

過渡高電壓 測定에서 測定값 補正에 關한 研究

A Study on the Restoration of Transient Voltage Deformed by the Measuring System

이복희*, 이국중**, 전덕규***, 백승권*, 임동묵**

(Bok-Hee Lee, Kook-Joong Lee, Duk-Kyu Jeon, Seung-Kwon Paek, Dong-Muk Lim)

요 약

본 논문은 과도고전압 측정시스템의 단위계단응답으로부터 구한 보정계수를 사용하여 수치계산에 의해 출력값을 보정하는 방법에 대하여 기술하였다. 또한 실규모 용량성분압기의 분압비와 상승시간을 갖는 모의등가회로를 구성하여 측정한 바, 본 연구에서 제안된 보정방법은 급준파 및 차단파 등의 어떠한 입력에도 유용하게 사용할 수 있다.

Abstract

This paper describes a method of reconstructing the input signal from the deformed output by using the unit step reponse of transient voltage measuring system. In addition, the reconstructing test is conducted by using the modeling equivalent circuit having the rise time and the voltage ratio of real-sized capacitive divider. It is certified that the proposed reconstructing method is applicable to any waveshape and more useful to chopped or steep-fronted impulse voltages.

1. 서론

과도고전압중에서 단일파 임펄스전압 및 차단파 등의 측정은 저항분압기와 용량성분압기 등의 여러가지로 개발된 분압기를 포함하는 측정시스템이 주로 사용되고 있다. 분압기를 사용하여 과도고전압을 측정하는 경우, 측정시스템의 이상적인 출력은 시간의 지연 없이 입력에 비례하여 나타나야 되나 실제로 있어서 출력은 시간의 지연과 함께 분압기 및 측정시스템의 특성에 의하여 입력에 정확하게 비례하여 나타나지 않고 약간은 왜곡되거나 지연된 출력이 나타난다. 시간이 충분히 경과한 후의 측정값에 대해서는 문제가 없지만 과도상태 또는 대단히 짧은 시간영역을 갖는 급준성 과도고전압파 차단파 임펄스의 측정에 있어서는 문제가 있다.

지금까지 이러한 문제를 개선하기 위한 많은 연구가 크게 두가지 분야로 행하여져 왔는데, 하나는 분압기 및 측정시스템의 특성을 개선하여 측정오차를 줄이는 방법이고, 다른 하나는 측정된 출력값을 보정하여 측정오차를 줄이는

것이다. (1)-(5) 본 논문에서는 측정된 출력값을 수치해석하므로써 출력값을 보정하는 방법에 대하여 제안하였으며, 이를 위하여 실규모 용량성분압기의 분압비와 상승시간을 갖는 모의 등가회로를 구성하고 측정된 출력값으로부터 수치계산에 의한 출력값의 보정을 수행하였다.

2. 이론

단위계단응답이 $g(t)$ 인 측정계에 임의의 입력 $x(t)$ 가 인가될 때, 출력 $y(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, (2)

$$y(t) = \int g'(\tau) \cdot x(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

Taylor급수로 전개하면 다음과 같다.

$$y(t) = a_0 \cdot x(t) + a_1 \cdot x'(t) + a_2 \cdot x''(t) + \dots \quad (2)$$
$$a_n = \frac{(-1)^n}{n!} \cdot \int \tau^n \cdot g'(\tau) d\tau$$
$$n = 0, 1, 2, \dots$$

그럼 1에서 시간간격이 h 인 임의의 시간 t_0, t_1, t_2, \dots 에서 $g(t)$ 의 값들이 g_0, g_1, g_2, \dots 이고, $g'(t)$ 의 값들이 g'_0, g'_1, g'_2, \dots 라고 하면 g'_k 는 다음과 같이 근사적으로 계산할 수 있다.

*:인하대 공대 전기공학과 조교수
**:한국전력공사
***:인하대 공대 전기공학과 대학원
+:인제대 전자공학과 전임강사
++:HEE Co.

