

웨이브렛 변환을 이용한 새로운 변압기 보호계전 방식

*권기백 **서희석 *윤석우 *신명철
 *대덕대학 전기전자계열 ** 두원공대 자동화시스템과 *성균관대 전기전자공학부

The new protective relaying scheme of power transformer using wavelet transforms

*G. B. Kwon ** H.S. Suh *S. M. Yoon *M. C Shin
 *DaeDuk College **Doowon Tech. College *Sung Kyun Kwan Univ.

Abstract - This paper presents the new protective relaying scheme as a method for discriminating of power transformer's transient state associated with magnetizing inrush state and internal fault using wavelet transforms. The simulation of EMTP with respect to different fault and inrush condition in transformer have been conducted, and the result prove that the proposed method is able to discriminate between inrush magnetizing current and internal fault.

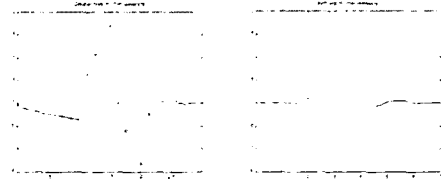
2. 본 론

2.1 웨이브렛 변환

연속적인 신호 $x(t)$ 의 웨이브렛 변환(Wavelet Transform :WT)은 다음 식(1)과 같이 정의된다.

$$WT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

여기서, 신호 $x(t)$ 는 분석함수 $g\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 에 의해 변환된다. 분석함수 $g(t)$ 는 복소지수에 제한되지 않으며, $g(t)$ 에 대한 유일한 제한은 짧고 진동적이어야 한다는 것이다. 그리고 $g(t)$ 는 모 웨이브렛(mother wavelet)이라 하며 웨이브렛을 단순히 팽창(dilates)과 변이(translates)시킨 것이다. 그림 1은 모 웨이브렛의 예를 나타낸 것이다.



(a) 도비시 모웨이브렛 (b) symlet 모웨이브렛
 그림 1. 모 웨이브렛의 예

그림 1의 (a)는 비대칭적이면서 진동적이고 비정현적인 특성을 보여주는 도비시 모 웨이브렛으로 전력계통분야에 많이 이용되고 있으며, 그림(b)는 도비시 모 웨이브렛과 유사하지만 거의 대칭적인 특성을 가지고 있는 symlet 모 웨이브렛을 나타낸 것이다.

이와 같은 웨이브렛 변환을 디지털적으로 표현하면 식(2)와 같은 이산 웨이브렛 변환(Digital Wavelet Transform :DWT)으로 정의된다.

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x[n] \cdot g\left(k - \frac{na_0^m}{a_0}\right) \quad (2)$$

여기서, $g[n]$ 은 모 웨이브렛이며, 스케일과 변이 파라메타 a, b 는 정수 파라메타 m 의 함수이다.(9)

2.2 패턴 생성 웨이브렛 변환을 이용한 새로운 변압기보호계전 알고리즘

웨이브렛 변환을 이용하여 필터뱅크를 구현하기 위해 식(2)를 n 에 대해서 k 의 변수를 치환하면 일반적인 FIR(Finite Impulse Response) 디지털 필터에 대한 방정식과 같은 형태로 식(3)과 같이 표현될 수 있다.

1. 서 론

일반적으로 전력용 변압기를 보호하기 위한 주보호 알고리즘으로는 여자돌입전류에 의한 계전기의 오동작 방지를 고려한 제2고조파 억제 기능을 갖는 비율차동계전 방식이 널리 이용되고 있다.[1,2]

그러나 변압기 제작기술의 발달과 더불어 근래에 제작되는 변압기는 효율이 더욱 개선되어 변압기의 여자돌입시 차전류에 제2고조파 성분의 함유율이 낮아지는 경향이 있는 반면 고압화 및 지중화로 인해 정전용량의 증가로 중저조파 성분이 많이 포함되는 경향이 있다. 따라서 현재 널리 이용되고 있는 제2고조파 억제기능을 갖는 비율차동계전기법으로는 변압기의 고장상태와 여자돌입 및 과여자 상태를 구별하기 어려운 경우가 발생한다.[2]

