

# MINIMISASI ARUS NETRAL DENGAN MENGGUNAKAN AUTOTRAFO ZIG-ZAG PADA SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA EMPAT KAWAT

**Junaidy Sipayung, Ir. Zulkarnaen Pane, Syiska Yana, ST, MT**

Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)

Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA

e-mail : [junaidysipayung@students.usu.ac.id](mailto:junaidysipayung@students.usu.ac.id) [zulkarnaen\\_pane@yahoo.com](mailto:zulkarnaen_pane@yahoo.com) [syiska\\_yana@yahoo.com](mailto:syiska_yana@yahoo.com)

## Abstrak

Arus netral merupakan arus balik yang mengalir pada kawat netral sistem distribusi tiga fasa empat kawat yang merupakan penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris. Idealnya arus netral sama dengan nol pada saat beban seimbang namun pada kenyataannya penggunaan beban non linear dan beban tidak seimbang mengakibatkan adanya arus netral dan bahkan melebihi besar arus fasanya. Arus netral yang besar mengakibatkan panas yang berlebih pada generator, menimbulkan kerusakan atau kesalahan kerja dari peralatan-peralatan listrik yang terhubung pada transformator. Pada penelitian ini dilakukan minimisasi arus netral pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat dengan menggunakan autotrafo zig-zag. Pemasangan autotrafo zig-zag pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat dapat mengurangi arus netral pada penghantar netral sistem tiga fasa empat kawat, dimana terjadi pengurangan arus netral sebesar 99,68 % yaitu dari semula 1,209934 A menjadi 0,003809 A.

**Kata Kunci : arus netral, autotrafo zig-zag**

## 1. Pendahuluan

Sistem distribusi daya tiga fasa empat kawat sangat luas digunakan untuk menyuplai beban satu fasa ataupun beban tiga fasa. Keberadaan dari beban-beban non linear seperti televisi, radio, komputer, lampu hemat energi dan lain-lain yang disuplai oleh sistem tiga fasa empat kawat akan menimbulkan harmonisa. Harmonisa adalah arus atau tegangan yang nilai frekuensinya kelipatan bulat dari frekuensi fundamental (di Indonesia 50 Hz) [1].

Salah satu pengaruh harmonisa pada sistem tiga fasa empat kawat adalah timbulnya arus urutan nol yang tinggi di kawat netralnya sehingga mengakibatkan arus netral yang tinggi juga. Kawat netral pada sistem tiga fasa empat kawat merupakan jalur untuk arus urutan nol. Arus masukan dari beban-beban non linear satu fasa mengandung komponen harmonisa yang berbeda dan salah satunya adalah arus urutan nol yang besar. Selain itu, beban-beban satu fasa di sistem tiga fasa mungkin didistribusikan tidak merata yang mana mengakibatkan beban tidak seimbang yang serius dan komponen arus urutan nol fundamental yang nyata. Karena komponen harmonisa urutan nol dan komponen urutan nol fundamental dari arus beban tidak seimbang mengalir ke dalam kawat netral yang akan mengakibatkan beban lebih pada kawat netral [2].

Harmonisa akan mengakibatkan arus netral yang tinggi pada sistem distribusi tiga fasa empat

kawat akibat penggunaan beban-beban non linear yang seimbang. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dibahas tentang minimisasi arus netral dengan menggunakan autotrafo zig-zag pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat.

## 2. Minimisasi Arus Netral pada Sistem Tiga Fasa Empat Kawat dengan Menggunakan Autotrafo Zig-zag

Jaringan distribusi tegangan rendah adalah jaringan tiga fasa empat kawat, dengan ketentuan, terdiri dari kawat tiga fasa (R, S, T) dan satu kawat netral. Jika beban seimbang tidak ada arus netral. Namun, pada kenyataannya, beban tidak seimbang karena kebanyakan jaringan menyuplai seperangkat peralatan dengan beban satu fasa. Ketidakseimbangan tersebut menyebabkan timbulnya arus netral dan meningkatnya rugi-rugi pada jaringan [3].

