

GIS 스페이스서 내장형 저전력 측정용 변압기의 설계 및 제작

박성관¹, 이경렬¹, 김남훈¹, 김철환², 길경석¹ 

¹ 한국해양대학교 전기전자공학과

² 국토교통부 철도시설안전과

Design and Fabrication of an LPVT Embedded in a GIS Spacer

Seung-Gwan Park¹, Gyeong-Yeol Lee¹, Nam-Hoon Kim¹, Cheol-Hwan Kim², and Gyung-Suk Kil¹

¹ Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

² Railway Facilities Safety Division, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong 30103, Korea

(Received December 5, 2023; Revised December 19, 2023; Accepted December 21, 2023)

Abstract: In electrical power substations, bulky iron-core potential transformers (PTs) are installed in a tank of gas-insulated switchgear (GIS) to measure system voltages. This paper proposed a low-power voltage transformer (LPVT) that can replace the conventional iron-core PTs in response to the demand for the digitalization of substations. The prototype LPVT consists of a capacitive voltage divider (CVD) which is embedded in a spacer and an impedance matching circuit using passive components. The CVD was fabricated with a flexible PCB to acquire enough insulation performance and withstand vibration and shock during operation. The performance of the LPVT was evaluated at 80%, 100%, and 120% of the rated voltage (38.1 kV) according to IEC 61869-11. An accuracy correction algorithm based on LabVIEW was applied to correct the voltage ratio and phase error. The corrected voltage ratio and phase error were +0.134% and +0.079 min., respectively, which satisfies the accuracy CL 0.2. In addition, the voltage ratio of LPVT was analyzed in ranges of -40~+40°C, and a temperature correction coefficient was applied to maintain the accuracy CL 0.2. By applying the LPVT proposed in this paper to the same rating GIS, it can be reduced the length per GIS bay by 11%, and the amount of SF6 by 5~7%.

Keywords: LPVT, PT, CVD, GIS, Spacer

1. 서론

변전소 운영 프로토콜 IEC 61850-9-2 (communication networks and systems in substations)의 자동화 시스템 표준은 전력 설비로 적용 범위가 확장되고 있으며, 다양한 제품이 시장에 출시·적용되고 있다. 한국전력공사는

2013년 신규 154 kV급 변전소를 시작으로 디지털 변전소 구축을 추진하여 2020년 1월 기준 약 60개소의 디지털 변전소를 운영하고 있으며 2034년까지 전 변전소의 디지털화를 계획하고 있다 [1,2]. 또한 디지털 변전소 운용의 상태 감시와 제어 신호는 지능형 전자장치(intelligent electronic device, IED)의 형식이어야 한다 [3].

그림 1은 GIS에서 사용되고 있는 탱크형 철심형 변압기 (potential transformer, PT)를 나타내었다. 기존 철심형 PT는 고전압 도체와 직접 접촉되어 있는 구조로 운전 중 절연 파괴로 인한 위험이 있다. 철심과 동선으로 이루어진 철심형 PT는 부피가 크고 무거워 별도의 설치 공간이 요구

✉ Gyung-Suk Kil; kilgs@kmou.ac.kr

Copyright ©2024 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 of tank type PT in GIS.

되며, 철심 코어의 히스테리시스 특성으로 인해 정확도가 낮다는 단점을 가지고 있다 [4]. 이를 대체하기 위해 디지털 변전소에 적합한 전자식 변압기(electronic voltage transformer, EVT)에 대한 연구가 지속되었지만, EVT에서 사용되는 직접 회로(integrated circuit, IC)와 같은 능동소자의 외부전원 필요, 외부 서지 유입에 대한 잦은 고장 등으로 인한 문제점이 존재한다 [5-7]. 그렇기 때문에 현재에는 수동소자만을 사용하는 저전력 측정용 변압기(low power voltage transformer, LPVT)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 국제 기준인 IEC에서도 EVT (IEC 60044-7)에서 LPVT (IEC 61869-11)로 전환을 진행하고 있다 [8-10].