이와 같은 문제점을 보완하기 위해 근래에는 변압기 보호계전방식으로 변압기 자속의 변화율을 이용하는 방법, 신경회로망이나 퍼지 의사결정에 의한 방법, 전력을 이용하는 방법 등이 제시되기도 하였다.[4,5] 또한 최근에는 푸리에(Fourier) 변환과는 달리 크기 팽창(dilates)과 변이(translates)를 가변하면서 신호를 분석하므로써 과도파형 분석에 적합한 웨이브렛 변환을 이용한 신호처리 방법 등이 제시되었다. 웨이브렛 변환은 변환된 신호를 어떻게 이용하는가에 따라 그 효율성이 고려되는데 일반적으로 변압기 보호계전기법에서는 변환된 정보를 확률적으로 해석하는 방법이 이용되었다.[6,7,8]

본 논문에서는 웨이브렛 변환을 이용한 새로운 변압기 보호 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서 제시한 변압기 보호계전 알고리즘은 변압기 각 상의 전류를 도비시(Daubechies) 웨이브렛 변환을 이용하여 근사정보(Approximation)와 상세정보(Detail)로 분해하였다. 그리고 분해 결과 생성된 차전류와 억제전류의 근사정보를 비율차동요소로 이용하였으며, 차전류의 근사정보와 상세정보를 이용하여 여자돌입상태인 경우 계전기의 오동작을 방지하는데 이용하였고, 내부고장인 경우에는 트립정보로 이용하였다.

그리고 제시한 변압기 보호계전 알고리즘은 EMTP를 이용하여 시뮬레이션한 전력용 변압기의 다양한 고장, 여자돌입상태 등의 데이터를 이용하여 그 신뢰성을 입증하였다.

$$y(n) = \frac{1}{c} \sum_k x[k] \cdot h(n-k) \quad (3)$$

따라서 식(3)는 $g(a_0^{-m}n-k)$ 이 전달함수 $G(w)$ 을 갖는 로패스 필터(Low Pass Filter)의 임펄스 응답을 나타낸다. 그리고 $a_0=2$ 또는 $a_0^{-m}=1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots$ 을 선택함으로써 $g(n)$ 의 팽창은 $G(W)$ 의 밴드폭의 절반이 된다. 그림 2는 로패스 모웨이브렛 $g(n)$ 과 하이패스 $h(n)$ 을 이용하여 DWT를 구현한 다중 단계 필터뱅크(multi-stage filter bank)를 나타낸 것이다

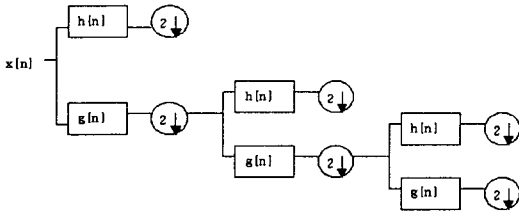


그림 2. 다단계 필터뱅크 DWT 구현

그림 2에서 다운샘플링 (2↓)은 다음 관계를 위해 웨이브렛을 스케일하는 것이다. 그리고 $g(n)$ 과 $h(n)$ 이 직교(orthogonal) 기저를 형성하도록 억제 조건을 준 모웨이브렛이라면 그림 2와 같은 다단계 필터뱅크의 출력은 유일한(unique) 특성을 나타낸다.

그림3은 이와 같은 웨이브렛 변환을 이용하여 구현한 전력용 변압기의 새로운 보호계전 알고리즘의 구성도를 나타낸 것이다.

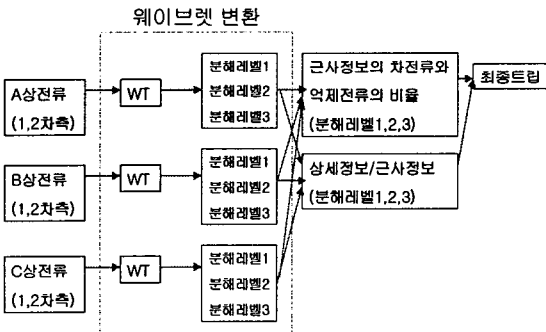


그림3. 제안된 변압기 보호 알고리즘의 전체적인 구성도

2.3 사례적용 및 결과 고찰

그림4는 제시된 기법의 성능평가를 위하여 EMTP를 이용하여 변압기의 여자돌입상태, 내부 고장발생 등을 모의하기 위해 이용한 모델계통을 나타낸 것이다.

