

철심 변류기 2차 전류 보상 알고리즘

강 용 철*, 박 종 근*, 강 상 희**
 * 서울대학교 전기공학과, ** 명지대학교 전기공학과

A Compensating Algorithm for the Secondary Current of Iron-cored Current Transformers

Yong-Cheol Kang*, Jong-Keun Park*, Sang-Hee Kang**
 * Seoul National University, ** Myong-Ji University

Abstract

CT saturation may cause protective relays to malfunction. The conventional method to deal with the problem 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. This paper presents a technique of estimating the secondary current corresponding to the CT ratio under CT saturation using the magnetization curve. The proposed algorithm can improve the sensitivity of relays to low level faults and minimize the instability of relays for external faults.

1. 서론

보호 계전기에 필요한 전류를 공급하기 위하여 사용하는 변류기는 철심 변류기가 가장 널리 이용되고 있다. 그런데, 철심은 자기 포화 특성이 있고, 잔류 자속이 철심에 존재 하므로 철심 변류기는 이상적인 변류기 아니다.

또한 변류기 포화에 대하여 현재 널리 이용되고 있는 변류기 사용에 대한 기준은, 계통에 정격 전류의 20배의 전류가 흐를 경우에 변류비 오차가 10 %를 넘지 않도록 하는 방식이다[1]. 그런데, 이 방식은 철심에 큰 자속이 유기되도록 단면적이 큰 변류기를 사용하므로 포화 방지 효과가 있는 반면, 전류가 정격의 20 배를 초과하는 심한 사고 시에는 변류기가 포화되어 2차 전류에 많은 오차가 포함되므로, 이에대한 대책으로 계전기의 감도를 회생하여 계전기의 성능이 저하되는 결과를 초래하며, 또한 포화 방지를 위하여 계통의 최대 사고 전류에 비례하여 철심의 단면적을 증가시켜야 하는 단점이 있다.

잔류 자속 존재 시 그 극성과 일치하는 방향으로는 포화점까지의 여유가 작으므로, 사고 시 변류기 포화 가능성성이 증가 할 수 있어, 이를 방지하기 위해서는 참고문헌 [1]에서 제시한 기준 보다 큰 단면적의 변류기를 사용하여야 한다. 그러므로 기존의 변류기 사용에 대한 제약 조건을 벗어나지 않는 한도 내에서서 잔류 자속에 의한 포화의 가능성을 감소하되, 단면적이 작은 변류기를 사용하기 위한 많은 연구가 진행 되었다. 예를 들어 공극 변류기를 사용하면 잔류 자속을 현저히 감소할 수 있다. 그러나 공극 변류기는 가격이 비쌀 뿐만 아니라, 비포화 영역에서 여자 전류가 커 변류비 오차가 증가한다[2].

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

본 논문은 참고문헌 [3]의 확대 연구로써, 자화폭선을 이용한 변류기 2차 전류 보상 알고리즘의 자속 계산시 필요한 철심의 초기 자속을 구하는 방법을 제시하였으며, EMTP를 이용한 포화 특성 뿐만 아니라 히스테리시스 특성 까지 반영한 변류기의 모델에 대하여, 중첩 방지 저역통과 필터의 영향 및 우리나라 345 [kV] 계통의 여러가지 계통 조건 및 사고 조건에 대하여 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 자화 폭선을 이용한 디지털 전류 변성 알고리즘

그림 1에 히스테리시스 특성을 고려한 변류기의 등가 회로가 나타나 있으며, 1, 2차 전류 사이의 관계식은 식 (1)과 같다.

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

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

2.1 철심 자속 계산

2차 측 부담을 $Z_b = R_b + j\omega L_b$ 이라 하면, 철심 자속 $\phi(t)$ 와 $i_s(t)$ 사이의 관계식은 식 (2)와 같다.

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

식 (2)의 양변을 t_0 에서 t 까지 적분하면

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

이다. R_b, R_s, L_b, L_s 는 주어진 값이므로 식 (3)을 이용하면 $\phi(t)$ 을 계산할 수 있으며, 우선 식 (3)에서의 $\phi(t_0)$ 를 알아야 한다.

2.2 초기 자속 $\phi(t_0)$ 계산

정상상태에서 $\phi(t)$ 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

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

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

이 되므로, 정상상태에서 한 주기의 2차 전류으로부터 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.