Arus netral dalam sistem distribusi tenaga listrik dikenal sebagai arus yang mengalir pada kawat netral di sistem distribusi tegangan rendah tiga fasa empat kawat. Arus yang mengalir pada kawat netral yang merupakan arus balik untuk sistem distribusi tiga fasa empat kawat adalah penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa dalam komponen simetris.

Perkembangan jaringan distribusi ditandai dengan pemakaian sebagian besar peralatan non linier. Dengan meningkatnya sejumlah peralatan non linier menyebabkan adanya distorsi harmonik

pada arus beban dan menyebabkan meningkatnya rugi-rugi pada jaringan dan transformator [3].

Pada sistem simetris dan seimbang, arus fasa pada sistem dapat dituliskan dengan menggunakan transformasi fourier. Arus pada penghantar netral dapat dicari dengan penjumlahan arus dari ketiga fasa (R, S, dan T) [4].

Adapun bentuk persamaannya yaitu :

$$I_R(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + I_5 \sin(5\omega t + \varphi_5) + \dots \quad (1)$$

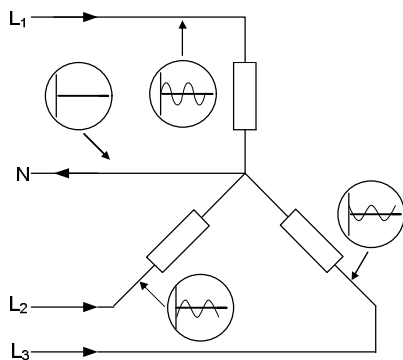
$$I_S(t) = I_1 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_1\right) + I_3 \sin\left(3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_3\right) + I_5 \sin\left(5\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_5\right) + \dots \quad (2)$$

$$I_T(t) = I_1 \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \varphi_1\right) + I_3 \sin\left(3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \varphi_3\right) + I_5 \sin\left(5\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_5\right) + \dots \quad (3)$$

$$I_N(t) = 0 + 3 * I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + 0 + \dots \quad (4)$$

Dapat dilihat bahwa harmonisa pertama (i = 6k + 1), dengan i adalah urutan harmonisa dan k = 0,1,2,...) di arus fasa dibentuk langsung dari sistem, harmonisa ketiga (i = 6k + 3) merupakan komponen urutan nol dan harmonisa kelima (i = 6k + 5) adalah komponen urutan negatif. Dimana arus pada kawat netral hanya terdiri dari harmonisa ketiga[4].

Secara grafis, sistem yang simetris dan seimbang ditunjukkan pada Gambar 1 [5].



**Gambar 1** Sistem tiga fasa simetris dan seimbang dimana tidak ada arus urutan nol

Dengan menggunakan transformasi Fortescue, sistem tidak simetris dan tidak seimbang dapat dituliskan sebagai penjumlahan dari komponen urutan positif, negatif dan nol [4].

Adapun persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{R,i} \\ \bar{I}_{S,i} \\ \bar{I}_{T,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{0,i} \\ \bar{I}_{1,i} \\ \bar{I}_{2,i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{0,i} \\ \bar{I}_{1,i} \\ \bar{I}_{2,i} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{R,i} \\ \bar{I}_{S,i} \\ \bar{I}_{T,i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

dimana

$$a = \exp\left(j \frac{2\pi}{3}\right)$$

$\bar{I}_{R,i}$  = arus harmonisa orde ke-i pada fasa R

$\bar{I}_{S,i}$  = arus harmonisa orde ke-i pada fasa S

$\bar{I}_{T,i}$  = arus harmonisa orde ke-i pada fasa T

$\bar{I}_{0,i}$  = arus urutan nol orde ke-i

$\bar{I}_{1,i}$  = arus urutan positif orde ke-i

$\bar{I}_{2,i}$  = arus urutan negatif orde ke-i

Sebagai penjumlahan dari komponen urutan positif dan juga penjumlahan dari komponen urutan negatif adalah nol ( $1+a+a^2=0$ ), maka hanya penjumlahan dari komponen urutan nol saja yang ada pada arus penghantar netral.

