

Wavelet Singular Value Decomposition을 이용한 부하 탈락 검출 알고리즘 개발

한 준, 김원기, 이재원, 김철환
성균관대학교

Development of Algorithm to Detect Load Shedding Using Wavelet Singular Value Decomposition

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

Abstract - In this paper, the algorithm for detecting load shedding based on Wavelet Singular Value Decomposition(WSVD) is proposed. WSVD is method of signal processing which combine Wavelet Transform(WT) and Singular Value Decomposition(SVD) to analyze transients in power system. 345kV Busan transmission system is modeled by EMTP-RV and simulations according to successive change of load capability are conducted. This paper analyzes characteristics of WSVD by using simulation results and proposes algorithm for detecting load shedding.

1. 서 론

전력계통의 대규모 및 다양화에 따라 계통의 안정화 및 전력의 안정적인 공급에 대한 중요성이 새롭게 부각되고, 이에 대한 다각적인 연구가 진행되고 있다. 따라서 광역계통 보호 및 안정화 확립을 위한 기술 개발을 위하여 각종 외란 검출 알고리즘의 개발이 필요하다.

WT(Wavelet Transform)은 신호와 주파수의 크기를 동시에 분석하는 신호처리 방법으로, 그 목적은 신호의 주파수 성분을 추출하는 것이다. 이것은 Fourier Transform과 매우 유사하지만, 시간에 따른 주파수 성분의 변화를 통해 그 주파수 성분의 존재와 위치까지 알 수 있다는 차이점이 있다. SVD(Singular Value Decomposition)은 행렬을 특정한 구조로 분해하는 방식으로, 행렬의 스펙트럼 이론을 임의의 비정방행렬에 대해 일반화한 것이다. 스펙트럼 이론을 통해 직교 정사각행렬을 고유값을 기저로 하는 대각행렬로 분해하여 신호의 크기 변화를 나타낼 수 있다. WSVD(Wavelet Singular Value Decomposition)은 이러한 두 가지의 신호처리 방법의 장점을 융합한 신호 처리 방법이다.

본 논문에서는 WSVD를 이용한 송전계통에서의 부하 탈락 검출 알고리즘을 제안하였다. 우선, EMTP-RV를 이용하여 우리나라 남부지역의 345kV급 계통을 모델링 하였으며, 대상 계통에서 다양한 지역의 부하 탈락을 모의하였다. 그 결과들을 MATLAB을 통해 WSVD를 계산하여 부하 탈락 시 나타나는 WSVD의 특징을 분석하였으며, 이를 토대로 부하 탈락을 검출하는 알고리즘을 개발하였다.

2. 본 론

2.1 Wavelet Transform

WT는 원신호에 대한 함수를 여러 형태로 변환된 mother wavelet으로 적분하여 변환시키는 것이며, 아날로그 영역과 디지털 영역에 적용이 가능하다. 이 중 디지털 영역에 적용되는 DWT(Discrete Wavelet Transform)은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$DWT(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x[n] g\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (1)$$

여기서 $g(n)$ 은 mother wavelet, $x(n)$ 은 입력신호, scaling 및 translation 파라미터 a 와 b 는 파라미터 m 의 함수이다. 보통 신호에 대한 저주파 성분은 신호의 고유 특성을 나타내며, 고주파 성분은 미세한 특성을 나타낸다. WT에서는 이와 같은 특성을 approximation과 detail로 정의하며, DWT의 수행과정은 고역필터와 저역필터를 사용하는 2가지 필터링의 개념으로 확장될 수 있다. approximation 필터를 통해서 얻어진 신호는 또 다른 두 개의 저역필터와 고역필터로 분해되고, 이 과정이 반복적으로 수행되어 wavelet 필터 뱅크가 구성된다. 각 필터를 거치고 나면 데이터의 크기는 2배가 되기 때문에, down-sampling 기법을 통해 데이터의 양을 줄여서 계산을 신속하게 하도록 한다[1].

2.2 Singular Value Decomposition

SVD는 비정방행렬을 분해하는 방법으로, 임의의 $m \times n$ 행렬 A 를 식 (2)와 같은 세 행렬의 곱으로 분해할 수 있다.

$$A = U A V^T \quad (2)$$

여기서 U 는 $m \times m$ 크기를 갖는 직교행렬이고, $n \times r$ 크기의 직교행렬 V 와 $r \times r$ 크기의 대각행렬 A 가 존재한다. 대각행렬 A 의 대각 성분인 Singular Value는 항상 양의 값을 가진다. 행렬 A 를 이와 같은 세 행렬의 곱으로 나타내는 것을 A 의 SVD라고 한다[2].

