

히스테리시스 특성을 고려한 전압 변성기 오차 보상 알고리즘

강용철\*, 정태영\*, 박종민\*, 장성일\*, 김용근\*\*  
 \*전북대학교, \*\* (주)한국 아이이디 이엔지

Compensation algorithm of a voltage transformer considering hysteresis characteristics

Yong-Cheol Kang\*, Taiying Zheng\*, Jong-Min Park\*, Sung-Il Jang\*, Yong-Guen Kim\*\*  
 \*Chonbuk National University, \*\*HANKOOK IED ENG

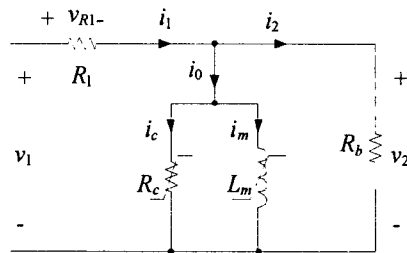
**Abstract**-A voltage transformer (VT) is used to transform a high voltage into a low voltage as an input for a metering device or a protection relay. VTs use an iron core which maximizes the flux linkage. The primary current of the VT has non-fundamental components caused by the hysteresis characteristics of the iron core. It causes a voltage drop in the winding impedances resulting in the error of the VT. This paper describes a compensation algorithm for the VT. The proposed algorithm can compensate the secondary voltage of VT by calculating the primary current from the exciting current of the hysteresis loop in the voltage transformer. In this paper, the exciting branch was divided into a non-linear core loss resistor and a non-linear magnetizing inductor. The performance of the proposed algorithm was validated under various conditions using EMTP generated data. Test results show that the proposed compensation algorithm can improve the accuracy of the VT significantly.

알고리즘은 EMTP에서 생성한 데이터를 사용하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 전압 변성기의 등가회로

그림 1은 1차측으로 환산한 전압 변성기의 등가 회로이며, 2차측 권선저항과 1차, 2차측 누설인덕턴스는 무시하였다.



- $v_2$ : 1차 측으로 환산한 2차 전압
- $i_2$ : 1차 측으로 환산한 2차 전류
- $v_1$ : 1차 전압
- $v_{R1}$ :  $R_1$ 에 걸리는 전압
- $R_1$ : 1차 권선저항
- $R_c$ : 철손 저항
- $R_b$ : 부담
- $i_1$ : 1차 전류
- $i_0$ : 여자 전류
- $i_c$ : 철손 전류
- $i_m$ : 자화 전류
- $L_m$ : 자화 인덕턴스

<그림 1> 전압 변성기 등가회로

그림 1의 전압 변성기 등가회로를 이용하여 식 (1)~(4)을 얻을 수 있다.

$$v_1 = v_2 + v_{R1} \tag{1}$$

$$v_{R1} = R_1 i_1 \tag{2}$$

$$i_0 = i_c + i_m \tag{3}$$

$$i_1 = i_2 + i_0 \tag{4}$$

2.2 전압 변성기의 오차 보상 알고리즘

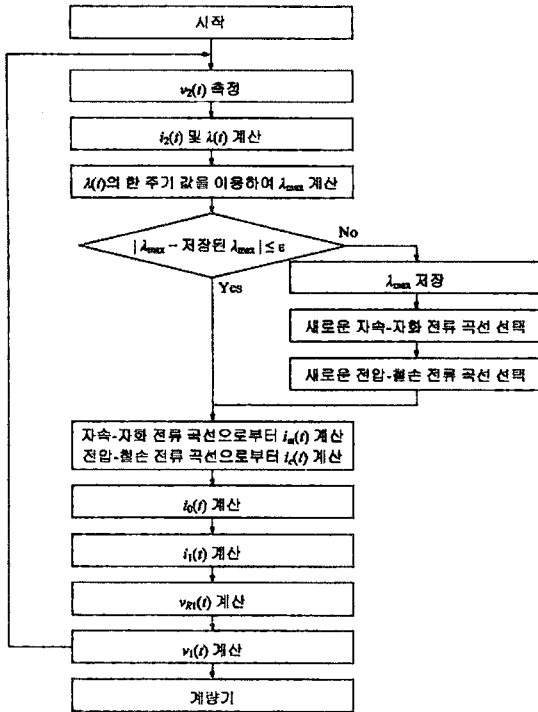
전압 변성기의 출력전압을 입력신호로 사용하는 계전기 및 측정 장비는 입력 신호에 변성기의 권선비를 곱하여  $v_1$ 을 계산한다. 그러나 실제 전압 변성기는 식 (1)과 같이  $R_1$ 에 흐르는  $i_1$ 의 영향으로  $v_{R1}$  만큼의 전압 강하가 발생한다. 그러므로 전압 변성기의 오차 보상 방법은 전압 변성기에 흐르는  $i_1$ 을 추정 한 후 식 (2)를 이용하여

1. 서 론

전력 계통에서 계전기의 입력과 측정을 목적으로 계통의 높은 전압을 낮은 전압신호로 변환하기 위해 전압 변성기를 사용한다. 전압변성기의 출력전압은 계전기와 측정용 장비의 입력신호가 되므로, 고정밀도 전압변성기는 전력시스템의 보호 측면에서 중요한 역할을 담당한다.

