

## Compensation Algorithm for a Measurement Voltage Transformer

姜龍澈\* · 朴鍾玟† · 李美善\*\* · 張成一\*\*\* · 金容均§

(Yong-Cheol Kang · Jong-Min Park · Mi-Sun Lee · Sung-Il Jang · Yong-Gyun Kim)

**Abstract** - This paper describes a compensation algorithm for a measurement voltage transformer (VT) based on the hysteresis characteristics of the core. The error of the VT is caused by the voltages across the primary and secondary windings. The latter depends on the secondary current whilst the former depends on the primary current, i.e. the sum of the exciting current and the secondary current. The proposed algorithm calculates the voltages across the primary and secondary windings and add them to the measured secondary voltage for compensation. To do this, the primary and secondary currents should be estimated. The secondary current is obtained directly from the secondary voltage and used to calculate the voltage across the secondary winding. For the primary current, in this paper, the exciting current is decomposed into the two currents, i.e. the core-loss current and the magnetizing current. The core-loss current is obtained by dividing the primary induced voltage by the core-loss resistance. The magnetizing current is obtained by inserting the flux into the flux-magnetizing current curve. The calculated voltages across the primary and secondary windings are added to the measured secondary current for compensation. The proposed compensation algorithm improves the error of the VT significantly.

**Key Words** : Voltage transformer, Compensation algorithm, Hysteresis characteristics and Iron core

### 1. 서 론

전력 계통에서 계통의 높은 전압을 낮은 전압으로 변환하기 위해 전압 변성기를 사용하고 있으며, 변환된 전압은 계전기와 계량기 등의 입력 신호로 사용된다. 전력량 계산을 목적으로 하는 측정용 전압 변성기는 높은 정밀도가 요구된다. 상호 쇄교 자속을 높이기 위해 전압 변성기의 코어로 철심을 사용하고 있다. 철심 코어는 투자율이 높아 자속이 잘 유지 되고 가격이 저렴하나, 히스테리시스 특성을 갖는다.

이상적인 전압 변성기는 1차 전압과 2차 전압 사이에 직렬 임피던스가 없기 때문에 오차가 없다. 하지만, 실제 전압 변성기는 1차, 2차 권선의 직렬 임피던스에 전압이 유기되어 오차가 발생한다.

전압 변성기의 오차는 1차 권선에 걸리는 전압과 2차 권선에 걸리는 전압으로 나누어진다. 후자는 2차 전류에만 의존하는 한편, 전자는 1차 전류 즉, 여자 전류와 2차 전류의 합에 의존한다. 그러므로 전압 변성기의 오차를 작게 하기 위해서는 2차 전류와 여자 전류가 작아야 한다.

일반적으로 전압 변성기의 부담의 임피던스는 크므로, 2차 전류는 작다. 한편, 여자 전류를 작게 하기 위해 코어의 자화 인덕턴스가 큰 값을 갖도록 설계하며, 이를 위해 투자율이 크고 단면적이 넓은 철심 코어를 사용한다. 이로 인하여 전압 변성기의 제작 비용과 크기가 증가된다. 또한, 철심의 히스테리시스 특성 때문에 여자 전류가 왜곡되므로 1차 전류에 비정형 성분이 포함되어 더 큰 오차를 유발한다.

이러한 전압 변성기의 오차를 보상하기 위한 알고리즘이 참고문헌 [1, 2]에서 제안되었다. [1]에서는 3권선 전류 변성기를 이용하여 1차, 2차 전류의 합 전류를 구해 전압을 보상하였으며, [2]에서는 1차 권선과 2차 권선에 걸리는 전압을 각각 구하여 보상하였다. [2]의 방식이 1차 권선과 2차 권선에 걸리는 전압을 분리하여 계산하므로 [1]의 방식보다 오차 개선 효과가 좋다. 하지만, 두 방식 모두 철심의 히스테리시스 특성을 고려하지 않아 오차 개선에 한계가 있으며, 별도의 회로가 필요하다.

본 논문은 히스테리시스 특성을 고려한 전압 변성기의 오차 개선 방법을 제안한다. 제안한 방법은 시간 영역에서 전압 변성기의 1차, 2차 권선에 걸리는 전압을 계산하여 보상한다. 2차 권선에 걸리는 전압은, 측정 전압으로부터 구한 2차 전류와 2차 권선 파라미터를 이용하여 구한다. 1차 권선에 걸리는 전압은 여자 전류를 추정해서 구한다. 본 논문에서는 여자 전류를 철손 전류와 자화 전류로 나누어 구한다. 철손 전류는 2차 전압을 철손 저항으로 나누어서 구하고, 자화 전류는 계산된 자속을 자속-자화 전류 곡선에 대입하여 구한다. 제안한 알고리즘은 EMTP를 이용하여 검증 하였다.

\* 正 會 員 : 全 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博

† 교신저자, 學生會員 : 全 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程  
E-mail : qbism9717@chonbuk.ac.kr

\*\* 學生會員 : 全 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

\*\*\* 正 會 員 : 全 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 研 究 教 授 · 工 博

§ 正 會 員 : 韓 國 IED Eng. 代 表 理 事

接受日字 : 2008年 2月 17日

最終完了 : 2008年 3月 24日

## 2. 전압 변성기 오차 보상 알고리즘

### 2.1 전압 변성기

그림 1은 전압 변성기 등가 회로를 나타낸다. 본 논문에서는 전압 변성기의 1차, 2차 권선 파라미터와 부담의 값을 알고 있다고 가정하였다.

### 2.2 전압 변성기의 보상 방법

그림 1로부터 1차 전압  $v_1$ 과 출력 전압  $v_2$  사이의 관계를 식 (1)과 같이 얻을 수 있다.

$$v_1(t) = v_p(t) + a[v_s(t) + v_2(t)] \quad (1)$$

식 (1)에서  $v_1$ 은 측정하고자 하는 지점의 전압이며,  $v_2$ 는 전압 변성기 출력 전압이다.  $v_1$ 과  $v_2$ 사이에는  $v_p + av_s$ 만큼의 차이가 발생하고, 이 항이 전압 변성기의 오차로 작용한다. 그러므로  $v_p + av_s$ 을 추정할 수 있다면, 이 값을  $av_2$ 에 더하여 참값인  $v_1$ 을 구할 수 있다.

이하에서는  $v_s$ 와  $v_p$ 를 구하는 방법을 설명한다.

