

부분방전 교정펄스 발생기의 표준화 시스템구축과 불확도

김광화, 이상화, 이현진, 강동식
한국전기연구원

Setup and Uncertainty of Standard System for Calibrating Pulse Generator of Partial Discharge

K. H. Kim, S. H. Yi, H. J. Lee, D. S. Kang
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper describes the standard system for calibrating pulse generator of partial discharge(PD) and its uncertainty. The system is consisted of digital pulse generator, digital recorder and evaluation software. The uncertainty requirement of calibrator charge is less than $\pm (0.1pC + 0.03q)$ and that of pulse duration is less than $\pm 10\%$. The system can generate various kind of calibration pulses such as single pulse, double pulses, oscillation pulse, long-duration pulse, random pulses and evaluate their uncertainty.

1. 서 론

현대 산업사회의 전기의 공급은 매우 중요하며 전력공급의 신뢰성 제고를 위하여 전력기기의 설계, 시험 및 제작기술의 향상과 운용기술의 고도화를 하고 있다. 이 일환으로 전력기기의 상태를 진단하는 부분방전 시험은 신뢰성을 높이는 데 직접적인 영향을 미치므로 최근 전력기기의 제작에 있어서 기기의 결함을 줄이기 위하여 부분방전량의 규제치가 IEC 등의 관련규격에서 규정하거나 강화하고 있다[1]. 전력기기가 일반적인 제품과 달리 고신뢰성과 장시간 사용에 따른 유지 및 보수비용의 저감을 필요로 하는 상반된 특성을 요구하고 있으므로 전력기기의 품질제고에 필수적인 기술이 부분방전시험 및 평가기술이다. 또한 전력기기가 컴팩트화와 초고압화로 되어 부분방전의 억제와 허용기준이 매우 낮아지고 있으며 이의 평가에서 정밀도를 높여야 하고 불확도를 낮추어야 할 필요성이 크게 증대되고 있다.

변압기, 차단기 등과 같은 전력기기에 대한 필수적인 부분방전 시험에 있어서 IEC 60270에서는 부분방전량 측정을 위한 교정펄스기의 불확도를 규제하고 있으므로 이를 유지하기 위한 교정기술의 표준화 시스템의 구축은 기기의 시험에 대한 신뢰성의 국제적인 인증과 국내 전력기기의 국제적인 기술이미지의 제고 및 수출경쟁력을 높이는 데 큰 역할을 할 것이다.

본 논문에서는 구축되는 부분방전 교정펄스 발생기의 표준화 시스템의 특성과 불확도 산출에 대해서 기술하였다.

2. 부분방전 교정펄스기의 표준시스템 구축

2.1 IEC 60270에서의 부분방전 펄스기의 요구특성

IEC 60270의 7.2.3항에서는 부분방전 교정용 펄스기의 특성을 전하량, 펄스상승시간 및 펄스반복율의 요구 불확도는 표 1과 같다.

이 규격에서는 펄스 교정기에 대해서 표준시험, 일상적인 시험, 동작시험 및 동작검사로 나누어져 있으며, 동작검사를 제외한 모든 시험에서는 전하량, 펄스상승시간, 펄스반복율을 측정하게 되어 있으나, 동작검사에서는 전하량만 측정하게 되어 있다.

<표 1> IEC 60270에서 펄스교정기의 불확도[1]

	Items	Uncertainty requirement	Note
Calibrator	Calibrator charge(q_0)	$\pm 5\%$ or $\leq 1pC$	IEC60270 (2000) Clause 7.2.3
Uncertainty	Pulse Rising time (t_r)	$\pm 10\%$ ($\leq 60ns$)	
	Pulse 반복주파수(N)	$\pm 1\%$	

2.2 표준 교정시스템용 부분방전 펄스기의 요구특성

독일 PTB(Physikalisch Technische Bundesanstalt)에서 교정펄스의 표준시스템 구축을 위해 PICOR (Programmable Impulse Charge Calibrator)를 개발하고 이의 국제적인 인증을 위해 유럽의 12개 관련 연구소, 학교, 업체에서 1996년부터 1988년까지 비교시험을 실시하였고 이 결과로부터 다음 표 2와 같은 불확도를 요구하였다.

여기에서 측정하는 항목은 IEC60270에서 측정하는 항목과는 다르지만, 실질적인 내용면에서 보면 펄스상승시간(IEC60270)과 표 2에서 규정한 펄스지속시간과 상한주파수가 대응된다. 그러나 펄스 반복주파수는 여기서 규정하고 있지 않다.

