frac{1}{I_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{19} I_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2 + I_{19rms}^2}}{I_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{3.5^2 + 1.1^2 + 0.7^2 + 0.3^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 0.1^2 + 0.2^2 + 0.1^2}}{I_{1rms}}
 \end{aligned}$$

Nilai THDI diatas mendekati hasil pengukuran 53.50 %. Baik THDI terukur maupun terhitung melampaui standar IEEE untuk sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Nilai THDV juga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.38].

Total distorsi harmonisa dihitung hingga harmonisa ke 19.

$$\begin{aligned}
 THDV &= 100\% \times \frac{1}{V_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{19} V_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2}}{V_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{9.3^2 + 5^2 + 2.1^2 + 1.1^2 + 1.5^2 + 0.6^2 + 0.3^2 + 0.4^2 + 0.1^2}}{217.5} \\
 &= 5.036 \%
 \end{aligned}$$

Nilai THDV masih dalam batas yang ditetapkan IEEE. Untuk melihat bentuk gelombang dapat menggunakan persamaan [2.39] maka :

$$CFi = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{10.2 \text{ A}}{7.2 \text{ A}} = 1.417$$

Cacat gelombang dapat dilihat pada sinyal non-sinus fasa R lampiran C.5.

Untuk nilai *crest factor* tegangan :

$$CFv = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{307.6 \text{ A}}{217.5 \text{ A}} = 1.4143$$

Nilai *crest factor* ini dianggap baik, menunjukkan gelombang tegangan mendekati sempurna seperti pada lampiran C 5

4.2.7.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Dengan menggunakan persamaan [2.65] dan [2.71] faktor daya masing-masing dapat dihitung :

Faktor daya *displacemant*:

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{1565.98}{1566} = 0.99$$

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{1606.36}{1772.48} = 0.91$$

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{1565.98}{1790.58} = 0.87$$

Faktor daya masing-masing dapat dituliskan kembali sebagai perbandingan.

Faktor daya hasil pengukuran :

$$DPF = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.87$$

Faktor daya hasil perhitungan :

$$DPF = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.87$$

Faktor daya *displacemant* dan faktor daya *true* hasil analisa sama dengan nilai yang terukur. Faktor daya *true* tersebut masih dalam batas yang di ijin

> 0.95. Meskipun demikian, harmonisa tetap memberikan kontribusi terhadap

rendahnya nilai faktor walaupun kecil. Sebagai pertimbangan disarankan untuk memasang filter harmonisa dan kapasitor bank di Laboratorium Teknik Elektro.

4.2.7.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Nilai daya reaktif yang dikonsumsi saat terjadinya harmonisa biasanya lebih besar dari daya reaktif fundamental.

Perbandingan daya reaktif :

$$\text{Fundamental} = 7.915 \text{ VAR}$$

$$\text{Harmonisa} = 863.6 \text{ VAR}$$

Pada kondisi fundamental, daya reaktif hanya sebesar 7.915 VAR sedangkan dalam keadaan harmonisa daya reaktif senilai 863.6 VAR, daya reaktif ini sangat besar jika dibandingkan dengan data-data hasil penelitian sebelumnya. Harmonisa, memperbesar daya reaktif. Sebagai pertimbangan dan untuk keamanan, tetap disarankan pada Laboratorium Teknik Elektro untuk memasang kapasitor bank dan filter harmonisa.

4.2.8. Perhitungan Fasa S Kondisi Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011

Dengan $h = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$, maka dapat dihitung nilai amplituda, sudut fasa dan frekuensi harmonisa. Dengan menggunakan persamaan [2.32], hasil perhitungan dapat ditabelkan sebagai berikut.

Tabel 4.24. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental Fasa S Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa S	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	26.7	87.86	1.53	50
I_2	0.3	16.69	0.29	100
I_3	12.2	85.3	1.49	150
I_4	0.2	11.31	0.197	200
I_5	1.5	56.3	0.983	250
I_7	3	71.56	1.249	350
I_9	1	45	0.785	450
I_{11}	1.1	47.73	0.833	550
I_{13}	0.9	42	0.733	650
I_{15}	0.6	31	0.540	750
I_{17}	0.8	38.7	0.675	850
I_{19}	0.1	5.7	0.099	950
I_{21}	0.4	21.8	0.381	1050
I_{23}	0.1	5.7	0.099	1150
I_{25}	0.3	16.69	0.291	1250
I_{27}	0.1	5.7	0.099	1350
I_{29}	0.2	11.31	0.197	1450

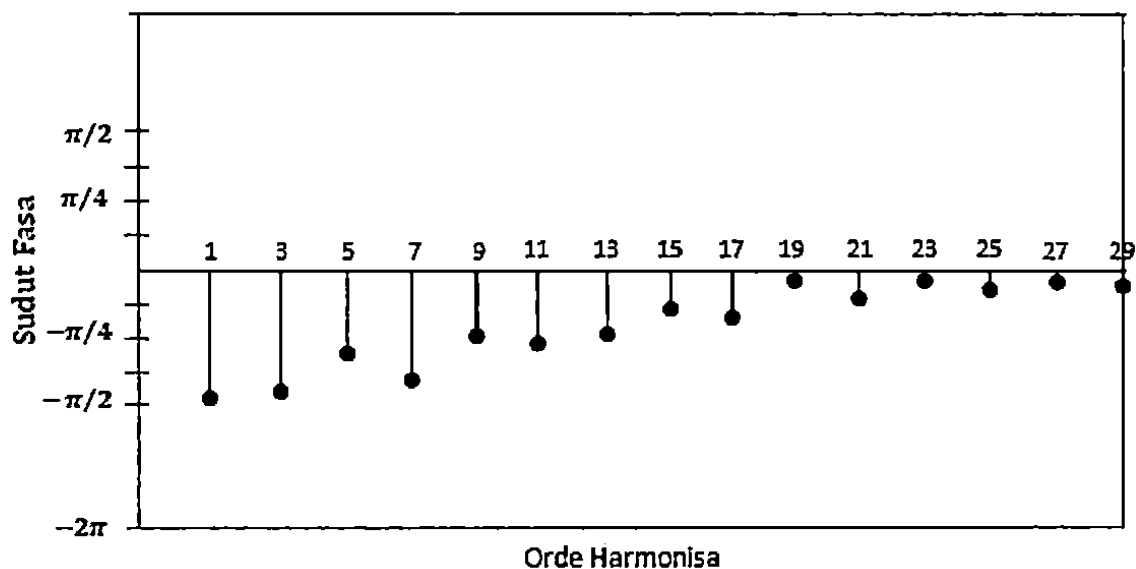
Harmonisa fasa S pada lampiran C.5 terukur hingga orde 45, karena nilainya kecil maka dapat diabaikan. Persamaan [2.35] dapat digunakan untuk mengurai sinyal non-sinus fungsi ganjil dan genap kedalam deret Fourier hingga harmonisa ke 29.

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sum_{n=1}^{29} I_n e^{j(n\omega t - \theta - \theta_h)} \\
 &= 26.7e^{j(2\pi ft - 240^\circ - 1.53)} + 0.3e^{j(4\pi ft - 240^\circ - 0.29)} + 12.2e^{j(6\pi ft - 240^\circ - 1.49)} \\
 &+ 0.2e^{j(8\pi ft - 240^\circ - 0.197)} + 1.5e^{j(10\pi ft - 240^\circ - 0.983)} + 3e^{j(14\pi ft - 240^\circ - 1.249)} \\
 &+ 1e^{j(18\pi ft - 240^\circ - 0.785)} + 1.1e^{j(22\pi ft - 240^\circ - 0.833)} + 0.9e^{j(26\pi ft - 240^\circ - 0.733)}
 \end{aligned}$$

$$+0.4e^{j(42\pi ft-240^\circ-0.381)} + 0.1e^{j(46\pi ft-240^\circ-0.099)} + 0.3e^{j(50\pi ft-240^\circ-0.291)}$$

$$+ 0.1e^{j(54\pi ft-240^\circ-0.099)} + 0.2e^{j(58\pi ft-240^\circ-0.197)}$$

Jika digambarkan spektrum fasa dari sinyal periodik non-sinus pengukuran lampiran C.5, didapatkan spektrum seperti gambar 4.17.



Gambar 4.17. Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa S kondisi pembebanan 30
Desember 2011

4.2.8.1. Kualitas Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa S

Dengan $h = 1, 2, 3, 4, \dots$, maka komponen harmonisa dapat ditabelkan sebagai berikut.

Tabel 4.25. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa S tanggal 30 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Arus Saluran Fasa S	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	18.9	50
I_2	0.2	100
I_3	8.6	150

Tabel 4.26. Nilai rms tegangan dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan

harmonisa kondisi pembebanan fasa S tanggal 30 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa S	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V ₁	213.1	50
V ₂	0.5	100
V ₃	9.4	150
V ₄	0.1	200
V ₅	4.9	250
V ₆	0.1	300
V ₇	2	350
V ₉	0.7	450
V ₁₁	1.4	550
V ₁₃	0.4	650
V ₁₅	0.1	750
V ₁₇	0	850
V ₁₉	0.2	950
V ₂₁	0.1	1050
V ₂₃	0.1	1150
V ₂₅	0.1	1250
V ₂₇	0	1350
V ₂₉	0.1	1450

I ₄	0.1	200
I ₅	1.1	250
I ₇	2.1	350
I ₉	0.9	450
I ₁₁	0.8	550
I ₁₃	0.7	650
I ₁₅	0.4	750
I ₁₇	0.6	850
I ₁₉	0.1	950
I ₂₁	0.3	1050
I ₂₃	0.1	1150
I ₂₅	0.2	1250
I ₂₇	0.1	1350
I ₂₉	0.1	1450

Daya nyata yang diberikan oleh komponen fundamental pada beban sebagai berikut :

Daya nyata fundamental :

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 18.9^2 \times 11.275 = 4027.543 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 213.1 \times 18.9 = 4027.59 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental :

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{4027.59^2 - 4027.543^2} = \sqrt{378.591} = 19.457 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_2 = \frac{V_{2rms}}{I_{2rms}} = \frac{0.5}{0.2} = 2.5 \Omega$$

$$P_2 = 0.2^2 \times 2.5 = 0.1 \text{ W}$$

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{9.4}{8.6} = 1.093 \Omega$$

$$P_3 = 8.6^2 \times 1.093 = 80.838 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{4.9}{1.1} = 4.455 \Omega$$

$$P_5 = 1.1^2 \times 4.455 = 5.391 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{2}{2.1} = 0.952 \Omega$$

$$P_7 = 2.1^2 \times 0.952 = 4.198 \text{ W}$$

$$R_9 = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{0.7}{0.9} = 0.78 \Omega$$

$$P_9 = 0.9^2 \times 0.78 = 0.632 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{11rms}}{I_{11rms}} = \frac{1.4}{0.8} = 1.75 \Omega$$

$$P_{11} = 0.8^2 \times 1.75 = 1.12 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.4}{0.7} = 0.571 \Omega$$

$$P_{13} = 0.7^2 \times 0.571 = 0.279 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.1}{0.25} = 0.25 \Omega$$

$$P_{15} = 0.1^2 \times 0.25 = 0.025 \text{ W}$$

$$R_{17} = 0$$

$$P_{17} = 0$$

$$R_{19} = \frac{V_{19rms}}{I_{19rms}} = \frac{0.2}{0.1} = 2 \Omega$$

$$P_{19} = 0.1^2 \times 2 = 0.002W$$

$$R_{21} = \frac{V_{21rms}}{I_{21rms}} = \frac{0.1}{0.3} = 0.33 \Omega$$

$$P_{21} = 0.3^2 \times 0.33 = 0.0297 W$$

$$R_{23} = \frac{V_{23rms}}{I_{23rms}} = \frac{0.1}{0.1} = 1 \Omega$$

$$P_{23} = 0.1^2 \times 1 = 0.01 W$$

$$R_{25} = \frac{V_{25rms}}{I_{25rms}} = \frac{0.1}{0.2} = 0.5 \Omega$$

$$P_{25} = 0.2^2 \times 0.5 = 0.02 W$$

Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$P_b = I_{1rms}^2 R + I_{2rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R$$

$$+ I_{15rms}^2 R + I_{17rms}^2 R + I_{19rms}^2 R + I_{21rms}^2 R + I_{23rms}^2 R + I_{25rms}^2 R$$

$$= 4027.543 + 0.1 + 80.838 + 5.391 + 4.198 + 0.632 + 1.12 + 0.279 + 0.025$$

$$+ 0 + 0.02 + 0.0297 + 0.01 + 0.02$$

$$= 4120.2057 W$$

Dari persamaan [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan sistem terdistorsi harmonisa juga dapat dihitung. Arus harmonisa dihitung hingga harmonisa 25 :

