

왜곡 전류 보상형 전류 취득 장치

류기찬\*, 장수영, 강상희  
 명지대학교 차세대전력기술연구센터

A Compensated Current Acquisition Device for CT Saturation

Kichan Ryu\*, Sooyoung Gang, Sanghee Kang  
 Myongji University Next-Generation Power Technology Center

**Abstract** - In this paper, an algorithm to compensate the distorted signals due to Current Transformer(CT) saturation is suggested, First, DWT which can be easily realized by filter banks in real-time applications is used to detect a start point and an end point of the saturation. Secondly, For enough Datas those need to use the least-square curve fitting method, the distorted current signal is compensated by the AR(autoregressive) model using the data during the previous healthy section until pick point of Saturation. Thirdly, the least-square curve fitting method is used to restore the distorted section of the secondary current. Finally, this algorithm had a Hardware test using DSP board(TMS320C32) with Doble test device. DWT has superior detection accuracy and the proposed compensation algorithm which shows very stable features under various levels of remanent flux in the CT core is also satisfactory. And this algorithm is more correct than a previous algorithm which is only using the LSQ fitting method. Also it can be used as a MU involving the compensation function that acquires the second data from CT and PT.

**Keywords** : Wavelet Transform, CT Saturation, LSQ method(Least-Square Fitting), AR model

1. 서 론

전력계통에서 전류의 측정은 대부분 철심을 사용하는 변류기를 통하여 이루어진다. 하지만 철심변류기는 그 자성적 특성 때문에 포화 현상을 피할 수 없으며, 변류기 포화는 각종 계전기의 오/부동작을 유발할 수 있다. 특히 큰 고장전류에 의해 변류기가 심하게 포화되는 경우 오동작 할 가능성이 매우 큼으로 변류기 포화에 대한 별도의 대책이 반드시 필요하다. 참고문헌 [1]에서는 포화현상이 한주기 이내에 종료되는 점을 이용하여 고장 판단 이후 일정 시간을 지연하여 트립신호를 출력시키는 방법을 제안하였으나, 이 방법은 최중 트립 신호를 출력하는데 시간이 지연된다. 참고문헌 [2]에서는 외부 고장시 변류기 포화에 상관없이 측정 임피던스가 일정 영역에 있음을 이용하여 내부 고장과 외부 고장을 판단하였으며, 참고문헌 [3]에서는 B-H 곡선의 포화구간에서 전압 및 전류의 증분으로 구한 임피던스가 매우 커짐을 이용하여 포화 여부를 판단하였다. 참고문헌 [4]에서는 변류기의 자화곡선을 이용하여 왜곡된 변류기 2차 전류를 보상할 수 있는 알고리즘을 적용한 비올차동 계전방식이 제안되었으나, 초기 잔류 자속이 없는 경우에만 보상 가능하다. 참고문헌 [5]에서는 이와 같은 보상 알고리즘의 단점을 보완하여 초기 잔류 자속을 계산하여 보상하는 새로운 방법이 제안 되었으나, 여전히 정확한 변류기 자

화곡선 데이터가 필요하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 변류기 포화에 의해 왜곡된 2차 전류를 복원하는 기법 중에 LSQ를 이용한 방법에 AR모형을 적용하여 LSQ 연산에 필요한 데이터를 충분히 확보하는 기법을 제안하였다. 적용된 보상 알고리즘은 변류기 자화곡선 데이터를 필요로 하지 않으며, 웨이브렛 변환을 이용하여 포화 시작점 및 종료점을 실시간으로 판단하고, LSQ 연산만을 이용한 기존의 기법보다 더 정확한 전류 데이터를 얻을 수 있다.

2. 본 론

2.1 웨이브렛 변환을 이용한 포화 검출

신호 분석에 가장 일반적으로 사용하는 푸리에 해석은 신호를 주파수 영역으로 변환하는 과정에서 시간 영역에 대한 정보가 소실된다는 단점이 있다. 웨이브렛 변환(Wavelet Transform)은 모(mather)함수를 정의하고, 모함수의 시간에 따른 크기변형(scale)과 이동(Translation)을 통해 분석영역이 가변되는 윈도우를 사용함으로써 푸리에 변환의 단점을 해결하였다. 본 논문에서는 이산시간 웨이브렛 함수( $\psi$ )를 이용하여 Scale( $a_0^m$ )과 Translation( $na_0^m$ ) 요소를 효율적으로 분해할 수 있는 이산 웨이브렛 변환(DWT, Discrete Wavelet Transform)을 사용하였으며, 신호  $x(n)$ 에 대한 이산 웨이브렛 변환식은 식(1)과 같다.

