

PENGURANGAN ARUS NETRAL PADA SISTEM DISTRIBUSI TIGA FASA EMPAT KAWAT MENGGUNAKAN ZERO SEQUENCE BLOCKING TRANSFORMER

T. Fakhru Hadi, Zulkarnaen Pane

Konsentrasi Teknik Energi Listrik, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA
e-mail: t.fakhrulhadi@yahoo.co.id

Abstrak

Pada jaringan distribusi tiga fasa empat kawat, idealnya arus yang mengalir pada penghantar netral sama dengan nol. Akan tetapi apabila jaringan distribusi tiga fasa empat kawat melayani beban nonlinear dan atau beban tidak seimbang maka pada penghantar netral akan mengalir arus. Beban nonlinear ini membangkitkan arus harmonisa urutan nol. Arus yang mengalir pada penghantar netral didominasi oleh arus harmonisa urutan nol. Zero sequence blocking transformer memiliki impedansi yang besar terhadap arus harmonisa urutan nol dan impedansi yang rendah terhadap arus harmonisa urutan positif dan negatif. Sehingga pemasangannya pada sisi sumber pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat yang melayani beban-beban nonlinear satu fasa dapat menahan arus harmonisa urutan nol dan melalukan arus urutan positif dan negatif. Pada tulisan ini digunakan dua jenis zero sequence blocking transformer terdiri dari tiga transformator satu fasa dengan perbandingan belitan 1:1. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pada beban seimbang dan beban variasi penurunan arus penghantar netral saat penggunaan zero sequence blocking transformer dengan jenis belitan konvensional dan bifilar mendekati 93%, dan penurunan tertinggi terjadi saat presentase beban 100%.

Kata kunci: harmonisa, zero sequence blocking transformer

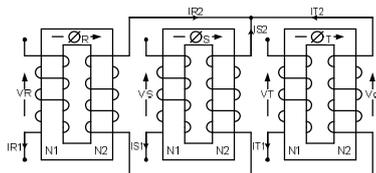
1. Pendahuluan

Sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa empat kawat umumnya digunakan untuk mendistribusikan energi listrik ke pusat-pusat beban listrik tegangan rendah, seperti perkantoran, perumahan dan industri. Beban yang terhubung pada sistem ini lebih didominasi oleh beban-beban nonlinear berupa peralatan listrik elektronik satu fasa, seperti komputer, printer, lampu hemat energi, UPS, dan lain-lain. Beban-beban nonlinear satu fasa ini membangkitkan arus harmonisa urutan nol, secara kumulatif mengalir melalui penghantar netral sistem. Dengan demikian, apabila arus jala-jala sistem mempunyai kandungan arus harmonisa urutan nol yang tinggi, maka arus netral sistem akan menjadi sangat berlebihan. Masalah lain yang timbul akibat harmonisa adalah peralatan listrik akan rusak, terjadi overheating pada penghantar, dan lain-lain. Untuk mengurangi kerusakan peralatan-peralatan listrik yang diakibatkan harmonisa,

maka hal yang harus di lakukan adalah mengurangi atau memfilter harmonisa tersebut [1], [2].

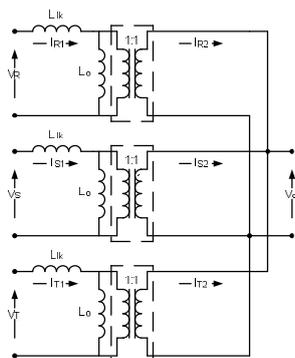
2. Zero Sequence Blocking Transformer

Pada penelitian ini, zero sequence blocking transformer (ZSBT) yang digunakan dibentuk dari tiga buah transformator satu fasa dengan perbandingan belitan 1:1 yang diperlihatkan pada Gambar 1. Suatu ZBST haruslah mempunyai impedansi yang besar terhadap arus harmonisa urutan nol dan impedansi yang rendah terhadap arus urutan lainnya. Dalam proses pengurangan harmonisa arus di jala-jala sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa empat kawat, ZSBT berfungsi sebagai panahan arus urutan nol dan pelalu arus urutan lainnya [2], [3].



