

분압용 세라믹 적층 소자를 이용한 정밀 고전압 계측 시스템

Precise High Voltage Measurement System Using Ceramic Stack Element for Voltage Divider

윤광희*, 류주현*, 박창엽*, 정영호**, 하복남**
(K-H Yoon*, J-H Yoo*, C-Y Park*, Y-H Jung**, B-N Ha**)

Abstract

In order to accurately measure the high voltage of 22.9[kV] power distribution lines, we investigated the temperature dependence of measuring voltage on the number of stack layers in the voltage measurement system made from single and stack voltage divider capacitors (22, 44, 66 layers, respectively). Temperature coefficient of dielectric constant ($TC\epsilon_r$) of voltage divider capacitors which were fabricated by BaTiO₃ system ceramics showed the variations from -2.28% to +1.69% in the range of -25[°C]~50[°C]. When one line voltage is 13,200[V], the error of measuring voltage with temperature(-25[°C]~50[°C]) was decreased with increasing of stack number and the stack element of 66 layers showed the least error of ±0.87%.

Key Words(중요용어) : Power distribution lines(배전 선로), Stack voltage divider capacitor(적층 분압용 캐패시터), Temperature dependence(온도 의존성)

1. 서 론

첨단의 산업 설비와 산업의 고도화로 전력의 안정적인 공급을 위해 전력 공급 설비인 배전 선로 운영의 신뢰성 향상 및 자동화가 요구됨에 따라, 배전 선로의 운전 전압의 상태에 따라 선로를 개폐하는 가스 개폐기(GIS)의 경우 선로의 운전 전압을 정확하게 계측할 수 있어야 한다. 현재 배전 선로의 22.9[kV] 고전압을 계측하기 위한 방법으로는 변압기 분압, 콘덴서 분압, 저항 분압 및 저항과 콘덴서 혼용 기법 등이 사용될 수 있다[1~3]. 배전 자동화 개폐기 시스템의 경우, 개폐기 함 내에 내장이 가능한 고전압 계측 방법이 요구되므로 작은 정전용량을

갖는 고압용 콘덴서와 큰 정전용량을 갖는 저압용 세라믹 콘덴서를 직렬로 연결하는 콘덴서 분압 방식이 고려되고 있다. 배전 자동화 개폐기 함내에 내장하기 위해서는 고전압 계측 소자의 크기가 작아야 하므로 콘덴서 분압 방식에 사용되는 고압 및 저압용 콘덴서로는 고유전율을 갖는 세라믹스 재료를 사용하고자 한다. 그러나 고유전율을 갖는 세라믹스는 주변온도의 변화에 따라 유전율의 변화가 심하므로 그에 따른 고압 및 저압용 콘덴서의 정전용량의 변화로 저압용 콘덴서에서의 계측 전압에 큰 오차가 발생하여 신뢰성이 떨어지는 문제점이 나타났다. 또한 고압 및 저압용 콘덴서 소자의 정전용량은 변적, 두께 및 유전율에 의존하는데, 크기가 다르고 유전율의 온도 의존성이 다를 경우 주변온도의 변화에 따라 고압 및 저압용 콘덴서의 정전용량의 변화율이 다르게 되기 때문에 저압용 콘덴서에서의 분배 전압이 달라져 큰 계측 전압 오차가 크게 발생할 수 있다.

* : 세명대학교 전기공학과
(충북 제천시 신월동 산 21-1,
E-mail : juhyun57@venus.semyung. ac. kr)
** : 한전 전력연구원 배전자동화 기술 그룹
2000년 1월 15일 접수, 2000년 3월 31일 심사완료

