J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 35, No. 4, pp. 353-358 July 2022
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.4.6
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

Regular Paper

가스절연개폐장치의 스페이서 내장형 전자식 변압기의 설계 및 제작

임승현, 김남훈, 김동언, 김선규, 길경석

한국해양대학교 전기전자공학과

Design and Fabrication of an Electronic Voltage Transformer (EVT) Embedded in a Spacer of Gas Insulated Switchgears

Seung-Hyun Lim, Nam-Hoon Kim, Dong-Eon Kim, Seon-Gyu Kim, and Gyung-Suk Kil

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received February 21, 2022; Revised March 5, 2022; Accepted March 16, 2022)

Abstract: Bulky iron-core potential transformers (PT) are installed in a tank of gas insulated switchgears (GIS) for a system voltage measurement in power substations. In this paper, we studied an electronic voltage transformer (EVT) embedded in a spacer for miniaturization, eco-friendliness, and performance improvement of GIS. The prototype EVT consists of a capacitive probe (CP) that can be embedded in a spacer and a voltage Follower with a high input and a low output impedance. The CP was fabricated in the form of a Flexible-PCB to acquire the insulation performance and to withstand vibration and shock during operation. Voltage ratio of the prototype EVT is about 42,270, and the frequency bandwidth of –3 dB ranges from 0.33 Hz to 3.9 MHz. The voltage ratio error evaluated at about 6%, 12% and 18% of the rated voltage of 170 kV was 0.32%, and the phase error was 12.9 minutes. These results were within the accuracy for the class 0.5 specified in IEC 60044-7 and satisfy even in ranges from 80% to 120% of the rated voltage. If the prototype EVT replaces the conventional iron-core potential transformer, it is expected that the height of the GIS could be reduced by 11% and the amount of SF_6 will be reduced by at least 10%.

Keywords: Potential transformers (PT), Gas insulated switchgears (GIS), Spacer, Electronic voltage transformer (EVT), Capaci-tive probe (CP)

1. 서 론

주요 변전설비 중 가스절연개폐장치(gas insulated switchgear, GIS)는 전력계통에서 안정적인 전력 공급을 위한 주요 설비 중의 하나로 차단기, 단로기, 계기용 변압기 및 변류기 등으로 구성되어 있다 [1,2]. 계기용 변압기(potential transformer, PT)는 고전압을 저전압으로 변환하는 장치로, 측정용과 보호 계전기용으로 구분되며, SF_6가 주입된 별도의 탱크 내에 설치한다 [3,4]. 이들 배경에서 본 논문에서는 GIS의 소형화와 지구온난화지수 (GWP)가 CO_2보다 약 23,700배 큰 SF_6 가스의 사용량을 감소시켜 친환경화를 목적으로, 정격 170 kV급 4,000 A의 GIS 스페이서(spacer) 내장형 전자식 변압기(electronic voltage transformer, EVT)의 개발에 관한 연구를 수행하였다 [5-8]. 170 kV급 4,000 A GIS를 대상으로 스페이서 내장형 EVT를 적용할 경우, 그림 1에 나타낸 바와 같이 GIS bay의 높이를 약 11%의 축소가 가능하며, SF_6 가스의 주입량을 10% 감소시킬 수 있어 친환경화에도 기여할 수 있다.

본 논문에서 설계 및 제작한 가스절연개폐장치의 스페

✉ Gyung-Suk Kil; kilgs@kmou.ac.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

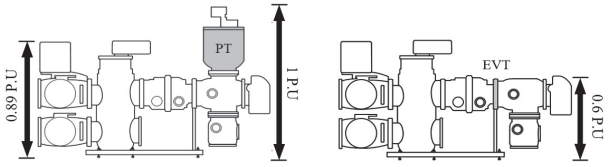


Fig. 1. Application effect of the EVT embedded in GIS spacer.

이서 내장형 EVT는 용량성 프로브(capacitive probe)와 신호 임피던스 변환용 전압 폴로어(voltage follower)로 구성되며, 용량성 프로브는 절연과 내구성을 고려하여 Flexible PCB 형태로 제작하였다. EVT의 성능은 IEC 60044-7 (electronic voltage transformers)을 기준으로 하였다 [9].