#### 2.2.1 2차 권선 전압( $v_s$ )

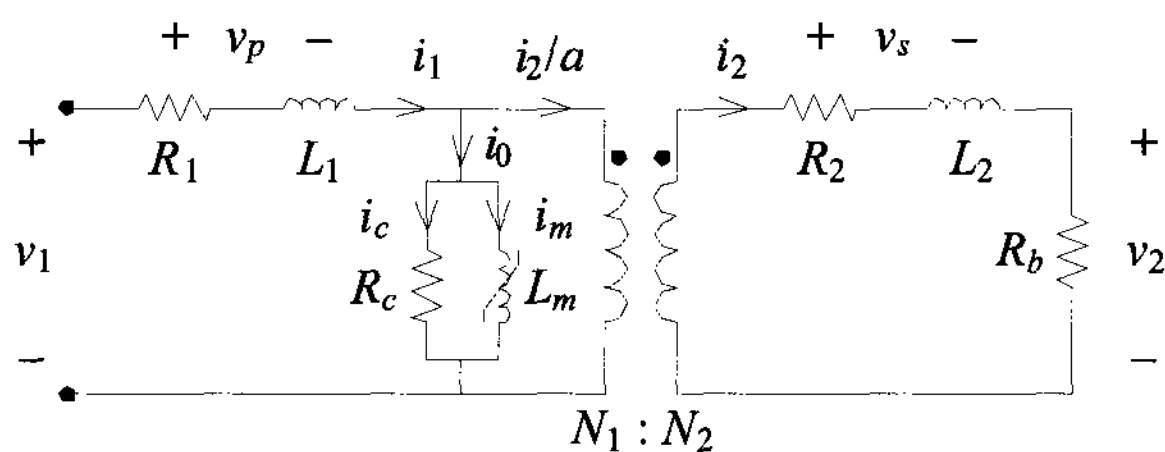
$v_s$ 는 2차 권선에 걸리는 전압이므로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$v_s(t) = R_2 i_2(t) + L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \quad (2)$$

식 (2)에서  $v_s$ 를 구하기 위해서는 2차 전류  $i_2$ 를 알아야 하고 이는 식 (3)으로 표현한다.

$$i_2(t) = \frac{v_2(t)}{R_b} \quad (3)$$

따라서  $v_2$ 를 식 (3)에 대입하여  $i_2$ 를 구하고, 이를 식 (2)에 대입하여  $v_s$ 를 구할 수 있다.



- $v_1, v_2$ : 1차, 2차 전압
- $v_p, v_s$ : 1차, 2차 권선 전압
- $i_1, i_2$ : 1차, 2차 전류
- $i_0, i_c, i_m$ : 여자, 철손, 자화 전류
- $R_1, L_1$ : 1차 권선 파라미터
- $R_2, L_2$ : 2차 권선 파라미터
- $R_c, L_m, R_b$ : 철손저항, 자화 인덕턴스, 부담
- $N_1, N_2$ : 1차, 2차 권선수
- $a = \frac{N_1}{N_2}$ : 권선비

그림 1 전압 변성기 등가회로  
Fig. 1 Equivalent circuit of the iron-cored VT

#### 2.2.2 1차 권선 전압( $v_p$ )

$v_p$ 는 1차 권선에 걸리는 전압이며 식 (4)와 같이 표현된다.

$$v_p(t) = R_1 i_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt} \quad (4)$$

$v_p$ 를 구하기 위해서는  $i_1$ 을 알아야 하고, 식 (5)와 같다.

$$i_1(t) = i_0(t) + \frac{i_2(t)}{a} \quad (5)$$

$i_2$ 는 식 (3)을 이용하여 구할 수 있으므로, 여기서는 여자 전류  $i_0$ 를 구하는 방법을 설명한다.

$i_0$ 는 임의의 자속  $\lambda$ 를 유지하기 위하여 필요한 전류이며,  $\lambda$ 와  $i_0$ 와의 관계는 그림 2와 같은 히스테리시스 루프로 표현된다. 따라서  $i_0$ 를 구하기 위해서는 코어에 유지되는  $\lambda$ 를 식 (6)을 이용하여 구하고, 이를 히스테리시스 루프에 대입하면  $\lambda$ 에 해당되는  $i_0$ 를 구할 수 있다.

$$\lambda(t) = \int_0^t a[v_s(t) + v_2(t)]dt \quad (6)$$

하지만, 히스테리시스 루프를 이용하여  $i_0$ 를 구하게 되면,  $\lambda$ 에 고조파가 포함되어 있을 경우 또는 직류 오프셋 성분이 포함되어 있는 경우에 오차가 증가하게 된다. 참고문헌 [3]에서는 식 (7)과 같이  $i_0$ 를 철손 전류인  $i_c$ 와 자화 전류인  $i_m$ 으로 나누어서 구하였다.

$$i_0(t) = i_c(t) + i_m(t) \quad (7)$$

$i_c$ 는 식 (8)과 같이  $a[v_s(t) + v_2(t)]$ 와 철손 저항  $R_c$ 를 통해 구한다.

$$i_c(t) = \frac{a[v_s(t) + v_2(t)]}{R_c} \quad (8)$$

한편, 그림 2의 히스테리시스 루프 가로축  $i_0$ 에서  $i_c$  성분을 제외한  $\lambda - i_m$  곡선을 얻을 수 있으며, 이를 그림 3에 나타내었다. 따라서 식 (6)에서 구한  $\lambda$ 를  $\lambda - i_m$  곡선에 대입하면  $i_m$ 을 구할 수 있으며, 히스테리시스 루프에 대입한 것에 비해 오차가 적다.

$i_c$ 와  $i_m$ 을 구한 후 식 (7)로부터  $i_0$ 를 구하고,  $i_0$ 와  $i_2$ 를 식 (5)에 대입해  $i_1$ 을 구한 후 이를 식 (4)에 대입하면  $v_p$ 를 구할 수 있다.

