

히스테리시스 특성을 고려한 측정용 변류기 보상 알고리즘

강용철*, 정태영*, 이병은*, 소순홍*, 이현웅*, 이미선*, 박정호*, 최현태*, 장성일*, 김용균**
 *전북대학교, ** (주)한국 IED Eng. Inc.

Compensating algorithm for a measurement type CT considering hysteresis characteristic of the core

Yong-Cheol Kang*, Taiying Zheng*, Byung-Eun Lee*, Soon-Hong So*, Hyun-Woong Lee*, Mi-Sun Lee*, Jung-Ho Park*, Hyun-Tae Choi*,
 Sung-Il Jang*, Yong-Gyun Kim**
 *Chonbuk National University, **Hankook IED Eng. Inc.

Abstract - This paper deals with error compensation in current transformers. Since the exciting current can be considered as the main error source, its evaluation can allow the compensation of its detrimental effects to be obtained. The exciting current required by the transformer in every kind of steady state operation can be determined by simply acquiring the secondary current, provided that the examined CT has been preliminarily identified. This paper also proposed a new approach to the model of the exciting branch. The exciting branch can be divided into a non-linear core loss resistor, and a non-linear magnetizing inductor whose flux and current characteristic is not the same as the characteristic shown by the joined tips of the first quadrant of a family of hysteresis loops. The performance of the proposed algorithm was validated under various conditions using EMTP generated data. Test result show, in all cases an improvement in primary current reproduction accuracy, compared with that achieved using CT's ratio.

1. 서 론

변류기(Current transformer, CT)는 1차 전류의 크기를 작게 하여 계량기, 보호 계전기 등의 기기에 공급하는 것을 목적으로 한다[1]. 현재 보편적으로 사용되는 변류기는 1차 전류와 2차 전류사이의 쇠교 자속을 최대화하기 위하여, 코어를 철심으로 사용하고 있다. 측정용 변류기는 정상상태 시 전류를 변류하여 계량기 등에 입력하여야 한다. 계통의 운전 상태를 파악하기 위하여 고정밀 데이터를 취득해야 하지만, 저 전류 영역에서 사용되는 관통형 변류기는 오차가 크게 발생하는 단점이 있다. 철심 변류기의 오차는 철심 코어의 히스테리시스 특성으로 인하여 발생하는 여자 전류가 주요한 원인이 된다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 투자율이 좋은 코어를 사용하거나 코어의 단면적을 증가시키는 방법을 사용하였다. 이는 변류기의 제작 단가를 증가시킬 뿐만 아니라 변류기의 크기 또한 커지는 단점이 있어, 철심 코어의 비선형 특성으로 인한 히스테리시스 문제를 해결하는 데에는 한계가 있다.

이에 따라 철심 변류기의 오차를 보상하는 방법이 제안되었다[2]-[4]. 참고 문헌 [2]에서는 철심 변류기 2차 측에 아날로그 회로를 연결하여 부하의 상태에 따라 자화 전류를 보상하여 준다. 하지만, 이 방법은 정상상태에서 사용되는 보상 방법이며, 주파수 영역 해석 방법이다. 또한, 여자전류의 비선형 특성이 고려되지 않았으며 과과상태 시, 과전류가 생성되어 기기의 소손을 가져올 수 있다.

철심 변류기의 오차를 감소하기 위한 디지털 보상방법[3], [4]은 철심 코어의 히스테리시스 특성을 보상하는 것이다. 이 방식은 히스테리시스 루프를 사용하여 여자전류를 추정하고, 이 전류를 측정된 2차 전류에 더함으로써 보상 전류를 구하는 방식이다. 이는 철심 코어의 히스테리시스 특성을 보상하기 때문에 변류기의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 하지만 1차 전류에 dc오프셋 성분 또는 고조파가 포함된 경우에는 오차가 크게 발생하는 단점이 있다.

