

웨이브릿 변환과 카오스 특성을 이용한 고저항 지락사고 검출에 관한 연구

홍대승*, 임화영
 광운대학교 제어계측공학과

A Study on High Impedance Fault Detection using Wavelet Transform and Chaos Properties

Dae-Seung, Hong* Hwa-Yeong Yim
 Dept. of Control and Instrumentation Eng. Kwangwoon University

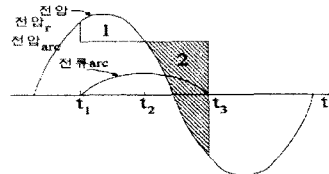
Abstract - The analysis of distribution line faults is essential to the proper protection of power system. A high impedance fault(HIF) dose not make enough current to cause conventional protective device operating. so it is well known that undesirable operating conditions and certain types of faults on electric distribution feeders cannot be detected by using conventional protection system. In this paper, we prove that the nature of the high impedance faults is indeed a deterministic chaos, not a random motion. Algorithms for estimating Lyapunov spectrum and the largest Lyapunov exponent are applied to various fault currents detections in order to evaluate the orbital instability peculiar to deterministic chaos dynamically, and fractal dimensions of fault currents which represent geometrical self-similarity are calculated. Wavelet transform analysis is applied the time-scale information to fault signal. Time-scale representation of high impedance faults can detect easily and localize correctly the fault waveform.

연(Time delay)과 매립차원(Embedding Dimension)을 결정하여 위상공간 해석을 시도하였다. 고저항 고장과 유사한 형태를 가진 일반 캐패시터 스위칭등의 일반 부하와의 차이를 이용하여 고저항 고장의 특성을 확인하여 검출의 정확도를 높일 수 있는 가능성을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 아크 전류의 특성

기존의 주파수 분포 특성을 이용한 고저항 고장사고 검출 기법은 한주기 전체에 대한 주파수 분포 특성을 고려하여 비슷한 고조파 분포가 나타나는 캐패시터 스위칭등의 일반 부하와 구별이 불가능한 문제점이 있었다. 그러나 그림 1과같이 고저항 고장 사고시 아크성 전류는 매 주기마다 전압이 높을 때 발생하기 시작하여 서서히 소멸하는 특성을 보이므로 전압의 변화율에 비례하는 캐패시터 스위칭 전류는 파고치 전압일 때가 오히려 적어지는 현상을 보이는 것으로 구별된 특성을 가지고 있다.



(그림 1). 지속 아크의 파형

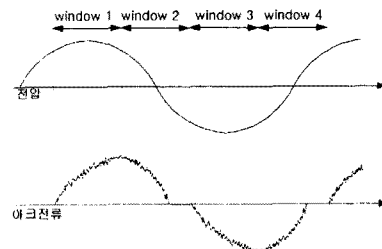
1. 서 론

전력계통에서 고저항 고장(High Impedance Fault : HIF)은 고장 전류가 작은 아크성 특징 때문에 고장 전류의 크기에 의존하는 기존의 계전 방식으로는 검출이 불가능하다. 특히, 3상 4선식 다중접지 방식인 우리 나라 배전 선로에서의 고저항 지락사고는 고장 전류와 부하 전류와의 구별이 어려운 문제점이 있으며, 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

고저항 고장전류는 일반적으로 아크를 수반하므로 화재의 우려 및 인체 감전이나 에너지 낭비 또한 정전등의 사고를 발생할 수 있다. 고저항 고장을 검출하기 위한 기존의 연구에는 고조파 신호의 증가를 검출해 내는 방법, 3조파, 5조파, 7조파 성분의 증가를 검출해 내는 방법, 고저항 고장 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)을 통해 얻어진 고조파를 이용하여 고저항 사고를 검출하는 연구등이 있으나, 현재까지 완벽한 해결책은 없는 실정이다. 특히 FFT를 이용한 고저항 지락사고 검출시에도 검출된 고조파가 고저항 사고에 의해 발생한 고조파인지, 비선형 부하에 의해 발생한 고조파인지 판단하기 어려운 문제점이 있다. 또한 혼돈 특성 추출에 관한 연구가 진행중이다.

