

2차 전압-철손 전류 곡선과 자속-자화 전류 곡선을 고려한 측정용 변류기 2차 전류 보상 알고리즘

강용철*, 정태영*, 장성일*, 김용균**
전북대학교*, (주)한국 IED Eng. Inc.**

Compensating algorithm for the secondary current of a measurement type CT considering the secondary voltage-core loss current curve and the flux linkage-magnetizing current curve

Yong-Cheol Kang*, Taiying Zheng*, Sung-Il Jang*, Yong-Gyun Kim**
Chonbuk National University*, Hankook IED Eng. Inc.**

Abstract - This paper proposes a compensating algorithm for the secondary current of the measurement current transformer (CT) that removes the effects of the hysteresis characteristics of the iron-core. The exciting current resulting from the hysteresis characteristics of the core causes an error between the primary current and the secondary current of the CT. The proposed algorithm decomposes the exciting current into the magnetizing current and the core loss current and each of them is estimated. The core loss current is calculated from the secondary voltage and the secondary voltage-core loss current curve. The core flux linkage is calculated and then inserted into the flux-current curve to estimate the magnetizing current. The exciting current at every sampling interval is obtained by summing the core-loss and magnetizing currents and then added to the measured current to compensate the secondary current. The performance of the proposed algorithm is validated under various conditions using EMTP generated data. The test results of the real CT were also included. The results indicate that the proposed algorithm can improve the accuracy of the measurement CT significantly, and thus reduce the size and the cost of the CT.

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 쇄고 자속을 최대화하기 위하여, 코어를 철심으로 사용하고 있다. 측정용 변류기는 정상상태 시 전류를 변류하여 계량기 등에 입력하여야 한다. 계통의 운전 상태를 파악하기 위하여 고장 및 데이터를 취득해야 한다. 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 크기도 커지는 단점이 있어, 철심 코어의 비선형 특성으로 인한 히스테리시스 문제를 해결하는 데에는 한계가 있다.

따라서 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 정상 상태에서 사용되는 보상 방법이며, 주파수 영역 해석 방법이다. 또한, 여자전류의 비선형 특성이 고려되지 않았으며 과도상태 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 계산된 자속과 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 궤적이 아니고, 히스테리시스 루프의 중간 곡선이다. 철손 전류와 자화 전류를 더하여 여자 전류를 구하고, 이를 측정된 2차 전류에 더해줌으로써 보상전류를 구한다. 제안한 방법의 성능을 EMTP와 실제 CT 실험을 통하여 검증하였다.

2. 본 론

2.1 철심 코어 변류기의 등가회로 및 보상 알고리즘

2차 측으로 환산한 철심 변류기의 등가회로를 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 부담, v_2 는 2차 전압을 나타낸다.

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

$$i_0(t) = i_m(t) + i_c(t) \tag{1}$$

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

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

$$i_1(t) = i_2(t) + i_0(t) \tag{2}$$

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

2.2 자화 전류(i_m)와 철손 전류(i_c)

i_m 은 계산된 자속을 λ - i_m 곡선에 대입하여 구할 수 있다. λ - i_m 곡선은 참고 문헌 [5]을 참조하여 Off-line상태에서 구할 수 있고, 그림 3a에 나타내었다.

i_c 는 계산된 2차 전압과 2차 전압-철손 전류 곡선을 사용하여 얻을 수 있다. 2차 전압-철손 전류 곡선은 참고 문헌 [5]을 참조하여 Off-line상태에서 구할 수 있고, 그림 3b에 나타내었다.

3. 사례 연구

3.1 모델 계통

제한한 측정용 철심 변류기 보상알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 그림 4와 같은 모델 계통을 선택하였다. 154kV의 2모선 송전 계통을 모의하였고, 두 모선을 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)으로 모의하였다.

3.2 사례 연구

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

그림 5은 변류기 1차 전류가 정격전류의 5%인 경우인 정격전류의 5%의 결과를 나타냈다. 그림 5a에서 실선은 변류비에 맞는 1차 전류, 쇄선은 측정된 2차 전류 그리고 점선은 보상 전류를 나타냈다. 보상알고리즘 적용 결과를 명확히 확인하기 위하여 확대한 그림을 그림 5b에 나타냈다. 측정된 2차 전류와 1차 전류 사이에 여자 전류의 크기만큼의 오차가 발생하였으나, 보상 전류는 1차 전류와 거의 차이가 없었다.