본 논문에서는 히스테리시스 특성을 고려한 측정용 변류기 보상 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 여자 전류를 자화 전류와 철손 전류로 나누어 구하는데, 자화 전류는 측정된 2차 전류와 자속-자화 곡선을 사용하여 얻을 수 있고, 철손 전류는 측정된 2차 전류와 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, 이를 측정된 2차 전류에 더해줌으로써 보상전류를 구한다. 제안한 방법의 성능을 EMTP를 통하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 철심 코어 변류기의 등가 회로 및 보상 알고리즘

2차 측으로 환산한 철심 변류기의 등가 회로를 그림 1에 나타냈다. i_1 은 2차 측으로 환산한 1차 전류이며, i_2 는 2차 전류, i_0 는 여자 전류, i_c 는

철손 전류, R_c 는 철손 저항을 나타낸다. 철손은 히스테리시스 손실과 와류손의 조합이다. i_m 은 자화 전류, L_m 은 자화 인덕턴스이다. 자화 인덕턴스는 자속과 자화 전류의 비선형 관계로 표현된다. R_b 는 변류기 2차 부하, v_2 는 2차 전압을 나타낸다.

여자 전류는 자화 전류와 철손 전류로 나눌 수 있고, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_0(t) = i_m(t) + i_c(t) \quad (1)$$

그림 2는 여자 전류, 철손 전류, 자화 전류의 한주기 파형을 나타냈다. 실선은 여자 전류, 점선은 철손 전류, 쇠선은 자화 전류를 나타냈다.

2차 측으로 환산한 1차 전류는 측정된 2차 전류와 여자 전류의 합으로 나타낼 수 있고, 식 (2)로 쓸 수 있다.

$$i_1(t) = i_2(t) + i_0(t) \quad (2)$$

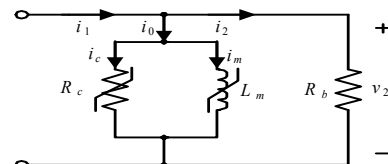


그림 1 철심 변류기 등가 회로

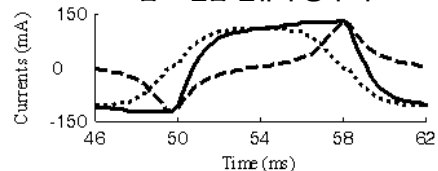


그림 2 여자 전류, 철손 전류, 자화 전류

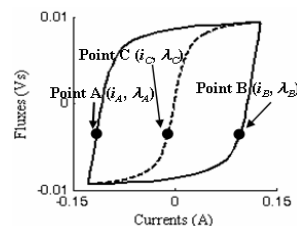
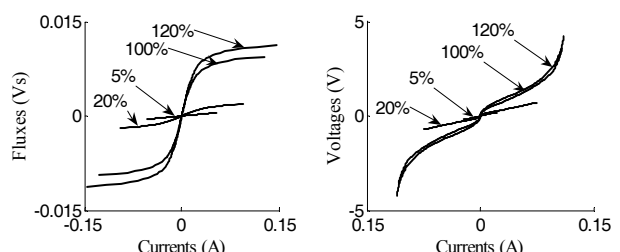


그림 3 히스테리시스 루프와 자속-자화 곡선



(a) 자속-자화 곡선 (b) 2차 전압-철손 전류 곡선
 그림 4 자속-자화 곡선과 2차 전압-철손 전류 곡선

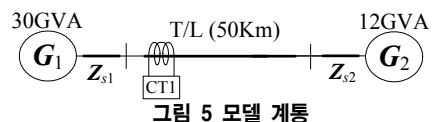
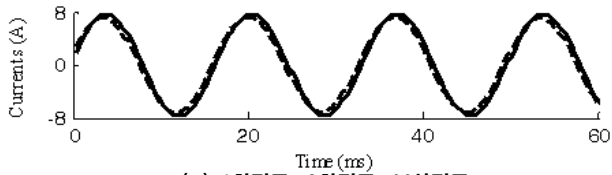
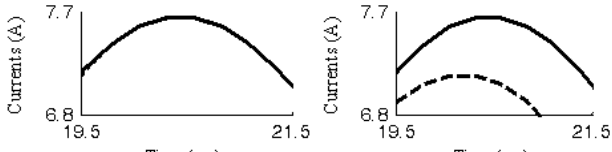