따라서 본 논문에서는 정확한 전압 계측을 위해 새로운 고전압 분압용 적층형 소자를 이용한 정밀한 고전압 계측 시스템을 구현하고자 한다. 배전 선로 전압의 정밀 계측을 위하여 기존의 콘덴서 분압 방식의 계측 전압의 오차를 줄이기 위해 유전율의 온도특성이 우수하고 내전압 특성이 좋은 BaTiO₃계 세라믹스를 사용한 콘덴서로 구성된 적층형 소자를 제작하였다[4]. 적층형 소자의 구성 소자인 각 층의 콘덴서들은 단면적과 두께를 일정하게 하여 정전용량의 크기가 온도에 따른 유전율의 변화에 의해서만 영향을 받게 하였고, 자동화 개폐기 함내에 내장이 가능하도록 작은 크기로 설계하였다. 제작된 고전압 계측용 적층형 소자와 기존의 고압 및 저압용 콘덴서로 구성된 고전압 계측 시스템의 전압 계측 특성을 비교하기 위해 -25~50[°C]의 온도 범위에서 적층형 소자의 최종단 콘덴서와 기존의 저압용 콘덴서에서의 출력 전압을 측정하여 정밀한 고전압 계측 시스템으로 적용 가능성을 고찰하였다.

2. 고전압 분압용 적층형 소자의 설계

기존의 콘덴서 분압을 이용한 고전압 계측 방식은 작은 정전용량을 갖는 고압용 콘덴서와 전압 계측을 위한 큰 정전용량을 갖는 저압용 콘덴서로 이루어져 있다. 콘덴서 분압 방식의 원리는 그림 1과 같이 고전압 V_{in} 이 고압 및 저압용 콘덴서 C_1 과 C_2 에 인가되면, 계측 전압 V_{out} 은 저압용 캐패시터 C_2 의 양단에서 측정되며 전압 분배 비율은 다음의 식으로부터 계산될 수 있다.

$$V_{out} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{in} \tag{1}$$

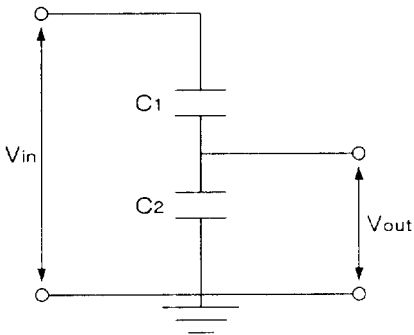


그림 1. 콘덴서 분압 분할기의 원리
Fig. 1. Principle of capacitive voltage divider.

만약 C_1 과 C_2 의 정전용량의 변화율이 온도에 따

라 다르다면 전압 분배 비율이 달라져 측정 전압 V_{out} 은 일정한 입력전압 V_{in} 하에서 변한다. 콘덴서의 정전용량은 식 (2)와 같이 소자의 면적, 두께 그리고 유전율에 의존한다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \tag{2}$$

여기서, ϵ_r : 비유전율, ϵ_0 : 8.854×10^{-12} [F/m], A : 면적, d : 소자의 두께이다.

기존의 콘덴서 분압 방식에서 고압용 콘덴서와 저압용 콘덴서의 면적, 두께 및 유전율의 온도 의존성이 다르면, 온도에 따른 유전율의 변화에 의한 정전용량의 변화뿐 아니라 면적과 두께의 차이에 의해서도 정전용량이 변할 수 있다. 따라서 고압 및 저압용 콘덴서의 면적 및 유전율의 변화율이 거의 같고, 두께만 다른 경우 정전용량의 변화율은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta C_1 = \frac{\Delta \epsilon_r}{d_1} \tag{3}$$

$$\Delta C_2 = \frac{\Delta \epsilon_r}{d_2} \tag{4}$$

여기서, ΔC_1 : 고압용 콘덴서의 정전용량의 변화율, ΔC_2 : 저압용 콘덴서의 정전용량의 변화율, $\Delta \epsilon_r$: 온도에 따른 유전율의 변화율, d_1, d_2 : 고압 및 저압용 콘덴서의 두께이다. 식 (3)과 (4)에서 유전율의 변화율이 거의 같고, $d_1 \gg d_2$ 의 관계를 만족한다면 ΔC_1 은 ΔC_2 보다 훨씬 작게 된다. 결국 이러한 정전용량의 다른 변화율 때문에 저압용 콘덴서에서 분압되는 계측 전압의 오차가 발생할 수 있다.