2. 이 론

GIS 스페이서 내에서 전압 검출의 원리는 그림 2와 같이 일종의 용량성 분압이며, 스페이서의 중심 도체와 검출 전극 사이에 작용하는 정전용량 C_H와 검출 전극(용량성 프로브)의 정전용량 C_L로 분압 회로가 구성된다 [10,11]. 실제 사용에 있어서 C_P 는 원하는 분압비에 따라 수~수십 nF으로 $C_H \ll C_P$이다.

중심도체와 용량성 프로브 사이의 정전용량 C_H는 동축 원통구조로 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$C_H = \frac{0.02413 \cdot \varepsilon s}{log10 \frac{R}{r}} \ (\text{nF/m}) \tag{1}$$

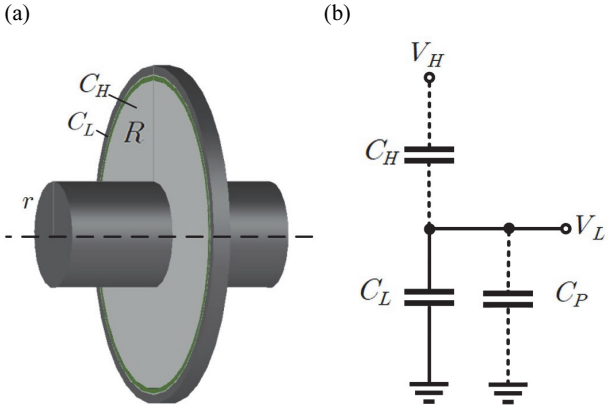


Fig. 2. Capacitive probe. (a) Principle of voltage detection and (b) equivalent circuit.

여기서, εs는 비유전율, r은 중심 도체의 반경 및 R은 용량성 프로브의 반경이다. 그림 2의 회로에서 분압비 U_L은

$$U_L = \frac{C_H + C_L + C_P}{C_H} \tag{2}$$

가 되며, C_L과 병렬로 주파수 특성이 우수한 탄탈 캐패시터 C_P를 접속하여 원하는 분압비와 주파수 안정성을 얻을 수 있다. 또한 용량성 프로브의 주파수 응답은 C_P 양단에 접속되는 계측 장치의 입력 임피던스에 의해 변화하기 때문에, 주파수 대역에 관계 없이 일정한 분압비를 얻기 위해 용량성 프로브와 계측장치 사이에 무손실 임피던스 변환 회로 즉, 전압 폴로어(voltage follower)의 삽입이 필요하다 [12].

3. 설계 및 제작

3.1 용량성 프로브

스페이서 내장 전자식 변압기는 스페이서 내 설치되는 용량성 프로브와 전압 폴로어로 구성된다. 용량성 프로브의 구조는 그림 3과 같이 flexible PCB형으로 센싱 및 접지 전극은 폐루프로 인해 스페이서 중심 도체를 흐르는 전류로

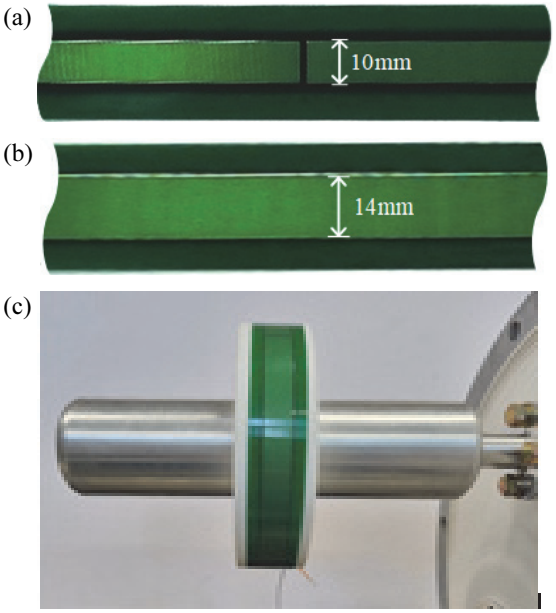


Fig. 3. Photographs of the prototype capacitive probe, (a) sensor plate, (b) ground plate, and (c) test jig.

Table 1. Specification of the prototype capacitive probes.