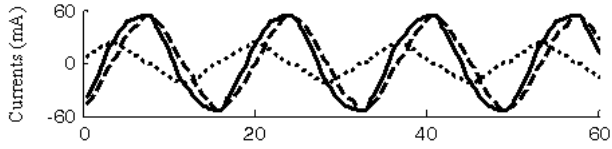
그림 5 모델 계통



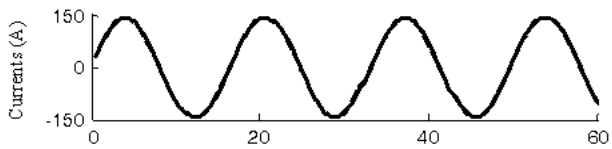
(a) 1차전류, 2차전류, 보상전류



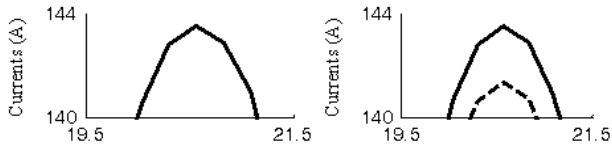
(b) 1차전류, 2차전류, 보상전류의 부분 확대



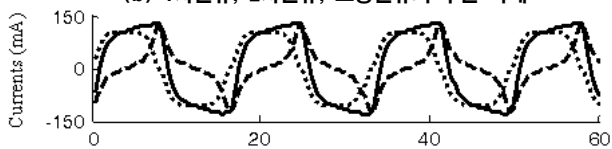
(c)추정한 자화 전류, 철손 전류, 여자 전류
그림 6 사례 1의 결과



(a) 1차전류, 2차전류, 보상전류



(b) 1차전류, 2차전류, 보상전류의 부분 확대



(c)추정한 자화 전류, 철손 전류, 여자 전류
그림 7 사례 3의 결과

<표 1> 정격전류의 5%, 20%, 100%, 120%인 경우의 결과

사례 번호	정격전류의 비율	전류 오차 (%)		위상 오차 (분)	
		측정	보상	측정	보상
사례 1	5 %	-6.12	-0.034	456.02	-1.32
사례 2	20 %	-4.95	-0.021	167.98	-1.85
사례 3	100 %	-1.71	-0.0026	33.42	-0.24
사례 4	120 %	-1.49	-0.012	30.31	-0.11

만약 여자 전류를 정확하게 추정하여 보상한다면, 정확한 1차 전류를 얻을 수 있고, 철심 변류기의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

2.2 자속-자화 전류 곡선과 2차 전압-철손 전류 곡선 구하는 방법 (Off-line)

Off-line 상태에서, 철심 코어의 히스테리시스 루프를 이용하여, 자속-자화 전류 곡선과 자속-철손 전류 곡선을 구할 수 있다.

그림 3의 실선은 철심 코어의 여자 전류와 자속의 특성인 히스테리시스 루프를 나타낸다. 점A는 내려가는 히스테리시스 곡선상에 있고, 점B는 올라가는 히스테리시스 곡선상에 있다. 점C는 점A와 점B 사이의 중간점이다. 각각의 좌표는 (i_A, λ_A) , (i_B, λ_B) 와 (i_C, λ_C) 로 표시하였다. 세 점 사이에는 식 (3)과 같은 관계가 있다.

$$\lambda_C = \lambda_A = \lambda_B \quad (3)$$

$$i_C = \frac{(i_A + i_B)}{2}$$

히스테리시스 루프를 이용하여, 모든 점C를 구할 수 있다. 점C로 구성된 곡선은, 즉 그림3의 중간 점선, 본 알고리즘에서 사용된 자속-자화 곡선이다. 그림 4a는 4가지 경우의 자속-자화 곡선이다.

2차 전압-철손 전류 곡선을 추정하기 위하여, 여자 전류에서 자화 전류를 빼 철손 전류와 2차 전압의 관계를 나타낸다. 이 곡선을 그림 4b에 나타냈다, 즉. 그림 4b는 그림 4a의 곡선으로부터 얻은 2차 전압-철손 전류 곡선이다.

