

평행판 전극과 전기장 센서를 이용한 교류 고전압 발생원의 측정범위 확장기술 개발

論 文
55C-9-5

Development for Measurement Range Extension Technique of AC High Voltage Source using Parallel Plates Electrode and Electric Field Sensor

姜 鎰 洪* · 鄭 在 甲[†] · 柳 濟 天** · 李 相 和* · 金 奎 泰* · 金 明 壽* · 韓 相 玉***
(Jeon Hong Kang · Jae Kap Jung · Jea Cheon Ryu · Sang Hwa Lee · Kyu Tae Kim
· Myungsoo Kim · Sang Ok Han)

Abstract - The output voltage value of AC high voltage source has been usually measured by employing the high voltage divider of inductive or capacitive type. In the study, we have developed a new method for measuring the output voltage up to 60 kV using parallel plates electrode and electric field sensor, which are constructed by home-made. Unlike the conventional method using a high voltage divider, this developed method makes it possible to extend the range of output voltage from known low voltage measurement to high voltage measurement. From the linearity measured between electric field and applied voltage in the output voltage range of 1 kV ~ 30 kV, the output voltage value up to 60 kV can be obtained by the electric field measurement using the electric field sensor. The output voltage value obtained using the method is consistent with that obtained using high voltage divider within corresponding uncertainties.

Key Words : High Voltage Divider, Parallel Plates Electrode, Electric Field Sensor, Uncertainty.

1. 서 론

고전압 발생원은 발전, 송전, 배전설비와 관련된 국가 모든 산업활동 및 국민생활에 에너지를 공급하기 위해 필수적인 중전기이다. 고품질의 전력확보를 위해 고전압 발생원의 신뢰성에 대한 요구가 갈수록 증대되고 있고, 이에 고전압 발생원의 성능에 대한 정밀측정이 요구된다. 현재 수십 혹은 수백 kV까지의 교류 고전압 발생원을 정밀측정하는 방법은 저항형, 용량형 분압기 혹은 고전압 변성기를 이용한다^[1-5]. 이는 고전압을 직접 측정하는 것이 불가능하기 때문에 낮은 전압으로 분압시켜 측정을 한 후 고전압 분압기의 분압비 혹은 전압 변성기의 정격변환비를 곱하여 고전압 발생원의 전압을 정밀 측정한다.

현재 국내 산업체에서 사용하고 있는 고전압 발생원의 최대 출력값은 1800 kV이다. IEC 규격에 의하면^[6] 고전압 발생전압의 5분의 1에 해당하는 교류 360 kV까지의 전압에 대한 측정 및 직선성을 평가해 주어야 한다. 이를 위해 국가표준기관에서 소급을 받은 약 360 kV까지의 정격전압을 가진 고전압 분압기나 고전압 변성기가 요구된다. 그러나 현

재 우리나라의 국가표준기관인 한국표준과학연구원에서는 200 kV까지 고전압 표준이 확립되어 있으므로 360 kV까지 고전압 발생원을 교정해 줄 수가 없는 현실이다. 따라서 200 kV의 고전압 표준값으로부터 360 kV까지 고전압을 교정할 수 있는 고전압 측정범위의 확장기술이 요구된다.

본 연구에서는 360 kV까지 고전압 측정범위 확장을 위한 가능성을 검토하기 위한 기초 선행연구로서 30 kV의 전압 표준값으로부터 60 kV의 고전압을 측정할 수 있는 장치를 개발하였다. 이 방법은 아래 위로 배열된 평행판 전극과 전기장 측정을 위한 원형 센서를 이용하는 것이다. 고전압 측정범위의 확장방법은 전압출력값을 정확하게 알고 있는 30 kV 이하의 낮은 범위에서 얻어진 전기장에 대한 고전압의 선형적인 증가로부터 30 kV 이상의 미지의 고전압 출력값을 전기장의 측정으로 계산하여 알 수 있다. 또한 이러한 방법으로 얻은 측정값에 대한 불확도도 같이 분석하였다. 본 방법을 이용하여 얻은 고전압 발생원의 출력전압값을 고전압 분압기로 직접 측정한 결과와 비교하여 불확도 내에서 측정값들의 일치도를 확인함으로써 본 측정기술의 유효성을 검증하였다.