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{2rms}^2 + I_{3rms}^2 + I_{4rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{19rms}^2 + I_{21rms}^2 + I_{23rms}^2 + I_{25rms}^2}$$

$$= \sqrt{0.2^2 + 8.6^2 + 0.1^2 + 1.1^2 + 2.1 + 0.9^2 + 0.8^2 + 0.7^2 + 0.4^2 + 0.1^2 + 0.3^2 + 0.1^2 + 0.2^2}$$

$$= \sqrt{91.99} = 9.594 A$$

Arus total beban :

$$I_{brms} = \sqrt{18.9^2 + 9.049^2} = 20.955 \text{ A}$$

Nilai tegangan dihitung hingga harmonisa 25 :

$$\begin{aligned} V_{hrms} &= \sqrt{V_{2rms}^2 + V_{3rms}^2 + V_{4rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 \\ &\quad + V_{15rms}^2 + V_{19rms}^2 + V_{21rms}^2 + V_{23rms}^2 + V_{25rms}^2} \\ &= \sqrt{0.5^2 + 9.4^2 + 0.1^2 + 4.9^2 + 2^2 + 0.7^2 + 1.4^2 + 0.4^2 + 0.1^2 + 0.2^2 \\ &\quad + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2} \\ &= 10.923 \text{ V} \end{aligned}$$

Tegangan harmonisa total :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{213.1^2 + 10.923^2} = 213.379 \text{ V}$$

Daya kompleks beban atau daya kompleks fundamental dan harmonisa :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 213.379 \times 20.955 = 4471.357 \text{ VA}$$

Nilai daya beban mendekati nilai yang terukur.

Dengan menggunakan persamaan [2.103], maka arus dan sudut fasa harmonisa $I_{1s} = 26.7 \cos(\omega t - 327.86^\circ) \text{ A}$, sehingga daya nyata yang diberikan sumber menjadi :

$$P_s = 220 \times 18.9 \times 0.847 = 3521.826 \text{ W}$$

Dengan menggunakan persamaan [2.49] daya kompleks menjadi :

$$|S| = V \cdot I = 220 \times 20.955 = 4610.1 \text{ VA}$$

4.2.8.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa S Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, Crest Factor, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.8.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan Crest Factor

Jika diambil harmonisa sampai orde ke 25 maka total distorsi harmonisa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.37] dan [2.38].

$$\begin{aligned}
 THDI &= 100\% \frac{1}{I_{1rms}} \times \sqrt{\sum_{h=2}^{25} I_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{2rms}^2 + I_{3rms}^2 + I_{4rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2 + I_{19rms}^2 + I_{21rms}^2 + I_{23rms}^2 + I_{25rms}^2}}{I_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{0.2^2 + 8.6^2 + 0.1^2 + 1.1^2 + 2.1 + 0.9^2 + 0.8^2 + 0.7^2 + 0.4^2 + 0.6^2 + 0.1^2 + 0.3^2 + 0.1^2 + 0.2^2}}{18.9} \\
 &= 47.98\%
 \end{aligned}$$

Hasil THDI perhitungan mendekati THDI terukur dan nilai ini melampaui standar yang ditetapkan IEEE.

Dengan mengambil nilai harmonisa ganjil dan genap, nilai THDV hingga harmonisa ke 25 dapat dihitung.

$$\begin{aligned}
 THDV &= 100\% \frac{1}{V_{1rms}} \times \sqrt{\sum_{h=2}^{25} V_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{2rms}^2 + V_{3rms}^2 + V_{4rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{19rms}^2 + V_{21rms}^2 + V_{23rms}^2 + V_{25rms}^2}}{V_{1rms}}
 \end{aligned}$$

$$= 100\% \times \sqrt{\frac{0.5^2 + 9.4^2 + 0.1^2 + 4.9^2 + 2^2 + 0.7^2 + 1.4^2 + 0.4^2 + 0.1^2 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2}{213.1}}$$

$$= 5.13 \%$$

Hasil ini mendekati nilai THDV terukur.

nilai *crest factor* arus :

$$CF_i = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{26.7 \text{ A}}{18.9 \text{ A}} = 1.4127$$

Dengan melihat nilai *crest factor*nya, gelombang sinusoidal tidak sempurna. harmonisa dengan THDI 47.82 % atau 47.98 % terukur menimbulkan cacat pada sinyal sinus. Untuk bentuk gelombang tersebut dapat dilihat pada lampiran C.5.

Nilai *crest factor* tegangan :

$$CF = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{301.4 \text{ A}}{213.1 \text{ A}} = 1.4144$$

Sinusoidal tegangan mendekati $\sqrt{2}$, karena THDV masih dalam batas yang yang diijinkan. Gelombang tegangan dapat juga dilihat pada lampiran C.5.

Dari persamaan [2.65] dan [2.71], nilai faktor daya dapat dapat dihitung.

Faktor daya *displacement* :

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{4027.543}{4027.59} = 0.99$$

Faktor daya beban :

Faktor daya sebenarnya :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{4027.543}{4610.1} = 0.87$$

Faktor daya masing-masing dapat dituliskan kembali.

Faktor daya hasil pengukuran :

$$\text{DPF} = 0.981$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.881$$

Faktor daya hasil perhitungan :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.87$$

Dengan THDI hasil analisa 47.98 % dan 47.82 % terukur, maka faktor daya *true* lebih rendah dari nilai maksimum. Pada tabel tidak dicantumkan nilai faktor daya maksimum untuk THDI 47.98 % atau 47.82 %. Yang tercantum hanya nilai maksimum faktor daya 0.89 pada THDI 50 %. Tapi pada pengukuran ini, nilai faktor daya pada THDI 47.98 % atau 47.82 % lebih rendah. Disarankan Laboratorium Teknik Elektro di filter dari harmonisa dan memasang kapasitor bank.

4.2.8.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Dalam dunia harmonisa, harmonisa adalah daya reaktif yang besar

Daya reaktif saat tidak ada harmonisa sebesar 19.457 VAR. Pada saat harmonisa, daya reaktif senilai 2122 VAR, nilai daya reaktif ini paling besar selama penelitian harmonisa di Laboratorium Teknik Elektro. Pada saat penelitian berlangsung ada beberapa beban non-linear di Laboratorium yang dioperasikan diantaranya, 8 perangkat komputer pada Laboratorium Jaringan Komputer, 15 perangkat komputer pada Laboratorium Komputer dan Perancangan, 1 perangkat komputer pada ruangan Sidang dan Referensi, 1 unit lemari es di Laboratorium Laboratorium Pengukuran dan Kendali dan 1 perangkat komputer pada Laboratorium Pengukuran dan Kendali.

Disarankan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta untuk memperbaiki kualitas daya dengan pemasangan kapasitor bank, sebagai bentuk antisipasi.

4.2.9. Perhitungan Fasa T Kondisi Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011

Bentuk spektrum amplituda dari sinyal periodik diatas ditunjukkan oleh tabel 4.28.

Tabel 4.28. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental fasa T Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011

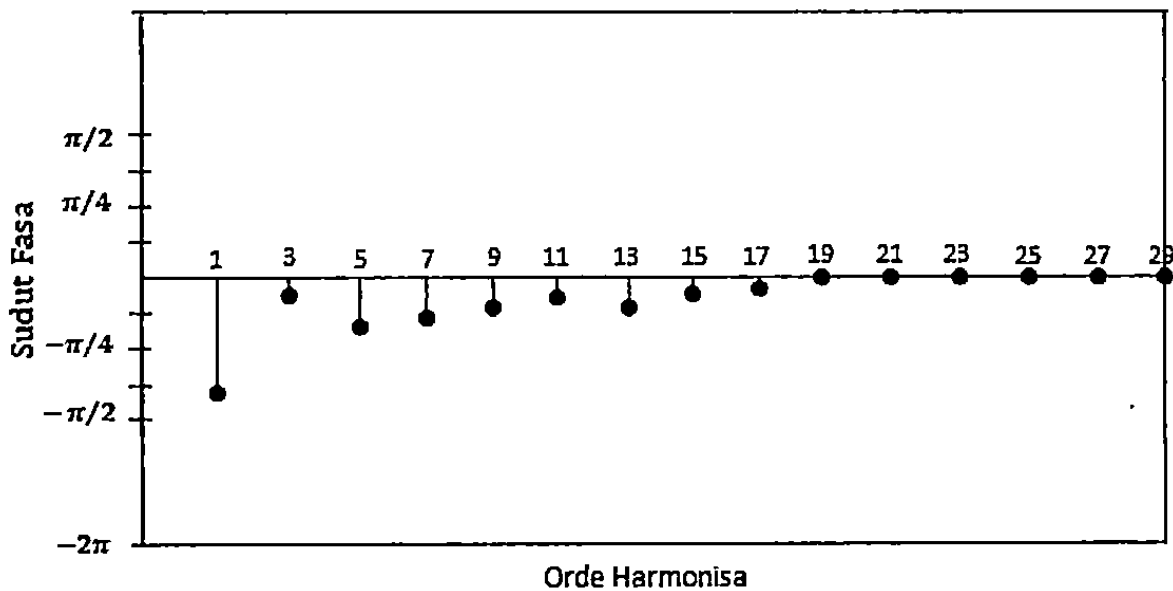
Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa T	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	4	76	1.326	50
I_3	0.2	11.31	0.197	150
I_5	0.8	38.7	0.675	250
I_7	0.6	31	0.540	350
I_9	0.4	21.801	0.381	450
I_{11}	0.3	16.69	0.291	550
I_{13}	0.4	21.801	0.381	650

I_{15}	0.2	11.31	0.197	750
I_{17}	0.1	5.7	0.099	850

Dengan [2.35], uraian deret Fourier sinyal periodik non-sinus lampiran C.5 diberikan hingga harmonisa ke 17.

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sum_{h=1}^{17} I_n e^{j(n\omega_1 t + 120^\circ - \theta_n)} \\
 &= 4e^{j(2\pi f t + 120^\circ - 1.326)} + 0.2e^{j(6\pi f t + 120^\circ - 0.197)} + 0.8e^{j(10\pi f t + 120^\circ - 0.675)} \\
 &\quad + 0.6e^{j(14\pi f t + 120^\circ - 0.540)} + 0.4e^{j(18\pi f t + 120^\circ - 0.381)} + 0.3e^{j(22\pi f t + 120^\circ - 0.291)} \\
 &\quad + 0.4e^{j(26\pi f t + 120^\circ - 0.381)} + 0.2e^{j(30\pi f t + 120^\circ - 0.197)} + 0.1e^{j(34\pi f t + 120^\circ - 0.099)}
 \end{aligned}$$

Dengan mengambil nilai sudut fasa harmonisa, spektrum fasa dari sinyal periodik non-sinus lampiran D.2 maka dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4.19. Spektrum fasa sinyal non sinus fasa T kondisi pembebanan 30

4.2.9.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa T Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011

Dengan $h = 1, 3, 5, \dots$, maka komponen arus dan tegangan serta frekuensi harmonisa dapat ditabelkan seperti 4.29.dan 4.30.

Tabel 4.29. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa T tanggal 30 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Arus Saluran Fasa T	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	2.8	50
I_3	0.1	150
I_5	0.6	250
I_7	0.5	350
I_9	0.3	450
I_{11}	0.2	550
I_{13}	0.3	650
I_{15}	0.1	750
I_{17}	0.1	850

Tabel 4.30. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa T tanggal 30 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa S	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	219.5	50
V_2	0.4	100
V_3	6	150
V_4	0.1	200
V_5	5.3	250
V_6	0.2	300
V_7	2.1	350
V_8	0.1	400
V_9	1.1	450
V_{10}	0.2	500
V_{11}	1.8	550
V_{12}	0.1	600
V_{13}	1.2	650
V_{14}	0.6	750

V_{17}	0.4	850
V_{19}	0.1	950
V_{21}	0.1	1050
V_{29}	0.1	1450

Dengan mengambil nilai arus dan tegangan yang tertera pada tabel diatas, nilai tahanan masing-masing harmonisa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.44].

