

Wavelet 변환을 이용한 여자돌입현상 해석

손진만*, 강용철*, 남순열*, 김성수*, 박종근*, 강상희**

*서울대학교 전기 공학부, **영지 대학교 전기 공학과

Analysis of Transformer Inrush Current Using Wavelet Transform

J.M.Sohn*, Y.C.Kang*, S.R.Nam*, S.S.Kim*, J.K.Park*, S.H.Kang**

*Seoul National University, **Myongji University

Abstract - This paper describes the analysis of characteristics of inrush current in transformers using wavelet transform. The simulations are performed with various transformer conditions, including transformer switching-on angles and the remanent flux. The ratio between wavelet coefficients is used for analysis.

1. 서 론

변압기 여자돌입전류(Inrush Current)⁽¹⁾는 변압기 투입시 갑작스런 전류의 증가를 말하며, 이는 철심의 히스테리시스의 비선형성과 밀접한 관련이 있다. 여자돌입전류는 실제 사고가 발생된 것이 아니라서 계전기가 동작하지 않아야 하므로 변압기 보호 계전기는 여자돌입전류(Inrush Current)와 내 사고전류를 구분해야한다. 이러한 여자돌입전류는 변압기투입시의 위상각과 변압기 철심내의 잔류자속에 따라 그 크기가 달라진다.

기존에는 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 검출된 2조파 성분의 크기로 여자돌입과 내부사고를 구분하였다. 한편, Wavelet 변환은 moth wavelet을 scaling과 time-shift시켜서 wavelet 구한 후, 여기서 구한 wavelets와 원 신호와의 유사성을 나타내는 계수들을 계산하게 되는데, 여기서 사용한 scaling과 time-shift때문에 시간정보 얻을 수 있다는 점과 일정한 선택도(constant-Q)를 가진다는 특징을 가진다.

본 논문은 wavelet변환을 이용하여 여자돌입전류의 특성을 분석하였다. EMTP를 이용해서 변압기의 투입위상각, 철심내 잔류자속을 변화시켜 가면서 여자돌입 현상을 모의하였고, 여기에서 생성된 데이터를 wavelet 변환하여 여자돌입전류의 특성을 분석하였다.

2. Wavelet 변환⁽²⁾

Wavelet 변환은 신호와 wavelet과의 유사성을 나타내는 계수를 구하는데, wavelet은 mother wavelet $\psi(t)$ 를 scaling과 translation시킨 시간 함수이다. Wavelet 변환에는 연속 신호에 대해서 연속 wavelet 변환, 이산 요소 wavelet 변환이 있고 이산 신호에 대해서 이산 시간 wavelet 변환, 이산 wavelet 변환의 네 종류가 있다. 본 논문에서는 이 중에서 (1)로 주어지는 이산 시간 wavelet 변환을 이용하였으며, 이를 다중 해상도 분해를 이용하여 구현하였다.

$$DTWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k s(k) \psi\left(\frac{k}{2^m} - n\right) \quad (식1)$$

여기서 $s(k)$ 는 신호, m 은 scale, n 은 translation, $\psi\left(\frac{k}{2^m} - n\right)$ 은 wavelet을 나타낸다.

3. 모델 계통

여자돌입현상을 모의하기 위한 모델계통이 그림 1에 나타나있다. 송전계통에 있는 154kV/22.9kV 변압기를 EMTP를 사용하여 모의하였다. 변압기의 고압측에는 50km의 송전선에 의해 발전기 1기가 연결되어 있고, 저압측에는 순저항부하가 연결되어 있다. 변압기의 1,2차측에 변류기를 연결하여, 변류기의 2차전류를 생성하였다. 변압기의 히스테리시스 특성은 EMTP의 type 96소자를 변압기 1차측에 연결하여 모의하였다. 변압기의 투입위상각은 변압기 고압측의 스위치를 개폐하는 시간을 조정함으로써 모의하였고, type 96소자의 잔류자속의 값을 변화시켜가며 모의하였다.

