

웨이블릿 변환을 이용한 변압기 보호계전 알고리즘 개발

홍동석*, 정채균, 이준범
원광대학교

The Development of Protective Relaying Algorithm for Transformer Based on Wavelet Transform

Dong-Suk Hong, Che-Kyun Jung, Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Abstract - Current differential protective relaying with harmonic restraint module is, in general, used to protect transformer. But it is hard to distinguish inrush and internal winding fault with differential current protective relaying. This paper presents the new protective algorithm for transformers using 3-phase differential current's d1 coefficient values in wavelet transform. Various states of transformer was simulated using EMTP. Internal winding fault and inrush are classified within shorter time using the proposed algorithm.

1. 서 론

변압기 보호계전 방식으로 주로 전류차동 계전방식이 사용되어 왔다. 그런데 이 방식만으로는 중간단락이나 권선지락과 같은 내부사고와 외부사고가 아닌 여자돌입이나 과여자과 같은 외란을 명확하게 구분하기가 어려워 계전기가 오동작하는 경우가 발생하게 된다. 이에 대응하여 여자전류는 차동전류의 2조파 성분을 억제요소로 하는 제 2조파 억제방식으로, 과여자는 5조파 성분을 억제요소로 하는 제 5조파 억제방식이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 변압기 투입시 발생하는 고장에 대해서는 검출이 힘들게 되고, 계통변화에 따른 과도상태 고조파 발생 특성변화로 변압기 내부사고시 차단 지연 또는 계전기의 부동작을 초래할 수 있다. 특히 심한 과여자시 5고조파가 오히려 감소하는 경향이 있고, 또한 변압기 철심 재질의 변화와, 경제적 이유에 의한 변압기 철심의 설계 방식의 변화에 따라 여자 돌입시 2조파가 적게 발생하게 되고 과여자시 5조파 역시 감소한다. 반면에 고압화와 지중화에 따른 커패시턴스가 큰 계통일수록 내부 사고시에도 차동전류에 2조파가 많이 포함되어 고조파 억제방식은 수정이 불가피하게 되었다.[3],[4]

따라서 본 논문에서는 EMTP의 보조프로그램인 BCTRAN과 HYSDAT를 이용하여 변압기 내부사고와 여자돌입과 같은 외란을 모델링 하였으며, 이를 통해 얻어진 총 63여가지의 EMTP 모의 데이터를 이산웨이블릿(DWT)변환을 통해 Scale1에서 High Frequency 성분을 추출하여 그 특징을 비교함으로써 새로운 형식의 변압기 보호계전 알고리즘을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 웨이블릿 변환

신호를 다양한 주파수의 정현파로 분해하여 시간영역의 관점에서 주파수 영역으로 변환시키는 방법으로 신호분석에 일반적으로 가장 많이 이용되는 푸리에 분석은 주파수 영역으로 변환할 때 시간 영역에 대한 정보는 소실된다는 단점을 가지고 있다. 이런 푸리에변환의 결점을 보완하기 위해 Dennis Gabor에 의해 1946년에 제안된 STFT는 신호를 시간과 주파수 영역으로 분석함으로써 푸리에변환의 단점을 개선하였으나 일정한 크기의 윈도우를 사용하기 때문에 제한된 범위에서의 신호분석만 가능하다. 즉, 시간영역에서 윈도우 크기가 설정되면 모든 주파수 영역에서 윈도우 크기가 고정된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 STFT를 이용한 방법도 비주기적이고 비정적인 전력계통의 과도특성을 분석하는데는 적절하지 못하다.[3]

그러나 웨이블릿 변환은 스케일이 주파수에 따라 변화한다. 즉, 시간-스케일 영역을 사용함으로써 가변윈도우의 특성을 나

타내므로 Low Scale에서는 High Frequency 성분을 나타내고, High Scale에서는 Low Frequency 성분을 나타내게 된다. 이처럼 웨이블릿 변환은 웨이블릿 모함수를 정의하고 이 모함수를 시간에 따른 크기 변형(Scaling)과 시간에 따른 이동(Translation)을 통해 분석영역이 가변되는 윈도우를 사용함으로써 푸리에 변환과 STFT변환의 단점을 해결하였다.[6]