본 연구에서 개발한 고전압 측정 방법이 실제로 산업체에 적용되어 중전기 업체에서 평행판 전극과 전기장 측정용 센서를 직접 제작한다면 교정비용과 시간을 매우 절감할 수 있을 것이므로 아주 유용한 방법이 될 것으로 예상된다. 이러한 평행판 전극과 센서는 적은 비용으로 제작 가능할 뿐만 아니라 한번 제작하면 거의 영구적으로 사용가능하다는 장점이 있다.

[†] 교신저자, 正會員 : 한국표준과학연구원 책임연구원

E-mail : jkjung@kriss.re.kr

* 正會員 : 한국표준과학연구원

** 正會員 : 케이엠시 주식회사

*** 正會員 : 충남대학교 전기공학과 교수

接受日字 : 2006年 7月 20日

最終完了 : 2006年 8月 11日

2. 고전압 측정범위 확장 기술

2.1 전기장 측정장치의 구성

전기장 측정은 그림 1과 같이 아래와 위로 평행하게 배열된 평행판 전극과, 전극에 고전압을 인가하기 위한 교류 고전압 발생원, 전기장 측정을 위한 원형 센서, 센서로부터의 출력 전압값을 측정할 수 있는 디지털 오실로스코프로 구성된다.

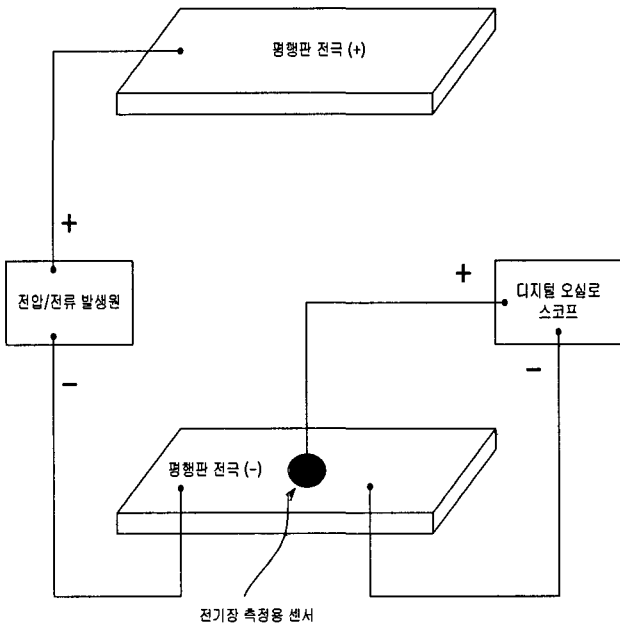


그림 1. 평행판 전극과 전기장 측정센서를 이용한 고전압 발생원의 측정시스템 구성도

Fig. 1. Constitution of measurement system of a high voltage source using parallel plates electrode and electric field sensor

그림 1에서의 평행판 전극은 1 m(가로) × 1 m(세로) × 0.03 m(두께) 합판의 양면에 Cu foil을 부착하여 제작하였다. 또한 평행판 전극간의 거리는 0.1 m ~ 1 m 간격에서 대략 0.1 m 간격으로 단계적으로 바꿀 수 있게 하였다. 전기장 측정용 센서는 직경 110 mm, 두께 3 mm의 원형 에폭시기판으로 만들었으며, 센서 출력전압은 디지털 오실로스코프(TDS1012)로 실효값을 측정함으로써 전기장의 세기를 측정한다.

2.2 전기장 측정센서를 이용한 고전압 측정 원리 및 실험

평행판 전극에 가한 전압과 전기장 측정센서의 출력(E)과의 관계는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$E = f\left(\frac{V}{d}\right) \quad (1)$$

여기서 V 는 평행판 전극에 인가된 전압이고, d 는 평행판 전극 간의 간격이다. 함수 f 는 전압과 극판 간격에 의존하는 함수이다. 실제로 평행판 전극이 무한대로 큰 것이 아니기 때문에

센서의 출력이 $E = \frac{V}{d}$ 가 아니고, 식(1)과 같이 전압과 극판 간격에 따라 함수 f 가 달라진다. 또한 고전압을 가하고 전기장을 측정할 때 전기장 측정용 센서기판과 측정기기를 연결하는 측정도선의 길이와 도선의 위치변화에 따른 임피던스의 변화로 전기장의 왜곡이 생긴다. 이로 인해 측정 전압의 큰 차이를 가져온다. 따라서 동일한 평행판 전극 간격과 인가전압에도 측정도선의 변화에 따라 센서측정전압이 다르게 나타나므로 측정의 재현성을 위해서 동일한 조건으로 실험을 해야 한다.

