

Fabrikasi Transformator *Step-up* 1-kV Fasa Tunggal untuk Generator Pemicu Transduser Ultrasonik

Darmawan Hidayat, Nendi Suhendi Syafei, Bambang Mukti Wibawa, Bernard Y. Tumbelaka

Departemen Teknik Elektro, Fakultas MIPA, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang KM. 21, Jatinangor 45363, Jawa Barat, Indonesia
darmawan.hidayat@unpad.ac.id

Abstrak

Generator pulsa tegangan tinggi diperlukan untuk memicu transduser ultrasonik dalam proses pembangkitan gelombang ultrasonik. Salah satu komponen sumber daya generator pulsa ini adalah tegangan tinggi searah (DC) orde 1 kV. Makalah ini melaporkan desain dan fabrikasi tegangan tinggi DC melalui transformator *step-up* inti besi fasa tunggal 0,5 mA dengan tegangan punak-puncak sinusoida sekunder hingga 1 kV 50 Hz. Masukan primer adalah jala-jala 220 VAC dengan variasi tegangan AC terminal sekunder 100, 200, 400, 600, 800 dan 1000 V. Sebuah dioda jembatan penyearah digunakan untuk penyearahan penuh tegangan AC sekunder menjadi DC. Kinerja transformator meliputi rasio dan linearitas penguatan tegangan, tanggapan frekuensi, dan analisis pembebanan. Hasil pengujian menunjukkan amplitudo tegangan sekunder meningkat linear seiring kenaikan tegangan sekunder dengan tegangan sekunder maksimum adalah 1220 V untuk masukan primer 220 VAC. Hasil penyearahan menunjukkan penyearahan penuh dengan *ripple* kurang dari 1%. Berdasarkan hasil seluruh pengujian, transformator dapat mencatu tegangan tinggi yang diperlukan hingga ~1 kV dengan daya maksimum sekitar 400 Watt memenuhi kriteria untuk mencatu generator pulsa tegangan tinggi.

Kata kunci: tegangan tinggi, transformator, arus searah, *step-up*

Abstract

A short-time-width high-voltage pulse generator is necessary for the generation of ultrasonic waves in the purposes of various material evaluations and physical quantity measurements. This necessitates a DC high voltage power supply in the order of hundreds of volts. This work reports a design and fabrication of an iron-cored single phase 0.5 mA step-up transformer which provided secondary output voltage up to 1 kV with a 50-Hz sinusoid primary working voltage of 220 VAC. An integrated bridge diode fully rectified the secondary voltage waveforms into an unrectified DC voltage. Transformer performance including the step-up ratio and gain, frequency response and load analysis were evaluated. The test results showed secondary maximum voltage of 1220 V for 220 VAC primary input, which secondary voltages proportionally increased with the increasing of primary voltage. The evaluated transformer parameters included ratio and linearity of voltage gain, frequency response and loading analysis. The frequency response analysis exhibited that the transformer working frequency was 50 Hz. In conclusion, the designed transformer were able to provide up to 1 kV DC voltage with maximum power of 400 W. This was sufficiently adequate to provide DC high voltage for the ultrasonic transducer pulse circuit.

Keywords: high voltage, transformer, DC voltage, *step-up*

I. PENDAHULUAN

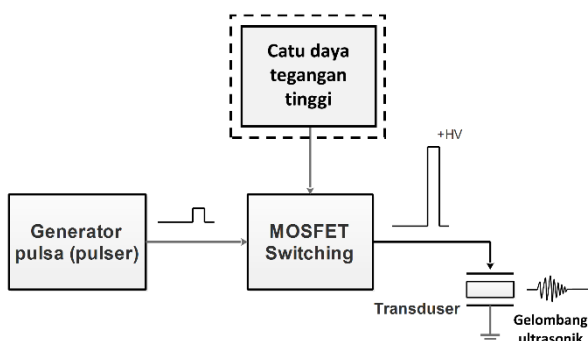
Gelombang ultrasonik banyak digunakan untuk keperluan evaluasi tak-merusak dan pengukuran berbagai besaran fisis karena keunggulan daya tembus pada objek-objek berbahan *opak* (material yang tidak meneruskan atau memantulkan cahaya

atau energi radiasi, tak tembus pandang). Salah satu metode pembangkitan gelombang ultrasonik adalah dengan memberikan sinyal eksitasi ke transduser ultrasonik berupa pulsa tegangan dengan durasi (lebar waktu pulsa) tertentu sesuai karakteristik transduser [1]-[3]. Lebar pulsa sinyal eksitasi menentukan kandungan frekuensi yang

dibangkitkan. Untuk meningkatkan daya pemancaran gelombang ultrasonik, daya sinyal eksitasi juga harus diperbesar dengan meningkatkan besar tegangan pulsa [4][5].

