

내삽법 기반의 최소자승법을 이용한 개선된 CT 포화 복원 알고리즘

류기찬, 강상희, 이봉현

An Enhanced Compensation Algorithm for the CT Saturation Using Interpolation-based LSQ(Least Square) Fitting Method

Kichan Ryu, Sang-Hee Kang, Bong-Hyun Lee

Abstract - A saturation of magnetic flux in the core may occur when a large primary current flows when the iron-cored current transformer is used. This saturation makes the distorted secondary current of the CT. the distorted secondary current may cause the mal-operation or operation time delay of protective relays. CT compensation algorithm using The LSQ(Least Square) fitting method has a problem. It needs to acquire enough data for executing this algorithm without an error. In this paper, an enhanced algorithm using interpolation based LSQ(Least Square) Fitting Method is proposed. The Lagrange Interpolation Method is used for the interpolation and CT is simulated by EMTP. The results show that the proposed algorithm can accurately compensate a distorted secondary current more than existing Algorithm when the saturation severely occurs.

1. 서 론

전력계통에서 전류의 측정을 위해 사용되는 철심 변류기는 그 자성특성 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. 변류기 포화 복원 알고리즘으로 포화현상이 한주기 이내에 종료되는 점을 찾고 고장판단 이후 일정 시간을 지연하여 트립 신호를 출력시키는 방법[1]이 제안되었으나 최종 트립 신호를 출력하는데 시간이 지연된다는 단점이 있다. 다른 알고리즘으로 외부 고장시 변류기 포화가 상관없이 측정 임피던스가 일정 영역에 있음을 이용하여 내부 고장과 외부 고장을 판단[2]하였으며, B-H 곡선의 포화구간에서 전압 및 전류의 증분으로 구한 임피던스가 매우 커짐을 이용하여 포화 여부를 판단[3]하는 알고리즘이 있다. 또한 변류기의 자화곡선을 이용하여 왜곡된 변류기 2차 전류를 보상할 수 있는 알고리즘을 적용한 비율차동 계전방식이 제안[4]되었으나, 초기 전류 자속이 없는 경우에만 보상 가능하다. 이와 같은 알고리즘의 단점을 보완하여 초기 전류 자속을 계산하여 보상하는 새로운 방법이 제안[5]되었으나, 여전히 정확한 변류기 자화곡선 데이터가 필요하다는 단점이 있다. 기존에 개발되어온 여러 가지 복원 알고리즘 중에 하나인 최소자승법(Least Square Fitting Method)을 이용한 기법은 고장 발생 전로부터 포화 시작점까지의 충분한 데이터와 포화 종료점 이후에 소수의 데이터가 확보되어야만 정확한 복원이 가능하다. 그러나 포화가 빨리 일어난 경우 충분한 데이터의 확보가 불가피하며 포화 종료점 이후에 사용하는 데이터의 수가 많을수록 고장이후에 포화복원까지 소요되는 시간이 늘어나게 된다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 내삽법을 적용한 기법을 제안하였다. 즉, 고장이후에서 포화시작점 이전의 데이터와 포화 종료점 이후의 데이터를 통해 내삽함수를 만들고 이 함수로부터 샘플간에 데이터를 내삽함으로써 알고리즘 수행에 필요한 충분한 데이터를 확보하였다. 제안된 알고리즘은 변류기 자화곡선 데이터 및 계통의 시정수를 필요로 하지 않으며, 이산 웨이블릿 변환(DWT)을 이용하여 포화 시작점 및 종료점을 실시간으로 판단하고, 내삽법을 통해 최소자승법 연산에 필요한 데이터를 확보함으로써 기존의 최소자승법을 이용한 기법의 복원 오차를 줄일 수 있었다.

2. 본 론

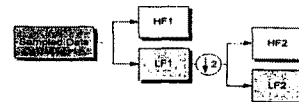
2.1 내삽법 기반의 최소자승법 알고리즘

최소자승법을 이용한 기법은 포화가 일찍 일어나 신뢰할 수 있는 데이터의 수가 적은 경우와 입력 파형의 샘플링 주파수가 낮은 경우에 알고리즘에 필요한 충분한 데이터를 취득하지 못한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환(DWT)을 이용하여 변류기의 포화를 검출한 후 라그랑지(Lagrange) 내삽법을 이용하여 기본 샘플링 주파수로 샘플링한 데이터 사이에 새로운 데이터를 내삽함으로써 최소자승법 알고리즘 수행에 필요한 충분한 데이터를 취득하는 알고리즘을 제안하였다.

