

Wavelet Singular Value Decomposition을 이용한 고장 판별 및 발전기 탈락 검출 알고리즘

김원기, 한준, 이재원, 김철환
성균관대학교

An Algorithm for Fault Classification and Detection of Generator Dropping Using Wavelet Singular Value Decomposition

Won-Ki Kim, Jun Han, Jae-Won Lee, Chul-Hwan Kim
Sungkyunkwan University

Abstract - In this paper, algorithm for fault classification and detection of generator dropping using wavelet singular value decomposition (WSVD) is proposed. Busan area upper 345kV is modeled and generator dropping is simulated in EMTP-RV. Characteristic of generator dropping is analyzed and this algorithm is deduced by calculating WSVD in MATLAB.

1. 서 론

WT(Wavelet Transform)는 신호의 시간에 따른 주파수와 크기 변화를 동시에 분석할 수 있는 신호처리 방법으로 전력계통에서 일어나는 변화를 해석하는 데 우수한 성능을 갖는다[1]. 그리고 SVD(Singular Value Decomposition)는 비정방 행렬의 특이값을 분석하는 신호처리 방법으로 신호의 크기 변화를 잘 나타낸다[2].

본 논문에서는 위 두 방법을 결합한 WSVD(Wavelet Singular Value Decomposition)를 이용한 송전계통에서의 고장 종류 판별 및 발전기 탈락 검출 알고리즘을 제안하였다. EMTP-RV에서 우리나라 부산 지역의 345kV급 계통을 모델링하였다. 그리고 이 계통에서 선로 고장과 발전기 탈락을 모의하였다. MATLAB에서 모의 결과에 대한 WSVD 계산을 통하여 선로 고장 시와 발전기 탈락 시 WSVD의 특징을 비교하였다. 그 특징을 바탕으로 고장 판별과 발전기 탈락 검출하는 알고리즘을 개발하였다.

2. Wavelet Singular Value Decomposition

2.1 Wavelet Transform

WT는 신호의 시간에 따른 주파수 및 크기 정보를 동시에 추출할 수 있는 성질을 갖고 있어 다양한 분야에서 인기 있는 변환 방법이다. 디지털 영역에서 적용되는 DWT(Discrete Wavelet Transform)는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x[k] \Psi \left[\frac{k - na_0^m b_0}{a_0^m} \right] \quad (1)$$

여기서, $x[k]$ 는 분석하는 신호이고, $\Psi[k]$ 는 mother wavelet, a_0^m 은 스케일 파라미터, $na_0^m b_0$ 는 모함수의 시간 이동 파라미터이다.

DWT는 그림 1과 같은 과정을 통해 계산되며, Approximation 계수(cA)와 Detail 계수(cD)는 변환 결과이다. 여기서 cA는 고 스케일-저주파 성분이고, cD는 저 스케일-고주파 성분이다. 이 계산 과정에서 데이터가 2배가 되어 down-sampling 과정이 포함된다.

DWT의 결과는 mother wavelet의 특징에 따라 달라질 수 있다. 이 mother wavelet의 특징은 일정한 시간 내에 평균값이 0인 함수로 정현파와 달리 시작과 끝을 갖는다. 전력계통의 과도상태 해석에서는 주로 직교 wavelet인 Daubechies 4(db4)가 mother wavelet으로 사용된다[1].

2.2 Singular Value Decomposition

SVD는 비정방 행렬의 특이값을 구하는 방법으로 신호 처리 및 통계학에서 주로 이용된다. 실수 또는 복소수로 이루어진 크기가 $m \times n$ 이고 rank가 r 인 행렬 A 를 SVD 방법을 이용하여 식 (2)와 같이 3가지의 행렬로 분해할 수 있다.

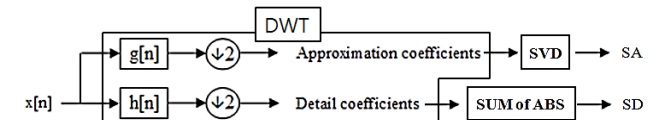
$$A = USV^T \quad (2)$$

여기서, U 는 $m \times m$ 크기의 행렬로 AA^T 의 orthonormal eigenvector로 이루어지고, V 는 $n \times n$ 크기의 행렬로 $A^T A$ 의 orthonormal eigen

vector로 이루어진다. 그리고 Σ 는 $m \times n$ 크기의 행렬로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} S0 \\ 00 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $S = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_r)$ 는 크기가 $r \times r$ 인 대각 행렬이다. σ 는 특이값이라 하고, $\sigma_1 \gg \dots \gg \sigma_r > 0$ 와 같은 성질을 만족한다. SVD를 통해 계산된 특이값은 신호의 크기 변화에 대한 정보를 갖고 있어 이를 통해 신호의 변화를 해석할 수 있다[2].