식 (1)의 전기장에 대한 전압과 극판간격의 상관관계함수 f 를 얻기 위해 첫째로 극판간격을 고정시키고 전압을 증가하면서 전기장을 측정하였고, 둘째로 전압을 고정시키고 극판간격을 변화시키면서 전기장을 측정하였다. 첫 번째 실험은 먼저 아래 위로 배열된 평행판 전극간 거리(d)를 고정시키고 표준 전압 발생원(FLUKE 5720A)으로 0.1 kV ~ 1 kV의 범위에서 전압을 단계적으로 증가시키면서 센서출력 전기장을 측정하였다. 이러한 실험은 극판간격 $d = 91.1 \text{ cm} \sim 985.4 \text{ cm}$ 의 범위의 총 10개의 극판간격에서 전압을 증가시켜 가면서 센서출력을 측정하였고 측정결과를 그림 2에 나타내었다.

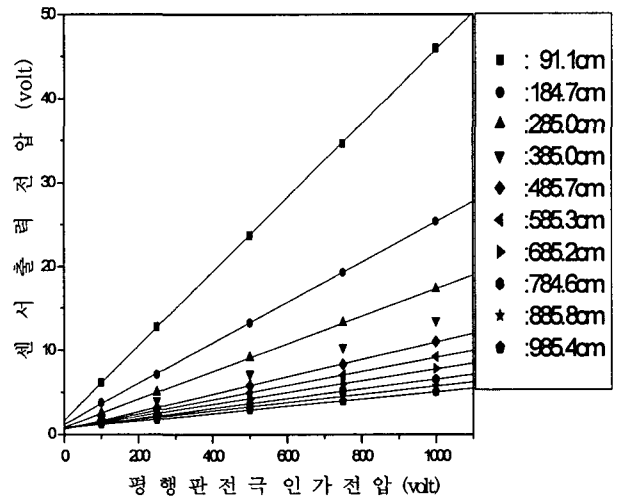


그림 2. 평행판 전극의 간격을 고정시키고, 총 10개의 다른 극판간격에서 인가전압을 증가시키면서 측정한 센서 출력전기장

Fig. 2. Sensor output electric field measured as a function of applied voltage at ten fixed distances between two plates.

그림 2의 측정결과는 모든 극판간격에서 센서출력전기장 (E)과 인가전압(V)은 비례함을 알 수 있고($E \propto V$), 극판의 간격이 좁을수록 인가전압에 대한 센서출력전압의 증가율이 커짐을 알 수 있다. 이러한 방법을 이용하여 전압을 증가시키면서 센서출력 전기장을 측정하여 전기장에 대한 전압의

관계함수를 얻을 수 있다.

두 번째로는 인가전압(V)을 일정하게 유지한 채 평행판 전극 간격(d)을 단계적으로 바꾸면서 실험을 하였다. 인가전압은 V = 100 V, 250 V, 500 V, 750 V, 1000 V에서 측정하였고, 결과는 그림 3에 나타내었다.

그림 3의 곡선은 아래의 식으로 피팅을 하였다.

$$E = \frac{V}{d^n} \quad (n < 1) \quad (2)$$

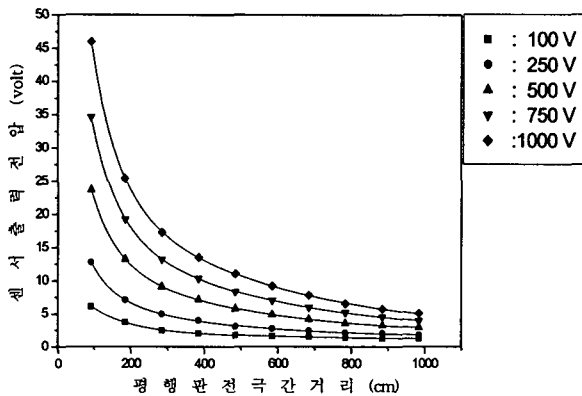


그림 3. 평행판 전극의 인가전압을 일정하게 유지시킨 채, 총 5개의 다른 전압에서 평행 전극판 거리를 변화시키며 측정한 센서출력 전기장

Fig. 3. Sensor output electric field measured as a function of the distance between two plates at five fixed applied voltage.

