

PENGURANGAN ARUS NETRAL PADA SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA EMPAT KAWAT MENGGUNAKAN TRANSFORMATOR WYE-DELTA

Doni Rivi Hermando, Zulkarnaen Pane
Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA
e-mail: doni_rivi@hotmail.com

Abstrak

Pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat yang seimbang, idealnya arus pada penghantar netral bernilai nol. Namun pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat yang melayani beban nonlinear, arus harmonisa urutan nol akan mengalir pada penghantar netral. Hal ini terjadi pada kondisi beban nonlinear yang seimbang maupun tidak seimbang. Untuk mengurangi arus harmonisa urutan nol yang mengalir pada penghantar netral, maka digunakan transformator wye-delta. Transformator wye-delta dirancang sebagai transformator *zero-passing* yang memiliki impedansi urutan nol yang kecil sehingga arus harmonisa urutan nol yang berasal dari beban akan mengalir melalui transformator wye-delta kembali ke beban. Transformator wye-delta yang digunakan terdiri dari satu unit transformator tiga fasa dan untuk mendapatkan impedansi urutan nol yang kecil digunakan jenis belitan *bifilar*. Agar kinerja transformator wye-delta dalam mengurangi arus pada penghantar netral dapat diketahui, maka dilakukan eksperimen di laboratorium dan perhitungan secara matematis. Dari hasil eksperimen diperoleh bahwa transformator wye-delta menunjukkan kinerja yang stabil dalam mengurangi arus rms yang mengalir pada penghantar netral yaitu dengan persentase pengurangan sebesar 40,4% saat kondisi daya beban seimbang dan 40,2% saat kondisi daya beban tidak seimbang. Perhitungan secara matematis untuk kondisi daya beban seimbang menunjukkan persentase pengurangan arus netral yang hampir sama dengan hasil eksperimen yaitu sebesar 40,1%.

Kata kunci: arus netral, transformator wye-delta

1. Pendahuluan

Pada beban linear yang seimbang, di mana besarnya arus pada setiap fasa dari fasa R, S, dan T adalah sama, arus tidak akan mengalir di penghantar netral [1-2]. Tetapi untuk beban-beban yang bersifat nonlinear, arus pada penghantar netral tetap mengalir walaupun sistem berada dalam kondisi yang seimbang [2].

Besarnya arus pada penghantar netral dapat lebih besar dari arus yang mengalir pada penghantar fasa. Hal ini dapat mengakibatkan masalah yang serius, diantaranya:

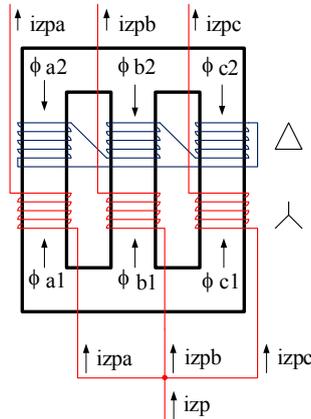
- Pemanasan yang berlebihan dan terus-menerus pada penghantar netral [3].
- Kerusakan isolasi pada transformator distribusi yang disebabkan oleh pemanasan yang berlebih akibat adanya arus harmonisa [3-5].

- Tegangan netral ke tanah (ground) yang berlebihan. Di mana hal ini dapat menyebabkan kegagalan kerja pada komponen-komponen elektronika yang sensitif [3-5].