대부분의 전압 변성기는 상호 쇄교 자속을 높이기 위해 코어로 철심을 사용하며, 철심 코어는 히스테리시스 특성이 있다. 전압 변성기에 흐르는 전류는 철심 코어의 히스테리시스 특성으로 인하여 비선형 특성을 가지며, 1차, 2차측 권선저항에서 전압강하를 일으키므로 전압 변성기 2차측 전압은 1차측 전압의 권선비와 다른 값이 측정되며, 이것이 전압 변성기의 오차이다.[1] 이러한 전압 변성기의 오차를 감소시키기 위해 철심의 자화 인덕턴스가 큰 값을 갖도록 철심의 단면적을 크게 하거나, 투자율이 큰 재질을 사용한다. 하지만 이 방식은 전압 변성기의 크기와 제작 비용을 증가시킨다.

본 논문에서는 히스테리시스 특성을 고려한 전압 변성기의 오차 개선 방법을 제안한다. 제안한 알고리즘은 여자 전류를 자화 전류와 철손 전류로 나누어 구하는데, 자화 전류는 측정된 2차 전압과 자속-자화 전류 곡선을 사용하여 얻을 수 있고, 철손 전류는 측정된 2차 전압과 2차 전압-철손 전류 곡선을 사용하여 얻을 수 있다. 본 논문의 자속-자화 전류 곡선은 히스테리시스 루프의 정점을 연결한 궤적 아니고, 히스테리시스 루프의 중간 곡선이다. 철손 전류와 자화 전류를 더하여 여자 전류를 구하고, 이 여자전류로 전압 변성기 1차 측에 흐르는 전류를 계산한다. 계산한 1차 전류로 권선저항의 전압 강하를 구한 후 이를 보상하여, 오차를 개선한다. 제안한



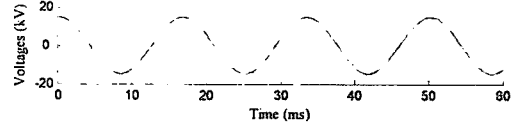
<그림 2> 히스테리시스 특성을 고려한 전압 변성기 오차 개선 방법 흐름도

$v_{R1}$  값을 계산하고 그 값을  $v_2$ 에 합하여  $v_1$ 을 추정한다.  $i_1$ 을 추정하는 방법은 변류기의 일차 전류를 추정할 참고문헌[2]의 방법을 적용하였다.

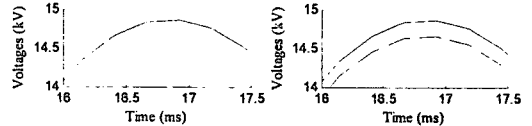
본 논문의 전압 변성기 오차 보상 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 전압 변성기 출력 단계에서 측정된  $v_2$ 로부터 자속과  $i_2$ 를 계산한다. 계산한 자속을 자속의 최대값에 따른 자속-자화 전류 곡선( $i-i_m$ )에 넣어  $i_m$ 을 구하고, 전압-철손 전류 곡선에 넣어  $i_c$ 를 구하며, 이  $i_m$ 과  $i_c$ 를 합하여 식 (3)에서와 같이  $i_0$ 를 구한다.  $i_1$ 은 식 (4)과 같이  $i_2$ 와  $i_0$ 의 합으로 나타낼 수 있다. 이와 같이 추정된  $i_1$ 을 이용하여 1차 권선저항에 전압 강하 값을 계산하고 이를  $v_2$ 와 합하면 히스테리시스 특성을 고려한 전압 변성기의  $v_1$ 을 추정할 수 있다. 그림 2는 제안한 알고리즘의 흐름도이다.

