

## 부하 탈락 시 Wavelet Transform과 Singular Value Decomposition을 이용한 특성 분석

권기현, 김원기, 한준, 김철환  
성균관대학교

### Effect Analysis of Load Shedding Using Wavelet Singular Value Decomposition

Gi-Hyeon Gwon, Won-Ki Kim, Jun Han, Chul-Hwan Kim  
Sungkyunkwan University

**Abstract** - 본 논문에서는 WT(Wavelet Transform)와 SVD(Singular Value Decomposition)기법을 결합한 WSVD(Wavelet Singular Value Decomposition)를 사용하여, 송전계통에서 부하 탈락 시 나타나는 특성 및 외란검출의 유효성을 분석하였다. WSVD 방식을 이용한 외란검출을 모의하기 위해 EMTP-RV를 이용하여 부산 및 경남 일부지역 345kV급 송전계통을 모델링하였고, 이 계통에서 부하 탈락을 모의하였다. WSVD의 계산은 MATLAB을 통해 수행하였으며, 이 결과를 바탕으로 전력계통에서 부하 탈락량의 변화에 따른 특성을 분석하였다

#### 1. 서 론

현대사회에서 양질의 전력공급은 필수적이다. 저품질의 전력은 생산 제품의 품질 저하뿐만 아니라 산업시설에 큰 피해를 야기함으로써 경제적 손실을 초래한다. 특히 고정밀 기기나 반도체 공정 등 전력품질에 민감한 산업들의 발달로 인해 전력품질에 영향을 미치는 외란 검출의 중요성이 대두되고 있다. 이러한 전력 계통의 외란과 관련된 과도현상을 분석하기 위한 방법으로써 WT(Wavelet Transform)가 널리 사용된다. WT는 푸리에 변환과는 달리 시간과 주파수 영역에 대한 정보를 모두 가지며, 크기가 가변되는 윈도우를 사용함으로써 과도상태의 신호를 처리하는데 유용하다[1]. 하지만 WT의 결과는 세부적인 처리과정을 필요로 하는 많은 수의 데이터가 존재하기 때문에 외란의 특성을 추출하는데 한계가 있다. 따라서 WT를 통해 추출한 정보들을 효율적으로 해석할 수 있는 방법이 필요하다[2].

본 논문에서는 WT와 SVD(Singular Value Decomposition)를 결합한 WSVD(Wavelet Singular Value Decomposition)기법을 통해 부하 탈락에 따른 계통의 특성을 분석하였다. 모델 계통은 EMTP-RV를 이용하여 부산 및 경남 일부 지역의 345kV급 송전계통을 모델링하였으며, 이때 MATLAB을 통해 부하탈락에 따른 WSVD 특성을 분석하였다.

#### 2. Wavelet Singular Value Decomposition

##### 2.1 Wavelet Transform

WT는 시간과 주파수 영역에 대한 정보를 동시에 분석할 수 있는 신호 처리 방법으로 다양한 분야에서 사용된다. 특히 WT는 확일화 되지 않은 주파수 영역을 사용함으로써 외란 후의 과도상태의 분석에 유용하다. 주어진 신호  $s(t)$ 에 대한 WT는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$W_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 scale 성분이고  $b$ 는 translation 성분이다. 그리고  $\psi$ 는 mother wavelet이며, 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

WT는 주어진 신호를 고스케일-저주파 성분인 approximation 계수와 저스케일-고주파 성분인 detail 계수로 분해한다[2].

##### 2.2 Singular Value Decomposition

SVD는 규모가 크고 다루기 힘든 행렬을 보다 작은 가역 정사각행렬로 근사하게 분해하는데 유용하게 사용되는 행렬분해 방법으로, 주로 신호처리방법으로 주로 이용된다. SVD 방법을 적용하면 크기가  $m \times n$ 이고, rank가  $r$ 인 임의의 행렬  $A$ 를 식 (3)과 같이  $m \times r$  직교행렬  $U$ 와  $n \times r$  직교행렬  $V$ 의 전치행렬,  $r \times r$  대각행렬  $\Lambda$ 의 곱의 형태로 분해할 수 있다.

$$A = U \Lambda V^T \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_{r-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

이때 식(4)의 행렬  $\Lambda$ 의 대각성분을 singular value라고 한다. singular value는 항상 양의 값을 갖고,  $r$ 이 커짐에 따라 그 값은 감소한다[3].

#### 2.3 Wavelet Singular Value Decomposition

WSVD는 WT와 SVD를 결합한 신호처리 방법으로, WSVD 과정을 통해 SA(Singular value of Approximation)와 SD(Sum of absolute Detail)를 얻을 수 있다. 크기가  $n$ 인 moving window로 신호가 들어올 때, WSVD는 레벨 1의 WT를 계산하고, 그 결과인 approximation 계수와 detail 계수를 바탕으로 아래와 같이 SA와 SD를 계산한다.

- 1) SA : SA는 approximation 계수의 SVD 처리를 통해 계산된 singular value이다. SA는 원신호의 크기 변화에 민감한 특성을 가진다.
- 2) SD : SD는 detail 계수를 식 (5), (6)을 이용하여 계산한 값이다. SD는 원신호의 주파수 변화 검출에 유용하다.