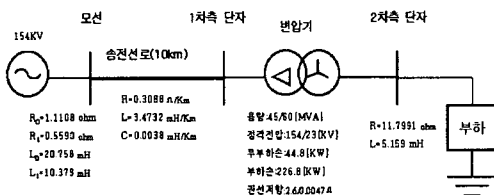
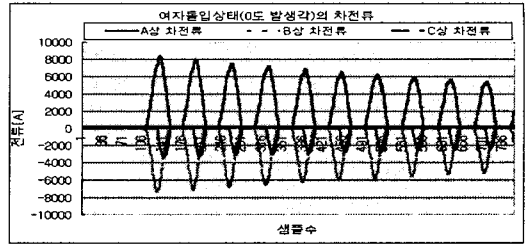


그림 4. 모델전력계통도

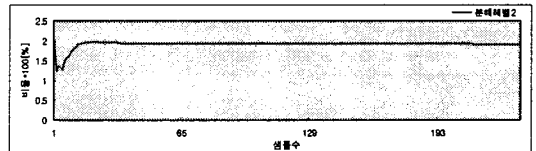
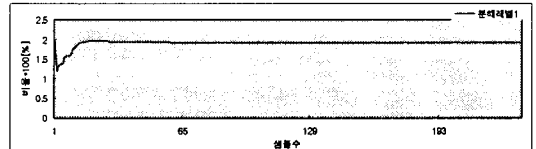
여기서, 전력용 변압기는 3상 2권선 45/60MVA, 154KV/ 22.9KV, Δ-Y 결선이다.

2.3.1 여자돌입 상태인 경우

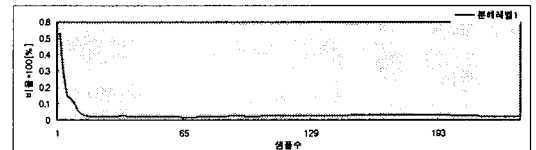
본 연구에서 제시한 변압기 보호계전 알고리즘은 그림3과 같이 각상의 차전류와 억제전류를 구하고, 웨이브렛 변환을 통해 상세 정보와 근사정보를 분석함으로써 변압기의 상태를 판단하게 된다. 다음의 그림5의 (a)는 변압기가 여자돌입상태인 경우의 차전류를 나타낸 것이다.



(a)차전류



(b) 차전류의 근사정보와 억제전류 근사정보의 비율



(c) 차전류의 근사정보와 상세정보의 비율

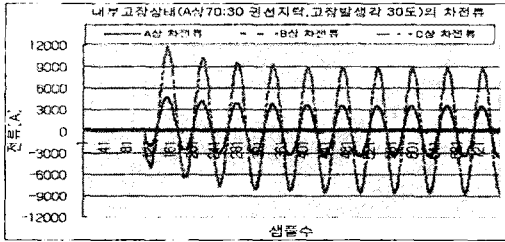
그림 5. 변압기의 여자돌입상태인 경우

그림5의 (b)는 웨이브렛 변환에 따른 차전류의 근사정보와 억제전류의 근사정보의 비율을 나타낸 것이며, (c)는 차전류의 근사정보와 상세정보의 비율을 나타낸 것이다.

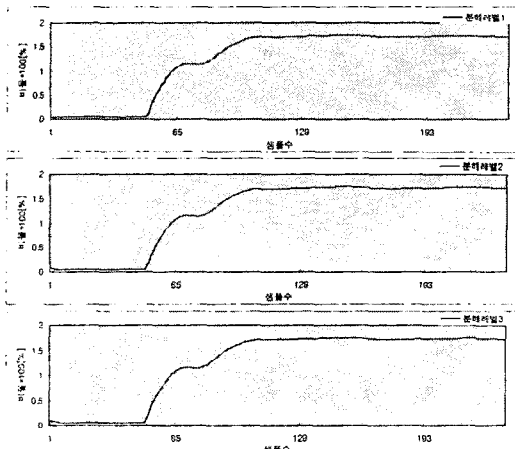
그림에서 알 수 있듯이 여자돌입 상태인 경우 차전류의 근사정보와 억제전류 근사정보의 비율이 100[%] 이상이므로 고장으로 판단되나, 차전류의 근사정보와 상세정보의 비율이 기준 값 이상으로 나타남으로서 최종적으로는 고장이 아닌 것으로 판단하게 된다.