Gambar 1 ZSBT Menggunakan Tiga Buah Transformator Satu Fasa [3]

Pada Gambar 1, N_1 adalah belitan pada sisi primer dan N_2 adalah belitan pada sisi sekunder. Pada sisi primer transformator terhubung seri dengan sumber dan beban dan pada sekunder transformator terhubung paralel.



Gambar 2 Rangkaian Ekuivalen Dari ZSBT [3]

Rangkaian ekuivalen dari ZSBT ditunjukkan pada Gambar 2 yang merupakan rangkaian listrik untuk transformator satu fasa. L_{lk} adalah induktansi bocor dan L_o adalah induktansi magnetisasi dari setiap transformator satu fasa. Untuk memudahkan analisis, semua resistansi telah diabaikan dan telah dianggap bahwa rasio untuk setiap transformator satu fasa adalah 1:1 ($N_1=N_2$).

Pada sisi sekunder dari transformator terhubung paralel, maka jumlah arus pada setiap sisi sekunder transformator adalah nol.

$$i_{R2} + i_{S2} + i_{T2} = 0 \tag{1}$$

Tegangan pada sisi sekunder transformator v_0 dapat dinyatakan:

$$v_0 = L_o \frac{d}{dt} (i_{R1} - i_{R2}) \tag{2}$$

$$= L_o \frac{d}{dt} (i_{S1} - i_{S2}) = L_o \frac{d}{dt} (i_{T1} - i_{T2})$$

Dari Persamaan (1) dan (2), diperoleh tegangan v_0 :

$$v_0 = \frac{L_o}{3} \frac{d}{dt} (i_{R1} + i_{S1} + i_{T1}) \tag{3}$$

dimana L_o adalah induktansi magnetisasi dari transformator satu fasa :

$$L_o = \frac{N^2}{R} \tag{4}$$

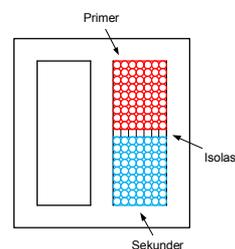
Dengan N dan R menjadi jumlah gulungan atau belitan dan reluktansi dari transformator satu fasa.

Tegangan pada sisi primer dari fasa a dapat dinyatakan:

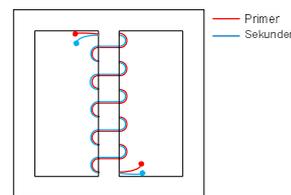
$$v_R = L_{lk} \cdot \frac{d}{dt} (i_{R1}) + \frac{L_o}{3} \cdot \frac{d}{dt} (i_{R1} + i_{S1} + i_{T1}) \tag{5}$$

Impedansi dari ZSBT dapat diturunkan dengan menggabungkan persamaan $i_{ZB} = \frac{(i_R+i_S+i_T)}{3} = i_{RZB} = i_{SZB} = i_{TZB}$ dengan Persamaan (5) dan mengabaikan induktansi bocor, impedansi yang dihasilkan oleh ZSBT terhadap arus urutan nol adalah impedansi magnetisasi dari transformator satu fasa ($Z_{ZB} = (L_{lk} + L_o)\omega \approx L_o\omega$). Untuk komponen urutan positif dan negatif, dapat diturunkan bahwa impedansi yang ada adalah impedansi bocor ($Z_{diff} = L_{lk} \omega$) [3].

Pada penelitian ini digunakan 2 buah ZSBT dengan jenis belitan konvensional dan bifilar. Perbandingan belitan setiap transformator 1:1. Belitan konvensional adalah kawat berisolasi yang dililit pada suatu inti. Kawat primer terlebih dahulu dililitkan setelah itu kawat sekunder dililitkan. Gambar 3 menunjukkan transformator yang dililit secara konvensional. Belitan bifilar adalah sepasang kawat berisolasi yang saling berdekatan satu sama lain dan dililit pada suatu inti yang sama. Satu kawat sebagai lilitan primer sedangkan kawat yang lain sebagai lilitan sekunder. Gambar 4 menunjukkan transformator yang dililit secara bifilar [4].