$$\bar{I}_{N,i} = (1 + a + a^2)\bar{I}_{1,i} + (1 + a + a^2)\bar{I}_{2,i} + 3\bar{I}_{0,i} = 3\bar{I}_{0,i} \quad (7)$$

Arus netral hanya memiliki komponen urutan nol dari arus fasa. Pada sistem yang simetris dan seimbang, komponen urutan nol ini memiliki hubungan dengan harmonisa kelipatan tiga.

Dari Persamaan 7, sebagaimana hukum kirchoff dapat dituliskan menjadi:

$$\bar{I}_{N,i} = 3\bar{I}_{0,i} = 3 * \frac{1}{3} (\bar{I}_{R,i} + \bar{I}_{S,i} + \bar{I}_{T,i}) = \bar{I}_{R,i} + \bar{I}_{S,i} + \bar{I}_{T,i} \quad (8)$$

Misalkan  $\bar{I}_{R,i} = \bar{I}_{R,i} e^{j\varphi_{R,i}}$ ,  $\bar{I}_{S,i} = \bar{I}_{S,i} e^{j\varphi_{S,i}}$ ,  $\bar{I}_{T,i} = \bar{I}_{T,i} e^{j\varphi_{T,i}}$  kemudian  $\bar{I}_{N,i}$  didapat :

$$\bar{I}_{N,i} = (I_{R,i} \cos \varphi_{R,i} + I_{S,i} \cos \varphi_{S,i} + I_{T,i} \cos \varphi_{T,i}) + j (I_{R,i} \sin \varphi_{R,i} + I_{S,i} \sin \varphi_{S,i} + I_{T,i} \sin \varphi_{T,i}) \quad (9)$$

Dari persamaan 9, amplitudo  $I_{N,i}$  dan sudut fasa  $\varphi_{N,i}$  dari harmonisa ke-i pada arus fasa netral dapat dihitung. Amplitudo dari  $I_{N,i}$  dari harmonisa di arus pada penghantar netral adalah:

$$I_{N,i} = \sqrt{(I_{R,i} \cos \varphi_{R,i} + I_{S,i} \cos \varphi_{S,i} + I_{T,i} \cos \varphi_{T,i})^2 + (I_{R,i} \sin \varphi_{R,i} + I_{S,i} \sin \varphi_{S,i} + I_{T,i} \sin \varphi_{T,i})^2} \quad (10)$$

dimana :

$I_{N,i}$  : amplitudo dari urutan harmonisa ke i pada arus pada penghantar netral

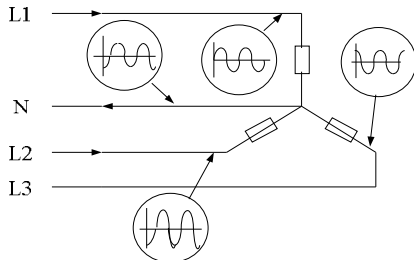
$I_{R,i}$ ,  $I_{S,i}$ ,  $I_{T,i}$  : amplitudo dari harmonisa dari arus pada fasa R,S,T

$\varphi_{R,i}$ ,  $\varphi_{S,i}$ ,  $\varphi_{T,i}$  : sudut fasa dari harmonisa dari arus pada fasa R,S,T

Sudut fasa dari harmonisa ke-i di arus konduktor netral adalah:

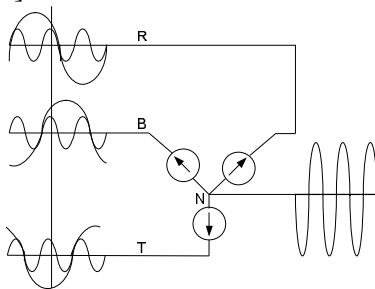
$$\varphi_{N,i} = \arctg \left( \frac{jX(I_{N,i})}{R(I_{N,i})} \right) \quad (11)$$

Jika harmonisa di arus fasa diketahui, maka harmonisa arus pada konduktor netral juga dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 9 dan Persamaan 10. Secara grafis sistem yang tidak seimbang ditunjukkan pada Gambar 2 [5].