<그림 1> WSVD 순서도

2.3 Wavelet Singular Value Decomposition

크기가 n 인 moving window를 통하여 신호 x 가 들어올 때, x 에 대한 WSVD는 그림 1과 같이 계산된다. DWT 과정에서 계산된 cA는 SVD 과정을 거쳐 SA(Singular value of Approximation)로 계산되고, cD는 식 (4), (5)의 과정을 거쳐 SD(Sum of absolute value of Detail)로 계산된다.

$$SDI(i) = \sum_{k=n/4}^{3n/4} |cD(k)| \quad (4)$$

$$SD(i) = \sum_{k=i-n+1}^i SDI(k) \quad (5)$$

식 (4)에서 $n/4 \leq k \leq 3n/4$ 까지의 합만 구하는 이유는 DWT된 신호의 끝점 효과 때문이다. 그리고 식(5)에서 과거의 값을 합하는 이유는 mother wavelet에 따른 영향을 줄이기 위해서이다[3].

3. WSVD를 이용한 발전기 탈락 검출 알고리즘

3.1 계통모델

그림 2에 표시된 바와 같이 부산 근방 345kV급 계통을 EMTP-RV를 이용하여 모델링하였다. 각 발전기의 조속기 및 여자기를 포함하여 모델링하였으며, 송전선로는 실제 송전선로 정수를 바탕으로 constant parameter로 모델링하였다. 그리고 154kV급 이하 계통은 부하로 처리하였고, 부하는 static load model로 모델링하였다.



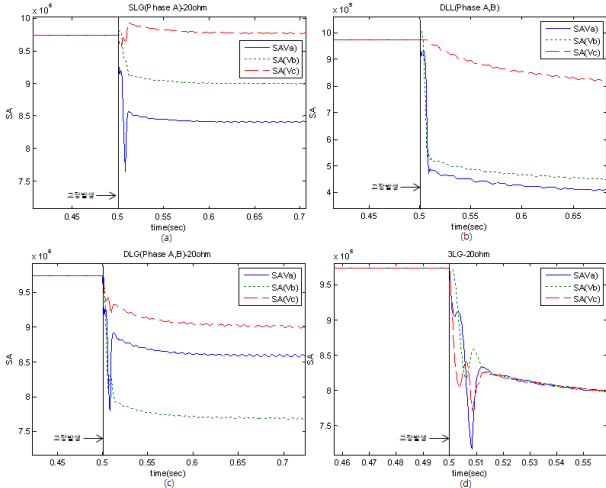
<그림 2> 우리나라 남부 전력계통 모델

3.2 모의 조건

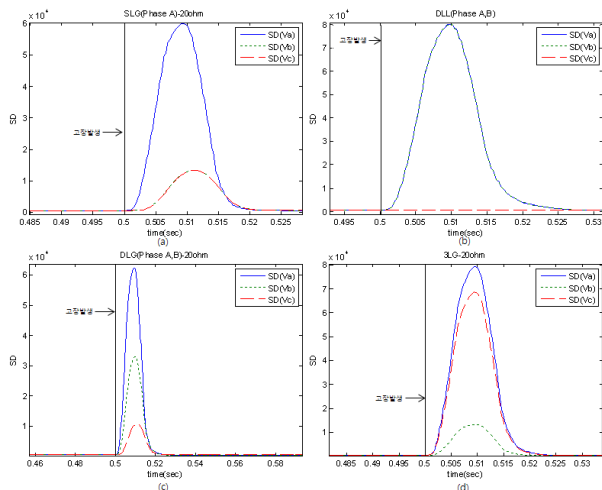
WSVD를 이용한 고장 종류 판별은 고장 거리 및 저항, 위상각에 상관없이 측정이 가능하다[3]. 이를 바탕으로 선로 고장에 따른 WSVD의 변화를 알아보기 위하여 북부산3과 신양산3S 모선 사이에서 고장을 모의하였다. 발전기 탈락은 모델계통에 포함된 부산C/C, 고리N/P, 울산 T/P- C/C에서 발전기 탈락용량을 변화하며 모의하였다. 전압은 북부산 3 모선에서 취득하였다. 이 때, 샘플링 주파수는 2.88kHz(48샘플/주기)이고, moving window의 크기는 24샘플(반주기)로 하였다.

3.3 선로 고장 시 WSVD

그림 3과 4는 선로 고장 시 측정된 전압에 대한 WSVD의 결과인 SA와 SD값의 변화이다. (a)는 단상 지락 고장이고, (b)는 선간 단락 고장, (c)는 2선 지락 고장, (d)는 3상 고장(지락)이다. 고장 검출 후 SD의 값 변화가 α 값 이상 시에 검출되고, 고장 종류는 고장 검출 후 1주기 동안의 각 상의 SA 최대 감소율 비(NSA)로 판별 가능하다[3].



