

**ANALISIS PENGGUNAAN BELITAN TERSIER PADA
TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y DALAM MENGURANGI
HARMONISA**

JURNAL
TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ANDRE PRASETYA
NIM. 135060300111032

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017

repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS PENGGUNAAN BELITAN TERSIER PADA
TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y DALAM MENGURANGI
HARMONISA

JURNAL

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



ANDRE PRASETYA
NIM. 135060300111032

Jurnal ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 31 Januari 2017

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Hery Purnomo, M.T.
NIP. 19550708 198212 1 001

Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.
NIP. 19630106 198802 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Azis Muzlim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001



PENGARUH PENGGUNAAN BELITAN TERSIER PADA TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y DALAM MENGURANGI HARMONISA

Andre Prasetya,¹ Hery Purnomo, Ir., M.T.², Unggul Wibawa, Ir., M.Sc.³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, ^{2,3}Dosen Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: andrprsty@gmail.com

ABSTRAK

Transformator merupakan peralatan listrik yang sangat berpengaruh besar pada sistem ketenagalistrikan. Transformator dirancang untuk menyalurkan energi dengan rugi-rugi sekecil mungkin. Namun, apabila pada sistem tenaga listrik terdapat harmonisa, maka akan sangat berdampak buruk bagi transformator dan alat-alat listrik lainnya. Pada Gardu Induk, biasanya digunakan transformator hubungan Y-Y dengan penambahan belitan tersier yang terhubung Δ . Belitan tersebut digunakan dengan maksud agar harmonisa pada sistem berkurang. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh belitan tersier dalam mengurangi harmonisa baik pada beban seimbang maupun beban tidak seimbang. Pada pengujian yang dilakukan di Laboratorium Mesin Elektrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya digunakan motor induksi tiga fasa dan dikopel dengan generator DC *shunt* sebagai pembebanan seimbang, dan digunakan lampu pijar serta lampu LED yang tersusun paralel dan dihubungkan Y sebagai pembebanan tidak seimbang. Dari hasil pengujian dan analisis didapatkan bahwa transformator hubungan Y-Y dengan penambahan belitan tersier yang terhubung Δ dapat memperbaiki tegangan tidak seimbang dan mengurangi harmonisa. Untuk keadaan beban seimbang tegangan harmonisa berkurang hingga 4,87 V dan arus harmonisa hingga 0,29 mA, sedangkan pada keadaan beban tidak seimbang tegangan harmonisa berkurang hingga 1,69 V dan arus harmonisa hingga 0,16 mA. Kata kunci: transformator tiga belitan, belitan tersier, harmonisa.

ABSTRACT

The transformer is an electrical equipment that is very important on the electricity system. The transformer is designed to distribute the energy with the possible small losses. However, if the harmonic is excited in the power system, it will impact to the transformer operation and other electrical equipments. At the substation, usually used Y-Y transformer with the addition of tertiary winding Δ -connected. Tertiary winding is used to reduced harmonic in the system. This research aimed to find out on how much the influence of tertiary winding in harmonic reduction in both balanced load and unbalanced load. Based on a research which have been experimented in the Electrical Machine Laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Brawijaya University, the research used three-phased induction motor and it coupled with a DC shunt generator as balancing load. As unbalanced load, it using incandescent bulbs and LED lights which connected parallely in Y-form. According to the research and analysis, it was resulted that the Y-Y transformer with the addition of tertiary windings Δ -connected can repair unbalanced voltage and reduce harmonics. In balanced load, the harmonic voltage decreases to 4.87 V and its harmonic current decreases to 0.29 mA, meanwhile in unbalanced load, the harmonic voltage decreases to 1.69 V and its harmonic current to 0.16 mA.

Keywords: three windings transformer, tertiary winding, harmonic.

I. PENDAHULUAN

Jaringan tenaga listrik yang tersambung pada beban-beban non-linier akan menimbulkan arus/tegangan dengan besar frekuensinya kelipatan frekuensi fundamental (harmonisa) yang sangatlah berpengaruh terhadap sistem ketenagalistrikan terutama pada jaringan sistem 3 fasa, tidak terkecuali transformator.

Transformator dirancang untuk memungkinkan penyaluran daya ke beban dengan rugi-rugi sekecil mungkin pada frekuensi dasar. Akan tetapi apabila terjadi distorsi harmonisa pada arus dan tegangannya maka menimbulkan rugi-rugi (panas) yang cukup signifikan akibat adanya komponen arus harmonisa yang mengalir bersama arus beban.

Pada transformator khususnya hubungan Y-Y terdapat permasalahan yang cukup serius, yaitu pada transformator hubungan ini timbul harmonisa dan ketika memikul beban tidak seimbang mengakibatkan tegangan fasanya menjadi sangat tidak seimbang [1] sehingga akan menimbulkan arus pada penghantar netral yang berakibat buruk bagi transformator.

Pada Gardu Induk (GI) umumnya digunakan transformator hubungan Y-Y dengan penambahan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) guna mengurangi harmonisa. Seberapa besar kandungan harmonisa pada transformator hubungan Y-Y dan bagaimana pengaruhnya ketika dilakukan penambahan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) perlu dilakukan penelitian lebih lanjut yang memberikan hasil seberapa besar pengaruh belitan tersier yang terhubung delta (Δ) pada transformator hubungan Y-Y dalam mengurangi harmonisa.