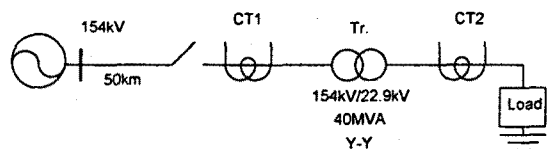
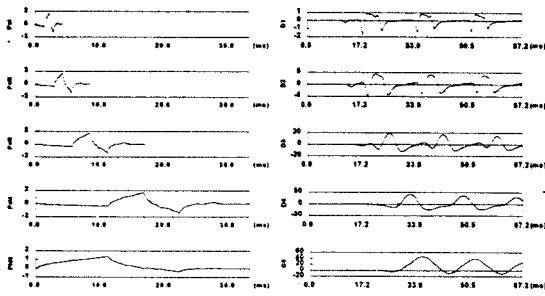


그림 1. 모델계통

4. 사례 연구



(가) wavelet과 scaling함수 (나) 적용 결과
그림 2. Daubechies 4의 적용

본 논문에서는 4차의 Daubechies 4를 moth wavelet으로 이용하여 신호를 Level 4까지 분해하였는데 이에 해당하는 wavelet과 scaling 함수는 그림 2.(가)와 같다. 그림 2.(나)의 D1은 그림 2.(가) wavelet 중에서 Ps1과 전류 신호와의 유사성을 나타내는 계수로서, 중심 주파수 480 Hz인 영역의 성분과의 유사성을 나타내게 된다. D2는 scaling 효과의 down-sampling 때문에 중심 주파수가 D1의 반인 240 Hz 영역의 성분과의 유사성을 나타내는 계수가 되는데, 이는 Ps1을 두배로 scaling한 Ps와 전류 신호와의 유사성을 나타낸다. D3도 동일한 해석이 가능하며, C4의 경우에는 전류 신호의 저주파 영역 성분과 scaling 함수인 Phi4와의 유사성을 나타내는 계수가 된다. Level을 4로 정한 이유는 크게 두 가지가 있는데 첫째로, 60 Hz 기본파 성분이 D4와 C4에 나타나기 때문에 더 이상 분해하는 것은 의미가 없으며 둘째로, k 번째 Level의 계수를 구하는데 필요한 샘플 수는 4×2^k 이므로 Level이 깊어질수록 사고의 영향이 낮게 나타나기 때문이다.

Wavelet 변환으로 구한 계수를 이용하여 사고 전과 사고 후의 변화를 비교하기 위한 용어를 아래와 같이 정의하였다.

- 전류 및 계수의 한 주기동안의 실효값

$$rms_n^k = \sqrt{\frac{1}{32} \sum_{i=0}^{31} (a_{n-i}^k)^2} \quad (2)$$

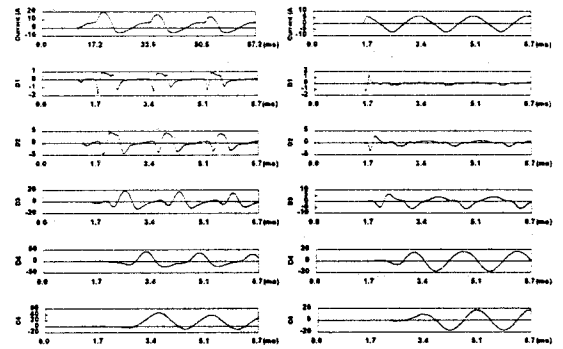
k : Level, n : 샘플 번호

사례연구에서는 변압기 투입시의 변압기 철심내의 잔류자속을 일정하게 하고 전원위상각을 달린 경우와 변압기 투입시의 위상각을 일정하게 하고 철심의 잔류자속을 변화시켜가는 두가지 경우에 대하여 변압기 1차측의 변류기에서 측정되는 전류를 이산시간 Wavelet 변환을 이용하여 특성을 분석하였다.

