발전기 탈락 시 Wavelet Transform과 Singular Value Decomposition을 이용한 특성 분석

노철호, 김원기, 한준, 김철환
성균관대학교

Effect Analysis of Generator Dropping Using Wavelet Singular Value Decomposition

Chul-Ho Noh, Won-Ki Kim, Jun Han, Chul-Hwan Kim
Sungkyunkwan University

Abstract - 본 논문에서는 WT(Wavelet Transform)와 SVD(Singular Value Decomposition)를 함께 사용한 WSVD(Wavelet Singular Value Decomposition)를 이용하여 발전기 탈락 시의 전압 변동 특성을 분석하였다. WSVD 특성 분석을 위해 부산 지역의 345kV급 송전계통을 EMTP-RV로 모델링하였으며, 이 계통모델에서 발전기 탈락을 모의하였다. MATLAB을 통해 이 때 측정된 전압의 WSVD를 계산하여 발전기 탈락에 따른 특성을 분석하였다.

1. 서 론

정보통신산업의 발전 및 생활수준의 향상에 따라 고품질의 전력이 요구되는 기기가 널리 보급되어 왔다. 그러나 이러한 장비들에 민감한 영향을 미치는 계통외란에 의한 전력품질저하는 외란의 지속시간이 짧고, 국지적인 현상이 많아 전력품질의 정확한 측정, 평가 및 분석이 어려울 뿐만 아니라, 이에 대한 대책을 수립하기도 쉽지 않은 상황이다. 따라서 전력품질 문제에 능동적으로 대처하기 위해 계통에서 발생하는 외란원인을 검출하고, 이를 감쇄시킴으로써 양질의 전력을 공급할 수 있도록 전력품질을 정확히 진단할 수 있는 기술의 필요성이 대두되고 있다. 전력계통의 외란 및 과도현상을 검출하기 위한 기존의 방법으로 푸리에 변환 등이 이용되어 왔으나 그 기술들의 단점 때문에 전력품질을 진단하는데 불편함이 있었다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법으로 WT(Wavelet Transform)가 제시되었다. WT는 무빙 윈도우를 도입함으로써 고주파수에서는 시간 분해능이 뛰어나고, 저주파수에서는 주파수 분해능이 좋은 특성을 나타낸다. 이러한 특징을 이용하여 파형 분석 시 원신호의 기본파 성분에 대한 정보를 유지하면서 과도 성분을 검출할 수 있다[1].

본 논문에서는 WT와 SVD(Singular Value Decomposition)을 통합한 WSVD(Wavelet Singular Value Decomposition) 방법을 사용하여 발전기 탈락에 따른 영향을 분석하였다. WSVD의 효과를 알아보기 위하여 부산 지역 345kV급 송전계통을 EMTP-RV로 모델링하였으며, 이 모델 계통에서 발전기 탈락을 모의한 후, MATLAB을 이용하여 이 때 측정된 전압에 대한 WSVD를 수행하였다. 이 과정을 통해 발전기 탈락 시의 전압 특성을 분석하였다.

2. Wavelet Singular Value Decomposition

2.1 Discrete Wavelet Transform

DWT(Discrete Wavelet Transform)를 이용하여 임의의 신호를 정확하게 분석하기 위해서는 모든 scale에 대해서 고려해야 한다. 하지만 모든 scale을 고려하여 wavelet 계수를 구할 경우 데이터의 양이 매우 커져서 분석 시간이 길어지기 때문에 1988년 Mallet에 의해서 개발된 2의 멱승 형태에 기초한 DWT을 사용하는 것이 더욱 효율적이다. DWT는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$D_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k S[n] \Psi\left[\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right] \tag{1}$$

여기서 $S[n]$는 원신호를 나타내며 a_0^m은 scale의 변수, $nb_0 a_0^m$은 shift의 변수이며 Ψ는 mother wavelet이다[2].