본 논문에서는 변전소의 디지털화에 대응하여 기존의 철심형 PT를 대체할 수 있는 정격 전압 72.5 kV급 가스절연 개폐장치(gas-insulated switchgear, GIS) 스페이스 내장형 LPVT를 설계, 제작 및 평가하였다. 2장에서는 용량성 분압 센서의 원리와 온도에 따라 변화하는 비유전율의 이론에 대해 서술하였으며, 3장에서는 센서의 구조와 특징을 언급하였다. 4장에서는 IEC 61869-11에 따른 시제작 LPVT의 성능 평가 결과와 LabVIEW 기반의 평가 프로그램, 온도 보정 알고리즘을 제시하였으며, 5장에서는 LPVT의 적용 효과에 대해 설명하였다 [11,12].

2. 이론

LPVT의 전압 검출회로 구성은 IEC 61869-11에 따라 저항 분압, 용량성 분압, 저항-용량성 분압 및 수동 적분기를 포함한 용량성 분압의 4가지로 분류한다 [13]. 1차측 고전압과 직접 연결되는 저항 분압 방식은 일반적으로 저전압 측정에서 사용되며, 고전압 측정에는 주로 비접촉 측정

법 방식인 용량성 분압이 적용된다. 저항-용량성 방식은 저항 분압 방식과 동일하게 고전압 도체와 직접적으로 연결되어 있기에 절연 확보에 대한 문제점이 존재한다. 수동 적분기를 포함한 용량성 분압 원리는 미분된 신호를 적분하기 위한 별도의 적분기를 포함하게 되므로 본 논문의 스페이스 내장형에는 적합하지 않다. 본 논문에서 제안한 72.5 kV급 GIS 스페이스 내장형 LPVT에는 충분한 절연이 확보되고 출력 전압의 안정성을 고려하여 용량성 분압 방식을 적용하였다 [14].

2.1 용량성 분압 원리

용량성 분압은 고전압 도체와 일정 간격이 떨어져 있는 검출 전극 간 형성된 표류 정전 용량(C_H)과 검출 전극과 접지 간 형성된 정전 용량(C_L)을 이용하는 것으로, 그림 2에 LPVT에 적용된 용량성 분압 회로를 나타내었다 [15].

여기서 V_H 는 1차측 고전압, V_L 는 2차측 출력 전압, C_H 는 고전압 도체와 검출 전극 사이의 표류 정전 용량, C_L 는 검출 전극과 접지 사이의 정전 용량, 그리고 C_P 는 분압비 조정용 캐패시터이다. R_m 은 측정 장치의 입력 임피던스의 정합을 위한 출력 저항이며, 2차측 전압 V_L 은 다음 식 (1)과 같다.

$$V_L = \frac{C_H}{C_H + C_L + C_P} \times V_H \text{ [V]} \quad (1)$$

2.2 용량성 분압 회로의 온도 의존성

두 도체 사이 또는 도체와 접지 사이의 유전체는 자유전자가 없어 일반적인 상태에서는 전기가 통하지 않는 절연체의 특징을 보이지만, 전계가 가해졌을 때는 전기장 내에서 쌍극자 모멘트가 형성되어 극성을 가진다. 유전체의 유

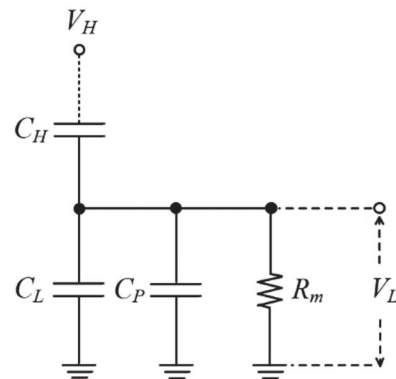


Fig. 2. Principle of CVD in LPVT.

Table 1. Relative permittivity of dielectric materials.

Material	Relative permittivity (ϵ_r)
Epoxy	3.5~4.5
Neoprene rubber	6.7
Silicon dioxide	3.9
Teflon	2.1

전율은 외부 전계에 의해 유전체 내 분극이 형성되는 정도를 나타내며, 대표적인 절연재료의 비유전율(ϵ_r)을 표 1에 나타내었다 [16,17].

유전체 내 쌍극자 모멘트에 의해 정해지는 비유전율은 원자의 이동도에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 유전체는 온도에 따라 원자 이동도가 달라져 유전체의 비유전율이 변화한다. GIS 스페이서를 구성하고 있는 절연물인 에폭시는 온도가 높아질수록 비유전율이 증가하고 반대의 경우 감소한다. 에폭시의 비유전율은 구성 물질에 따라 차이가 있으며 온도에 따른 비유전율 변화 정도 또한 에폭시 종류에 따라 차이가 있다 [18-21].

