

철심 변류기의 2차 전류 보상 알고리즘의 실시간 구현 및 오차 분석

論 文
45~4~5

Hardware Implementation and Error Analysis of an Algorithm for Compensating the Secondary Current of Iron-cored Current Transformers

姜龍澈* · 金成洙* · 朴鐘根** · 姜相熙*** · 金光鎬§
(Yong-Cheol Kang · Sung-Soo Kim · Jong-Keun Park · Sang-Hee Kang · Kwang-Ho Kim)

Abstract - The conventional method to deal with current transformer (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 as some errors may still be present in the secondary current when a severe fault occurs, but also increases the CT size. This paper presents an algorithm for compensating the distorted secondary current of iron-cored CTs under CT saturation using the magnetization (flux-current : $\lambda-i$) curve and its performance is examined for fault currents encountered on a typical 345 [kV] Korean transmission system, under a variety of different system and fault conditions. In addition, the results of hardware implementation of the algorithm using a TMS320C10 digital signal processor are also presented. The proposed algorithm can improve the sensitivity of relays to low level internal faults, maximize the stability of relays for external faults, and reduce the required CT core cross-section significantly.

Key Words : Current transformer saturation, Flux-current curve, TMS320C10 digital signal processor

1. 서 론

계통 보호를 담당하는 계전기가 제반 기능을 수행하기 위해서는, 계통의 전압과 전류에 대한 정확한 정보가 필요한데, 계통의 1차 전류의 크기를 축소하여 계전기에 입력하기 위한 목적으로 사용하고 있는 변류기에는 여러 가지 종류가 있으나, 1차 권선과 2차 권선 사이의 자속 쇄교를 최대로 하기 위하여 코어가 철인 철심 변류기가 널리 이용 된다. 그런데, 철심은 고유한 비선형의 자기 포화 특성이 있으며 또, 잔류자속이 철심 내에 존재하는 특성이 있고, 이는 포화의 가능성을 더욱 높이므로, 철심 변류기는 이상적인 변류기가 아니다. 그러므로 현재 까지, 정상 상태 및 과도 상태에서의 철심 변류기의 특성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다[1~4].

특히 변류기 포화 시에는 2차 전류는 변류 비에 심하게 맞지 않으므로, 현재 널리 이용되고 있는 변류기 포화에 대한 기준은, 계통에 정격의 20배의 전류가 흐를 경우에 변류비 오차가 10 %를 넘지 않도록 단면적이 큰 변류기를 사용하는 방식이다 [5]. 이 방식은 철심 내에 큰 자속을 유기할 수 있게 하기 위하여 철심의 단면적이 큰 변류기를 사용하는 것으로, 포화 방지 효과가 어느 정도 있으나, 사고 전류가 매우 큰 사고 시, 변류기가 포화 될 수 있고, 이 경우에 계전기의 오동작/오부동작을 방지하기 위하여 계전기의 감도(sensitivity)를 저하시키는 문제점이 있으며, 포화 방지를 위하여 요구되는 철심의 단면적을

계통의 최대 사고 전류에 비례하여 증가시켜야 하는 단점이 있었다.

계전기에 입력으로 공급되는 변류기의 2차 전류를 변류비에 맞도록 보다 정확하게 추정하여 계전기의 성능을 향상시키기 위한 연구로서, 참고문헌 [6]에서는 변류기 포화 시 왜곡된 2차 전류를 보상하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하는 방식을 제안하였다.

본 논문에서는 참고 문헌 [6]의 확대 연구로서, 철심 자속 계산 시 필요한 초기 철심 자속을 구하는 방법을 제시하였으며, 우리 나라의 초고압인 345 [kV] 계통의 다양한 계통 조건 및 사고 조건에서, 정격으로 사용되는 C800 변류기가 포화 되는 경우에 왜곡된 2차 전류를 보상하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정함을 목적으로 한다. 또한 단면적이 정격의 1/4인 C200 변류기를 사용하여, 변류기가 심하게 포화 된 경우에도 변류비에 맞는 2차 전류를 추정이 가능함을 검증하여, 요구되는 변류기의 단면적을 현저히 감소시킬 수 있음을 제시하였다. 사례 연구에서 사용한 두 종류의 변류기는 전력 계통과도 현상 해석 프로그램인 EMTP (Electromagnetic Transient Program)을 이용하여 변류기의 히스테리시스 특성까지 모델링 하였다. 또한 제시한 알고리즘을 TMS320C10 디지털 신호 처리 칩에 구현하여 실시간 구현이 가능함을 보였다.

2. 철심 변류기의 왜곡된 2차 전류 보상 알고리즘

참고문헌 [6]의 변류기 등가 회로에서, 매 순간 1차 전류와 2차 전류 사이의 관계식은 다음과 같다.

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

* 正 會 員 : 서울대 大學院 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正 會 員 :明知대 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

§ 正 會 員 :江原대 工大 電氣工學科 專任講師 · 工博

接受日字 : 1995年 11月 22日

最終完了 : 1996年 3月 8日

식(1)은 항상 즉, 변류기가 포화 되는 경우에도 성립하며, 식(1)의 좌변 $\frac{1}{n} i_p(t)$ 는 변류비에 맞는 2차 전류이고, 이 값이 계전기에 필요한 값이다. 식(1) 우변의 $i_s(t)$ 는 계전기의 입력으로 사용되며 변류기의 2차 전류이며, 또한 $i_s(t)$ 는 외부에서 측정할 수 없는 철심에 자속을 유기하는 데 필요한 여자 전류로써 계전기에 입력되지 않는다. 변류기가 포화 되지 않은 경우에는 이 여자 전류의 값이 거의 0이 되어, $\frac{1}{n} i_p(t) \approx i_s(t)$ 이므로, 계전 알고리즘의 수행에 문제가 없지만, 변류기가 포화 되는 경우에는 여자 전류가 매우 커서 측정된 2차 전류와 변류비에 맞는 2차 전류와의 차이는 매우 크므로, 이는 전류를 이용하는 각종 보호 계전기의 오동작/오부동작을 유발할 수 있다. $i_s(t)$ 는 측정할 수 있는 값이므로 여자 전류 $i_p(t)$ 를 구할 수 있으면, 식(1)을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류 $\frac{1}{n} i_p(t)$ 를 추정할 수 있다.

변류기 2차측 부담(burden)을 $Z_b = R_b + j\omega L_b$ 이라 하면 철심 자속(자속 쇄고, flux linkage) $\lambda(t)$ 와 2차 전류 $i_s(t)$ 와의 관계식을 표현하면 식(2)와 같다.

$$\lambda(t) - \lambda(t_0) = (R_2 + R_b) \int_{t_0}^t i_s(t) dt + (L_2 + L_b) \{i_s(t) - i_s(t_0)\} \quad (2)$$

이 식은 항상 즉, 변류기가 정상일 때 뿐만 아니라 포화 시에도 성립한다. 식(2)에서 R_2, L_2 는 변류기 2차측 회로의 권선 저항과 누설 인덕턴스를 나타내는 정수이고, R_b, L_b 는 계전기 부담의 저항 성분과 인덕턴스를 각각 표현하는 상수이고 주어진 값이다. 식(2)를 이용하면, t_0 에서 t 까지의 시간 동안에 철심 자속의 변화량만을 계산할 수 있으며, 시간 t_0 에서의 철심 자속 $\lambda(t_0)$ 를 구할 수 있다면 식(2)를 이용하여 실제의 철심 자속 $\lambda(t)$ 를 계산할 수 있게 된다.