2.1.1 이산 웨이블릿 변환(DWT)을 이용한 포화 검출 기법

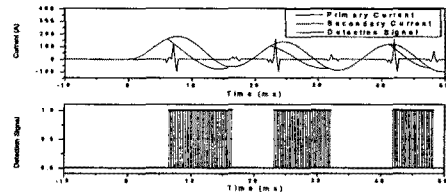
이산 웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform)은 다단계 필터뱅크로 구현된다. 그림 1은 이산 웨이블릿 변환(DWT)을 이용하여 신호를 분해하는 과정으로, 입력 신호를 고역 통과 필터와 저역 통과 필터에 단계적으로 통과시켜 웨이블릿 계수(Wavelet coefficient)를 구하였다. 고역 통과 필터를

통과하여 구한 계수들은 입력 신호의 세밀한 부분에 대한 정보를 나타내고, 저역 통과 필터를 통과하여 구한 계수들은 입력 신호의 전체적인 모양에 대한 정보를 나타내게 된다. 즉, 저역 통과 필터(LF)과 고역 통과 필터(HF)을 이용하여 신호를 분해하는 과정을 반복함으로써 필터뱅크가 구현된다.



<그림 1> 이산 웨이블릿 변환(DWT)의 필터뱅크 구조

본 논문에서는 다우비치(Daubechies) 모함수를 이용한 2단계의 필터뱅크를 구성하였고 2차 고역 통과 필터(HF2)의 출력 결과를 사용하여 포화 구간을 검출하였다. 그림 2는 이산 웨이블릿 변환(DWT)을 이용한 변류기 포화 검출 결과를 보여주고 있다.



<그림 2> DWT를 이용한 CT 포화 검출 결과

2.1.2 라그랑지(Lagrange) 내삽법의 원리

실제 데이터를 이용하여 임의의 시점에서 데이터를 추정하는 것이 보간법이다. 보간법은 내삽과 외삽으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 라그랑지(Lagrange)내삽법을 이용하였으며 원리는 다음과 같다. 서로 다른 n+1개의 $x_i, i=0,1,\dots,n$ 에서 점 $(x_i, y_i), i=0,1,\dots,n$ 을 지나는 n차 다항식은 단 하나 존재한다. 이 n차 다항식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 식(1)은 $L_i(x_j)=1, L_i(x_j)=0 (i \neq j)$ 을 만족하므로 식(2)가 성립되며 이식을 라그랑지 보간 다항식이라 한다. 이 식으로 임의의 점 x에서의 값을 구할 수 있다.

$$L_i(x) = \frac{(x-x_1)\dots(x-x_{i-1})(x-x_{i+1})\dots(x-x_n)}{(x_i-x_1)\dots(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})\dots(x_i-x_n)}, i=0,\dots,n$$

$$L_i(x) = \prod_{k=0, k \neq i}^n \frac{(x-x_k)}{(x_i-x_k)} \tag{1}$$

$$P_n(x) = y_0L_0(x) + \dots + y_nL_n(x) = \sum_{i=0}^n y_iL_i(x) \tag{2}$$

2.1.3 라그랑지 내삽법을 이용한 데이터 취득

최소자승법 알고리즘에 라그랑지 내삽법을 적용하기 위해서는 먼저 신뢰할 수 있는 데이터의 구간을 정의해야만 한다. 먼저 필터뱅크를 이용한 포화 검출 알고리즘을 통해 포화 구간을 찾는다. 포화이전 데이터를 사용하기 위해서는 고장점에서 포화 시작점까지의 데이터 중에서 고장점 근처의 몇 샘플과 포화시작점 근처의 몇 샘플을 제외하고 사용해야 한다. 그 이유는 고장발생 이후 몇 샘플의 데이터는 고장으로 인해 신뢰할 수 없고 포화 시작점으로 판단한 시점보다 몇 샘플 앞서 포화가 시작되므로 포화 시작점 이전 몇 샘플 또한 신뢰할 수 없는 구간이므로 사용할 수 없기 때문이다. 본 논문에서는 이 두 구간의 샘플을 제외하고 신뢰할 수 있는 샘플 데이터와 포화 종료점 이후 샘플 데이터를 입력으로 라그랑지 보간 다항식을 통해 만들어진 데이터를 기본 샘플 데이터 사이에 내삽함으로써 최소자승법 연산에 필요한 충분한 데이터를 취득하였다.