본 논문에서는 전압파형의 파고치 부근에서 아크가 발생되는 점에 착안하여 1주기의 전류 파형을 파고치 부근으로 4등분한 후 웨이브릿 변환(Wavelet Transform)을 이용하여 각 구간의 고조파 전류의 계수 값을 추출하였고, 추출된 고조파 전류의 계수 값들을 고장 검출의 변수로서 혼돈특성의 추출을 위하여 시간 지

따라서 본 논문에서는 아크성 전류를 검출하기 위해 그림 2와 같이 한 주기마다 전압이 파고치 부근과 나머지 구간을 2등분하여 4개의 데이터 윈도우(data window)를 정하고, 각 윈도우의 전류 데이터를 웨이브릿 변환을 이용하여 고조파 성분을 추출하였다. 한 주기 내에서 파고치 구간(윈도우 1, 윈도우 3)과 나머지 구간(윈도우 2, 윈도우 4)의 전류의 주파수 분포 특성 변화를 고장 검출 인자로 사용하였다.



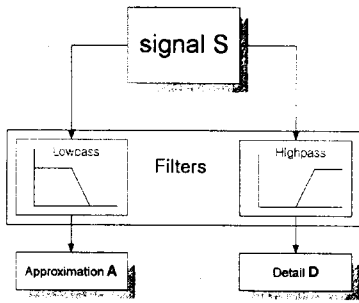
(그림 2) 데이터 윈도우

2.3 웨이브렛 변환

기존의 고저항 지락사고 검출시 시간영역에서 직접 검출 또는 신호에 포함되어 있는 주파수 정보만을 구하는 방법(Fourier Transform)은 그 적용범위가 제약되어 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 개발된 WDFT(Windowed Discrete Fourier Transform)은 윈도우 함수가 시간축을 따라 이동함으로써 시간축에서의 분해능을 결정하는 윈도우함수의 길이와 스펙트럼에서의 주파수 분해능을 분석할 신호에 따라 적절히 선택하여 고저항 전류 파형을 해석한다.

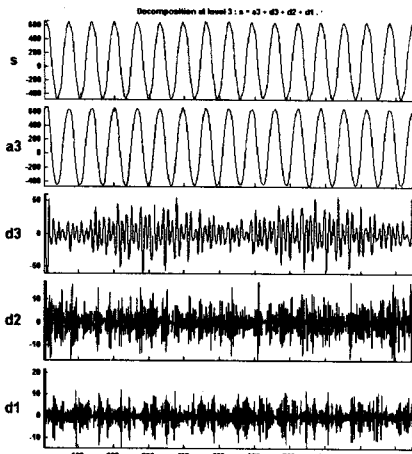
그러나 고저항 고장은 순간적이거나 돌발적인 형태로 기본주파수에 실려 짧은 시간 발생하게 되며, 이들 사고 파형은 일반적으로 기본 주파수 보다 높은 고주파 성분을 나타내므로 전 구간을 걸쳐 동일한 분해능을 가지고 검출해 낼수는 없다. 그러므로, 이러한 낮은 주파수 성분은 낮은 분해능으로, 높은 주파수 성분은 높은 분해능으로 해석하는 MRA(Multiresolution Analysis) 기법을 적용할 필요가 있다.

고저항 고장파형을 그림 2에서와 같이 파고치와 나머지 부분으로 재구성한 데이터를 이산 웨이브렛 변환을 이용한 분해과정을 거친다. 이산 웨이브렛 변환은 고주파, 저주파 영역을 그림 3과 같이 연속적으로 분해하여 표현된다.

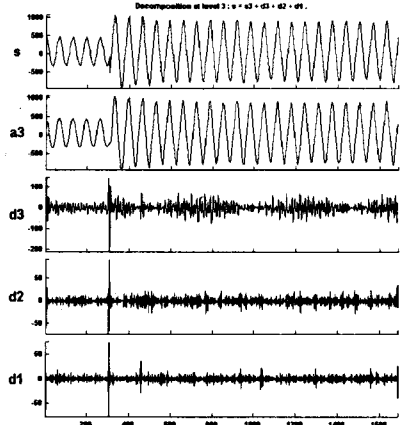


[그림 3] 웨이브렛 필터

이산 웨이브렛 변환 후 고주파 영역인 Detail 요소와 저주파 영역인 Approximation 요소로 분류된다. 다단계 필터링은 Detail부분을 연속적으로 고주파 및 저주파 필터링으로 각각의 요소를 분류한다.