DWT 과정을 통해 cA(Approximation Coefficients)와 cD(Detail Coefficients)를 얻을 수 있다. 여기서 cA는 고스케일-저주파 성분을 나타내고, cD는 저스케일-고주파 성분을 나타내고, DWT는 이와 같은 특성으로 시간과 주파수 영역을 동시에 분석할 수 있는 장점을 갖는다.

2.2 Singular Valued Decomposition

SVD(Singular Valued Decomposition)는 크기가 $m \times n$이고, rank가 r인 임의의 행렬 A를 $m \times r$의 직교행렬 U, $n \times r$의 직교행렬 V의 전치행렬, $r \times r$인 대각 행렬 S로 분해하여, 행렬 A의 singular value를 계산하는 방법으로, 식 (2)와 같다.

$$A = USV^T \tag{2}$$

여기서 대각 행렬 S의 대각 성분은 식 (3)과 같이 행렬 A의 singular value로 이루어진다.

$$S = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \bullet & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \bullet & 0 & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ 0 & 0 & \bullet & \lambda_{r-1} & 0 \\ 0 & 0 & \bullet & 0 & \lambda_r \end{bmatrix} \tag{3}$$

SVD 방식을 사용하면 기존의 데이터가 가지고 있는 정보를 유지하면서 데이터의 양을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다[3].

2.3 Wavlet Singular Value Decomposition

WSVD는 WT와 SVD를 통합하여 신호를 처리하는 방법이다. 우선 WT를 통해 cA와 cD를 얻는다. 다음으로 cA에 SVD 방식을 이용해서 SA(Singular Value of Approximation)를 계산하고, cD를 이용한 SD(Singular Value of Detail)는 식 (4), (5)와 같이 계산된다.

$$SD1 = \sum_{k=n/4}^{3n/4} |cD(k)| \tag{4}$$

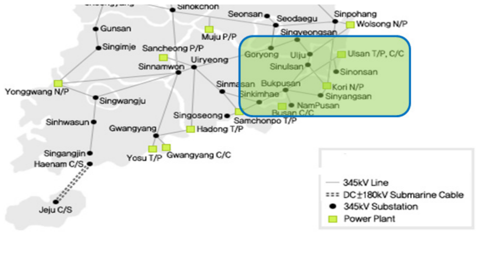
$$SD(i) = \sum_{k=i-n+1}^{i} SD1(k) \tag{5}$$

식 (4)에서 cD의 절대값의 부분합을 하는 이유는 변환된 신호의 앞뒤 부분에 원하지 않는 값을 제거하기 위함이다. 그리고 mother wavelet에 따른 결과 변화를 줄이기 위해 식 (5)와 같이 과거의 값을 합하였다. 이렇게 얻어진 SA와 SD값을 이용해서 신호의 특성을 분석할 수 있다.

3. 사례 연구

3.1 계통 모델

발전기 탈락 시의 특성을 분석하기 위해 부산 지역의 345kV 송전 계통을 선택하였다. 그림 1은 KEPCO의 남부지역 345kV 송전 모델이며, 그림 1에서 표시된 부분을 모델링하였다. 송전선로는 실제 데이터를 바탕으로 분포선로정수모델로 표현하였고, 발전기와 조속기 및 여자기를 EMTP-RV로 모델링하였다. 154kV 이하 계통은 부하로 처리하였다.



<그림 1> 계통도

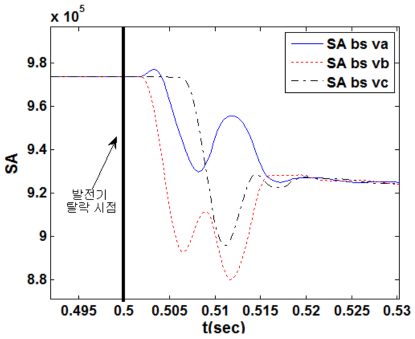
3.2 모의 조건

모델계통의 부산 C/C에 연결된 동일한 특성의 가스 터빈 발전기 8기의 탈락을 모의하였다. 이 때, 부산 C/C와 20km 떨어진 북부산3 모선에서 2.88kHz(48샘플/1주기)의 샘플링 주파수로 전압을 측정하였다. 여기서 WSVD 계산을 위한 WT의 레벨은 1로 선택하였고, mother wavelet은 Daubechies4를 사용하였다. 그리고 무빙 윈도우의 크기는 24로 선정하였다.