2.1 시간 t_0 에서의 철심 자속 $\lambda(t_0)$ 계산

계통이 정상 상태에서 변류기 철심 내에 잔류 자속이 없는 경우에는 철심 자속은 주기 함수이며, 한 주기 평균이 0인 함수이다 즉,

$$\lambda(t) = \lambda(t + N\Delta T), \quad \sum_{k=1}^N \lambda(t_0 + k\Delta T) = 0 \quad (3)$$

여기서 N 은 주기 당 샘플 수이며, T 는 샘플링 간격이다. 한편 식(2)의 좌변을 $\tilde{\lambda}(t)$ 라 하면

$$\tilde{\lambda}(t_0 + k\Delta T) = \lambda(t_0 + k\Delta T) - \lambda(t_0) \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N \tilde{\lambda}(t_0 + k\Delta T) &= \{ \lambda(t_0 + \Delta T) - \lambda(t_0) \} + \dots \\ &\quad + \{ \lambda(t_0 + N\Delta T) - \lambda(t_0) \} \\ &= \sum_{k=1}^N \lambda(t_0 + k\Delta T) - N\lambda(t_0) \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. 철심 자속의 한 주기 평균이 0인 특성(식 (3))을 이용하면, 식(5)는

$$\lambda(t_0) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{\lambda}(t_0 + k\Delta T) \quad (6)$$

이 되어, 철심 내에 잔류 자속이 없는 경우에, 정상 상태에서의 한 주기의 2차 전류와 자속의 주기적인 특성을 이용하여 시간 t_0 에서의 철심 자속 $\lambda(t_0)$ 을 계산할 수 있게 되고, 그 이후에는 식(6)을 이용하지 않고, 단지 식(2)만을 이용하여 변류기 포화 시에도 실제의 철심 자속을 구할 수 있다.

2.2 철심 변류기의 2차 전류 보상 알고리즘

철심의 히스테리시스 특성을 완벽하게 알 수 있다면, 식(1)을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정할 수 있다. 그런데 변류기의 히스테리시스 특성이 매우 복잡하여, 히스테리시스 특성을 이용하여 실시간으로 여자 전류를 추정하기에는 계산 부담이 많아, 일반적으로 2차 전류와 자기회로의 정수로부터 변류비에 맞는 2차 전류를 실시간으로 계산할 수 있는 해석적인 방식이 지금까지 알려져 있지 않았다.

변류기 자화 곡선은 변류기의 특성을 나타내는 곡선 즉, 변류기 철심 자속과 그에 해당되는 자화 전류의 값을 나타내는 곡선이며, 이는 변류기 제작자에 의해 제공되는 V-I 곡선으로부터 용이하게 변환 가능하다. 식(3)에서 철심 자속을 계산하였으므로, 자화곡선으로부터 매 순간의 자속에 해당하는 자화 전류의 값을 구할 수 있게 되고, 자화곡선을 선형화 하여 자화곡선을 구하면 계산 부담이 적어 실시간으로 변류비에 맞는 2차 전류를 추정할 수 있다.

변류기 포화 시에는 변류기가 자화 곡선의 포화 영역에서 동작하게 된다. 또한 히스테리시스 곡선이 비 포화 영역에서는 2가 함수이지만, 포화 영역에서는 1가 함수가 되어 여자 전류는 자화 전류와 같다. 식(2)를 이용하여 철심 자속을 계산할 수 있으므로 자화 곡선으로부터 그 자속에 해당하는 자화 전류를 구할 수 있고, 식(1)을 이용하여 측정된 2차 전류에 자화 전류를 합하면 변류기 포화 시에도 변류비에 맞는 2차 전류를 추정할 수 있다[6].

기존에는 변류기 포화 시 왜곡된 2차 전류를 보상할 수 있는 방법이 없었으므로, 변류기 포화 시에는 계전기의 오동작/오부동작을 유발할 가능성이 있어, 변류기를 비 포화 영역(포화점까지)에서만 이용하였기 때문에 사고 전류가 큰 계통에서는 포화를 방지하기 위하여 요구되는 변류기의 단면적을 사고 전류에 비례하여 증가시켜야 했고, 이는 변류기의 크기를 증가시켜 비용을 상승시키는 결과를 초래하였다.

포화 영역의 자화 인덕턴스는 비포화 영역의 자화 인덕턴스보다 매우 작다. 이는 포화 영역에서는 사고 전류가 매우 증가하더라도 철심 자속이 증가하는 비율이, 비 포화 영역에 비해서 매우 작다는 것을 의미한다. 단면적이 작은 변류기를 사용하여 포화가 심한 경우에도 제시한 방식이 자화 곡선의 전영역을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정할 수 있으므로, 철심이 유기할 수 있는 자속의 최대값까지의 특성을 알 수 있다면, 제시한 방식을 이용하면 단면적이 매우 작은 변류기를 사용할 수 있다.

3. 모델 계통 및 변류기 모델링

3.1 모델 계통

본 알고리즘의 성능의 검증을 위하여, 100 [km] 송전선으로 연결되어 있는 2모선 초고압 계통을 선택하였으며, 이는 그림 1에 나타나 있다. 모델 계통의 전압은 345 [kV] 이고, 주파수는 60 [Hz]이며, Z_s 는 전원의 등가 임피던스를 나타낸다. 제시한 모든 사례 연구에서 모의한 사고는 P 모선으로부터 2 [km] 떨어진 지점에서의 A상 지락 사고이다. P 모선 측에 변류기를 연결하여 1차, 2차 전류를 EMTP를 이용하여 얻었으며, 샘플링 비율은 주기 당 64샘플로 하였다.

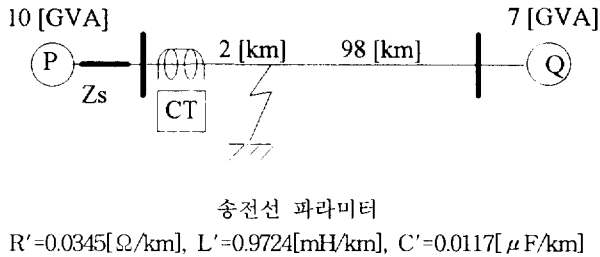
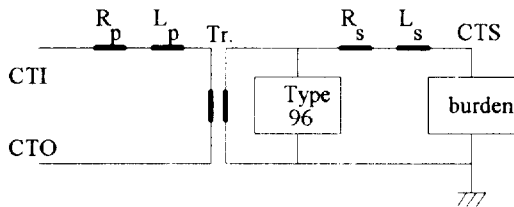


그림 1 모델 계통
Fig. 1 A Model system

3.2 변류기 모델링

본 논문에서 EMTP를 이용하여 변류기를 모델링 하였고, 사용한 모델을 그림 2에 나타내었다[7]. 그림 2에서 Type-96 소자는 철심의 포화 특성 뿐만 아니라, 히스테리시스 현상도 모의할 수 있는 소자이며, 변류기를 정확하게 모델링하기 위하여 본 논문에서는 Type-96 소자를 이용하였다. 그런데 이를 이용하기 위해서는 히스테리시스 데이터가 필요하다. 본 논문에서는 EMTP 내의 보조 프로그램 HYSDAT를 이용하여 이를 얻었다.