따라서 온도에 따른 계측 전압의 오차를 줄이기 위해 적층형 콘덴서로 이루어진 새로운 콘덴서 분압용 전압 계측 소자가 설계되었다. 콘덴서 분압 방식을 위한 적층형 소자의 각 층을 구성하는 콘덴서 소자들은 같은 면적과 두께를 갖도록 제작되었기 때문에 각 콘덴서의 정전용량의 변화율은 온도에 따라 변하는 유전율에만 의존한다. 결국 적층형 소자의 각 층을 구성하는 콘덴서들의 정전용량의 변화율은 온도에 따른 유전율의 변화율에 의존하며, 사용된 세라믹 콘덴서 재료의 온도에 따른 유전율의 변화가 거의 같다면 각 층에서 분배되는 전압이 일정하게 되므로 적층형 소자의 최종단에서 계측되는 전압의 온도 의존성이 감소하게 된다. 이러한 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

만약 적층형 소자의 각 층 콘덴서의 비유전율의 변화율이 거의 같다고 가정하면, 다음 식과 같이 정전용량의 변화율이 비유전율의 변화율과 비슷할 것

이다.

$$\Delta C_1, \Delta C_2, \dots, \Delta C_n \approx \Delta \epsilon_r \quad (5)$$

여기서, n은 적층수이다. 그러므로,

$$\begin{aligned} \overline{\Delta C} &= \frac{\Delta C_1 + \Delta C_2 + \dots + \Delta C_{n-1}}{n-1} \\ &\approx \frac{\Delta \epsilon_{r(1)} + \Delta \epsilon_{r(2)} + \dots + \Delta \epsilon_{r(n-1)}}{n-1} \\ &\approx \Delta \epsilon_r \end{aligned} \quad (6)$$

단, $\Delta \epsilon_{r(1)} \approx \Delta \epsilon_{r(2)} \approx \dots \approx \Delta \epsilon_{r(n-1)} \approx \Delta \epsilon_r$.

그러므로, 적층수가 증가할수록 각 층 콘덴서의 정전용량 변화율의 평균값을 취하면 적층형 소자의 최종단 전압 계측용 콘덴서의 정전용량 변화율 ($\overline{\Delta C_n}$)에 가까워질 것이다. 즉,

$$\overline{\Delta C} \approx \Delta C_n \quad (7)$$

이 관계식을 입증하기 위해서 적층수를 변화시켜 전압 계측용 적층형 소자를 제작하고자 한다. 적층수에 따른 적층형의 계측 전압 오차를 비교하기 위해 22, 44 및 66층으로 구성된 적층형 소자는 전체 두께를 일정하게 만들기 위해 각 층의 두께를 각각 3, 1.5, 및 1[mm]로 하였으며, 설계된 적층형 소자의 구조를 그림 2에 나타내었다.

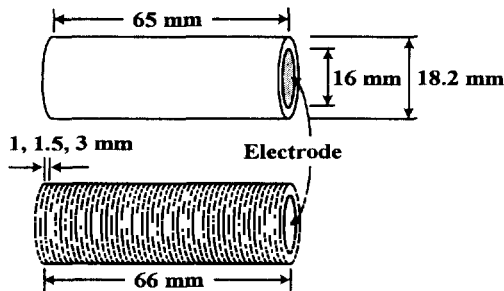


그림 2. 단층 및 적층형 소자의 구조
Fig. 2. Structure of single and multi-layer stack element.

3. 실험

3.1 적층형 소자의 제작

고전압 계측 시스템을 위한 세라믹 콘덴서 조성으로 우수한 온도 특성을 갖는 BaTiO₃계(BT325S) 유전체 세라믹스를 사용하였다. BaTiO₃계 세라믹스 분말을 1000[kg/cm²]의 압력으로 압축하여 원판형으로 성형하였으며, 승하강 온도를 300[°C/h]로 하여 1360[°C]에서 90분간 소결하였다. 소결된 시편의 직경은 18.2[mm]였으며, 각각 1, 1.5 및 3[mm]의 두께를 갖도록 가공하였다. 각 시편은 실버 페이스트

를 원판형 시편에 도포한 후 600[°C]에서 10분간 열처리하여 전극을 형성시켰다. 적층형 소자를 제작하기 위해서는 각 층 사이에 실버 페이스트를 삽입하고 열처리하여 접착시켰으며, 제작된 22, 44 및 66층의 적층형 소자를 에폭시 접착제로 코팅하여 단단히 결합시켰다.