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{219.5}{2.8} = 78.39 \Omega$$

Daya yang diberikan oleh komponen fundamental pada beban sebagai berikut :

Daya nyata fundamental :

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 2.8^2 \times 78.39 = 614.578 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 219.5 \times 2.8 = 614.6 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental :

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{614.6^2 - 614.578^2} = \sqrt{27.042} = 5.2 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{6}{0.1} = 60 \Omega$$

$$P_3 = 0.1^2 \times 60 = 0.6 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{5.3}{0.6} = 8.83 \Omega$$

$$P_5 = 0.6^2 \times 8.33 = 2.99 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{2.1}{0.1} = 21 \Omega$$

$$P_7 = 0.1^2 \times 21 = 0.21 \text{ W}$$

$$R_9 = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.1}{0.3} = 3.67 \Omega$$

$$P_9 = 0.3^2 \times 3.67 = 0.33 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{11rms}}{I_{11rms}} = \frac{1.8}{0.2} = 9 \Omega$$

$$P_{11} = 0.2^2 \times 9 = 0.36 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{1.2}{0.3} = 4 \Omega$$

$$P_{13} = 0.3^2 \times 4 = 0.36 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.6}{0.1} = 6 \Omega$$

$$P_{15} = 0.1^2 \times 6 = 0.06 \text{ W}$$

$$R_{17} = \frac{V_{17rms}}{I_{17rms}} = \frac{0.4}{0.1} = 4 \Omega$$

$$P_{17} = 0.1^2 \times 4 = 0.04 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$P_b = I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R + I_{17rms}^2 R$$

$$= 614.577 + 0.6 + 2.99 + 1.05 + 0.33 + 0.36 + 0.36 + 0.06 + 0.04$$

$$= 620.007 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan sistem terdistorsi harmonisa juga dapat dihitung.

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}$$

$$= \sqrt{0.1^2 + 0.6^2 + 0.5^2 + 0.3^2 + 0.2^2 + 0.3^2 + 0.1^2 + 0.1^2} = 0.927 \text{ A}$$

Arus beban total :

$$I_{brms} = \sqrt{2.8^2 + 0.927^2} = 2.949 \text{ A}$$

Nilai tegangan hingga harmonisa ke 21 dengan mengabaikan harmonisa ke 17 dan ke 19 adalah :

$$V_{hrms} = \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2}$$

$$= \sqrt{6^2 + 5.3^2 + 2.1^2 + 1.1^2 + 1.8^2 + 1.2^2 + 0.6^2 + 0.4^2} = 8.655 \text{ V}$$

Tegangan harmonisa total :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{219.5^2 + 8.655^2} = 219.671 \text{ V}$$

Daya kompleks beban :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 219.671 \times 2.949 = 647.809 \text{ VA}$$

Nilai daya kompleks beban mendekati nilai yang terukur.

Dari [2.104] nilai arus $I_{1T} = 4 \cos(\omega t + 44^\circ)$ A, sehingga daya nyata yang diberikan sumber :

$$P_s = 220 \times 2.8 \times 0.719 = 442.904 \text{ W}$$

Daya kompleks menggunakan persamaan [2.49] :

$$|S_s| = V_{srms} I_{brms} = 220 \times 2.949 = 648.78 \text{ VA}$$

2.2.9.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa T Pembebanan Tanggal 30 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, Crest Factor, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.9.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan Crest Factor

THDI dan THDV dapat dihitung sebagai evaluasi daya dengan [2.37] dan [2.38]. Jika diambil nilai harmonisa sampai orde ke 15 maka total distorsi harmonisa arus dapat dihitung dengan persamaan [2.37].

$$\begin{aligned}
 THDI &= 100\% \times \frac{1}{I_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=2}^{15} I_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{2rms}^2 + I_{3rms}^2 + I_{4rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2}}{I_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{0.1^2 + 0.6^2 + 0.5^2 + 0.3^2 + 0.2^2 + 0.3^2 + 0.1^2 + 0.1^2}}{2.8} \\
 &= 33.1 \%
 \end{aligned}$$

Dengan mengambil nilai harmonisa ganjil, nilai THDV hingga harmonisa ke 17 dapat dihitung dengan persamaan [2.38].

$$\begin{aligned}
 THDV &= 100\% \times \frac{1}{V_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=2}^{17} V_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2}}{V_{1rms}}
 \end{aligned}$$

$$= 100\% \times \frac{\sqrt{6^2 + 5.3^2 + 2.1^2 + 1.1^2 + 1.8^2 + 1.2^2 + 0.6^2 + 0.4^2}}{10}$$

$$= 3.94 \%$$

Dengan persamaan [2.39] maka nilai *cres faktor* arus :

$$CF = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{4}{2.8 \text{ A}} = 1.429$$

Dengan melihat nilai *cres faktor* arus diatas, gelombang sinusoidal tidak sempurna lagi akibat adanya harmonisa.

Nilai *cres faktor* arus tegangan :

$$CF = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{310.5 \text{ A}}{219.5 \text{ A}} = 1.4146$$

Sinusoidal tegangan mendekati sempurna, karena THDV masih dalam batas yang yang diijinkan.

4.2.9.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Dengan menggunakan persamaan [2.65] dan [2.71] faktor daya dapat

Selisih nilai faktor daya *true* diatas sangat jauh dengan nilai yang terukur. Permasalahan ini terkadang sering muncul dalam pengukuran harmonisa ketika nilai arus yang terukur lebih kecil dari nilai yang dapat diukur oleh alat ukur harmonisa. Nilai arus harmonisa yang terukur ≤ 2 A atau ≤ 1 A pada setiap pengukuran menyebabkan banyak kejanggalan. Hal ini bisa ditunjukkan oleh hasil penelitian tanggal 30 Desember jam 12.00 dengan nilai THD fasa T sebesar 144 % dan nilai arus rms terukur 0.616 A. Data ini ada pada data pengukuran tanggal 30 Desember jam 12.00 pada lampiran A. Data tersebut pernah dianalisa dan hasilnya tidak sesuai terutama untuk nilai THDnya. Maka kesimpulannya, pada nilai arus yang terbaca pada alat ukur ≥ 3 A, hasil pengukuran tersebut dalam analisa lebih mendekati hasil-hasil yang terukur, tapi pada kondisi arus yang terukur ≤ 2 A atau ≤ 1 A, yang terjadi adalah seringnya ada kontradiksi antara hasil analisa dengan hasil penelitian. Tapi untuk nilai arus rms sebesar 2 A pada pengukuran harmonisa di Laboratorium Teknik Elektro masih dapat diterima walaupun hasil analisa pada satu sisi tidak sesuai dengan hasil penelitian, seperti analisa terhadap nilai faktor daya diatas.

Dengan demikian, nilai faktor daya dapat ditampilkan dalam perbandingan

Faktor daya hasil perhitungan :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.94$$

4.2.9.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Perbandingan daya reaktif fundamental dan harmonisa dapat menjelaskan harmonisa dan kualitas daya.

$$\text{Fundamental} = 5.2 \text{ VAR}$$

$$\text{Harmonisa} = 353 \text{ VAR}$$

Daya reaktif akibat adanya harmonisa terukur sebesar 353 VAR, sedangkan pada kondisi fundamental nilainya sebesar 5.3 VAR. Namun demikian, nilai daya reaktif fasa T pengukuran tanggal 30 Desember 2011 paling kecil dibanding fasa R dan S pengukuran tanggal 30 Desember 2011. Untuk nilai selengkapnya, dapat dilihat pada tabel hasil pengukuran tanggal 30 Desember 2011 lampiran C.5.

Tetap disarankan investasi kapasitor bank dan filter harmonisa.

4.2.9.3. Daya 3 Fasa

Dengan menggunakan persamaan [2.98] daya total 3 hasil penelitian dan

$$= 1606.36 + 4120.2057 + 620.007 = 6346.573 \text{ W}$$

Daya kompleks 3 fasa hasil perhitungan :

$$\begin{aligned} |S_T| &= S_{bR} + S_{bS} + S_{bT} \\ &= 1772.48 + 4471.357 + 647.809 = 6891.646 \text{ VA} \end{aligned}$$

Daya aktif tiga fasa hasil pengukuran :

$$\begin{aligned} P_T &= P_{bR} + P_{bS} + P_{bT} \\ &= 1558 + 3944 + 560 = 6062 \text{ W} \end{aligned}$$

Daya kompleks tiga fasa hasil pengukuran :

$$\begin{aligned} |S_T| &= S_{bR} + S_{bS} + S_{bT} \\ &= 1781 + 4479 + 663.2 = 6923.2 \text{ VA} \end{aligned}$$

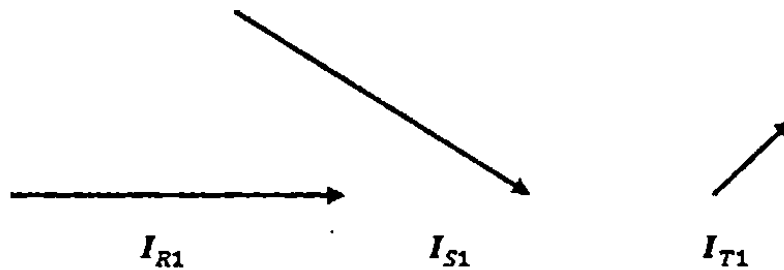
Daya reaktif tiga fasa hasil pengukuran :

$$\begin{aligned} Q_T &= Q_{bR} + Q_{bS} + Q_{bT} \\ &= 863.6 + 2122 + 355 = 3340.6 \text{ VAR} \end{aligned}$$

4.2.9.4. Kualitas Daya Ditinjau Dari Ketidakseimbangan Diagram Fasor

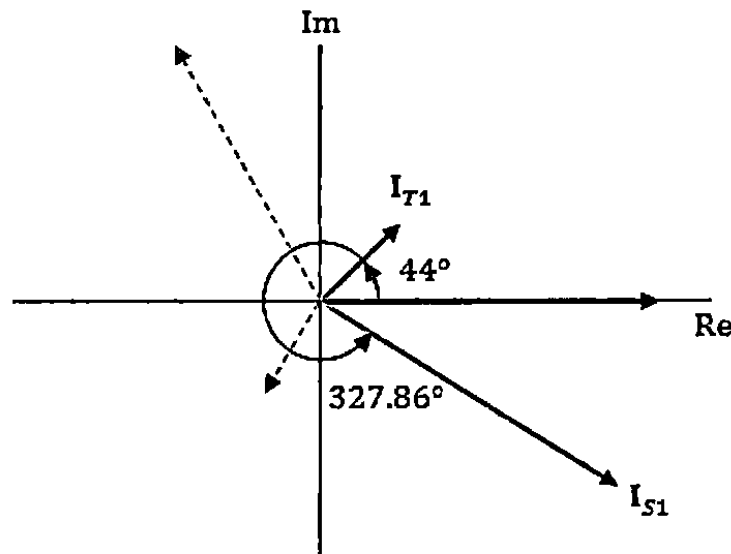
Dengan nilai deret Fourier $I(t)$ masing-masing fasa R, S, T hasil analisa untuk pembebanan tanggal 30 Desember 2011, maka dapat ditentukan pergeseran fasor masing-masing fasa akibat pengaruh harmonisa. Nilai arus masing-masing dapat ditulis kembali dalam notasi fasor dengan urutan fasa (c, b, a) untuk masing-masing arus, $\bar{I}_{1R} = 10.2 \angle 0^\circ$, $\bar{I}_{1S} = 26.7 \angle 327.86^\circ$, $\bar{I}_{1T} = 4 \angle 44^\circ$.

Hanya dengan melihat sudut fasa dan amplituda gelombang dari bentuk belahnya diatas terlihat adanya ketidak seimbangan baik pada amplituda maupun



Gambar 4.19. Besar dan arah fasor fundamental fasa R, S, T hasil perhitungan

Diagram fasor tidak seimbang bisa juga dilihat pada gambar 4.20.