센서출력전기장(E)이 거리(d)에 일차함수로 반비례하지 않고 식 (2)와 같이 지수함수적으로 감소하였다. 식 (2)의 지수 n은 일정한 값을 가지지 않고 극판 인가전압 V가 커질수록 1에 근접하였다. 또한 지수 n은 동일한 극판 인가전압에서도 평행판 전극간 거리가 달라짐에 따라 변하기에 센서출력전압만으로 극판인가전압을 정확히 알 수가 없다. 이 결과는 평행판 전극의 크기가 무한대가 아니고 1 m × 1 m로 제한됨에 따라 나타난 것으로 생각되며, 이러한 평행판 전극간 거리에 따른 센서출력전기장의 관계함수는 근사함수가 복잡하여 센서출력전압으로 극판 인가전압을 정확히 계산하기는 어렵다.

결과적으로 위의 두 측정 결과로부터 알 수 있는 것은, 평행판 전극구조에서 극판간격을 일정하게 유지한 상태에서 측정한 센서 출력전기장과 극판 인가전압은 직선적인 함수로 표현할 수 있으며, 이로부터 센서출력전압만을 측정하면 미지의 극판 인가전압도 식(1)을 이용하여 간단하면서도 정확하게 알 수 있다는 것이다. 따라서 이 방법을 이용하여 고전압 발생원의 측정범위를 확장하고자 한다.

2.3 전기장 측정센서를 이용한 고전압 발생원의 측정범위 확장

앞서 논의한 결과를 바탕으로 고전압 발생원의 측정범위를 확장하기 위하여 전기장 측정센서를 이용한 고전압 발생원 측정시스템은 그림 1과 동일하고 평행판 전극간 거리(d)는 885.8 mm로 일정하게 유지하였다. 고전압 발생원의 측정범위 확장은 아래와 같이 두 단계로 나누어진다.

1) 첫 번째는 출력값을 정확히 알고 있는 고전압 발생원을 이용하여 1 kV ~ 30 kV 까지의 고전압을 평행판 전극에 인가하여 디지털 오실로스코프로 전기장 측정센서의 출력전기장(E)을 측정한다. 그 측정결과를 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 30 kV 까지의 실험결과를 피팅한 결과 전기장 측정센서의 출력전기장(E)과 전압(V)의 관계는 선형적이었. 관계함수 f는 아래와 같이 주어진다.

$$y = 1.2502x + 0.04442 \quad (3)$$

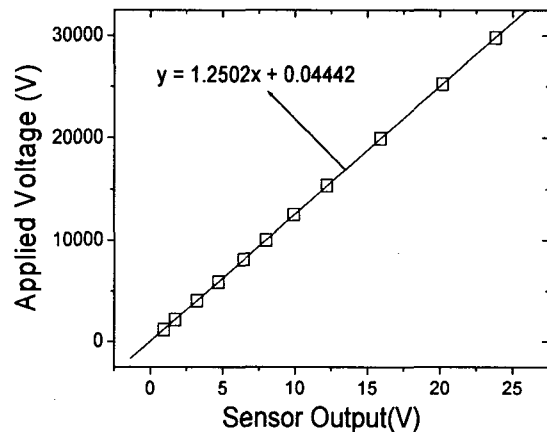


그림 4. 1 kV ~ 30 kV 까지의 인가전압을 증가시키면서 측정한 센서의 출력 전기장

Fig. 4. Sensor output electric field measured as a function of the applied voltage in the voltage range of 1 kV ~ 30 kV.

식 (3)에서 y는 고전압 발생원의 전압(V), x는 센서의 출력전기장(E)에 해당한다.