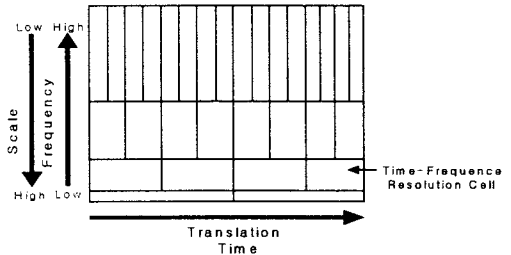


그림 1. 웨이블릿 변환의 Time-Scale의 관계

그림 1은 웨이블릿 변환의 시간-스케일의 관계와 스케일과 주파수의 관계를 도표로 나타내었다.

$$C(a, b, t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

$$D(m, n, t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \cdot \psi\left(\frac{t-na_0^m}{a_0^m}\right) \quad (2)$$

연속웨이블릿 변환(CWT)은 식 (1)의 웨이블릿함수(ψ)의 Scale(a)과 Translation(b)에 의해 곱해진 Signal의 모든시간에 걸친 합으로 정의된다. 하지만 연속웨이블릿 변환은 모든 스케일에서 웨이블릿 분석을 수행하게 되어 무한히 많은 데이터가 산출되므로 분석시간이 길어진다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 식 (2)의 이산시간 웨이블릿함수(ψ)를 이용하여 Scale(a₀^m)과 Translation(na₀^m)요소를 이산화시켜 효율적으로 웨이블릿 분석을 수행할 수 있는 이산웨이블릿 변환(DWT)을 사용하였다. 이산 웨이블릿함수와 Signal S(t)에 대한 이산웨이블릿 변환식은 식 (3)과 같다.

$$DWT(s, m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n S(t) \cdot \psi\left(\frac{t-na_0^m}{a_0^m}\right) \quad (3)$$

3. 변압기 보호 알고리즘

본 논문에서 사용된 변압기 외란 판단 기준은 변압기 3상 차전류의 웨이블릿 분석 결과인 d1계수값을 입력으로 사용하였다. 이는 그림 2에 나와 있는 알고리즘 블록도에서 볼 수 있듯이 우선 반주기(1/2주기) 데이터 윈도우(32샘플)의 웨이블릿 분석 결과인 d1계수의 절대값을 합한 뒤 이 값들의 평균값을 구한다. 여기서 d1계수의 절대값의 합을 S라하고 각각 상별로 S_a, S_b, S_c라 하였으며, 이 값들의 평균값을 M1이라 하였다. 이 과정을 거쳐 얻어진 값들을 아래의 식 (3),(4),(5)와 같이 각각상의 평균값에 대한 상승률 P(a,b,c)를 적용하여 나온 값들의 평균값 M2에서 처음 반주 기값을 외란 판단 기준으로 정하였다.

$$\frac{S_a - M1}{S_a} = P_a \quad (3)$$

$$\frac{S_b - M1}{S_b} = P_b \quad (4)$$

$$\frac{S_c - M1}{S_c} = P_c \quad (5), \quad \frac{[P_a, P_b, P_c]}{3} = M2 \quad (6)$$

본 논문에서는 이 외란 판단 기준값의 임계치를 100%로 정하여 평균값 M2의 처음 반주기값이 임계치를 넘으면 내부사고로 판정하고, 이 임계치를 넘지 않으면 여자돌입으로 판정하도록 하였다.