본 논문의 시제작 LPVT는 고전압 도체와 검출 전극 사이의 표류 정전 용량(C_H)을 통해 용량성 분압을 하기 때문에 GIS의 사용 온도에 따라 에폭시의 비유전율이 변화한다. 비유전율 변화로 인해 정전 용량이 달라지며, 일정 온도에서 측정된 표류 정전 용량을 기반으로 설정한 분압비는 온도에 의해 달라지게 된다. 그러므로 넓은 온도 범위에서 사용할 수 있는 높은 정확도의 LPVT를 제작하기 위해서는 온도에 따른 출력 분석을 통한 보상이 필요하다. 본 논문에서는 선형회귀 분석을 통한 온도 보상을 적용하였다.

Table 2. Specifications of prototype LPVT.

Parameters	Values	
Diameter [mm]	ϕ 230	
Height [mm]	12	
Sensing electrode	Width [mm]	3
	Thickness [oz]	1
Insulation layer [mm]	0.2	
Relative permittivity (ϵ_r)	4.7	

3. 설계 및 제작

시제작 LPVT는 용량성 분압 센서와 수동 소자로 이루어진 임피던스 정합 회로로 구성하였다. 용량성 분압 센서는 GIS 스페이서에 내장되는 구조이며, 외부의 진동과 충격에 견딜 수 있도록 flexible PCB 형태로 제작하였다. 또한 스페이서 성형 시 발생하는 열로 인한 센서의 변형을 방지하기 위해서 높은 열 안정성을 가지는 PCB (high Tg)를 사용하였으며, 세부 사양은 표 2와 같다 [15,22-24].

그림 3은 시제작 LPVT의 구조와 이를 내장한 스페이서 사진을 나타내었다. 시제작 LPVT의 센서는 원통형으로 고전압 도체와 동축 방향으로 내장 설치되었으며, 각 상의 전계의 간섭을 방지하고 GIS 내부에서 발생하는 진동 및 개폐, 단락 등에 의한 서지전압으로부터 센서를 보호하기 위해 센서 외측면에 금속 쉴드링을 설치하였다. 임피던스 정합 회로는 C_L 과 병렬로 연결한 분압용 커패시터 C_P 와 임피던스 정합을 위한 R_m 로 구성된다. C_H 와 C_L 은 절연체의 종류, 센서의 두께 및 길이 등에 의해 결정되며, 식 (1)에 따라 C_P 를 조정하여 분압비를 100,000:1로 설정하였다. IEC 61869-11에 따르면 정격 전압 범위를 사용한 LPVT

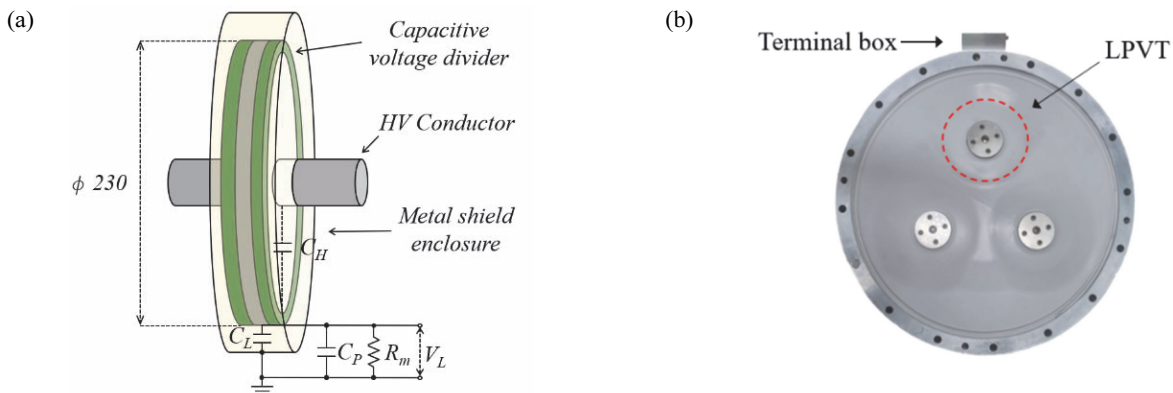


Fig. 3. The prototype LPVT: (a) structure and (b) photograph.