### 3. 사례 연구

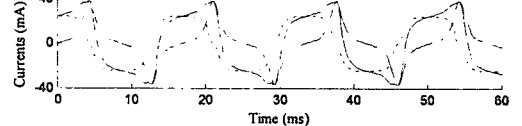
제안한 방식의 성능을 검증하기 위하여 EMTF를 사용하여 전압 변성기를 모델링 하였으며, 모델링 시 히스테리시스 특성을 고려하기 위하여 비선형 소자인 96소자를 포함하였다. 96소자의 포화점은 60.0[Vs], 0.45[A]로 정격전압의 121%로 설계하였다. 전압 변성기의 권선비는 22.9kV/110V이며, 자속-자화 전류 곡선과 전압-철손 전류 곡선은 1차 측에 정격 전압의 80%, 100%, 120%를 인가하여 값을 취득하였다. 이는 KS C IEC 60044-7: 2003 계기용 전압 변성기 오차 규정에 따르기 위함이다 [3]. 전압 변성기의 일차 권선 저항은 4970 $\Omega$ 을 사용하였으며 [4] 부담은 60.5 $\Omega$ 을 사용하였다. 주기 당 64샘플 데이터를 사용하고, 지역봉과 필터로 1920Hz의 컷오프 주파수를 갖는 중첩방지용 1차 RC 필터를 사용하였다.



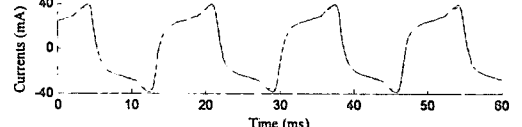
(a) 1차전압, 2차전압, 보상한 전압



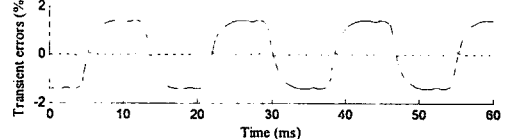
(b) 1차전압, 2차전압, 보상한 전압의 부분 확대



(c) 추정한 자화 전류, 철손 전류, 여자 전류



(d) 추정한 여자 전류, 실제 여자전류



(e) 보상한 전압과 보상하지 않은 전압의 과도오차

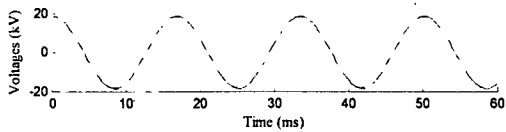
### <그림 3> 정격 전압의 80%에서의 보상

#### 3.1 정격 전압의 80%일 때 보상한 경우

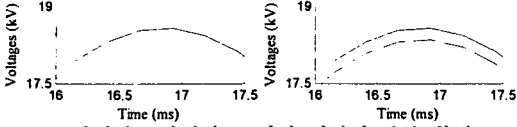
그림 3은 전압 변성기 1차 전압이 정격전압의 80%인 경우인 사례 1의 결과를 나타냈다. 그림 3a에서 실선은 1차 전압, 점선은 측정된 2차 전압 그리고 파선은 보상한 전압을 나타냈다. 보상알고리즘 적용 결과를 명확히 확인하기 위하여 확대한 그림을 그림 3b에 나타냈다. 1차 전압 14.86kV, 2차 전압 14.65kV, 보상한 전압 14.86kV임을 확인할 수 있다. 측정된 2차 전압과 1차 전압 사이에 1차 권선저항에 전압 강하 값만큼의 오차가 발생하였으나, 보상한 전압은 1차 전압과 거의 차이가 없었다. 그림 3c에서 점선은 철손 전류를, 파선은 자화 전류를, 실선은 여자 전류를 나타내며, 보상 알고리즘을 적용하여 추정한 값이다. 추정한 철손 전류와 자화 전류의 합은 추정한 여자전류와 같다. 그림 3d에서 점선은 추정한 여자전류를, 실선은 실제 여자전류를 나타내었다. 보상 알고리즘을 적용하여, 추정한 여자전류는 실제 여자전류와 거의 차이가 없었다. 그림 3e에서 점선은 보상한 전압의 과도오차이고, 실선은 보상하지 않은 전압의 과도오차이다. 보상하지 않은 경우의 비 오차는 -1.539%에서 -0.00882%로 줄었고, 위상 오차의 경우 22.9분에서 -0.0955분으로 줄었다.

#### 3.2 정격 전압의 100%일 때 보상한 경우

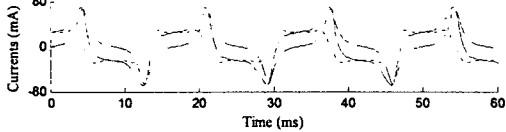
그림 4은 전압 변성기 1차 전압이 정격전압의 100%인 경우인 사례 2의 결과를 나타냈다. 그림 4a에서 1차 전압 18.57kV, 2차 전압 18.34kV, 보상한 전압 18.57kV임을 확인 하였다. 보상하지 않은 경우의 비 오차는 -1.441%에서 -0.00136%로 줄었고, 위상 오차의 경우 30.546분에서 -0.0162분으로 줄었다.