2. Transformator Wye-Delta

Pada penelitian ini, transformator wye-delta yang digunakan terdiri dari satu unit transformator tiga fasa yang dirancang menjadi transformator *zero-passing*. Transformator *zero-passing* adalah transformator yang berfungsi melewatkan arus harmonisa urutan nol dan menahan arus harmonisa urutan positif dan negatif. Hal ini dapat terjadi karena transformator *zero-passing* memiliki impedansi urutan nol yang rendah dan impedansi urutan positif serta negatif yang tinggi. Agar memiliki

impedansi urutan nol yang kecil, transformator wye-delta dibentuk dengan jenis belitan *bifilar*. Rangkaian transformator wye-delta dan penggunaannya pada jaringan diperlihatkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1 Rangkaian Transformator Wye-Delta yang Dibentuk dari Satu Unit Transformator 3 Fasa

Gambar 2 Penggunaan Transformator Wye-Delta Sebagai *Zero-Passing* Pada Jaringan

Tegangan pada masing-masing kumparan wye adalah:

$$V_{an1} = V_{bn1} = V_{cn1} = V_{n1} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

dan tegangan pada masing-masing kumparan delta adalah:

$$V_{an2} = V_{bn2} = V_{cn2} = V_{n2} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Dengan asumsi bahwa arus netral yang mengalir dari beban (sumber harmonisa) mengalir seluruhnya menuju transformator wye-delta ($i_{zp}=i_{Ln}$), maka arus maksimum yang dapat mengalir pada masing-masing belitan wye adalah:

$$i_{zpa} = i_{zpb} = i_{zpc} = \frac{I_{Ln}}{3} \quad (3)$$

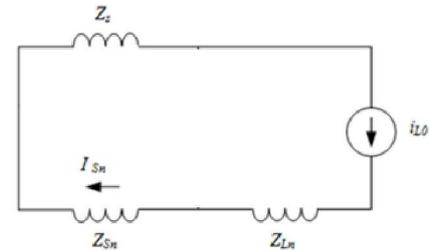
dan arus maksimum yang dapat bersirkulasi pada belitan delta transformator adalah:

$$i_{an2} = i_{bn2} = i_{cn2} = i_{n2} = \frac{I_{Ln}}{3} \quad (4)$$

Dengan demikian, rating daya transformator *zero-passing* wye-delta dapat ditentukan sebagai berikut:

$$S = 3 \left(\frac{V_L I_{Ln}}{3\sqrt{3}} \right) = \left(\frac{V_L I_{Ln}}{\sqrt{3}} \right) [VA] \quad (5)$$

Gambar 3 menunjukkan rangkaian ekivalen urutan nol per fasa dari suatu sistem tiga fasa empat kawat sebelum penggunaan transformator wye-delta dengan menganggap sumber harmonisa hanya berasal dari sisi beban (sumber tegangan urutan nol dihubungkan-singkat)



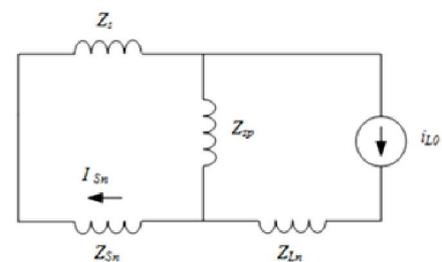
Gambar 3 Rangkaian Ekivalen Urutan Nol Tanpa Transformator Wye-Delta

i_{L0} adalah sumber arus urutan nol, i_{Sn} adalah arus urutan nol menuju sumber, Z_{Ln} dan Z_{Sn} adalah impedansi urutan nol antara sumber arus urutan nol dengan sumber tegangan urutan nol, serta Z_s adalah impedansi urutan nol sumber.

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa besarnya arus urutan nol yang menuju ke sumber tegangan (i_{Sn}) adalah sama dengan arus urutan nol yang dihasilkan oleh beban (i_{L0}). Yaitu:

$$i_{Sn} = i_{L0} \quad (6)$$

Gambar 4 memperlihatkan rangkaian ekivalen urutan nol sistem setelah penggunaan transformator wye-delta.



Gambar 4 Rangkaian Ekivalen Urutan Nol Setelah Penggunaan Transformator Wye-Delta

Karena impedansi urutan nol pada transformator wye-delta (Z_{zp}) lebih kecil dibandingkan dengan impedansi antara transformator wye-delta dengan sumber tegangan urutan nol (Z_{Sn}) dan impedansi urutan nol sumber (Z_s), maka sebagian arus harmonisa urutan nol yang dihasilkan oleh beban (i_{L0}) akan

mengalir melalui transformator wye-delta kembali ke beban. Sehingga arus harmonisa urutan nol yang mengalir menuju sumber (i_{Sn}) menjadi lebih kecil.