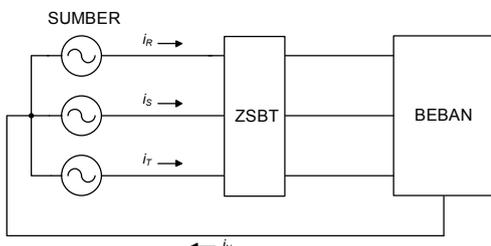


Gambar 3 Transformator Dengan Belitan Konvensional

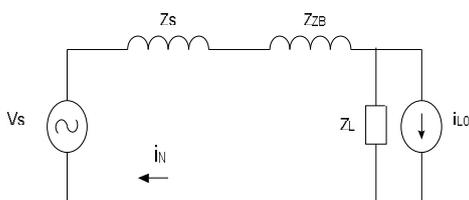


Gambar 4 Transformator Dengan Belitan Bifilar [4]

Gambar 5 menunjukkan rangkaian pengurangan arus harmonisa urutan nol menggunakan ZSBT. Untuk Penyederhanaan analisa pengurangan arus harmonisa di jala-jala sistem maka digunakan rangkaian ekivalan urutan nol per fasa dari rangkaian pengurangan arus harmonisa Gambar 5. Gambar 6 merupakan rangkaian ekivalen urutan nol per fasa [5].



Gambar 5 Rangkaian Pengurangan Arus Harmonisa Menggunakan ZSBT



Gambar 6 Rangkaian Ekivalen Urutan Nol Sistem Menggunakan ZSBT [5]

di mana:

- V_S : Sumber tegangan
- i_{L0} : Sumber arus urutan nol
- i_N : Arus netral menuju sumber
- Z_S : Impedansi sumber
- Z_{ZB} : Impedansi ZSBT
- Z_L : Impedansi beban

Dari Gambar 2.13 besar arus i_N dapat diperoleh sebagai berikut:

$$i_N = \frac{Z_L}{Z_S + Z_{ZB} + Z_L} i_{L0} \quad (6)$$

Pada Persamaan (6) dapat dilihat bahwa efektifitas pengurangan arus netral menuju sumber tergantung kepada perbandingan antara impedansi beban (Z_L) dan impedansi urutan nol ZSBT (Z_{ZB}). Jika impedansi urutan nol ZSBT (Z_{ZB}) jauh lebih besar dibanding impedansi beban (Z_L) maka makin besar pengurangan arus netral.

3. Metode Penelitian

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

Dalam penelitian ini digunakan dua jenis ZSBT yang terdiri dari tiga buah transformator satu fasa. Spesifikasi transformator satu fasa yang akan digunakan sebagai ZSBT adalah sebagai berikut:

Spesifikasi transformator jenis pertama (TR1):

- Tegangan kumparan: 133 V/133 V
- Kapasitas: 500 VA
- Perbandingan belitan 1 : 1
- Jenis belitan kumparan: konvensional

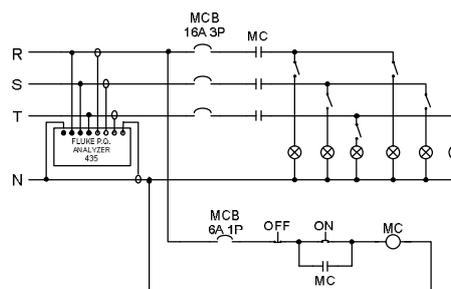
Spesifikasi transformator jenis kedua (TR2):

- Tegangan kumparan: 127 V/127 V
- Kapasitas: 300 VA
- Perbandingan belitan 1 : 1
- Jenis belitan kumparan: bifilar

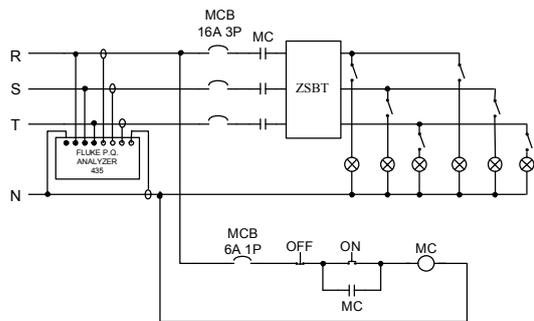
Adapun bahan dan peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Satu unit alat ukur Three Phase Power Quality Analyzer merk FLUKE model 435.
2. Tiga unit transformator satu fasa masing-masing 500 VA; 133V/133V (TR 11, TR 12, TR 13).
3. Tiga unit transformator satu fasa masing-masing 300 VA; 127V/127V (TR 21, TR 22, TR 23).
4. Dua puluh tujuh buah lampu hemat energi 23W/220V.
5. Enam buah lampu hemat energi 18W/220V.
6. Satu set peralatan untuk instalasi rangkaian eksperimen antara lain adalah: MCB 3P 16 A, MCB 1P 6A, magnetic contactor 9 A, kabel kontrol, push-button switch, terminal block dan saklar.
7. 15 mtr kabel NYMHY 4 x 2,5 mm².

Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan rangkaian eksperimen sebelum dan sesudah menggunakan ZSBT.



Gambar 7 Rangkaian Eksperimen Sebelum Menggunakan ZSBT



Gambar 8 Rangkaian Eksperimen Setelah Menggunakan ZSBT

Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan ZSBT yang digunakan dalam eksperimen.



Gambar 9 ZSBT Dengan Belitan Konvensional yang Digunakan Pada Eksperimen



Gambar 10 ZSBT Dengan Belitan Bifilar yang Digunakan Pada Eksperimen

Untuk daya beban seimbang, pada setiap fasa terdapat lampu hemat energi dengan susunan sebagai berikut:

$$2 \times 18W + 9 \times 23W = 243W \text{ (per fasa)}$$

$$\text{Daya total : } 729W$$

Untuk eksperimen dengan daya beban yang bervariasi, beban diatur sedemikian rupa sehingga mendekati 25%, 50%, 75%, dan 100% dari daya total yang dipakai pada kondisi beban seimbang. Tetapi dengan daya per fasa yang seimbang. Adapun susunannya adalah sebagai berikut:

- a. Beban 25%
 - $1 \times 18W + 2 \times 23W = 64W \text{ (per fasa)}$
 - Daya Total : 192W
- b. Beban 50%
 - Fasa R: $5 \times 23W = 115W \text{ (per fasa)}$
 - Daya Total = 345W

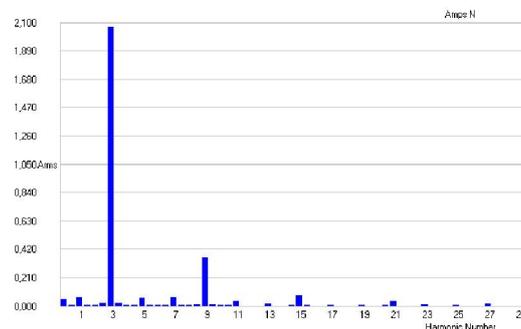
- c. Beban 75%
 - $8 \times 23W = 184W$
 - Daya Total = 192W
- d. Beban 100%
 - $2 \times 18W + 9 \times 23W = 243W$
 - Daya Total = 192W

4. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran sebelum penggunaan ZSBT pada kondisi beban yang seimbang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 10.

Tabel 1 Hasil Pengukuran Sebelum Penggunaan ZSBT

Besaran	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
Frekuensi (Hz)	49,952			
Tegangan rms(V)	214,31	212,40	212,14	0,60
Arus rms (A)	1,267	1,284	1,296	2,110
THD arus (%)	75,3	74,3	72,9	3188



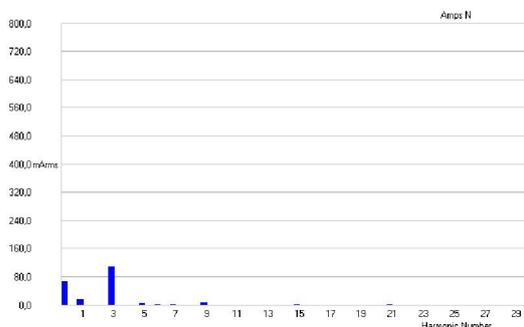
Gambar 11 Spektrum Harmonisa Arus Netral Sebelum Penggunaan ZSBT

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa sebelum penggunaan ZSBT, arus yang mengalir pada penghantar netral sebesar 2,11A dan didominasi oleh komponen arus harmonisa urutan nol, sedangkan komponen arus harmonisa urutan positif dan urutan negatif sangat kecil sehingga dapat diabaikan seperti terlihat pada Gambar 11. Hal ini disebabkan pada penghantar netral komponen arus harmonisa urutan nol saling menjumlahkan dan komponen arus harmonisa urutan positif dan urutan negatif saling meniadakan.