Gambar 1 memperlihatkan sistem tipikal evaluasi dan pengukuran tak-merusak berbasis gelombang ultrasonik dengan mode *pulse-echo* dan mode transmisi. Pada mode *pulse-echo*, transduser yang digunakan hanya satu bekerja sebagai pemancar dan penerima. Terdapat tiga komponen elektronik utama yaitu: (1) generator pulsa, untuk membangkitkan pulsa dengan pengaturan lebar pulsa dan interval repetisi pulsa; (2) sumber tegangan tinggi DC, untuk menyediakan tegangan tinggi DC sebagai sumber daya bagi transduser pemancar; dan (3) rangkaian penyaluran (*switching*), yang berfungsi untuk mencacah tegangan tinggi DC kontinyu menjadi pulsa-pulsa tegangan tinggi dengan lebar pulsa yang singkat untuk memicu transduser ultrasonik. Daya rambat gelombang ultrasonik ditentukan oleh daya sinyal eksitasi dalam hal ini besar tegangan (magnitudo) sinyal eksitasi ke transduser pemancar. Dalam banyak aplikasi evaluasi tak-merusak dan pengukuran besaran fisis berbasis gelombang ultrasonik, diperlukan tegangan pulsa dengan magnitudo dalam orde hingga ratusan volt untuk meningkatkan daya rambat gelombang [6]-[8]. Oleh karena itu, catu daya tegangan tinggi DC stabil dalam orde ratusan volt menjadi komponen penting untuk implementasi sistem berbasis gelombang ultrasonik.

Makalah ini menyajikan pembangkitan sumber tegangan tinggi DC untuk keperluan pembangkitan pulsa cepat tegangan tinggi dengan menggunakan transformator *step-up* inti besi fasa tunggal dari sumber tegangan primer 220 VAC 50 Hz (Gambar 1). Kinerja catu daya tegangan tinggi yang dikaji meliputi rasio kenaikan tegangan, respon frekuensi dan analisis pembebanan.

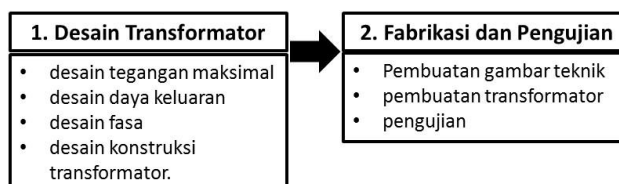


Gambar 1. Catu daya tegangan tinggi DC untuk eksitasi transduser gelombang ultrasonik [6]

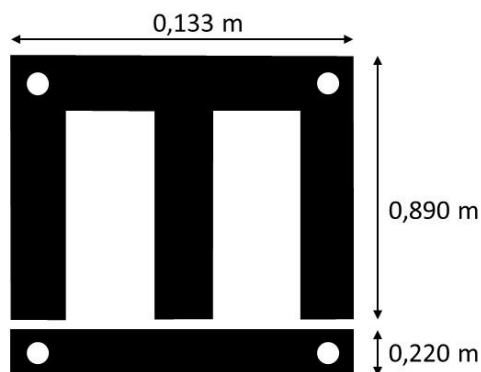
II. DESAIN DAN FABRIKASI

Gambar 2 memperlihatkan tahapan proses implementasi sistem catu daya tegangan tinggi. Terdapat dua tahap untuk implementasi sistem catu daya tegangan tinggi untuk keperluan eksitasi transduser ultrasonik. Pertama, tahap desain transformator, meliputi: desain tegangan maksimal, desain daya keluaran, desain fasa, dan desain konstruksi transformator. Tahap kedua adalah fabrikasi dan pengujian, meliputi gambar teknik, pembuatan transformator dan pengujian.