의 경우, 정격 변환비를 사용할 수 있다. 본 논문에서는 72.5 kV급 GIS 스페이서에 각 상에 내장 가능한 LPVT에 대해서 다루었기 때문에, 1차 정격 전압(38.1 kV)에서 디지털 계측기의 A/D 변환기 입력 레벨(± 3 V)로 변환시키기 위해 정격 변환비를 100,000:1로 설정하였다.

4. 평가 및 분석

4.1 실험계

제안한 LPVT의 성능을 평가하기 위해 그림 4와 같이 실험계를 구성하였다. 시험 전압은 유도전압조정기(IVR)와 고전압 변압기(HV Tr.)로 인가하였다. 피측정 전압을 측정하기 위한 고전압 분압기(HV divider)와 LPVT의 출력 전압은 디지털 오실로스코프(DSO)와 데이터 취득장치(DAQ)로 비교·분석하였으며, 실험에 사용된 기기의 사양은 표 3과 같다.

Table 3. Specifications of the equipment.

Item	Specification
GIS chamber	72.5 kV, SF ₆ insulation
HV Tr.	1 ϕ 440 V / 350 kV _{rms} , 100 mA
IVR	0~480 V, 50 kVA
HV divider	~150 kV _{rms} , 0.5% (full range) 0.1% (30~50 kV)
DSO	RTE-1054, 16 bit, 20 MHz, 2.5 GS/s
DAQ	NI-9220, 16 bit, sim., 100 kS/s, 0.01%

DAQ는 KOLAS 기관의 검교정으로 정확도 0.01%이며, HV divider는 측정 전 영역 0~150 kV에서 0.5%이지만, 본 실험의 측정 대역인 30~50 kV에서는 DAQ로 자체 비교한 결과, 정확도 0.1%로 나타났다. 본 측정계에서 인가 전압 측정용 HV divider와 LPVT의 출력 전압을 동시 샘플링의 DAQ로 검출 및 비교하기 때문에 측정계 내에서의 정확도는 충분한 신뢰도를 갖는다. 향후, 공인기관의 형식 시험 시에 본 HV divider의 표준 값과 편차가 있을 경우는 편차만큼 LPVT를 보정하면 동일한 성능을 얻을 수 있다.

4.2 정확도 평가

시제작 LPVT의 측정 성능은 IEC 61869-11에 따라 정격 전압의 80% (30.48 kV), 100% (38.10 kV) 및 120% (45.72 kV)에서 분압비와 위상 오차를 비교 분석하였다. LPVT의 정격 분압비는 100,000:1이며, 식 (2)와 (3)으로부터 분압비 오차(ε)와 위상 오차(φ_e)를 산출하였다 [13].

$$\varepsilon = \frac{K_r \cdot V_L - V_H}{V_H} \times 100 \% \quad (2)$$

$$\varphi_e = \frac{t(V_H) - t(V_L)}{0.77} \text{ [min.]} \quad (3)$$

식 (2)에서 K_r 는 정격 분압비, V_H 는 기준 분압기로 측정된 인가 전압, 그리고 V_L 는 LPVT의 출력 전압이다. 식 (3)에서 $t(V_H)$ 와 $t(V_L)$ 는 각각 기준 분압기로 측정된 인가 전압과 LPVT의 출력 파형의 영점 교차(zero crossing)이다. 위상 오차는 IEC 61869-11에 따라 minute 단위로 분석하기 위해 약 0.77로 나누어 us를 minute으로 환산하였다.

정격 전압의 80%, 100% 및 120%에서 측정된 V_H 와 V_L 및 식 (2)와 (3)으로 산출한 분압비 오차(ε)와 위상 오차(φ_e)