Besar arus i_{Sn} pada Gambar 4 dapat diperoleh sebagai berikut:

$$i_{Sn} = \frac{Z_{zp}}{Z_s + Z_{Sn} + Z_{zp}} i_{L0} \quad (7)$$

Terlihat pada Persamaan (7) bahwa semakin rendah nilai impedansi transformator wye-delta (Z_{zp}) atau semakin tinggi nilai Z_{Sn} maka nilai arus urutan nol yang menuju sumber (i_{Sn}) akan semakin rendah.

3. Metode Penelitian

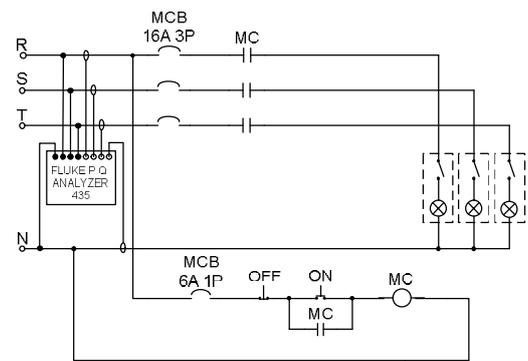
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Transmisi dan Distribusi, Departemen Teknik Elektro, Universitas Sumatera Utara.

Adapun Bahan dan peralatan yang digunakan adalah:

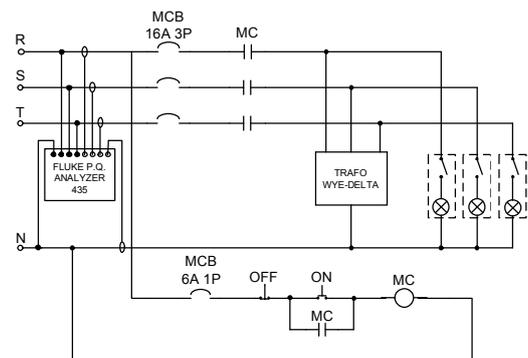
1. Satu unit transformator 3 fasa. Dengan spesifikasi:
 - Tegangan setiap kumparan: 220V
 - Kapasitas: 1000VA
 - Perbandingan belitan: 1:1
 - Jenis belitan kumparan: *bifilar*
2. Sembilan buah lampu hemat energi 18W/220V
3. Dua puluh satu buah lampu hemat energi 23W/220V
4. Satu unit alat ukur Three Phase Power Quality Analyzer merk FLUKE model 435.
5. Satu set peralatan instalasi rangkaian eksperimen. Antara lain adalah: MCB 3P 16A, MCB 1P 6A, magnetic contactor 9A, kabel kontrol, push-button switch, terminal block, dan sakelar.
6. Lima belas meter kabel NYMHY 4 x 2,5 mm²

Gambar rangkaian eksperimen yang dilakukan, seperti yang terlihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Sedangkan transformator wye-delta yang digunakan pada eksperimen diperlihatkan pada Gambar 7.

Untuk daya beban seimbang, pada setiap fasa terdapat lampu hemat energi dengan daya 215W per fasa.



Gambar 5 Rangkaian Eksperimen Sebelum Menggunakan Transformator Wye-Delta



Gambar 6 Rangkaian Eksperimen Setelah Menggunakan Transformator Wye-Delta

Sedangkan untuk daya beban yang tidak seimbang, pada setiap fasa terdapat lampu hemat energi dengan susunan: fasa R=151W, fasa S=215W, dan fasa T=279W.