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \psi\left(\frac{k - na_0^m}{a_0^m}\right) \quad (1)$$

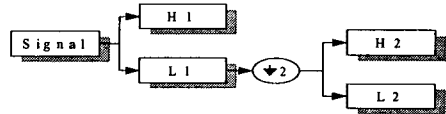


그림 1. 웨이브렛 변환을 이용한 분해도

이산 웨이브렛 변환은 저역통과 필터와 고역통과 필터로 구성된 필터 뱅크를 이용하여 신호를 분해하는 과정을 반복함으로써 구현된다.

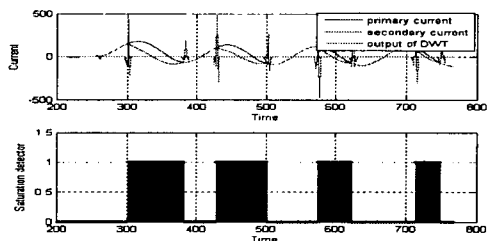


그림 2. D2 계수를 이용한 CT 포화 검출

그림 1은 웨이브렛 변환을 이용하여 신호를 분해하는 과정을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 DB4 모함수를 사용하여 이산 웨이브렛분석을 하였으며, 변류기의 포화 판단을 위해 신호의 고주파 성분을 포함하고 있는 H2 계수를 이용하였다. 그림 2는 웨이브렛 변환을 이용한 변류기 포화 검출 결과를 보인 것으로 포화 시작점 및 종료점을 정확하게 검출함을 알 수 있다.

### 2.2 AR 모델을 이용한 왜곡 보상 데이터 취득

전력 계통의 고장시 발생하는 전류는 지수 감쇄하는 직류 성분과 기본파 및 고조파 성분의 조합으로 가정할 수 있으므로 이를 자기회귀(Autoregressive, AR) 모델로 재표현 할 수 있다. 등가 전원의 시정수를 직류 성분과 고조파 성분의 시정수로 가정하여 구하는 방법을 사용하였으며, 포화시작 이전 5샘플을 AR로 복원하여 LSQ 연산에 필요한 Data를 확보할 수 있다.

#### 2.2.1 자기회귀(Autoregressive, AR) 모델

AR 모델이란 시계열자료가 과거 값들로써 설명된다는 모형이다. 다시 말하면 식(2)과 같이와 같이

$$y(k) = a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) + \dots + a_p y(k-p) \quad (2)$$

라고 할 때, 현재(k) 시점의 값(y(k))은 바로 직전(k-1)값으로부터 a<sub>1</sub>만큼, (k-2)값으로부터 a<sub>2</sub>만큼 등의 영향을 받는다고 할 수 있다. 과거(k-p)까지의 값들이 y(k)에 영향을 주는 경우 p차 AR 모델이라고 부르며, AR(p)라고 표현한다.

#### 2.2.2 전류 신호의 AR 모델

전력 계통의 고장시 발생하는 전류 신호는 지수 감쇄하는 dc 성분과 사인파 성분의 조합으로 가정할 수 있으므로 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$i(t) = C_0 \exp^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^m C_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (3)$$

여기서 τ와 C<sub>0</sub>는 dc 성분의 시정수 및 크기, C<sub>n</sub>과 θ<sub>n</sub>은 n조파 사인성분의 크기 및 위상각, m은 고조파 성분의 최고차수이며 ω는 시스템의 기본 주파수이다. n 조파의 sine 성분의 AR 모델은 식(4)와 같고, 지수 감쇄하는 dc 성분은 AR 모델은 식(5)와 같다.

$$x_n(t) = C_n \sin(n\omega t + \theta_n)$$

$$x_n^{k+1} = \begin{bmatrix} x_n[k+1] \\ x_n[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 - (n\omega \Delta t)^2 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n[k] \\ x_n[k-1] \end{bmatrix} = a_n x_n^k \quad (4)$$

$$x_0(t) = C_0 \exp^{-t/\tau}$$

$$x_0^{k+1} = x_0[k+1] = (1 - \Delta t/\tau)x_0[k] = a_0 x_0^k \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에서 알 수 있듯이 n조파 sine성분의 AR계수는 주파수(nω) 및 샘플링 간격(T)에 의해 표현되고, dc 성분의 계수는 샘플링 간격(T)과 시정수(τ)에 의해 표현된다. 이 3개의 값들 중 알지 못하는 값은 시정수(τ)뿐이므로 시정수를 일정 값으로 가정하면 전류 신호의 AR 계수(θ)를 사전에 계산할 수 있게 된다. 결과적으로 식(6)과 같이 포화 구간의 전류를 추정하는데 필요