2.3.2 변압기의 권선 지락고장이 발생한 경우

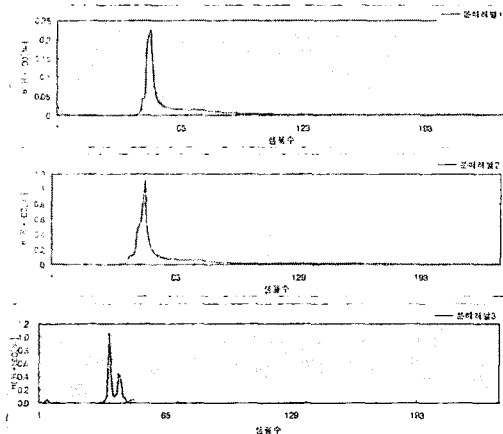
그림 6은 변압기의 권선에서 지락고장이 발생한 경우 변압기의 차전류와 본 논문에서 제시한 알고리즘으로 차전류를 분석한 결과를 나타낸 것이다.



(a) 차전류



(b) 차전류의 근사정보와 억제전류 근사정보의 비율



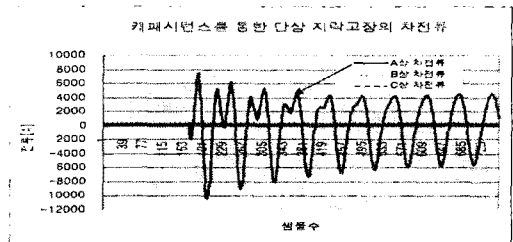
(c) 차전류 근사정보와 상세정보의 비율

그림6. 권선지락 고장이 발생한 경우

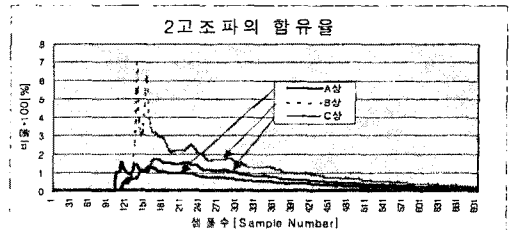
그림6에서 알 수 있듯이 권선 지락고장이 발생한 경우에는 차전류의 근사정보와 억제전류 근사정보의 비율이 100[%] 이상이고, 차전류의 근사정보와 상세정보의 비율이 순간적으로 과도하게 나타나지만 약 1/3 주기 후부터는 적은 값으로 수렴됨으로 고장으로 판별하게 된다.

2.2.3 차전류에 제2고조파 성분이 다량 함유된 고장이 발생한 경우

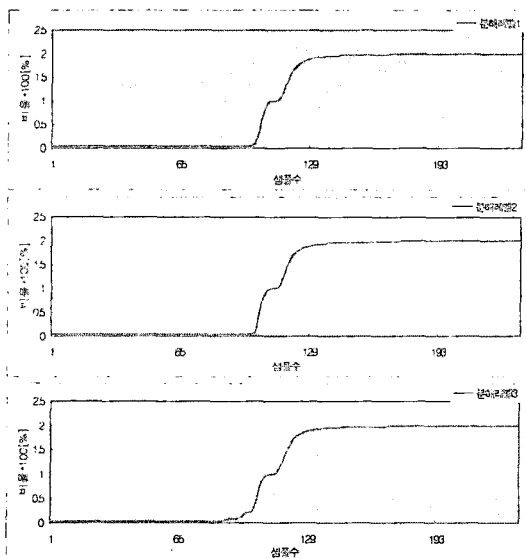
그림7의 (a)는 변압기의 외부단자 A상에서 캐패시터를 통한 고장이 발생하도록 함으로써 고장발생 후 변압기의 차전류에 고조파성분이 많이 포함되도록 모의한 변압기 각 상의 차전류 파형이다.



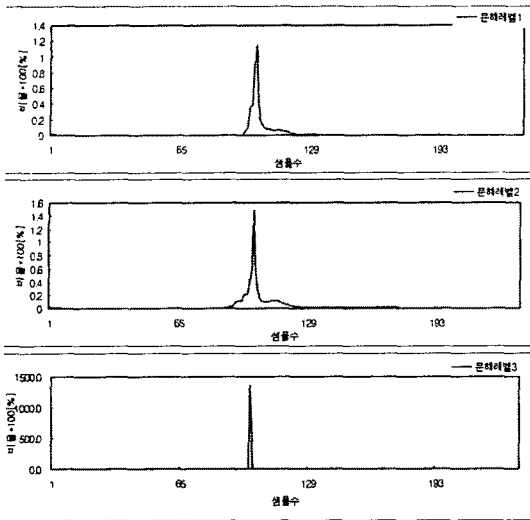
(a) 차전류



(b) 차전류에 포함된 기본파에 대한 제2고조파의 비율



(c) 차전류의 근사정보와 억제전류 근사정보의 비율



(d) 차전류 근사정보와 상세정보의 비율

그림7. 차전류에 제2고조파 성분이 다량 함유된 고장이 발생한 경우

그림7의 (b)는 차전류에 포함된 기본파 및 제2고조파 성분을 추출하여 기본파 성분에 대한 제2고조파 성분의 비율을 나타낸 것으로 고장발생 후 각 상의 차전류에는 제2고조파 성분이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다.

