

작은 변류기 사용이 가능한 전류 보상 알고리즘

강상희*, 강용철**, 박종근**

* 명지대학교 전기공학과, **서울대학교 전기공학과

A Current Compensating Algorithm with Small Iron-cored CTs

Sang-Hee Kang*, Yong-Cheol Kang**, Jong-Keun Park**

* Myong-Ji University, ** Seoul National University

Abstract

The conventional technique to deal with CT saturation is overdimensioning of the core so that CTs can carry up to 20 times the rated current without exceeding 10 % ratio correction. However, this not only reduces the sensitivity of relays, but also increases the CT core size in proportion to the expected maximum fault current to avoid CT saturation. This paper presents a technique of estimating the secondary current corresponding to the CT ratio which can reduce the required CT core cross section significantly.

1. 서론

계통에 사고 발생 시 계통의 전류를 변류비에 맞는 2차 전류로 변류하여 계전기에 입력하기 위한 목적으로 변류기가 사용되는 데, 가장 널리 이용되는 변류기는 코어가 철인 철심 변류기인데, 철심의 자기 포화 특성과 잔류 자속이 존재하므로 이는 이상적인 변류기 아니다. 또한 변류기 포화시 각종 계전기의 오/부동작을 야기할 수 있으므로, 현재 널리 이용되고 있는 변류기 사용에 대한 기준은 계통에 정격 전류의 20배의 전류가 흐를 경우에 변류비 오차가 10 %를 넘지 않도록 하는 방식이다 [1]. 이 방식은 철심에 큰 자속을 유기할 수 있도록 철심의 단면적이 큰 변류기를 사용하므로 포화 방지 효과가 있는 반면, 각종 계전기의 감도를 저하시키며, 포화 방지를 위하여 단면적을 최대 사고 전류에 비례하여 증가시켜야 한다.

참고문헌 [2]에서는, 극초고압계통(1000 [kV])에서 계통의 시정수가 매우 커 직류 음셋 성분에 의한 변류기 포화의 가능성이 더욱 증가한 반면, 차동 전류 계전기의 만족할 만한 대책이 없을 뿐만 아니라, 포화 방지를 위하여 요구되는 단면적이 매우 커 비용의 막대한 증가가 불가피하므로, 철심 변류기 대신 포화의 가능성이 없는 공심 변류기를 채택하여 차동 전류 계전 방식을 구현하였다.

참고문헌 [3]에서는 자화곡선을 이용하여 변류기 포화시에도 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하는 방식을 제안하였다.

본 논문에서는 참고문헌 [3]의 확대 연구로써, 자화곡선을 이용하여 변류기 2차 전류를 보상하는 알고리즘에 대하여, 단면적이 매우 작은 변류기를 사용하여 변류기가 심하게 포화되는 경우에도 변류비에 맞는 2차 전류를 추정함을 검증한다. 345 [kV] 계통에서 여러 가지 계통 조건 및 사고 조건에서 정격인 변류기 C800과, 단면적이 C800의 1/4인 변류기 C200의 경우에 대하여 제시한 알고리즘을 타당성을 검증하였다.

2. 자화 곡선을 이용한 디지털 전류 변성 알고리즘

히스테리시스 특성을 고려한 변류기 등가 회로는 그림 1에 보였으며, 매 순간 1, 2차 전류사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{n}i_s(t) = i_s(t) + i_r(t) \quad (1)$$

식 (1)에서, $i_s(t)$ 는 측정한 2차 전류이므로, $i_r(t)$ 를 알 수 있으면, 변류비에 맞는 2차 전류 $\frac{1}{n}i_s(t)$ 를 추정할 수 있게 된다.

2.1 철심 상호 자속 계산

2차축 부담(burden)을 $Z_b = R_b + j\omega L_b$ 이라 하면, 매 순간 철심 자속과 2차 전류와의 관계식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{di_r(t)}{dt} = (R_s + R_b)i_s(t) + (L_s + L_b)\frac{di_s(t)}{dt} \quad (2)$$

식 (2)의 양변을 t_0 에서 t 까지 적분하면

$$i_r(t) - i_r(t_0) = (R_s + R_b) \int_{t_0}^t i_s(\tau) d\tau + (L_s + L_b) \{i_s(t) - i_s(t_0)\} \quad (3)$$

이다. R_s, R_b, L_s, L_b 는 주어진 값이므로, 식 (3)을 이용하면 $i_r(t)$ 를 계산할 수 있으며, 먼저 식 (3)의 $i_r(t_0)$ 를 알아야 한다.