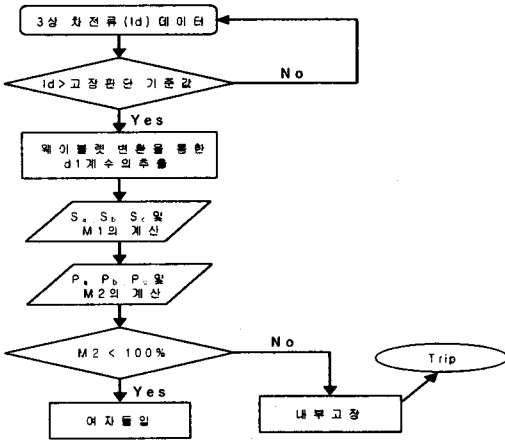


그림 2. 알고리즘의 전체 흐름도

4. 모델계통 및 EMTP를 이용한 변압기 모의

4.1 모델계통

제시한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 그림 3과 같은 모델계통을 선택하였다. 대상 변압기는 154[kV]/22.9[kV], Y-Y결선, 용량이 40[MVA]이고, 부하용량 또한 40[MVA]이다.

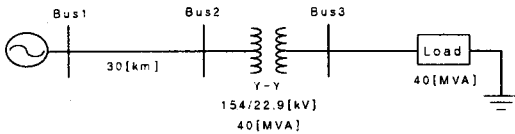


그림 3. 모델 계통도

4.2 EMTP를 이용한 변압기 모의

변압기 사고는 EMTP를 이용하여 모델링 되었으며, 모의 시간은 총 10주기이고, 주기당 64샘플링을 하였고, 전압은 변압기 1차측 단자 전압 데이터를 이용하였고, 전류는 변압기 1,2차측 정보를 이용하였다. [1], [4]

4.2.1 내부사고

변압기 내부사고 모델링은 변압기 선형 모델링 기법인 BCTRAN 보조프로그램을 이용하였다. 모의한 내부사고로는 증간단락(5%~80%) 24가지, 권선지락(5%~90%) 20가지를 다루었고, 전압투입 위상각은 0도, 90도로 하였다.

그림 4와 5는 변압기의 1차측 A상권선의 05:05:90로 분리된 지점에서 증간단락(Turn-to-Turn)이 발생된 경우와 30% 권선지락(Turn-to-Ground)시의 3상의 차전류이다. 두 경우 모두 고장 발생시점은 위에서 언급한 바와 같이 약 0.03333초이고, 전압투입 위상각은 0도이다.

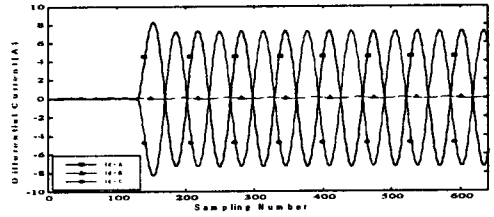


그림 4. A상 증간단락 5% 사고(전압 위상각 0도)

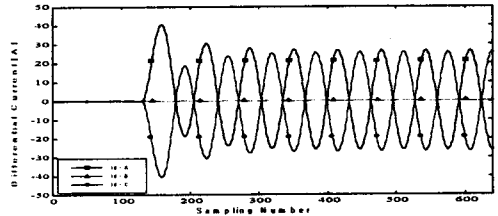


그림 5. A상 권선지락 30% 사고(전압 위상각 0도)

4.2.1 여자돌입

여자돌입과 과여자과 같이 변압기 포화모델이 필요한 외란을 모의하기 위해서는 변압기 자화곡선이 필요하다. 따라서 여자돌입은 EMTP내에 자화곡선 모델링이 가능한 Type-96소자를 이용하여 모델링 하였으며, 여자돌입은 모의 시 전압 위상각에 크게 의존하는 사실에 입각하여 전압투입 위상각을 0도에서 90도로 변화시켜가며 총 19가지를 다루었다.

그림 3은 전압 전압투입 위상각을 90도로 하였을 때의 3상 여자돌입 전류 신호의 차전류이다.

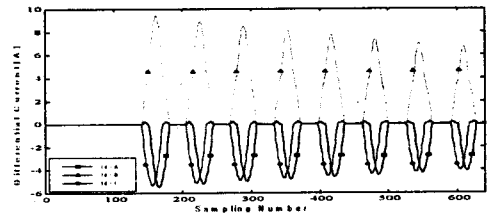


그림 6. 여자돌입(전압 위상각 90도)

5. 사례연구

웨이블릿 변환에서는 모함수의 선택이 중요하다. 일반적으로 전력 계통 고장해석에 사용되는 모함수는 db4, db5, sym5, coif4등이 있는데, 본 논문에서는 각각의 모함수들을 비교해 본 결과 원신호 추출능력과 특징 추출능력이 가장 우수한 db4를 사용하여 웨이블릿 변환을 수행하였다.