<표 2> PTB의 결과에 따른 펄스교정기 불확도[2]

	Items	Uncertainty requirement	Note
Calibrator	Calibrator charge(q_0)	$\pm (0.1pC + 0.03q)$	- q 는 방전량으로 1-500(pC) - Upper frequency limit는 PD측정기 주파수 대역과 관계있음
	Pulse duration (t_d)	$\pm 10\%$	
Uncertainty	Upper frequency limit	-	

2.3 부분방전 교정펄스기의 표준시스템의 구성

한국전기연구원에서는 부분방전 교정펄스기의 표준 시스템을 교정펄스발생장치, 펄스 전하량 측정시스템 및 평가 소프트웨어로 구성하였으며, 다음 표 3과 같은 특성을 가진다.

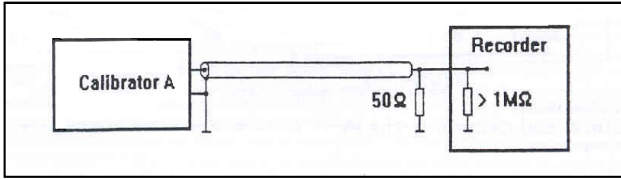
<표 3> 교정펄스발생기 표준시스템의 특성

	교정펄스발생기	측정시스템	비고
부분방전 교정 펄스기 표준시스템	- 14bit DAC(Digital to Analog Converter)에 의한 컴퓨터 제어 방식 - minimum time-interval : 500MHz - 최대진폭전압 : 10Volt - 펄스 최대 반복율 : 650Hz	- 디지털 오실로스코프 - 대역폭 : 2.5GHz - 샘플링주파수 : 40GS/s - 분해능 : 12bit	불확도는 표 2의 수준

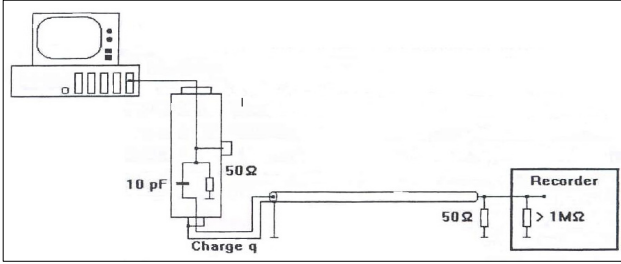
교정펄스발생장치는 디지털형의 펄스 발생기(Agilent 81150A)로 구성하였고 측정시스템은 디지털 오실로스코프(Tektronix DPO7254)로 구성하였다. 그리고 측정된 결과를 평가하고, 상기 펄스발생장치 및 측정시스템을 제어하는 프로그램이 제작되었으며, 사용한 언어와 프로그램은 Microsoft Visual Basic 6.0 SP6, Chart FX 6.2 및 Microsoft Access 2003 이다.

2.4 부분방전 교정펄스기의 방전량 평가방법[2,3,4]

부분방전 교정펄스의 발생기 평가방법은 다음의 그림 1과 같다. 그림 1a)는 일반 교정펄스발생기의 측정회로도를 보여주며, 그림 1b)는 표준 교정펄스 발생기의 구성도 및 측정 회로도를 보여주고 있다.



a) 일반 교정펄스발생기 측정회로도



b) 표준 교정펄스발생기 구성도 및 측정회로도
<그림 1> 교정펄스 발생기 평가방법

부분 방전량(q)을 측정하여 평가하는 방법은 2가지로, 첫 번째인 방법 1은 저항부하(R)에 펄스를 인가하여 그 때 흐르는 전류를 적분하는 방법으로 아래의 식(1)과 같이 계산한다. 이때 계산하는 방법은 3가지로 다음 표 4와 같이 분류된다.

$$q = \frac{1}{R} \int u dt \quad (1)$$

여기서 u는 저항부하(R)에서 전압강하이다.

<표 4> 방법 1에 의한 방전량 평가법

방법구분	측정평가법
방법 1a	측정기내부의 적분 소프트웨어사용
방법 1b	실험실에서 개발된 소프트웨어사용
방법 1c	PICOR와 같이 사용되는 EXCEL소프트웨어 사용

두 번째인 방법 2는 적분기를 사용하여 전압을 식 2와 같이 계산하고 평가한다. 이의 평가방법은 표 5와 같이 적분기에 종류에 따라 분류된다.

$$q = CU \quad (2)$$

여기서 C는 커패시터 정전용량이고, U는 충전전압이다.