Gambar 4.20. Diagram fasor beban tidak seimbang fundamental hasil perhitungan

Dari gambar 4.20, fasor untuk fasa S bergeser menuju kuadran IV sebesar 327.86° dari titik 0° atau 207.86° dari titik awal fasa S. Sedangkan fasor fasa T bergeser dari kuadran III menuju kuadran I sebesar 164° dari sudut awalnya. Secara umum, harmonisa menyebabkan ketidak seimbangan beban pada diagram fasornya. Hal ini ditunjukkan juga oleh nilai amplituda arus masing-masing fasa dimana nilai amplituda masing-masing fasa berbeda dan sudut fasa tidak lagi

terpisah sebesar 120° antara masing-masing fasanya. Adanya

pergeseran fasor fasa S menuju kuadran IV dan fasor fasa T menuju kuadran I, menunjukkan adanya pengaruh harmonisa di Laboratorium Teknik Elektro.

Dengan melihat kembali diagram fasor hasil pengukuran pada lampiran C.5, terlihat adanya arus netral akibat pengaruh harmonisa di Laboratorium Teknik Elektro akibat aktifnya beberapa beban non-linear.

Dengan menggunakan persamaan [2.101], maka dapat dihitung besarnya arus netral akibat pengaruh harmonisa.

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_N &= \bar{I}_{1R} + \bar{I}_{1S} + \bar{I}_{1T} \neq 0 \\
 &= 10.2 \angle 0^\circ + 26.7 \angle 327.86^\circ + 4 \angle 44^\circ \\
 &= 10.2(\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + 26.7(\cos 327.86^\circ + j \sin 327.86^\circ) \\
 &\quad + 4(\cos 44^\circ + j \sin 44^\circ) \\
 &= (10.2 + 22.615 - j14.204 + 2.876 + j2.78) \\
 &= 35.691 - j11.424 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$I_{Nmaks} = \sqrt{35.691^2 + 11.424^2} = 37.47 \text{ A}$$

$$\theta_N = \tan^{-1} \frac{11.424}{35.691} = 17.74^\circ \Rightarrow 360^\circ - \theta_h = 342.26^\circ \approx 343^\circ$$

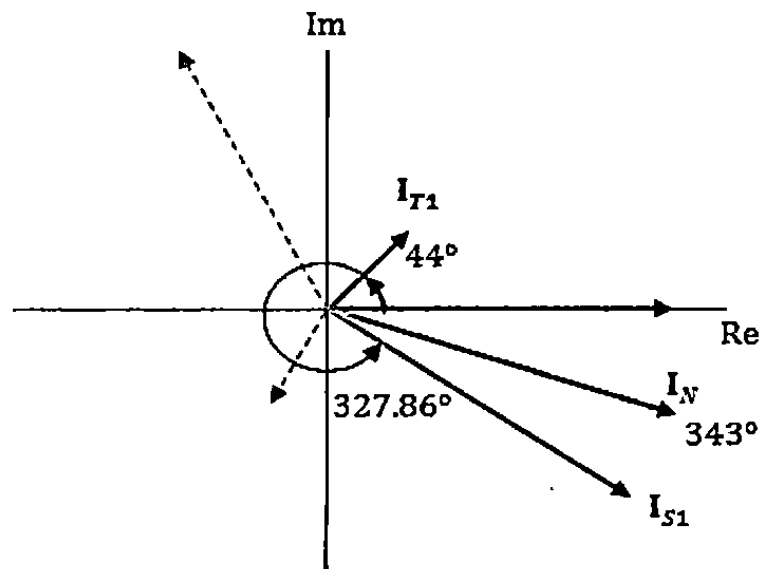
dengan demikian nilai rms arus pada konduktor netral :

$$I_{Nrms} = \frac{37.47}{\sqrt{2}} \angle 343^\circ = 26.49 \angle 343^\circ \text{ A}$$

Nilai amplituda dan nilai arus rms hasil perhitungan adalah sebesar $\bar{I}_N = \bar{I}_{1R} + \bar{I}_{1S} + \bar{I}_{1T} = 26.49 \angle 343^\circ \text{ A}$. Nilai ini mendekati hasil pengukuran

... pada lampiran C dan C.5 sebesar 32.220 A dengan sudut fase netral

Dengan adanya arus netral menunjukkan ketidak seimbangan beban akibat pengaruh harmonisa. Jika digambarkan dalam sumbu Re dan Im diagram fasor untuk arus netral ditunjukkan oleh gambar 4.21.



Gambar 4.21. Diagram fasor fundamental dan arus netral hasil perhitungan

Arah fasor hasil pengukuran dapat dilihat pada lampiran C.5 dengan arah fasor yang serupa dengan hasil analisa. Akibat adanya arus netral, terjadi *losses* pada netral transformator dengan nilai sebesar $P_N = I_N^2 R_N$.

4.2.10. Perhitungan Fasa R Kondisi Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011

Dari sinyal non-sinus fasa R pada lampiran D.2 maka amplituda, sudut fasa dan frekuensi harmonisa dapat ditentukan dengan cara yang sama

..... Hasil perhitungan dapat ditabalkan seperti tabel

Tabel 4.31. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental fasa R Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011

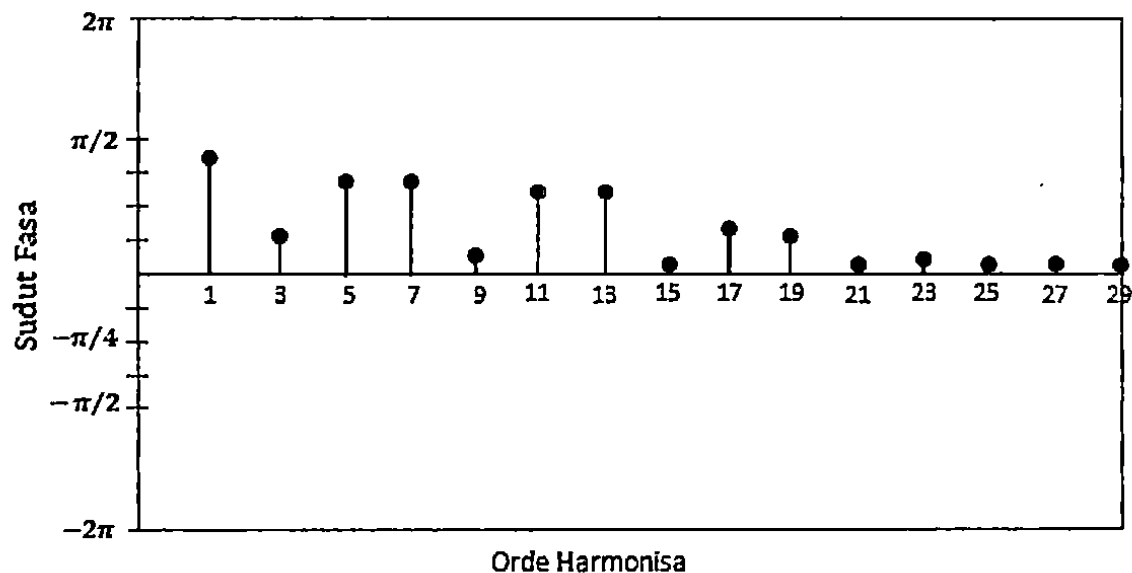
Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa R	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	5.2	79.11	1.38	50
I_3	0.6	31	0.540	150
I_4	0.1	5.7	0.099	200
I_5	2	63.43	1.107	250
I_6	0.1	5.7	0.099	300
I_7	2	63.43	1.107	350
I_9	0.3	16.69	0.291	450
I_{11}	1.5	56.309	0.983	550
I_{13}	1.4	54.46	0.951	650
I_{15}	0.1	5.7	0.099	750
I_{17}	0.7	35	0.611	850
I_{19}	0.6	31	0.540	950
I_{21}	0.1	5.7	0.099	1050
I_{23}	0.2	11.31	0.197	1150
I_{25}	0.1	5.7	0.099	1250
I_{27}	0.1	5.7	0.099	1350
I_{29}	0.1	5.7	0.099	1450
I_{31}	0.2	35	0.611	850
I_{33}	0.1	5.7	0.099	950
I_{35}	0.1	5.7	0.099	1050
I_{37}	0.2	11.31	0.197	1150
I_{47}	0.1	5.7	0.099	1250
I_{49}	0.1	5.7	0.099	1350

Sinyal non-sinus fasa R lampiran D.2 dapat diurai dalam deret Fourier persamaan [2.35] hingga harmonisa ke 29.

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sum_{h=1}^{29} I_n e^{j(n\omega t - \theta + \theta_h)} \\
 &= 5.2e^{j(2\pi ft - 90^\circ + 1.38)} + 0.6e^{j(6\pi ft - 90^\circ + 0.540)} + 2e^{j(10\pi ft - 90^\circ + 1.107)} \\
 &\quad + 2e^{j(14\pi ft - 90^\circ + 1.107)} + 0.3e^{j(18\pi ft - 90^\circ + 0.291)} + 1.5e^{j(22\pi ft - 90^\circ + 0.983)} \\
 &\quad + 1.4e^{j(26\pi ft - 90^\circ + 0.951)} + 0.1e^{j(30\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.7e^{j(34\pi ft - 90^\circ + 0.611)}
 \end{aligned}$$

$$+ 0.1e^{j(50\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.1e^{j(54\pi ft - 90^\circ + 0.099)} + 0.1e^{j(58\pi ft - 90^\circ + 0.099)}$$

Dengan demikian, spektrum fasa dari sinyal periodik non-sinus lampiran D.1 dapat digambarkan.



Gambar 4.22. Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa R kondisi pembebanan 31

Desember 2011

2.2.10.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa R Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011

Dengan $h = 1, 3, 5, \dots$, maka komponen harmonisa arus dan tegangan sinyal sinus dan non-sinus lampiran D.2 dapat ditabelkan dalam harmonisa ganjil dan genap.

Tabel 4.32. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa S tanggal 27 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Arus Saluran Fasa R	Frekuensi Harmonisa (Hz)
1	3.7	50

I_3	0.4	150
I_4	0.1	200
I_5	1.4	250
I_7	1.4	350
I_9	0.2	450
I_{11}	1.1	550
I_{13}	1	650
I_{15}	0	-
I_{17}	0.5	850
I_{19}	0.4	950
I_{21}	0.1	1050
I_{23}	0.2	1150
I_{25}	0.1	1250
I_{27}	0	-
I_{29}	0.1	1450

Tabel 4.33. Nilai rms tegangan, orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa R tanggal 31 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa R	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	217.3	50
V_2	0.3	100
V_3	8.3	150
V_4	0.1	200
V_5	4.3	250
V_6	0.1	300
V_7	2.3	350
V_8	0.1	400
V_9	1.7	450
V_{10}	0.1	500
V_{11}	1.6	550
V_{13}	0.9	650
V_{15}	0.5	750
V_{17}	0.4	850
V_{19}	0.2	950
V_{21}	0.1	1050
V_{23}	0.1	1150
V_{29}	0.1	1450

Tegangan fundamental dan harmonisa dapat dihitung dengan menggunakan

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{217.3}{3.7} = 58.729 \Omega$$

Daya yang diberikan oleh komponen fundamental pada beban sebagai berikut.

Daya nyata fundamental :

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 3.7^2 \times 58.729 = 804 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 217.3 \times 3.7 = 804.01 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental :

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{804.01^2 - 804^2} = \sqrt{16.08} = 4.01 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{8.3}{0.4} = 20.75 \Omega$$

$$P_3 = 0.4^2 \times 20.75 = 3.32 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{4.3}{1.4} = 3.071 \Omega$$

$$P_5 = 1.4^2 \times 3.071 = 6.019 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{2.3}{1.4} = 1.643 \Omega$$

$$P_7 = 1.4^2 \times 1.643 = 3.22 \text{ W}$$

$$R_9 = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.7}{0.2} = 8.5 \Omega$$

$$P_9 = 0.2^2 \times 8.5 = 0.34 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{11rms}}{I_{11rms}} = \frac{1.6}{1.1} = 1.455 \Omega$$

$$P_{11} = 1.1^2 \times 1.455 = 1.761 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.9}{1} = 0.9 \Omega$$

$$P_{13} = 1^2 \times 0.9 = 0.9 \text{ W}$$

$$R_{15} = 0$$

$$P_{15} = 0$$

$$V_{17rms} \quad 0.4$$

$$P_{17} = 0.4^2 \times 0.9 = 0.144 \text{ W}$$

$$R_{19} = \frac{V_{19rms}}{I_{19rms}} = \frac{0.2}{0.4} = 0.5 \Omega$$

$$P_{19} = 0.4^2 \times 0.5 = 0.08 \text{ W}$$

$$R_{21} = \frac{V_{21rms}}{I_{21rms}} = \frac{0.1}{0.1} = 1 \Omega$$

$$P_{21} = 0.1^2 \times 1 = 0.01 \text{ W}$$

$$R_{23} = \frac{V_{23rms}}{I_{23rms}} = \frac{0.1}{0.2} = 0.5 \Omega$$

$$P_{23} = 0.2^2 \times 0.5 = 0.02 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$P_b = I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R \\ + I_{17rms}^2 R + I_{19rms}^2 R + I_{21rms}^2 R + I_{23rms}^2 R$$

$$= 804 + 3.32 + 6.019 + 3.22 + 0.34 + 1.761 + 0.9 + 0 + 0.2 + 0.08 + 0.01 \\ + 0.02$$

$$= 819.87 \text{ W}$$

Harmonisa mempengaruhi daya rata-rata.