接受日字:1992年 12月 3日

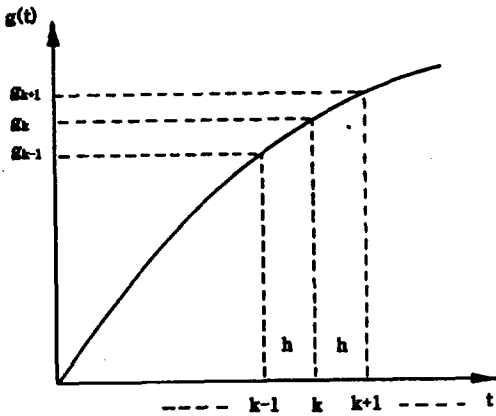


그림 1. g'_k 의 근사적인 계산방법
Fig. 1. Calculation of g'_k in g_k having sampling time h .

$$g'_k = (g_k - g_{k-1})/h \quad (3)$$

$k = 1, 2, 3, \dots$

식(3)을 식(2)에 대입하여 사다리꼴 적분법을 이용하면 a_n 을 구할 수 있다.^[6]

$$a_n = (-1)^n/n! \cdot \Sigma(f_{nk} + f_{n(k-1)}) \quad (4)$$

$f_{nk} = (k \cdot h)^n \cdot g'_k$
 $n = 0, 1, 2, \dots$
 $k = 1, 2, 3, \dots$

그리고 식(2)를 1회, 2회, 3회, ..., n회 미분시키면 다음과 같으며, 그 변화량을 그림 2에 나타내었다.

$$y'(t) = a_0 \cdot x'(t) + a_1 \cdot x''(t) + a_2 \cdot x^{(3)}(t) + \dots \quad (5-1)$$

$$y''(t) = a_0 \cdot x''(t) + a_1 \cdot x^{(3)}(t) + a_2 \cdot x^{(4)}(t) + \dots \quad (5-2)$$

$$y^{(3)}(t) = a_0 \cdot x^{(3)}(t) + a_1 \cdot x^{(4)}(t) + a_2 \cdot x^{(5)}(t) + \dots \quad (5-3)$$

$$y^{(n)}(t) = a_0 \cdot x^{(n)}(t) + a_1 \cdot x^{(n+1)}(t) + a_2 \cdot x^{(n+2)}(t) + \dots \quad (5-n)$$

식(2)와 식(5-n)을 사용하여 $x(t), x'(t), x''(t), \dots$ 에 대해서 풀면 다음과 같다.

$$x(t) = (1/a_0)(y(t) - a_1 \cdot x'(t) - a_2 \cdot x''(t) - \dots) \quad (6)$$

$$x'(t) = (1/a_0)(y'(t) - a_1 \cdot x''(t) - a_2 \cdot x^{(3)}(t) - \dots) \quad (7-1)$$

$$x''(t) = (1/a_0)(y''(t) - a_1 \cdot x^{(3)}(t) - a_2 \cdot x^{(4)}(t) - \dots) \quad (7-2)$$

$$x^{(3)}(t) = (1/a_0)(y^{(3)}(t) - a_1 \cdot x^{(4)}(t) - a_2 \cdot x^{(5)}(t) - \dots) \quad (7-2)$$

$$\vdots$$

$$x^{(n)}(t) = (1/a_0)(y^{(n)}(t) - a_1 \cdot x^{(n+1)}(t) - a_2 \cdot x^{(n+2)}(t) - \dots) \quad (7-n)$$

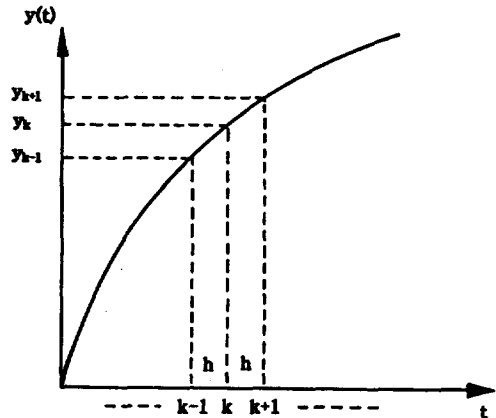


그림 2. y'_k, y''_k, \dots 의 근사적인 계산방법
Fig. 2. Calculation of y'_k, y''_k, \dots in y_k having sampling time h .