표 1은 4가지 사례를 모의한 결과이다. 보상 알고리즘을 적용한 후 전류 오차와 위상 오차가 현저하게 감소한다.

4. 실제 변류기 실험

4.1 실제 변류기의 2차 전압-철손 전류 곡선과 자속-자화 전류 곡선 측정

실제 변류기의 히스테리시스 루프를 측정하는 방법으로는 변류기 2차 측에 직접 전압을 인가하고 그때 변류기에 흐르는 전류를 측정하여 변류기의 히스테리시스 루프를 얻어내는 방법이 있다. 이러한 경우 수차례 전압을 바꾸어 변류기를 테스트함으로써, 전압별 히스테리시스 곡선을 구한다. 하지만 이 방법은 실험 중 변류기에 큰 자화 전류가 흐를 수 있고, 2차 측에 전압이 크게 걸려 기기에 손상을 줄 수 있다.

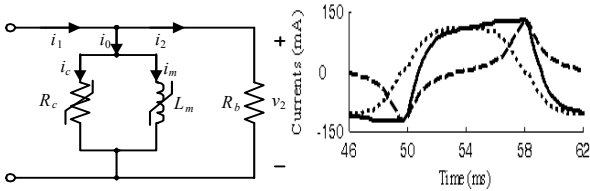
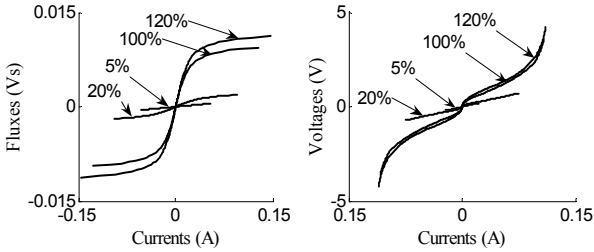


그림 1 철심 변류기 등가회로 그림 2 여자 전류, 철손 전류, 자화 전류



(a) 자속-자화 곡선 (b) 2차 전압-철손 전류 곡선
그림 3 자속-자화 곡선과 2차 전압-철손 전류 곡선

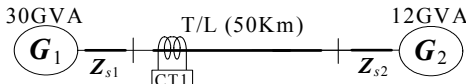
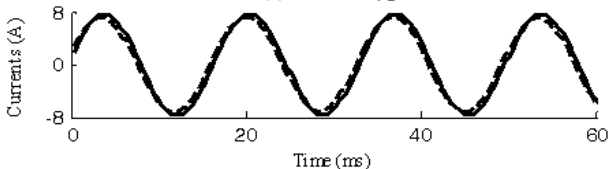
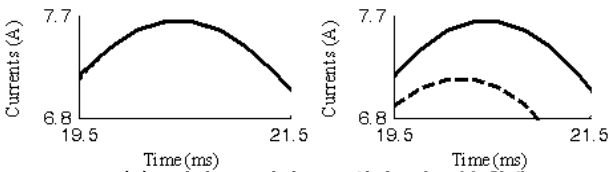


그림 4 모델 계통



(a) 1차전류, 2차전류, 보상전류



(b) 1차전류, 2차전류, 보상전류의 부분 확대
그림 5 정격전류의 5%의 결과

본 논문에서는 변류기의 1차 전류와 2차 전류를 측정하여, 여자 전류를 구하고, 히스테리시스 루프를 얻는 방법을 사용했다. 히스테리시스 루프를 얻은 후, 2절에서 설명한 바와 같이, 2차 전압-철손 전류 곡선과 자속-자화 전류 곡선을 측정했다.

본 논문에서는 실제 변류기의 2차 전압-철손 전류 곡선과 자속-자화 전류 곡선을 구하기 위해 보상 알고리즘을 적용하기 전에 실제 1차, 2차 전류를 얻어, 보상 알고리즘에 사용될 자속-자화 전류 곡선을 얻은 후 실험을 진행했다.