**Gambar 2** Sistem tiga fasa tidak simetris dan tidak seimbang dimana ada arus urutan nol

*Triplen* harmonisa merupakan salah satu penyebab terjadinya arus netral. *Triplen* harmonisa adalah kelipatan ganjil dari harmonisa ketiga ( $h = 3, 9, 15, 21, 27, \dots$ ). Hal ini penting diperhatikan khususnya pada sistem bintang yang ditanahkan (*grounded wye systems*) karena adanya arus yang mengalir pada kawat netral. Arus pada kawat netral akan menjadi *overload* karena arus antar fasanya tidak saling menghilangkan. Gambar 3 menunjukkan suatu sistem yang seimbang dan diasumsikan komponen fundamental dan komponen harmonisa ketiga hadir dalam sistem tersebut [6].



**Gambar 3** Arus netral pada *grounded wye system* akibat *triplen* harmonisa

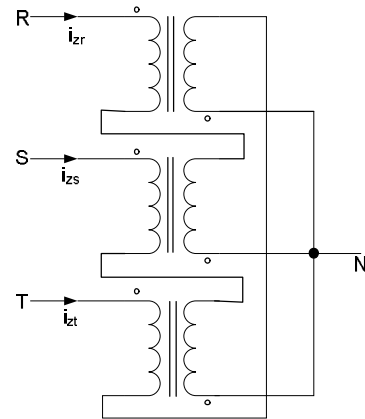
Diharapkan penjumlahan vektor dari ketiga arus fasa R, S, dan T bernilai nol, sehingga tidak ada arus yang mengalir pada konduktor netral. Akan tetapi pada konduktor netral mengalir arus *triplen* harmonisa dari ketiga fasa yang saling menjumlahkan yang besarnya tiga kali dari arus *triplen* pada setiap fasanya.

Arus netral yang besar sebisa mungkin harus dikurangi. Salah satu cara penanganannya yaitu dengan menggunakan *zero passing*. Autotrafo hubungan zig-zag dapat digunakan sebagai *zero passing*. Hubungan autotrafo zig-zag dapat juga

dihasilkan dari menghubungkan belitan tiga buah transformator satu fasa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Arus urutan nol di masing-masing fasanya yaitu ( $i_{r0}(t)$ , ( $i_{s0}(t)$  dan ( $i_{t0}(t)$  mempunyai amplitudo yang sama dan fasa yang sama pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat, dan dapat ditunjukkan sebagai :

$$i_{r0}(t) = i_{s0}(t) = i_{t0}(t) \quad (12)$$



**Gambar 4** Hubungan autotrafo zig-zag

Arus netral merupakan penjumlahan dari arus urutan nol ketiga fasanya, dan ditunjukkan sebagai :

$$i_n(t) = 3 i_{r0}(t) \quad (13)$$

Arus masukan mengalir ke titik ujung dari belitan primer sama dengan arus yang mengalir keluar dari titik ujung belitan sekunder karena belitan autotrafo zig-zag ini mempunyai perbandingan 1 : 1. Sehingga didapatkan bahwa :

$$i_{zr}(t) = i_{zs}(t) \quad (14)$$

$$i_{zs}(t) = i_{zt}(t) \quad (15)$$

$$i_{zt}(t) = i_{zr}(t) \quad (16)$$

dimana :

$i_{r0}$  : arus urutan nol pada fasa R

$i_{s0}$  : arus urutan nol pada fasa S

$i_{t0}$  : arus urutan nol pada fasa T

$i_n$  : arus netral

$i_{zr}$  : arus fasa R pada autotrafo zig-zag

$i_{zs}$  : arus fasa S pada autotrafo zig-zag

$i_{zt}$  : arus fasa T pada autotrafo zig-zag

Dari Persamaan 14, Persamaan 15, dan Persamaan 16 menyatakan bahwa arus tiga fasa yang mengalir ke belitan autotrafo harus seimbang. Sehingga komponen arus urutan nol dari arus beban akan mengalir ke dalam autotrafo zig-zag [1].