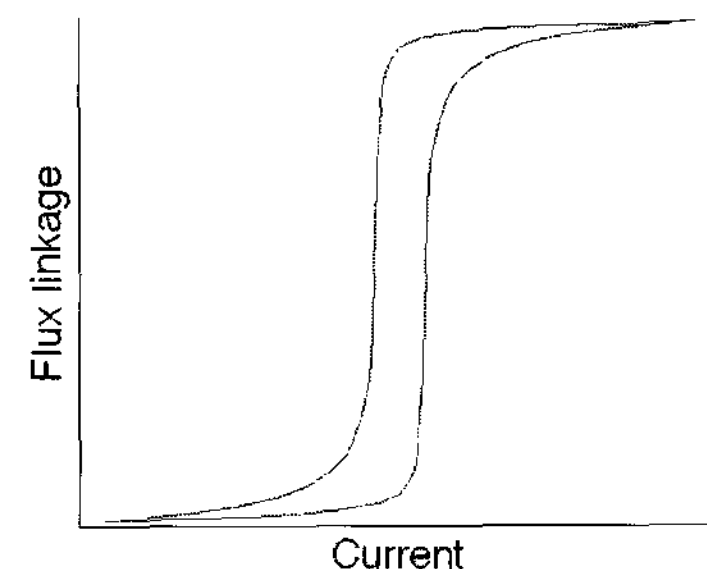


그림 2 히스테리시스 루프  
Fig. 2 Hysteresis loop

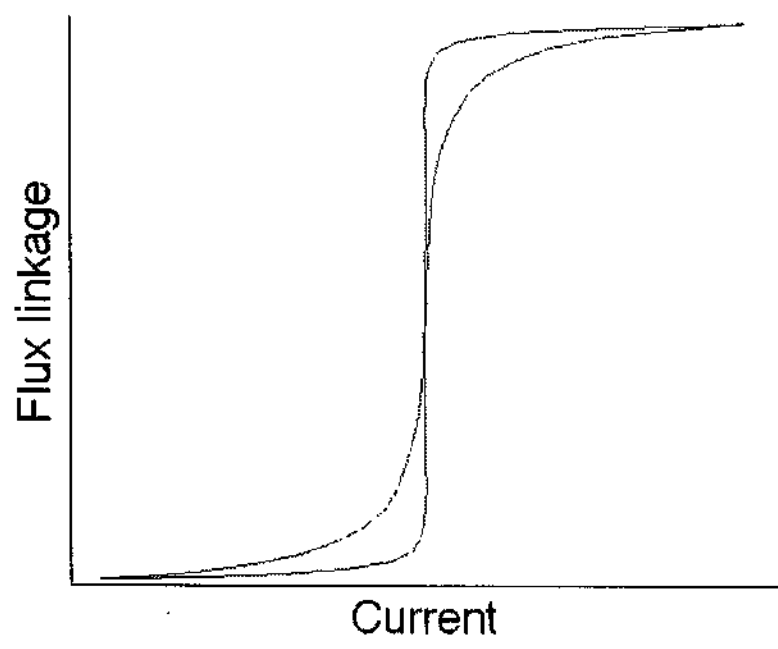


그림 3  $\lambda-i_m$  곡선

Fig. 3  $\lambda-i_m$  curve

### 3. 사례 연구

#### 3.1 모델 계통

그림 4는 사례 연구에 사용된 22.9kV 배전 시스템을 나타낸다. 시스템의 모델링은 EMTP를 사용하였으며, 단락 용량 1GVA, 배전선로 5km, 부하 용량 6MVA로 모의 하였다. 전압 변성기 모델링 시 히스테리시스 특성을 고려하기 위하여 비선형 소자인 96소자를 포함하였다. 히스테리시스 데이터는 보조 프로그램인 HYSDAT을 통해 얻었고 포화점은 자속 60Vs, 전류 0.016A로 하였다. 변압비는 13200V/110V이며, 전압 변성기의 권선 파라미터와 부담 저항은 각각  $R_1 = 4970\Omega$ ,  $L_1 = 0.1mH$ ,  $R_2 = 0.473\Omega$ ,  $L_2 = 0.1mH$ ,  $R_b = 60.5\Omega$ 을 사용하였다. 주기 당 64샘플 데이터로 전압 변성기의 2차 전압을 생성하였으며, 저역통과 필터는 1920Hz의 컷오프 주파수를 갖는 중첩방지용 1차 RC 필터를 사용하였다.

히스테리시스 루프는 전압 변성기의 1차에, 정격 전압의 120%, 100%, 80%인 전압을 인가하여 취득하였으며, 이를 그림 5에 나타내었다. 실선은 정격 전압의 120%, 점선은 100%, 쇄선은 80%인 경우를 나타낸다. 그림 6은 그림 5의 히스테리시스 루프로부터 철손 전류 성분을 제외한  $\lambda-i_m$  곡선을 각 전압별로 나타내었다. 여기서, 철손 전류는 정격 전압의 120%, 100%, 80%시에 각각 9240kA, 7870kA, 6480kA의 철손 저항으로부터 구하였다.

제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 지표로서 전자식 전압 변성기의 국제 규격을 참고하였다[4]. 표 1은 IEC 60044-7에서 규정하고 있는 측정용 전자식 전압 변성기의 오차 등급이다. 측정용 전압 변성기의 경우, 정격 전압의 120%, 100%, 80%인 경우에 표 1의 비오차와 위상오차를 동시에 만족해야 한다.