식(7-n)을 식(6)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = b_0 \cdot y(t) + b_1 \cdot y'(t) + b_2 \cdot y''(t) + \dots \quad (8)$$

$b_0 \cdot a_0 = 1$
 $b_0 \cdot a_1 + b_1 \cdot a_0 = 0$
 $b_0 \cdot a_2 + b_1 \cdot a_1 + b_2 \cdot a_0 = 0$
 $b_0 \cdot a_3 + b_1 \cdot a_2 + b_2 \cdot a_1 + b_3 \cdot a_0 = 0$
 \vdots

그림 2에서 t 가 $t_{k-1}, t_k, t_{k+1}, \dots$ 일 때, $y(t)$ 의 값이 $y_{k-1}, y_k, y_{k+1}, \dots$ 이고, 시간간격 h 를 충분히 작게 취하면 t_k 에서의 $y'_k, y''_k, y_k^{(3)}, \dots$ 는 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$y'_k = (y_k - y_{k-1})/h \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (9-1)$$

$$y''_k = (y_{k+1} - 2y_k + y_{k-1})/h^2 \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (9-2)$$

$$y^{(3)}_k = (y'_{k+1} - y'_{k-1})/(2h) \quad k = 2, 3, 4, \dots \quad (9-3)$$

$$y^{(4)}_k = (y'_{k+1} - 2y'_k + y'_{k-1})/h^2 \quad k = 2, 3, 4, \dots \quad (9-4)$$

식(8)에서 우변의 5항까지 취하여 식(9)를 식(8)에 대입시켜 정리하면 다음과 같다.

$$x_k = C_0 \cdot y_{k+2} + C_1 \cdot y_{k+1} + C_2 \cdot y_k + C_3 \cdot y_{k-1} + C_4 \cdot y_{k-2} \quad (10)$$

$$k = 2, 3, 4, \dots$$

$$C_0 = b_3/(2h^3) + b_4/h^4$$

$$C_1 = b_2/h^2 - b_3/h^3 + 4b_4/h^4$$

$$C_2 = b_0 + b_1/h - 2b_2/h^2 + 6b_4/h^4$$

$$C_3 = -b_1/h + b_2/h^2 + b_3/h^3 - 4b_4/h^4$$

$$C_4 = -b_3/(2h^3) - b_4/h^4$$

따라서 측정시스템의 단위계단응답 $g(t)$ 로 부터 식(4), (8), (10)을 적용하여 보정계수 a_n, b_n, c_n 을 각각 구할 수 있다. 측정시스템의 출력 $y(t)$ 를 적당한 시간간격 h 로 분할하여 y_k 를 정하고 식(10)으로 부터 측정시스템의 출력의 보정값이 구해진다.

3. 적용방법 및 보정

용량성분압기에서 얻어지는 단위계단응답이 $g(t) = 1 - \exp(-a \cdot t)$ 인 꼴에서 시정수 $1/a$ 은 단 시간적인 요소이므로 $a=1$ 로 하여 적용해 본다. 보정계수 a_n 을 구하는 적분 속의 $g'(t)$ 는 충분한 시간(t_n)이 경과한 후에는 0으로 수렴하므로 적분구간은 t_n 까지 하여도 충분하다. $t_n = 10.97$, $h = 0.55$ 로 하고 g_k 를 20개 취하여 보정계수 a_n, b_n 을 구하면 $a_0 = 1, a_1 = -1.30$ 이고 $b_0 = 1, b_1 = 1.30$ 이다. 위의 보정계수 2개를 출력에 $y(t) = 1 - \exp(-t)$ 일 때 $h=0.11$ 로 하고 보정계수 c_n 을 구하면 $c_0=0, c_1=0, c_2=12.83, c_3=-11.83, c_4=0$ 으로 되어 보정식은 다음과 같다.

$$x_k = 12.83y_k - 11.83y_{k-1} \quad (11)$$

그리고 보정계수를 3개 사용하여 위와 같은 방법으로 보정식을 구하면 다음과 같다.

$$x_k = 29.7y_{k+1} - 46.5y_k + 17.8y_{k-1} \quad (12)$$

식(12)로부터 $t=2.2$ 까지 보정한 x_k 를 그림(3)에 나타내었으며, 보정된 x_k 는 단위계단입력에 대하여 최대 1.5% 오차 이내로 구해졌다.

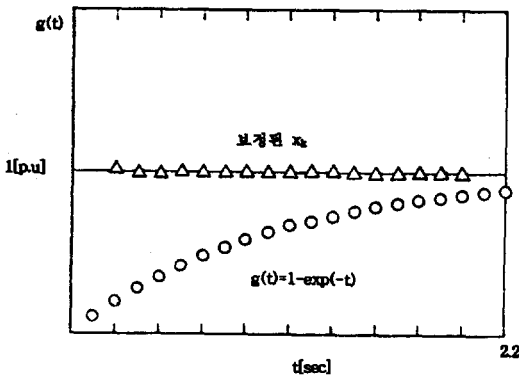


그림 3. 단위계단응답 $g(t) = 1 - \exp(-t)$ 인 측정시스템의 보정
Fig. 3. Reconstruction of unit step response in $g(t) = 1 - \exp(-t)$.