3.2 유전 특성 측정 및 고전압 계측 시스템

분압용 세라믹 콘덴서의 온도에 따른 정전용량은 LCR meter(AG4304, ANDO)로 1[kHz]의 측정 주파수에서 항온조내의 온도 범위 -25~50[°C]에서 측정하였으며, 비유전율은 식 (2)로 구하였다. 고전압 계측을 위해서는 고전압 발생기(SJ/A75 type, 신전사)를 이용하여 배전 선로 한상의 전압인 13.2[kV]를 입력전압으로 인가하였으며, 항온조내에서 온도 범위 -25~50[°C]에서 오실로스코프(Lecroy 9310A)로 그림 3과 같은 고전압 계측 시스템으로 적층형 소자의 최종단에서 계측 전압을 무부하에서 측정하였다. 고전압 계측 소자를 GIS 내부에 내장하고 설계통에 설치할 경우, 뇌 서지 등에 의한 절연파괴가 일어나지 않아야 하므로 충격 내전압 시험 규격[5]에 만족하는지 시험하기 위해 임펄스 발생기(SJ-300 type, 신전사)를 이용하여 피크의 최고치가 150[kV] 이상인 표준 임펄스를 연속적으로 15회 이상 인가하여 임펄스 내전압 시험을 하였으며 출력파형을 10,000 : 1 프로브를 사용하여 오실로스코프로 측정하였다.

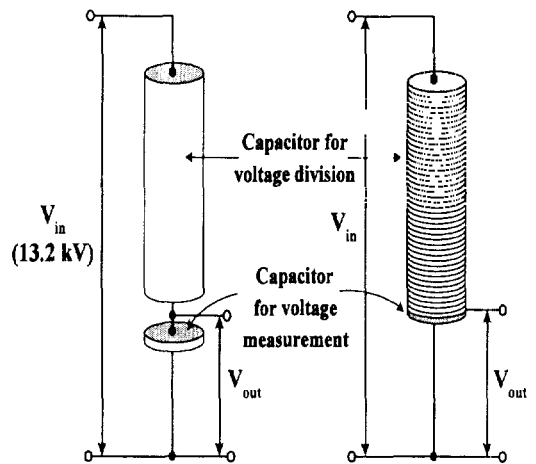


그림 3. 고전압 계측 시스템
Fig. 3. High-voltage measurement system.

4. 결과 및 고찰

고전압 분압용 BaTiO₃계 세라믹스의 밀도는 5.6 [kg/cm³]였으며 상온에서의 유전상수는 2719이었다. -25~50[°C]의 온도 범위에서 BaTiO₃계 세라믹스의 온도에 따른 비유전율 변화를 그림 4에 나타내었다. 원관형 콘덴서의 비유전율의 온도계수(TCε_r)는 다음 식에 의해 계산하여 그림 5에 나타내었다.

$$TC\epsilon_r = \frac{\epsilon_{r(T)} - \epsilon_{r(20^\circ C)}}{\epsilon_{r(20^\circ C)}} \times 100 [\%] \quad (8)$$

여기서, ε_{r(T)}과 ε_{r(20°C)}는 각각 T[°C]와 20[°C]에서의 비유전율이다. BaTiO₃계 세라믹스로 제작된 콘덴서는 -2.28%에서 +1.69%의 TCε_r를 나타내었다.