사례 연구에서 사용한 변류기의 등급은 우리나라 345 [kV] 계통에서 정격으로 사용되는 C800(2000:5, $R_2 = 0.72[\Omega]$) 변류기이다. 이의 자화 곡선은 그림 3에 나타나 있으며, HYSDAT를 이용하여 히스테리시스 데이터를 얻기 위한 포화점은 자화 곡선 상의 점 (2.6 [A], 3.378 [Vs])을 선택하였다.



R_p, L_p : 1차 권선 저항, 누설 인덕턴스
 R_s, L_s : 2차 권선 저항, 누설 인덕턴스

그림 2 EMTP를 이용한 변류기 모델
Fig. 2 An EMTP-based CT Model

4. 사례연구 및 오차 분석

중첩 방지 지역 통과 필터로는 컷오프 주파수가 6조파인 2차

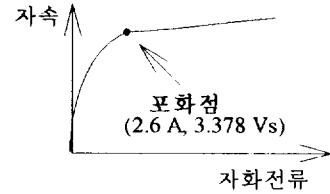


그림 3 C800의 자화곡선
Fig. 3 Magnetization curve of the C800

버터워스(Butterworth) 필터를 설계하였으며, 이후 모든 측정된 2차 전류는 설계된 필터를 통과시킨 전류이다.

C800 변류기의 부담으로는, 사례 1부터 6까지의 경우에는 그 값이 $4 + j7[\Omega]$ 인 저항, 유도성 부담(resistive inductive burden)을 사용하였고, 사례 7의 경우에는 그 값이 $8[\Omega]$ 인 순 저항 부담을 사용하였다.

변류기의 2차 전류로부터 처음 한 주기 동안에는 식 (6)을 이용하여 초기 자속을 계산하였고, 한 주기 후부터는 매 샘플링 순간마다 식(2)만을 이용하여 철심 자속을 계산한 후, 히스테리시스 곡선을 이용하지 않고, 그림 3에 주어진 자화 곡선으로부터 자화 전류를 계산하고, 식(1)을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였다.

본 논문에서 제시한 알고리즘을 여러 가지 계통 조건 및 사고 조건 즉, 사고 개시 각(fault inception angle), 등가 전원 임피던스의 시정수, 잔류 자속 및 저항 부담의 경우에 대해서 검증하였다. 제시한 알고리즘을 이용하여 보상한 2차 전류의 정확도를 검증하기 위하여 식(7)의 변류비 오차를 매 샘플링 순간마다 계산하였다.

$$Ratio\ error = \frac{i_s - (i_p/n)}{20 \times \{rated\ i_s\}} \times 100[\%] \quad (7)$$

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

변류기 포화를 야기하는 원인에는 여러 가지가 있다. 이 중에서 가장 주요한 원인은 직류 성분인데, 이는 사고 개시각에 따라 그 크기가 달라진다. 본 논문에서는 사고 개시각이 0도인 경우와 45도인 경우에 대해서 사례 연구를 수행하였으며, 그 결과는 각각 그림 4와 그림 5에 나타나 있다.

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

사고 개시각이 0도이기 때문에 직류 성분은 매우 크므로, 345 [kV] 계통에서 정격인 C800 변류기를 사용하였음에도 불구하고, 그림 4b에서 알 수 있듯이 사고 후에 자속은 포화점 (3.378 [Vs])을 초과하였다. 즉, 변류기가 포화 되어 2차 전류는 심하게 왜곡됨을 그림 4c의 측정된 2차 전류로부터 알 수 있다. 그러나 그림 4c에 제시한 바와 같이 제시한 알고리즘을 이용하여, 왜곡된 2차 전류를 보상하여 변류비 맞는 2차 전류를 추정하였고, 이는 그림 4a의 1차 전류와 그림 4c의 보상한 2차 전류를 변류비를 고려하여 비교하면 알 수 있다. 또, 측정된 2차 전류에 대한 변류비 오차는 1.5 % 이내로써 매우 적다(그림 4d).

4.1.2 사례 2 : 45 도 사고, 시정수: 20 (ms)

그림 5에서 알 수 있듯이, 사례 2의 경우는 사고 개시각이

45도 이므로, 변류기의 2차 전류는 왜곡되었지만 예상했던 대로 사례 1의 경우보다 직류 성분이 적어 포화의 정도가 다소 적었다. 하지만 제시한 알고리즘이 이를 보상하여 정확한 2차 전류를 추정하였으며, 변류비 오차는 1.5 % 이내로써 매우 적다(그림 5c).

사례 1, 사례 2의 결과로부터, 사고 개시 위상각이 달라서 포화의 정도가 다른 경우에도, 제시한 알고리즘을 이용하면, 왜곡된 2차 전류로부터 변류비에 맞는 2차 전류를 정확히 추정함을 알 수 있다.

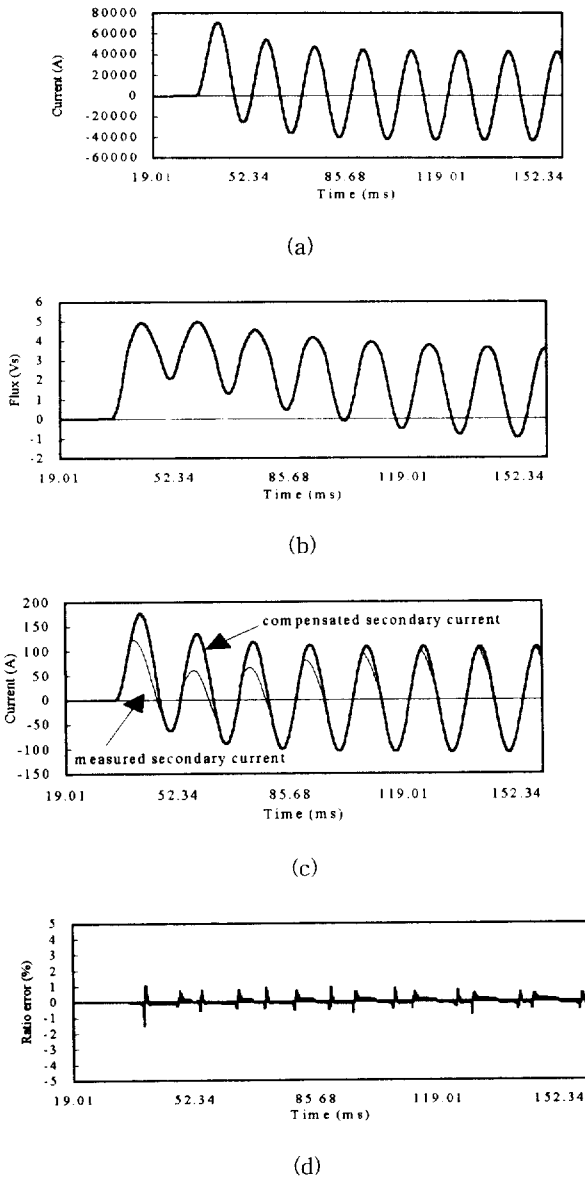


그림 4 사례 1의 결과
 (a) 1차전류 (b) 철심 자속
 (c) 측정된 2차전류와 보상한 2차전류
 (d) 변류비 오차
Fig. 4 The results of Case 1
 (a) Primary Current (b) Core flux
 (c) Compensated & measured secondary currents
 (d) Ratio error