II. TINJAUAN PUSTAKA

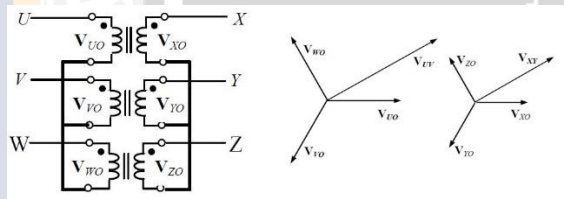
A. Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik statis yang mampu mengubah maupun untuk menyalurkan energi listrik arus bolak-balik dari satu atau lebih rangkaian listrik arus bolak-balik yang lain, melalui gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang dapat menaikkan/menurunkan tegangan/arus dengan frekuensi yang sama [2].

Pada sistem tiga fasa, penaikan dan penurunan tegangan dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu menggunakan satu unit transformator tiga fasa, atau menggunakan tiga unit transformator satu fasa. Belitan transformator dapat dihubungkan Y atau Δ . Pada transformator hubungan Y-Y Tegangan fasa-fasa primer sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa primer dengan perbedaan sudut fasa 30° , tegangan fasa-fasa sekunder sama dengan $\sqrt{3}$ kali tegangan fasa sekunder dengan perbedaan sudut fasa 30° . Perbandingan tegangan fasa-fasa primer dan sekunder adalah [3].

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}\sqrt{3}}{V_{FS}\sqrt{3}} = a; \quad \frac{I_{LP}}{I_{LS}} = \frac{I_{FP}}{I_{FS}} = \frac{1}{a} \quad (1)$$

Antara fasor tegangan fasa-fasa primer dan sekunder tidak terdapat perbedaan sudut fasa.



Gambar 1. Transformator Hubungan Y-Y

Hubungan Y-Y mempunyai dua permasalahan serius, yaitu: [1]

1. Jika beban pada transformator tidak seimbang, akan mengakibatkan tegangan fasa pada transformator bisa menjadi sangat tidak seimbang.
2. Tegangan harmonisa ketiga bisa sangat besar.

Kedua permasalahan di atas dapat diselesaikan dengan salah satu cara berikut:

1. Mentanahkan netral dari transformator, terutama netral dari belitan primer. Cara ini memungkinkan penambahan komponen harmonisa ketiga untuk membuat aliran arus di netral bukan untuk memperbesar tegangan. Dengan adanya netral yang ditanahkan ini akan menyediakan jalur kembali untuk setiap arus tidak seimbang.
2. Menambahkan belitan tersier yang terhubung delta (Δ). Jika belitan tersier yang terhubung delta (Δ) ditambahkan ke transformator, maka komponen tegangan harmonisa ketiga pada belitan tersier Δ akan bertambah, karena terdapat arus sirkulasi yang beredar dalam belitan. Cara ini menekan komponen tegangan harmonisa ketiga dengan cara yang sama seperti pentanahan netral pada transformator. Belitan tersier ini biasanya dipasang pada inti transformator dan juga bisa dihubungkan dengan beban.

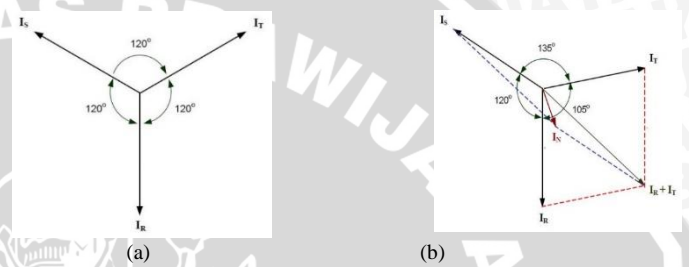
B. Ketidakseimbangan Beban pada Transformator

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana: [4]

- a. Ketiga vektor arus / tegangan sama besar.
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan di mana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada tiga, yaitu:

- a. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- b. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- c. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.



Gambar 2. Vektor Diagram Arus

Gambar 2(a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R, I_S, I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada Gambar 2(b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R, I_S, I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

C. Jenis Beban Listrik

Terdapat dua jenis beban listrik, yaitu:

- 1) *Beban Listrik Linier*: Beban listrik linier adalah beban yang tidak mempengaruhi karakteristik dari tegangan dan arus. Beban linier merupakan beban yang mengeluarkan bentuk gelombang yang berbentuk linier, dimana arus yang mengalir sebanding dengan tahanan dan perubahan tegangan [5]. Contoh beban listrik linier adalah pemanasan resistif, lampu pijar, dan lain-lain.
- 2) *Beban Listrik Nonlinier*: Beban listrik non linier adalah beban yang mempengaruhi karakteristik dari tegangan dan arus, sehingga bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengah siklus sehingga bentuk gelombang keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya. Beban nonlinier inilah yang menimbulkan atau menghasilkan harmonisa [5]. Contoh beban listrik nonlinier adalah *Programmable Logic Control (PLC)*, *Variable Speed Drive (VSD)*, *Pulse Width Modulation (PWM)*, peralatan tanur induksi (*induction furnace*), tanur busur listrik (*arc furnace*),

konverter, ballast elektronik untuk lampu neon, las listrik, dan lain-lain

D. Analisis Kandungan Harmonisa

Besaran distorsi harmonisa dapat dinyatakan dengan *Total Harmonic Distortion* (THD) yang digunakan sebagai ukuran untuk melihat berapa besar pengaruh keseluruhan adanya harmonisa terhadap sinyal sinus [6]. Pengaruh keseluruhan harmonisa diperbandingkan terhadap komponen fundamental.