<표 5> 방법 2에 의한 방전량 평가법

방법구분	측정평가법
방법 2a	전자식 적분기를 사용하여 전압측정
방법 2b	커패시터를 사용하여 충전전압측정

이와 같은 방법으로 반복 측정된 결과와 교정시스템의 특성을 고려하고, ISO Guide에 준하여, 방전량 q에 대한 불확도를 평가하게 된다.

표 2의 교정펄스 발생기의 펄스폭(Pulse duration), t_d 는 측정장치 내부 측정저항 50Ω 양단의 전압 펄스 파형에서, 최대값의 10%의 크기를 갖는 펄스 앞부분과 10%의 크기를 갖는 펄스 뒷부분사이의 시간 간격으로 정의 된다. 10% 지점은 매뉴얼하거나 소프트웨어로 지정한다.

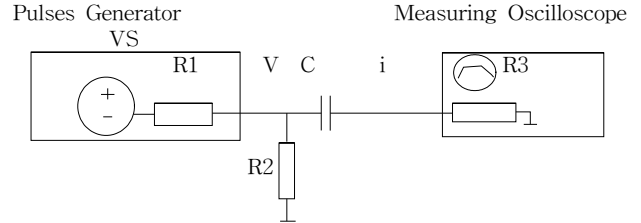
교정펄스 발생기의 올바른 표준화를 위해서는, 교정 펄스발생기의 교정용 임펄스의 주파수 스펙트럼이 정해진 밴드 내부에서 일정하여야 한다. 이러한 조건을 가장 간편하게 확인할 수 있는 방법은 펄스 스펙트럼의 상한주파수 (upper frequency limit)를 측정하는 것이다. 스펙트럼의 상한주파수는 측정저항 50Ω에 들어오는 펄스 진폭 성분이 주파수 0 Hz의 성분에 10%가 될 때의 주파수로 정의하며, 아래 세 가지 방법 중 하나로 측정 할 수 있다.

<표 6> 상한주파수 측정평가법

방법구분	측정평가법
방법 a	펄스를 디지털로 측정한 후 디지털 오실로스코프의 FFT루틴을 이용
방법 b	펄스를 디지털로 측정한 후 디지털 오실로스코프의 FFT루틴 이외의 방법을 이용
방법 c	·10kHz 나 100kHz의 주파수 밴드로 제한된 스펙트럼 분석기를 사용

2.5 부분방전 교정펄스기의 불확도 평가방법[2,3,4]

부분방전 교정펄스발생기의 모델 회로도는 그림 2와 같으며, 펄스발생기, 펄스발생용 회로 그리고 측정용 디지털 오실로스코프로 구성하였다.



[<그림 2> 부분방전 교정펄스기의 모델 회로도

여기서 Vs : Source Voltage of Pulses Generator. V : Output voltage of Pulses Generator. R1 : Output Impedance of Pulses Generator. R2 : Load Impedance of Module. C: Coupling Capacitance of Module. R3 : Input Impedance of Measuring Oscilloscope. i : current of R3이다.

이상의 모델 회로도에서 발생하는 펄스의 전하량은 다음의 식(3)과 같이 계산되며 이식을 적분하면 식(4)와 같이 표현된다.

$$q = \int_0^{\infty} i dt \quad (3)$$

$$q = V \cdot C \quad (4)$$

식(4)는 펄스의 입력부분의 파라미터 함수로 되어 있는 데 출력된 파형을 디지털 측정부분에서 검토하면 다음 식(5)와 같다.

$$q = \sum_{n=1}^N \frac{v_n}{R3} \Delta T \quad (5)$$

여기서 v_n 는 디지털 오실로스코프에서 샘플마다 읽는 전압값이며, ΔT 는 샘플시간 간격이다.

불확도의 평가에서 각 파라미터별로 감도 계수를 구하여 불확도의 양을 평가함으로 펄스발생기와 펄스발생회로의 감도계수는 식(4)로부터 구하면 식(6) - 식(8)으로 표현할 수 있다. 그리고 측정부분에서의 감도계수를 구하면 식(9)와 식(10)과 같이 표현된다.

$$cs = \frac{\partial q}{\partial R1} = - \frac{R2 Vs C}{(R1 + R2)^2} \quad (6)$$

$$cr2 = \frac{\partial q}{\partial R2} = \frac{Vs C}{(R1 + R2)} \left(1 - \frac{R2}{R1 + R2}\right) \quad (7)$$

$$cc = \frac{\partial q}{\partial C} = \frac{R2 Vs}{(R1 + R2)} \quad (9)$$

$$cr3 = \frac{\partial q}{\partial R3} = \frac{-1}{R3^2} \sum_{n=1}^N v_n \cdot \Delta T \quad (9)$$

$$c\Delta T = \frac{\partial q}{\partial \Delta T} = \frac{1}{R3} \sum_{n=1}^N v_n \quad (10)$$