그리고 그림7 (c)와 (d)에서 알 수 있듯이 고조파성분이 많이 포함된 경우에서도 차전류의 근사정보와 억제전류의 근사정보의 비율은 100[%] 이상으로 나타났고 아울러 차전류의 근사정보와 상세정보의 비율이 순간적으로 과도하게 나타나기는 하지만 약 1/3 주기 후부터는 적은 값으로 수렴되어 고장을 판단하게 된다.

한편, 기존의 비율차동 계전기법은 비율차동 특성에 의해 1차적으로 변압기의 고장을 판단하고, 차전류에 포함된 제2고조파 성분의 함유량을 이용하여 최종적으로 고장과 여자돌입상태를 판별하게 된다. 따라서 이와 같이 차전류에 고조파성분이 다량 함유된 경우 기존의 제2고조파 억제특성을 갖는 비율차동계전방식에서는 고장이 발생한 경우라도 여자돌입상태로 판단하여 트립신호를 발생하지 않게 된다. 그러나 본 논문에서 제시한 알고리즘에서는 고조파의 함유량에 관계없이 정확하게 고장상태를 판별하게 됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 일반적으로 신호 분석에 이용되어 온 퓨리에 변환과는 다르게 크기 팽창(dilates)과 변이(translates)를 가변하며 신호를 분석함으로써 다양한 고조파를 함유한 과도신호의 분석에 적합한 웨이브렛 변환을 이용한 새로운 변압기 보호계전 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘은 웨이브렛 변환을 통해 얻어진 근사정보와 상세정보를 이용하는 것으로, 차전류와 억제전류의 근사정보는 비율차동요소로 이용하였으며, 차전류의 근사정보와 상세정보는 여자돌입상태를 판별하는데 이용하였다.

그리고 제시한 보호계전 알고리즘을 EMTP를 이용하여 시뮬레이션한 전력용 변압기의 다양한 고장, 여자돌입상태 등의 데이터를 이용하여 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

즉 본 논문에서 제시한 변압기용 보호계전 알고리즘은 변압기의 고장상태와 여자돌입 상태를 정확하게 판별할 수 있음을 확인하였다. 아울러 변압기의 차전류에 고조

파 성분이 다량 함유된 고장이 발생한 경우 기존의 비율차동 계전방식으로는 고장을 판단할 수 없는 경우가 발생하게 되나, 본 논문에서 제시한 알고리즘은 이와 같은 경우에도 정확하게 고장을 판단할 수 있음을 알 수 있다.

향후 좀더 다양한 변압기의 고장상태를 모의하여 그 신뢰성과 적용 가능성에 대해서 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Arun G.Phadke, James S. Thorp, "Computer relaying for power systems", Research Studies Press LTD, pp.43-47, pp 166-176, 1988.
- [2] Kuniaki Yabe, "Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers", T. IEE Japan, Vol.116-B, No.3, pp.293-298, 1996.
- [3] Patrick Bastard, Pierre Bertrand, Michel Meunier, "A transformer model for winding fault studies", IEEE trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp.690-699, April 1994.
- [4] A.Wiszniowski, B.Kasztenny, "A multi-criteria differential transformer relay based on fuzzy logic", IEEE trans. on Power Delivery, Vol.10, No.4, pp.1786-1792, 1995.
- [5] L.G.Perez, A.J.Flechsigs, J.L.Meador, Z.Obradovic, "Training an artificial neural network to discriminate between magnetizing inrush and internal faults", IEEE trans. on Power Delivery, Vol.9, No.1, pp.434-441, 1994.
- [6] Moises Gomez-Morante, Denise W.Nicolette "A wavelet-based differential transformer protection", IEEE trans. on Power Delivery, Vol.14, No.4, pp.1351-1355, 1999.
- [7] Surya Santoso, "Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier-part 1: theoretical foundation", IEEE trans. on Power Delivery, Vol.15, No.1, pp.222-228, 2000.
- [8] Ingrid Daubechies, "Ten Lectures On Wavelets", Rutgers University and AT&T Bell Lab., pp194-196, 1992.
- [9] ATP Rule Book, LEUVEN EMTP CENTER, July 1987.