정상상태에서 자속 $\phi(t)$ 은 주기함수이며 평균이 0이다. 즉,

$$\phi(t) = \phi(t + N\Delta T), \sum_{k=1}^N \phi(t_0 + k\Delta T) = 0 \quad (4)$$

여기서, N : 주기당 샘플수, ΔT : 샘플링 간격이다.

$$\tilde{\phi}(t_0 + k\Delta T) = \phi(t_0 + k\Delta T) - \phi(t_0) \quad (5)$$

이라 하면,

$$\tilde{\phi}(t_0 + (k+1)\Delta T) - \tilde{\phi}(t_0 + k\Delta T) = \phi(t_0 + (k+1)\Delta T) - \phi(t_0 + k\Delta T) \quad (6)$$

이 성립하고, $\tilde{\phi}(t_0 + k\Delta T)$ 을 $k=1$ 에서 N 까지 합하면,

$$\sum_{k=1}^N \tilde{\phi}(t_0 + k\Delta T) = \sum_{k=1}^N \phi(t_0 + k\Delta T) - N\phi(t_0) \quad (7)$$

$$\text{이 되고, 식 (4)로부터, } \phi(t_0) = -\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{\phi}(t_0 + k\Delta T) \quad (8)$$

이 되므로, 정상상태에서 한 주기 2차 전류로부터 식 (8)을 이용하여 초기 자속을 구할 수 있고, 한 주기 후부터는 식 (3)을 이용하여, 실제의 철심 자속 $\phi(t)$ 을 구할 수 있게 된다.

2.2 자화 곡선을 이용한 전류 변성 알고리즘 [3]

변류기 자화 곡선은 변류기 철심 자속과 그에 해당되는 자화 전류를 나타내는 곡선이며, 식 (3)에서 철심 자속을 계산하였으므로, 자화곡선으로부터 그 자속에 해당하는 자화 전류의 값을 구할 수 있다. 자화곡선의 포화 영역에서 자화 전류는 여자 전류와 같은 반면, 비포화 영역에서는 여자 전류와 자화 전류와의 차의 최대값은 히스테리시스의 주 투프 폭의 1/2이다. 그런데, 주 투프의 폭은 상당히 작으므로 여자전류를 자화전류와 같다고 가정할 수 있다. 그러므로, 식 (1)을 이용하여, 축정한 2차 전류에 여자 전류 대신에 자화전류를 합하면, 변류비에 맞는 2차 전류를 구할 수 있다.

기존의 방식은 변류기를 비포화 영역(포화점 까지)만을 이용하였으므로, 사고 전류가 증가하면 포화를 방지하기 위하여 변류기의 단면적이 그에 비례하여 확대되어 변류기의 크기가 증가하였고, 이는 결과적으로 비용의 막대한 상승을 초래하였다.

포화 영역의 자화 인더던스는 비포화 영역의 그것보다 상당히 작다. 이는 포화영역에서는 사고 전류가 매우 증가하더라도 자속의 증가율이 비포화 영역에 비해서 매우 작다는 것을 의미한다. 본 논문에서 제시한 방식은 자화 곡선의 전영역을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하므로, 철심이 유기할 수 있는 자속의 최대값까지의 특성을 알 수 있다면, 제시한 방식을 이용

하여 단면적이 매우 작은 변류기를 사용할 수 있다.

3. 모델 계통 및 변류기 모델링

그림 2의 전압은 345 [kV]이고 주파수는 60 [Hz]이다. P 모선으로부터 2 [km] 떨어진 곳에서 A상 지락사고를 모의하였다.

참고문헌 [5]의 EMTP를 이용한 변류기를 모델링하는 방법 중, 그림 2의 변류기에 적용한 모델을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 Type-96 소자는 철심의 포화 특성 뿐만 아니라, 히스테리시스 현상도 모의할 수 있는 소자이며, 이를 이용하기 위해서는 히스테리시스 데이터가 필요하다. 이를 얻는 방법은 실험에 의한 방법과, EMTP의 보조 프로그램 HYSDAT를 이용하는 방법 등 두 가지가 있는데, 본 논문에서는 후자의 방법을 이용하였다.