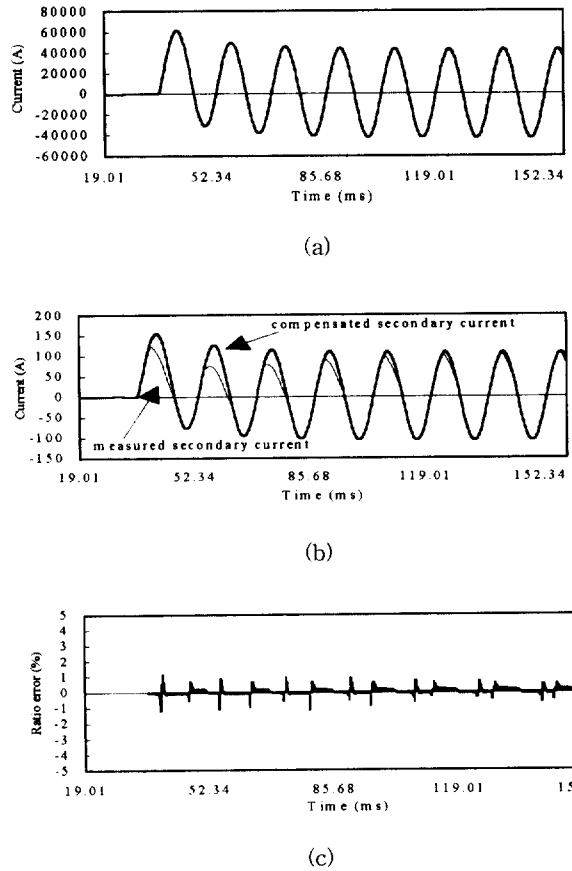


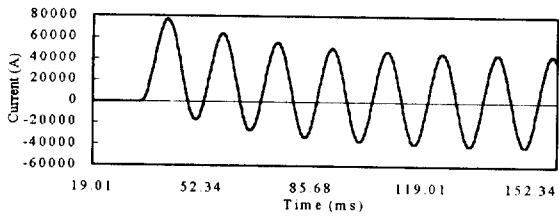
그림 5 사례 2의 결과
 (a) 1차전류
 (b) 측정된 2차 전류와 보상한 2차전류
 (c) 변류비 오차
Fig. 5 The results of Case 2
 (a) primary Current
 (b) Compensated & measured secondary currents
 (c) Ratio error

4.2 전원 임피던스 시정수에 따른 오차분석(X/R 비)

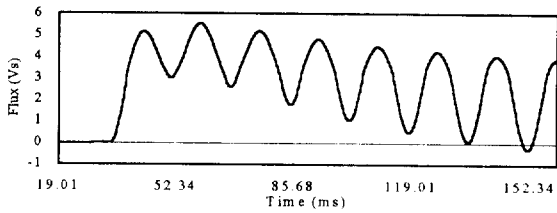
초고압 (EHV) 계통에서는 시정수가 매우 크고, 이는 송전 전압이 상승할수록 증가한다. 시정수는 수십 밀리 초[ms]에서 크게는 200 밀리 초[ms]에 이른다. 또한 시정수가 매우 크고 직류 성분 성분이 큰 경우에는 더욱 심한 변류기 포화를 야기하므로, 본 논문에서는 0도 사고 시, 시정수가 100 [ms]와 200 [ms]인 경우에 대해서 사례 연구를 수행하였고, 그 결과를 각각 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

- 4.2.1 사례 3 : 시정수 : 100 (ms) (0 도 사고)
- 4.2.2 사례 4 : 시정수 : 200 (ms) (0 도 사고)

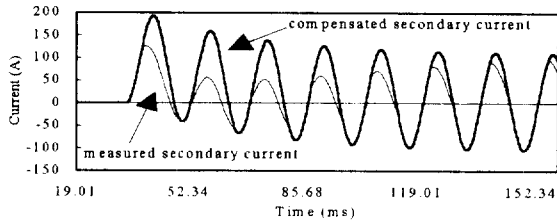
그림 6과 그림 7에 나타난 바와 같이, 사례 3과 사례 4의 경우는 사례 1의 경우보다 시정수가 더 크므로 포화 정도가 매우 심하여 2차 전류는 더욱 심하게 왜곡되었고, 사례 4의 경우는 시정수가 매우 크므로 다른 두 경우에 비해서 포화의 정도가 매우 심함을 그림 7b를 통해서 알 수 있다. 하지만, 시정수가 매우 길며, 직류 성분이 매우 큰 커서 변류기 포화된 경우에도



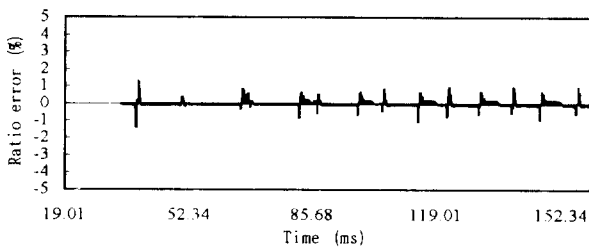
(a)



(b)



(c)



(d)

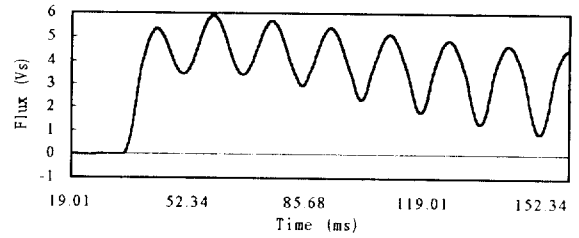
그림 6 사례 3의 결과

- (a) 1차 전류
- (b) 철심 자속
- (c) 측정된 2차 전류와 보상한 2차 전류
- (d) 변류비 오차

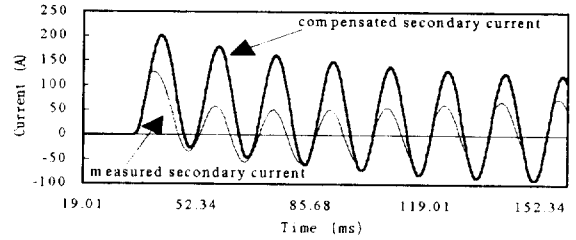
Fig. 6 The results of Case 3

- (a) Primary current
- (b) Core flux
- (c) Compensated & measured secondary currents
- (d) Ratio error

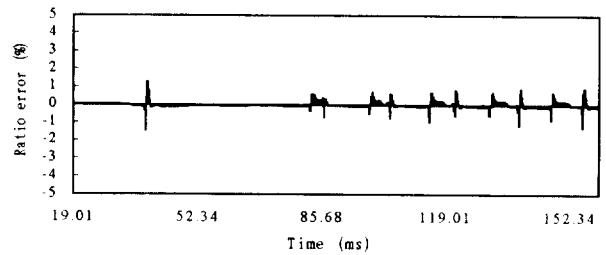
제시한 알고리즘이 왜곡된 2차 전류로부터 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였으며, 그림 6d와 그림 7c에서 나타난 바와 같이 변류비 오차는 1.5% 이내로써 매우 적었다.