이상의 감도계수의 식으로부터 각각의 편차 양인 u(xi)를 구하여 식 (11)에 대입하여 종합적인 편차값을 구하고 각각의 자유도로부터 식(12)을 사용하여 유효 자유도를 구하고 그로부터 식 (13)을 사용하여 종합적인 커버리지 팩터(Coverage factor)를 구

한다. 불확도는 커버리지 팩터와 종합적인 편차값의 곱으로 나타난다.

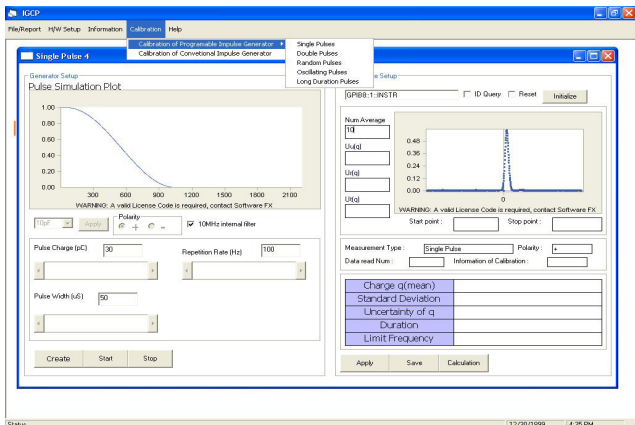
$$uc(y_i) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(c_i u(x_i))^2} \text{-----(11)}$$

$$v_{eff} = u_c^4 / \sum_{i=1}^n \frac{|c_i u(x_i)|^4}{v_i} \text{-----(12)}$$

$$k = 1.96 + \frac{2.5}{v_{eff}} + \frac{2.3}{v_{eff}^2} + \frac{2.2}{v_{eff}^3} + \frac{3.7}{v_{eff}^4} \text{---(13)}$$

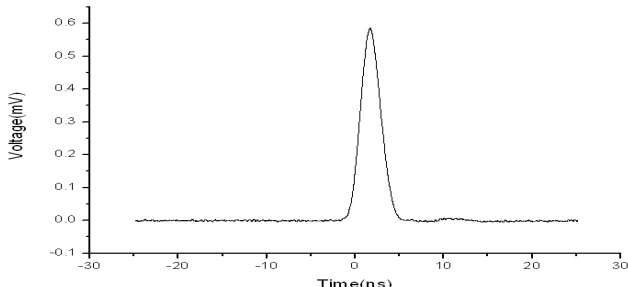
2.6 부분방전 교정용 임펄스 발생기

전기연구원의 부분방전 교정펄스기는 다양한 형태의 파형을 제공하며, 그림 3과 같이 소프트웨어 화면 상단의 Calibration 메뉴에서 Single Pulse, Double Pulse, Random Pulse, Oscillation Pulse, Long-duration Pulse 로 분류된 종류의 펄스를 선택할 수 있다.



〈그림 3〉 부분방전 교정펄스 발생기 표준화 시스템의 화면 예

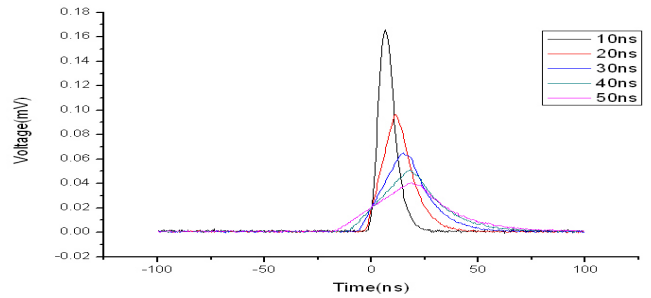
그림 4는 부분방전 교정펄스 발생기의 single pulse mode의 펄스 생성 예이다. 이 모드에서는, 설정된 반복률(repetition rate)로 일정하게 반복되는 방전펄스를 생성한다. 이러한 부분방전 교정펄스를 디지털 DAC를 사용하여 만들기 위하여 디지털 펄스 발생기에서는 상승시간을 2ns 정도로 빠르게 일정전압으로 상승시킨 후 일정시간(150ns 이상) 유지한 다음 전압을 느리게 1ms 이상의 시간동안 하강시키는 계단파를 발생시킨다. 이와 같은 전압을 그림 1 b)의 커패시터와 저항 모듈을 통과시키면 그림 3 파형과 같은 부분방전 교정펄스를 발생시킬 수 있다. 2ns의 상승시간은 펄스 발생장치의 샘플 간격으로 생성할 수 있는 가장 빠른 시간이며, single pulse mode에서 변동되지는 않는다. 펄스의 극성을 선택하면 양, 음의 두 가지 형태의 펄스를 생성할 수 있으며, 설정된 펄스의 형태는 실제 발생하기 이전에 프로그램화면의 왼쪽 상단에 표시하여 확인할 수 있게 하였다.