4.2 실제 변류기를 이용한 실험

본 논문에서 제안한 알고리즘을 실제 변류기를 사용하여 테스트하기 위해 모의 계통을 구성했다. 구성된 실험 계통은 그림 6과 같고, 계통의 회로 구성도는 그림 7에 나타내었다. 실제 데이터를 얻기 위해 그림 7에서 부하단과 2차 부담에서 각각 차동 입력을 받아 1차, 2차 전류를 계산한다. 차동 입력된 신호는 증첩 방지용 RC 1차 필터를 통과하여 TMS320C6701(DSP)에서 처리된다. 표 2는 실제 변류기의 사양과 실험 조건을 표시했다. 사전 실험을 통해 얻은 2차 전압-철손 전류 곡선과 자속-자화 전류 곡선을 입력하고 각각 정격 전류의 120%, 100%, 20%, 5%를 인가하여 보상 알고리즘의 성능을 검증했다.

4.3 실제 변류기 실험에 대한 분석

실시간 실험은 정격 부담을 사용하여 정격 전류의 120%, 100%, 20%, 5%인 경우에 대하여 사례 5, 6, 7, 8로 나타냈다. 표 3은 4가지 사례의 실험 결과이다. 보상 알고리즘을 적용한 후 전류 오차와 위상 오차가 감소한다.

5. 결 론

본 논문에서는 히스테리시스 특성을 고려한 측정용 변류기 보상 알고리즘을 제안하였다. 철심 코어의 히스테리시스 특성을 이용하여, 2차 전압-철손 전류 곡선과 자속-자화 전류 곡선을 구한다. 측정된 2차 전류로부터 자속을 계산하고, 2차 전압-철손 전류 곡선과 자속-자화 전류 곡선을 이용

<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



그림 6 실제 변류기 실험 모델 계통

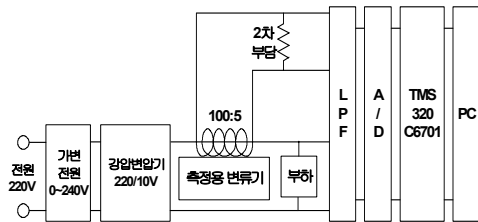


그림 7 실제 변류기 실험 모델 회로 구성도

<표 2> 실험 변류기 사양 및 실험 조건

사용 전압	주파수	변류기 사양		정밀도	실험 조건	
		정격변류비	정격 부담		변류비	2차 부담
22.9kV	60Hz	1차 전류: 600, 400, 300, 200, 100A	2차 전류: 5A	12.5VA (0.5Ω)	1.2C	100/5A, 12.5VA (0.5Ω)

<표 3> 정격전류의 5%, 20%, 100%, 120%인 경우의 결과

사례 번호	정격전류의 비율	전류 오차 (%)		위상 오차 (분)	
		측정	보상	측정	보상
사례 5	5 %	-4.44	0.26	35.17	-8.47
사례 6	20 %	-4.74	0.0013	-25.67	-0.67
사례 7	100 %	-2.16	-0.1	-27.03	0.86
사례 8	120 %	-1.92	-0.15	-24.87	0.26

하여, 철손전류와 자화전류를 계산한다. 이렇게 추정된 자화 전류와 철손 전류를 측정된 2차 전류에 더하여 보상전류를 구하는 방식이다.

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 EMTF와 실제 CT 실험을 사용하였다. 정격전류의 120%, 100%, 20%, 5%의 경우에 보상 알고리즘의 성능을 검증한 결과, 보상 하지 않은 경우에는 1.5%급(시물레이션)과 2.0급(실제 실험)이었지만, 보상한 결과 모두 0.1급을 만족함을 알 수 있었다.

제안한 알고리즘은 측정용 변류기의 오차를 크게 향상시킬 수 있기 때문에, 이의 단면적을 감소시킬 수 있다.

[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.
- [5] 강용철, 정태영, 이병은, 소순홍, 이현용, 이미선, 박정호, 최현태, 장성일, 김용근, "히스테리시스 특성을 고려한 측정용 변류기 보상 알고리즘," 2007년도 대한전기학회 하계학술대회, 2007년 7월.