Untuk tegangan non sinus, THD didefinisikan sebagai berikut: [7]

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

Untuk arus nonsinus, THD didefinisikan sebagai berikut:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_R} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

V_h = tegangan rms pada frekuensi tunggal pada harmonisa ke n

I_h = arus rms pada frekuensi tunggal pada harmonisa ke n

V_1 = tegangan rms fundamental

I_R = arus rms fundamental

N = harmonisa maksimum

h = orde harmonisa

E. Standar Harmonisa

Standar harmonisa secara umum telah diatur dalam standar IEEE 519-1992 tentang batasan harmonisa yang secara garis besar dituliskan pada Tabel 1 [8] dan Tabel 2 [9].

TABEL I
STARDAR DISTORSI TEGANGAN

Maksimum Distorsi Harmonisa dalam % Arus Beban (I_L)						
Harmonisa Orde Ganjil Pada: $120 \text{ V} \leq V \leq 69 \text{ kV}$						
I_{sc}/I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	THDi
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

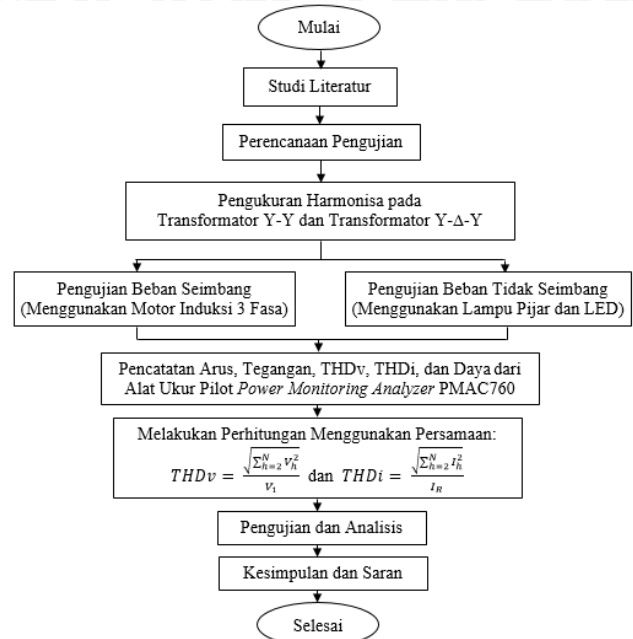
Harmonisa orde genap dibatasi 25% dari batasan harmonisa orde ganjil diatas

TABEL II
STANDAR DISTORSI TEGANGAN

Distorsi Maksimum (%)	Tegangan		
	<69 kV	69-138 kV	>138 kV
Individual harmonic	3,0	1,5	1,0
Total harmonic	5,0	2,5	1,5

III. METODOLOGI PENELITIAN

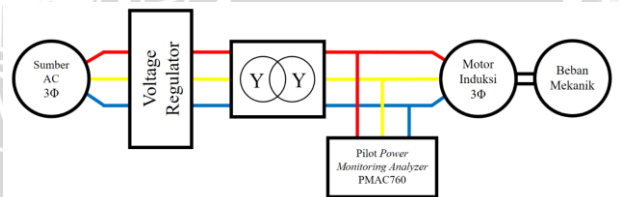
Metode penelitian yang akan digunakan dalam penelitian ini secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.



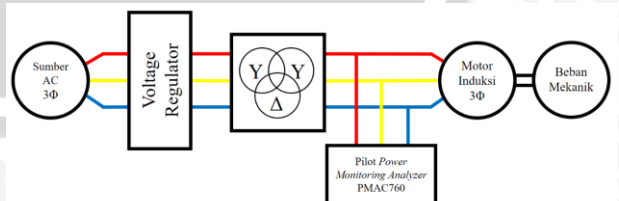
Gambar 3 Diagram Alir Pengerjaan Penelitian.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

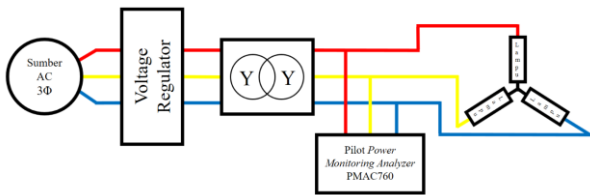
Terdapat empat macam pengujian yaitu transformator hubungan Y-Y dan hubungan Y-Δ-Y dengan masing-masing keadaan beban seimbang dan tidak seimbang. Dilakukan pengukuran pada setiap pengujian terhadap tegangan, arus, daya, THD, beserta gelombang tegangan dan gelombang arus pada sisi sekunder transformator menggunakan alat ukur Pilot Power Monitoring Analyzer PMAC 760. Rangkaian pengujian pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4, 5, 6, dan 7.



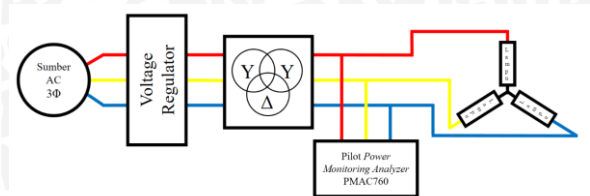
Gambar 4. Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Y Keadaan Beban Seimbang.



Gambar 5. Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Δ-Y Keadaan Beban Seimbang.



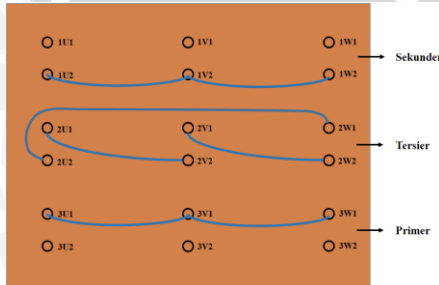
Gambar 6. Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Y Keadaan Beban Tidak Seimbang.