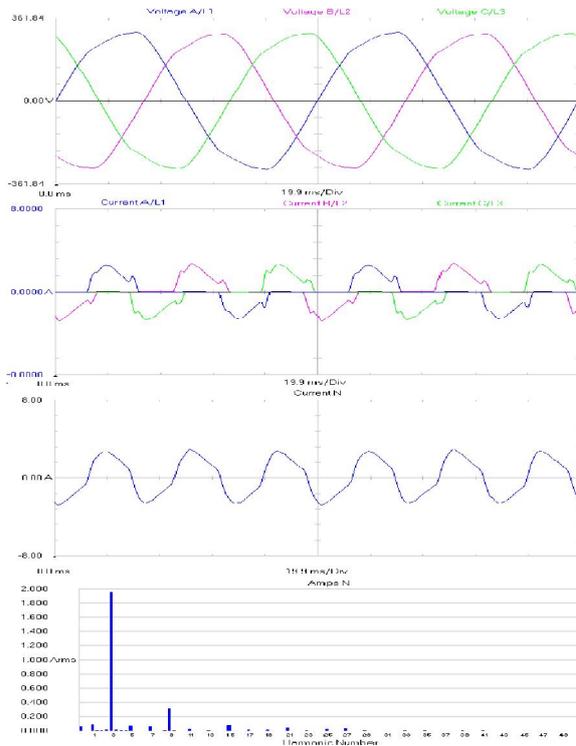
Gambar 7 Transformator Wye-Delta yang Digunakan Pada Eksperimen

4. Hasil dan Analisis

Hasil eksperimen sebelum penggunaan transformator wye-delta pada kondisi beban yang seimbang ditampilkan pada Tabel 1 dan Gambar 8. Sedangkan untuk beban yang tidak seimbang ditampilkan pada Tabel 2 dan Gambar 9.

Tabel 1 Hasil Pengukuran Sebelum Penggunaan Transformator Wye-Delta Pada Kondisi Beban Seimbang

Besaran	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
Frekuensi (Hz)	50,118			
Tegangan (V)	214,36	211,77	212,12	0,59
Arus rms (A)	1,154	1,170	1,173	1,932
THD arus (%)	75,8	74,4	74,4	2194,2
Cos φ (DPF)	0,96	0,94	0,95	-
Power Factor	0,74	0,72	0,73	-



Gambar 8 Tegangan Fasa, Arus Fasa, Arus Netral, dan Spektrum Harmonisa Arus Netral Sebelum Penggunaan Transformator Wye-Delta Pada Kondisi Beban Seimbang

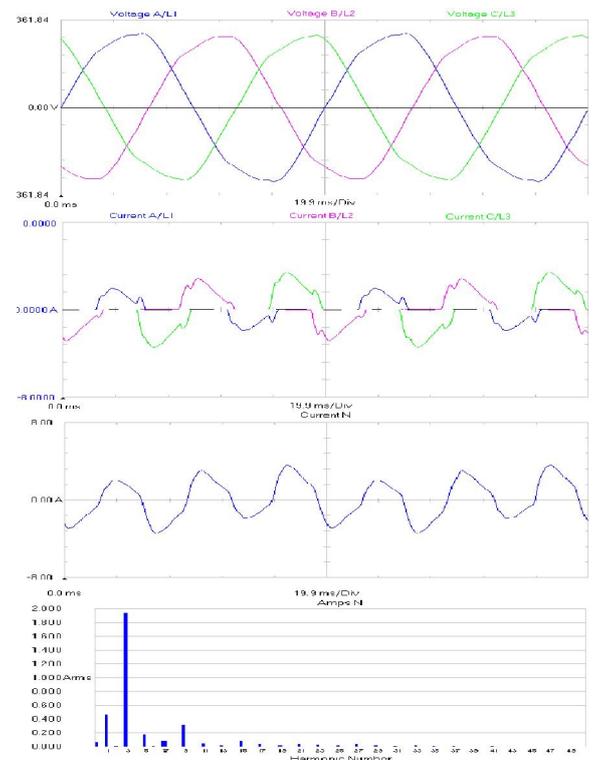
Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa arus yang mengalir pada penghantar netral cukup besar nilainya yaitu sekitar 166% dari rata-rata arus yang mengalir pada penghantar fasa. Pada spektrum harmonisa arus netral di Gambar 8 terlihat bahwa arus yang mengalir pada penghantar netral hanya didominasi oleh komponen arus harmonisa triplen sedangkan komponen arus harmonisa urutan positif dan negatif sangat kecil.

