

## 고저항 지락 사고의 카오스 패턴 해석

고 재호\*, 배 영철\*\*, 임 화영\*

\* 광운대학교 제어계측공학과, \*\* 산업 정보 기술원

### A Chaotic Pattern Analysis of High Impedance Faults

Ko Jae-Ho, Bae Young-Chul, Yim Hwa-Yeoung

\* Dept. of Control & Inst. Eng. Kwangwoon Univ. \*\* KINITE

#### Abstract

The analysis of distribution line faults is essential to the proper protections in the power system. A high impedance fault does not make enough current to cause conventional protective devices.

In this paper, Fractal dimensions are estimated for distinction between normal status and fault status in the power system. Application of the concepts of the fractal geometry to analyze chaotic properties of high impedance fault current was described. In addition, to analyze variation of fault current and normal current on phase plane, embedding state variables are reconstructed from 1 dimensional time series.

#### 1. 서 론

전력 계통에서 고저항 고장(High Impedance Fault : HIF)은 고장 전류가 작은 아크성 특징 때문에 고장 전류의 크기에 의존하는 기존의 계전 방식으로는 검출이 불가능하며, 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>[1-8]</sup>

본 논문에서는 불규칙한 아크의 지속과 아크 고장 전류의 변화 특성에 카오스 성질이 있음을 Embedding 위상 공간과 프랙탈 차원(Fractal Dimension)을 구하여 규명하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 고저항 지락 사고에서의 카오스 현상 해석

아크성 고장 전류에 카오스 성질이 있음을 규명하려면 카오스 현상의 판별 기준인 시계열 데이터, 위상 공간, 포엔카레맵, 리아프노프 지수, 프랙탈 차원으로 판별해야 하나, 수학적 모델없는 1차원의 시계열 데이터로는 그 구별이 매우 어렵다.

본 논문에서는 고저항 지락 사고시의 실측 데이터에 카오스적인 성질이 있음을 embedding에 의한 상태 공간의 재구성 및 기하학적인 카오스의 성질을 나타내는 프랙탈 차원을 구하여 나타내고자 한다.

#### 2.2 Embedding

고저항 지락 사고 파형에서 카오스적인 특성이 나타나는지를 판별하기 위해서는 embedding에 의한 상태 공간의 재구성(reconstruction)이 선행되어야 한다. embedding은 상태변수  $x_t \in R^n$ 에 관련된 다음과 같은 1변수의 시계열 데이터  $\xi_t$ 로부터,

$$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots \quad (1)$$

시간 지연의 크기  $\tau$  및 차수  $m$ 을 선정하여 다음과 같은  $m$ 차원 벡터를 생성하는 것이다.

$$\begin{aligned} X_1 &= (\xi_1, \xi_{1+\tau}, \dots, \xi_{1+(m-1)\tau}) \\ &\vdots \\ X_i &= (\xi_i, \xi_{i+\tau}, \dots, \xi_{i+(m-1)\tau}) \\ &\vdots \\ X_N &= (\xi_N, \xi_{N+\tau}, \dots, \xi_{N+(m-1)\tau}) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2)$$

이때,  $m$ 이  $2n+1$  이상이면, 재구성된 상태 공간에서 어트랙터의 구조가 보존되는 것이 보여지고 있으며<sup>[8]</sup>,  $X_N$ 이 상태 공간내의 일정한 영역내에 여러 개의 고리가 중첩된 이상한 모양을 나타내면 카오스적인 성질을 가진다고 할 수 있다.

Embedding 차원이 충분히 크면 추정하고 싶은 프랙탈 차원이 위상적으로 보존되어 재구성된 어트랙터에 대해서도 추정이 가능하다. 그러나 실제 데이터를 해석 대상으로 했을 때, 식 (2)에서 시간 지연  $\tau$ 의 선택은 매우 중요하며 시간 지연  $\tau$ 가 너무 작으면 재구성 상태 공간내의 데이터는 극단적으로 상관이 크게되어 상태공간의 45° 기울기를 갖는 직선상에 응집하며, 너무 크면 서로의 상관성을

않게 된다.

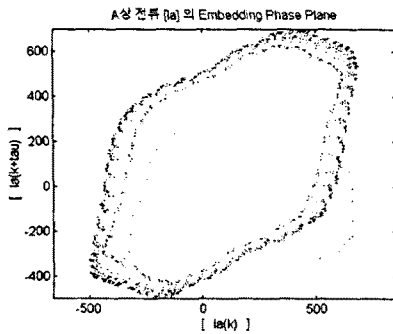
시간 지연  $\tau$ 의 설정에 다음과 같은 기준이 흔히 사용된다.