Gambar 7. Rangkaian Pengujian Transformator Hubungan Y-Δ-Y Keadaan Beban Tidak Seimbang.



Gambar 8. Hubungan Belitan pada Transformator Y-Y



Gambar 9. Hubungan Belitan pada Transformator Y-Δ-Y

A. Pengujian dan Analisis Transformator Hubungan Y-Y Keadaan Beban Seimbang

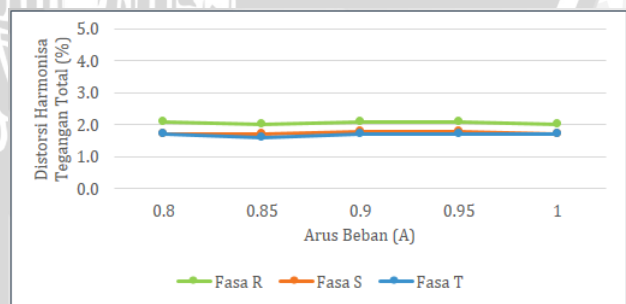
Data yang diambil merupakan data pada pengujian transformator hubungan Y-Y dimana sisi sekunder transformator dihubungkan dengan motor induksi 3 fasa dan dikopel generator DC shunt yang dioperasikan sebagai generator DC penguat terpisah. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

TABEL III
DATA HASIL PENGUJIAN TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y KEADAAN BEBAN SEIMBANG

Fasa	I (A)		V _(L-N) (volt)	V _(L-L) (volt)	THD _v (%)	THD _i (%)
	I _{rata-rata} (A)	I _{fasa} (A)				
R	0,80	0,797	221,60	386,08	2,1	4,6
S		0,844	221,80	380,62	1,7	4,0
T		0,757	218,08	379,13	1,7	4,5
R	0,85	0,869	221,51	385,42	2,0	4,3
S		0,892	221,51	380,22	1,7	3,5
T		0,791	218,29	379,07	1,6	4,1
R	0,90	0,931	221,86	385,41	2,1	4,0
S		0,937	221,46	380,54	1,8	3,4
T		0,831	218,13	379,97	1,7	4,0
R	0,95	0,972	221,49	385,40	2,1	3,9
S		0,992	221,65	380,01	1,8	3,1
T		0,891	218,17	379,60	1,7	3,8
R	1,00	1,037	221,66	385,84	2,0	3,8
S		1,026	221,41	380,02	1,7	3,0
T		0,964	218,26	379,71	1,7	3,5

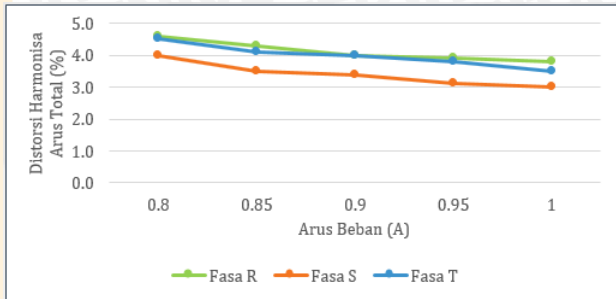
Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 3, Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THD_v) dan Distorsi Harmonisa Arus Total (THD_i) pada pengujian transformator hubungan Y-Y jika dibandingkan dengan standar ukuran harmonisa pada Tabel 1 dan Tabel 2 maka pengujian ini masih memenuhi standar IEEE 512-1992 yaitu di bawah 5%. THD_v pada pengujian ini berkisar antara 1,6% hingga 2,1% dan untuk THD_i berkisar antara 3,0% hingga 4,6% sehingga bentuk gelombang tegangan maupun arus yang terdistorsi harmonisa masih menyerupai gelombang sinusoidal.

Berikut merupakan grafik hubungan antara distorsi harmonisa tegangan total terhadap arus beban, dan distorsi harmonisa arus total terhadap arus beban.



Gambar 10. Hubungan Distorsi Harmonisa Tegangan Total terhadap Arus Beban





Gambar 11. Hubungan Distorsi Harmonisa Arus Total terhadap Arus Beban

Berdasarkan grafik pada Gambar 8 dapat diamati bahwa dengan arus beban yang semakin besar dan tegangan yang tetap maka distorsi harmonisa tegangan total (THDv) tidak mengalami perubahan yang signifikan (relatif konstan). Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai THDv paling besar terdapat pada fasa R yaitu 2,1% dengan arus beban 0,8 A, 0,9 A, dan 0,95 A, sedangkan nilai THDv paling kecil terdapat pada fasa T, yaitu 1,6% dengan arus beban 0,85 A.

Pada grafik Gambar 9 dapat diamati bahwa dengan arus beban yang semakin besar dan tegangan yang tetap maka distorsi harmonisa arus total (THDi) semakin kecil. Dari grafik terlihat nilai THDi paling besar terdapat pada fasa R yaitu 4,6% dengan arus beban 0,8 A, sedangkan nilai THDi paling kecil terdapat pada fasa S, yaitu 3% dengan arus beban 1 A.

Dengan menggunakan persamaan (1) dan (2), maka dapat dicari nilai tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.