Transformator dirancang untuk tegangan primer AC 220 V bekerja pada frekuensi 50 Hz. Terdapat enam terminal sekunder sebagai keluaran, yaitu 100, 200, 400, 600, 800 dan 1000 V. Diameter kawat konduktor primer dan sekunder masing-masing adalah $9,0 \times 10^{-4}$ dan $4,5 \times 10^{-4}$ m. Rasio lilitan dan tegangan adalah 1,5. Lilitan primer dibuat sebanyak 330 lilitan sehingga jumlah lilitan masing-masing terminal sekunder dapat dilihat pada Tabel 1. Inti transformator (*kern*) adalah inti besi dengan geometri pasangan E dan I ukuran 44 yaitu ukuran panjang dan lebar inti-E adalah $0,133 \times 0,089$ m; dan ukuran inti-I adalah $0,133 \times 0,022$ m. Gambar 3 memperlihatkan konstruksi inti besi transformator yang dibuat.



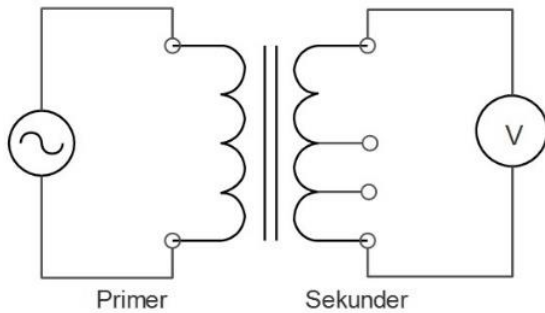
Gambar 2. Tahapan implementasi desain dan fabrikasi transformator



Gambar 3. Inti besi transformator

Tabel 1. Jumlah lilitan sekunder untuk tiap terminal keluaran

Jumlah lilitan sekunder, n_s		Rasio $n_s : n_p$
Terminal	Sekunder	
100 V	150	0,45
200 V	300	0,91
400 V	600	1,82
600 V	900	2,73
800 V	1200	3,64
1000 V	1500	4,55

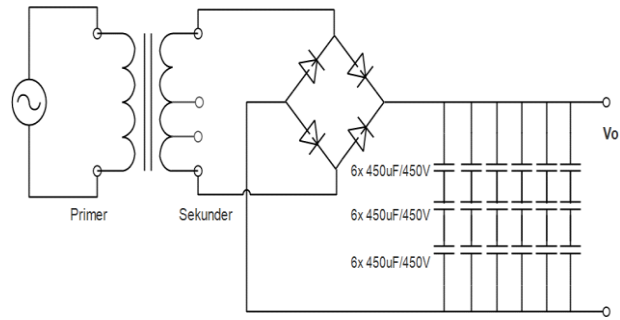
**Gambar 4. Diagram skematik transformator untuk pengujian rasio tegangan primer-sekunder dan respon frekuensi**

A. Pengujian Rasio Tegangan dan Respon Frekuensi

Untuk mengetahui rasio *step-up* tegangan primer-sekunder, terminal primer diberi sinyal sinusoid 50 Hz dengan rentang amplitudo 0-15 V dari sebuah sinyal generator (GW-Instek GFG-8255) dan sinyal sinusoid AC 50 Hz 220 V dari jala-jala listrik PLN seperti diperlihatkan Gambar 4. Sinyal keluaran di primer diukur dengan voltmeter AC (Sanwa 800a), ditampilkan dan direkam dengan menggunakan osiloskop (GW-Instek 2104A).