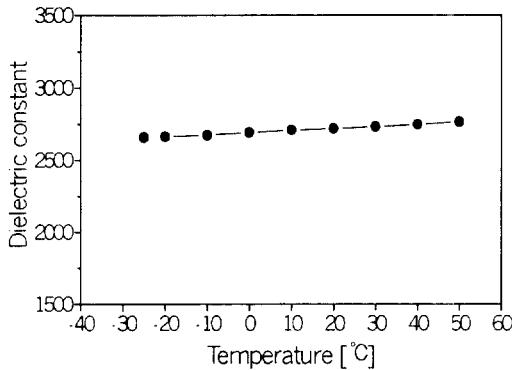


그림 4. 온도에 따른 비유전율
Fig. 4. Dielectric constant with temperature.

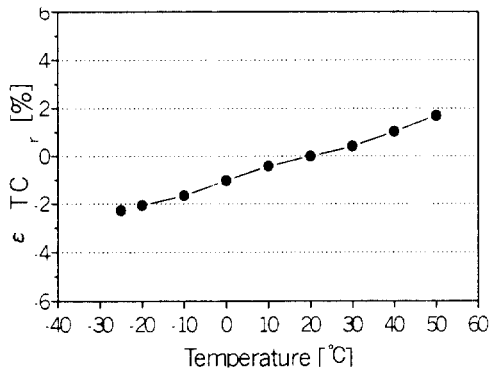


그림 5. 온도에 따른 유전율의 온도계수 TCε_r
Fig. 5. Temperature coefficient of dielectric constant(TCε_r) with temperature.

고전압 계측을 위한 고압용 콘덴서와 전압 계측을 위한 저압용 콘덴서를 직렬로 연결한 기존의 콘덴서 분압 방식과 적층형 소자를 사용한 새로운 콘

덴서 분압 방식의 입력전압에 따른 계측 전압의 선형성을 조사하기 위해 기존의 저압용 콘덴서에서의 출력전압과 직층형 소자의 최종단 콘덴서에서의 출력전압을 20[°C]에서 측정하여 그림 6에 나타내었다. 인가전압의 변화에 따라 단층 및 모든 적층형 소자들에서 적층수에 관계없이 거의 선형적인 출력전압이 나타남을 알 수 있다. 계측 출력전압의 작은 비선형성이 관찰되었으며, 이는 고전압 발생기로부터 인가되는 입력 전압값의 오차에 의해 발생한 오차와, 또한 코로나 방전, 소자 내부의 전압의존성 방전 효과, 열적 효과에 의한 비선형 특성 때문에 발생하는 오차 요인에 의한 것으로 보인다.

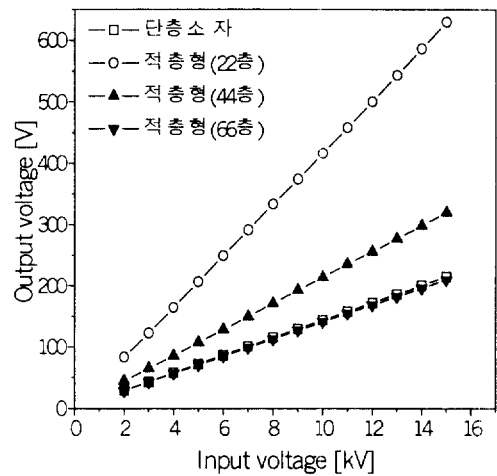


그림 6. 단층 및 적층형 소자들의 입력전압 대 출력 전압 특성
Fig. 6. Output vs. input voltage characteristics for single and stack elements according to the number of stack layers.

그리고 고전압 분압을 위한 고압용 콘덴서와 계측 전압을 위한 저압용 콘덴서로 구성된 단층 소자와 22층, 44층, 66층으로 한 적층형 소자들의 적층수에 따른 계측 전압을 -25~50[°C]의 온도 범위에서 측정하여 그림 7에 나타내었다.

계측 출력전압의 온도계수(TCV_o)는 다음 식과 같이 계산되어 그림 8에 나타내었다.

$$TCV_o = \frac{V_o(T) - V_o(20^\circ C)}{V_o(20^\circ C)} \times 100 [\%] \quad (9)$$

여기서, V_{o(T)}와 V_{o(20°C)}는 각각 T[°C]와 20[°C]에서의 출력전압이다.