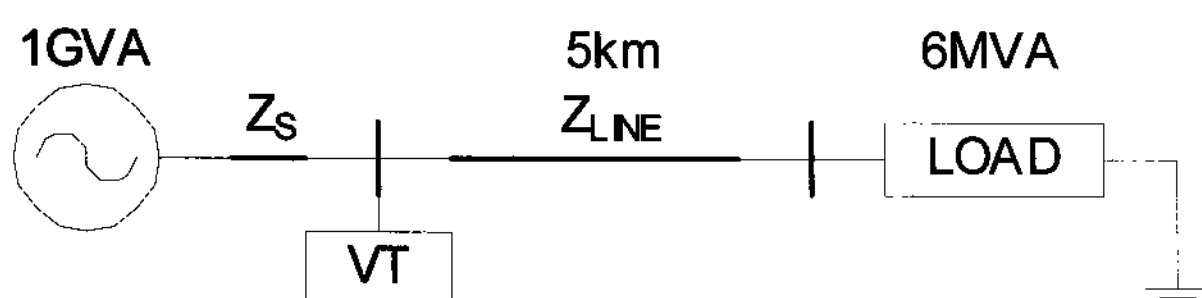


그림 4 모델 계통

Fig. 4 Model system

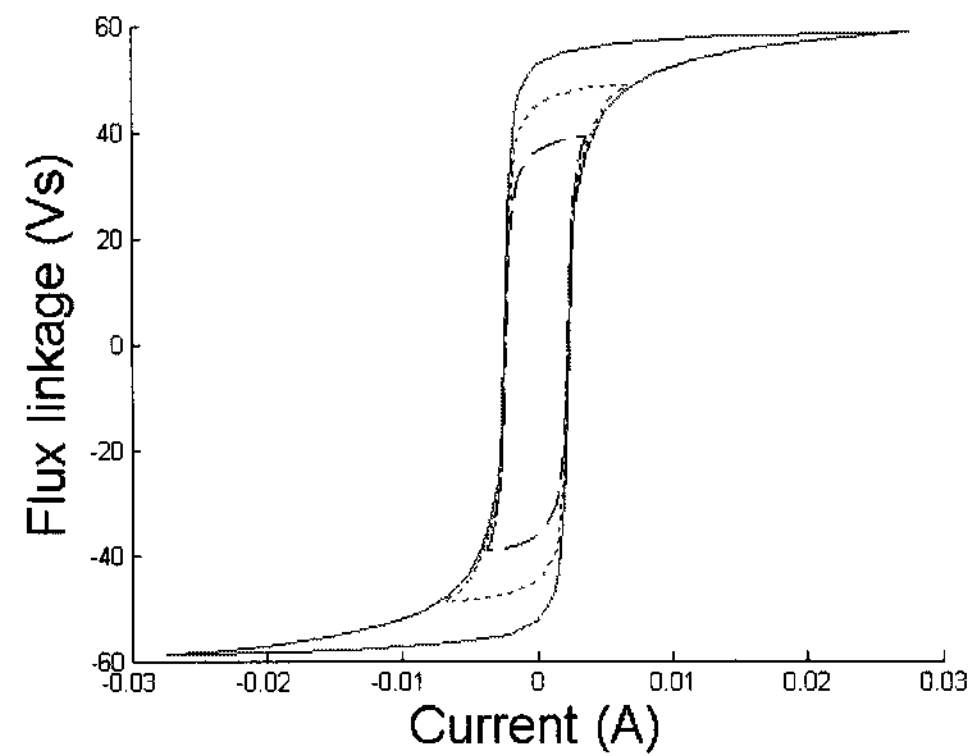


그림 5 정격의 120, 100, 80%인 경우 히스테리시스 루프

Fig. 5 Hysteresis loops for the 120%, 100%, and 80% of the rated voltage

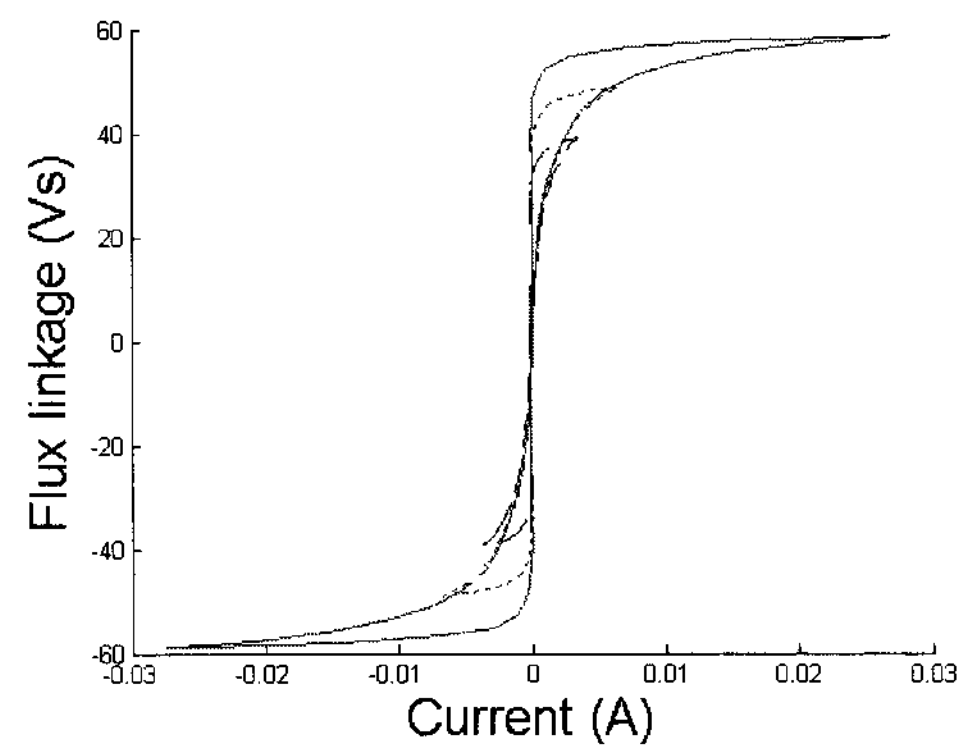


그림 6 정격의 120, 100, 80%인 경우  $\lambda-i_m$  곡선

Fig. 6  $\lambda-i_m$  curve for 120%, 100%, and 80% of the rated voltage

표 1 IEC 60044-7 전압 변성기 오차 규정

Table 1 The accuracy class for the measurement voltage transformer of IEC 60044-7

정밀도 등급	$\pm$ 비오차 (%)	$\pm$ 위상오차 (분)
0.1	0.1	5
0.2	0.2	10
0.5	0.5	20
1.0	1.0	40

#### 3.2 정격 전압의 120%인 경우

그림 7은 정격 전압의 120%인 경우의 결과를 나타낸다. 그림 7a는  $v_1$ 과 2차 전압을 1차로 환산한  $av_2$ 를 각각 실선과 점선으로 표시하였다. 그림에서 두 전압 파형의 차이가  $v_p + av_s$ 이며, 이 항이 전압 변성기의 오차가 된다. 측정 전압의 비오차는 -1.422%, 위상오차는 7.732분이다. 그림 7b는 식 (2)를 이용해 구한  $v_s$ 를 1차로 환산한  $av_s$ 이다. 그림 7c에는 식 (8)을 이용해서 구한  $i_c$ 와, 자속을 그림 6의 곡선에 대입하여 구한  $i_m$ 을 각각 쇄선, 점선으로 나타내었으며, 식

(7)을 이용하여 구한  $i_0$ 를 실선으로 나타내었다. 그림 7d에는  $i_0$ 와 1차로 환산한 2차 전류  $i_2/a$ 를 각각 점선과 쇠선으로 나타내었으며, 식 (5)을 이용하여 구한  $i_1$ 을 실선으로 나타내었다. 정현 성분만을 갖는  $i_2/a$ 에 비해 여자 전류를 포함하는  $i_1$ 에는 비정현 성분이 포함되어 왜곡된 것을 볼 수 있다. 그림 7e에는 식 (4)를 이용하여 구한  $v_p$ 를 나타낸다.  $v_p$  역시 여자 전류의 영향으로 비정현 성분이 포함 된 것을 볼 수 있다. 그림 7f에, 측정 전압  $av_2$ 를 점선으로 표시하였으며,  $av_2$ 에 그림 7b의  $av_s$ 와 그림 7e의  $v_p$ 를 합하여 보상한 전압을 쇠선으로 나타내었고,  $v_1$ 을 실선으로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 보상한 전압이 1차 전압이 매우 유사함을 볼 수 있으며,  $av_2$ 와 보상 전압의 비오차와 위상오차를 표 2에 나타내었다.  $av_2$ 는 IEC 60044-7 규정의 1.0급을 만족하지 못하지만 보상 한 경우에는 0.1급의 오차 범위 안에 있는 것을 알 수 있다.