3.3 시뮬레이션 결과

3.3.1 발전기 탈락에 따른 SA 특성 분석

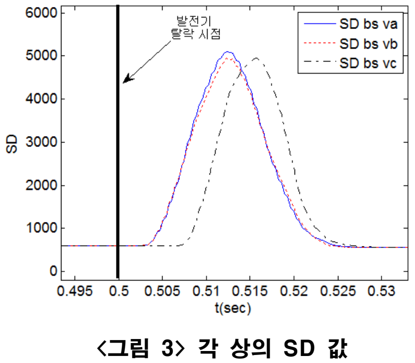
그림 2는 총 1315.2MVA의 전력을 생산하던 발전기 8기를 0.5초에서 탈락 시켰을 때, 시간에 따른 SA의 변화를 나타낸다. 그림 2에서 발전기 탈락 후 약 한 주기 동안, 과도 상태가 지속되었고 그 후에는 삼상의 SA의 크기가 일정해졌다. 과도 상태 시에는 삼상에서 undershoot가 나타났고, 발전기 탈락 시 삼상의 위상에 따라 과도상태일 때의 SA의 최솟값, 최솟값에 도달되는 시간, overshoot를 갖는 상이 변화했다. 하지만 과도 상태 후의 SA는 위상에 관계없이 일정했다. SA가 이러한 변화를 나타내는 이유는 SA가 신호의 크기 변화에 대한 정보를 갖고 있기 때문이다. 따라서, 발전기 탈락에 의해 발생하는 과도 상태와 voltage sag의 영향으로 SA가 그림 2와 같이 변하는 것이다.



<그림 2> 각 상의 SA값

3.3.2 발전기 탈락에 따른 SD 특성 분석

그림 3은 총 1315.2MVA의 전력을 생산하던 발전기 8기를 0.5초에서 탈락 시켰을 때, 시간에 따른 SD의 변화를 나타낸다. 발전기가 탈락한 이후, 모든 상에서 overshoot가 발생했다. 그 이유는 발전기 탈락에 따른 과도상태에서 전압에 고주파 성분이 포함되기 때문에, 주파수영역 분석에 사용되는 cD의 부분합인 SD가 상승하는 것이다. 발전기 탈락 약 한 주기 안에 SD는 최댓값을 갖고, 약 두 주기 후에 일정한 값을 갖게 되는데, 그 값은 과도 상태 이전의 값과 거의 같다. 발전기 탈락 시점의 위상에 따라 SD가 최댓값에 도달하는 시간은 달라지지만, 최댓값은 위상에 따른 영향을 적게 받는다.