- \* 관측된 시계열 데이터  $\xi_i$ 의 중요한 주기의 수분의 1
- \*  $\xi_i$ 의 자기 상관 함수  $R$ 이 최초로 0이 되는 시각
- \*  $\xi_i$ 의 상호 정보량  $I$ 가 최초로 극소치를 취하는 시각

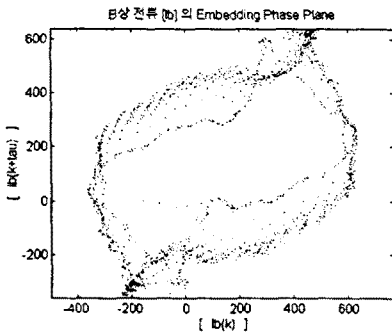
이외에도 상관적분을 응용해서 적당한  $\tau$ 를 결정하는 방법과, 상태공간의 차원에 따라  $\tau$ 를 변화시켜, 재구성 후의 벡터의 폭(window)을 일정하게 유지하는 방법 등도 제시되고 있다.

고저항 고장전류의 위상공간을 재구성하기 위한 시간지연  $\tau$ 는 실측 데이터가 64 sampling인 관계로  $90^\circ$ 의 위상 지연을 갖는  $\tau=16$  또는  $1/2$ 주기의 전체를 포함하는  $\tau=10$ 으로 선정하였다.

<그림 1>과 <그림 2>는 정상 부하의 A상과 B상 전류의 embedding 위상 공간을 시간 지연  $\tau=10$ , 차수  $m=3$ 으로 구한 것이다.

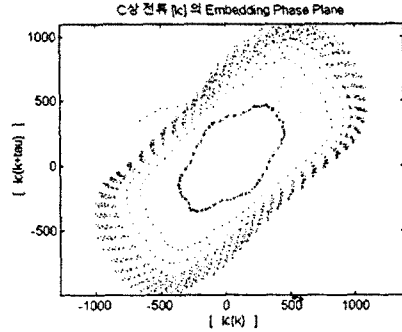


<그림 1> 모래 지락시 전전 A상 전류의 위상 공간

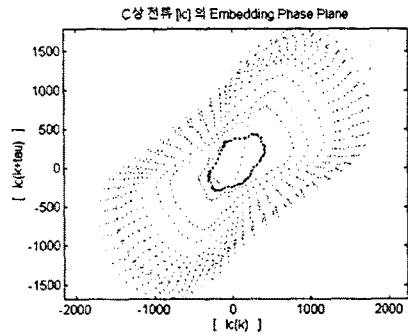


<그림 2> 모래 지락시 전전 B상 전류의 위상 공간

<그림 3>과 <그림 4>는 모래 지락시와 자갈 모래 지락시의 고장 전류의 위상 공간을 나타낸 것이다.



<그림 3> C상이 모래에 지락시 고장 전류의 위상 공간



<그림 4> C상이 보도볼력에 지락시 고장 전류의 위상 공간

<그림 1> ~ <그림 4>에서 고장 전류의 위상 공간이 정상 전류의 위상 공간보다 왜곡된 모양 즉, 준주기성이 강한 카오스적인 성질이 강하게 나타남을 알 수 있다.

### 2.3 프랙탈 차원

프랙탈 차원은 카오스를 정량적으로 표시하는 것으로 보통 상관적분에 의한 상관 차원으로 나타낸다. 재구성된 어트랙터상의 1점을  $x_i \in R^m$ 이라고 하면, 상관적분은 다음 식 (3)으로 정의되며,

$$C^m(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N H(\tau - |X_i - X_j|) \quad (3)$$

여기서,  $H(t)$ 는 heavy-side 함수로,

$$H(t) = \begin{cases} 1 & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad (4)$$

상관적분의 알고리즘은 우선  $m$ 차원 공간에 있어서 재구성된 어트랙터 상의 1점  $X_i$ 를 고려하고, 다음으로 나머지  $(N-1)$ 개의 점에 대해서 중심을  $X_i$ 로 했을 때 반경  $r$ 의  $m$ 차원 초구(hyper-ball)내로 들어가는 점  $X_j$ 를 헤아린다. 이 계산을 모든  $X_i$ 를 중심으로 해서 반복함으로써, 식 (3)에 나타난 2차의

상관적분이 얻어진다.