Structure \ Model	A	B	C
Thickness of insulation layer (mm)	0.10	0.30	0.50
Capacitance of probe (nF)	2.72	0.88	0.54

오차가 발생하지 않도록 split형으로 설계하였다. 센싱 전극 및 접지 전극의 폭은 각각 10 mm와 14 mm, 직경은 192 mm로 동일하며, 센싱 및 접지극 사이의 절연층은 표 1과 같이 0.1 mm, 0.3 mm 및 0.5 mm의 3종을 제작하고 분압비를 비교하였다.

용량성 프로브를 스페이서에 내장하는 것과 유사한 구조가 되도록 그림 3(c)와 같이 에폭시 재질의 원판을 제작하여, 외측에 용량성 프로브를 설치하고 큰 분압비를 얻기 위하여 22 nF 또는 47 nF의 C_P를 연결하였다. 중심

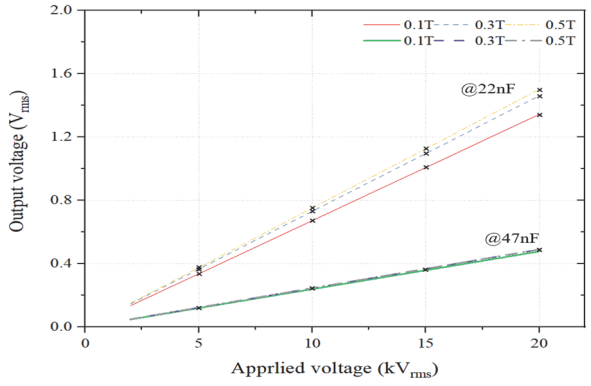


Fig. 4. Comparison of voltage ratio.

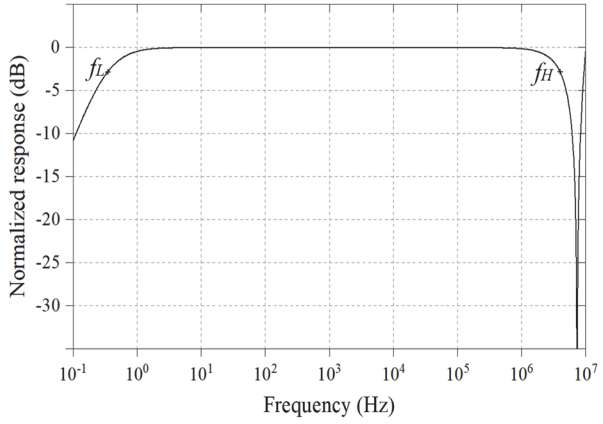


Fig. 5. Frequency response of the capacitive probe.

도체에 상용 교류 전압을 인가하면서 입력 임피던스 10 MΩ의 오실로스코프로 용량성 프로브의 출력 전압을 측정하였다.

3종 모델에 대한 분압비 측정 결과는 그림 4와 같고, 센싱 및 접지 전극 사이의 절연층 두께에 따른 분압비는 $C_L \ll C_P$이므로 크게 변화하지 않으며, 모델 A를 기준으로 C_P가 22 nF 일 때 최대 10.54% 이내, 그리고 C_P가 47 nF 일 때 최대 2.64% 이내였다. 본 논문에서 용량성 프로브의 적용 대상은 정격 전압은 AC 170 kV 이며 IEC 60044-7에 따른 최대 시험 전압이 정격 전압의 120%인 AC 204 kV 이므로 용량성 프로브의 출력 전압은 AC 200 kV 에서 5 V_{rms} 이하가 되기 위한 C_P는 47 nF 가 적합하다. 3종 모델 모두 적용이 가능하나 제작의 용이성과 내구성을 고려하여 본 논문에서는 절연층 두께 0.5 mm 인 모델 C 로 EVT를 제작하였다.

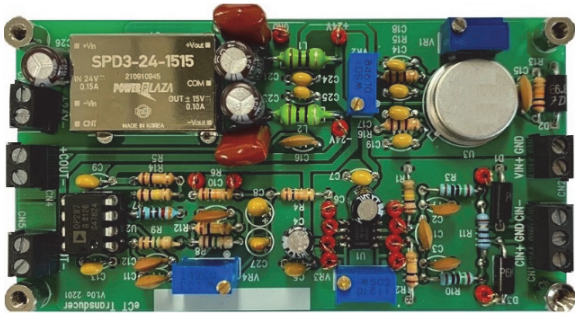
용량성 프로브 모델 C에 C_P로 47 nF를 접속 시 주파수 하한(f_L)은 식 (3)으로 구할 수 있으며 [13], 그림 2(b)의 등가 회로에서 C_P를 실제 적용과 같이 스페이서 외부에 접속하면 본 용량성 프로브의 주파수 응답은 그림 5와 같이 -3 dB의 주파수 대역은 0.33 Hz ~ 3.9 MHz로 분석되었다.