[그림 4] 정상 전류파형 3Level 웨이브렛 변환



[그림 5] 보도블럭 고장전류 파형 3 Level 웨이브렛 변환

다음 level 필터링시의 샘플의 개수는 down-sampling을 적용하여 각각 1/2로 감소한다. 또한 필터링시의 마더 웨이브렛(Mother Wavelet)의 선정은 파형 분석시 매우 중요하다. 본 논문에서 전력계통의 해석에 적합한 Daubichies wavelet-4를 마더 웨이브렛으로 선정하여 고저항 고장파형의 계수를 추출하였다.

그림 4는 건전상의 전류파형을 3 레벨 웨이브렛 변환한 결과이며, 그림 5의 보도블록 고저항 고장전류 파형을 웨이브렛 변환한 결과이다.

본 논문에서는 각각의 계수중 2레벨의 고주파 요소를 혼돈특성 추출을 위한 계수로 사용하였다.

2.3 혼돈 특성 추출

불규칙하고 유계된(bounded) 카오스 신호의 성질이 야크싱 고장전류에도 포함되어 있음을 규명하려면 카오스 현상의 판별 기준인 시계열 데이터, 위상공간, 포엔카레맵, 리아프노프 지수, 프랙탈 차원으로 판별해야 하나, 수학적 모델없는 1차원의 시계열 데이터로는 구별이 매우 어렵다.

본 연구에서는 고저항 지락 사고시의 실측 데이터에 카오스적인 성질이 있음을 매립(embedding) 이론에 의한 상태 공간의 재구성 및 기하학적인 카오스의 성질을 나타내는 프랙탈 차원으로 증명하여 새로운 고장 검출 인자로 제시하였다.

본 논문에서는 재구성시 false neighbour기법을 적용하여 최적의 재구성 차원을 선정하였다. 주어진 고장전류 $s(k)$ 로부터 d 차원의 벡터 $y(k)$ 를 재구성하면

$$y(k) = \{s(k), s(k+\tau), \dots, s(k+(d-1)\tau)\} \quad (1)$$

여기서, d 는 재구성 차원이고, τ 는 시간지연이다. 본 논문에서 재구성 차원은 3, 자기상관함수로 계산한 시간지연은 42로 하여 식 1을 식 2와 같이 표현할 수 있다.

$$y(k) = \{s(k), s(k+\tau), s(k+2\tau)\} \quad (2)$$

표1은 실측 고저항 고장 파형을 이용하여 자기상관함수로 계산한 시간지연들의 결과이다. 평균 시간지연은 약 42로 결정되었고, 이 시간 지연을 이용하여 카오스 어트랙터로 재구성하였다.

<표 1> 자기상관 함수를 이용한 시간지연의 선택

지락시 접촉매체	매체상태	파형 번호	고장 장소	최적의
				시간 지연 I_{α} (고장상)
보도블럭	건조	No.1	고창 D/L	42
	습기	No.2	고창 D/L	42
	습기	No.3	고창 D/L	42
모래땅	반습기	No.1	고창 D/L	42
자갈	갯자갈	No.1	고창 D/L	41
	강자갈 (건조)	No.2	고창 D/L	42
차량	타이어대	No.1	고창 D/L	41
	타이어	No.2	고창 D/L	41
수목	미루나무, 습기	No.1	고창 D/L	43
	소나무, 습기	No.2	고창 D/L	42
	말뚝	습기	No.9	고창 D/L
평균				41.82

2.5 사례 연구

실측한 고저항 고장파형을 웨이브렛 변환하여 고장파형의 특성을 분류한 후 계수들을 이용하여 카오스 어트랙터를 구성하였다. 그림 6과 그림 7은 수목 접촉시의 건전상 전류의 위상공간이다.