2.3 자화 폭선을 이용한 전류 변성 알고리즘 [3]

자화폭선을 이용하면 변류비에 맞는 2차 전류를 추정할 수 있다. 식 (3)에서 철심 자속을 계산하였으므로, 자화폭선으로부터 그 자속에 해당하는 자화 전류의 값을 구할 수 있다. 자화폭선의 포화 영역에서 자화 전류는 여자 전류와 같은 반면, 비포화 영역에서는 여자 전류에 해당하는 여자 전류는 값이 두개이다. 여자 전류와 자화 전류와의 차의 최대값은 히스테리시스 주 루프 폭의 1/2이다. 그런데, 그 폭은 매우 작으므로 자화 전류와 여자 전류와의 차는 더욱 작게 되어 같다고 가정할 수 있다. 그러므로 식 (1)을 이용하여, 측정한 2차 전류에 자화전류를 합하면 변류비에 맞는 2차 전류를 구할 수 있게 된다.

3. 모델 계통 및 변류기 모델링

그림 2의 모델 계통의 전압은 345 [kV]이고, 주파수는 60 [Hz]이다. P 모션으로부터 2 [km] 떨어진 지점에서 A상 지락사고를

모의하였다.

참고문헌 [4]에는 EMTP를 이용하여 변류기를 모델링하는 여러 가지 방법이 소개되었고, 본 논문에서 사용한 모델은 그림 3에 보였다. 그림 3의 Type-96 소자는 철심의 포화 특성과 히스테리시스 현상을 모의할 수 있는 소자이며, 히스테리시스 데이터가 필요한데, 본 논문에서는 EMTP 내의 HYSDAT를 이용하여 구하였다. 사용한 변류기의 등급은 345 [kV] 계통의 정격인 C800(2000:3, $R_s = 0.72 \Omega$)이며, 이의 자화곡선은 그림 4에 나타나 있고, 포화점으로 (2.6 [A], 3.378 [Vs])을 선택하였고, C800의 부담으로는 $4+j7 \Omega$ 인 저항, 유도성 부담을 사용하였다.

4. 사례연구 및 오차 분석

EMTP를 이용하여 모델 계통에서, 변류기의 1, 2차 전류를 얻었으며, 샘플링 비율은 주기당 64 샘플로 하였다.

제시한 방식에 대하여 디지털 계산기에서 사용되는 중첩 방지 저역 통과 필터의 영향을 고려하였다. 포화된 2차 전류의 스펙트럼을 분석한 결과 7조파 이상의 고조파의 크기가 기본파의 5% 이하 이었으므로, 컷온 주파수가 6조파인 2차 버터워스(Butterworth)필터를 설계하였으며, 이후의 모든 측정한 2차 전류는 설계된 필터를 통과시킨 전류이다.

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

사고 개시 각, 샘플링 주파수, 계통 시정수, 잔류 자속의 경우에 대해서 사례 연구를 행하였으며, 제시한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여, 보상한 2차 전류에 대하여 식 (9)의 변류비 오차를 매 샘플링 순간마다 계산하였다.

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

4.1 사고 개시각(fault inception angle)에 따른 오차 분석

변류기 포화의 가장 주요한 원인인 직류 옵셋 성분은, 사고 개시각에 따라 크기가 달라진다. 사고 개시각이 0도인 경우와 45도인 경우에 대해서 검증하였으며, 그 결과는 각각 그림 5와 그림 6에 나타나 있다.

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

0도 사고이므로 옵셋 성분이 매우 커 사고 직후에 자속은 포화점(3.378 [Vs])을 초과하여 변류기가 포화되었다. 제시한 알고리즘은 이용하여 복원한 2차 전류를 그림 5c에 제시하였고, 그에 대한 변류비 오차는 매우 적음을 알 수 있다.

4.1.2 사례 2: 45도 사고, 시정수: 20 [ms]

결과는 사례 1의 경우와 비슷하고, 45도 사고이므로 사례 1의 경우보다 포화의 정도가 다소 적다(그림 6).

제시한 알고리즘은 두 가지 경우에 왜곡된 2차 전류로부터 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였다.

4.2 샘플링 주파수에 따른 오차분석

본 논문에서 제시한 방식은 철심 자속 계산의 정확도에 달려 있다. 본 논문에서는 식 (3)의 적분을 사다리꼴 적분 방식을 사용하였다. 그런데, 사다리꼴 적분 방식은 시간 간격에 비례하여 오차가 증가하므로, 여러 가지 샘플링 주파수에 따른 오차 분석을 하였으며, 사례 1에 대하여 주기당 샘플 수가 32, 128의 경우의 변류비 오차를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

그림 6, 그림 7과 그림 8에서 알 수 있듯이, 주기당 64 샘플인 경우와 128 샘플인 경우는 변류비 오차가 거의 비슷하지만, 주기당 32 샘플인 경우와 같이 그 비율이 적은 경우에는 오차가 거의 2배까지 커지는 것을 볼 수 있다.