4.1 철심내의 잔류자속이 일정한 경우

가) 잔류자속이 없는 경우

그림 3에 철심내의 잔류자속이 없는 경우, 변압기 투입위상각이 0도와 90도인 경우에 변압기 1차측 변류기 a상 전류에 대한 Wavelet 변환계수가 나타나있다. 투입위상각이 0도인 경우에는 투입위상각이 90도인 경우에 비하여 4배가량의 전류가 흐르게된다. 계수 D1, D2의 경우 상대적으로 다른 계수들에 비해 작은 값을 보이고 있다. 계수 D3는 약 4배정도의 증가를 나타내고 있으며, 중심주파수 120Hz인 계수 D4의 경우 한주기동안 4배정도의 증가를 보이고 있다.



(가) 위상각 0도 (나) 위상각 90도

그림 3. 위상각 0도, 90도인 경우 Wavelet 계수

그림 4와 그림 5는 투입위상각을 0도에서 90도까지 10도씩 증가시켜가며 계수 D3와 D4에 대해 (2)를 이용해 계산한 값을 도시한 것이다. 잔류자속이 없는 경우, 위상각이 증가함에 따라 계수 D3와 D4는 작아진다. 위상각이 작은 경우 철심의 포화로 인하여 전류가 증가하기 때문으로 해석된다.

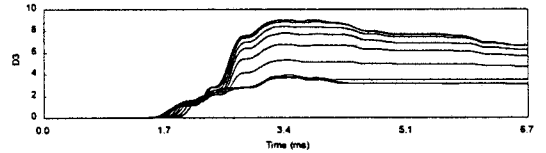


그림 4. 위상각에 대한 D3 계수

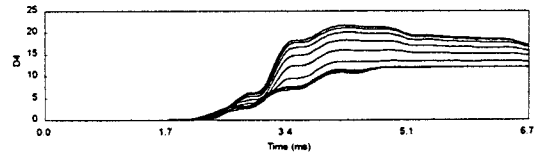


그림 5. 위상각에 대한 D4 계수

그림 6은 투입위상각에 대한 D3와 D4의 실효값의 비를 나타낸 것인데, 투입위상각에 무관하게 변압기 투입후 약 8의 값을 유지하다가 약 반주기 후

에 0.3정도의 값으로 감소함을 알 수 있다.

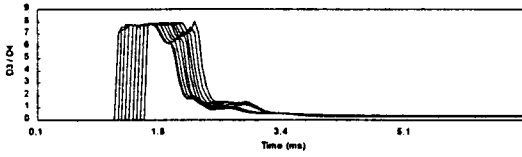


그림 6. 위상각에 대한 D3와 D4의 비(0Vs)

나) 잔류자속이 200Vs인 경우

그림 7과 그림 8은 투입위상각이 0도, 10도, 30도, 60도, 80도, 90도인 경우에 대한 계수 D3와 D4 한주기동안의 실효값이다.

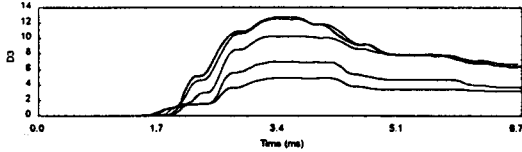


그림 7. 위상각에 대한 D3 계수(200Vs)

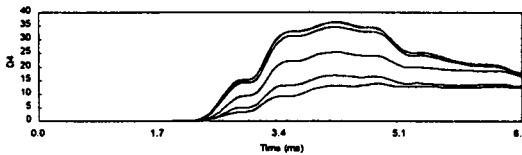


그림 8. 위상각에 대한 D4 계수(200Vs)

잔류자속이 200Vs인 경우 투입위상각 0도인 경우에서 계수 D3와 D4가 가장 큰 값을 가지고, 투입위상각 90도인 경우 가장 작은 값을 가진다. 이는 자속-전류 관계에서 잔류자속의 영향으로 발생한 전류의 급격한 증가로 인한 것으로 해석할 수 있다.