Dari persamaan [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan sistem terdistorsi harmonisa juga dapat dihitung. Untuk arus dihitung hingga harmonisa ke 23.

$$I_{hrms} = \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2 \\ I_{19rms}^2 + I_{21rms}^2 + I_{23rms}^2}$$

Arus beban total :

$$I_{brms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{hrms}^2} = \sqrt{3.7^2 + 2.606^2} = 4.526 \text{ A}$$

Nilai tegangan :

$$\begin{aligned} V_{hrms} &= \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2} \\ &\quad + V_{19rms}^2 + V_{21rms}^2 + V_{23rms}^2} \\ &= \sqrt{8.3^2 + 4.3^2 + 2.3^2 + 1.7^2 + 1.6^2 + 0.9^2 + 0.5^2 + 0.4^2 + 0.2^2 + 0.1^2} \\ &= 9.969 \text{ V} \end{aligned}$$

Tegangan harmonisa total :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{217.3^2 + 9.969^2} = 217.529 \text{ V}$$

Daya kompleks total :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 217.529 \times 4.526 = 984.536 \text{ VA}$$

Dari persamaan [2.102] arus yang diberikan fasa R adalah sebesar $I_{1R} = 5.2 \cos(\omega t - 10.89^\circ)$ A. Dengan demikian, dari persamaan [2.45], daya nyata yang diberikan sumber adalah :

$$P_s = 220 \times 3.7 \times 0.98 = 797.72 \text{ W}$$

Dengan adanya sudut fasa antara arus fundamental dan tegangan sumber, maka nilai daya sumber lebih kecil karena sistem mengkonsumsi beban induktif.

Untuk daya kompleks juga dapat dihitung, dari persamaan [2.49] maka :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 220 \times 4.526 = 995.72 \text{ VA}$$

4.2.10.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa R Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, *Crest Factor*, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.10.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan *Crest Factor*

Dengan menggunakan persamaan [2.37] dan [2.38], THDI dan THDV masing-masing dapat dihitung. Untuk total distorsi harmonisa arus dihitung hingga harmonisa ke 17.

$$\begin{aligned} THDI &= 100\% \times \frac{1}{I_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{17} I_h^2} \\ &= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2}}{I_{1rms}} \\ &= 100\% \times \frac{\sqrt{0.4^2 + 1.4^2 + 1.4^2 + 0.2^2 + 1.1^2 + 1^2 + 0^2 + 0.5^2 + 0.4^2 + 0.1^2 + 0.2^2}}{3.7} \\ &= 70.43 \% \end{aligned}$$

Nilai THDI diatas mendekati hasil pengukuran sebesar 71.39 % dan nilai ini melampaui standar IEEE untuk sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Dengan cara yang sama THDV juga dapat dihitung hingga harmonisa ke

$$\begin{aligned}
&= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2 + V_{21rms}^2 + V_{23rms}^2}}{V_{1rms}} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{8.3^2 + 4.3^2 + 2.3^2 + 1.7^2 + 1.6^2 + 0.9^2 + 0.5^2 + 0.4^2 + 0.2^2 + 0.1^2 + 0.1^2}}{217.3} \\
&= 4.58 \%
\end{aligned}$$

Nilai THDV diatas masih dalam batas yang ditetapkan IEEE sehingga dianggap aman.

Untuk melihat THDI dapat juga menggunakan persamaan [2.39].

$$CFi = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{5.2 \text{ A}}{3.7 \text{ A}} = 1.406$$

Nilai gelombang distorsi dapat dilihat pada pada lampiran D.2.

Untuk nilai *crest factor* tegangan :

$$CFv = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{307.3 \text{ A}}{217.3 \text{ A}} = 1.4142$$

Dari hasil pengukuran di Laboratorium menunjukkan nilai THDV selalu lebih kecil dari standar IEEE sehingga THD tegangan dianggap aman.

4.2.10.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Dengan menggunakan persamaan [2.58], [2.65] dan [2.71] faktor daya

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{804}{804.01} = 0.99$$

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{819.87}{984.536} = 0.83$$

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{804}{995.72} = 0.81$$

Faktor daya masing-masing dapat dituliskan kembali, baik DPF (*displacement power factor*) maupun faktor daya *true*.

Faktor daya hasil pengukuran :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.82$$

Faktor daya hasil perhitungan :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.81$$

Nilai faktor daya *displacement* antara yang terukur dan terhitung nilainya sama, sedangkan untuk faktor daya *true* hasil perhitungan mendekati nilai terukur sebesar 0.82

Dengan THDI terukur 71.39 % dan terhitung sebesar 70.43 % faktor daya *true* menjadi sangat rendah dibanding dengan data-data yang lain, walaupun ada nilai faktor daya yang lebih rendah dari nilai diatas. Jika dianggap nilai minimum faktor daya adalah 0.85, maka nilai faktor daya hasil pengukuran dan hasil

perhitungan bisa dikatakan tidak bagus, namun karena tidak adanya standar yang pasti mengenai batas minimum faktor daya, maka asumsi faktor daya diatas sebagai faktor daya yang buruk kurang tepat. Namun sebagai langkah pendekatan untuk sementara akan dianggap nilai minimum 0.85 sebagai batas minimum dari faktor daya. Dengan adanya nilai faktor daya yang rendah diatas, kualitas daya pada tingkat ini juga dianggap tidak bagus. Beban yang aktif saat pengukuran di panel listrik Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta diantaranya, pada Laboratorium Pengukuran dan Kendali beban yang aktif diantaranya 1 Generator dengan beban 1 unit komputer, 3 perangkat komputer, satu unit kulkas. Pada Laboratorium Komputer dan Perancangan, beban yang aktif hanya 2 perangkat komputer, sedangkan 1 perangkat komputer aktif di Laboratorium Instrumentasi dan Telekomunikasi.

Dengan aktifnya beberapa beban non-linier menimbulkan THDI >70 %, nilai THDI ini sangat tinggi untuk sistem kelistrikan Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Dengan tingginya nilai THDI, nilai faktor daya menjadi rendah dapat berpengaruh kualitas daya di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Disarankan untuk mengambil langkah-langkah diantaranya dengan memfilter harmonisa dan memasang kapasitor bank

4.2.10.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Kualitas daya dapat juga ditinjau dari besarnya nilai daya reaktif yang dikonsumsi beban saat sistem mengalami distorsi harmonisa.

Untuk daya reaktif tersebut :

$$\text{Fundamental} = 4.01 \text{ VAR}$$

$$\text{Harmonisa} = 551.9 \text{ VAR}$$

Daya reaktif harmonisa lebih besar dari daya reaktif fundamental. Dengan mempertimbangkan faktor keamanan sistem kelistrikan Laboratorium Teknik Elektro, disarankan untuk mengkompensasi daya reaktif dengan memasang kapasitor bank.

4.2.11. Perhitungan Fasa S Kondisi Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011

Dengan melihat pada spektrum amplituda harmonisa lampiran D.2, harmonisa yang muncul adalah harmonisa ganjil dan genap, tapi yang harmonisa ganjil lebih dominan sehingga harmonisa genap dapat diabaikan karena nilai arusnya juga kecil. Dengan menggunakan persamaan [2.32], amplituda dan sudut fasa sinyal non-sinus fasa S lampiran D.2 dapat dihitung dan kelipatan frekuensi harmonisanya juga ditentukan. Dari hasil perhitungan, hasilnya dapat dirangkum

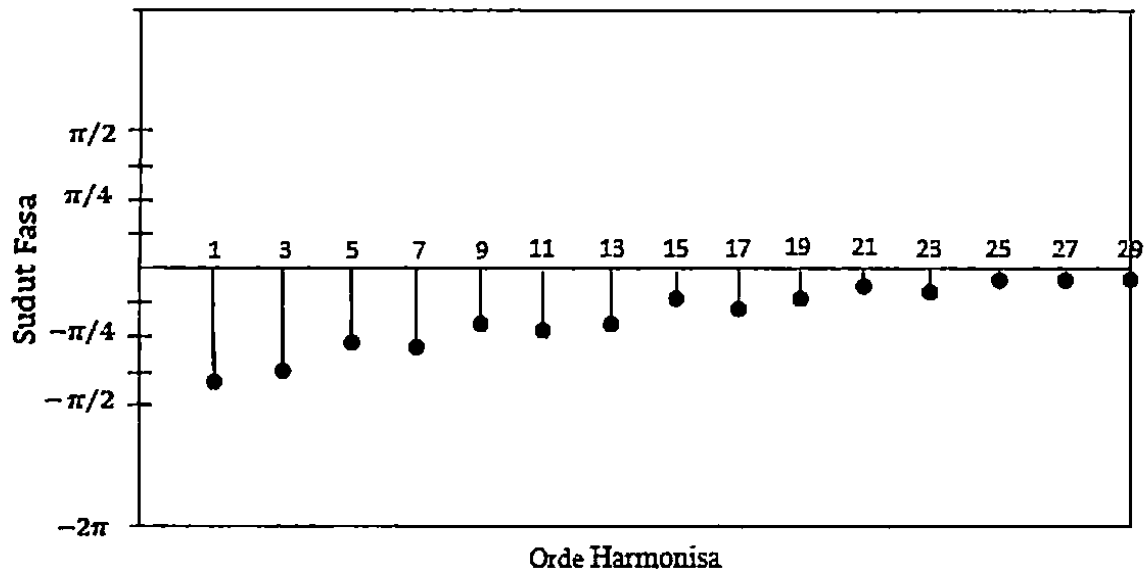
Tabel 4.34. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental fasa S Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa S	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	7	81.87	1.429	50
I_3	2.3	66.501	1.161	150
I_5	1.1	47.7	0.833	250
I_7	1.3	52.431	0.915	350
I_9	0.7	35	0.611	450
I_{11}	1.5	38.66	0.675	550
I_{13}	0.7	35	0.611	650
I_{15}	0.4	21.8	0.381	750
I_{17}	0.5	26.57	0.464	850
I_{19}	0.4	21.8	0.381	950
I_{21}	0.2	11.31	0.197	1050
I_{23}	0.3	16.69	0.291	1150
I_{25}	0.1	5.7	0.099	1250
I_{27}	0.1	5.7	0.099	1350
I_{29}	0.1	5.7	0.099	1450

Uraian deret Fourier fungsi ganjil sinyal periodik non-sinus fasa S pada lampiran D.1 diberikan hingga harmonisa ke 29.

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \sum_{h=1}^{17} I_n e^{j(n\omega t - \theta - \theta_n)} \\
 &= 7e^{j(2\pi ft - 240^\circ - 1.429)} + 2.3e^{j(6\pi ft - 240^\circ - 1.161)} + 1.1e^{j(10\pi ft - 240^\circ - 0.833)} \\
 &\quad + 1.3e^{j(14\pi ft - 240^\circ - 0.915)} + 0.7e^{j(18\pi ft - 240^\circ - 0.611)} + 0.8e^{j(22\pi ft - 240^\circ - 0.675)} \\
 &\quad + 0.7e^{j(18\pi ft - 240^\circ - 0.611)} + 0.4e^{j(30\pi ft - 240^\circ - 0.381)} + 0.5e^{j(34\pi ft - 240^\circ - 0.464)} \\
 &\quad + 0.4e^{j(30\pi ft - 240^\circ - 0.381)} + 0.2e^{j(42\pi ft - 240^\circ - 0.197)} + 0.3e^{j(46\pi ft - 240^\circ - 0.291)} \\
 &\quad + 0.1e^{j(50\pi ft - 240^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(54\pi ft - 240^\circ - 0.099)} + 0.1e^{j(58\pi ft - 240^\circ - 0.099)}
 \end{aligned}$$

Jika digambarkan spektrum fasa dari sinyal periodik non-sinus lampiran



Gambar 4.23. Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa S kondisi pembebanan 31

Desember 2011

4.2.11.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa S Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011

Dengan $h = 1, 2, 3, 4, \dots$, maka frekuensi harmonisa arus dan tegangan untuk sinyal non-sinus lampiran D.2 fasa S seperti tabel 4.35 dan 4.36.