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_i(C_L+C_P)} \quad \text{(Hz)} \tag{3}$$

3.2 전압 폴로어(voltage follower)

2장에서 기술한 바와 같이 용량성 프로브의 분압비가 1차 전압의 주파수 대역에 관계없이 일정하게 하기 위해 용량성 프로브와 MU (merging unit)와 같은 데이터 취득장치 사이에 전압 폴로어의 삽입이 필요하다. 본 논문에서는 주파수 대역 20 MHz, 입력임피던스 100 MΩ 및 출력 임피던스 3 Ω의 연산증폭기로 원 신호 전달이 가능한 그림 6의 전압 폴로어를 설계 및 제작하였다. 용량성 프로브의 다양한 특성에 따라 분압비와 입력 임피던스를 제어할 수 있도

(a)



(b)

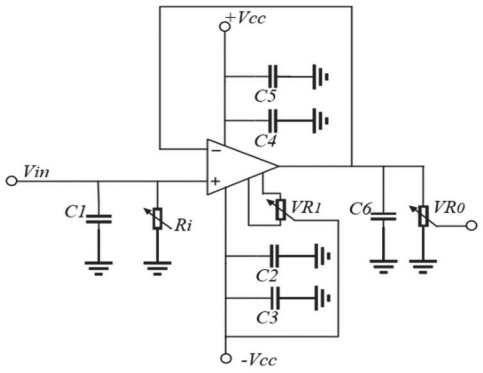


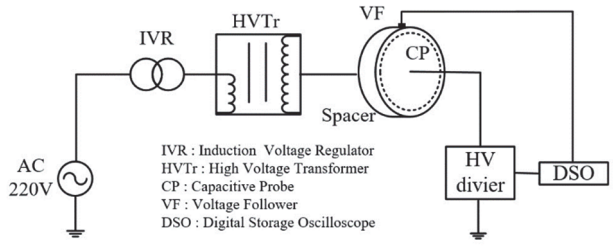
Fig. 6. Voltage follower, (a) photogrph and (b) circuit.

록 C_P와 R_I를 내장하고, 전압 폴로어 출력단의 VR_0로 출력 신호의 정밀 조정이 가능하다.

4. 평가 및 분석

시제작한 EVT 를 평가하기 위해 그림 7과 같이 실험계를 구축하였으며, 주요 기기 및 설비의 사양은 표 2와 같다. 전압 공급을 위해 유도 전압 조정기(IVR)와 승압용 에폭시

(a)



(b)

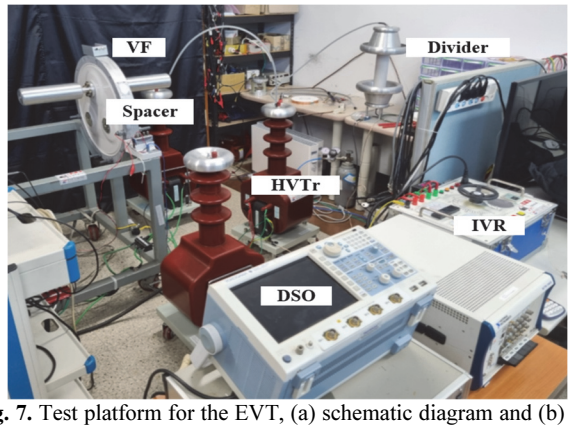
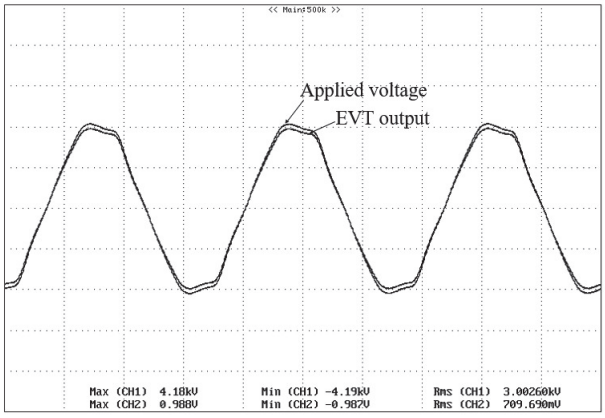


Fig. 7. Test platform for the EVT, (a) schematic diagram and (b) lay out.