Tabel 2 Hasil Pengukuran Sebelum Penggunaan Transformator Wye-Delta Pada Kondisi Beban Tidak Seimbang

Besaran	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
Frekuensi (Hz)	50,158			
Tegangan (V)	220,48	214,37	213,77	0,63

Besaran	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
Arus rms (A)	0,829	1,208	1,547	2,047
THD arus (%)	80,8	76,4	74,1	432,0
Cos φ (DPF)	0,97	0,93	0,95	-
Power Factor	0,73	0,71	0,73	-

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa untuk eksperimen dengan beban yang tidak seimbang, arus pada penghantar netral mengalami kenaikan menjadi 2,047A. THD arus pada penghantar netral mengalami penurunan yaitu menjadi 432%.



Gambar 9 Tegangan Fasa, Arus Fasa, Arus Netral, dan Spektrum Harmonisa Arus Netral Sebelum Penggunaan Transformator Wye-Delta Pada Kondisi Beban Tidak Seimbang

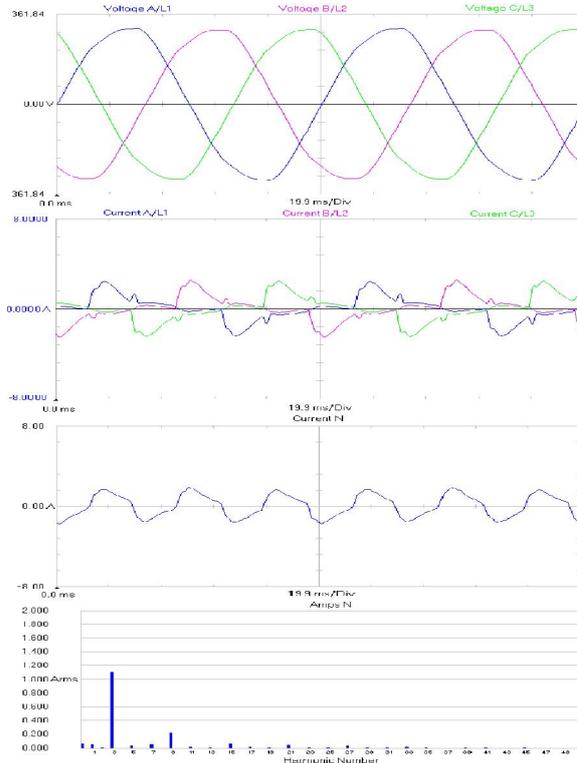
Penurunan THD arus penghantar netral pada eksperimen sebelum penggunaan transformator wye-delta dengan beban tidak seimbang dapat terjadi karena pada penghantar netral juga terdapat komponen arus fundamental yang cukup besar, seperti yang terlihat pada spektrum harmonisa arus netral di Gambar 9.

Hasil eksperimen setelah penggunaan transformator wye-delta pada kondisi beban yang seimbang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 10. Sedangkan untuk beban yang tidak seimbang ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 11.

Tabel 3 Hasil Pengukuran Setelah Penggunaan Transformator Wye-Delta Pada Kondisi Beban Seimbang

Besaran	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
Frekuensi (Hz)	50,255			
Tegangan (V)	220,09	217,63	217,79	0,36
Arus rms (A)	1,082	1,074	1,099	1,152
THD arus (%)	57,9	59,9	56,3	2117,4
Cos φ (DPF)	0,98	0,96	0,97	-
Power Factor	0,84	0,81	0,83	-

Dari Tabel 3 dapat terlihat bahwa terjadi penurunan arus pada penghantar fasa dan penghantar netral. Arus pada penghantar fasa yang semula masing-masing bernilai 1,154A, 1,170A, dan 1,173A turun menjadi 1,082A, 1,074A, dan 1,099A. Penggunaan transformator wye-delta menyebabkan arus pada penghantar netral juga berkurang sebesar 40,4% yaitu dari sebelumnya 1,932A menjadi 1,152A.