TABEL IV
HARMONISA PADA TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y KEADAAN BEBAN SEIMBANG

Fasa	I (A)		Tegangan Harmonisa Total (V)	Arus Harmonisa Total (mA)
	I _{rata-rata} (A)	I _{fasa} (A)		
R	0,80	0,797	21,66	1,34
S		0,844	14,22	1,14
T		0,757	13,74	1,16
R	0,85	0,869	19,63	1,40
S		0,892	14,18	0,97
T		0,791	12,20	1,05
R	0,90	0,931	21,71	1,39
S		0,937	15,89	1,01
T		0,831	13,75	1,10
R	0,95	0,972	21,63	1,44
S		0,992	15,92	0,95
T		0,891	13,76	1,15
R	1,00	1,037	19,65	1,55
S		1,026	14,17	0,95
T		0,964	13,77	1,14

B. Pengujian dan Analisis Transformator Hubungan Y-Δ-Y Keadaan Beban Seimbang

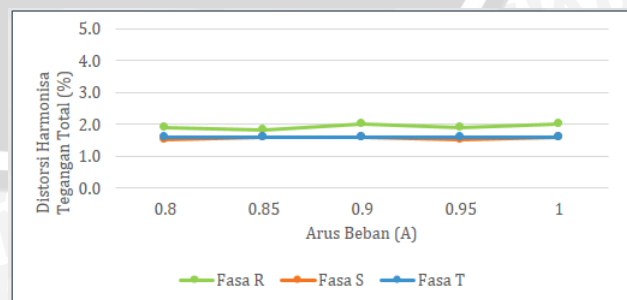
Data yang diambil merupakan data pada pengujian transformator hubungan Y-Δ-Y keadaan beban seimbang dimana perlakuan pengujian sama dengan saat hubungan Y-Y. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 5.

TABEL V
DATA HASIL PENGUJIAN TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Δ-Y KEADAAN BEBAN SEIMBANG

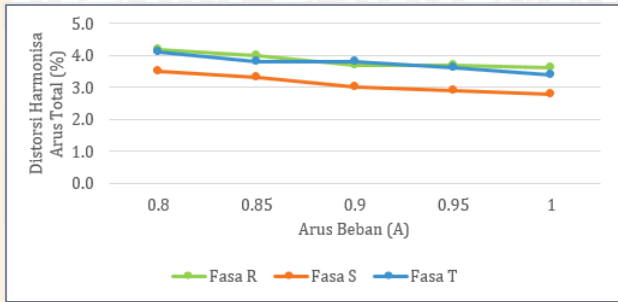
Fasa	I (A)		V _(L-N) (volt)	V _(L-L) (volt)	THDv (%)	THDi (%)
	I _{rata-rata} (A)	I _{fasa} (A)				
R	0,80	0,803	221,55	385,78	1,9	4,2
S		0,833	221,64	380,16	1,5	3,5
T		0,757	218,21	379,75	1,6	4,1
R	0,85	0,871	221,45	385,52	1,8	4,0
S		0,894	221,36	380,18	1,6	3,3
T		0,796	218,17	379,12	1,6	3,8
R	0,90	0,934	221,51	385,60	2,0	3,7
S		0,939	221,38	380,33	1,6	3,0
T		0,834	218,16	379,69	1,6	3,8
R	0,95	0,974	221,49	385,80	1,9	3,7
S		0,991	221,57	380,05	1,5	2,9
T		0,886	218,27	379,50	1,6	3,6
R	1,00	1,030	221,61	385,91	2,0	3,6
S		1,029	221,51	380,20	1,6	2,8
T		0,959	218,25	379,60	1,6	3,4

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 5, Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THDv) dan Distorsi Harmonisa Arus Total (THDi) pada pengujian transformator hubungan Y-Δ-Y jika dibandingkan dengan standar ukuran harmonisa pada Tabel 1 dan Tabel 2 maka pengujian ini masih memenuhi standar IEEE 512-1992 yaitu di bawah 5%. THDv pada pengujian ini berkisar antara 1,5% hingga 2,0% dan untuk THDi berkisar antara 2,8% hingga 4,2% sehingga bentuk gelombang tegangan maupun arus yang terdistorsi harmonisa masih menyerupai gelombang sinusoidal.

Berikut merupakan grafik hubungan antara distorsi harmonisa tegangan total terhadap arus beban, dan distorsi harmonisa arus total terhadap arus beban.



Gambar 12. Hubungan Distorsi Harmonisa Tegangan Total terhadap Arus Beban



Gambar 13. Hubungan Distorsi Harmonisa Arus Total terhadap Arus Beban

Berdasarkan grafik pada Gambar 10 dapat diamati bahwa dengan arus beban yang semakin besar dan tegangan yang tetap maka Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THDv) tidak mengalami perubahan yang signifikan (relatif konstan). Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai THDv paling besar terdapat pada fasa R yaitu 2,0% dengan arus beban 0,9 A dan 1 A, sedangkan nilai THDv paling kecil terdapat pada fasa S, yaitu 1,5% dengan arus beban 0,8 A dan 0,95 A.

Pada grafik Gambar 11 dapat diamati bahwa dengan arus beban yang semakin besar dan tegangan yang tetap maka Distorsi Harmonisa Arus Total (THDi) semakin kecil. Dari grafik terlihat nilai THDi paling besar terdapat pada fasa R yaitu 4,2% dengan arus beban 0,8 A, sedangkan nilai THDi paling kecil terdapat pada fasa S, yaitu 2,8% dengan arus beban 1 A.

Dengan menggunakan persamaan (1) dan (2), maka dapat dicari nilai tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa dan setiap perubahan arus beban pada transformator hubungan Y-Δ-Y dengan pembebanan seimbang. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 6.