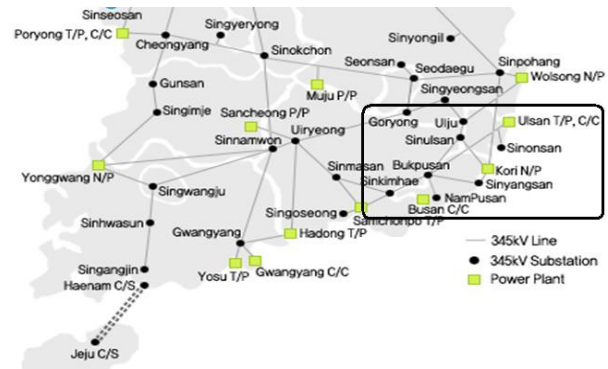
$$SDI = \sum_{k=n/4}^{3n/4} |dI(k)| \quad (5)$$

$$SD(i) = \sum_{k=i-n+1}^i SDI(k) \quad (6)$$

#### 3. 사례 연구

##### 3.1 계통 모델

송전계통에서 발생하는 외란의 과도상태를 분석하기 위해 부산 및 경남지역의 345kV급 송전계통을 선정하여, EMTP-RV를 통해 모델링 하였다. 선로는 실제 데이터를 바탕으로 분포 정수 모델을 사용하였으며, 발전기, 여자기 및 조속기를 포함하였다. 부하는 정적 모델을 사용하였으며, 154kV 이하의 계통은 부하로 처리하였다. 그림 1은 KEPCO 남부지역의 345kV급 계통이고, 그림 1에서 표시된 부분은 본 논문에서 부하 탈락 시, 그 변화를 분석하기 위해 선정된 지역의 모델 계통이다.



<그림 1> 모델 계통

### 3.2 모의 조건

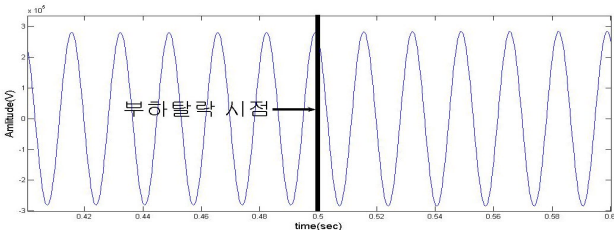
EMTP-RV로 설계한 모델 계통에서 부하 탈락을 모의하였다. 표 1과 같이 신양산3 모선의 부하를 5%에서 40%까지 동일한 역률(0.97)을 유지한 상태로 부하를 탈락시켰으며, 이 때 신양산3 모선에서 20km 떨어진 북부산3S 모선에서 2.88kHz(48 샘플/주기)의 샘플링 주파수로 전압을 측정하였다. WSDV 계산에는 크기가 24 샘플(반주기)인 moving window를 사용하였고 WT의 mother wavelet은 Daubechies 4를 이용하였다.

〈표 1〉 총 부하 용량의 백분율에 따른 탈락 용량

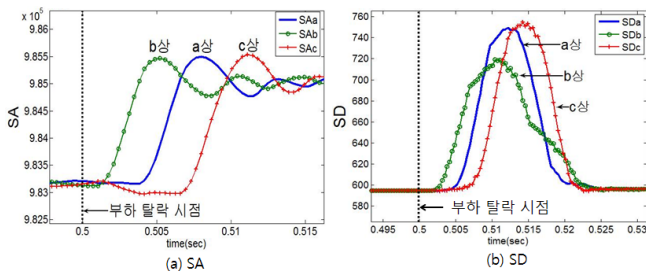
백분율 (%)	탈락 부하 용량(MVA)	백분율 (%)	탈락 부하 용량(MVA)	백분율 (%)	탈락 부하 용량(MVA)
5	26.68	15	80.03	30	160.07
7	37.35	20	106.71	35	186.74
10	53.36	25	133.39	40	213.42

### 3.3 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 2는 총 부하 용량이 약 533.5MVA인 양산에서 0.5초에 총 부하량의 15%인 약 80MVA 용량의 부하 탈락 시 북부산3S 모선에서 a상 전압을 측정한 파형이다. 그림 3은 그림2와 동일한 경우의 3상 전압에 대한 WSDV결과이며, (a)는 SA, (b)는 SD를 나타낸다. 그림 3을 통해 부하 탈락 시점 이후, SA와 SD 값의 변화에 따른 외란을 판별할 수 있다.