### 3. Metodologi Penelitian

Metode yang dilakukan dalam penelitian adalah metode pengukuran arus dan metode simulasi pengukuran arus. Metode pengukuran

arus dilakukan di Laboratorium Distribusi dan Transmisi Teknik Elektro USU untuk mengukur nilai arus pada sistem tiga fasa empat kawat akibat penggunaan beban non linear berupa lampu hemat energi dengan kondisi beban seimbang. Sedangkan metode simulasi pengukuran arus dengan menggunakan program PSIM untuk melihat pengaruh pemasangan autotrafo zig-zag pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat untuk mengurangi arus netral.

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian meminimasi arus netral dengan menggunakan autotrafo zig-zag pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat di Labotarium Distribusi dan Transmisi Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara adalah sebagai berikut :

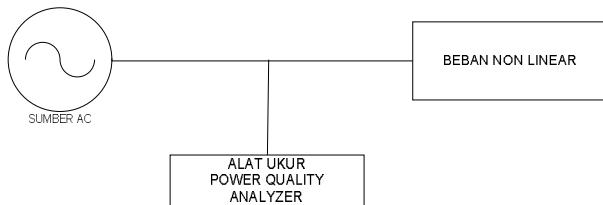
1. Alat ukur *Power Quality Analyzer Fluke 434/435*.
2. Beban non linear berupa lampu hemat energi dengan rincian daya sebagai berikut :
  1. 23 Watt sebanyak 6 buah.
  2. 18 Watt sebanyak 6 buah.
  3. 8 Watt sebanyak 3 buah.
3. Kabel penghubung.
4. MCCB tiga fasa 20 A.

Adapun daftar pembebanannya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1 Data pembebanan pengukuran arus**

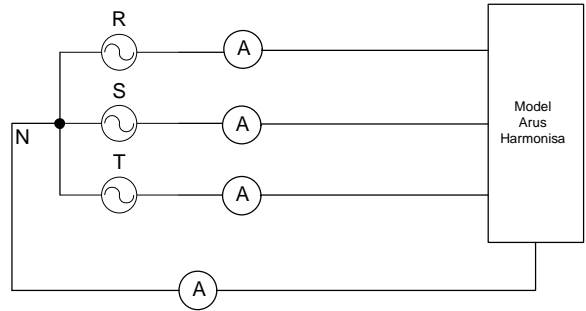
Fasa	Lampu Hemat Energi (watt)					Total (watt)
	LHE1	LHE2	LHE3	LHE4	LHE5	
R	23	23	18	18	8	90
S	23	23	18	18	8	90
T	23	23	18	18	8	90

Blok diagram umum pengukuran arus tanpa menggunakan autotrafo zig-zag ditunjukkan pada Gambar 5.



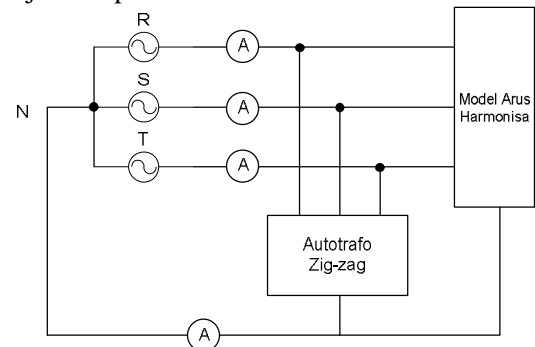
**Gambar 5** Blok diagram umum pengukuran arus sebelum menggunakan autotrafo zig-zag

Hasil pengukuran arus pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat disimulasikan dengan menggunakan program PSIM untuk melihat besar arus hasil simulasi. Adapun blok diagram umum simulasi pengukuran arus sebelum menggunakan autotrafo zig-zag ditunjukkan pada Gambar 6.