TABEL VI
HARMONISA PADA TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Δ-Y KEADAAN BEBAN SEIMBANG

Fasa	I (A)		Tegangan Harmonisa Total (V)	Arus Harmonisa Total (mA)
	I _{rata-rata} (A)	I _{fasa} (A)		
R	0,80	0,803	17,72	1,14
S		0,833	11,05	0,85
T		0,757	12,19	0,96
R	0,85	0,871	15,89	1,21
S		0,894	12,54	0,87
T		0,796	12,19	0,91
R	0,90	0,934	19,63	1,19
S		0,939	12,55	0,79
T		0,834	12,18	1,00
R	0,95	0,974	17,71	1,30
S		0,991	11,05	0,83
T		0,886	12,20	1,02
R	1,00	1,030	19,64	1,45
S		1,029	12,56	0,83
T		0,959	12,19	1,06

C. Analisis Pengaruh Penggunaan Belitan Tersier yang Terhubung Delta (Δ) pada Transformator Hubungan Y-Y Keadaan Beban Seimbang dalam Mengurangi Harmonisa

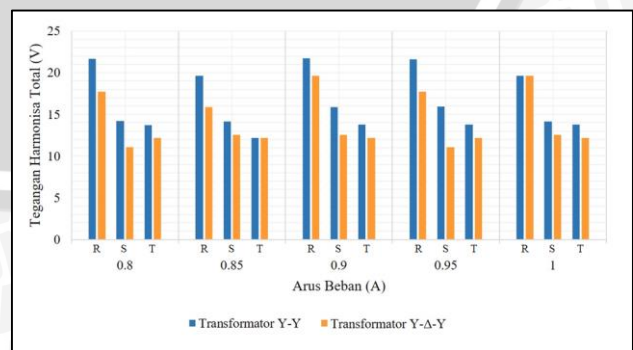
Pada pengujian transformator baik dengan hubungan Y-Y maupun Y-Δ-Y dengan pembebanan seimbang, semakin besar arus beban maka nilai THDi semakin kecil sedangkan nilai THDv tetap. Nilai THDv maupun THDi pada transformator hubungan Y-Y semakin berkurang ketika dilakukan penambahan belitan tersier yang terhubung delta (Δ) sehingga gelombang terdistorsi pada transformator hubungan Y-Δ-Y akan lebih mendekati sinusoidal dari pada transformator hubungan Y-Y.

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4 dan Tabel 6, maka dapat ditentukan selisih harmonisa antara hubungan Y-Y dan hubungan Y-Δ-Y keadaan beban seimbang untuk mengetahui seberapa besar pengaruh belitan tersier yang terhubung Δ dalam mengurangi harmonisa.

TABEL VII
SELISIH HARMONISA ANTARA TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y DENGAN HUBUNGAN Y-Δ-Y KEADAAN BEBAN SEIMBANG

Fasa	I (A)	Selisih Tegangan Harmonisa Total (V)	Selisih Arus Harmonisa Total (mA)
R	0,8	3,94	0,20
S		3,16	0,29
T		1,55	0,20
R	0,85	3,74	0,18
S		1,64	0,10
T		0,01	0,14
R	0,9	2,08	0,19
S		3,34	0,22
T		1,57	0,10
R	0,95	3,92	0,14
S		4,87	0,12
T		1,56	0,13
R	1	0,01	0,18
S		1,61	0,12
T		1,57	0,08

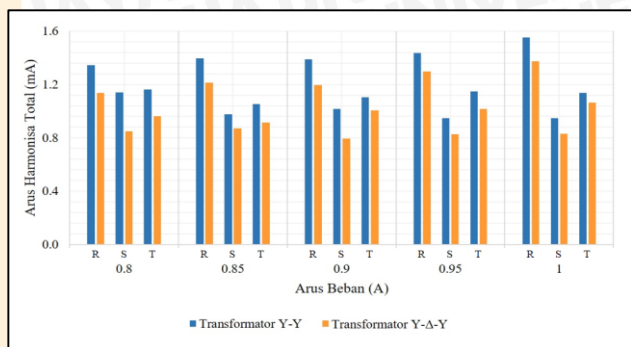
Berikut ini grafik hubungan tegangan harmonisa total terhadap arus beban pada transformator hubungan Y-Y dan Y-Δ-Y di setiap fasanya.



Gambar 14. Hubungan Tegangan Harmonisa Total terhadap Arus Beban



Sedangkan untuk grafik hubungan arus harmonisa total terhadap arus beban di setiap fasanya adalah sebagai berikut:



Gambar 15. Hubungan Arus Harmonisa Total terhadap Arus Beban

Berdasarkan Gambar 12 dan Gambar 13 dapat diamati bahwa tegangan harmonisa total maupun arus harmonisa total pada transformator hubungan Y-Y berkurang ketika belitan tersier yang terhubung delta (Δ) ditambahkan. Belitan tersier ini mampu mengurangi tegangan harmonisa total pada fasa R hingga 3,94 V, pada fasa S hingga 4,87 V, dan pada fasa T hingga 1,57 V. Sedangkan untuk arus harmonisa total berkurang pada fasa R hingga 0,2 mA, pada fasa S hingga 0,29 mA, dan pada fasa T hingga 0,20 mA pada kondisi arus beban tertentu.

D. Pengujian dan Analisis Transformator Hubungan Y-Y Keadaan Beban Tidak Seimbang

Data yang diambil merupakan data pada pengujian transformator hubungan Y-Y dimana sisi sekunder transformator dihubungkan dengan lampu pijar dan lampu LED yang telah tersusun paralel dan dihubung Y. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 8.