(a)



(b)



(c)

그림 7 사례 4의 결과

- (a) 철심 자속
- (b) 측정된 2차 전류와 보상한 2차 전류
- (c) 변류비 오차

Fig. 7 The results of Case 4

- (a) Core flux
- (b) Compensated & measured secondary currents
- (c) Ratio error

4.3 잔류 자속에 따른 오차 분석

서론에서 언급하였듯이, 철심의 특성 상 철심에 잔류 자속이 존재할 수 있고, 잔류 자속이 존재하면 변류기 포화의 가능성을 증가시킬 수 있다. 철심에 잔류 자속이 남아 있게 되는 이유는 여러 가지가 있다. 예를 들면 사고 제거는 철심에 많은 자속을 남아 있게 하고, 그 후의 재폐로시 변류기는 포화 되어 2차 전류가 왜곡될 수 있다. 본 논문에서는 철심에 잔류 자속 존재 시 재폐로 시 변류기가 포화 되는 경우에 대하여 제시한 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여, 2 가지 재폐로의 경우를 모의하였으며, 그 결과는 각각 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

4.3.1 사례 5: 사고 제거:62 [ms], 재폐로:137 [ms] (90 도사고:37.5 [ms], 시정수:200 [ms])

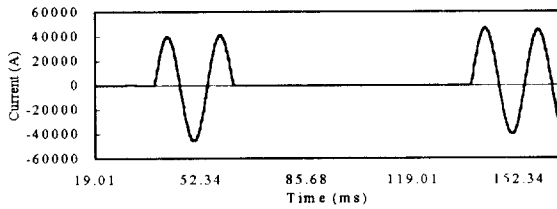
그림 8에서 알 수 있듯이, 사례 5는 90도 사고이어서 직류 성분은 존재하지 않고 정격 변류기를 사용하였으므로, 사

고 제거 전에는 변류비가 포화 되지 않았다. 그림 8b에서 알 수 있듯이, 사고 제거 전의 자속은 포화점을 넘지 않음을 알 수 있으며, 사고 제거 후에는 철심 내에 잔류 자속이 존재 하였고, 재폐로 시 그 값은 1.94 [Vs] (57 % 잔류 자속)이었다. 이로 인하여 재폐로 후에는 자속이 포화점을 초과하여 변류비가 포화 됨을 그림 8b로부터 알 수 있으며, 그 결과 2차 전류는 왜곡되었다(그림 8c). 하지만 왜곡된 2차 전류로부터 제시한

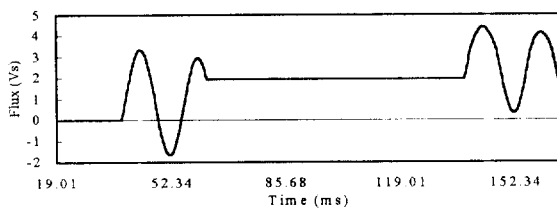
알고리즘이 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였고, 그림 8d에 나타난 바와 같이 변류비 오차는 1 % 이내로 매우 적었다.

4.3.2 사례 6: 사고 제거: 48 [ms], 재폐로: 137 [ms]
(0 도 사고: 33.3 [ms], 시정수 : 200 [ms])

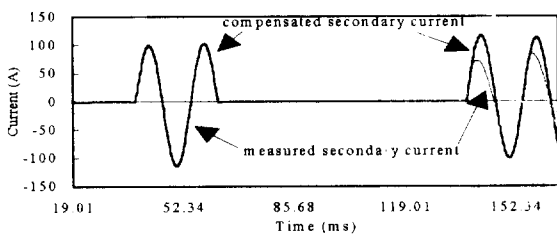
사례 6의 경우는 0도 사고이므로 직류 성분이 매우 크므로, 사례 5의 경우 보다 포화가 더욱 심한 경우이다. 사고 제거 전



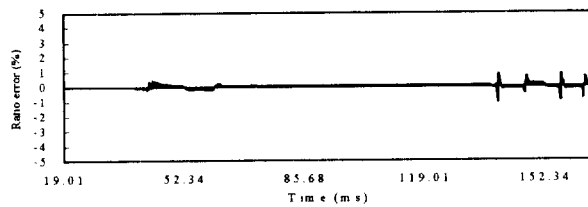
(a)



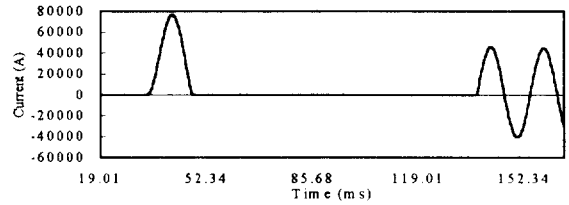
(b)



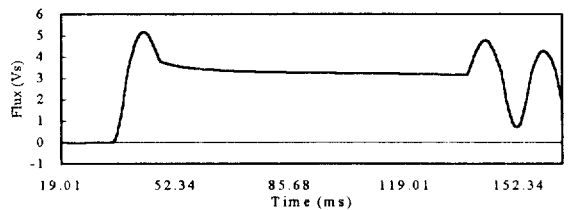
(c)



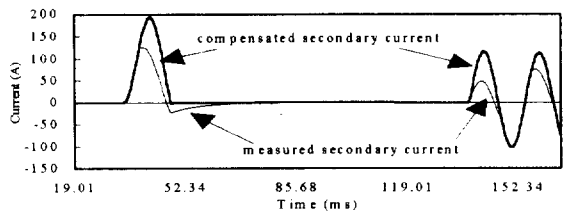
(d)



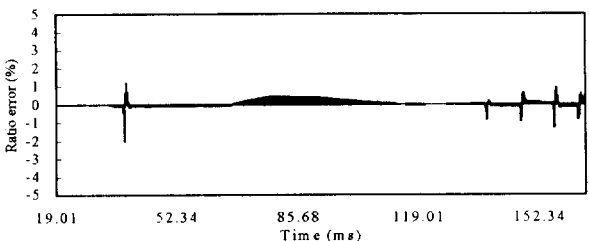
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 8 사례 5의 결과

- (a) 1차 전류 (b) 철심 자속
- (c) 측정된 2차 전류와 보상한 2차 전류
- (d) 변류비 오차

Fig. 8 The results of Case 5

- (a) Primary current (b) Core flux
- (c) Compensated & measured secondary currents
- (d) Ratio error

그림 9 사례 6의 결과

- (a) 1차 전류 (b) 철심 자속
- (c) 측정된 2차 전류와 보상한 2차 전류
- (d) 변류비 오차

Fig. 9 The results of Case 6

- (a) Primary current (b) Core flux
- (c) Compensated & measured secondary currents
- (d) Ratio error

에도 자속이 매우 커, 변류기는 포화 되었고(그림 9c), 그림 9b에 나타난 바와 같이 사고 제거 후에 자속은 감소하여, 재폐로 순간에는 3.17 [Vs](94 % 잔류 자속)에 이르렀다. 이로 인하여, 재폐로 후에도 사고 제거 이전과 마찬가지로 변류기는 포화 되어 2차 전류가 왜곡됨을 그림 9c에서 알 수 있다. 게다가 이 경우에는 사고 제거 후에 1차 전류가 0이 되었는데도 불구하고, 2차 회로에 과도 전류가 흘렀으며 이는 차단 순간에 철심 자속에 따라 그 정도가 달라지며, 초고압 계통에서 차단 실패 시 사용되는 매우 민감한 고속의 과전류 계전기(overcurrent relay)의 리셋을 지연시키게 된다. 하지만, 제시한 알고리즘이 그러한 과도 전류까지도 보상하였으며, 사고 제거 전과 사고 제거 후 변류기가 포화 되는 모든 경우에 왜곡된 2차 전류로부터 변류비에 맞는 2차 전류로 복원하였다(그림 9c). 그림 9d에 나타난 바와 같이, 이 경우에도 변류비 오차는 1.5 % 이내로 매우 적었다.