B. Penyearahan dan Pengujian Pembebanan

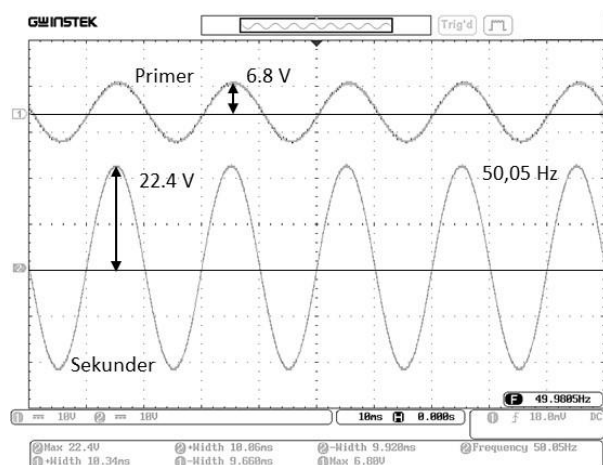
Gambar 5 memperlihatkan rangkaian penyearah penuh dan perata tegangan. Rangkaian empat dioda (BY329) disusun untuk proses penyearahan gelombang penuh. Perataan gelombang dari rangkaian dioda dilakukan dengan menggunakan 12 kapasitor 450 μ F/450 V yang disusun secara seri-paralel. Perataan gelombang dari rangkaian dioda dilakukan dengan menggunakan tiga kapasitor yang disusun seri dan empat paralel. Dengan rangkaian ini, tegangan kerja perataan adalah 3×450 V adalah 1350 V, dan kapasitansi total menjadi $4 \times (450/3)$ μ F adalah 600 μ F.

**Gambar 5. Skematik rangkaian penyearahan dan perataan gelombang penuh**

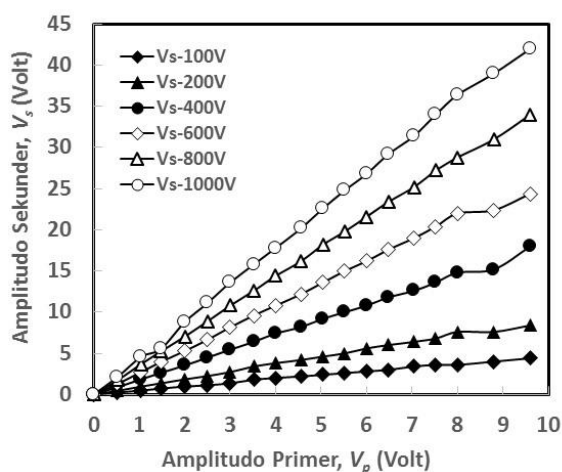
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 6 memperlihatkan bentuk tegangan primer dan sekunder transformator *step-up*. Sinyal masukan primer adalah sinusoid 50 Hz dengan amplitudo 6,80 V, menghasilkan tegangan keluaran sekunder di terminal 800 V adalah sinusoid 22,4 V. Dari hasil pengujian seperti Gambar 5, dapat dihitung nilai penguatan *step-up* amplitudo adalah 3,29 sehingga untuk tegangan jala-jala 220 VAC akan menghasilkan amplitudo keluaran sebesar 745,8 VAC dengan tegangan efektif (*rms*) sebesar 527,36 Vrms. Sinyal tegangan sekunder sefasa dengan sinyal primer. Ini karena lilitan sekunder dirancang sefasa dan fasa tunggal.

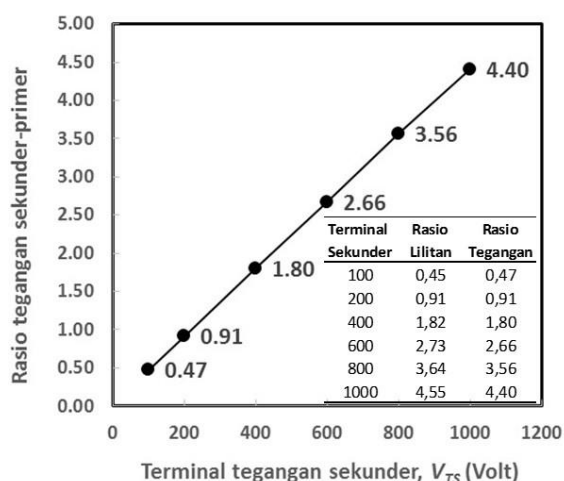
Untuk menghitung rasio penguatan sekunder-primer masing-masing terminal sekunder terhadap tegangan primer, sinyal sinusoid 50 Hz dengan rentang amplitudo 0-10 V dari sinyal generator dimasukkan ke terminal primer. Setiap tegangan pada terminal sekunder diukur dan direkam menggunakan osiloskop digital. Gambar 7 memperlihatkan nilai amplitudo tegangan sekunder di masing-masing terminal untuk variasi amplitudo tegangan primer. Tegangan pada masing-masing terminal meningkat linear seiring variasi perubahan amplitudo primer. Untuk satu nilai amplitudo primer, tegangan pada tiap terminal sekunder meningkat sesuai dengan rasio penguatan sekunder-primer Tabel 1. Hasil pengujian Gambar 7 menunjukkan bahwa rasio penguatan untuk sekunder tanpa beban sesuai dengan rasio lilitan sekunder-primer berdasarkan rancangan rancangan. Dengan cara ini, variasi nilai tegangan sekunder dapat dipilih dari terminal sekunder.