단층 소자의 저압용 콘덴서에 분압된 출력전압과 적층형 소자의 최종단 계측용 소자에서 분압되는

출력전압을 측정하였을 때 온도에 따른 계측 오차가 상온 20[°C]를 기준으로 할 때, 기존의 콘덴서 분압 방식에서는 저온쪽으로 +1.95%, 고온쪽으로 -1.58%의 값이 얻어졌고, 22층, 44층, 66층 적층형 소자의 경우 저온쪽으로 각각 -0.49%, -0.5%, -0.27%, 고온쪽으로 각각 +1.11%, +0.94%, +0.87%를 나타내었다.

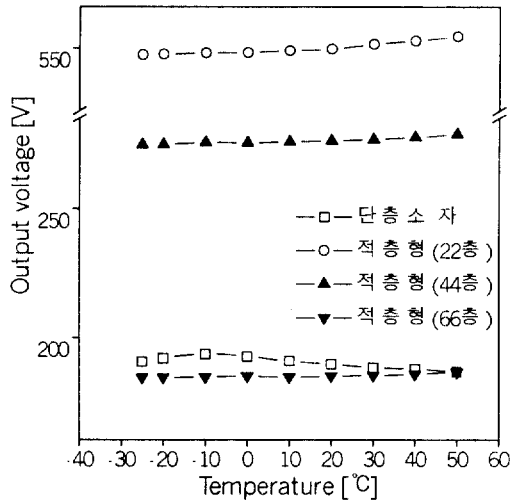


그림 7. 온도에 따른 출력 전압
Fig. 7. Output voltage for single and stack elements according to the temperature.

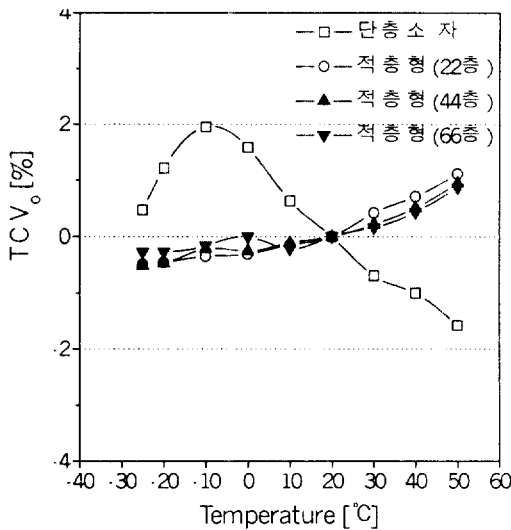


그림 8. 온도에 따른 출력전압의 온도계수 TCV_0
Fig. 8. Temperature coefficient of output voltage TCV_0 according to the temperature.

적층형 소자의 TCV_0 는 기존의 콘덴서 분압 방식보다 작았으며, 적층수가 증가할수록 오차가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 적층형 소자의 설계 부분에서 서술했듯이 각 층 콘덴서의 온도에 따른 유전율의 변화율이 일정하지 않고 약간의 차이가 있더라도, 적층수가 증가할수록 각 층 콘덴서들의 온도에 따른 유전율의 변화를 전체적으로 평균하면 최종단 계측용 콘덴서의 온도 변화에 따른 유전율의 변화에 가까워지기 때문으로 보인다. 결국, 최종단 콘덴서에서의 계측된 출력전압의 오차가 감소하며 적층수가 증가함에 따라 TCV_0 는 감소함을 알 수 있다.