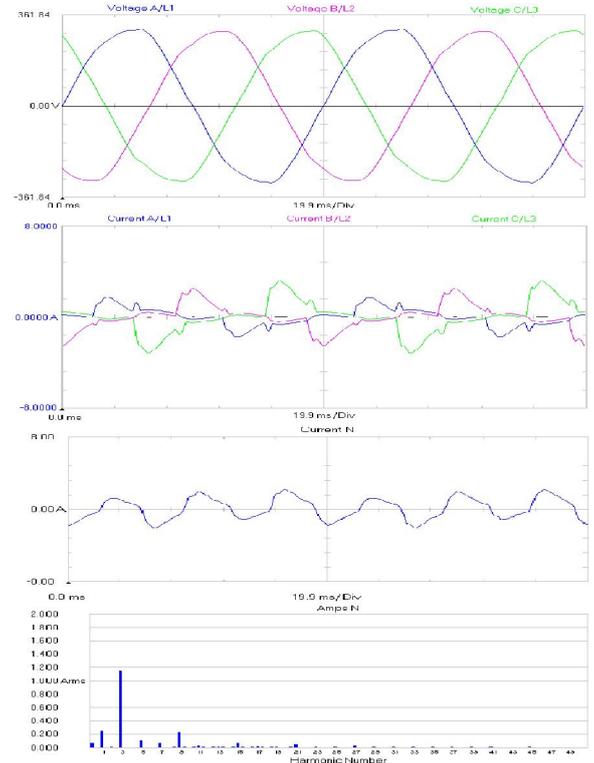
Gambar 10 Tegangan Fasa, Arus Fasa, Arus Netral, dan Spektrum Harmonisa Arus Netral Setelah Penggunaan Transformator Wye-Delta Pada Kondisi Beban Seimbang

Bila dibandingkan dengan Gambar 8, tampak pada Gambar 10 bahwa komponen arus harmonisa triplen telah berkurang akibat penggunaan transformator wye-delta.

Tabel 4 Hasil Pengukuran Setelah Penggunaan Transformator Wye-Delta Pada Kondisi Beban Tidak Seimbang

Besaran	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
Frekuensi (Hz)	50,135			
Tegangan (V)	218,65	213,95	213,58	0,39
Arus rms (A)	0,819	1,096	1,414	1,224
THD arus (%)	49,2	58,7	61,9	482,6
Cos φ (DPF)	1,00	0,93	0,97	-
Power Factor	0,88	0,79	0,81	-

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa dengan penggunaan transformator wye-delta pada kondisi beban yang tidak seimbang juga dapat mengurangi besar arus yang mengalir pada penghantar netral. Besar arus netral sebelum penggunaan transformator wye-delta adalah sebesar 2,047A sedangkan setelah penggunaan transformator wye-delta turun menjadi 1,224A. Persentase penurunan ini adalah sebesar 40,2%.



Gambar 11 Tegangan Fasa, Arus Fasa, Arus Netral, dan Spektrum Harmonisa Arus Netral Setelah Penggunaan Transformator Wye-Delta Pada Kondisi Beban Tidak Seimbang

Bila dibandingkan dengan Gambar 9, tampak pada Gambar 11 bahwa telah terjadi penurunan nilai komponen arus harmonisa triplen dan fundamental akibat penggunaan transformator wye-delta.

Untuk melengkapi metode eksperimen dan sebagai validasi terhadap rumus yang tersedia untuk mengetahui besarnya pengurangan arus netral, maka dilakukan perhitungan secara matematis.