2.1.4 최소자승법을 이용한 포화 복원 알고리즘

최소자승법을 이용한 포화 복원 알고리즘의 원리는 다음과 같다. 먼저 전

력 계통의 고장으로 인해 발생하는 전류 신호를 직류 음펄트 성분을 테일러 시리스로 전개한 후 초기 3항만을 취하고 정현파 성분 중 기본파 성분만으로 가정하여 정리하였다. 이 식을 기지값(a_{ij})과 미지값(x_j)으로 분리하고 취득한 전류 샘플 데이터를 이용하여 연립방정식을 세운 후 행렬식으로 정리하면 식(3)을 얻을 수 있다. 전류 신호를 복원하기 위한 신호의 계수 행렬 θ 는 식(4)를 이용하여 계산할 수 있다. 여기서 구한 계수들을 다시 식(3)에 대입하면 시간에 따른 전류 신호를 추정할 수 있다.

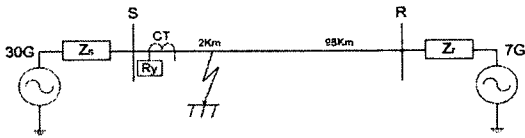
$$Y = X \cdot \theta \quad (3)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} i(t_1) \\ i(t_2) \\ \dots \\ i(t_m) \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_5 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{m5} \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

3. 사례연구

제한된 알고리즘의 검증을 위하여, EMTP를 사용하여 그림 3과 같이 양 단 계통을 모델링하였다. 선로길이는 100[km], 계통의 전압은 345[kV]이며 주기당 32, 64, 128샘플링 하였다. 모의한 고장은 S단으로부터 2[km] 지점에서의 A상 위상각 0° 지락고장이며, S단의 계전점(Relaying Point)에 변류기를 연결하여 잔류 자속의 변화에 따라 1, 2차 전류를 측정하였다.



〈그림 3〉 모델 계통

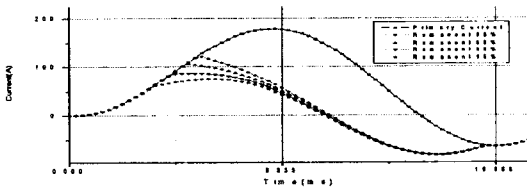
3.1 잔류 자속법 포화 복원 결과

제한된 알고리즘의 성능 검증을 위하여 식(5)와 같은 과도 오차 계산식 [6]을 이용하여 과도 오차를 구하였다.

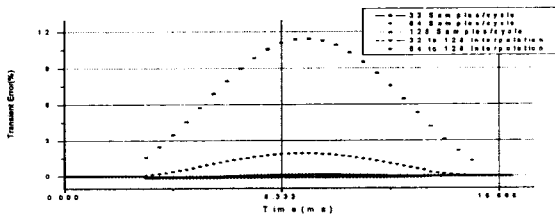
$$\text{Transient Error}(\%) = \frac{K_n \cdot i_2(t) - i_1(t)}{\sqrt{2} \cdot I_{pac}} \times 100(\%) \quad (5)$$

여기서, I_{pac} : 1차측 정격 단락전류, K_n : 변류기의 권선비

그림 4는 잔류 자속의 변화에 따른 변류기 포화를 모의한 결과를 보여주며 그림 5는 잔류 자속 95%일 때 샘플링 주파수별 복원 결과의 과도 오차를 보여주고 있다.



〈그림 4〉 잔류 자속에 따른 CT 포화 모의



〈그림 5〉 잔류 자속 95%일 때 과도 오차 비교

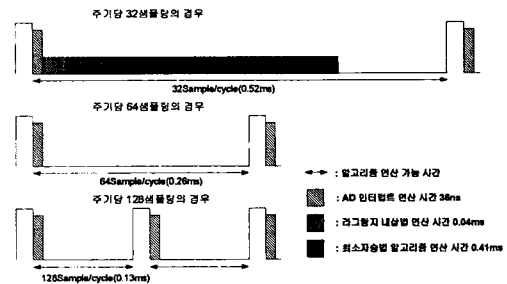
식(4)에서 Y행렬은 모의 파형을 AD변환한 데이터로 이루어지며 알고리즘에 필요한 최소 샘플 데이터의 개수는 직류 음펄트 성분의 미지수 3개와 기본파 성분의 미지수 2개를 구하는데 필요한 5개이다. 주기당 32샘플로 모의할 경우 포화전 3개와 포화 종료후 2개를 사용하여 복원하였고, 64샘플의 경우 포화전 5개와 포화 종료후 2개를 사용하였다. 포화 종료후 1개만 사용할 경우에는 복원 에러가 10%를 넘으므로 적어도 2개 이상의 데이터를 사용해야 한다. 주기당 128샘플 데이터의 경우 포화전 10개, 포화 종료후 4개의 데이터를 사용하였다. 내삽법을 적용할 경우 주기당 128샘플 데이터와 데이터 윈도우 크기가 동일하므로 데이터 사용 개수를 동일하게 모의하였고, 데이터 사용 개수가 같으므로 최소자승법 알고리즘 연산에 걸리는 시간 또한 동일하다. 표 1은 주기당 32, 64, 128 샘플링한 데이터와 내삽을 통해 128샘플로 만든 데이터의 복원 결과를 최대오차와 RMS오차로 보여주고 있다. 결과에서 보듯이 포화가 심할수록 내삽법을 이용하여 복원했을 때의 오