사례 연구에서 사용한 변류기는 345 [kV] 계통에서 정격으로 사용하고 있는 C800(2000:5, $R_s = 0.72 [\Omega]$) 변류기와, 단면적이 이의 1/4인 C200(2000:5, $R_s = 0.564 [\Omega]$) 변류기이다. 이들의 자화곡선은 각각 그림 4와 그림 5에 나타나 있고, HYSDAT를 이용하기 위한 포화점으로 각각 (2.6 [A], 3.378 [Vs])과 (2.5 [A], 0.66 [Vs])을 선택하였다.

4. 사례연구 및 오차 분석

위에서 언급하였듯이 본 알고리즘을 사용하면 단면적이 매우 작은 변류기의 사용이 가능하다. 이를 검증하기 위하여 그림 2의 모델 계통에서, C800과 C200의 두 가지 변류기를 사용하여 0도 사고, 시정수가 큰 경우, 잔류 자속이 존재하는 경우 등 여러 가지 계통 조건 및 사고 조건에 대하여 사례연구를 행하였다.

EMTP를 이용하여 모델 계통의 변류기 1, 2차 전류를 얻었으며, 샘플링 비율은 주기당 64 샘플로 하였다. 부담으로는, C800인 경우에는 그 값이 $4 + j7 [\Omega]$, C200인 경우에는 $1 + j1.7 [\Omega]$ 인 저항, 유도성 부담을 각각 사용하였다.

본 논문에서 제시한 방식에 대하여, 중첩 방지 저역 통과 필터의 영향을 고려하였다. 여러 경우에서 포화된 2차 전류의 스펙트럼을 분석한 결과 7조파 이상의 고조파의 크기는 기본파의 5% 이하 이었으므로, 컷온주파수가 6조파인 2차 Butterworth 필터를 설계하였으며, 이후의 모든 축정한 2차 전류는 설계된 필터를 통과시킨 전류이다.

모의한 2차 전류로부터, 처음 한주기 동안에는 식 (8)을 이용하여 초기 자속을 계산하였고, 한 주기 후부터는 매 샘플링 순간마다 식 (3)을 이용하여 철심 자속을 계산한 후, C800인 경우에는 그림 4의 자화곡선을, C200인 경우에는 그림 5의 자화곡선으로부터 자화 전류를 구하고, 식 (1)을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였다.

제시한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여, 보상한 2차 전류에 대하여 식 (9)의 변류비오차를 매 샘플링 순간마다 계산하였다.

$$\text{Ratio error} = \frac{i_p - (i_p/n)}{20 \times \text{rated } i_p} \times 100 [\%] \quad (9)$$

4.1 사고 개시 각 0도

4.1.1 사례 1: 0도 사고(33.33 [ms]), 시정수: 20 [ms]

변류기 포화의 가장 주요한 원인인 직류 융선풍 성분은 사고 개시각에 따라 그 크기가 달라지며, 0도 사고의 경우가 가장 크다. 정격(C800)을 사용한 경우와, 작은 변류기(C200)을 사용한 경우의 결과를 각각 그림 6, 그림 7에 나타내었다.

그림 6에서 알 수 있듯이, 사고 직후에 자속은 포화점(3.378 [Vs])을 초과하여 변류기가 포화되었다. 왜곡된 2차 전류로부터 제시한 알고리즘을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였고, 그에 대한 변류비 오차는 매우 적음을 알 수 있다.

그림 7의 경우에는 C200의 단면적이 C800의 경우 보다 1/4이지만, 부담도 1/4이므로 철심에 유기되는 자속도 1/4이 된다. 작은 변류기를 사용하였으므로 포화의 정도가 그림 7의 경우 보다 심하다. 그러나, 제시한 알고리즘이 변류비에 맞는 2차 전류를 추정함을 알 수 있고, 변류비 오차도 C800을 사용한 경우와 비슷하다.

4.2 계통의 시정수(X/R 비)가 큰 경우

4.2.1 사례 2: 0도 사고, 시정수: 200 [ms]

초고압계통에서는 시정수가 매우 크고, 이는 심한 변류기 포화를 야기한다. 시정수는 수십 밀리초에서, 크기는 약 200 밀리

초에 이른다. 시정수가 200 [ms]인 경우에 대해서 C800을 사용한 경우와 C200을 사용한 경우에 대하여, 사례 연구를 행하였고, 그 결과를 각각 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

사례 1은 사례 2의 경우보다 시정수가 크므로, 그림 8은 그림 6의 경우보다 포화의 정도가 더 심하였지만, 제시한 알고리즘이 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였다.