Table 2. Specification of the facilities and instruments.

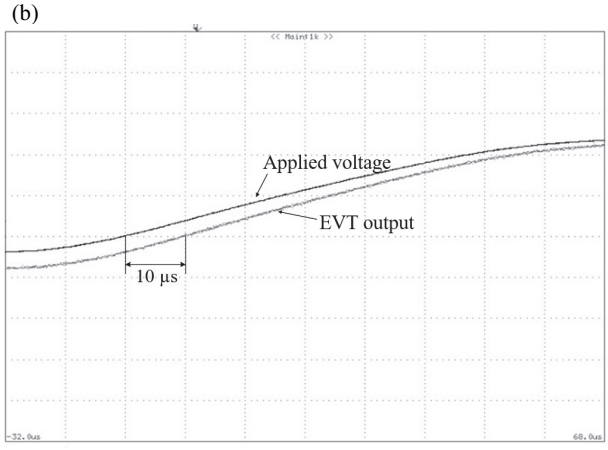
Equipment	Specification
Induction regulator	0~240 (V), 10 (kVA)
High voltage transformer	1φ 220 (V) / 100 (kV), 50 (mA)
GIS spacer	3 ph, φ 582 (mm)
Digital storage oscilloscope	Yokogawa 12 bit, 3 (MHz), 10 (MS/s)
High voltage divider	Northstar, 10,000:1, 20 (MHz)

(a)



Applied voltage : 20 (kV/div), 5 (ms/div)
EVT output : 500 (mV/div), 5 (ms/div)

(b)



Applied voltage : 200 (V/div), 10 (us/div)
EVT output : 5 (mV/div), 10 (us/div)

Fig. 8. Typical voltage waveforms measured at 30 kVrms (a) waveforms and (b) phase deviation.

절연변압기(AC 220 V/100 kV)를 적용하였으며, 가스절연 개폐장치의 스페이서 내 도체에 인가된 전압은 용량성 프로브로 검출되고 전압 폴로어를 통해 관측장치 (DSO)로 전달된다. IEC 60044-7 에 따른 전압(분압비)과 위상 오차

를 분석하기 위해, EVT 의 출력 전압과 중심 도체에 인가하는 전압을 비교하였다.

IEC 기준에 따른 실규모 평가에서는 정격 전압의 80~120%에서 실시하며, 이 영역에서 전압 오차 ±0.5% 및 위상 오차 ±20분으로 동일하다. 본 논문에서는 정격전압 170 kV 의 GIS 스페이서 내에 용량성 프로브를 내장하고 EVT 를 제작하였다. 실험은 GIS 설비에 스페이서를 설치하여 SF_6 절연가스를 주입 상태에서 불가능하여, 공기 중에서 수행함으로써 최대 인가 전압은 정격 전압의 약 18%인 30 kV_{rms}까지 실시하였다. 실제 적용에 있어서는 EVT의 전압 폴로어의 파라미터를 조정하며 분압비와 위상의 제어가 가능하므로 정격 전압의 80~120%에서도 동등 이상의 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단한다.

그림 8에 AC 30 kV 에서 측정된 1차 전압과 EVT 의 출력 파형의 예를 나타내었다. 분압비는 측정 장치에 기록된 인가 전압과 EVT 출력의 실효값으로 산출하였으며, 위상차는 그림 8(b)와 같이 1차 전압과 EVT 출력 파형 각각의 영점(zero cross)에서 시간 차이를 분석하였다.

스페이서 중심 도체의 인가 전압 10 kV, 20 kV 및 30 kV 에서 EVT 의 분압비 오차는 인가 전압 측정용 분압기를 기준으로 최대 0.32% 이내였으며, 위상 차이는 최대 10us 즉, 12.9분 이내로 평가되었다. 이는 표 3의 IEC 규격 0.5급의 오차율 이내로 정격 전압의 80~120%에서도 만족하는 결과이다.