3.3 정격 전압의 100%인 경우

그림 8은 정격 전압의 100%인 경우의 결과를 나타낸다. 그림 8a는  $v_1$ 과  $av_2$ 를 나타내며, 두 전압 파형의 차이가 있음을 알 수 있다.  $av_2$ 의 비오차는 -1.414%, 위상오차는 2.93분이다. 그림 8b는  $av_s$ 를 나타낸다. 그림 8c는  $i_0$ ,  $i_m$ ,  $i_c$ 를 나타낸다. 120%에 비해 여자 전류의 비정현 성분이 작아진 것을 볼 수 있다. 그림 8d는  $i_1$ ,  $i_0$ ,  $i_2/a$ 를 나타낸다. 작아진 여자 전류의 비정현 성분으로 인해  $i_1$ 의 비정현 성분 역시 작아진 것을 볼 수 있다. 그림 8e는  $v_p$ 를 나타낸다.  $v_p$  역시 비정현 성분이 포함 되어 있으나 120%에 비해 비정현 성분이 작아졌다. 그림 8f는 보상 전압과  $v_1$ ,  $av_2$ 를 나타내며, 보상한 전압이 1차 전압과 거의 유사함을 알 수 있다. 표 3은  $av_2$ 와 보상 전압의 비오차와 위상오차를 나타낸다.  $av_2$ 는 IEC 60044-7 규정의 1.0급을 만족하지 못하지만 보상 한 경우에는 0.1급의 오차 범위 안에 있는 것을 볼 수 있다.

3.4 사례 3: 정격 전압의 80%인 경우

그림 9는 정격 전압의 80%인 경우의 결과를 나타낸다. 그림 9a는  $v_1$ 과  $av_2$ 를 나타내며,  $av_2$ 의 비오차는 -1.424%, 위상오차는 2.16분이다. 그림 9b는  $av_s$ 를, 그림 9c는  $i_0$ ,  $i_m$ ,  $i_c$ 를 나타낸다. 80%의 경우 120%나 100%에 비해 여자 전류의 비정현 성분이 작아진 것을 볼 수 있다. 그림 9d는  $i_1$ ,  $i_0$ ,  $i_2/a$ 를 나타낸다. 사례 2, 3에 비해 여자 전류의 비정현 성분이 작아져  $i_1$ 과  $v_p$ 의 비정현 성분 역시 작아진 것을 볼 수 있다. 그림 9f는 보상 전압과  $v_1$ ,  $av_2$ 를 나타낸다. 표 4는  $av_2$ 와 보상 전압의 비오차와 위상오차를 나타낸다.  $av_2$ 는 IEC 60044-7 규정의 1.0급을 만족하지 못하지만 보상 한 경우에는 0.1급의 오차 범위 안에 있는 것을 볼 수 있다.

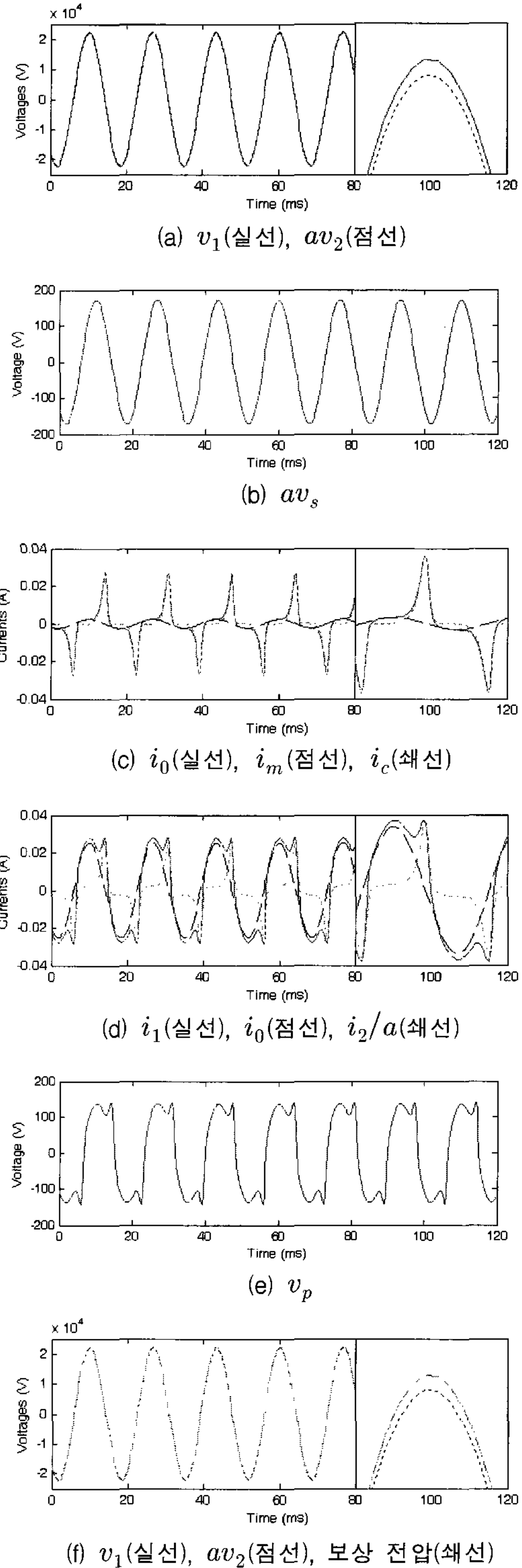
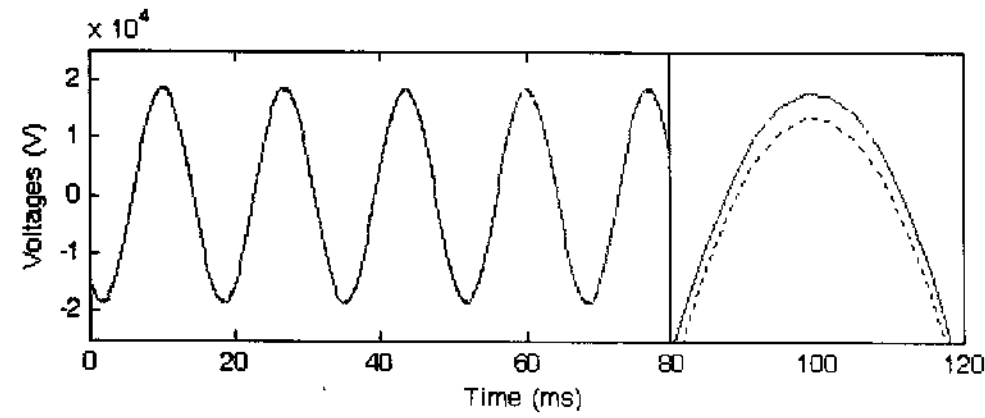