C200을 사용한 그림 9는 작은 변류기를 사용했으므로, 그림 8보다 포화가 심함을 알 수 있다. 제시한 알고리즘이 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였다.

4.3 잔류자속 존재 시

철심의 특성상, 사고 후에 철심에 잔류자속이 존재하고, 이는 변류기는 포화의 가능성을 증가시킬 수 있으며, 작은 변류기를 사용하는 경우에는 잔류 자속에 대한 영향이 더욱 중요하다. 철심에 잔류 자속이 존재하는 경우에 변류기가 포화되는 경우에 대하여 본 알고리즘을 검증하기 위하여, 두 가지 재폐로의 경우를 모의하였다.

4.3.1 사례 3: 90도 사고, 시정수: 50 [ms], 사고 재폐: 62 [ms], 재폐로: 137 [ms]

C800, C200의 각각의 경우에 대하여 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 사례 3은 90도 사고이므로 C800의 경우에, 사고 재거전에는 변류기가 포화되지 않았다. 그런데 사고 재거 후에 철심에 잔류 자속이 존재하였고, 그 값은 1.94 [Vs](57%)이었으며, 이로 인하여 재폐로 후에 변류기가 포화되었으나, 본 알고리즘이 변류비에 맞는 전류를 추정하였다.

그림 11에서 알 수 있듯이, C200의 경우에는 90도 사고임에도 불구하고, 작은 변류기를 사용하였으므로 사고 재거 전에도 변류기는 포화되었다. 또, 사고 후에 잔류 자속이 존재하여 그 값은 0.568 [Vs](86%)이 되었고, 재폐로 후에 변류기는 다시 포화되었고, 그 정도는 C800의 경우보다 심하였다. 그러나 본 알고리즘이 이를 보상하였으며, 변류비 오차도 C800을 사용한 경우처럼 매우 작음을 알 수 있다.

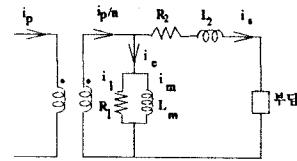
5. 결론

본 논문에서는 작은 변류기를 사용하여도 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하는 방식을 제시하였다.

초고압 계통의 여러 가지 조건 및 사고 조건에 대하여 본 알고리즘이 작은 변류기(정격의 1/4)를 사용하여도 변류비에 맞는 2차 전류를 추정함을 검증하였다. 그러므로 본 알고리즘을 사용하면 변류기의 단면적을 현저하게 감소할 수 있어 상당한 비용 절감 효과가 기대되며, 최대 사고전류가 증가하더라도 그에 따라 단면적을 증가시킬 필요가 없다.

6. 참고문헌

- [1] IEEE, IEEE Guides and Standards for Protective Relaying Systems, Spring 1991
- [2] 前田陵文 외 4인, "1000KV 母線保護方式의 檢討," Fourth annual conference of Power & Energy Society, IEE of Japan, Jul. 1993
- [3] 강용철, 강상희, 문승호, 박종근, "변류기 여자곡선의 전영역을 사용하는 디지털 전류 변성 알고리즘," 1994년도 대한 전기 학회 하계학술 대회, 논문집 (B) 1994. 7
- [4] M. Kezunovic, et. al, "Experimental Evaluation of EMTP-Based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 9, no. 1, pp. 405-413, Jan. 1994



i_p , i_s : 1차, 2차 전류, i_m : 여자 전류, $i_{\text{부}}$: 자화 전류, n : 2차 권선수
 R_2 , L_2 : 2차 권선 저항, 누설 인더린스, L_m : 자화 인더린스, R_f : 손실 저항