이러한 적층형 소자(66층)를 GIS 내부에 실장하고 GIS 시스템을 실계통에 설치하여 22.9[kV] 배전선로의 고전압 계측 시스템으로 적용하는 경우, 뇌서지 등으로 인한 절연파괴가 일어나지 않아야 하므로 높은 절연파괴전압을 가져야 한다. 이를 확인하기 위하여 피크의 최고치가 150[kV] 이상인 표준 임펄스를 인가하여 66층 적층형 소자의 임펄스 내전압 시험을 하였다. 그림 9는 임펄스 내전압 시험의 결과를 오실로스코프로 측정된 것으로, 임펄스 내전압 시험 파형은 피크의 최고치가 157[kV] 이상 이었고 10부터 90%까지의 전압 상승시간은 대략 1.2[μs]이며 최고치의 50%까지인 하강시간은 대략 52[μs]이었다. 150[kV] 이상인 임펄스를 15번 이상 연속적으로 가했을 때 절연파괴가 일어나지 않았고 정상적인 고전압 계측이 이루어졌다.

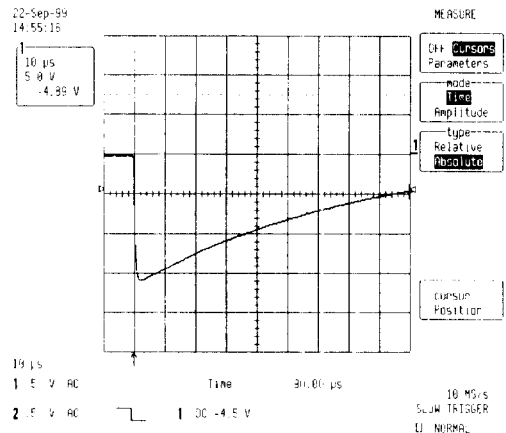


그림 9. 150[kV] 임펄스 내전압 시험 결과
Fig. 9. Impulse withstand voltage tests under 15 times continuous impulse of 150[kV] for stack element of 66 layers.

5. 결 론

22.9[kV] 배전 선로의 운전 전압을 정밀하게 계측하기 위해 BaTiO₃계 세라믹스를 사용한 분압용 적층형 소자를 제작하여 기존의 콘덴서 분압 방식의 계측 전압의 측정 오차를 개선하였다. 배전 선로 한상의 전압인 13.2[kV]를 입력전압으로 인가하였을 때 적층형 소자를 사용하여 고전압을 계측한 결과는 다음과 같다.

BaTiO₃계 세라믹스로 이루어진 원판형 콘덴서는 -25~50[°C]의 온도 범위에서 -2.28%에서 +1.69%의 TCE,의 변화값을 나타내었다. 모든 적층형 소자들의 최종단 계측용 콘덴서와 기존의 콘덴서 분압 방식의 저압용 콘덴서에서 인가전압의 변화에 따른 출력 전압을 측정된 결과 선형성을 나타내었다. 또한 적층형 소자의 적층수가 증가할수록 계측 전압의 오차는 줄어들었으며, 6층인 경우 TCV,가 0.27%에서 +0.87%의 값을 나타냈다. 150[kV] 이상의 임펄스 내전압 시험 결과 임펄스를 15회 이상 연속적으로 인가하였을 때 절연파괴가 일어나지 않았으며 정상적인 전압 계측이 이루어졌다.

감사의 글

본 연구는 신배전 자동화 시스템 개발 연구의 연구비로 이루어졌으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M. Khalifa, High-Voltage Engineering Marcel Dekker, INC., pp. 243-255, 1990.
- [2] Gyung-Suk Kil, Bok-Hee Lee and Sung-Chul Ha, "High-Voltage Measurement Technique", Proceeding of KIEE, Vol. 46, NO. 8, pp. 41-46, 1997.
- [3] A. Schwab and J. Pagel, "Precision Capacitive Voltage Divider for Impulse Voltage Measurements", IEEE Trans. PES, Vol. 91, pp. 2376-2382, 1972.
- [4] J. H. Yoo, Y. W. Lee, H. S. Yoon, C. Y. Park, Y. H. Jung and B. N. Ha, "A Study on the High Voltage Measurement Using Voltage Division Ceramic and Piezoelectric Actuator", Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 12 No. 3, pp. 242-247, 1999.
- [5] IEC 694, "Common Specifications for High-Voltage Switchgear and Controller Standards-