2) 두 번째 단계는 첫 번째 단계의 전압범위 1 kV ~ 30 kV에서 구한 관계함수 f를 이용하여 미지의 고전압 발생원 40 kV ~ 60 kV 까지의 전압을 전기장의 측정으로 교정하는 것이다. 이는 미지의 고전압 발생원의 40 kV ~ 60 kV의 고전압을 평행판 전극에 인가하며 센서출력전기장을 측정한다. 앞서 구한 식 (3)의 관계함수 f의 x 변수에 전기장 센서의 출력전기장을 입력하고, 이때 계산된 y변수 값이 전기장 측정센서로 측정된 고전압이다. 40 kV ~ 60 kV에서 전기장의 측정으로 계산된 고전압의 출력전압을 표 1에 나타내었다.

표 1. 고전압 1 kV ~ 30 kV 범위에서 측정된 결과로 얻은 관계함수로부터 미지의 40 ~ 60 kV 까지의 고전압을 센서출력전기장의 측정으로부터 얻은 결과

Table 1. Output voltage value of 40 ~ 60 kV calculated by the electric field measurement from the linearity function obtained between electric field and applied voltage in the output voltage range of 1 kV ~ 30 kV.

미지의 고전압 발생원의 정격전압(kV)	센서출력 전기장(V)	관계함수로 얻은 고전압 발생원 출력전압(kV)
40	32.23	40.33
50	38.83	48.59
55	43.67	54.64
60	47.72	59.70

3. 불확도 평가 및 측정방법의 유효성 검증

전기장 측정센서를 이용한 고전압 측정기술의 불확도의 평가는 불확도 요인을 찾아 요인별 표준불확도(u_1, u_2, \dots)와 자유도를 구하고 이로부터 상대 합성 표준불확도와 유효 자유도를 구한다. 유효 자유도와 신뢰수준에 따른 포함인자를 찾아 상대 합성 표준불확도에 곱하면 상대 확장 불확도(U)가 된다. 여기서 포함인자는 2 이므로 상대 확장 불확도(U)는 아래와 같이 표현된다.^[7]

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + \dots} \quad (4)$$

표 2. 전기장 측정센서를 이용한 고전압 측정값에 대한 불확도 총괄표.

Table 2. Uncertainty budget for output voltage measured using electric field sensor.

불확도 요인	단위 %			
	40 kV	50 kV	55 kV	60 kV
반복측정, u_1	0.52	0.79	0.69	1.05
교류 전압원의 정확도, u_2	0.50	0.50	0.50	0.50
전기장의 왜곡효과, u_3	0.40	0.40	0.40	0.40
전극판의 기하학적 크기, u_4	0.20	0.20	0.20	0.20
fitting 오차, u_5	0.96	0.96	0.96	0.96
상대 합성 표준불확도	1.28	1.41	1.36	1.57
상대 확장 불확도, U (k=2)	2.56	2.83	2.72	3.15

전기장 측정센서를 이용한 고전압 측정시 불확도 요인을 정리하여 각각 표 2의 첫 번째 열에 나타내었다. 고전압 값(40 kV, 50 kV, 55 kV, 60 kV)에 대해 평가된 각 불확도의 크기를 나타내었고, 상대 합성 표준불확도와 상대 확장 불확도를 각각 표 2의 마지막 두 열에 나타내었다. 고전압 측정값에 대한 상대 확장 불확도는 약 3.15 % 이내이다.

한편 전기장 측정센서를 이용한 고전압 측정기술의 유효성을 검증하기 위해 고전압 발생원을 고전압 분압기로 직접 측정된 결과와 표 3에서 서로 비교 하였다. 표 3의 마지막 열에 두 방법에서의 얻은 고전압 값에 대한 상대차이를 나타내었다. 상대차이는 아래와 같이 정의된다.

$$\text{상대차이 (\%)} = \frac{V_D - V_E}{V_E} \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

여기서 V_D 는 고전압 분압기로 측정된 고전압 값이고, V_E 는 전기장 측정센서로 측정된 고전압 값이다. 상대차이는 정격전압 40 kV, 50 kV, 55 kV, 60 kV 에서 각각 -0.37 %, -0.37 %, -0.08 %, -0.18 % 이었다. 이는 두 방법에 대한 불확도가 약 3 % 임을 감안하면 상당히 양호한 일치도이다.