5.1 내부고장

아래 그림 7은 A상 5% 증간단락시(0도) 3상 차전류의 d1 웨이블릿 변환결과이다.

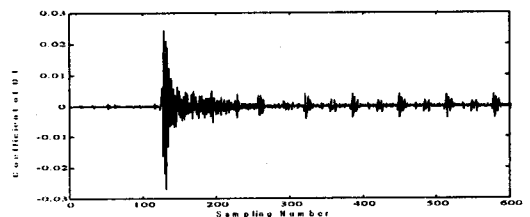


그림 7. 5% 증간단락시(0도) 3상 차전류중 A상의 d1 그림에서 볼수 있듯이 고장순간에 아주 큰값의 d1계수가 발

생하고 시간이 지날수록 감소하는 형태를 보인다. 그림 8은 각상의 d1계수들을 알고리즘에 적용한 결과 값이다. A.C상과 B상의 상송률(P)이 현격한 차이를 가져 그 평균값인 M2가 알고리즘의 외란 판단 기준값인 100%를 넘음으로써 계전기가 트립 하였다.

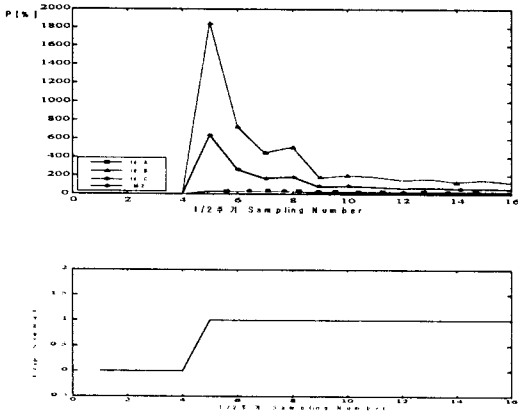


그림 8. 30% 권선지락시(0도) 1/2주기 데이터 윈도우

그림 9와 10은 A상 30% 권선지락시(0도) 차전류의 A상 웨이블릿 분석결과와 각상의 d1 계수들을 알고리즘에 적용한 결과이다. 이 그림 또한 위의 층간단락시와 비슷한 파형을 나타내며 알고리즘 적용결과 이것 또한 외란 판단 기준값인 100%를 넘음으로써 계전기가 트립하였다.

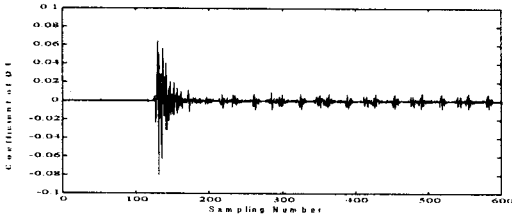


그림 9. 30% 권선지락시(0도) 3상 차전류중 A상의 d1

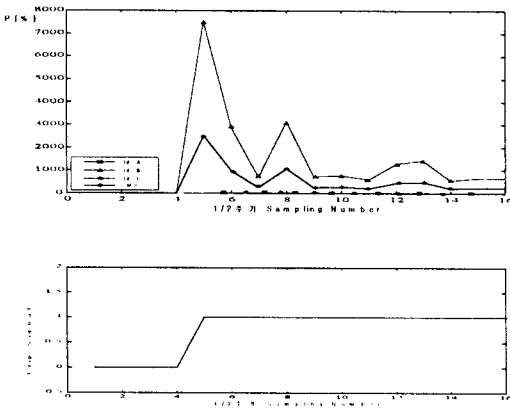


그림 10. 30% 권선지락시(0도) 1/2주기 데이터 윈도우

그림 11은 여자돌입시(90도) A상의 웨이블릿 결과이다. 이 파형은 내부사고인 층간단락, 권선지락의 파형과는 달리 고장 후에 시간이 지날수록 감소하지 않고 주기적으로 비슷한 파형들이 나타난다. 그림 12는 여자돌입 파형의 알고리즘 적용결과에 내부사고와는 달리 A,B,C상의 상송률(P)의 차이가 별로 없어 평균값 M2의 고장후 처음 반주기 값이 약 15%가 되어 외란 판단 기준값인 100%를 넘지 않아 계전기가 트립하지 않았다.