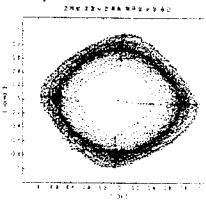
[그림 6] 수목에 접촉시 건전 A상전류의 위상 공간



[그림 7] 보통토사에 지락시 건전 B상전류의 위상 공간

정상 부하시 전류의 위상 공간은 단일 폐곡선을 나타내는 1주기 신호에 가깝고 변화의 폭 및 불규칙한 특성이 크게 나타나지는 않았다.

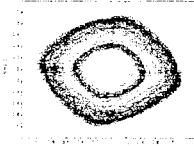
고저항 고장시의 위상 공간을 그림 8~9에 고장 유형별로 나타내었다.



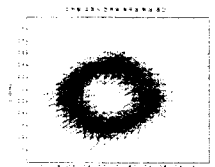
[그림 8] 모래에 지락시 고장 전류의 위상 공간



[그림 9] 보도블럭 지락시 고장전류 위상공간



<그림 5-3-6>
보도블럭(습기)에 지락시 고장 전류의 위상 공간



<그림 5-3-7> 수목에 접촉시 고장 전류의 위상 공간

고장 전류의 위상 공간은 지락 매체에 따라 그 모양이 구분된 특성을 나타내며, 아크의 발생과 소멸에 따라 특정한 형태로는 변하지는 않지만 위상 공간내의 일부분을 벗어나지 않으며, 마치 수많은 끌개(attractor)가 얹히고 중첩된 기이하면서도 모양이 있는 구조체를 형성한다. 이러한 구조체를 이상한 끌개(strange attractor)라 하며, 고장 전류는 카오스 성질을 강하게 나타낸다고 할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 고저항 고장시 실측된 여러 형태의 사고 파형중 전류 파형 1주기를 웨이브렛 변환을 이용하여 고주파 및 저주파 성분으로 분류하여 각 구간의 전류의 분포 특성 변화를 고장 검출 변수로 적용하였다. 고저항 고장파형을 직접 시계열 데이터로 사용하여 어트랙터를 구성한 결과보다 웨이브렛 변환된 검출인자를 매립차원의 시계열 데이터로 사용하여 어트랙터를 구성시 각 사고별로 그 모양이 구분된 특성을 나타내었다. 또한 웨이브렛 변환한 계수를 이용하여 카오스 어트랙터를 구성하여 각 고장파형의 특성을 재구성하여 다양한 형태의 고저항 고장에 대해 복잡한 수식적 해석이 없이도 고장 패턴을 분류할 수 있으며 고장의 검출 성능 및 정확도를 높일 수 있었다.

웨이브렛 변환과 위상공간으로 재구성한 결과를 AN-FIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)에 적용하여 어트랙터 구성에 따른 정확하고 신속한 고장판별과 그 알고리즘을 마이크로 프로세서에 적용하여 실측 데이터를 이용한 실험과정이 추후과제로 남는다.

[참고 문헌]

- [1] "High Impedance Fault Detection Using Third Harmonic Current", Electric Power Research Institute Report EL-2430, Prepared by Hughes Aircraft Co., Jun. 1982
- [2] B. Mike Aucoin and B. Don Russell, "Detection of Distribution High Impedance Faults Using Burst Noise Signals Near 60Hz", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.2, pp.342-348, Apr. 1987
- [3] Russel, B. D., Chinchali, R. P. "A digital signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.4, No.1, Jan, 1989.
- [4] 임화영, 유창완, 고재호, "전력계통의 고임피던스 고장 검출 기법에 관한 연구", 대한전기학회지, 48A권 1호, 15 - 21, 1999년 1월
- [5] C.Sidney Burrus, Remesh A. Gopinath, Haitao Guo, "Introduction to wavelets and wavelet transforms", Printice Hall, Inc, 1998
- [6] 배영철, 고재호, 유창완, 홍대승 임화영, "전력계통의 고임피던스 고장으로부러 혼돈 특성 추출에 관한 연구", 한국표지 및 지능시스템 학회지, Vol.9, No.5, 545-549, 1999