표 3. 두 서로다른 방법에 의해 측정된 고전압 발생원의 출력전압의 비교.

Table 3. Comparison of output voltage value of high voltage source measured by two different methods.

정격전압 (kV)	전기장 측정센서로 측정된 고전압 출력전압(kV)	고전압 분압기로 측정된 고전압 출력전압(kV)	상대차이 (%)
	40	40.33	
50	48.59	48.41	-0.37
55	54.64	54.59	-0.08
60	59.70	59.59	-0.18

4. 논의 및 결론

현재까지 고전압 분압기를 이용한 고전압 교정방법을 대체하여 전기장 측정센서와 평행판 전극을 이용하여 고전압 발생원의 교정 및 측정범위 확장하는 방법에 대하여 논의하였다. 이는 전압범위 1 kV ~ 30 kV에서 구한 전기장에 대한 고전압의 관계함수 f 를 이용하여 미지의 고전압 발생원 40 kV ~ 60 kV 까지의 전압을 전기장의 측정으로 교정하는 것이다. 본 방법을 이용한 40 kV ~ 60 kV 까지의 고전압 발생원에 대한 교정결과는 기존의 고전압 분압기를 이용한 교정결과와 0.4 % 이내에서 서로 잘 일치하였다. 고전압 국제규격에(IEC 60044)에서 명시한 고전압 측정불확도가 3 % 임을 감안하면 평행판 전극을 이용한 고전압 발생원에 대한 교정은 적용가능한 방법임을 알 수 있다.

전기장 측정센서와 평행판 전극을 이용하여 전기장 센서의 출력 전기장에 대한 평행판 인가전압을 측정하면 낮은 전압 (1 kV)에서 고전압(60 kV)까지 매우 직선적 비례관계를 가지는 것으로 나타났다(그림 5 참조).

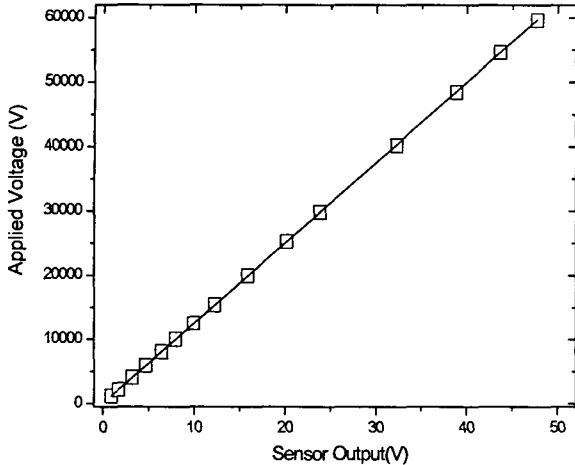


그림 5. 평행판 전극 간 거리를 일정하게 유지하고 고전압 발생원으로 1 kV ~ 60 kV 범위의 전압을 인가하며 전기장 센서출력전압을 측정 한 결과.

Fig. 5. Sensor output electric field measured as a function of applied voltage of 1 kV ~ 60 kV at a fixed distance between two plates.

고전압 전압범위를 확장하기 위해 향후 산업체 교정요구 최대 전압인 360 kV 까지도 비례관계가 유지된다면 360 kV 까지의 고전압 발생원의 출력전압을 교정할 수 있다. 이는 고전압 출력값을 이미 알고 있는 200 kV 까지 센서출력전기장에 대한 고전압 출력값을 측정 한 후 비례함수 f 를 이용하여 360 kV 까지의 고전압 출력전압 측정이 가능할 것으로 판단이 된다.