용량성분압기에서 리이드선이 길기 때문에 인덕턴스 성분을 고려하여야 하며 이때의 측정계의 단위계단응답이 $g(t) = 1 - \exp(-a \cdot t) \cdot \sin(b \cdot t + 1.57)$ 일 때 $a=1, b=3.14$ 인 경우를 적용해 본다. $t_n=40, h=0.125$ 로 하고 g_k 를 320개 취하여 보정계수 a_n, b_n 을 구하면 $a_0=1, a_1=-0.16, a_2=-0.07$ 이고 $b_0=1, b_1=0.16, b_2=0.09$ 이다. 위의 보정계수 3개를 사용하여 출력에 $y(t) = 1 - \exp(-t) \sin(3.14t + 1.57)$ 일 때 $h=0.067$ 로 하고 보정계수 c_n 을 구하면 $c_0=0, c_1=20.5, c_2=-37.6, c_3=18.1, c_4=0$ 으로 되어 보정식은 다음과 같다.

$$x_k = 20.5y_{k+1} - 37.6y_k + 18.1y_{k-1} \quad (13)$$

그리고 보정계수를 4개 사용하여 위와 같은 방법으로 보정식을 구하면 다음과 같다.

$$x_k = -3.5y_{k+2} + 27.5y_{k+1} - 37.6y_k + 11.1y_{k-1} + 3.5y_{k-2} \quad (14)$$

식(14)로부터 $t=4$ 까지 보정한 x_k 를 그림 4에 나타내었으며, 보정된 x_k 는 단위계단입력에 대하여 최대 1.5% 오차 이내로 구해졌다.

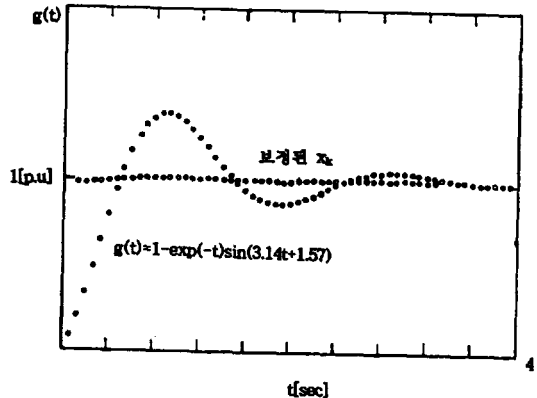


그림 4. 단위계단응답 $g(t) = 1 - \exp(-t) \cdot \sin(3.14t + 1.57)$ 인 측정시스템의 보정
Fig. 4. Reconstruction of unit step response in $g(t) = 1 - \exp(-t) \cdot \sin(3.14t + 1.57)$.

4. 실험 및 고찰

실험장치로는 그림 5와 같이 실규모 용량성분압기의 분압비와 상승시간 정도를 가지는 모의동기실험회로를 구성하였다.

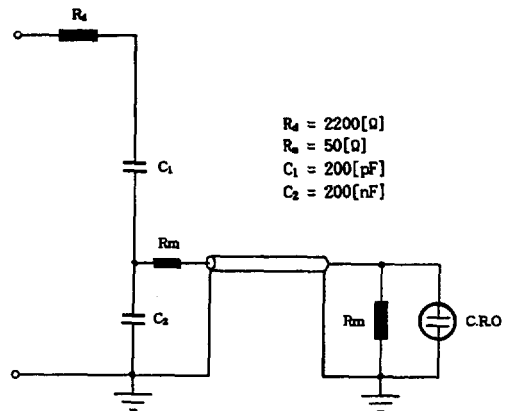
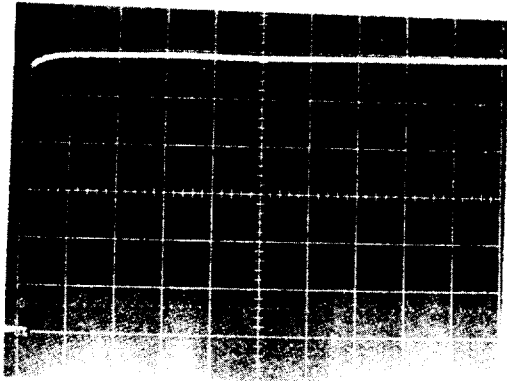


그림 5. 측정시스템의 동가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of the measuring system.