**Gambar 6** Blok diagram umum simulasi pengukuran arus sebelum menggunakan autotrafo zig-zag

Hasil simulasi arus netral dikurangi dengan menggunakan autotrafo zig-zag pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat yang disimulasikan dengan program PSIM untuk melihat besar pengurangan arus netral. Adapun blok diagram umum simulasi pengukuran arus setelah menggunakan transformator zig-zag ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7** Blok diagram umum simulasi pengukuran arus setelah menggunakan autotrafo zig-zag

#### 4. Hasil dan Analisis

Pengukuran besar arus pada sistem tiga fasa empat kawat dilakukan pada tanggal 8 Juni 2012 di Laboratorium Distribusi dan Transmisi Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, diperoleh data pengukuran besar arus akibat penggunaan beban non linear berupa lampu hemat energi dengan kondisi seimbang pada sistem tiga fasa empat kawat ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2 Data hasil pengukuran besar arus akibat penggunaan beban non linear yang seimbang**

Beban pada masing-masing fasa (watt)	Orde Harmonisa	Besar Arus (mArms)			
		Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
R = 90 S = 90 T = 90	1	338 $\angle 18^0$	345 $\angle -103^0$	356 $\angle -222^0$	8 $\angle -340^0$

**Tabel 2 (Lanjutan)**

Beban pada masing-masing fasa (watt)	Orde Harmonisa	Besaran Arus (mA <sub>rms</sub> )			
		Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
R = 90 S = 90 T = 90	3	274 ∠ -136°	283 ∠ -133°	284 ∠ -131°	849 ∠ -313°
R = 90 S = 90 T = 90	5	166 ∠ 77°	175 ∠ -157°	180 ∠ -35°	18 ∠ -193°
R = 90 S = 90 T = 90	7	77 ∠ -54°	86 ∠ -173°	85 ∠ -284°	21 ∠ -16°
R = 90 S = 90 T = 90	9	48 ∠ -149°	49 ∠ -148°	51 ∠ -136°	148 ∠ -323°
R = 90 S = 90 T = 90	11	46 ∠ 90°	44 ∠ -140°	55 ∠ -11°	19 ∠ -150°
R = 90 S = 90 T = 90	13	31 ∠ -45°	32 ∠ -156°	42 ∠ -266°	11 ∠ -20°
R = 90 S = 90 T = 90	15	16 ∠ -156°	16 ∠ -144°	23 ∠ -152°	54 ∠ -328°
R = 90 S = 90 T = 90	17	15 ∠ 103°	15 ∠ -111°	16 ∠ -3°	6 ∠ -186°

Dari data hasil pengukuran arus pada penggunaan beban non linear yang seimbang seperti pada Tabel 1 terlihat bahwa arus netral yang terjadi diakibatkan oleh harmonisa orde ke-3, ke-9 dan ke-15 (harmonisa kelipatan tiga/ *triplen harmonic*), dan bahkan arus netralnya melebihi besar arus di masing-masing fasanya sebesar tiga kali dari arus fasanya.