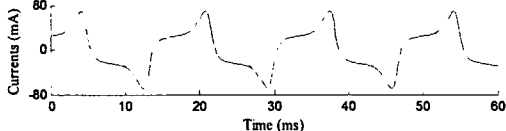
(a) 1차전압, 2차전압, 보상한 전압



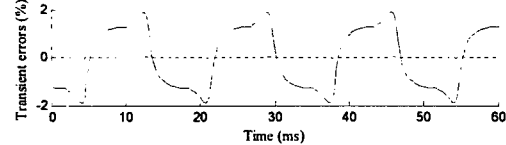
(b) 1차전압, 2차전압, 보상한 전압의 부분 확대



(c) 추정한 자화 전류, 철손 전류, 여자 전류

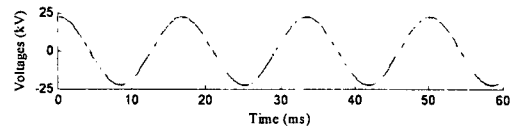


(d) 추정한 여자 전류, 정확한 여자전류

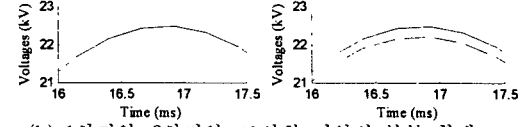


(e) 보상한 전압과 보상하지 않은 전압의 과도오차

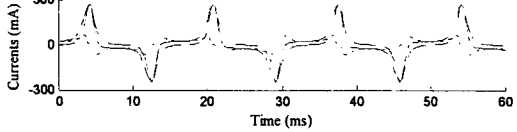
<그림 4> 정격 전압의 100%에서의 보상



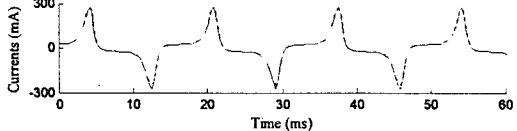
(a) 1차전압, 2차전압, 보상한 전압



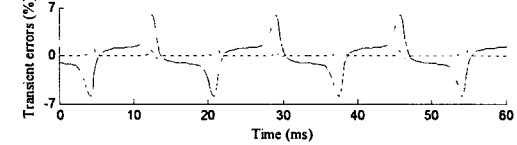
(b) 1차전압, 2차전압, 보상한 전압의 부분 확대



(c) 추정한 자화 전류, 철손 전류, 여자 전류



(d) 추정한 여자 전류, 정확한 여자전류



(e) 보상한 전압과 보상하지 않은 전압의 과도오차

<그림 5> 정격 전압의 120%에서의 보상

### 3.3 정격 전압의 120%일 때 보상한 경우

그림 5은 전압 변성기 1차 전압이 정격전압의 120%인 경우인 사례 3의 결과를 나타냈다. 그림 5a에서 1차 전압 22.46kV, 2차 전압 22.21kV, 보상한 전압 22.46kV임을 확인 하였다. 보상하지 않은 경우의 비 오차는 -1.561%에서 -0.0112%로 줄었고, 위상 오차의 경우 77.04분에서 -0.5171분으로 줄었다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 히스테리시스 특성을 고려한 전압 변성기의 오차 보상 방법을 제안하였다. 제안된 오차 보상 방법은 히스테리시스 특성을 고려하여 전압 변성기의 여자 전류를 구한 다음 여자 전류와 2차 전류를 합하여 1차 전류를 계산하고, 이 값을 이용하여 1차 권선저항의 전압을 계산하여 이 값을 2차 전압에 합하여 보상하는 방법이다. 측정용 전압 변성기는 정격 전압의 80-120% 범위 내에서 오차 범위를 만족해야 하는 계기용 변성기규정에 따라 정격 전압의 80%, 100%, 120%를 모의한 결과 3가지 사례모두 오차가 개선됨을 확인 할 수 있다.

제안한 방식을 이용하면 전압 변성기의 철심 크기의 증가 없이 오차를 개선할 수 있으며, 기존 철심 코어를 이용하여 정밀급 전압 변성기를 제작할 수 있는 장점이 있다. 또한 보호 계전기에 정확한 입력신호를 제공하여 보호 계전기의 성능을 향상시킬 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

### [참 고 문 헌]

- [1] D. Slomovitz, "Electronic compensation of voltage transformer," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 37, Issue 4, Dec. 19 88 pp. 652-654.
- [2] 강용철, 정태영, 이병은, 소순홍, 이현웅, 이미선, 박정호, 최현태, 장성일, 김용균, "히스테리시스 특성을 고려한 측정용 변류기 보상 알고리즘," 2007년도 대한전기학회 하계학술대회, 2007년 7월.
- [3] KS C IEC 60044-7: 2003
- [4] A.F. Brandao Jr, A.C. de Silos, D. Ivanoff, I.P. da Silva, "A method for field verification of the precision class of inductive voltage transformers," High Voltage Engineering, 199 9. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 4 67) vol. 1, 23-27 Aug. 1999, pp. 209 - 212.