4.3 계통의 시정수에 따른 오차분석(X/R 비)

초고압 계통에서는 시정수가 매우 크고, 이는 심한 변류기 포화를 야기한다. 시정수는 수십 밀리초에서 200 밀리초에 이른다. 시정수가 200 [ms]인 경우에 대해서 검증하였고, 그 결과를 그림 9에 나타내었다.

4.3.1 사례 3: 0도 사고, 시정수: 200 [ms]

그림 9에서 알 수 있듯이, 사례 3의 경우는 사례 1의 경우보다 시정수가 더 커 포화 정도가 더 심하지만, 제시한 알고리즘이 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였다.

4.4 잔류자속에 따른 오차 분석

철심의 특성 상 사고 후에 철심 내에 잔류 자속이 존재하고, 이는 포화의 가능성을 증가시킬 수 있다. 잔류 자속이 존재시 변류기가 포화되는 경우에 대하여 본 알고리즘을 검증하기 위하여, 두 가지 재폐로를 모의하였으며, 그 결과는 각각 그림 10과 그림 11에 나타내었다.

4.4.1 사례 4: 90도 사고, 시정수: 50 [ms], 사고 제거: 62 [ms], 재폐로: 137 [ms]

그림 10에 나타난 바와 같이 사례 4는 90도 사고이므로, 제거 전에는 변류기가 포화 되지 않았다. 그런데, 제거 후에 잔류자속이 존재하여 그 값은 1.94 [Vs](57%)이다. 이로 인하여 재폐로시 변류기가 포화되었다.

4.4.2 사례 5: 0도 사고, 시정수: 50 [ms], 사고 제거: 47.66 [ms], 재폐로: 137 [ms]

사례 5의 경우는 0도 사고이므로 사례 4의 경우 보다 포화가 더욱 심한 경우이다. 사고 제거 전에도 변류기는 포화되었고, 사고 제거 후에 자속은 감소하여, 재폐로시 3.17 [Vs]에 이르렀고, 재폐로 후에도 포화되었다. 게다가, 사고 제거 후에 1차 전류가 0이 되었음에도, 2차 회로에 과도전류가 흐름을 알 수 있다(그림 11c). 그러나 그러한 경우에도 제시한 알고리즘이 변류비에 맞는 2차전류로 복원하였다.

위의 결과에서 알 수 있듯이, 철심에 잔류 자속이 존재하여 변류기가 포화되는 경우에도 제시한 알고리즘이 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였다.

5. 결론

본 논문에서는 정상 상태의 한 주기의 2차 전류를 이용하여 초기 자속을 계산하는 방법을 제시하였고, 자화곡선을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하는 알고리즘을 대하여, 중첩방지 저역 통과 필터의 영향을 고려하였으며, 철심 내에 잔류자속이 존재하지 않는 경우뿐만 아니라 존재하여 변류기가 포화되는 경우에도 변류비에 맞는 2차 전류를 추정함을, 우리나라의 초고압 345 [kV] 계통에서 여러 가지 조건에 대하여 검증하였고, 그 결과 오차가 매우 적음을 확인하였다.

본 알고리즘은 변류기 포화시에도 변류비에 맞는 2차 전류 추정이 가능하여 계전기의 감도를 향상시킬 수 있으며, 외부사고 시 계전기가 불안정한 동작을 최소화 할 수 있다.

6. 참고문헌

- [1] IEEE, IEEE Guides and Standards for Protective Relaying Systems, Spring 1991
- [2] IEEE Power System Relaying Committee, "Gapped Core Transformer Characteristics and Performance," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, no. 4, pp. 1732-1740, Nov. 1990
- [3] 강용설, 강상희, 문승일, 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