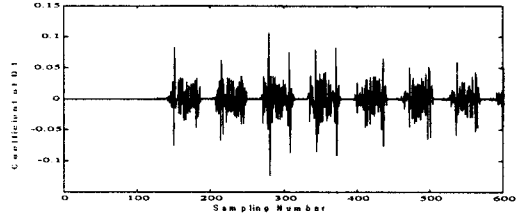


그림 11. 여자돌입시(90도) 3상 차전류중 A상의 d1

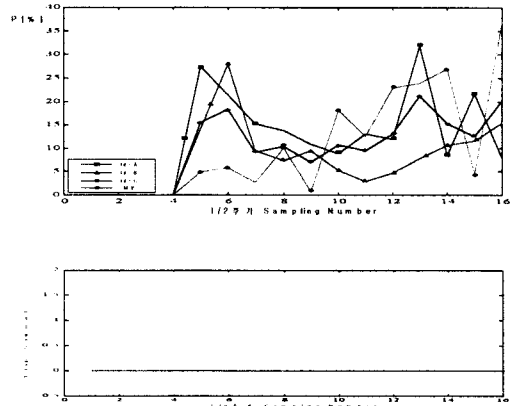


그림 12. 여자돌입시(0도) 1/2주기 데이터 윈도우

따라서 위의 적용사례에서 보인 결과와 같이 본 알고리즘은 여러 가지 경우에 대해서 내부사고와 여자돌입을 판별하였으며, 판단시간 또한 1/2주기안에 판별함으로써 아주 양호한 특성을 나타냄을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 변압기 3상 차전류의 웨이블릿 변환을 이용하여 변압기의 내부사고와 여자돌입을 판별하는 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 본 논문의 알고리즘은 변압기 3상 차전류의 웨이블릿 분석을 통하여 얻어진 d1계수값의 1/2주기 합 평균값을 구한 후 각상의 평균값에 대한 상송률의 평균값을 적용하였다.

총 63가지의 EMTP 모의를 통하여 변압기의 내부사고와 여자돌입을 모의 하였으며, 이들 데이터에 본 논문의 알고리즘을 적용한 결과 모든 경우에 대하여 사고후 1/2주기 이내에 내부고장과 여자돌입을 판별함으로써 아주 양호한 특성을 나타내었다. 앞으로 좀더 많은 경우의 데이터와 계통을 고려한 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] P. Bastard, P. Betrand, M. Meunier, "A Transformer Model for Winding Fault Studies", IEEE Trans. on PWRD, Vol.9 No. 2, April 1994, pp. 690-699
- [2] W.A.Wilkinson, M.D. Cox, "Discrete Wavelet Analysis of Power System Transients", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.11, No.4, Nov. 1996, pp. 2308-2044
- [3] Martin, "Wavelet and Filter Banks: Theory and Design", IEEE Transaction on Signal Processing, Vol.40, No. 9, 1992, pp. 2207-2232
- [4] 김상태, 이승재, 강상희 외, "전압, 전류 변화 추이를 이용한 전력용 변압기 보호계전 알고리즘", 전기학회 논문지, 50권 4호, pp. 157-165, 2000년 4월
- [5] 박철원, 권명현, 이종주, 신명철, "Discrete Wavelet Transform를 이용한 변압기의 내부고장과 여자돌입 판별", 전력계통 보호제어 연구회 기술세미나 논문집, Vol.4, No.1, pp. 238-249 2000년 11월
- [6] Wavelet Toolbox For Use with MATLAB