Tabel 4.35. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa S tanggal 31 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Arus Saluran Fasa S	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	4.9	50
I_2	0.1	100
I_3	1.6	150
I_5	0.7	250
I_6	0.1	300
I_7	0.9	350
I_9	0.5	450
I_{11}	0.6	550
I_{13}	0.5	650
I_{17}	0.3	750

I_{17}	0.3	850
I_{19}	0.3	950
I_{21}	0.1	1050
I_{23}	0.2	1150
I_{25}	0.1	1250
I_{27}	0.1	1350
I_{29}	0.1	1450
I_{33}	0.1	1650
I_{37}	0.1	1850

Tabel 4.36. Nilai rms tegangan dan orde harmonisa ganjil/genap fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa S tanggal 31 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa S	Frekuensi Harmonisa(Hz)
V_1	217.2	50
V_2	0.1	100
V_3	8.6	150
V_4	0.1	200
V_5	6.5	250
V_6	0.1	300
V_7	3.1	350
V_8	0.1	400
V_9	1.7	450
V_{10}	0.1	500
V_{11}	2.1	550
V_{13}	0.2	650
V_{15}	0.3	750
V_{17}	0.2	850
V_{19}	0.2	950
V_{25}	0.1	1050

Dengan mengambil nilai arus dan tegangan yang tertera pada tabel diatas, nilai tahanan masing-masing harmonisa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.44].

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{217.2}{4.9} = 44.326 \Omega$$

Daya yang dihasilkan oleh komponen fundamental pada beban sebagai

Daya nyata fundamental dihitung dengan menggunakan persamaan [2.47].

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 4.9^2 \times 44.326 = 1064.267 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental dihitung dengan menggunakan persamaan [2.50].

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 217.2 \times 4.9 = 1064.28 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental dihitung dengan menggunakan persamaan [2.56].

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{1064.28^2 - 1064.267^2} = \sqrt{27.671} = 5.26 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{8.6}{1.6} = 5.375 \Omega$$

$$P_3 = 1.6^2 \times 5.375 = 13.76 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{6.5}{0.7} = 9.29 \Omega$$

$$P_5 = 0.7^2 \times 9.29 = 4.55 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{3.1}{0.9} = 3.44 \Omega$$

$$P_7 = 0.9^2 \times 3.44 = 2.786 \text{ W}$$

$$R_9 = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.7}{0.5} = 3.4 \Omega$$

$$P_9 = 0.5^2 \times 3.4 = 0.85 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{2.1}{0.6} = 3.5 \Omega$$

$$P_{11} = 0.6^2 \times 3.5 = 1.26 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.2}{0.5} = 0.4 \Omega$$

$$P_{13} = 0.5^2 \times 0.4 = 0.1 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.3}{0.3} = 1 \Omega$$

$$P_{15} = 0.3^2 \times 1 = 0.01 \text{ W}$$

$$R_{17} = \frac{V_{17rms}}{I_{17rms}} = \frac{0.2}{0.3} = 0.667 \Omega$$

$$P_{17} = 0.3^2 \times 0.667 = 0.06 \text{ W}$$

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$\begin{aligned} P_b &= I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R \\ &\quad + I_{17rms}^2 R + I_{19rms}^2 R + I_{25rms}^2 R \\ &= 1064.267 + 13.76 + 4.55 + 2.786 + 0.85 + 1.26 + 0.1 + 0.01 + 0.06 + 0.06 \\ &\quad + 0.01 \\ &= 1087.713 \text{ W} \end{aligned}$$

Harmonisa mempengaruhi daya rata-rata.

Dari persamaan [2.76] dan [2.77] arus dan tegangan sistem terdistorsi harmonisa dapat dihitung. Untuk arus harmonisa, dihitung hingga harmonisa 19.

$$\begin{aligned} I_{hrms} &= \sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2 + I_{19rms}^2} \\ &= \sqrt{1.6^2 + 0.7^2 + 0.9^2 + 0.5^2 + 0.6^2 + 0.5^2 + 0.3^2 + 0.3^2 + 0.3^2} \\ &= 2.234 \text{ A} \end{aligned}$$

Arus beban total :

$$I_{brms} = \sqrt{4.9^2 + 2.234^2} = 5.385 \text{ A}$$

Harmonisa tegangan dihitung hingga harmonisa ke 23 dengan mengabaikan harmonisa ke 17 dan ke 19 :

$$\begin{aligned} V_{hrms} &= \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2} \\ &= \sqrt{8.6^2 + 6.5^2 + 3.1^2 + 1.7^2 + 2.1^2 + 0.2^2 + 0.3^2 + 0.2^2 + 0.2^2} = 11.547 \text{ V} \end{aligned}$$

Tegangan harmonisa total :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{217.2^2 + 11.547^2} = 217.507 \text{ V}$$

Daya kompleks beban :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 217.507 \times 5.385 = 1171.275 \text{ VA}$$

Nilai ini mendekati nilai yang terukur pada tabel hasil pengukuran lampiran D jam 10.00.

Daya sumber juga dapat dihitung dari nilai arus fasa S dan sudut fasa harmonisanya, dimana nilai arus dapat diturunkan dari persamaan [2.103] sebagai $I_{1S} = 7 \cos(\omega_1 t - 321.87^\circ)$ A. Dengan menggunakan persamaan [2.45], daya nyata yang diberikan sumber dapat dihitung.

$$P_s = 220 \times 4.9 \times 0.79 = 851.62 \text{ W}$$

Daya kompleks juga dapat dihitung menggunakan persamaan [2.49].

$$|S_s| = V_{srms} I_{brms} = 220 \times 5.385 = 1184.7 \text{ VA}$$

4.2.11.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa S Pembebanan Tanggal 31 Desember

2011 Ditinjau Dari Nilai THD, Crest Factor, Faktor Daya dan Daya

Reaktif

4.2.11.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan Crest Factor

Dengan menggunakan persamaan [2.37] dan [2.38], THDI dan THDV dapat dihitung. Untuk total distorsi harmonis arus dihitung dengan menggunakan

$$\begin{aligned}
&= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{11rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2 + I_{19rms}^2}}{I_{1rms}} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{1.6^2 + 0.7^2 + 0.9^2 + 0.5^2 + 0.6^2 + 0.5^2 + 0.3^2 + 0.3^2 + 0.3^2}}{4.9} \\
&= 45.59\%
\end{aligned}$$

Nilai THDI terhitung mendekati nilai terukur pada tabel pengukuran pada lampiran D sebesar 46.36 %. Baik THDI terukur maupun terhitung melampaui standar IEEE.

Dengan mengambil nilai harmonisa ganjil, nilai THDV hingga harmonisa ke 19 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.38].

$$\begin{aligned}
THDV &= 100\% \times \frac{1}{V_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{19} V_h^2} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{11rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2}}{V_{1rms}} \\
&= 100\% \times \frac{\sqrt{8.6^2 + 6.5^2 + 3.1^2 + 1.7^2 + 2.1^2 + 0.2^2 + 0.3^2 + 0.2^2 + 0.2^2}}{217.2} \\
&= 5.3\%
\end{aligned}$$

THDV lebih besar dari standar IEEE. Biasanya aktifitas beban non-linear bisa diamati dar iperubahn THDV.

Cacat sinyal sinusoidal arus tersebut dipengaruhi oleh THDI terukur sebesar 46.36 % atau terhitung sebesar 45.59 %.

Nilai *crest factor* tegangan :

$$CF_v = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{307.2 \text{ A}}{217.2 \text{ A}} = 1.4144$$

THDV masih dalam batas yang yang diijinkan.

4.2.11.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Dengan menggunakan persamaan [2.58] dan [2.71] faktor daya masing-masing dapat dihitung.

Faktor daya *displacement* :

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{1064.267}{1064.28} = 0.99$$

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{1087.713}{1171.275} = 0.92$$

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{1064.267}{1184.7} = 0.89$$

Faktor daya masing-masing dapat dituliskan kembali sebagai evaluasi

Faktor daya hasil perhitungan :

$$\text{DPF} = 0.99$$

$$\text{Faktor daya } true = 0.89$$

Faktor daya *displacement* dan faktor daya *true* hasil terukur atau terhitung, sama-sama dibawah nilai maksimum sebesar 0.89, tapi nilai tersebut masih dianggap baik jika standar minimum faktor daya adalah 0.85. Namun harmonisa tetap memiliki kontribusi terhadap nilai faktor daya. Tetap disarankan laboratorium untuk memasang kapasitor bank dan memfilter harmonisa.

4.2.11.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Untuk memastikan kualitas daya pada Laboratorium Teknik Elektro, dapat dilihat pada besarnya daya reaktif, baik fundamental maupun harmonisa.

Perbandingan daya reaktif :

$$\text{Fundamental} = 5.26 \text{ VAR}$$

$$\text{Harmonisa} = 644.1 \text{ VAR}$$

Dalam kondisi tidak ada harmonisa, daya reaktif fundamental hanya sebesar 5.26 VAR sedangkan saat terjadi harmonisa, nilai daya reaktif menjadi > 5.26 VAR. Disarankan untuk Laboratorium Teknik Elektro Universitas

... ..

4.2.12. Perhitungan Fasa T Kondisi Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011

Dari sinyal non-sinus fasa T lampiran D.2 maka amplituda, sudut fasa dan frekuensi harmonisa dapat ditentukan dengan cara yang sama menggunakan persamaan [2.32]. Hasil perhitungan dapat ditabelkan sebagai berikut.

Tabel 4.37. Orde harmonisa, sudut fasa, kelipatan frekuensi harmonisa dan fundamental Fasa T Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011

Orde Harmonisa	Nilai Amplituda Arus Saluran Fasa T	Sudut Fasa Harmonisa (°)	Sudut Fasa Harmonisa (rad)	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	5.1	79	1.377	50
I_2	0.1	5.7	0.099	100
I_3	1.1	47.7	0.833	150
I_4	0.1	5.7	0.099	200
I_5	1.1	47.7	0.833	250
I_7	1.6	58	1.012	350
I_9	1.1	47.7	0.833	450
I_{10}	0.1	5.7	0.099	500
I_{11}	1.4	54.46	0.951	550
I_{13}	0.9	42	0.733	650
I_{15}	0.5	26.57	0.464	750
I_{17}	0.6	31	0.540	850
I_{19}	0.4	21.8	0.381	950
I_{21}	0.1	5.7	0.099	1050
I_{23}	0.2	11.31	0.197	1150
I_{25}	0.2	11.31	0.197	1250
I_{27}	0.2	11.31	0.197	1350
I_{29}	0.1	5.7	0.099	1450

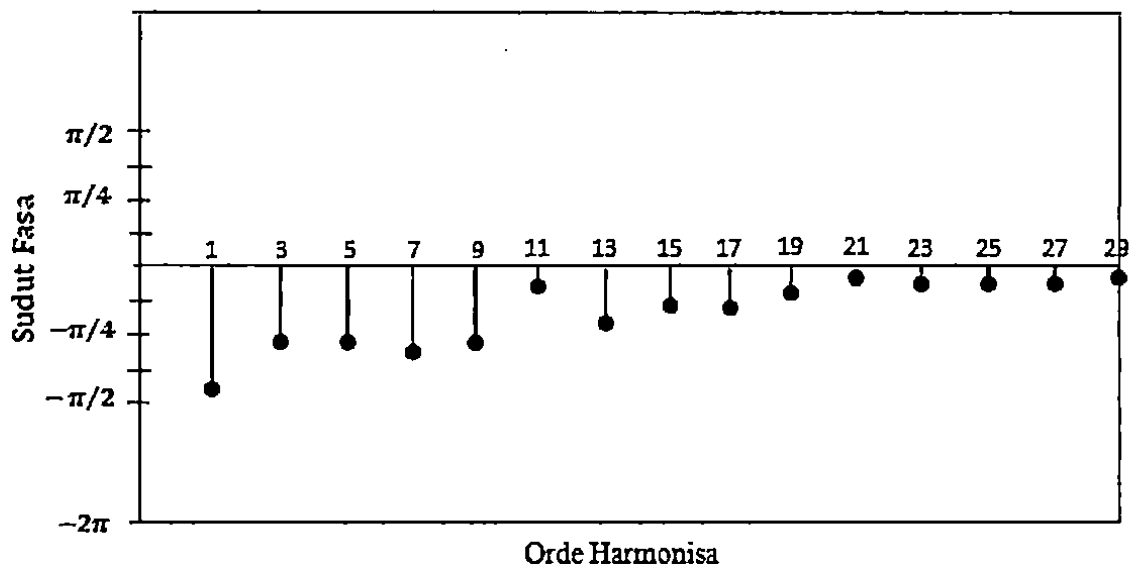
Dengan menggunakan persamaan [2.35], uraian deret Fourier sinyal non-sinus fasa T pada lampiran D.2 diberikan hingga harmonisa ke 29.