그림 9는 잔류자속이 200Vs인 경우 위에서 구한 D3와 D4의 평균값의 비를 나타낸 것이다. 투입위상각이 0도, 10도, 30도인 경우 변압기투입직후 1주기내에서 갑작스럽게 증가하는 현상을 보여주는 데, 이는 투입위상각에 무관하게 변압기 투입시 약 8로 증가한 후, 약 반주기 후에 0.3정도의 값으로 감소된다.

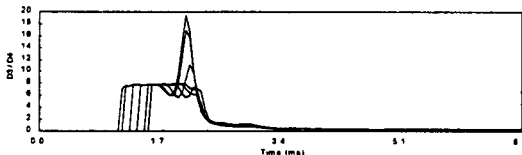


그림 9. 위상각에 대한 D3와 D4의 비(200Vs)

다) 잔류자속이 -200Vs인 경우

그림 10과 그림 11은 투입위상각이 0도에서 90도 사이에 10도씩 증가시켜가며 구한 계수 D3와 D4의 한주기동안의 실효값이다. 잔류자속이 없는 경우와

마찬가지로 잔류자속이 -200Vs인 경우에는 위상각의 변화에 무관하게 일정한 값을 유지한다.

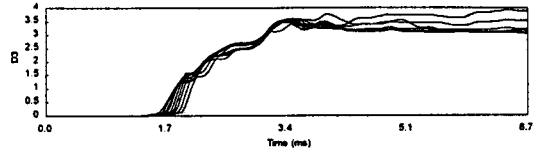


그림 10. 위상각에 대한 D3 계수(-200Vs)

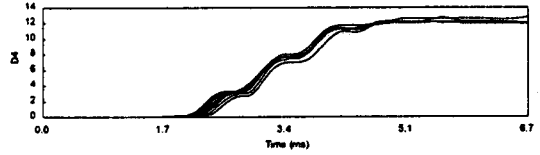


그림 11. 위상각에 대한 D4 계수(-200Vs)

그림 12는 잔류자속이 -200Vs인 경우 위에서 구한 D3와 D4의 평균값의 비를 나타낸 것이다. 잔류자속이 200Vs인 경우와는 달리 철심의 포화의 정도가 적어서인 것으로 보인다. 투입위상각에 무관하게 변압기 투입직후 반주기동안 약 8로 증가한 후, 0.3정도의 값으로 감소된다.

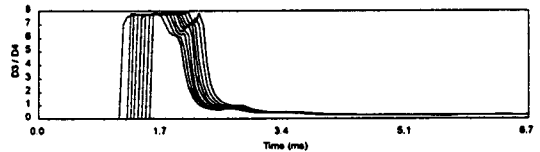


그림 12. 위상각에 대한 D3와 D4의 비(-200Vs)

4.2 변압기 투입위상각이 일정한 경우

가) 투입위상각이 0도인 경우

그림 13과 그림 14는 투입위상각이 0도인 경우 잔류자속의 변화가 계수 D3와 D4에 미치는 영향을 알아보기 위하여 변압기철심의 잔류자속이 -410Vs, -300Vs, -200Vs, -100Vs, -50Vs, 0Vs, 50Vs, 100Vs, 200Vs, 300Vs, 410Vs에 대해 각각의 들을 한주기동안 실효값을 취해서 도시한 것이다. 여기에서 잔류자속이 증가함에 따라 D3와 D4 계수가 점차로 커지는 모양을 볼 수 있으며, 잔류자속의 영향으로 점차 커지는 것으로 해석할 수 있다.