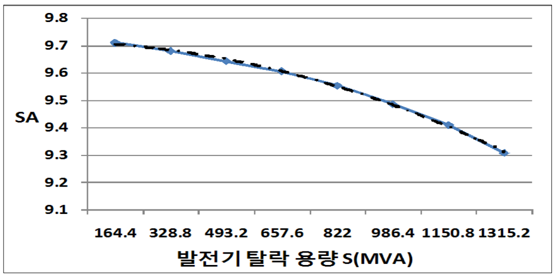


<그림 3> 각 상의 SD 값

3.3 시뮬레이션 결과 검토

3.4.1 용량에 따른 SA 특성 분석

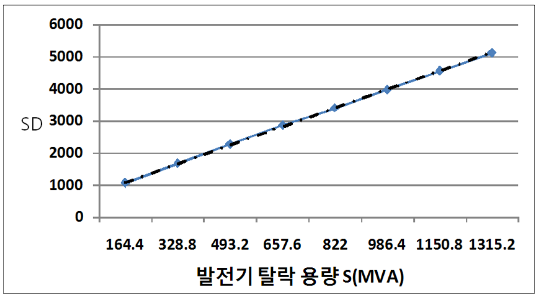
계통모델에서 발전기 탈락 시 SA값은 약 한 주기 동안 과도상태가 지속된다. 삼상에서 발전기 탈락 시점의 위상에 따라 SA가 최솟값에 도달하는 시간은 상이하였으나, 삼상의 SA 최솟값의 평균은 거의 일정하다. 이 때 발전기 탈락 용량을 증가시키면서 삼상의 SA 최솟값의 평균을 추출하였다. 그림 4는 발전기 탈락 용량에 따른 삼상의 SA 최솟값의 평균을 보여준다. 여기서 각 네모 표시는 발전기 탈락 용량에 따른 삼상의 SA 최솟값의 평균을 나타내며, 점선은 최소자승법을 통해 계산된 추세선이다. 이 추세선에서 발전기 탈락 용량과 3상의 SA의 최솟값의 평균이 2차 함수의 형태를 보이며, 이러한 결과는 SVD 계산을 통해 singular value를 계산할 때, 신호행렬과 신호행렬의 전치행렬을 곱하기 때문에 나타난다.



<그림 4> 발전기 탈락 용량에 따른 SA의 최솟값 변화

3.4.2 용량에 따른 SD 특성 분석

발전기 탈락에 의해 생기는 과도 상태 시에 SD의 overshoot가 발생한다. 이 때 발전기 탈락 용량을 증가시키면서 삼상의 SD 최댓값의 평균을 추출하였다. 그림 5는 발전기 탈락 용량에 따른 삼상의 SD 최댓값의 평균이다. 여기서 삼상의 SD 최댓값의 평균을 네모로 표시했고, 최소자승법을 통해 계산된 추세선은 점선으로 나타냈다. 이 추세선을 통해 발전기 탈락 용량에 따라 삼상의 SD의 최댓값의 평균이 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.



<그림 5> 발전기 탈락 용량에 따른 SD의 최댓값 변화

4. 결 론

본 논문에서는 실제 계통을 모델링하였으며, 시뮬레이션 결과로부터 얻은 전압의 WSVD로 SA와 SD값을 이용하여 발전기 탈락 시의 특성을 분석하였다. 발전기 탈락 시에는 sag가 발생하기 때문에 과도 상태가 나타나며, 이 때 SA에서는 undershoot가 나타나고 SA의 최솟값은 발전기 탈락 용량의 제곱에 반비례하는 2차함수의 형태이다. 또한 SD에서도 overshoot가 나타났지만 SA와는 달리 SD의 최댓값은 발전기 탈락 용량에 비례하는 선형함수의 형태를 보인다. 과도 상태 이후에 신호의 크기와 관련이 있는 SA값은 정상상태에서보다 감소하였으며, 주파수와 관련이 있는 SD값은 큰 변화가 없었다. 발전기 탈락으로 인한 전압의 파형은 미세한 변화가 있었지만, 그 작은 변화에도 WSVD를 통해 얻은 SA와 SD값은 매우 큰 변화를 보였다. 이를 통해서 WSVD가 발전기 탈락 시의 특성에 매우 용이하다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

[1] 손영락, “웨이브렛 변환을 이용한 배전계통의 전력품질 외란 검출에 관한 연구”, 전기학회논문지A, 54A-7-2, pp.328~336
[2] 박철원, “DWT를 이용한 전력시스템의 고장검출 기법”, 2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2009. 7. 14 – 17
[3] Zhengyou He, “Fault Detection and Classification in EHV Transmission Line Based on Wavelet Singular Entropy”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 4, OCT. 2010