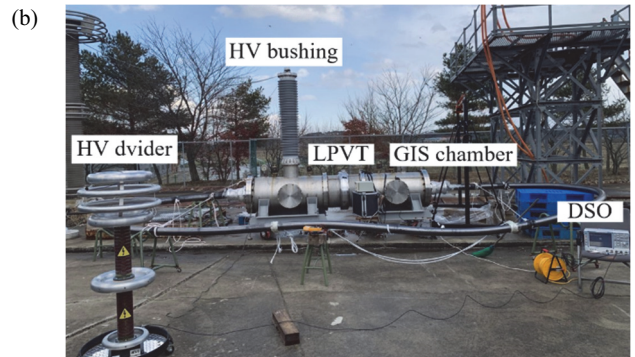
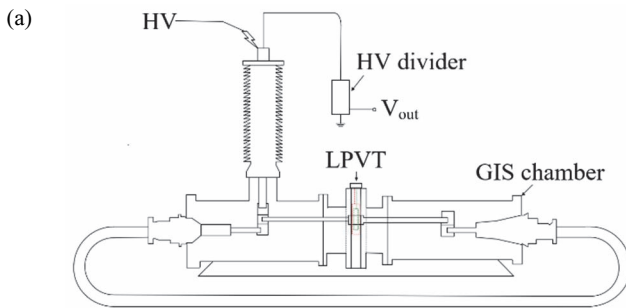


Fig. 4. Experimental set-up: (a) configuration and (b) photograph.

Table 4. Measurement results of the LPVT.

Test voltage	V_H [kV]	V_L [mV]	Ratio error ε [%]	Phase error φ_e [min]
0.8 U_r	30.444	303.963	0.157	77.927
1.0 U_r	38.102	379.755	0.334	77.921
1.2 U_r	45.722	445.920	0.285	77.925

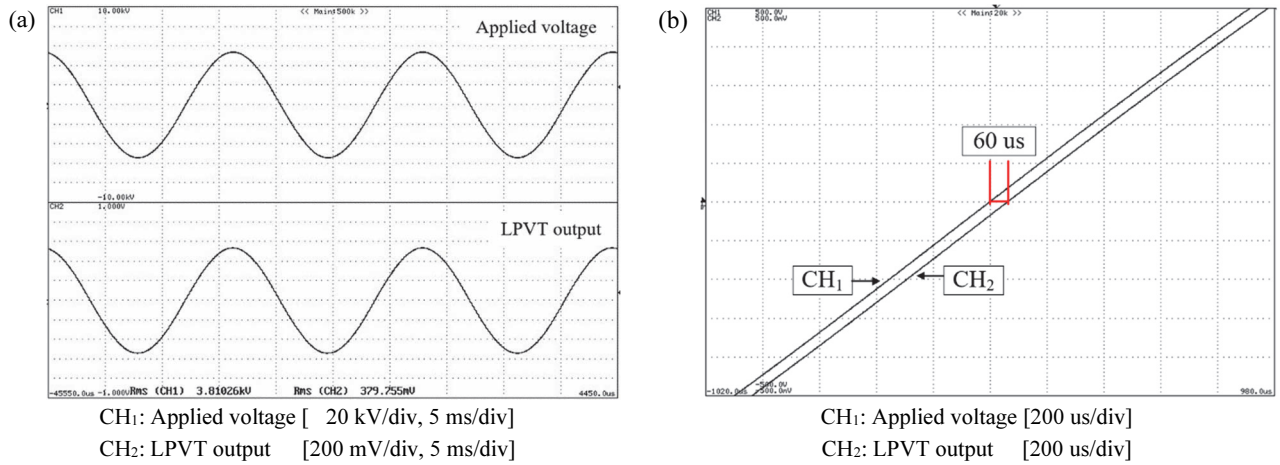


Fig. 5. Output waveforms at the rated voltage: (a) voltage waveforms and (b) phase deviation.

를 표 4에 나타내었다. LPVT의 최대 분압비 오차(ε_{max})는 정격 전압의 100% (1.0 U_r)에서 0.334%이었으며, 최대 위상 오차($\varphi_{e max}$)는 정격 전압의 80% (0.8 U_r)에서 77.927 min.이었다. 정격 전압에서 기준 분압기로 측정된 인가 전압 파형(CH1)과 LPVT의 출력 파형(CH2) 및 두 파형의 위상 오차를 그림 5에 나타내었다.