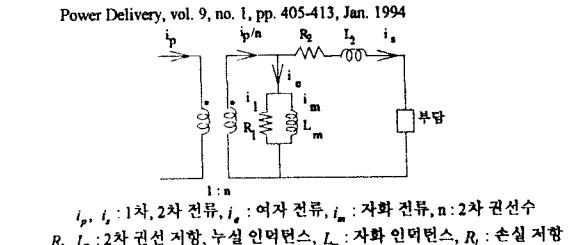


그림 1 변류기의 동등 회로

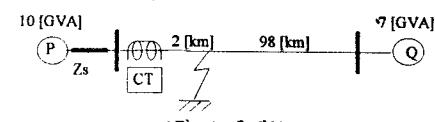


그림 2 모델 계통

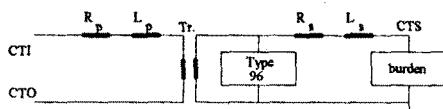


그림 3 EMTP를 이용한 변류기 모델

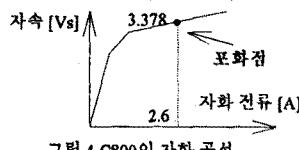
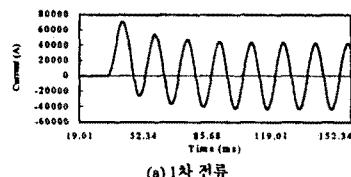
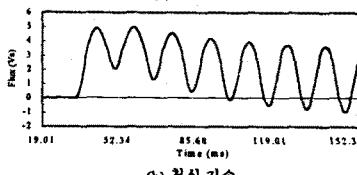


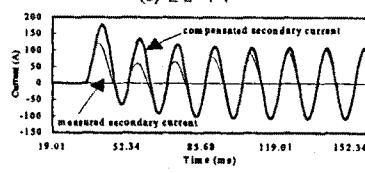
그림 4 C800의 자화 곡선



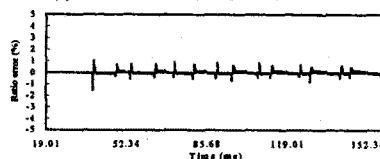
(a) 1차 전류



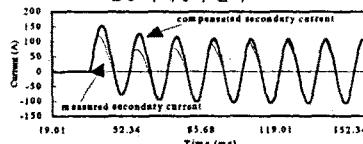
(b) 철심 자속



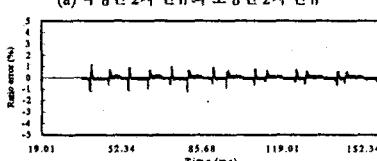
(c) 측정한 2차 전류와 보상한 2차 전류



(d) 변류비 오차
그림 5 사례 1의 결과



(a) 측정한 2차 전류와 보상한 2차 전류



(b) 변류비 오차
그림 6 사례 2의 결과

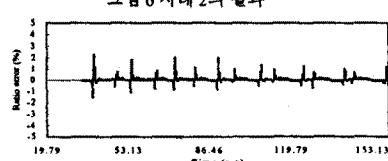


그림 7 사례 1의 주기당 32샘플인 경우의 변류비 오차

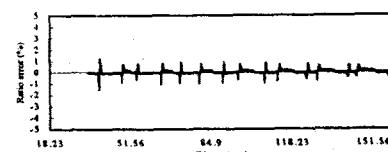


그림 8 사례 1의 주기당 128 샘플인 경우의 변류비 오차

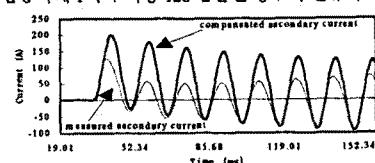
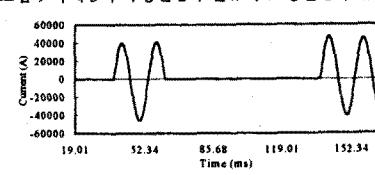
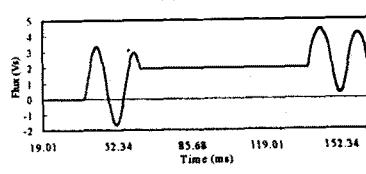


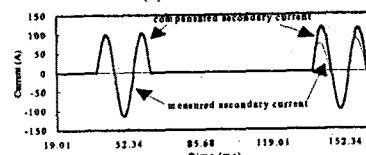
그림 9 사례 3의 측정한 2차 전류와 보상한 2차 전류



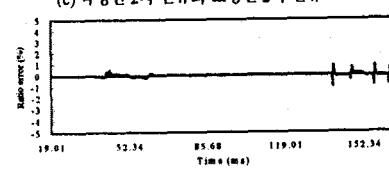
(a) 1차 전류



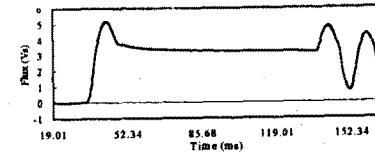
(b) 철심 자속



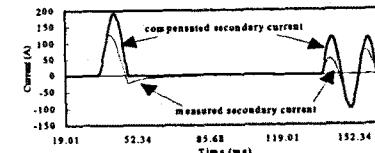
(c) 측정한 2차 전류와 보상한 2차 전류



(d) 변류비 오차
그림 10 사례 4의 결과



(a) 철심 자속



(b) 측정한 2차 전류와 보상한 2차 전류
그림 11 사례 5의 결과