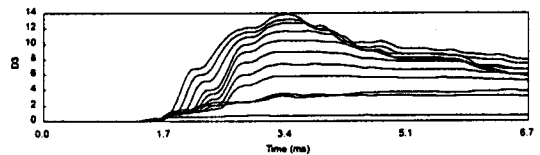


그림 13. 잔류자속에 대한 D3 계수 (0도)

5. 결론

본 논문은 Wavelet 변환을 이용하여 송전계통의 154kV/22.9kV 변압기에서 투입위상각과 변압기심의 잔류자속을 변화시켜가며 여자돌입현상의 특성을 분석하였다. D3와 D4의 패턴은 잔류자속을 고정시킨 경우, 위상각을 변화시키거나 위상각을 고정시키고 잔류자속을 변화시킴에 따라 일정한 경향을 보인다. D3와 D4의 비를 살펴보면 변압기 투입직후 일정한 값(약 8이상)으로 증가한 후 반주기 이후에는 작은 값(약 0.4이하)으로 감소하게 된다.

이러한 특성은 변압기내부사고에 대해 Wavelet 변환을 이용하여 분석한 특성과 비교분석하여 여자돌입과 내부사고를 구분할 수 있는 변압기보호계전 알고리즘을 개발하는데 기초적인 자료로 이용될 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, C. Yeh, "Investigation of Magnetizing In Current in Transformers," *IEEE Trans Power Delivery*, Vol.8, No.1, Jan, 1993
- [2] Y. T. Chan, "Wavelet Basics," Klu Academic Publishers, Massachusetts, 19

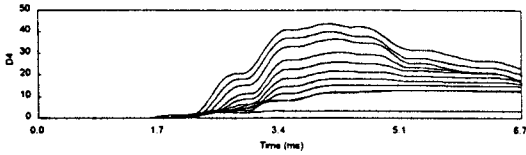


그림 14. 잔류자속에 대한 D4 계수 (0도)

그림 15는 투입위상각 0도인 경우 위에서 구한 D3와 D4의 실효값의 비를 나타낸 것이다. 모든 경우에 있어 1주기 내에 1이하의 값으로 줄어들게 된다. 20ms 근방에서 높은 값을 보이는 것은 잔류자속이 200Vs와 300Vs인 경우로써 이는 철심내 자속의 포화로 인한 것으로 보인다.

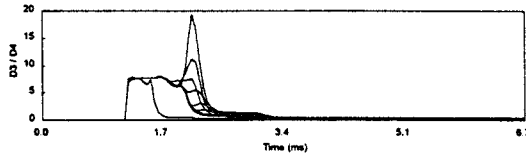


그림 15. 잔류자속에 대한 D3와 D4의 비 (0도)

나) 투입위상각이 90도인 경우

그림 16과 그림 17은 투입위상각이 90도인 경우로써 투입위상각이 0도인 경우에 비하여 잔류자속별 곡선이 확실히 구분되지는 않지만 역시 잔류자속이 410Vs인 경우가 가장 큰 값을 나타내고 있다

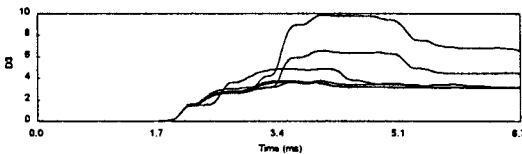


그림 16. 잔류자속에 대한 D3 계수 (90도)

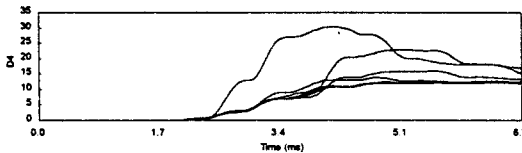


그림 17. 잔류자속에 대한 D4 계수 (90도)

그림 18은 투입위상각 90도인 경우 위에서 구한 D3와 D4의 평균값의 비를 나타낸 것이다. 잔류자속의 변화에 관계없이 항상 일정한 비를 유지하고 있으며, 1주기내에 1이하의 값으로 줄어들게 된다.

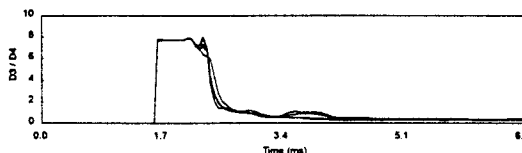


그림 18. 잔류자속에 대한 D3와 D4의 비(90de