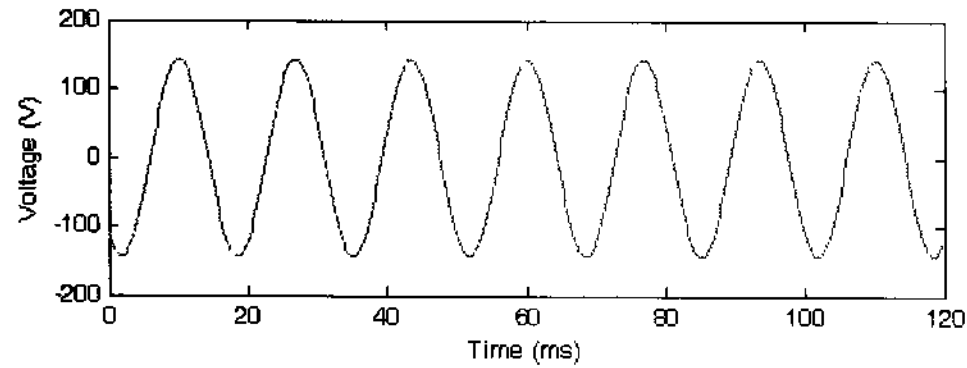
그림 7 정격 전압의 120%인 경우 결과  
Fig. 7 Results for 120% of the rated voltage

표 2 정격 전압의 120% 인 경우의 오차  
Table 2 Errors for the 120% rated voltage

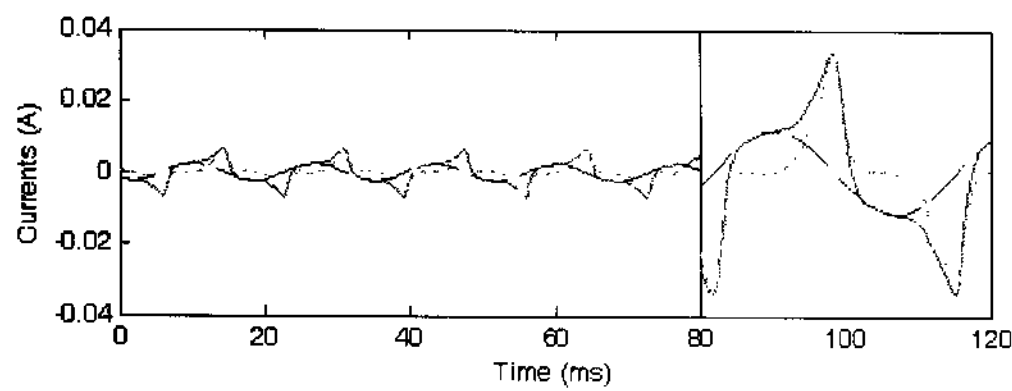
	측정 전압	보상 전압
비오차 (%)	-1.422	0.0002
위상오차 (분)	7.732	-0.1



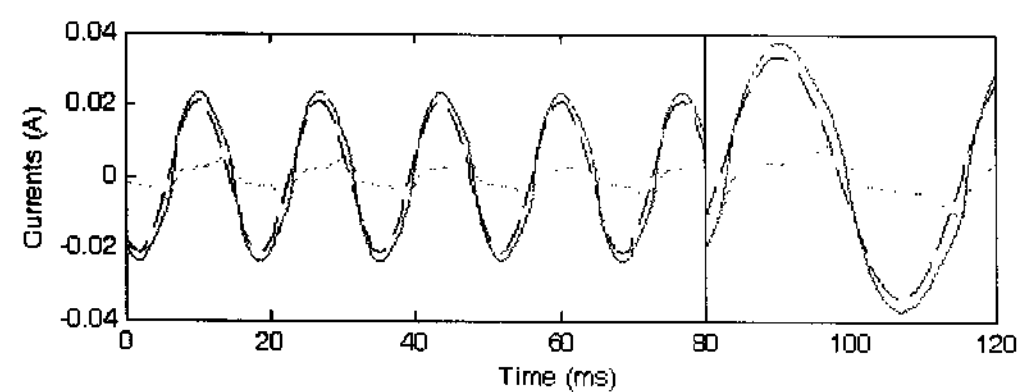
(a)  $v_1$ (실선),  $av_2$ (점선)



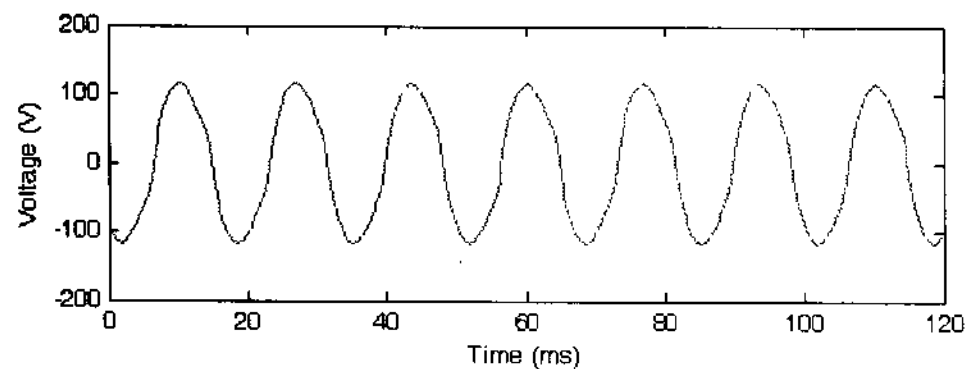
(b)  $av_s$



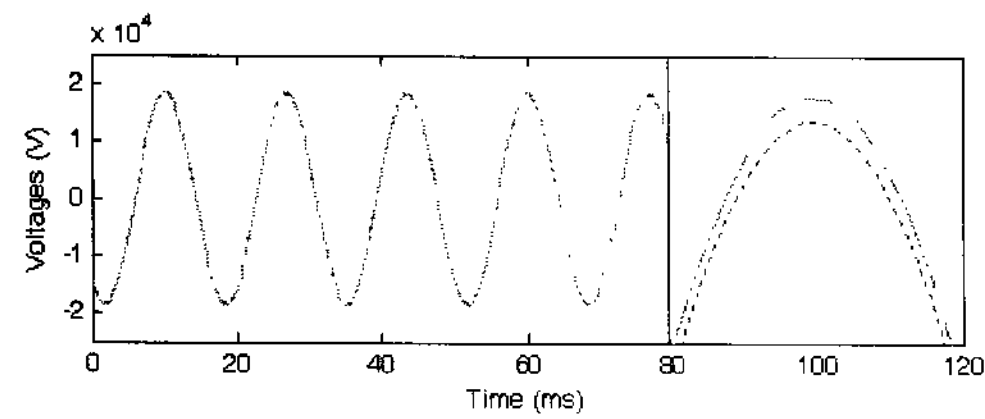
(c)  $i_0$ (실선),  $i_m$ (점선),  $i_c$ (쇄선)