Hasil pengukuran setelah penggunaan ZSBT dengan belitan konvensional (TR 1) pada kondisi beban yang seimbang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 12.

Tabel 2 Hasil Pengukuran Setelah Penggunaan ZSBT (TR 1)

Besaran	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
Frekuensi (Hz)	49,948			
Tegangan rms (V)	210,98	209,46	209,25	0,12
Arus rms (A)	0,976	0,989	1,008	0,131
THD arus (%)	45,3	46,8	45,5	670,6



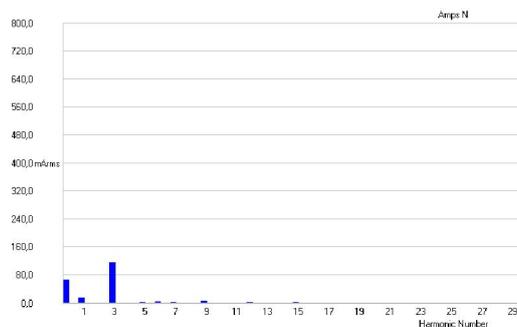
Gambar 12 Spektrum Harmonisa Arus Netral Setelah Penggunaan ZSBT (TR 1)

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa setelah penggunaan ZSBT (TR1), arus pada penghantar netral mengalami penurunan setelah penggunaan ZSBT (TR 1) menjadi 0,131A. Nilai penurunan arus pada penghantar netral adalah sebesar 93,7%. Penurunan nilai arus pada penghantar netral ini disebabkan karena komponen arus harmonisa urutan nol mengalami penurunan, seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Berdasarkan Persamaan (6) dapat dilihat bahwa nilai arus penghantar netral mengalami penurunan karena ZSBT dengan belitan konvensional (TR 1) memiliki impedansi urutan nol yang besar.

Hasil pengukuran setelah penggunaan ZSBT dengan belitan bifilar (TR 2) pada kondisi beban yang seimbang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 13.

Tabel 3 Hasil Pengukuran Setelah Penggunaan ZSBT (TR 2)

Besaran	Fasa R	Fasa S	Fasa T	Netral
Frekuensi (Hz)	50,070			
Tegangan rms (V)	213,17	211,44	211,78	0,12
Arus rms (A)	1,266	1,286	1,268	0,137
THD arus (%)	85	84,2	81,3	710,5



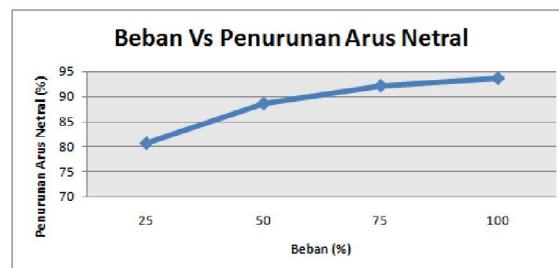
Gambar 13 Spektrum Harmonisa Arus Netral Setelah Penggunaan ZSBT (TR 2)

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa setelah penggunaan ZSBT (TR2), arus pada penghantar netral mengalami penurunan menjadi 0,137A. Nilai penurunan arus pada penghantar netral adalah sebesar 93,5%. Penurunan nilai arus pada penghantar netral ini disebabkan karena komponen arus harmonisa urutan nol mengalami penurunan setelah penggunaan ZSBT (TR 2), seperti ditunjukkan pada Gambar 13. Berdasarkan Persamaan (6) dapat dilihat bahwa nilai arus penghantar netral mengalami penurunan karena ZSBT dengan belitan bifilar (TR 2) memiliki impedansi urutan nol yang besar.

Hasil pengukuran setelah penggunaan ZSBT dengan belitan konvensional (TR 1) pada kondisi daya beban yang bervariasi ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 14.