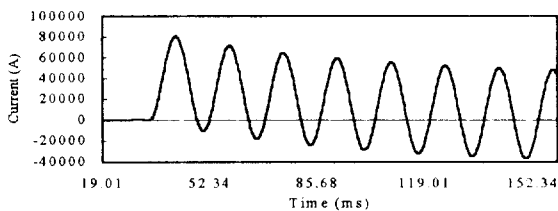
사례 5와 사례 6의 결과로부터, 사고 제거 후에 철심에 존재하게 되는 잔류 자속으로 인하여 재폐로 시 변류기가 포화 되는 경우에도, 제시한 알고리즘을 이용하면 왜곡된 2차 전류로부터 변류비에 맞는 2차 전류를 정확하게 추정함을 알 수 있다.

4.4 저항 부담에 대한 오차 분석

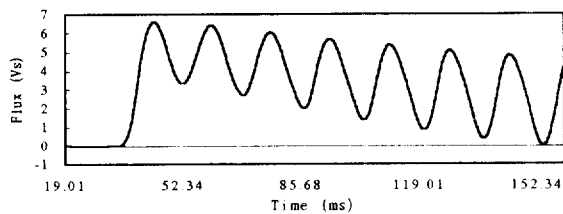
식 (2)에서 알 수 있듯이 변류기의 2차 회로에 저항 성분이 크면 철심 자속이 커지게 되므로, 같은 크기의 부담이더라도 순 저항 부담은 저항, 유도성 부담 또는 순 유도성 부담보다 변류기 포화의 가능성이 다른 부담에 비해 매우 높게 되어, 본문에서는 순 저항 부담인 경우에 대하여 사례 연구를 수행하였으며, 그 결과를 그림 10에 나타내었다.

4.4.1 사례 7 : 0 도 사고, 시정수 : 200 (ms)

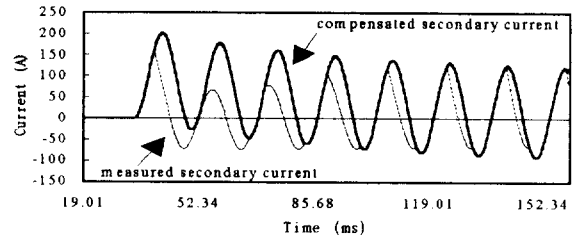
사례 7은 부담을 제외하고는 사례 4의 경우와 같은 조건이다. 저항, 유도성 부담 대신 순저항 부담을 사용하였으므로, 그림 10b에 제시한 바와 같이 자속이 사례 4의 경우보다 크며, 포화의 정도도 심함을 그림 10c의 측정된 2차 전류를 통해서 알 수 있다. 하지만 제시한 알고리즘이 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였으며, 그림 10c의 변류비 오차도 3 % 이내로 매우 적었다.



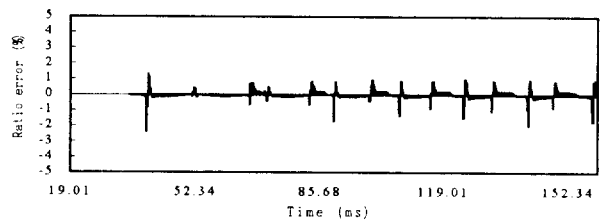
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 10 사례 7의 결과

- (a) 1차 전류 (b) 철심 자속
- (c) 보상한 2차 전류와 측정된 2차 전류
- (d) 변류비 오차

Fig. 10 The results of Case 7

- (a) Primary current (b) Core flux
- (c) Compensated & measured secondary currents
- (d) Ratio error

4.5 작은 변류기에 대한 오차 분석

본문 2.2에서 언급하였듯이, 본 알고리즘을 사용하면 단면적이 매우 작은 변류기의 사용이 가능하다. 이를 검증하기 위하여 그림 1의 모델 계통에서 345 [kV] 계통에서 정격으로 사용하고 있는 C800 변류기 대신 단면적이 정격의 1/4인 C200 변류기를 사용한 경우에 대하여 본 알고리즘을 검증하였으며, 사용한 C200 변류기의 자화 곡선은 그림 11에 나타나 있다.

사례 8 - 사례 10에서 사용한 부담으로는 인 저항, 유도성 부담을 사용하였으며, 0도 사고, 시정수가 큰 경우, 잔류 자속이 존재하는 경우 등 여러 가지 계통 조건 및 사고 조건에 대하여 오차 분석을 수행하였다.

사례 1 - 사례 7의 경우에 사용한 방법과 동일하게, 2차 전류로부터, 처음 한 주기 동안에는 식(6)을 이용하여 초기 자속을 계산하였고, 한 주기 후부터는 매 샘플링 순간마다 식(2)을 이용하여 철심 자속을 계산한 후, 그림 11의 자화 곡선으로부터 자화 전류를 구하고, 식(1)을 이용하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였다. 제시한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여, 추정된 2차 전류에 대하여 식(7)의 변류비오차를 매 샘플링 순간마다 계산하였다.

4.5.1 사례 8 : 0도 사고, 시정수 20 (ms)

사례 8은 사례 1과 같은 조건이며, 사용한 변류기만 다르다. C200 변류기를 사용한 경우에는 부담이 1/4이므로 계산한 철심 자속도 약 1/4이 되었다(그림 12a). 그림 12b와 그림 4c의 측정된 2차 전류를 비교하여 보면, C200의 경우가 단면적이 작

으므로 C800 경우에 포화가 발생하는 시점 이전에 포화가 발생함을 알 수 있으며, 포화의 정도도 심하였다. 그러나, 제시한 알고리즘이 왜곡된 2차 전류로부터 변류비에 맞는 2차 전류를 추정함을 그림 12b를 통해서 알 수 있고, 그림 12c에 제시한 변류비 오차도 2 % 이내로 정격인 C800 변류기를 사용한 경우와 같이 매우 적다.

사례 8의 결과로부터, C800 변류기를 사용한 경우 대신

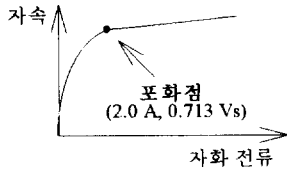
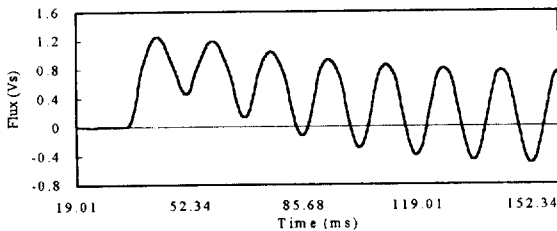
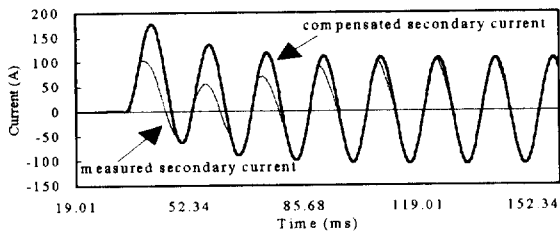


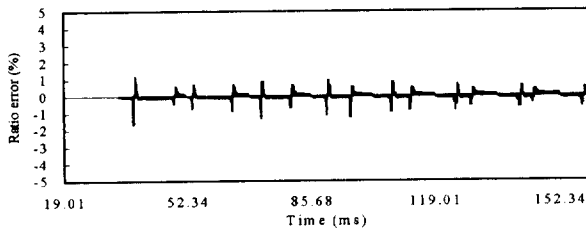
그림 11 C200 변류기의 자화 곡선
Fig. 11 Magnetization curve of the C200 CT



(a)



(b)



(c)

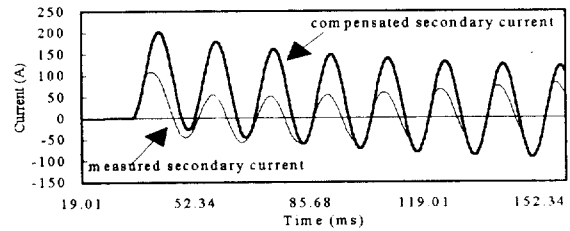
그림 12 사례 8의 결과
(a) 철심 자속
(b) 보상한 2차 전류와 측정된 2차 전류
(c) 변류비 오차
Fig. 12 The results of Case 8
(a) Core flux
(b) Compensated & measured secondary currents
(c) ratio error

C200을 사용한 경우, 0도 사고 시 직류 성분이 매우 과다하여 변류기가 포화되는 경우 제시한 알고리즘이 왜곡된 2차 전류를 보상하여 변류비 맞는 2차 전류를 매우 정확하게 추정함을 확 하였다.