TABEL VIII
DATA HASIL PENGUJIAN TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y KEADAAN BEBAN TIDAK SEIMBANG

Fasa	I (A)	V _(L-N) (volt)	V _(L-L) (volt)	THDv (%)	THDi (%)
R	1,576	116,34	201,34	2,4	2,1
S	1,617	119,62	210,32	2,2	2,5
T	0,345	125,10	213,39	2,3	7,4
I _N (A)	1,336				

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 8, Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THDv) dan Distorsi Harmonisa Arus Total (THDi) pada pengujian transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan tidak seimbang jika dibandingkan dengan standar ukuran harmonisa pada Tabel 1 dan Tabel 2 masih memenuhi standar IEEE 512-1992 yaitu di bawah 5% kecuali THDi pada fasa T dikarenakan THDi pada fasa ini sebesar 7,4% sehingga gelombang arus pada fasa ini cenderung lebih buruk dari gelombang tegangan maupun arus pada fasa yang lain. THDi pada fasa T jauh lebih besar dikarenakan arus beban yang mengalir lebih besar pada lampu LED dari pada lampu pijar, sedangkan pada fasa yang lain arus yang mengalir pada lampu LED tidak begitu besar karena pada fasa tersebut

terdapat lima lampu pijar sehingga arus yang mengalir pada lampu LED tidak begitu besar dan THDi yang dihasilkannya juga tidak sebesar seperti pada fasa T.

Dengan menggunakan persamaan (1) dan (2), maka dapat dicari nilai tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa pada transformator hubungan Y-Y keadaan beban tidak seimbang. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 9.

TABEL IX
HARMONISA PADA TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y KEADAAN BEBAN TIDAK SEIMBANG

Fasa	I (A)	Tegangan Harmonisa Total (V)	Arus Harmonisa Total (mA)
R	1,576	7,80	1,10
S	1,617	6,93	1,63
T	0,345	8,28	0,65

E. Pengujian dan Analisis Transformator Hubungan Y-Δ-Y Keadaan Beban Tidak Seimbang

Data yang diambil merupakan data pada pengujian transformator hubungan Y-Δ-Y keadaan beban tidak seimbang dimana perlakuan pengujian sama dengan saat hubungan Y-Y. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 10.

TABEL X
DATA HASIL PENGUJIAN TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Δ-Y KEADAAN BEBAN TIDAK SEIMBANG

Fasa	I (A)	V _(L-N) (volt)	V _(L-L) (volt)	THDv (%)	THDi (%)
R	1,583	117,68	201,43	2,1	2,0
S	1,600	117,43	210,42	2,1	2,4
T	0,346	125,72	213,17	2,2	7,0
I _N (A)	1,310				

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 10, Distorsi Harmonisa Tegangan Total (THDv) dan Distorsi Harmonisa Arus Total (THDi) pada pengujian transformator hubungan Y-Δ-Y dengan pembebanan tidak seimbang jika dibandingkan dengan standar ukuran harmonisa pada Tabel 1 dan Tabel 2 masih memenuhi standar IEEE 512-1992 yaitu di bawah 5% kecuali THDi pada fasa T dikarenakan THDi pada fasa ini sebesar 7% sehingga gelombang arus pada fasa ini cenderung lebih buruk dari gelombang tegangan maupun arus pada fasa yang lain. THDi pada fasa T jauh lebih besar dikarenakan arus beban yang mengalir lebih besar pada lampu LED dari pada lampu pijar, sedangkan pada fasa yang lain arus yang mengalir pada lampu LED tidak begitu besar karena pada fasa tersebut terdapat lima lampu pijar sehingga arus yang mengalir pada lampu LED tidak begitu besar dan THDi yang dihasilkannya juga tidak sebesar seperti pada fasa T.

Dengan menggunakan persamaan (1) dan (2), maka dapat dicari nilai tegangan harmonisa total dan arus harmonisa total di setiap fasa pada transformator hubungan Y-Δ-Y keadaan beban tidak seimbang. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 11.

TABEL XI
HARMONISA PADA TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Δ-Y
KEADAAN BEBAN TIDAK SEIMBANG

Fasa	I (A)	Tegangan Harmonisa Total (V)	Arus Harmonisa Total (mA)
R	1,583	6,11	1,00
S	1,600	6,08	1,47
T	0,346	7,65	0,59

F. Analisis Pengaruh Penggunaan Belitan Tersier yang Terhubung Delta (Δ) pada Transformator Hubungan Y-Y Keadaan Beban Tidak Seimbang dalam Mengurangi Harmonisa

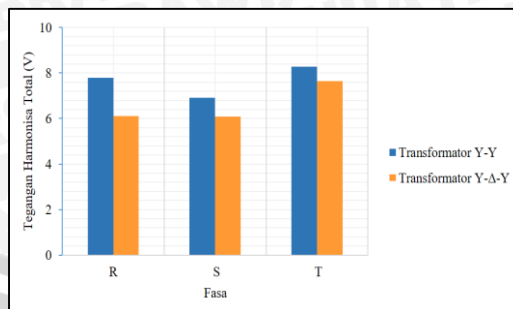
Ketika transformator hubungan Y-Y dibebani oleh beban tidak seimbang akan mengakibatkan tegangan fasanya sangat tidak seimbang. Semakin besar ketidakseimbangan tegangan tersebut tentunya akan memperbesar arus pada penghantar netral. Belitan tersier yang terhubung delta (Δ) selain digunakan untuk mengurangi harmonisa juga dapat digunakan untuk memperbaiki tegangan tidak seimbang pada transformator hubungan Y-Y. Hal tersebut dapat diamati pada Tabel 8 dan Tabel 10 dimana arus netral pada transformator hubungan Y-Y sebesar 1,336 A turun menjadi 1,310 A ketika dilakukan penambahan belitan tersier yang terhubung Δ yang menunjukkan bahwa belitan tersier dapat memperbaiki ketidakseimbangan tegangan pada transformator hubungan Y-Y.