〈그림 2〉 부하 탈락에 따른 a상 전압



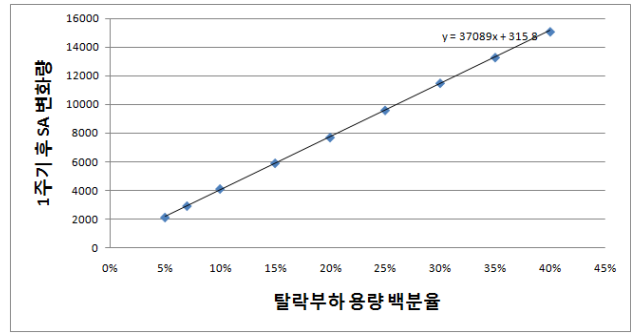
〈그림 3〉 부하 탈락에 따른 SA와 SD

#### 3.3.1 부하 탈락에 따른 SA 특성 분석

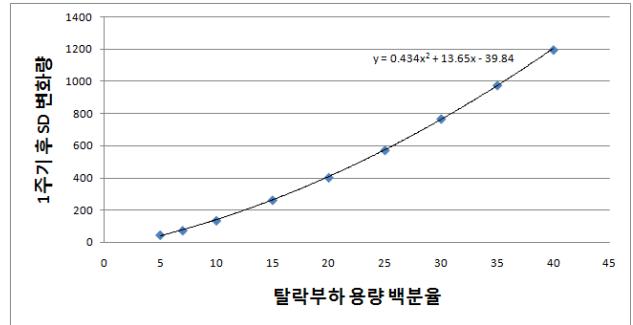
부하 탈락 시의 SA값의 변화를 살펴보면, 부하 탈락 시 전압이 상승함에 따라 SA값도 증가하는 현상을 보였다. 부하 탈락 후, 약 한주기 동안 과도상태를 보였으며, 이 때, 삼상의 SA값은 최대로 상승한 후 일정한 값으로 수렴하였다. 부하 탈락 시의 위상에 따라 SA값의 최대 상승 시점이 변화하였으나, 그 최대값과 수렴하는 값의 차이는 미세하였다. 이러한 특징을 바탕으로 신양산3 모선에서 표 1과 같이 부하 탈락량을 증가시킨 경우, 삼상의 발전기 탈락 후 1주기 후의 SA값에서 정상상태 SA값의 차이를 합하였다. 그 결과는 그림 4와 같으며, 부하 탈락 시 SA의 변화량은 탈락 용량에 비례함을 알 수 있다.

#### 3.3.2 부하 탈락에 따른 SD 특성 분석

부하 탈락 시의 SD값의 변화를 살펴보면, 정상상태에서는 일정한 값을 유지하다가 부하 탈락에 따른 전압 변동의 영향으로 SD값이 상승하였다. 부하 탈락 후, 약 두주기 동안 급격하게 상승한 후 다시 하락하여 정상상태의 값으로 복귀하였다. 부하 탈락 시의 위상에 따라 SD값의 최대 상승 시점과 값이 변화하였으나, 삼상의 SD 최대값의 평균은 일정하게 유지하였다. 그림 5는 그림 4와 같이 탈락되는 부하의 용량에 따른 3상 전압을 WSDV 계산을 하고, 부하 탈락 시점 1주기 이후의 3상의 SD값 변화량의 합을 나타낸 것이다. SD값 역시 탈락 되는 부하의 용량이 증가함에 따라 증가하는 추세를 보였다. 하지만 SA와 달리 선형적 비례가 아닌 비선형적 비례를 보였다.



〈그림 4〉 부하탈락 용량 변화에 따른 1주기 후 SA변화량 관계



〈그림 5〉 부하탈락 용량 변화에 따른 1주기 후 SD변화량 관계

## 4. 결 론

부하 탈락 시 WSDV의 특성을 분석하기 위해 EMTP-RV를 통하여 실제 송전선로를 바탕으로 345kV급 송전계통을 모델링하고, 부하 탈락을 모의하였다. 이 때, 전압을 WSDV로 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 부하 탈락 시 전압의 변화만을 이용한 외란의 검출은 어렵지만, 전압의 WSDV의 결과인 SA와 SD의 변화량을 통한 외란의 검출은 가능하다. 시뮬레이션 결과를 통해, SA 변화량은 위상에 의한 큰 영향을 받지 않으므로 단상을 분석함으로써 외란에 의한 과도상태를 검출할 수 있다. 또한 SD값의 변화량은 초기 값보다 높은 비율로 상승하므로, 검출 방식에 따라 적절한 SA 또는 SD를 선택한다.
- 2) SA와 SD의 변화량은 부하 탈락량에 비례하여 증가함으로써 외란 검출뿐만 아니라 외란 발생 시 부하 탈락량을 추정할 수 있는 장점을 가진다.

### 감사의 글

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

### [참 고 문 헌]

- [1] 손영락, 이화석, 문경준, 김형수, 박준호, 강현태, “웨이브렛 변환을 이용한 전력품질분석”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 214-216, July 2004.
- [2] Z. Y. He, L. Fu, S. Lin, Z. Q. Bo, “Fault detection and classification in EHV transmission line based on wavelet singular entropy”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, Oct. 2010.
- [3] Virginia C. Klema, Alan J. Laub, “The singular value decomposition: Its computation and some applications”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-25, No. 2, pp. 164-176, Apr. 1980.
- [4] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. Poggi, “Wavelet Toolbox™ 4 User's guide”, The MATH WORKS Inc.