Gambar 6. Bentuk sinyal masukan di primer dan keluaran di sekunder pada terminal 600 V



Gambar 7. Pengaruh amplitudo primer terhadap amplitudo sekunder untuk tiap terminal sekunder



Gambar 8. Rasio penguatan amplitudo (*step-up*) antara amplitudo sekunder terhadap primer

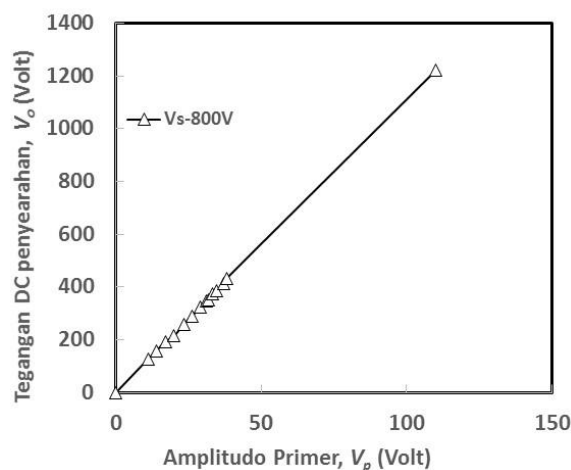
Rasio penguatan tegangan sekunder-primer hasil pengujian Gambar 7 disajikan pada Gambar 8. Untuk tiap terminal sekunder terdapat selisih nilai rasio sekunder-primer hasil perhitungan lilitan dan pengukuran tegangan, masing-masing sebesar -0,02,

0, 0,02, 0,07, 0,08 dan 0,05 untuk terminal T-100V, 200V, 400V, 600V, 800V dan 1000V. Nilai selisih (*error*) ini tidak begitu signifikan untuk penggunaan tegangan-tegangan orde ratusan volt.

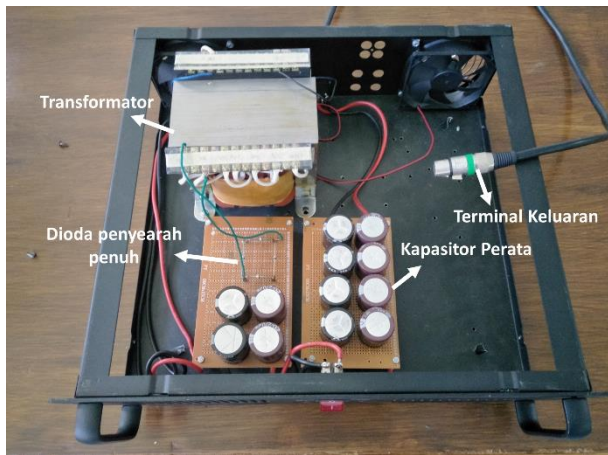
Untuk menghasilkan tegangan DC rata, tegangan sinusoid *step-up* keluaran di sekunder transformator selanjutnya disearahkan melalui empat buah dioda tegangan tinggi dengan rangkaian penyearah penuh. Perataan gelombang penuh dilakukan dengan kapasitor. Tegangan DC hasil penyearahan dan perataan diukur terhadap variasi amplitudo primer.

Gambar 9 memperlihatkan tegangan DC keluaran hasil penyearahan dan perataan sinyal sekunder di terminal T-600V. Amplitudo sinyal primer divariasikan dari 11 hingga 110 V. Tampak bahwa tegangan DC keluaran linear terhadap amplitudo primer. Tegangan untuk masukan 110 V menghasilkan tegangan DC sebesar 1220 V (tanpa beban). Tegangan ini sudah mencukupi untuk eksitasi transduser ultrasonik. Hasil pengukuran Gambar 9 menyimpulkan bahwa daya eksitasi ke transduser ultrasonik dapat dilakukan dengan pengaturan amplitudo sekunder atau pengaturan sinyal masukan primer.