(d)  $i_1$ (실선),  $i_0$ (점선),  $i_2/a$ (쇄선)



(e)  $v_p$



(f)  $v_1$ (실선),  $av_2$ (점선), 보상 전압(쇄선)

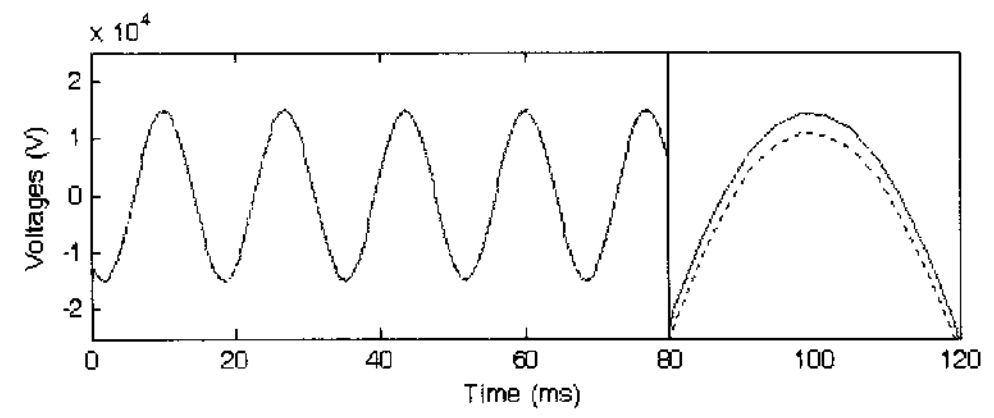
그림 8 정격 전압의 100%인 경우 결과

Fig. 8 Results for 100% of the rated voltage

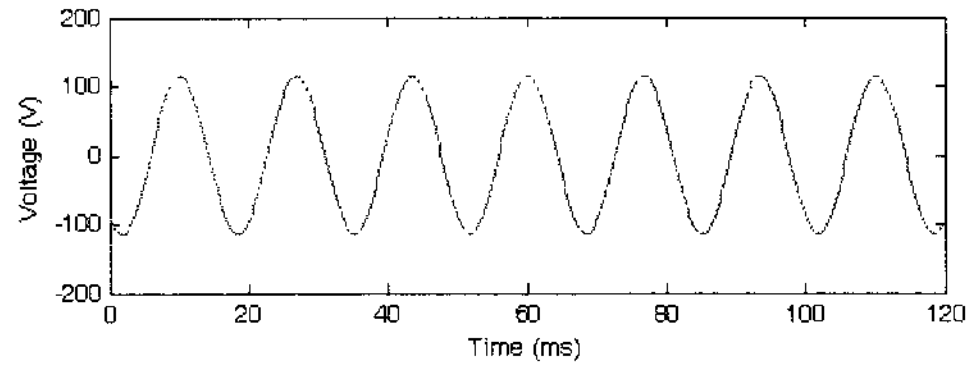
표 3 정격 전압의 100%인 경우의 오차

Table 3 Errors for the rated voltage

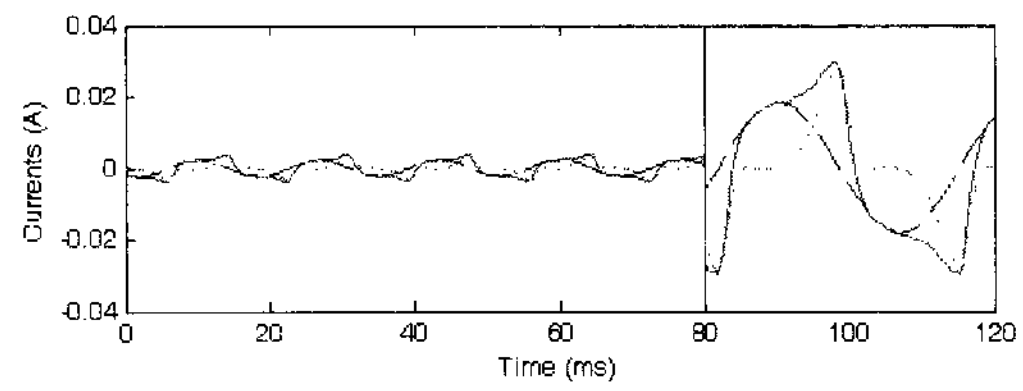
	측정 전압	보상 전압
비오차 (%)	-1.414	0.001
위상오차 (분)	2.93	-0.03



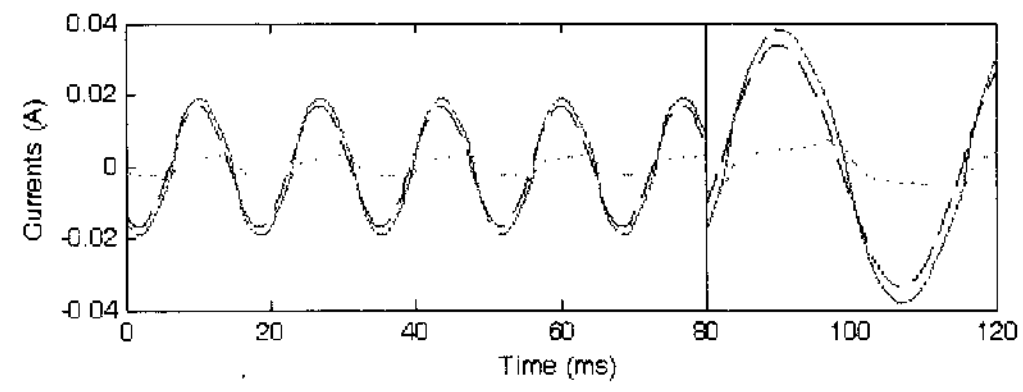
(a)  $v_1$ (실선),  $av_2$ (점선)