차가 주기당 32, 64 샘플 데이터에 비해 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있고 128샘플 데이터와 비교했을 때 오차가 비슷한 것을 확인할 수 있다.

〈표 1〉 잔류 자속과 계전기 부담에 따른 오차 비교

잔류자속(%)		50%	65%	80%	95%
32 Samples	최대오차(%)	0.75	1.96	3.97	11.42
	RMS오차(%)	0.40	1.15	2.21	7.05
32 to 128 Samples	최대오차(%)	0.20	0.52	0.55	0.76
	RMS오차(%)	0.13	0.37	0.24	0.42
64 Samples	최대오차(%)	0.51	0.77	0.85	1.89
	RMS오차(%)	0.27	0.40	0.44	1.01
64 to 128 Samples	최대오차(%)	0.11	0.13	0.19	0.29
	RMS오차(%)	0.06	0.07	0.09	0.15
128 Samples	최대오차(%)	0.17	0.16	0.16	0.17
	RMS오차(%)	0.12	0.11	0.08	0.09

최소자승법의 경우 알고리즘 연산 시간이 길기 때문에 AD샘플링 주파수를 높이기 어렵다. 그림 6은 TMS320C32 프로세서에서 AD샘플링 주파수에 따른 연산 가능 시간을 보여준다. 주기당 32샘플의 경우 최소자승법 연산을 수행하기에는 무리가 없으나 그 이상의 샘플링 주파수에서는 알고리즘 연산시간이 부족함을 보여준다. 주기당 32샘플의 경우에 내삽법 알고리즘 연산시간이 0.04ms이므로 최소자승법 연산과 함께 사용하여도 연산이 가능하다. 결론적으로, 제한된 알고리즘을 사용할 경우 낮은 AD샘플링 주파수로도 높은 샘플링 주파수의 경우와 같이 정확도 높은 복원이 가능하다.



〈그림 6〉 알고리즘 연산 시간 및 주기당 샘플링 주파수별 연산 가능 시간

4. 결 론

철심 변류기의 경우 포화가 빨리 일어나면 최소자승법 알고리즘 연산에 필요한 충분한 데이터를 취득하지 못하는 단점이 있다. 이러한 경우에 충분한 데이터를 취득하기 위해서 AD샘플링 주파수를 높이는 방법이 있으나 샘플링 주파수를 높일수록 프로세서의 알고리즘 연산 가능 시간은 줄어든다. 또한 최소자승법 알고리즘의 경우 많은 데이터를 사용할수록 데이터 윈도우의 크기가 커지므로 그에 따른 알고리즘 연산시간도 증가하게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 보완하기 위해 주기당 128샘플링 이상의 고주파수로 샘플링하지 않고도 고주파수 샘플링의 경우와 같이 연산에 필요한 데이터를 충분히 취득할 수 있는 내삽법 기반의 최소자승법 알고리즘을 제안하였다. 즉, 내삽을 통해 샘플 데이터를 늘린 후 최소자승법을 이용하여 포화를 복원하였다. 또한 알고리즘의 복원 결과인 과도 오차를 비교하고 연산 시간을 측정하여 알고리즘을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [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, 윤제성, 김동룡, "변류기 보상 알고리즘을 이용한 모선보호용 차동계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, 제49권 제9호, pp. 446-450, 2000년 9월
- [5] 강용철, 윤제성, 강상희, "개선된 변류기 보상 알고리즘을 적용한 모선 보호용 비울전류차동 계전방식", 대한전기학회 논문지, 제52권 제3호, pp. 158-163, 2003년 3월
- [6] IEC 44-6, International Standard Part 6, Current Transformer, 1992