상관적분이 식 (5)와 같이 반경  $r$ 의 적당한 영역에서 스케일링된다고 하면,

$$C^m(r) \propto r^{\nu(m)} \quad (5)$$

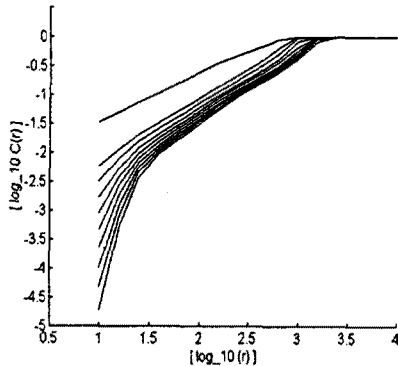
식 (5)의 스케일링 지수  $\nu(m)$ 을 상관지수 (correlation exponent)라고 한다.

식 (5)의 양변에 대수를 취하면 다음 식과 같이 되며,

$$\log C^m(r) \propto \nu(m) \log r \quad (6)$$

어트랙터를 스케일 범위  $r_1 \leq r \leq r_2$ 에서 관측했을 때, 식 (6)이 성립하면 이 범위에서 자기상사성이 성립되고 있다고 할 수 있다. 결국  $\nu(m)$ 은 횡축으로  $\log r$ , 종축으로  $\log C^m(r)$ 을 취해서 그린 그래프에서 직선 부분의 기울기로, embedding 차원  $m$ 의 증가와 함께  $\nu(m)$ 이 포화되어 접근해 가는 값이 상관 차원(프랙탈 차원)이 되며,

<그림 5>에 사고 전류의 상관 적분의 그래프를 차수  $m$ 을 1부터 10까지 변화시켜 나타내었다.



<그림 5> 상관 적분

상관적분은 계산 자체가 단순하고 용이하여 적절한 차원을 얻을 수가 있다. 그러나, 스케일링 영역, 계산에 필요한 총데이터 수등의 결정법에 대해서 해결해야 할 문제점이 많이 남아 있다. 또, 데이터 수의 부족과 데이터 측정시의 대역제한 때문에, 잘못된 상관차원이 추정된다고 하는 것도 지적되고 있다.

<표 1>은 C상 지락시 전류의 프랙탈 차원을 나타낸 것으로 아스팔트 지락 사고를 제외한 나머지 사고시의 사고 전류(C상)의 프랙탈 차원이 정상 전류의 프랙탈 차원에 비해 크게 나타남을 알 수 있다.

	C상 전류	B상 전류	A상 전류
아스팔트	1.1451	1.4205	1.2274
보도블럭	1.5182	1.3762	1.3794
자갈모래	1.3978	1.0947	1.0682
모래	1.5336	1.3453	1.4908

<표 1> 프랙탈 차원

### 3. 결 론

본 논문에서는 Embedding 위상 공간 및 프랙탈 차원을 구하여 고장 전류의 불규칙한 변화 특성에 카오스 성질이 있음을 규명하였다.

프랙탈 차원의 계산을 실시간으로 적용하기 위해 적은량의 데이터로 빠르게 계산할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 차후 과제로 남는다.

### 참 고 문 헌

- [1] B. Mike Aucoin and B. Don Russell, "Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components", IEEE Transactions on Power Apparatus, and Systems, Vol. PAS-101, No.6, pp.1596-1606, Jun. 1982
- [2] "High Impedance Fault Detection Using Third Harmonic Current", Electric Power Research Institute Report EL-2430, Prepared by Hughes Aircraft Co., Jun. 1982
- [3] 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
- [4] S.J. Balsler, K.A. Clements and D.J. Lawrence, "A Microprocessor-based Technique for Detection of High Impedance Faults", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, pp.252-258, Jul. 1986
- [5] C.L. Huand, H.Y. Chu and M.T. Chen, "Algorithm Comparison For High Impedance Fault Detection Based on Staged Fault Test", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3 No.4, Oct. 1988
- [6] B. Don Russell and R.P. Chinchali, "A Digital Signal Processing Algorithm for Detecting Arcing Faults on Power Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4 No.1, Jan. 1989
- [7] S. Ebron, D.L. Lubkeman and M. White, "A Neural Network Approach to the Detection of Incipient Faults on Power Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.5 No.2, pp.905-914, Apr. 1990
- [8] "다중접지 배전선로 보호계전방식 개선에 관한 연구", 한국전력공사 기술연구원, 1987