Untuk mengurangi interferensi magnetik akibat transformator, seluruh rangkaian ditempatkan di dalam kemasan (*casing*) aluminium seperti diperlihatkan Gambar 10. Empat dioda tegangan tinggi berfungsi untuk penyearah penuh. Rangkaian seri-paralel kapasitor meratakan sinyal hasil penyearahan.



Gambar 9. Tegangan keluaran hasil penyearahan dan perataan terhadap amplitudo sinusoid primer



Gambar 10. Wujud fisik catu daya tegangan tinggi DC untuk eksitasi transduser ultrasonik

IV. KESIMPULAN

Hasil penelitian telah berhasil merancang dan fabrikasi catu daya tegangan tinggi DC 1-kV menggunakan transformator fasa tunggal step-up fabrikasi. Besar tegangan dapat ditentukan dengan pemilihan enam terminal sekunder. Hasil perancangan dan pengujian menungkap bahwa transformator dapat menyediakan tegangan DC 100 hingga 1220 V. Variasi tegangan dapat dilakukan dengan pemilihan terminal sekunder dan variasi amplitudo primer. Tegangan DC keluaran linear terhadap tegangan masukan primer. Berdasarkan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa transformator telah berfungsi sesuai rancangan dan memenuhi kriteria untuk digunakan sebagai eksitasi transduser ultrasonik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kemenristekdikti melalui skim Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi (PUPT) Universitas Padjadjaran tahun anggaran 2017 dan dukungan dari *Academic Leadership Grant* (ALG) Universitas Padjadjaran Prof. Bernard Y. Tumbelaka. Kami mengucapkan terima kasih kepada Kemenristekdikti atas pendanaan PUPT Universitas Padjadjaran nomor: 718/UN6.3.1/PL/2017.

REFERENSI

- [1] D. Campbell, J. Harper, V. Natham, F. Xiao, R. Sundararajan, "A Compact High Voltage Nanosecond Pulse Generator", in *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*, 2008, p. 1–12.
- [2] Y. Guo, G. Zhu, "Novel Design and Implementation of Ultra-wideband Pulse Generator Based on Avalanche Transistor", in *proc. PIERS Proceedings*, 2014, p. 34–38.
- [3] A. Camarda, A. Romani, M. Tartagni, "Piezoelectric Transformers for Ultra-low Voltage Energy Harvesting Applications", *Procedia Engineering* vol. 87, pp. 1521 – 1524, 2014.
- [4] R.K. Barik, S.S. Karthikeyan, "A novel quad-band impedance transformer with ultra-high transforming Ratio", *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)* vol. 78 pp. 157–161, 2017.
- [5] V.A. Lavrinovich, A.V. Mytnikov, H. Li, "Advanced technology of transformer winding condition control based on nanosecond probing impulse", *Resource-Efficient Technologies* vol. 2 pp. 111–117, 2016.
- [6] E. Macrelli, A. Romania, N. Wang, S. Roy, M. Hayes, R.P. Paganelli, M. Tartagni, "Design and fabrication of a 29 H bond wire micro-transformer with LTCC magnetic core on silicon for energy harvesting applications", *Procedia Engineering* vol. 87 pp. 1557 – 1560, 2014.
- [7] D. I. Zenkov, S. G. Kozlov, Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. I. Nizhegorodtsev, I. N. Romanov, A. A. Tkachuk, E. V. Uralin, and O. A. Shamro, "A ГИИ-1200 high-voltage pulse generator", *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, Vol. 51, No. 3, pp. 396–400.
- [8] A. Chaney, and R. Sundararajan, "Simple MOSFET-Based High-Voltage Nanosecond Pulse Circuit", *IEEE Transactions On Plasma Science*, vol. 32, no. 5, pp. 1919–1924, Oct. 2004.
- [9] M. Kaczmarek, "Inductive current transformer accuracy of transformation for the PQ measurements", *Measurement* vol. 101 pp. 53–61, 2017.
- [10] M. Kaczmarek, "Development and application of the differential voltage to single-ended voltage converter to determine the composite error of voltage transformers and dividers for transformation of sinusoidal and distorted voltages", *Electric Power Systems Research* vol. 150 pp. 169–176, 2017.