$$I(t) = \sum_{h=1}^{29} I_n e^{j(n\omega t + \theta - \theta_h)}$$

$$= 5.1e^{j(2\pi ft + 120^\circ - 1.377)} + 1.1e^{j(6\pi ft + 120^\circ - 0.833)} + 1.1e^{j(10\pi ft + 120^\circ - 0.833)}$$

$$\begin{aligned}
 &+ 0.9e^{j(26\pi ft+120^\circ-0.733)} + 0.5e^{j(30\pi ft+120^\circ-0.464)} + 0.6e^{j(34\pi ft+120^\circ-0.540)} \\
 &+ 0.4e^{j(38\pi ft+120^\circ-0.381)} + 0.1e^{j(42\pi ft+120^\circ-0.099)} + 0.2e^{j(46\pi ft+120^\circ-0.197)} \\
 &+ 0.2e^{j(50\pi ft+120^\circ-0.197)} + 0.2e^{j(54\pi ft+120^\circ-0.197)} + 0.1e^{j(58\pi ft+120^\circ-0.099)}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, spektrum fasa dari sinyal periodik harmonisa diatas dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4.24. Spektrum fasa sinyal non-sinus fasa T kondisi pembebanan 31

Desember 2011

4.2.12.1. Perhitungan Nilai Arus dan Tegangan serta Daya Fundamental dan Harmonisa Fasa T Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011

Dari data pengukuran lampiran D.2 fasa T, dapat diturunkan orde harmonisa dan orde frekuensi harmonisa seperti tabel 4.38.

Orde Harmonisa	Nilai rms Arus Saluran Fasa T	Frekuensi Harmonisa (Hz)
I_1	3.6	50
I_2	0.1	100
I_3	0.8	150
I_4	0.1	200

I_5	0.8	250
I_7	1.1	350
I_9	0.8	450
I_{11}	1	550
I_{13}	0.6	650
I_{15}	0.4	750
I_{17}	0.4	850
I_{19}	0.3	950
I_{23}	0.1	1150
I_{25}	0.1	1250
I_{27}	0.1	1350
I_{31}	0.1	1450
I_{35}	0.1	1550
I_{37}	0.1	1650

Tabel 4.38. Nilai rms arus dan orde harmonisa ganjil/genap dengan frekuensi fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa T tanggal 31 Desember

2011

Orde Harmonisa	Nilai rms Tegangan Fasa-Netral Fasa T	Frekuensi Harmonisa (Hz)
V_1	219.6	50
V_2	0.4	100
V_3	5.2	150
V_4	0.1	200
V_5	5	250
V_6	0.1	300
V_7	2	350
V_8	0.1	400
V_9	1.4	450
V_{10}	0.2	500
V_{11}	1.5	550
V_{13}	0.4	650
V_{14}	0.1	700
V_{15}	0.6	750
V_{17}	0.4	850
V_{19}	0.1	950
V_{21}	0.1	1050
V_{23}	0.1	1150
V_{25}	0.1	1650

Tabel 4.39. Nilai rms tegangan dan orde harmonisa ganjil/genap dengan frekuensi fundamental dan harmonisa kondisi pembebanan fasa T tanggal 31 Desember 2011

Dengan mengambil nilai arus dan tegangan yang tertera pada tabel diatas maka impedansi dapat dihitung.

$$R_1 = \frac{V_{1rms}}{I_{1rms}} = \frac{219.6}{3.6} = 61 \Omega$$

Daya nyata yang diberikan oleh komponen fundamental pada beban sebagai berikut :

Daya nyata fundamental :

$$P_1 = I_{1rms}^2 R_{1rms} = 3.6^2 \times 61 = 790.56 \text{ W}$$

Daya kompleks fundamental :

$$|S_1| = V_{1rms} I_{1rms} = 219.6 \times 3.6 = 790.56 \text{ VA}$$

Daya reaktif fundamental :

$$Q_1 = \sqrt{|S_1|^2 - P_1^2} = \sqrt{790.56^2 - 790.56^2} = 0 \text{ VAR}$$

Daya aktif pada masing-masing harmonisa :

$$R_3 = \frac{V_{3rms}}{I_{3rms}} = \frac{5.2}{0.8} = 6.5 \Omega$$

$$P_3 = 0.8^2 \times 6.5 = 4.16 \text{ W}$$

$$R_5 = \frac{V_{5rms}}{I_{5rms}} = \frac{5}{0.8} = 6.25 \Omega$$

$$P_5 = 0.8^2 \times 6.25 = 4 \text{ W}$$

$$R_7 = \frac{V_{7rms}}{I_{7rms}} = \frac{2}{0.8} = 2.5 \Omega$$

$$P_7 = 0.8^2 \times 2.5 = 1.6 \text{ W}$$

$$R_9 = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.4}{0.8} = 1.75 \Omega$$

$$P_9 = 0.8^2 \times 1.75 = 1.12 \text{ W}$$

$$R_{11} = \frac{V_{9rms}}{I_{9rms}} = \frac{1.5}{1} = 1.5 \Omega$$

$$P_{11} = 1^2 \times 1.5 = 1.5 \text{ W}$$

$$R_{13} = \frac{V_{13rms}}{I_{13rms}} = \frac{0.4}{0.6} = 0.667 \Omega$$

$$P_{13} = 0.6^2 \times 0.667 = 0.24 \text{ W}$$

$$R_{15} = \frac{V_{15rms}}{I_{15rms}} = \frac{0.6}{0.4} = 1.5 \Omega$$

$$P_{15} = 0.4^2 \times 1.5 = 0.24 \text{ W}$$

$$R_{17} = \frac{V_{17rms}}{I_{17rms}} = \frac{0.4}{0.4} = 1 \Omega$$

$$P_{17} = 0.4^2 \times 1 = 0.04 \text{ W}$$

$$R_{19} = \frac{V_{19rms}}{I_{19rms}} = \frac{0.1}{0.3} = 0.33 \Omega$$

$$P_{19} = 0.3^2 \times 0.33 = 0.0297 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.47] atau [2.48] daya nyata total yang diserap beban adalah :

$$P_b = P_1 + P_h = I_{1rms}^2 R + I_{hrms}^2 R$$

$$P_b = I_{1rms}^2 R + I_{3rms}^2 R + I_{5rms}^2 R + I_{7rms}^2 R + I_{9rms}^2 R + I_{11rms}^2 R + I_{13rms}^2 R + I_{15rms}^2 R \\ + I_{17rms}^2 R + I_{19rms}^2 R$$

$$= 790.56 + 4.16 + 4 + 7.563 + 1.12 + 1.5 + 0.24 + 0.24 + 0.04 + 0.0297$$

$$= 809.453 \text{ W}$$

Dari persamaan [2.57] dan [2.58] arus dan tegangan sistem terdistorsi harmonisa juga dapat dihitung.

Arus harmonisa dihitung hingga harmonisa 19 :

$$I_1 = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{15}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2}$$

$$= \sqrt{0.8^2 + 0.8^2 + 1.1^2 + 0.8^2 + 1^2 + 0.6^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 0.3^2} = 2.214 \text{ A}$$

Arus beban total :

$$I_{brms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{hrms}^2} = \sqrt{3.6^2 + 2.214^2} = 4.226 \text{ A}$$

Nilai tegangan :

$$V_{hrms} = \sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2}$$

$$= \sqrt{5.2^2 + 5^2 + 2^2 + 1.4^2 + 1.5^2 + 0.4^2 + 0.6^2 + 0.4^2 + 0.1^2} = 7.806 \text{ V}$$

Tegangan harmonisa total :

$$V_{brms} = \sqrt{V_{1rms}^2 + V_{hrms}^2} = \sqrt{219.6^2 + 7.806^2} = 219.739 \text{ V}$$

Daya semu beban :

$$|S_b| = V_{brms} I_{brms} = 219.739 \times 4.226 = 928.617 \text{ VA}$$

Dengan diketahuinya nilai arus fasa R dan sudut fasa harmonisanya, dari persamaan [2.84] dapat diturunkan persamaan arus untuk komponen fundamental sebesar $I_{1r} = 5.1 \cos(\omega t + 41^\circ) \text{ A}$. Dengan menggunakan persamaan [2.45], daya nyata yang diberikan sumber dapat dihitung.

$$P_s = 220 \times 3.6 \times 0.75 = 594 \text{ W}$$

Daya kompleks menggunakan persamaan [2.49] :

$$S = P + jQ = 594 + j928.617 \text{ VA}$$

4.2.21.2. Evaluasi Kualitas Daya Fasa T Pembebanan Tanggal 31 Desember 2011 Ditinjau Dari Nilai THD, Crest Factor, Faktor Daya dan Daya Reaktif

4.2.12.2.1. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai THD dan Crest Factor

Dengan menggunakan persamaan [2.37] dan [2.38], THDI dan THDV dapat dihitung sebagai evaluasi daya. Untuk total distorsi harmonisa arus diambil hingga harmonisa ke 19 :

$$\begin{aligned}
 THDI &= 100\% \times \frac{1}{I_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=1}^{19} I_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{I_{3rms}^2 + I_{5rms}^2 + I_{7rms}^2 + I_{9rms}^2 + I_{13rms}^2 + I_{15rms}^2 + I_{17rms}^2 + I_{19rms}^2}}{I_{1rms}} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{0.8^2 + 0.8^2 + 1.1^2 + 0.8^2 + 1^2 + 0.6^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 0.3^2}}{3.6} \\
 &= 61.5 \%
 \end{aligned}$$

Nilai THDI hasil analisa perhitungan sebesar 61.5 % dan 62.53 % terukur melampaui standar IEEE sebesar 5 %.

Dengan cara yang sama THDV juga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan [2.38] hingga harmonisa ke 19.

$$\begin{aligned}
 THDV &= 100\% \times \frac{1}{V_{1rms}} \sqrt{\sum_{h=3}^{19} V_h^2} \\
 &= 100\% \times \frac{\sqrt{V_{3rms}^2 + V_{5rms}^2 + V_{7rms}^2 + V_{9rms}^2 + V_{13rms}^2 + V_{15rms}^2 + V_{17rms}^2 + V_{19rms}^2}}{V_{1rms}}
 \end{aligned}$$

$$= 100\% \times \frac{\sqrt{5.2^2 + 5^2 + 2^2 + 1.4^2 + 1.5^2 + 0.4^2 + 0.6^2 + 0.4^2 + 0.1^2}}{219.6}$$

$$= 3.55 \%$$

Nilai THDV masih dalam batas yang ditetapkan IEEE.

Untuk melihat cacat gelombang dapat menggunakan persamaan [2.39].

$$CF_i = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{5.1 \text{ A}}{3.6 \text{ A}} = 1.4167$$

Sinyal sinus mengalami distorsi akibat pengaruh harmonisa.

Untuk nilai *crest factor* tegangan :

$$CF_v = \frac{\text{peak_of_waveform}}{\text{rms_of_waveform}} = \frac{310.5 \text{ A}}{219.6 \text{ A}} = 1.4139$$

Nilai THDV masih dianggap normal berdasarkan standar IEEE.

4.2.12.2.2. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Faktor Daya

Untuk masing-masing faktor daya dapat ditentukan dari hasil perhitungan diatas sebagai evaluasi kualitas. Dengan menggunakan persamaan [2.58], [2.65] dan [2.71], faktor daya fundamental dan faktor daya *true* dapat dituliskan.