Table 3. Accuracy of the class 0.5 EVT at rated frequency.

Items	± % voltage (ratio) error	± phase error in minutes / in time (us)
IEC 60044-7 limits	0.5	20.0/15.4
Prototype EVT	0.33	-12.9/-10.0

5. 결 론

본 논문에서는 가스절연개폐장치의 소형화, 친환경화 및 성능 개선을 목적으로 스페이서 내장형 EVT에 대한 연구를 수행하였다. EVT는 스페이서에 내장 가능한 용량성 프로브와 전압 폴로어로 구성되며, 용량성 프로브는 절연과 내구성을 고려하여 flexible PCB로 제작하였다. 시제작 EVT의 −3 dB의 주파수 대역은 약 0.33 Hz ~ 3.9 MHz이며, 분압비는 약 42,270로 정격 전압의 120%인 AC 200 kV에서 5 V_{rms} (8 V_{max}) 이하가 되도록 설정하여 MU 등 데이터 취득장치의 허용 입력 범위 이내가 되도록 하였다. 정격 전압 170 kV의 6~18%인 10 kV, 20 kV 및 30 kV에서 전압 오차는 0.32% 이내, 위상차는 12.9분이었다. 이는 IEC 60044-7에 규정된 0.5급의 오차 허용값 이내로 정격 전압의 80~120%에서도 만족하는 결과이다. 본 논문의 스페이서 내장형 EVT로 기존 철심형 PT 또는 VT를 대체 시, GIS bay의 높이를 약 11% 축소가 가능하며, SF_6 주입량을 10% 이상 감소시킬 수 있어 전력기기의 친환경화에도 기여할 것으로 기대한다.

ORCID

Gyung-Suk Kil https://orcid.org/0000-0002-1672-2812

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구입니다 (No.20010965).

REFERENCES

[1] N. Presser and W. Olszewski, Contribution to CIGRE (2014).

[2] S. W. Kim, *Ph.D Thesis*, *A Study on the Phase-Asynchronous PD Diagnosis Method for Gas Insulated Switchgears*, p. 1-104, Korea Maritime and Ocean University, Busan (2017).

[3] W. Olszewski and M. Kuschel, International ETG Congress, p. 481-488 (2017).

[4] H. Heine, P. Guenther, and F. Becker, *Proc. 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)* (IEEE, Dallas, USA, 2016) p. 1-5. [DOI: https://doi.org/10.1109/TDC.2016.7519939]

[5] H. S. Shin, N. H. Kim, S. H. Lim, J. H. Kim, and G. S. Kil, *Proc. KIEEME Annual Autumn Conference* (KIEEME, Gyoungju, Korea, 2020) p. 62.

[6] S. H. Lim, N. H. Kim, H. S. Shin, and G. S. Kil, *Proc. KIEEME Annual Autumn Conference* (KIEEME, Gyoungju, Korea, 2020) p. 64.

[7] S. H. Lim, N. H. Kim, D. E. Kim, D. H. Ahn, H. S. Shin, and G. S. Kil, *Proc. KIEEME Annual Summer Conference* (KIEEME, Pyeongchang, Korea, 2021) p. 1.

[8] N. H. Kim, D. E. Kim, H. S. Shin, S. H. Lim, and G. S. Kil, *Proc. KIEEME Annual Summer Conference* (KIEEME, Pyeongchang, Korea, 2021) p. 17.

[9] IEC 60044-7:1997, Instrument Transformers - Part 7: Electronic Voltage Transformers (2017).

[10] A. J. Schwab and J.H.W. Pagel, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*,

PAS-91, 2376 (1972). [DOI: https://doi.org/10.1109/TPAS.1972.293394]

[11] V. Fister and H. J. Koster, *Proc. the 4th International Symposium on High Voltage Engineering* (ISH, Athens, Greece, 1983) No. 61.01.

[12] J. Meppelink and P. Hoper, *Proc. the 5th International Symposium on High Voltage Engineering* (ISH, Braunschweig, Germany, 1987) No. 71.08.

[13] S. A. Boggs and N. Fujimoto, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-19**, 87 (1984). [DOI: https://doi.org/10.1109/TEI.1984.298778]