Adapun hasil simulasi pengukuran arus sebelum menggunakan autotrafo zig-zag ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3 Hasil simulasi pengukuran arus sebelum menggunakan autotrafo zig-zag**

Orde Harmonisa	Arus (A <sub>peak</sub> )			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
1	0,477999	0,487999	0,502999	0,030277
3	0,386996	0,399997	0,400996	1,187233
5	0,233994	0,246995	0,254994	0,037212
7	0,107995	0,121996	0,119994	0,031908
9	0,067995	0,068996	0,072994	0,208849
11	0,064992	0,062994	0,076991	0,029028
13	0,043993	0,045994	0,059991	0,018122
15	0,022995	0,022996	0,032993	0,078721
17	0,020994	0,020995	0,022994	0,010720

Dari hasil simulasi pengukuran arus sebelum menggunakan autotrafo zig-zag terlihat bahwa arus netral yang terjadi diakibatkan oleh harmonisa kelipatan tiga orde ke-3, ke-9 dan ke-15 dimana arus netralnya melebihi besar arus fasanya bahkan mencapai tiga kali arus fasanya dan terlihat juga bahwa bertambahnya orde harmonisa maka besar harmonisa kelipatan tiga pada arus netralnya semakin kecil.

Sedangkan hasil simulasi pengukuran arus setelah menggunakan autotrafo zig-zag ditunjukkan pada Tabel 4.

**Tabel 4 Hasil simulasi pengukuran arus setelah menggunakan autotrafo zig-zag**

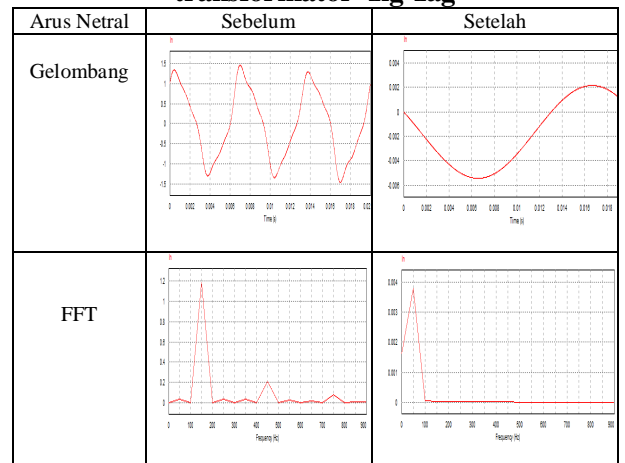
Orde Harmonisa	Arus (A <sub>peak</sub> )			
	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
1	0,487155	0,489098	0,492601	0,003809
3	0,020393	0,004738	0,016849	0,000030
5	0,236546	0,255704	0,242862	0,000018
7	0,117527	0,113264	0,118168	0,000013
9	0,006032	0,004684	0,010691	0,000010
11	0,062390	0,072148	0,068857	0,000008
13	0,049931	0,043059	0,056508	0,000007
15	0,003928	0,004373	0,006776	0,000006
17	0,022181	0,022422	0,019423	0,000005

Dari hasil simulasi pengukuran arus setelah menggunakan autotrafo zig-zag terlihat bahwa terjadi pengurangan arus netral yang signifikan hingga mencapai keadaan idealnya (0 A).

Adapun perbandingan hasil simulasi gelombang dan FFT arus netral sebelum menggunakan autotrafo zig-zag dengan hasil simulasi gelombang dan FFT arus netral setelah menggunakan autotrafo zig-zag ditunjukkan pada Tabel 5.

Dari Tabel 5 terlihat bahwa setelah pemasangan autotrafo zig-zag pada sistem tiga fasa empat kawat bentuk gelombang arus netral berubah menjadi lebih sinusoidal dan pada FFT-nya terlihat bahwa terjadi penurunan arus netral yang signifikan yaitu dari 1,187233 A menjadi 0,000030 A pada harmonisa kelipatan tiga orde ke-3.

**Tabel 5 Hasil simulasi gelombang dan FFT arus netral sebelum dengan setelah menggunakan transformator zig-zag**



Sedangkan hasil simulasi data arus netral di program PSIM, sebelum menggunakan autotrafo zig-zag dan setelah menggunakan autotrafo zig-zag ditunjukkan pada Tabel 6.