Pada Gambar 3, besar arus harmonisa urutan nol yang mengalir menuju sumber tegangan (i_{sn}) sebelum penggunaan transformator wye-delta dapat diperoleh dengan persamaan:

$$I_{sn} = \sqrt{\sum_{h=3}^{21} (I_h)^2} \quad (9)$$

Di mana h adalah harmonisa orde ganjil kelipatan 3 (triplen) yang terdapat pada spektrum harmonisa arus netral Gambar 8.

Tabel 6 Besar Arus Untuk Setiap Harmonisa Orde Ganjil Kelipatan 3 Pada Penghantar Netral

Orde Harmonisa	Arus (A)
3	1,960 \angle -126°
9	0,313 \angle -91°
15	0,079 \angle 7°
21	0,044 \angle -251°
27	0,029 \angle -162°

Dengan memasukkan nilai arus dari setiap orde harmonisa pada Tabel 6 ke Persamaan (9), maka besar arus i_{sn} dapat diperoleh melalui perhitungan sebagai berikut.

$$I_{sn} = \sqrt{(I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + I_{21}^2 + I_{27}^2)}$$

$$I_{sn} = 1,968 \angle 54,64^\circ \text{ A}$$

Besarnya arus i_{sn} setelah penggunaan transformator wye-delta dapat diperoleh dengan menggunakan rangkaian ekivalen urutan nol pada Gambar 4 dan Persamaan (7). Parameter rangkaian ekivalen urutan nol pada Gambar 4 terlihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Parameter Rangkaian Ekivalen Urutan Nol

Parameter	Nilai
$Z_s (\Omega)$	0,46+j0,01 (asumsi)
$Z_{sn} (\Omega)$	0,46+j0,01 (asumsi)
$Z_{zp} (\Omega)$	j0,7
$Z_{Ln} (\Omega)$	0,46+j0,01 (asumsi)
$i_{L0} (A)$	1,968 \angle 54,64°

Besar arus i_{sn} setelah penggunaan transformator wye-delta adalah sebagai berikut:

$$i_{sn} = \frac{Z_{zp}}{Z_s + Z_{sn} + Z_{zp}} i_{L0}$$

$$i_{sn} = 1,179 \angle -73,41^\circ \text{ A}$$

Sehingga diperoleh persentase pengurangan arus pada penghantar netral melalui hasil perhitungan adalah sebesar 40,1%.

5. Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Transformator wye-delta menunjukkan kinerja yang stabil dalam mengurangi arus rms yang mengalir pada penghantar netral yaitu dengan persentase pengurangan sebesar 40,4% saat kondisi beban seimbang dan 40,2% saat kondisi beban tidak seimbang.
2. Persentase pengurangan arus netral melalui hasil eksperimen adalah sebesar 40,4% dan melalui hasil perhitungan adalah sebesar 40,1%.

6. Daftar Pustaka

- [1] Lowenstein, M.Z., "Eliminating Harmonic Neutral Current Problems," *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES*, pp.1-4, 21-24 April 2008.
- [2] Desmet, J.; Baggini, A., "Neutral Sizing in Harmonic Rich Installations," *Copper Development Association & European Copper Institute*, June 2003.
- [3] Negi, A.; Surendhar, S.; Kumar, S.R.; Raja, P., "Assessment and Comparison of Different Neutral Current Compensation Techniques in Three-Phase Four-Wire Distribution System," *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2012 3rd IEEE International Symposium on*, pp.423-430, 25-28 June 2012.
- [4] Singh, B.; Jayaprakash, P.; Kothari, D.P., "Magnetics for Neutral Current Compensation in Three-Phase Four-Wire Distribution System," *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on*, pp.1-7, 20-23 Dec. 2010.
- [5] Hadzer, C.M.; Masri, S.; Mahamad, N., "A Study on Zero-Passing Transformer in Harmonics Reduction," *Power Engineering Conference, 2003. PECon 2003. Proceedings. National*, pp.180-184, 15-16 Dec. 2003.