한 데이터의 수는 AR 모델의 차수와 동일한 2m+1개만 필요하게 된다.

$$i[k+1] = \phi^T(k)\theta$$

여기서,  $\phi(k) = [i[k] \ i[k-1] \ \dots \ i[k-2m]]^T$

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_{2m+1}]^T \quad (6)$$

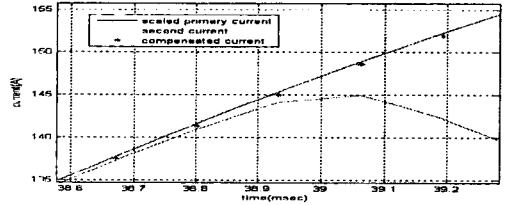


그림 3. AR 모델을 이용한 2차 전류 보상

그림 3은 포화시작점 이전 5개의 샘플을 AR로 복원한 데이터는 LSQ의 정확한 연산을 위해 필요한 기지값으로 쓰이게 된다.

### 2.3 최소 자승법을 이용한 변류기 포화 복원

전력 계통의 고장시 발생하는 전류 신호는 식(3)과 같이 지수 감쇄하는 dc 성분과 정현파 성분의 합으로 표현 가능하다. 고장 전류를 dc 성분 및 기본파 성분만으로 가정하고 dc 성분을 테일러 시리즈로 전개한 후 초기 3항만을 취하여 정리하고 아래와 같이 기지값(a<sub>ij</sub>)과 미지수(x<sub>i</sub>)로 분리한다. 그리고 포화 이전의 m개의 전류 샘플값을 이용하여 연립방정식을 세운 후 행렬 식으로 정리하면 식(7)을 얻을 수 있으며,

$$Y = X \cdot \theta \quad (7)$$

$$\text{여기서, } Y = \begin{bmatrix} i(t_1) \\ i(t_2) \\ \dots \\ i(t_m) \end{bmatrix}, \theta = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_5 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{m5} \end{bmatrix}$$

전류 신호를 복원하기 위해 필요한 신호의 계수 행렬 θ는 식(8)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (8)$$

여기서 구한 계수들을 다시 식(7)에 대입하면 시간에 따른 전류 신호를 추정할 수 있다.

## 2.4 사례 연구

### 2.4.1 EMTF를 이용한 시뮬레이션

그림 4와 5는 EMTF를 이용해 전류 자속 40%, 전압 위상각 0°에 고장이 발생했을 경우 변류기 포화에 의해 왜곡된 2차 전류를 복원한 결과이며 128샘플링을 이용하였다. 먼저 그림 4는 신호의 계수를 추정하기 위해 포화 시작 이전 15개, 포화 종료 이후 3개의 전류 데이터를 사용하였으며 그림 5는 AR 모델로 복원한 5개 전류 데이터를 추가하여 복원하였다.

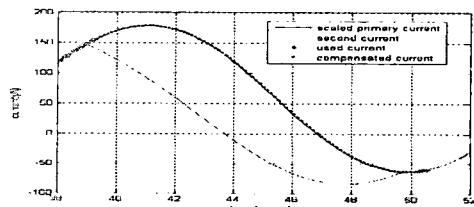


그림 4. 왜곡된 변류기 2차 전류의 추정 결과 (LSQ만을 사용했을 경우)

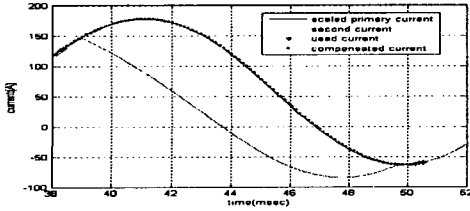


그림 5. 왜곡된 변류기 2차 전류의 추정 결과 (AR 모델과 LSQ를 이용한 경우)

그림 6에서와 같이 AR 모델을 이용하여 LSQ에 필요한 샘플을 늘린 결과 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

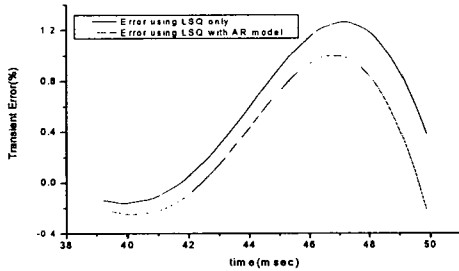


그림 6. 1차 전류와 보상된 전류의 과도오차(%)