〈그림 3〉 선로 고장 시 SA 변화



〈그림 4〉 선로 고장 시 SD 변화

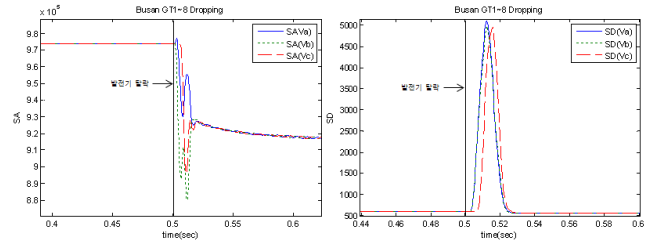
3.4 발전기 탈락 시 WSVD

그림 5는 측정위치에서 20km 떨어진 위치에 부산C/C의 모든 발전기 탈락 시 전압에 대한 WSVD의 결과로 (a)는 SA, (b)는 SD이다. 발전기 탈락 시 SA값의 변화는 고장과 유사한 결과를 보이지만 SD값은 선로 고장 시와는 다르게 발전기 탈락 후 3상의 SD 최대 변화량 비(NSD)가 유사하였다. 그림 6은 발전단지 별 3상의 최대 SD변화량의 합이 발전기 탈락 용량에 선형 비례함을 보여준다. 같은 발전기 탈락 용량 시에는 측정 위치와 가까운 지역에서의 값이 더 크게 나타났다. 발전기 탈락 위치를 안다고 가정 하면, 최대 SD 변화량을 통해 발전기 탈락 용량 계산이 가능하다.

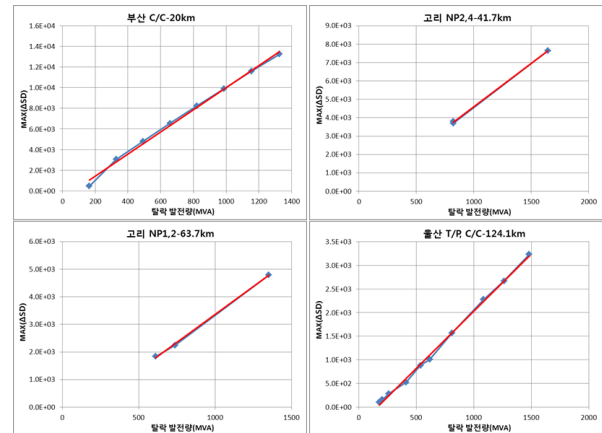
3.5 고장판별 및 발전기 탈락 검출 알고리즘

그림 7은 고장 판별 및 발전기 탈락 검출 알고리즘이다. Voltage sag 현상이 발생 시, 선로 고장과 발전기 탈락의 SD 특성 차이를 바탕으로 구분을 한다. 여기서 고장 검출 임계값 α 는 1, 고장과 발전기 탈락 구분

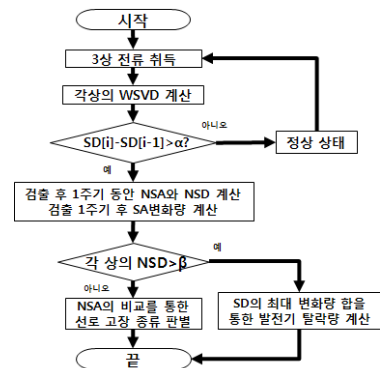
계수 β 값은 0.8로 선정하였다.



〈그림 5〉 발전기 탈락 시 SA와 SD 변화



〈그림 6〉 발전기 탈락 용량에 따른 최대 SD변화량



〈그림 7〉 발전기 탈락 검출 알고리즘

4. 결 론

EMTP-RV로 모델링한 송전계통에서 발전기 탈락과 선로 고장 시의 전압 변동을 모의한 결과를 MATLAB에서 WT와 SVD를 결합한 WSVD를 이용하여 분석하였다. 그 결과 발전기 탈락과 선로 고장 전압의 WSVD 결과인 SA는 두 경우가 확실하게 구분되지 않았으나, SD의 특성이 서로 달라 구분할 수 있었다. 이에 따라 두 경우의 SD의 특성을 바탕으로 알고리즘을 개발하였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (2008T100100131) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] Kim, C. H., and Aggarwal, R., "Wavelet transforms in Power Systems", IEE Power Engineering Journal vol. 15, pp. 193-202, 2001.
- [2] V. C. Klema, A. J. Laub, "The singular value decomposition: Its computation and some applications", IEEE Trans. Autom. Control, vol. AC-25, no. 2, pp. 164 - 176, Apr. 1980.
- [3] Kim, W. K. and etc., "Algorithm for Fault Detection and Classification Based on Wavelet Singular Value Decomposition in Transmission Line", ICEE 2011, Jul. 2011.