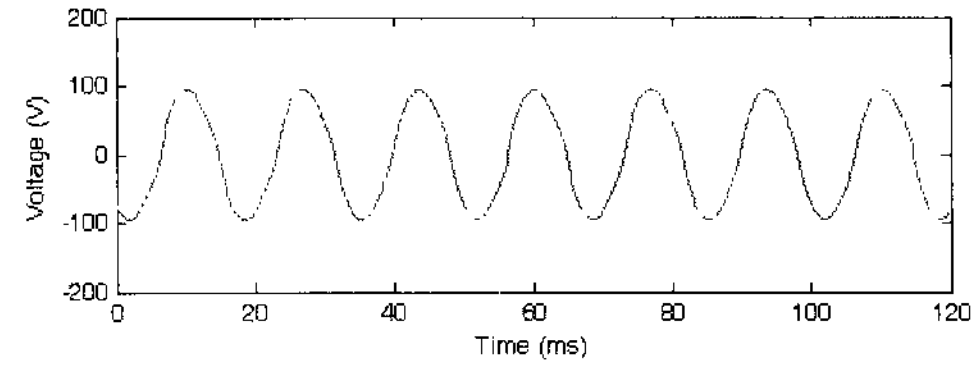
(b)  $av_s$



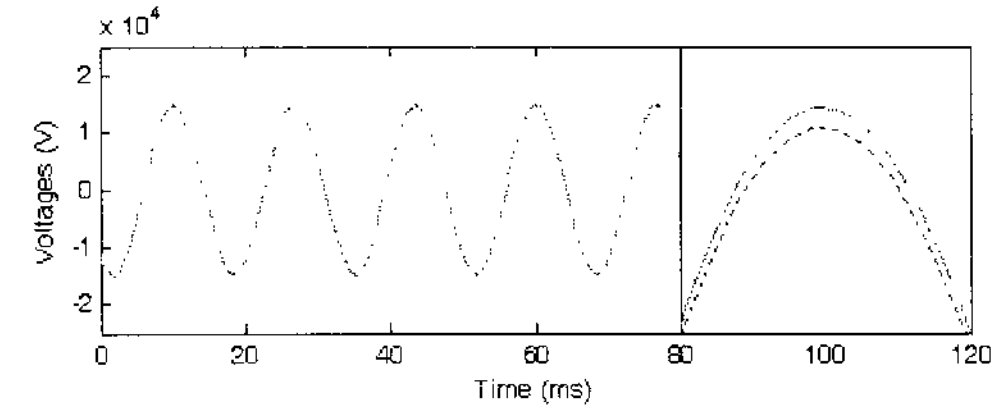
(c)  $i_0$ (실선),  $i_m$ (점선),  $i_c$ (쇄선)



(d)  $i_1$ (실선),  $i_0$ (점선),  $i_2/a$ (쇄선)



(e)  $v_p$



(f)  $v_1$ (실선),  $av_2$ (점선), 보상 전압(쇄선)

그림 9 정격 전압의 80%인 경우 결과

Fig. 9 Results for 80% of the rated voltage

표 4 정격 전압의 80%인 경우의 오차

Table 4 Errors for the 80% rated voltage

	측정 전압	보상 전압
비오차 (%)	-1.424	0.0001
위상오차 (분)	2.16	-0.002

#### 4. 결 론

본 논문에서는 히스테리시스 특성을 고려한 전압 변성기의 오차 보상 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 시간 영역에서 2차 권선 전압과 1차 권선 전압을 각각 추정 후 이를 2차 측정 전압과 합하여 전압 변성기의 오차를 보상하는 방법이다. 제안한 방식은 철심의 히스테리시스 특성을 고려하여 오차를 보상하므로, 전압 변성기의 오차를 현저하게 개선 가능하다.

사례연구 결과 정격 전압의 120%, 100%, 80%인 경우, 전압 변성기의 오차를 보상하지 않은 경우에는 오차가 1.0급을 초과하지만, 보상한 경우에는 0.1급을 만족함을 확인하였다.

제안한 방식을 이용하면 투자율이 높은 코어나 단면적의 크기 증가 없이 전압 변성기의 오차를 현저하게 개선할 수 있다.

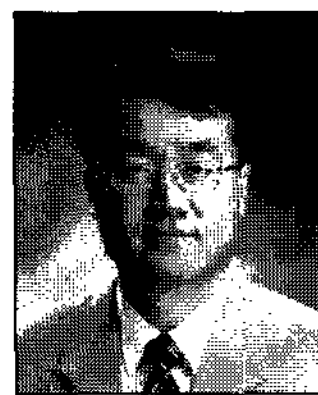
#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-408)주관으로 수행된 과제임.

#### 참 고 문 헌

- [1] D. Slomovitz, "Electronic compensation of voltage transformer" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 37, Dec. 1988 pp. 652 - 654
- [2] D. Slomovitz, "Electronic Based High-Voltage Measuring Transformer" IEEE Trans. Power delivery. vol. 17, No. 2, April. 2002 pp. 359 - 361
- [3] 강용철, 소순홍, 정태영, 장성일, 김용균, "히스테리시스 특성을 고려한 측정용 변류기 2차 전류 보상 알고리즘", 전기학회 논문지. vol. 55, No. 10, 10. 2007 pp. 1709 - 1714
- [4] KS C IEC 60044-1 or 7: 2003

#### 저 자 소 개



#### 강 용 철 (姜 龍 澈)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사). 현재, 전북대학교 전자정보공학부 부교수.

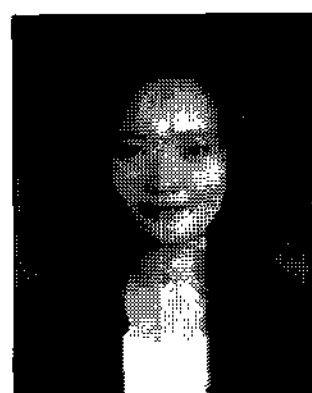
Tel : 063-270-2391  
Fax : 063-270-2394  
E-mail : yckang@chonbuk.ac.kr



#### 박 종 민 (朴 鍾 玟)

1979년 3월 9일생. 2006년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2006년~현재 전북대학교 대학원 전기공학과 석사과정

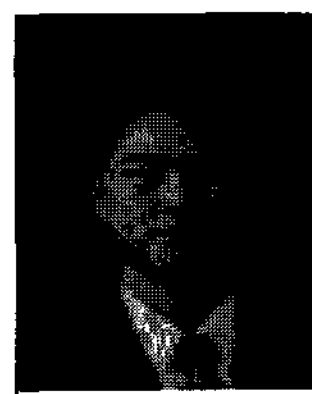
Tel : 063-270-2391  
Fax : 063-270-2394  
E-mail : qbism9717@chonbuk.ac.kr



#### 이 미 선 (李 美 善)

1983년 9월 10일생. 2007년 전북대학교 전자정보공학부 졸업. 2007년~현재 전북대학교 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 063-270-2391  
Fax : 063-270-2394  
E-mail : sagomaker@chonbuk.ac.kr



#### 장 성 일 (張 成 一)

1971년 8월 30일생. 1996년 강원대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사). 현재 전북대학교 대학원 전기공학과 BK21 연구교수

Tel : 063-270-2389  
Fax : 063-270-2394  
E-mail : sijang@chonbuk.ac.kr



#### 김 용 균 (金 容 均)

1973년 7월 4일생. 1993년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 한국IED Eng. 대표이사

Tel : 02-529-2113  
Fax : 02-571-9207  
E-mail : ygkim@hankookied.com