Faktor daya *displacement* :

$$PF_{disp} = \frac{P_1}{|S_1|} = \frac{790.56}{790.56} = 1$$

Faktor daya beban :

$$PF_{beban} = \frac{P_b}{|S_b|} = \frac{809.453}{928.617} = 0.87$$

Faktor daya *true* :

$$PF_{true} = \frac{P_{1s}}{|S_s|} = \frac{790.56}{929.72} = 0.85$$

Nilai faktor daya dalam keadaan harmonisa adalah sebesar 0.85. nilai ini masih dalam batas minimum faktor daya sebesar 0.85. Dengan meninjau kembali data hasil analisa, semua nilai faktor daya lebih rendah dari nilai maksimum. Idealnya, semua nilai faktor daya harus pada berada pada nilai maksimumnya, tapi karena adanya beberapa permasalahan pada sistem kelistrikan, khususnya di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta adalah masalah harmonisa, menyebabkan rendahnya nilai faktor daya, walaupun nilai faktor daya tersebut masih dalam batas yang yang diperbolehkan.

Sebagai perbandingan, nilai faktor daya dapat dituliskan kembali sebagai :

Faktor daya hasil pengukuran :

$$\text{DPF} = 0.986$$

$$\text{Faktor daya } \textit{true} = 0.846$$

Faktor daya hasil perhitungan :

$$\text{DPF} = 1$$

$$\text{Faktor daya } \textit{true} = 0.85$$

4.2.12.2.3. Kualitas daya Ditinjau Dari Nilai Daya Reaktif

Untuk melihat kualitas daya, dapat juga dilihat dari nilai daya reaktif yang dikonsumsi beban dalam kondisi fundamental maupun harmonisa

Daya reaktif akibat harmonisa yaitu sebesar 497.9 VAR. Dari hasil analisa sebelumnya, daya reaktif yang diakibatkan oleh adanya harmonisa rata-rata lebih besar dari daya reaktif dalam keadaan fundamental. Sangat disarankan kepada Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta untuk memasang kapasitor bank dan mengambil tindakan untuk memfilter harmonisa. Karena harmonisa termasuk salah satu penyebab adanya kegagalan pada peralatan pada sisi pengguna atau berbagai macam dampak lain yang dapat ditimbulkan oleh harmonisa pada sistem tenaga listrik, termasuk rendahnya nilai faktor daya, besarnya nilai daya reaktif, adanya ketidak seimbangan beban, timbulnya arus pada netral transformator dan masih banyak lagi dampak harmonisa yang tidak disebutkan termasuk didalamnya adalah cacat gelombang sinus, dan semua ini mencakup masalah kualitas daya karena Kennedy juga mengutip definisi kualitas daya yang dibawakan Roger Dugan, Mark McGranaghan, dan Wayne Beaty bahwa "Permasalahan daya dapat diwujudkan dalam tegangan, arus, atau penyimpangan frekuensi yang mengakibatkan kegagalan atau kehilangan pengoperasian pada utilitas atau peralatan pengguna". (Kennedy, 2000)

4.2.12.3. Daya 3 fasa

Dengan mengambil nilai daya total masing-masing fasa maka dapat di tentukan daya total 3 fasa. Dengan menggunakan persamaan [2.74] daya total

$$= 819.87 + 1087.713 + 809.453 = 2717.036 \text{ W}$$

Daya kompleks tiga fasa hasil perhitungan :

$$\begin{aligned} |S_T| &= S_{1R} + S_{1S} + S_{1T} \\ &= 984.536 + 1171.275 + 928.617 = 3084.428 \text{ VA} \end{aligned}$$

Daya aktif tiga fasa hasil pengukuran :

$$\begin{aligned} P_T &= P_{bR} + P_{bS} + P_{bT} \\ &= 795.6 + 995.1 + 778.4 = 2569.1 \text{ W} \end{aligned}$$

Daya kompleks tiga fasa hasil pengukuran :

$$\begin{aligned} |S_T| &= S_{bR} + S_{bS} + S_{bT} \\ &= 968.3 + 1185 + 924 = 3077.3 \text{ VA} \end{aligned}$$

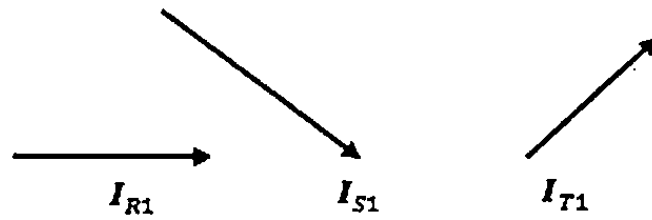
Daya reaktif tiga fasa hasil pengukuran :

$$\begin{aligned} Q_T &= Q_{bR} + Q_{bS} + Q_{bT} \\ &= 100.1 + 450.7 + 146.1 = 696.9 \text{ VAR} \end{aligned}$$

4.2.12.4. Kualitas Daya Ditinjau Dari Ketidakseimbangan Diagram Fasor

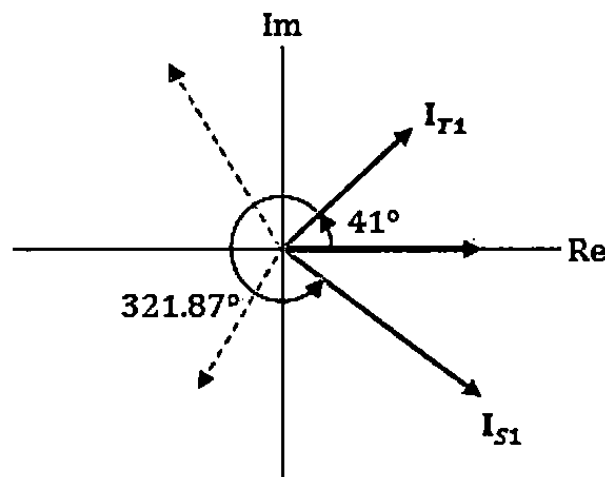
Dengan mengambil nilai deret Fourier $I(t)$ masing-masing fasa R, S, T yang telah dijabarkan, maka dengan mudah dapat ditentukan pergeseran fasor masing-masing fasa akibat pengaruh harmonisa. Dari persamaan [2.104] nilai arus masing-masing $\bar{I}_{1R} = 5.2 \angle 0^\circ$, $\bar{I}_{1S} = 7 \angle 321.87^\circ$, $\bar{I}_{1T} = 5.1 \angle 41^\circ$

Dari nilai arus diatas dapat disimpulkan besar dan arah masing masing



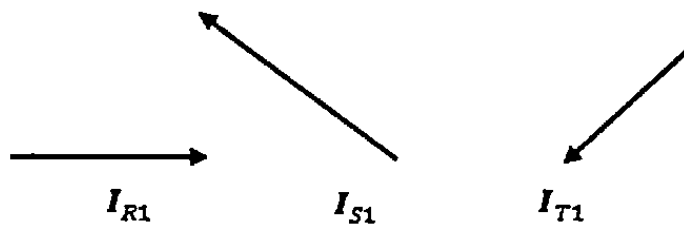
Gambar 4.25. Besar dan arah fasor fundamental fasa R, S, T hasil perhitungan

Dengan demikian diagram fasor tidak seimbang masing-masing fasanya dapat digambarkan tanpa menggunakan skala.

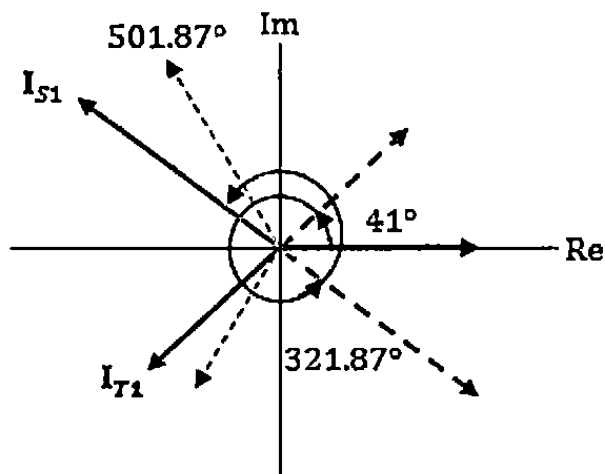


Gambar 4.26. Diagram fasor beban tidak seimbang fundamental hasil perhitungan

Jika melihat pada diagram fasor hasil pengukuran, fasor arus fasa S berputar hampir 360° dari titik asal S akibat besarnya distorsi harmonisa pada fasa S. Karena putaran fasor fasa S mengikuti urutan sistem (c, b, a), maka fasor berputar dari kuadran II dan kembali ke kuadran II dengan arah berlawanan arah jarum jam. Demikian juga diagram fasor hasil perhitungan dapat dituliskan



Gambar 4.27. Besar dan arah fasor fundamental fasa R, S, T hasil perhitungan



Gambar 4.28. Diagram fasor beban tidak seimbang fundamental hasil perhitungan

Dengan adanya pembebanan non-linear saat Inhal Praktikum di Laboratorium IE, menyebabkan adanya harmonisa yang menimbulkan distorsi pada sinyal sinusoidal. Dengan adanya THDI, $I_R \neq I_S \neq I_T$ sehingga pada konduktor netral mengalir arus.

Dengan melihat diagram fasor hasil pengukuran, maka dapat dihitung besarnya arus netral akibat pengaruh harmonisa dan buruknya kualitas daya di

$$\bar{I}_N = \bar{I}_{1R} + \bar{I}_{1S} + \bar{I}_{1T} \neq 0$$

$$= 5.2 \angle 0^\circ + 7 \angle 321.87^\circ + 5.1 \angle 41^\circ$$

$$= 5.2(\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + 7(\cos 321.87^\circ + j \sin 321.87^\circ)$$

$$+ 5.1(\cos 41^\circ + j \sin 41^\circ)$$

$$= (5.2 + 5.502 - j4.319 + 3.825 + j3.345)$$

$$= 14.53 - j0.97 \text{ A}$$

$$I_{Nmaks} = \sqrt{14.53^2 + 0.97^2} = 14.59 \text{ A}$$

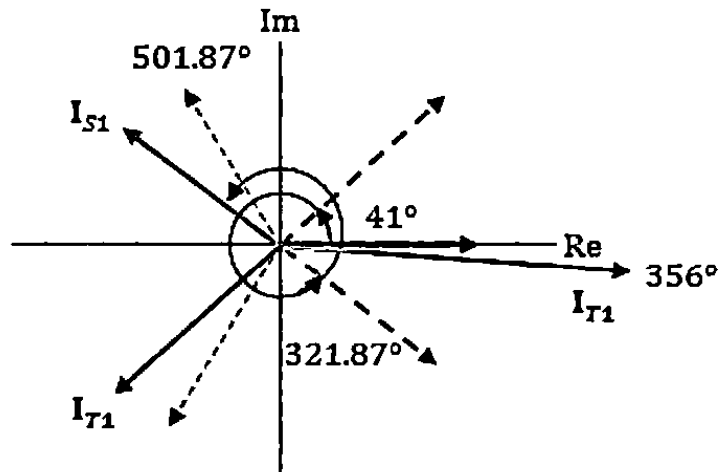
$$\theta_N = \tan^{-1} \frac{0.97}{14.53} = 3.82^\circ \quad \Rightarrow \quad 360^\circ - \theta_N = 356.18^\circ \approx 356^\circ$$

dengan demikian nilai rms arus pada konduktor netral :

$$I_{Nrms} = \frac{14.59}{\sqrt{2}} \angle 356^\circ = 10.32 \angle 356^\circ$$

Dengan $\bar{I}_{Nrms} = \bar{I}_{1R} + \bar{I}_{1S} + \bar{I}_{1T} = 10.32 \angle 356^\circ$ nilai amplituda dan nilai arus rms hasil perhitungan tidak mendekati nilai hasil pengukuran. Tapi dengan adanya arus netral menunjukkan ketidak seimbangan beban akibat pengaruh harmonisa di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Arus netral ditimbulkan oleh harmonisa urutan nol seperti harmonisa ketiga atau harmonisa kesembilan. Jika digambarkan dalam sumbu Re dan Im

diagram fasor untuk arus netral ditunjukkan oleh gambar



Gambar 4.29. Diagram fasor tidak seimbang fundamental dan arus netral hasil perhitungan

Arah fasor fasa S dan T sesuai hasil pengukuran pada lampiran D.2 namun arah fasor netral tidak. Dengan adanya arus netral, maka terjadi losses pada transformator Universitas Muhammadiyah Yogyakarta