그러나 향후 교정목표인 360 kV까지의 고전압 발생원을 교정하기 위해서는 다음사항을 더 신중하게 고려해야 할 것이다. 첫째로, 평행판 전극 제작시 향후 업체에 현장교정을 수행하기 위해서는 이동 가능하고 조립식이 되어야 한다. 그러므로 가능한 작으면서 분해 및 합체가 가능해야 한다. 둘째로 전극판과 고전압 발생원을 연결하는 접속단자의 견고한 접합이다. 만약 연결부에서 약간의 저항이라도 발생하면 고전압 인가시 누설전류가 발생하여 전극판이 파손될 수 있으며, 본 논문이 60 kV 까지 측정 한 이유도 평행판 전극 연결부에서 발생하는 누설전압으로 더 이상 인가할 수 없었기 때문이다. 셋째로, 본 연구원내에서 발생 가능한 고전압 200 kV 까지 선행실험이 더 수행되어야 한다. 본 논문에서 수행한 결과에 대해 더욱 확신을 갖기 위해서는 200 kV까지 선행실험을 더 하여 향후 발생할 수 있는 문제를 모두 해결한 뒤에 산업체에서 360 kV 까지 교정을 수행한다면 더욱 확실해질 것이다. 앞서 언급한 세가지 문제를 해결한다면 평행판 전극을 이용한 고전압 발생원 교정방법은 우리나라 중전기 산업체에 큰 도움을 줄 수 있는 표준교정방법으로 한 위치를

확고히 할 수 있을 것이다. 또한 이 방법을 활용하면 앞으로 국내 중전기 업체에서 고전압 발생원의 교정을 위해 많은 비용을 들여 고전압 분압기를 갖출 필요도 없이 평행판 전극과 전기장 측정기기 만을 갖추어 손쉽게 직접 교정이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업인프라구축지원사업의 “연구시험설비구축사업”의 지원으로 이루어진 것입니다.

참 고 문 헌

[1] William E. Anderson “A Calibration Service for Voltage Transformers and High-Voltage Capacitors” NBS Measurement Services Special Publication 250-33, 1988.

[2] R. Krump, J. Weltgen, “Investigation and calibration of AC-voltage divider capacitors in connection with the accreditation of the HV Laboratory” Proceedings ERA European Conference and Exhibition on High Voltage Measurement and Calibration, ERA 94-0776, 1994.

[3] T. Tadokoro, T. Tsuchiyama, “AC voltage divider test set” JEMIC Technical Report, vol. 37, no. 3, pp 45-47, 2002

[4] D. I. Nefed’ev, “Equipment for checking high-voltage measuring transformers” Measurement Techniques, vol. 48, no. 8, pp 812-816, 2005.

[5] 권성원, 김문석, 정재갑, 이성하, 김명수, “전압변성기용 부담특성 정밀분석용 자동평가 시스템의 개발” 대한전기학회지, vol. 5C, no. 10, pp 457-464, 2005.

[6] International Electrotechnical Commission, IEC 60, 1987

[7] ISO “Guide to the expression of uncertainty in measurements,” 1991.

저 자 소 개



강 전 홍 (姜 鎭 洪)

1963년 2월 8일생, 1988년 대전한밭대 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2004년 충남대학교 전기공학과 박사과정, 1988년~2004년 현재 : 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹 선임연구원.
Tel : 042-868-5152
Fax : 042-868-5018
E-mail : jhkang@kriss.re.kr



김 규 태 (金 奎 泰)

1960년 4월 5일생. 1989년 KAIST 물리학과 졸업 박사. 1989년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹 책임연구원.
Tel : 042-868-5157
Fax : 042-868-5018
E-mail : ktkim@kriss.re.kr



정 재 갑 (鄭 在 甲)

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업 박사. 2001년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹 책임연구원.
Tel : 042-868-5759, Fax : 042-868-5018
E-mail : jkjung@kriss.re.kr



김 명 수 (金 明 壽)

1954년 8월 26일생. 1977년 서울공대 화공과 졸업. 1986년 미국 미주리대 (공학박사). 1977년~1982년 국방과학연구소. 1987년~현재 한국표준과학연구원 표준보급부장.
Tel : 042-868-5040
Fax : 042-868-5018
E-mail : mkim@kriss.re.kr

류 제 천 (柳 濟 天)

케이엠시 주식회사



이 상 화 (李 相 和)

1967년 1월 26일생. 1994년 한밭대 전자공학과 1986년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기그룹 선임연구원.
Tel : 042-868-5151
Fax : 042-868-5018
E-mail : shlee@kriss.re.kr



한 상 옥 (韓 相 玉)

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현 충남대학교 전기공학과 교수.
Tel : 042-821-5655
E-mail : soha@cnu.ac.kr