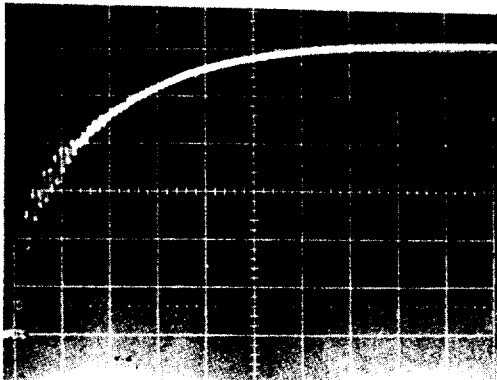
C_1 은 동축케이블 RG-58-A/U 2.22[m]를 사용하였고, C_2 는 6.6(kV)용 고전압 전해콘덴서를 사

용하였다. 압력은 펄스 발생기(WAVETEK MODEL 801)를 사용하였고, 오실로스코프(DSS 5020)로써 출력값을 측정하였다. 펄스발생기로부터 c_1 까지의 리이드선의 길이는 실규모 고전압설비에서의 대략적인 거리에 해당하는 5[m]로 하였다.



[2V/div, 200 ns/div]

a) 입력파형



[2mV/div, 200 ns/div]

b) 출력파형

그림 6. 측정시스템의 단위계단응답
Fig. 6. Unit step response of the measuring system.

그림 6은 본 연구에서 구성한 측정시스템의 단위계단입력에 대한 응답특성을 나타내며, 분압비는 1/1000이고 상승시간은 약 700[ns]임을 알 수 있다. 이 측정시스템의 보정계수를 계산하기 위해서 단위계단응답으로부터 g_k 를 취할 때 시간간격 h 를 너무 작게 하면 부정확한 g_k 값을 읽게되어 보정계수에 많은 오차가 포함되어지고, 또한 보정계수를 많이 사용하게 되면 오히려 오차는 더욱 커진다. 그림 6으로부터 $h=100$ [ns]로 하여 g_k 를 20개 취하고, $g(t)$ 의 최대값을 1로 하여 규격화시켜 보정계수 a_n 과 b_n 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_0 &= 1 & b_0 &= 1 \\ a_1 &= -3.26 \times 10^{-7} & b_1 &= 3.26 \times 10^{-7} \\ a_2 &= 1.01 \times 10^{-13} & b_2 &= 4.84 \times 10^{-15} \\ a_3 &= -3.02 \times 10^{-20} & b_3 &= -1.16 \times 10^{-21} \\ a_4 &= 8.21 \times 10^{-27} & b_4 &= 7.64 \times 10^{-28} \end{aligned}$$

이 보정계수를 3개 또는 4개로 하여 각각 구해진 보정식은 다음과 같다.

$$x_k = 0.48y_{k+1} = 3.29y_k - 2.77y_{k-1} \quad (15)$$

$$x_k = -0.58y_{k+2} + 1.64y_{k+1} + 3.29y_k - 3.93y_{k-1} + 0.58y_{k-2} \quad (16)$$

식(15), (16)으로부터 각각 보정된 x_k 를 그림 7, 그림 8에 나타내었는데, 보정계수를 많이 사용할 때 보정값의 분산이 일어나 오히려 정확도가 떨어짐을 알 수 있다.

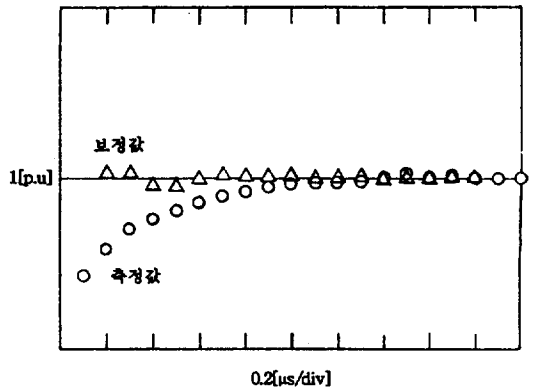


그림 7. 측정시스템의 단위계단응답에 대한 보정 (a_0, a_1, a_2)