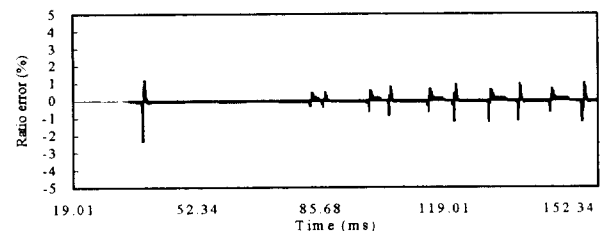
4.5.2 사례 9 : 0 도 사고, 시정수: 200 (ms)

사례 9의 조건은 사례 4의 조건과 동일하고, 사용한 변류기 만 다르다. 예상했던 대로 C200을 사용한 경우는 작은 변류기를 사용했으므로 C800의 경우보다 포화의 정도가 매우 심하였다(그림 13a). 그러나 제시한 알고리즘이 매우 심하게 왜곡된 2 차 전류로부터 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였으며(그림 13a), 변류비 오차도 2.5 % 이내로 매우 적었다(그림 13b).

사례 9의 결과로부터 계통의 시정수가 매우 크고, 직류 성분 성분이 매우 커 변류기가 심하게 포화 되는 경우에 정격 보다 작은 변류기를 사용하여 변류기가 포화되는 경우에도, 제시한 알고리즘이 변류비에 맞는 2차 전류를 추정함을 알 수 있다.



(a)

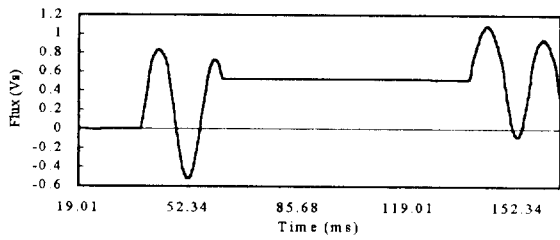


(b)

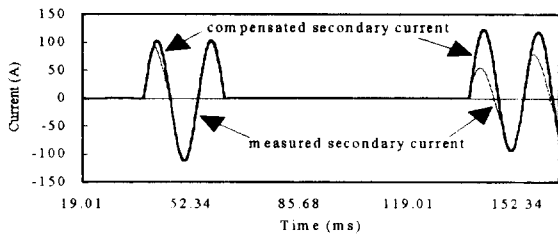
그림 13 사례 9의 결과
(a) 보상한 2차 전류와 측정된 2차 전류
(b) 변류비 오차
Fig. 13 The results of Case 9
(a) Compensated & measured secondary current
(b) Ratio error

4.5.3 사례 10: 90 도 사고, 시정수:200 (ms), 사고 제 거:62 (ms), 재폐로:137 (ms)

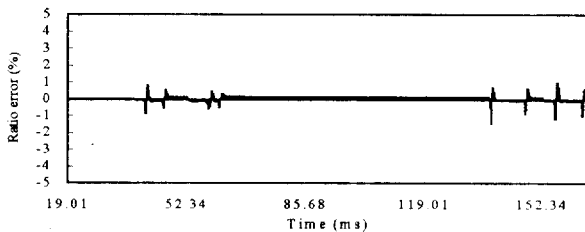
사례 10은 사례5와 같은 조건이며, 사용한 변류기만 다른 경우이다. C200의 경우에는 정격보다 작은 변류기를 사용하였으므로, 90 도 사고 시 직류 성분이 존재하지 않음에도 불구하고 사고 전에도 변류기가 포화 됨을 그림 14b를 통해서 알 수 있다. 또, 사고 후에 잔류 자속이 존재하여 재폐로 시 그 값은 0.568 [Vs] (80 % 잔류 자속)이 되었고, 재폐로 후에 변류기는 잔류 자속으로 인하여 다시 포화 되었고, 그 정도는 C800의 경우보다 심하였다. 하지만 제시한 알고리즘이 이를 보상하여 변



(a)



(b)



(c)

그림 14 사례 10의 결과

- (a) 철심 자속
- (b) 보상한 2차 전류와 측정된 2차 전류
- (c) 변류비 오차

Fig. 14 The results of Case 10

- (a) Core flux
- (b) Compensated & measured secondary current
- (c) Ratio error

류비에 맞는 전류를 추정하였고(그림 14b), 그림 14c에 제시한 변류비 오차도 1% 이내로써 정격인 C800 변류기를 사용한 경우와 같이 매우 적었다.

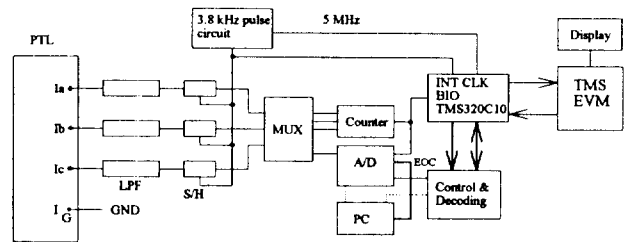
사례8 - 사례 10의 결과로부터 단면적이 정격의 1/4인 변류기를 사용하여 변류기가 포화 된 경우에 제시한 알고리즘을 이용하여 왜곡된 2차 전류를 보상하여 변류비에 맞는 2차 전류의 추정이 가능함을 보였고, 이는 경제적/물리적인 이유로 인하여 작은 변류기를 사용하는 경우에 변류기 포화 시에 2차 전류가 왜곡되어도 변류비에 맞는 2차 전류의 추정이 가능함을 의미한다.

5. TMS320C10 DSP를 이용한 실시간 구현

본문 2.2에서 언급한 바와 같이 본 알고리즘은 계산량이 적어 실시간으로 구현할 수 있으며, 이를 증명하기 위하여 Texas Instrument사의 TMS320C10 DSP 을 이용하여 제시한 알고리즘을 구현하였으며, 그림 15에 이에 대한 블럭 구성도가 나타나 있다. EMTP 출력 데이터를 programmable transmis-

sion line (PTL)을 이용하여[8], 3상 전류를 디지털/아날로그 변환한 후, TMS320C10 디지털 신호 처리 칩에 인가하였다.