IEC 61869-11에 따라 분압비 보정 계수(CF_U)와 위상 오프셋 보정($\varphi_{cor \varphi 0}$)을 적용하여 LPVT의 분압비와 위상 오차의 정확도를 보정할 수 있다. 보정 분압비 오차($\varepsilon_{cor U}$)는 보정 계수(CF_U)를 0.900~1.100, 그리고 보정 위상 오차($\varphi_{e cor}$)는 위상 오프셋 보정($\varphi_{cor \varphi 0}$)을 ± 300 min.에서 적용한다. 보정계수를 적용한 분압비와 위상 오차는 다음 식 (4) 및 식 (5)와 같다 [13].

$$\varepsilon_{cor U} = \frac{CF_U \cdot K_r \cdot V_L - V_H}{V_H} \times 100 \% \quad (4)$$

$$\varphi_{e cor} = \varphi_e - \varphi_{cor \varphi 0} \text{ [min.]} \quad (5)$$

식 (4)에서 CF_U 는 분압비 보정 계수, K_r 는 정격 분압비, V_H 는 인가 전압, 그리고 V_L 는 LPVT의 출력 전압이다. 식 (5)에서 φ_e 는 위상 오차, 그리고 $\varphi_{cor \varphi 0}$ 는 위상 오프셋 보정이다.

IEC 61869-11에 따라 LPVT의 분압비 오차 및 위상 오차 보정을 위한 LabVIEW 기반 정확도 보정 알고리즘을 그림 6과 같이 설계하였다. 정확도 보정 알고리즘은 데이터 입력, 샘플링 신호처리, 수동 트리거, 신호 분석 및 보정 계수 적용으로 구성된다 [13]. 분압비 보정 계수(CF_U)와 위상 오프셋 보정($\varphi_{cor \varphi 0}$)이 적용된 보정 분압비 오차($\varepsilon_{cor U}$), 보정 위상 오차($\varphi_{e cor}$) 및 실시간 오차를 프론트 패널에 표시한다. 표 5에는 정격 전압의 80%, 100% 및 120%에서 알고리즘에 의해 보정된 결과를 나타낸 것이다.

전술한 바와 같이 측정의 정확도 평가를 위한 분압비 보정 계수(CF_U)와 위상 오프셋 보정($\varphi_{cor \varphi 0}$)은 각각 0.998와 -78 min.으로 설정하였다. 보정 계수를 적용 후, 보정 분압비 오차($\varepsilon_{cor U}$)와 보정 위상 오차($\varphi_{e cor}$)의 최댓값은 정격 전압에서 각각 +0.134%와 +0.079 min.이었다. 이는 IEC 61869-11의 정확도 0.2급 보정 분압비 오차 $\pm 0.2\%$ 와 보정 위상 오차 10 min.을 만족하는 값이다.

Table 5. Evaluation results of the LPVT after correction by IEC 61869-11.

Test voltage	Corrected ratio error $\varepsilon_{cor} U$ [%]		Corrected phase error $\varphi_{e\ cor}$ [min.]	
	Measured value	IEC requirement	Measured value	IEC requirement
0.8 U_r	-0.042	≤0.2	+0.073	≤10
1.0 U_r	+0.134		+0.079	
1.2 U_r	+0.085		+0.075	

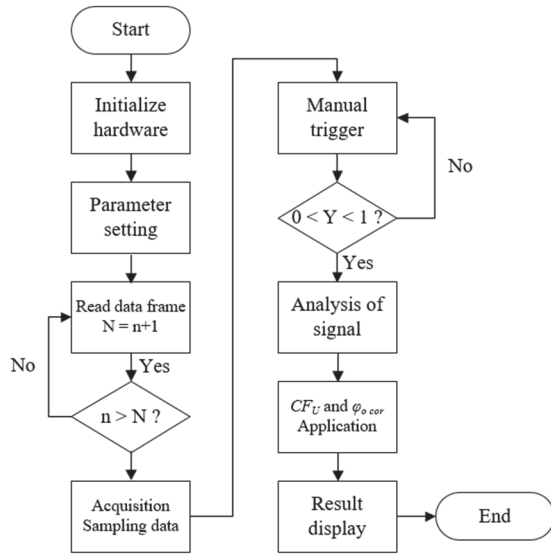


Fig. 6. Flowchart for LPVT accuracy correction.

4.3 LPVT 온도 보상

정전 용량은 온도에 따라 비유전율이 변하기 때문에, 용량성 분압 원리가 적용된 GIS 스페이서 내장형 시제작 LPVT는 사용 온도에 따른 출력 오차에 대한 보상이 필요하다. 따라서 보상 알고리즘을 설계하기 위해 IEC 61869-1에 명시된 사용 온도 범위인 -40~+40°C에서 LPVT의 출력 전압 변화를 분석하였다. HV Tr.과 IVR를 사용하여 10 kV_{rms}의 일정한 전압을 연속적으로 인가하였으며, DSO (16 bit, 20 MS/s, 2.5 GS/s)를 사용하여 LPVT의 출력을 측정하였다.