**Tabel 6 Data hasil simulasi arus netral sebelum menggunakan autotrafo zig- zag dan setelah menggunakan autotrafo zig-zag**

Orde Harmonisa	Besar Arus Netral (A)	
	Sebelum Menggunakan Autotrafo Zig-zag	Setelah Menggunakan Autotrafo Zig-zag
1	0,030277	0,003809
3	1,187233	0,000030
5	0,037212	0,000018
7	0,031908	0,000013
9	0,208849	0,000010
11	0,029028	0,000008
13	0,018122	0,000007
15	0,078721	0,000006
17	0,010720	0,000005
<b>Total Arus Netral</b>	<b>1,209934</b>	<b>0,003809</b>

Total arus netral diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan Persamaan 17 yaitu :

$$I_N = \sqrt{\sum_{h=1}^{17} (I_h)^2} \quad (17)$$

dimana :

h merupakan orde harmonisa ganjil kelipatan tiga

Dari Tabel 6 terlihat bahwa arus netral yang mengalir di kawat netral didominasi oleh arus harmonisa orde ke-3, ke-9 dan ke-15 (*triplen harmonic*) dimana besarnya lebih signifikan dibandingkan arus harmonisa orde lainnya. Untuk itu, arus netral yang besar harus kurangi agar tidak terjadi panas yang berlebihan di kawat netral.

Adapun besar pengurangan arus netral setelah penggunaan autotrafo zig-zag sebesar :

$$\% \text{ Pengurangan arus netral} = \frac{I_n - I_n'}{I_n} \times 100 \% \quad (18)$$

dimana :

$I_n$  = arus netral sebelum minimisasi

$I_n'$  = arus netral setelah minimisasi

Maka besar pengurangan arus netralnya setelah pemasangan autotrafo zig-zag pada sistem tiga fasa empat kawat adalah :

$$\% \text{ Pengurangan arus netral} =$$

$$= \frac{1,209934 - 0,003809}{1,209934} \times 100 \%$$

$$= \frac{1,206125}{1,209934} \times 100 \%$$

$$= 99,68 \%$$

Dari hasil perhitungan, terlihat bahwa autotrafo zig-zag sangat cocok digunakan untuk meminimisasi arus netral karena pengurangan arus netralnya sangat besar dan signifikan.

## 5. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Meskipun lampu hemat energi dalam kondisi beban yang seimbang akan tetap menghasilkan arus netral yang besar

bahkan besarnya tiga kali dari arus fasanya.

2. Dengan bertambahnya orde harmonisa maka besar harmonisa kelipatan tiga pada arus netralnya semakin kecil.
3. Autotrafo zig-zag dapat meminimisasi arus netral dengan pengurangan sebesar 99,68 % sehingga autotrafo zig-zag sangat efektif untuk meminimisasi arus netral.

## 6. Daftar Pustaka

- [1] S.Ranjith Kumar, S.Surendhar, Ashish Negi and P.Raja. *Zig Zag Transformer performance analysis on harmonic reduction in distribution load*. International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering Pahang, Malaysia, June 21-22, 2011.
- [2] Hurng-Liahng Jou, Member, IEEE, Kuen-Der Wu, Jinn-Chang Wu, and Wen-Jung Chiang. *A Three-Phase Four-Wire Power Filter Comprising a Three-Phase Three-Wire Active Power Filter and a Zig-Zag Transformer*. IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 23, No. 1, January 2008.
- [3] P.Stojanovic, Dobrivoje et al. *Measurement and Analysis of Neutral Conductor Current in Low Voltage Distribution Network*. IEEE 2009.
- [4] J. Desmet et al. *Analysis of the neutral conductor current in a three phase supplied network with non-linear single phase loads*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003.
- [5] Desmit, Jan & Baggini, Angelo. *Neutral Sizing in Harmonic Rich Installations*. Università di Bergamo, June 2003.
- [6] Dugan, Roger C. dkk. 2004. *Electric Power System Quality*. Edisi Kedua. McGraw-Hill.