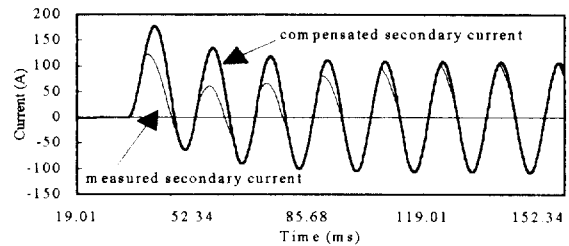
시뮬레이션과 실시간 구현의 결과를 비교하기 위하여 두 가지 경우를 비교하였고, 이의 결과는 그림 16에 나타나 있다. 사례 3과 사례 4의 경우를 테스트하였다. 본 알고리즘이 3상의 전류를 보상하는 데 소요한 시간은 63 [μs] 이었으며, 이는 샘플링 간격 즉, 260 [μs] (3.8 [kHz], 여기서 사용한 샘플링 주파수) 의 24%에 해당하므로, 제시한 보상 알고리즘을 보호 알고리즘의 일부로써 사용하는 데 충분하다.



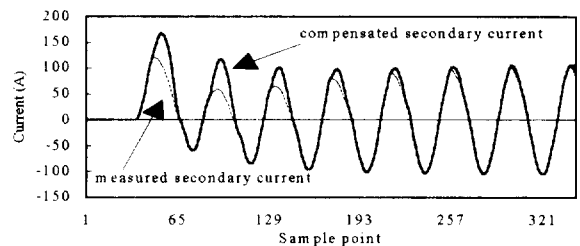
- LPF : low pass filter
- S/H : sample and hold
- MUX : multiplexer
- PC : program counter
- EVM : evaluation module
- INT : interrupt
- EOC : end of conversion
- BIO : branch input/output

그림 15 실시간 구현의 블럭 구성도

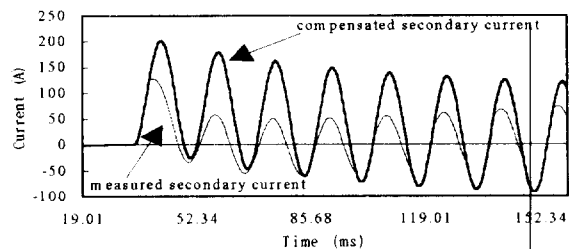
Fig. 15 The block diagram of hardware implementation using a TMS320C10 digital signal processor



(a)



(b)



(c)

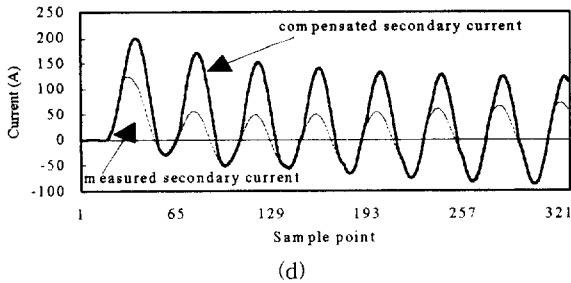


그림 16 시뮬레이션과 TMS32010 DSP칩을 사용하여 실시간 구현한 결과

시정수가 20ms인 경우(0도 사고)
 (a) 시뮬레이션의 경우 (b) 실시간 구현의 경우
 시정수가 200ms인 경우(0도 사고)
 (c) 시뮬레이션의 경우 (d) 실시간 구현의 경우

Fig. 16 Compensated and measured secondary currents of the simulation and hardware implementation using TMS32010 digital signal processor

For a 0 deg fault, primary time constant of 20ms
 (a) In case of simulation
 (b) In case of hardware implementation
 For a 0 deg fault, primary time constant of 200ms
 (c) In case of simulation
 (d) In case of hardware implementation

하드웨어 테스트 결과인 그림 16b, 그림 16d는 각각 시뮬레이션 결과인 그림 16a, 그림 16c의 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 약간의 차이는 양자화 오차(quantization error) 등, 하드웨어의 오차로 인한 결과로 추정된다. 하지만 몇 가지의 제시된 실시간 구현의 결과는 본 알고리즘이 디지털 보호 계전기의 일부로써 실시간으로 구현될 수 있음을 의미한다.

6. 결 론

본 논문에서는 자화 곡선을 이용하여 변류기 포화 시에도 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하는 알고리즘에서 필요한 초기 자속을 계산하는 방법을 제시하였으며, 우리 나라 345 [kV] 계통의 여러 가지 계통 조건 및 사고 조건에 대하여 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 사례연구에서 살펴본 바와 같이 변류기가 과도한 직류 성분 그리고/또는 잔류 자속에 의해 변류기가 포화 되는 경우에도 제시한 알고리즘을 이용하여 왜곡된 2차 전류를 보상하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정하였으며, 변류비 오차가 매우 적게 유지됨을 알 수 있었다. 또한, 단면적이 정격의 1/4인 C200 변류기를 사용한 경우에 정격의 변류기를 사용한 경우보다 빠르게 그리고 심하게 포화 되는 경우에도, 왜곡된 2차 전류를 보상하여 변류비에 맞는 2차 전류를 추정함을 검증하였으며, 이 경우에도 보정한 2차 전류의 변류비 오차가 매우 적게 유지됨을 확인하였다.

또한 제시한 알고리즘을 TMS320C10 DSP에 실시간으로 구현하여, 3상 전류를 보상하는 데 필요한 시간을 확인한 결과, 샘플링 비율이 주기당 64 샘플(3.8 [kHz])과 같은 고속의 샘플링 속도의 경우에도, 샘플링 간격의 24 %를 소요하여, 제시한 알고리즘이 실제의 보호 계전 알고리즘의 일부로써 사용될 수

있음을 보였다.

제시한 방식을 이용하면 변류기 포화 시에도 변류비에 맞는 2차 전류의 추정이 가능하므로, 내부 사고 시 적은 전류 레벨의 사고에 대한 계전기의 민감도를 향상시킬 수 있으며, 외부 사고의 경우 변류기 포화 시 계전기가 불안정하게 동작하는 것을 방지할 수 있어 계전기의 성능 향상이 기대되며, 단면적이 작은 변류기의 사용이 가능하여 비용을 감소하는 등 여러 가지 장점이 있다.

7. 참고문헌

- [1] E. E. Conner, E. C. Wentz, D. W. Allen, "Methods for Estimating Transient Performance of Practical Current Transformer for Relaying", IEEE Trans. PAS, vol. 94, no. 1 pp. 116-122, Jan./Feb. 1975.
- [2] L. J. Powell, "Current Transformer Burden and Saturation", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 15, no.3, pp. 294-302, May/June. 1979.
- [3] IEEE Power System Relaying Committee, "Transient Response of Current Transformers", IEEE Trans. PAS, vol. 96, no. 6, pp. 1809-1814, Nov./Dec. 1977.
- [4] A. Wright, C. Christopoulos, Electrical Power System Protection, Chapman & Hall, 1993.
- [5] IEEE, IEEE Guides and Standards for Protective Relaying Systems, Spring 1991.
- [6] 강용철, 강상희, 박종근, 문승일, "자화 곡선을 이용한 디지털 전류 변성 알고리즘," 대한 전기 학회 논문지 제44권 제6호, 1995. 6. pp.705-710.
- [7] M. Kezunovic, L. Kojovic, A. Abur, C. W. Fromen, F. Phillips, "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.
- [8] M. A. Redfern, R. K. Aggarwal, A. H. Hussein, "A Personal Computer Based System for the Laboratory Evaluation of High Performance Power System Protection Relays", IEEE Trans. PWRD vol. 6, no. 4, Oct. 1991.

저 자 소 개

강용철 (姜龍澈)

전기학회논문지 제45권 제2호 참조

김성수 (金成洙)

전기학회논문지 제45권 제2호 참조

박종근 (朴鐘根)

전기학회논문지 제45권 제2호 참조