온도에 따른 LPVT 출력 측정 결과 상온(23°C)에서 100.283 mV이었으며, -40°C에서는 15% 감소하였고 +40°C에서는 3% 증가하였다. 전체 사용 온도 범위에서 정확도 0.2급을 만족하기 위한 LPVT의 출력 보상을 진행하였다. 데이터 기반 통계 분석 프로그램인 IBM사의 SPSS (statistical package for the social sciences)를 사용하여 LPVT의 출력 선형 방정식은 식 (6)으로 표현된다.

$$y = -0.0024t + 1.0707 \tag{6}$$

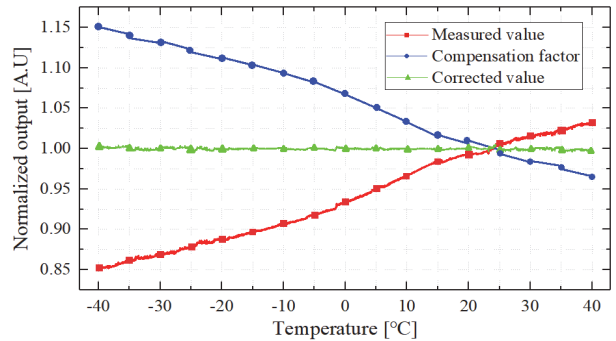


Fig. 7. Changes in the LPVT’s output as a function of the ambient temperature and the corrected result.

여기서 t 는 주위 온도이며, y 는 LPVT 출력 전압이다. 선형회귀 분석(linear regression analysis)을 통해 5°C 간격으로 16개 구간으로 나누어 LPVT의 출력에 대한 선형 방정식을 도출하여 온도 보상 계수를 산출하였다 [25]. 그림 7과 같이 사용 온도 범위에서 LPVT의 분압비 오차는 상온 기준으로 보상 전 -15.0~+3%에서 보상 후 -0.45~+ 0.40%로 개선되었으며, 정확도 0.2급을 유지하는 결과이다.

5. 결론

본 논문에서는 72.5 kV급 특별 고압용 GIS 스페이서 내장형 LPVT를 제작하고 IEC 61869-11에 따라 정확도를 평가하였다. 시제작 LPVT는 F-PCB를 검출 전극으로 3상 스페이서에 내장하고, 외부 간섭을 제거하기 위하여 외측면은 정전 차폐하였으며, 분압비 조정과 임피던스 정합 회로를 설계 및 적용하였다.

시제작 LPVT의 성능은 IEC 61869-11에 따라 정격 전압의 80%, 100% 및 120%에서 평가하였으며, LabVIEW 기반 보정 알고리즘으로 정확도를 분석하였다. 최대 보정 분압비 오차는 +0.134%, 보정 위상 오차는 +0.079 min.으로 정확도 0.2급을 만족하였다. 또한 -40~+40°C에서 LPVT의 분압비 변화를 분석하고 보상 알고리즘을 통해 정확도 0.2급을 유지시켰다.

본 논문에서 제안한 LPVT는 비접촉 방식으로 1차 고전압 도체와 완전한 절연을 확보할 수 있으며, 기존 철심형 PT를 대체함으로써, SF₆ 가스의 사용량 5~7% 감소에 따른 친환경화 및 GIS Bay당 설치 공간을 길이 방향으로 약 11% 줄일 수 있어 GIS의 소형 경량화와 저전력화에 기여할 수 있다.

ORCID

Gyung-Suk Kil

<https://orcid.org/0000-0002-1672-2812>

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구입니다(No.20010965).

REFERENCES

[1] K. M. Ha, S. H. Kim, G. W. Son, and S. R. Nam, *Trans. Korean Inst. Electr. Eng.*, **71**, 55 (2021).
doi: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2022.71.1.055>

[2] M. Stefanka, V. Prokop, and G. Salge, *Proc. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED, Stockholm, Sweden, 2013)* p. 103.
doi: <https://doi.org/10.1049/cp.2013.0563>

[3] IEC 61850-9-2:2011, *Communication Networks and Systems for Power Utility Automation - Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Sampled Values over ISO/IEC 8802-3*.