그림 1 변류기의 등가 회로

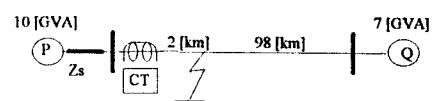


그림 2 모델 계통

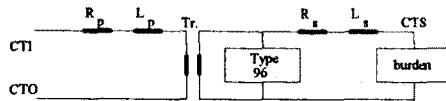


그림 3 EMTP를 이용한 변류기 모델

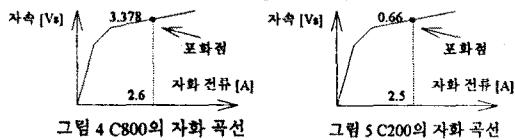
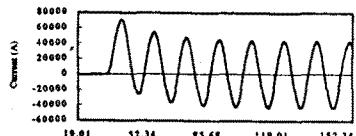
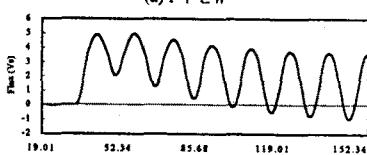


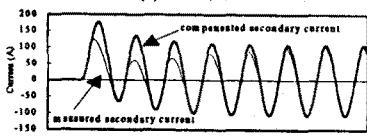
그림 4 C800의 자화 곡선



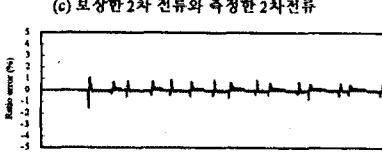
(a) 1차 전류



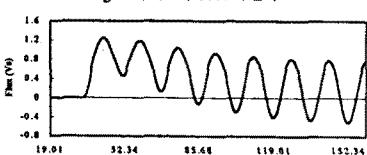
(b) 철심 자속



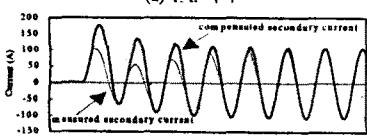
(c) 보상한 2차 전류와 측정한 2차 전류



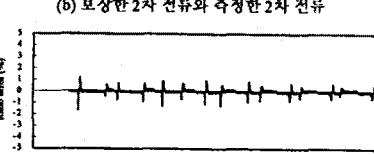
(d) 변류비 오차
Fig. 6 사례 1의 C800의 결과



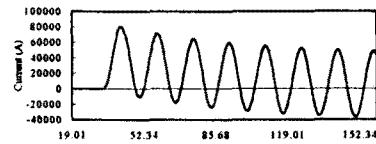
(a) 철심 자속



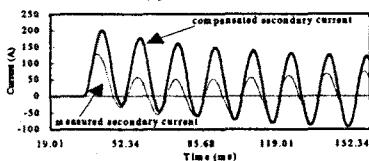
(b) 보상한 2차 전류와 측정한 2차 전류



(c) 변류비 오차
그림 7 사례 1의 C200의 결과



(a) 1차 전류



(b) 보상한 2차 전류와 측정한 2차 전류
그림 8 사례 2의 C800의 결과

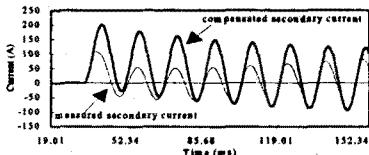
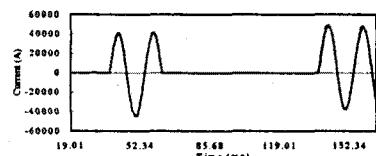
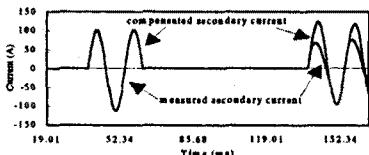


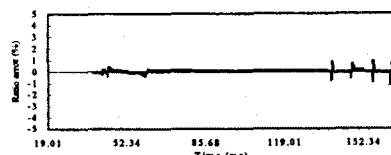
그림 9 사례 2의 C200를 사용한 경우의 보상한 2차 전류와 측정한 2차 전류



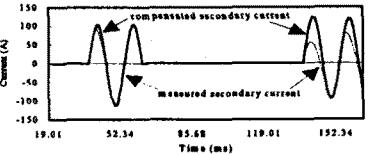
(a) 1차 전류



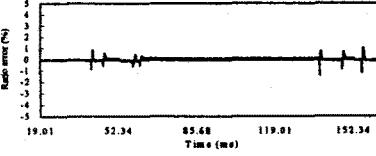
(b) 보상한 2차 전류와 측정한 2차 전류



(c) 변류비 오차
그림 10 사례 3의 C800의 결과



(a) 보상한 2차 전류와 측정한 2차 전류



(b) 변류비 오차
그림 11 사례 3의 C200의 결과