Fig. 7. Reconstruction of unit step response of the measuring system (a_0, a_1, a_2)

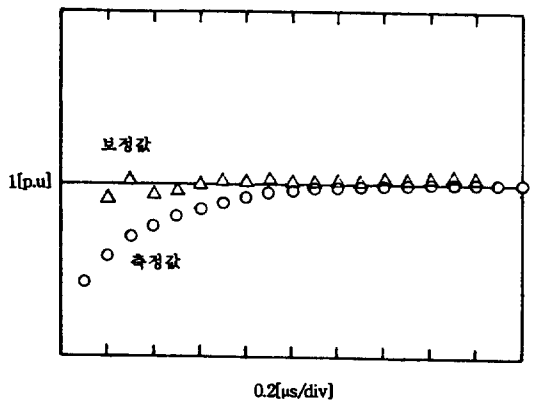


그림 8. 측정시스템의 단위계단응답에 대한 보정 (a_0, a_1, a_2, a_3)

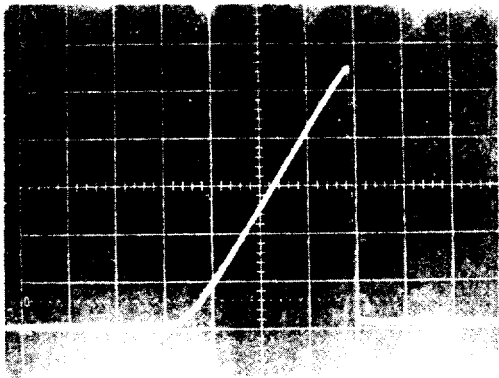
Fig. 8. Reconstruction of unit step response of the measuring system (a_0, a_1, a_2, a_3)

이것은 보정계수 a_n 과 b_n 을 수치계산으로 구할 때 발생하는 보정계수 자체의 오차와 보정계수 c_n 을 구할 때 h 의 작용으로 오차가 더욱 커지기 때문이다. 따라서 이론적으로는 시간간격 h 를 작게 할수록, 보정계수를 많이 취할수록 정확한 보정이 이루어질 것으로 예상되지만 실제로는 응답파형의 시간적 규모 등을 고려하여 적당한 샘플링 시간과 보정계수의 갯수를 취하는 것이 중요하다.

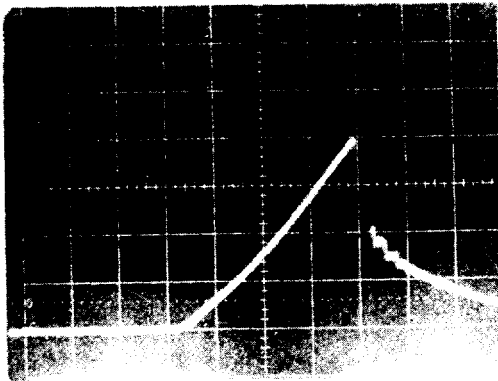
시간간격 h 를 작게하고 적분구간 t_n 을 길게 할수록 정확한 보정계수를 얻을 수 있지만 실측한 측정시스템의 단위계단응답의 오실로그래프로부터 g_k 를 취할 때는 시간간격 h 를 작게하면 오히려 부정확한 g_k 를 읽게 되어 보정계수의 오차가 커지게 된다. 또한 출력값 y_k 를 보정할 때 보정계수를 많이 사용하게 되면 y_k 의 시간간격 h 의 작용으로 보정계수의 오차가 더욱 커지게 된다. 일반적으로 실측한 측정시스템의 단위계단응답이 진동없이 지수함수적으로 증가할 때는 a_0, a_1 만으로 보정식을 구하여도

충분한 보정이 이루어지며, 진동이 있을 경우는 a_0, a_1, a_2 으로 보정식을 구하는 것이 좋다 또한 실측치로부터 a_3 이상의 보정계수를 구하는 것은 계산과정에서 많은 오차를 포함하게 되고, 보정식에서 h 의 작용으로 오차가 더욱 커지게 되어 오히려 보정이 이루어지지 않는다. 본 모의실험계에서 실측값으로부터의 보정은 식 (10) 에서 우변의 3항 까지만 취하여 계산하는 것이 적당하였다. 그림 (9) 에 톱니파입력에 대한 측정시스템의 출력파형을 나타내었으며 측정시스템의 출력은 응답의 지연으로 피이크에서 30%의 오차를 나타내고 있다.