〈그림 4〉 부분방전 교정펄스발생기 single pulse mode 펄스 예

부분방전 교정펄스의 폭은 long duration pulse mode에서 변화시킬 수 있다. 상승 기울기가 single pulse mode보다 더 낮은 계단파를 생성시키면 커패시터 저항모듈을 통과하면서 넓은 펄스 폭의 교정펄스를 생성시키게 된다. 다양한 기울기의 계단파와 이것으로 생성된 동일한 방전량의 교정용 펄스의 예를 그림 5에 제시하였다. 동일한 방전량이라 하더라도 각각의 주파수 스펙트

럼은 상이하며, 더 넓은 폭을 가진 펄스의 상한주파수가 더 낮다.



〈그림 5〉 부분방전 교정펄스 발생기 long duration pulse mode의 펄스 예

2.7 부분방전 교정펄스기의 불확도 계산 예

부분방전 교정펄스 발생기의 특성은 표 7과 같고 이 표로부터 불확도를 '2.5' 항에 따라 구하면 아래와 같이 계산된다.

〈표 7〉 불확도 계산표

항목	u(xi)(pC)	ci	ciu(xi)(pC)	vi
Pulse Gen.				
rounding-off	2.89x10 ⁻⁴ C	1	2.89x10 ⁻⁴ C	1000
offset(OV)	5x10 ⁻⁴ C	1	5x10 ⁻⁴ C	8
Amplitude Accuracy	4x10 ⁻⁴ VC	1	4x10 ⁻⁴ VC	8
R1				
Absolute temperature	2.5x10 ⁻⁵ 25-20 VC	1	2.5x10 ⁻⁵ 25-20 VC	8
C				
temperature	1.73x10 ⁻⁵ 25-20 VC	1	1.73x10 ⁻⁵ 25-20 VC	8
Digital Osc.				
Mean Reading	5.484x10 ⁻² /2.23	1	5.484x10 ⁻² /2.23	10
DC Accuracy (10mV)(전압계 급에 따라)	1.25x10 ⁻³ q	1	1.25x10 ⁻³ q	8
Clock Accuracy	1.6x10 ⁻⁷ q	1	1.6x10 ⁻⁷ q	8

표에서 C가 10pF이고 V가 4(V)일 때 식(11)를 사용하여 종합적인 편차값을 상기의 표로부터 구하면 0.0593(pC)이고, 식(12)을 사용하여 각각의 자유도로부터 유효자유도를 구하면 14.9이다. 유효 자유도로부터 식(13)을 사용하여 커버리지 팩터를 구하면 2.138이고 이값과 종합 편차값을 곱한 확장불확도 값은 0.1268(pC)이다.

3. 결 론

이상과 같이 한국전기연구원에서 부분방전 교정펄스 표준시스템을 구축하여 부분방전 교정펄스기의 신뢰성을 확인할 수 있는 불확도 평가기술을 확보하여 국내의 관련 업체, 학교 등에 교정 서비스를 할 수 있는 기반을 마련할 수 있을 것이다. 또한 선진국 수준이상의 다양한 형태의 파형을 가지는 가변형 부분방전 교정 시스템을 구축하였고, 6월에 독일 표준연구기관인 PTB와의 비교평가를 통한 시스템 검증을 실시한 예정이다. 이로서 국내외 부분방전 시험 및 평가기술의 발전에 기여를 할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC 60270 Partial Discharge, 2000
- [2] K. schon, W. Lucas, "intercomparison of Impulse charge Measurement" European Commission Standards, Measurements and Testing Programme Project SMT4-CT95-7501, 1998
- [3] K. Schon, H. D. Valentini, "Programmable Impulse Charge Generator for Calibrating PD Instrument", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, 1997.
- [4] Robin E. Bently, "Uncertainty in Measurement: the ISO Guide", 6th Edition, National Measurement Laboratory CSIRO, July 2003.