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 9 dan Tabel 11, maka dapat ditentukan selisih harmonisa antara hubungan Y-Y dan hubungan Y- Δ -Y keadaan beban tidak seimbang untuk mengetahui seberapa besar pengaruh belitan tersier yang terhubung Δ dalam mengurangi harmonisa.

TABEL XII
SELISIH HARMONISA ANTARA TRANSFORMATOR HUBUNGAN Y-Y DENGAN HUBUNGAN Y-Δ-Y KEADAAN BEBAN TIDAK SEIMBANG

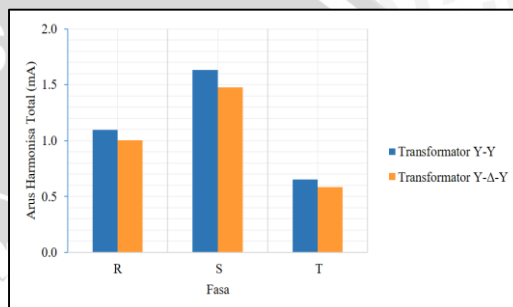
Fasa	I (A)	Selisih Tegangan Harmonisa Total (V)	Selisih Arus Harmonisa Total (V)
R	1,6	1,69	0,10
S	1,6	0,85	0,16
T	0,3	0,63	0,06

Berikut ini grafik tegangan harmonisa total transformator hubungan Y-Y dan Y- Δ -Y di setiap fasanya.



Gambar 16 Tegangan Harmonisa Total pada Setiap Fasa

Sedangkan untuk grafik arus harmonisa total di setiap fasanya adalah sebagai berikut:



Gambar 17. Arus Harmonisa Total pada Setiap Fasa

Berdasarkan grafik pada Gambar 14 dan Gambar 15 dapat diamati bahwa tegangan harmonisa total maupun arus harmonisa total pada transformator hubungan Y-Y berkurang ketika belitan tersier yang terhubung delta (Δ) ditambahkan. Belitan tersier ini mampu mengurangi tegangan harmonisa total pada fasa R sebesar 1,69 V, pada fasa S sebesar 0,85 V, dan pada fasa T sebesar 0,63 V. Sedangkan untuk arus harmonisa total, pada fasa R berkurang sebesar 0,1 mA, pada fasa S berkurang sebesar 0,16, dan pada fasa T berkurang sebesar 0,06 mA.

V. KESIMPULAN

1. a) Tegangan harmonisa total yang terkandung pada transformator hubungan Y-Y dengan pembebanan seimbang di setiap perubahan arus beban antara 12,20 V hingga 21,71 V. Untuk arus harmonisa total yang terkandung di setiap perubahan arus beban antara 0,95 mA hingga 1,55 mA.
- b) Untuk keadaan beban tidak seimbang, tegangan harmonisa total yang terkandung pada transformator hubungan Y-Y pada fasa R, S, dan T berturut-turut sebesar 7,8 V, 6,93 V, dan 8,28 V. Untuk harmonisa total yang terkandung pada fasa R, S, dan T berturut-turut sebesar 1,10 mA, 1,63 mA, dan 0,65 mA.
2. a. Pada keadaan beban seimbang, belitan tersier ini mampu mengurangi tegangan harmonisa total hingga 4,87 V. Sedangkan untuk arus harmonisa total berkurang hingga 0,29 mA pada kondisi arus beban tertentu.
- b. Pada keadaan beban tidak seimbang, Tegangan harmonisa total pada fasa mengalami penurunan berturut-turut sebesar 1,69 V, 0,85 V, dan 0,63 V. Untuk

arus harmonisa total pada fasa R, S, dan T mengalami penurunan berturut turut sebesar 0,1 mA, 0,16 mA, dan 0,06 mA.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chapman, Stephen J. 2005. Electric Machinery Fundamentals fourth edition. New York: McGraw-Hill.
- [2] Kadir, Abdul. 1989. Transformator. Jakarta: PT. Elek Media Komputindo.
- [3] Sudirham, Sudaryatno. 2010. Analisis Rangkaian Listrik Jilid 3. Bandung: ITB.
- [4] Setiadji, Julius Sentosa. 2006. Pengaruh Ketidakeimbangan Beban terhadap Arus Netral dan Losses pada Trafo Distribusi. Jurnal Teknik Elektro. VI (1): 68-73.
- [5] Dugan, Roger C & McGranaghan, Mark F. 2003. Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw-Hill.
- [6] Sugiarto, Hadi. 2012. Kajian Harmonisa Arus dan Tegangan Listrik di Gedung Administrasi Politeknik Negeri Pontianak. ISSN 1693-9085. VIII (2): 80-89.
- [7] Arrillaga, Jos, dan Watson, Naville R. 2003. Power System Harmonics, second edition. New York: John Wiley & Sons.
- [8] Kusko, Alexander, dan Thompson, Marc T. 2007. Power Quality in Electrical Systems. New York: McGraw-Hill.
- [9] Burke, James J. 1994. Power Distribution Engineering-Fundamentals and Applications. New York: Marcel Dekker Inc.