Tabel 4 Hasil Pengukuran Sebelum dan Setelah Penggunaan ZSBT (TR 1) Pada Beban Variasi

Beban (%)	Tanpa ZSBT	Dengan ZSBT TR1	Penurunan Arus Netral (%)
	Arus Netral (I _n)	Arus Netral (I _n)	
25	0,682	0,132	80,6
50	1,167	0,132	88,6
75	1,751	0,136	92,2
100	2,211	0,138	93,7



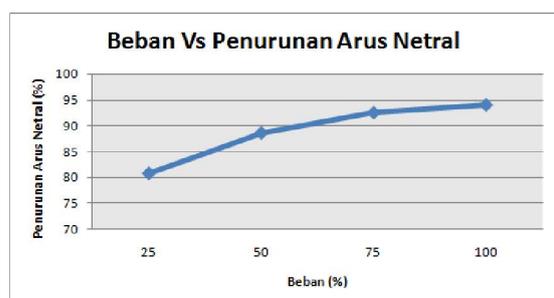
Gambar 14 Grafik Hubungan Persentase Beban Dengan Persentase Penurunan Arus Netral Penggunaan ZSBT (TR 1)

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa presentase penurunan arus netral paling kecil adalah 80,6% pada saat beban 25%, sedangkan presentase penurunan arus netral paling besar adalah 93,7% pada saat beban 100 %. Dan dari Tabel 4 didapatkan grafik seperti pada Gambar 14. Dapat dilihat bahwa setiap kenaikan beban diikuti dengan kenaikan presentase penurunan arus netral.

Hasil pengukuran setelah penggunaan ZSBT dengan belitan bifilar (TR 2) pada kondisi daya beban yang bervariasi ditunjukkan pada Tabel 5 dan Gambar 15.

Tabel 5 Hasil Pengukuran Sebelum dan Setelah Penggunaan ZSBT (TR 2) Pada Beban Variasi

Beban (%)	Tanpa ZSBT	Dengan ZSBT TR2	Penurunan Arus Netral (%)
	Arus Netral (I_n)	Arus Netral (I_n)	
25	0,682	0,130	80,9
50	1,167	0,131	88,7
75	1,751	0,128	92,6
100	2,211	0,129	94,1



Gambar 15 Grafik Hubungan Persentase Beban Dengan Persentase Penurunan Arus Netral Penggunaan ZSBT (TR 2)

Dari Tabel 5 didapatkan grafik seperti pada Gambar 15. Dapat dilihat bahwa setiap kenaikan beban diikuti dengan kenaikan presentase penurunan arus netral. Presentase penurunan arus netral paling kecil adalah 80,9% pada saat beban 25%, sedangkan presentase penurunan arus netral paling besar adalah 94,1% pada saat beban 100 %.

5. Kesimpulan

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

1. Penggunaan ZSBT dengan belitan konvensional (TR 1) pada kondisi beban

yang seimbang mengurangi arus rms yang mengalir pada penghantar netral sebesar 93,7%. Dan pada beban variasi, penurunan tertinggi terjadi saat presentase beban 100% .

2. Penggunaan ZSBT dengan belitan bifilar (TR 2) pada kondisi beban yang seimbang mengurangi arus rms yang mengalir pada penghantar netral sebesar 93,5%. Dan pada beban variasi, penurunan tertinggi terjadi saat presentase beban 100%
3. Pada kondisi beban variasi, besar penurunan arus rms penghantar netral selalu lebih rendah saat penggunaan ZSBT TR 1 dan TR 2 dibanding sebelum penggunaan ZSBT.
4. Kedua jenis ZSBT (TR 1 & TR 2) efektif digunakan untuk mengurangi arus rms penghantar netral.

6. Daftar Pustaka

- [1] Azhar, Ahmad, "Mitigation of Triplen Harmonics in Three-Phase Four-Wire Electrical Distribution System", *thesis of the degree of master of science in electrical engineering*, universitas teknikal malaysia melaka, 2007.
- [2] Syafrudin, "Metoda Baru Pengurangan Arus Harmonisa Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik," *Disertasi*, Institut Teknologi Bandung, 2001.
- [3] Aitor Laka, Jon Andoni Barrena, Javier Chivite-Zabalza, Miguel Angel Rodriquez Vidal, "Novel Zero-Sequence Blocking Transformer (ZSBT) Using Three Single-Phase Transformers", *IEEE Trans on Energy Conversion*, Vol. 28, No. 1, March 2013.
- [4] McLyman, Col. Wm. T., "Transformer and Inductor Design Handbook", Third Edition. 2004. Marcel Dekker, Inc.
- [5] Peng, F.Z.; Su, G.-J.; Farquharson, George, "A Series LC Filter for Harmonic Compensation of AC Drives." IEEE 1999