그림 7의 (b) 에서 h 는 100[ns] 도 하여 20개의 y_k 를 취하고, 단위계단응답으로부터 얻어진 보정식 (13) 를 사용하여 보정된 x_k 를 구하고 그림 10에 나타내었다. 보정된 x_k 의 피이크에서 압력전압에 대한 오차는 3%로 감소하였다.



[2V/div, 200ns/div]
a) 입력파형



[2 mV/div, 200ns/div]
b) 출력파형

그림 9. 측정시스템의 톱니파응답파형
Fig. 9. Response waveform of ramp chopped impulse of the measuring system.

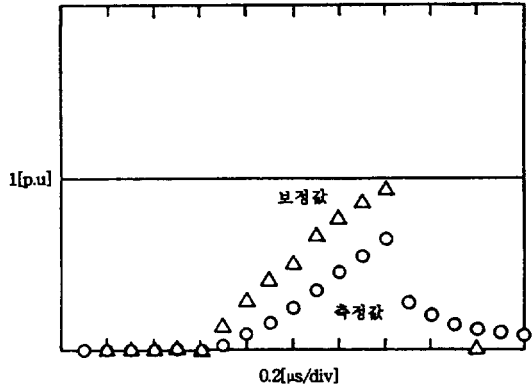


그림 10. 측정시스템의 톱니파 응답에 대한 보정

Fig. 10. Reconstruction of ramp chopped impulse deformed by the measuring system.

5. 결론

과도고전압 측정시스템의 측정값 보정에 관한 이론과 모의측정시스템의 실험을 통한 측정값 보정으로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 측정시스템의 단위계단응답으로부터 얻어진 보정식에 의하여 임의의 입력에 대한 출력값의 오차를 줄일 수 있었다.
- 2) 보정식의 수치계산으로 구해진 보정계수는 보정계수 자체에 오차를 포함하고 있으므로 측정시스템의 단위계단응답 특성에 따라 적당히 결정되어야 한다.
- 3) 보정계수를 구함에 있어 그 정확도는 단위계단응답의 g_k 를 취할 때, 시간간격 h 와 적분구간 t_n 에 의존한다.
- 4) 본 연구에서 제안된 보정방법은 측정시스템의 단위계단응답이 지수함수적으로 증가하는 경우에는 보정계수 2개를 포함하는 보정으로 충분하며, 진동이 있을 경우에는 보정

계수 3~4개를 포함하는 보정식을 적용하는 것이 적당하다.

※ 본 연구는 현대연구조성비에 의하여 이루어진 것으로 지원해준 인하대학교 산업과학기술연구소에 감사드린다.

참고문헌

- (1) A. Schwab, H. Bellm, D. Sautter: "Peak-error correction for front-chopped impulse voltage", 3rd International Symposium on High Voltage Engineering, Milan 28~31 August 1979, Paper 42. 13.
- (2) Klersztyn, S.: "Numerical correction of h v, impulse deformed by the measuring system", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-99, pp. 1984~1991, 1980.
- (3) Jiang, Guo-Xiong and Huang, De-Xiang: "The compensation of the measuring error of impulse resistive voltage divider on its voltage side", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Athens, Greece, 5~9 September 1983, Paper 65. 03.
- (4) Nikolopoulos, P. N., Topalis, F.: "Complete numerical correction of errors of high impulse voltages", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Athens, Greece, 5~9 September 1983, Paper 65. 09.
- (5) Nikolopoulos, P. N., Topalis, F.: "Error free registration of high impulse voltages", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, 24~28 August 1987, Paper 71. 03.
- (6) 오재용 ; BASIC에 의한 수치해석

著者紹介



이복희

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사).

1988년-89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1991년-현재 당 학회 학술이사. 현재 인하대 공대

전기공학과 조교수. 주 관심연구분야: 부성기체의 절연특성 및 방전현상, 고전압 및 전자계측측과 해석.



백승권

1955년 8월 26일생. 1979년 인하대 공대 전자공학과 졸업. 1989년 일본 경응대학 전기공학과 박사과정 졸업(공학박사). 현재 인재대학교 전자공학과 전임강사.



전덕규

1962년 2월 9일생. 1985년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



임동묵

1953년 9월 30일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 PSU 졸업(공학박사). 1985년-88년 PIE 근무. 1988년-현재 HEE Co. 근무.