그림 6은 복원 알고리즘의 성능 평가를 위한 과도 오차 (transient error)를 보인 것이고 이것은 식(9)과 같은 참고문헌 [6]의 과도 오차 계산식을 이용하여 계산하였다.

$$transient\ error(\%) = \frac{K_n \cdot i_2(t) - i_1(t)}{\sqrt{2} \cdot I_{psc}} \times 100(\%) \quad (9)$$

#### 2.4.2 TMS320C32를 이용한 Hardware Test

타겟보드로 TMS320C32를 사용하였으며 42샘플링하여 알고리즘을 검증하였다. 그림 8은 에뮬레이터(Code Composer)를 이용하여 그래프로 나타낸 것이다. 상단의 두 그래프는 도블(DOUBLE)로 생성한 1차 전류신호와 2차 왜곡 전류 신호로서 42샘플링의 AD결과이며, 세 번째 그래프는 왜곡파형을 보상한 최종 데이터로서 연산시간에 따른 시지연과 알고리즘의 결과를 나타내고 있다. 마지막 그래프는 사고 검출에 이용한 웨이브렛의 H2를 나타낸 것이다.

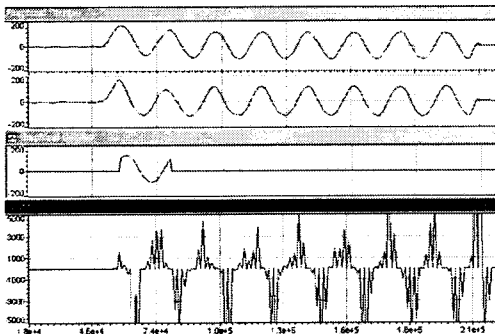


그림 8. 에뮬레이터를 이용한 H/W 시험 결과

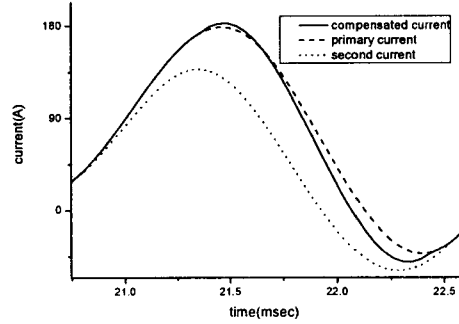


그림 9. 42샘플링하여 TMS320C32로 연산한 결과

그림 8은 주기당 42샘플링하여 TMS320C32로 연산한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 1차측 전류신호를 따라 데이터가 보상되는 것을 볼 수 있다. 12bit의 AD컨버터를 사용하였으며 PC와 직렬 통신하여 보상데이터를 전송하였다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 변류기 포화에 의해 왜곡된 2차 전류를 복원하는 기법 중에서 LSQ를 이용한 복원 기법에 AR 모델을 적용하여 LSQ를 연산에 필요한 데이터를 충분히 확보하였으며 LSQ만을 사용했을 경우 보다 과도오차가 적은 알고리즘을 제안하였다. 도블(DOUBLE)을 이용하여 실제 포화 파형을 입력하고 TMS320C32 보드로 연산하여 알고리즘을 검증하였다. 이 알고리즘은 포화 구간의 왜곡된 2차 전류를 보다 정확하게 보상한다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2004-B-211)주관으로 수행된 과제임.

#### [참고 문헌]

- [1] A. Kumar, P. Hansen, "Digital bus-zone protection", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 4, pp. 29-34, Oct. 1993
- [2] M. S. Sachdev, T. S. Sidhu, H. S. Gill, "A busbar protection technique and its performance during CT saturation and CT ratio-mismatch", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 15, No. 3, pp. 895-901, July. 2000
- [3] C. Fernandez, "An Impedance-based CT saturation Detection Algorithm for Bus-Bar Differential Protection", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 16, No. 4, pp. 468-472, Oct. 2001
- [4] 강용철, 윤재성, 김동룡, "변류기 보상 알고리즘을 이용한 모선보호용 전류 차동계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, 제49권 제9호, pp. 446-450, 2000년 9월
- [5] 강용철, 윤재성, 강상희, "개선된 변류기 보상 알고리즘을 적용한 모선보호용 비율전류차동 계전방식", 대한전기학회 논문지, 제52권 제3호, pp. 158-163, 2003년 3월
- [6] IEC 44-6, International Standard Part 6, Current Transformer, 1992