3. 사례 연구

3.1 모델 계통

제한한 측정용 철심 변류기 보상알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 그림 5와 같은 모델 계통을 선택하였다. 154kV의 2모선 송전 계통을 모의하였고, 두 모선이 50km의 송전선로로 연결하였다. 계통의 주파수는 60Hz이며, EMTP를 사용하여 모의하였다. 주기 당 64샘플의 데이터를 사용하였으며, 지역통과 필터로는 컷오프 주파수가 1,920Hz인 중첩방지용 1차 RC 필터를 사용했다.

계통의 전류를 측정하기 위해 모선 옆에 변류기를 모의하였다. 변류비는 100/5A이고, 포화점이 0.02Vs, 2.047A인 측정용 변류기이며, EMTP의 96소자를 이용하여 모델링하였다. 히스테리시스 특성은 EMTP의 보조 프로그램인 HYSDAT으로 모의하였으며, 과전류정수는 2로 하였다. 변류기의 2차 부담은 순수 저항 부담을 사용하였고, 12.5VA(0.5Ω)로 모의하였다.

3.2 사례 연구

변류기 1차 전류가 정격전류의 5%, 20%, 100%와 120%인 경우에 대하여 모의하였다.

그림 6은 변류기 1차 전류가 정격전류의 5%인 경우인 사례 1의 결과를 나타냈다. 그림 6a에서 실선은 변류비에 맞는 1차 전류, 쇠선은 측정된 2차 전류 그리고 점선은 보상 전류를 나타냈다. 보상알고리즘 적용 결과를 명확히 확인하기 위하여 확대한 그림을 그림 6b에 나타냈다. 측정된 2차 전류와 1차 전류 사이에 여자 전류의 크기만큼의 오차가 발생하였으나, 보상 전류는 1차 전류와 거의 차이가 없었다. 그림 6c에서 점선은 철손 전류를, 쇠선은 자화 전류를, 실선은 여자 전류를 나타내며, 보상 알고리즘을 적용하여 추정된 값이다. 추정된 철손 전류와 자화 전류의 합은 추정된 여자전류와 같다.

그림 7은 변류기 1차 전류가 정격전류인 경우인 사례 3의 결과를 나타냈다. 표 1은 4가지 사례를 모의한 결과이다. 보상 알고리즘을 적용한 후 전류 오차와 위상 오차가 감소한다.

4. 결 론

본 논문에서는 히스테리시스 특성을 고려한 측정용 변류기 보상알고리즘을 제안하였다. Off-line 상태에서, 철심 코어의 히스테리시스 특성을 이용하여, 2차 전압-철손 전류 곡선과 자속-자화 전류 곡선을 구한다. On-line 상태에서, 측정된 2차 전류로부터 자속을 계산하고, 2차 전압-철손 전류 곡선과 자속-자화 전류 곡선을 이용하여, 철손전류와 자화전류를 계산한다. 이렇게 추정된 자화 전류와 철손 전류를 측정된 2차 전류에 더하여 보상전류를 구하는 방식이다.

제한한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 EMTP를 사용하였다. 정격전류보다 큰 전류의 경우 보상 알고리즘의 성능을 검증하였고, 정격전류보다 작은 전류 영역과 정격 전류의 5%인 저전류 영역에서 보상알고리즘의 성능을 확인하였다. 보상 알고리즘을 적용한 후 전류 오차와 위상 오차가 감소하는 것을 통하여 철심 변류기의 정밀도가 향상되었음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

[참 고 문 헌]

- [1] S. H. Horowitz, and A. G. Phadke, "Power system Relaying," Research Studies Press Ltd, 1992.
- [2] D. Slomovitz, "Electronic system for increasing the accuracy of in-service instrument-current transformers," IEEE Trans. on Instrumentation and measurement, Vol. 52, No. 2, April 2003, pp. 408-410.
- [3] N. Locci, and C. Muscas, "A digital compensation method for improving current transformer accuracy," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 4, pp. 1104-1109, October 2000.
- [4] N. Locci, and C. Muscas, "Hysteresis and eddy currents compensation in current transformer," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 154-159, April 2001.