[4] N. H. Kim, D. E. Kim, S. H. Lim, G. S. Kil, and J. H. Kim, *Proc. KIEEME Annual Summer Conference* (KIEEME, Pyeongchang, Korea, 2022) p. 52.

[5] J. H. Jeong, D. E. Kim, G. S. Kil, and J. H. Kim, *Proc. KIEEME Annual Summer Conference* (KIEEME, Pyeongchang, Korea, 2023) p. 104.

[6] S. G. Kim, N. H. Kim, G. S. Kil, and K. Y. Kim, *Proc. KIEEME Annual Summer Conference* (KIEEME, Pyeongchang, Korea, 2023) p. 104.

[7] B. Djokic and E. So, *Proc. 2004 Conference on Precision Electromagnetic Measurements* (IEEE, London, UK, 2005) p. 86.
doi: <https://doi.org/10.1109/cpem.2004.305453>

[8] S. G. Park, D. E. Eon, N. H. Kim, K. Y. Kim, and G. S. Kil, *Proc.*

KIEEME Annual Summer Conference (KIEEME, Pyeongchang, Korea, 2023) p. 61.

[9] D. E. Kim, N. H. Kim, S. G. Kim, J. H. Kim, and G. S. Kil, *Proc. KIEEME Annual Summer Conference* (KIEEME, Pyeongchang, Korea, 2023) p. 61.

[10] A. Mingotti, L. Peretto, and R. Tinarelli, *Sensors*, **22**, 5804 (2022).
doi: <https://doi.org/10.3390/s22155804>

[11] IEC 61869-1:2023, *Instrument Transformers - Part 1: General Requirements*.

[12] N. H. Kim, D. E. Kim, S. G. Park, J. H. Jeong, and G. S. Kil, *Proc. KIEEME Annual Summer Conference* (KIEEME, Pyeongchang, Korea, 2023) p. 105.

[13] IEC 61869-11:2017, *Instrument Transformers - Part 11: Additional Requirements for Low Power Passive Voltage Transformers*.

[14] J. L. Liu, B. Ye, T. W. Zhan, J. H. Feng, J. D. Zhang, and X. X. Wang, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **58**, 161 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1109/tim.2008.927195>

[15] S. H. Lim, N. H. Kim, D. E. Kim, S. G. Kim, and G. S. Kil, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 353 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.4.6>

[16] J. Bonkerud, C. Zimmermann, P. M. Weiser, L. Vines, and E. V. Monakhov, *Sci. Rep.*, **11**, 12443 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92021-5>

[17] D. K. Kim, K. H. Kang, Y. S. Choi, and Y. S. Kwon, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **13**, 300 (2000).

[18] J. S. Park, J. H. Kim, and J. U. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **11**, 773 (1998).

[19] J. G. Hyun, S. Lee, S. D. Cho, and K. W. Paik, *Proc. Electronic Components and Technology* (ECTC, Florida, USA, 2005) p. 1241.

[20] Y. Feng, C. Gao, and E. Gao, *Proc. 2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology* (ICEEMT, Hangzhou, China, 2022) p. 6.

[21] C. Chen, Q. Sun, C. Wang, Y. Bu, J. Zhang, and Z. Peng, *Molecules*, **25**, 4128 (2020).
doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25184128>

[22] S. G. Kim, D. E. Kim, N. H. Kim, S. W. Kim, and G. S. Kil, *J. Korean Soc. Railw.*, **25**, 621 (2022).
doi: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2022.25.9.621>

[23] D. E. Kim, N. H. Kim, S. G. Kim, S. W. Kim, and G. S. Kil, *J. Korean Soc. Railw.*, **26**, 268 (2023).
doi: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2023.26.4.268>

[24] N. H. Kim, D. E. Kim, S. W. Kim, J. H. Kim, and G. S. Kil, *J. Korean Soc. Railw.*, **26**, 445 (2023).
doi: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2023.26.6.445>

[25] K. Kumari and S. Yadav, *J. Pract. Cardiovasc. Sci.*, **4**, 33 (2018).
doi: https://doi.org/10.4103/jpcs.jpcs_8_18