2.3 Wavelet Singular Value Decomposition

원신호는 WT를 통해 approximation 계수와 detail 계수로 분해가 된다. 이때 approximations 계수들의 행렬은 SVD과정을 통해 Singular value를 구할 수 있다. 이 값을 SA라고 하며, SA는 원신호의 크기 변화 정보를 포함한다. detail계수에 대한 절대값의 부분합은 SD(Sum of absolute d1)으로 나타내고, SD는 다음 식(3), (4)와 같이 계산된다.

$$SD1 = \sum_{k=n/4}^{3n/4} |d1(k)| \quad (3)$$

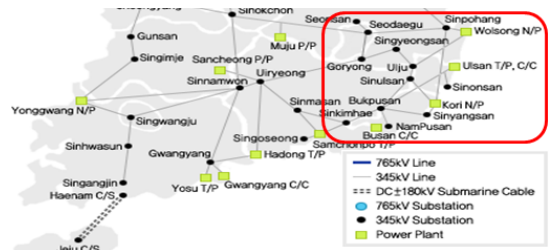
$$SD(i) = \sum_{k=i-n+1}^i SD1(k) \quad (4)$$

3. 사례연구

3.1 계통 모델 및 모의조건

송전계통에서 부하탈락 시 나타나는 변화와 특징을 분석하기 위해서 우리나라 남부지방 345kV급 계통을 EMTP-RV를 통해 구현하였다. 본 계통은 static load와 발전기의 조속기 및 여자기를 포함하였으며, 송전선로는 실제 송전선로 정수를 바탕으로 Constant Parameter 모델을 이용하여 모델링 되었다.

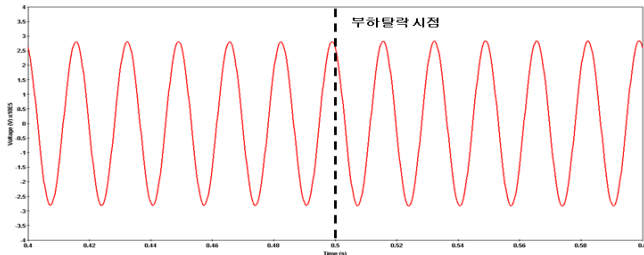
시뮬레이션은 부산, 울산 및 포항 등 세 지역에서의 부하 탈락을 모의하였으며, 사고 발생 시간은 모든 지역에서 0.5s로 동일하게 설정하였다. 한 지역씩 선전하여 5%부터 40% 부하의 용량을 순차적으로 탈락시켰으며, 이 때 각 지역에서 나타나는 SA와 SD값의 변화를 살펴보았다[3].



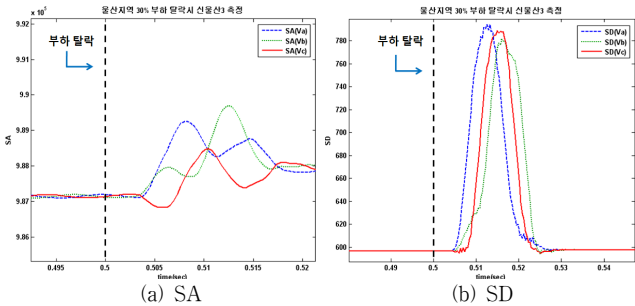
〈그림 1〉 우리나라 남부지역 전력계통 모델

3.2 시뮬레이션 결과

그림 2는 울산지역에서 전체 부하의 30%에 해당하는 용량을 탈락시켰을 때, 신울산3 모선에서 측정된 a상의 전압을 나타낸 파형이다. 그림에서 알 수 있듯이, 고장 발생시점인 0.5s가 지난 이후에 나타나는 파형의 변화로는 고장여부를 판별할 수가 없다. 따라서 WSVD 과정을 통해 나타나는 SA와 SD값의 결과를 분석하여 고장상태를 판별하고자 한다.



〈그림 2〉 울산지역 전체 부하의 30% 탈락시 신울산3의 a상 전압



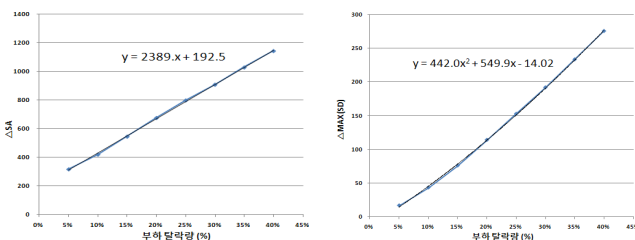
〈그림 3〉 울산지역 전체 부하의 30% 탈락시 신울산3의 SA와 SD

그림 3에서 WSVD 과정을 통한 SA와 SD값의 파형의 변화를 통해 부하 탈락 여부를 판별할 수 있다. SA 값은 부하가 탈락한 시점인 0.5s 이후 a상과 b상이 동시에 상승한 후에 c상이 상승하며, 이 순서는 탈락이 발생하는 위상에 따라 변할 수 있지만 최대값의 크기에 미치는 영향은 적다. 고장 발생 후 한 주기 뒤의 SA값은 고장이 일어나기 전의 SA값보다 증가한 것을 볼 수 있고 SD값의 상승 변화는 SA와 같지만 고장 발생 후 한 주기 뒤의 SD값은 고장이 일어나기 전의 SD값과 동일하다는 차이점이 있다. 다음 표 1을 통해 부하 탈락량에 따른 SA와 SD값의 변화량을 살펴보면 SA와 SD값의 변화는 삼상의 위상차에 따른 큰 차이는 보이지 않으며, 부하 탈락량이 증가할수록 SA와 SD값의 변화량도 증가함을 확인할 수 있다.

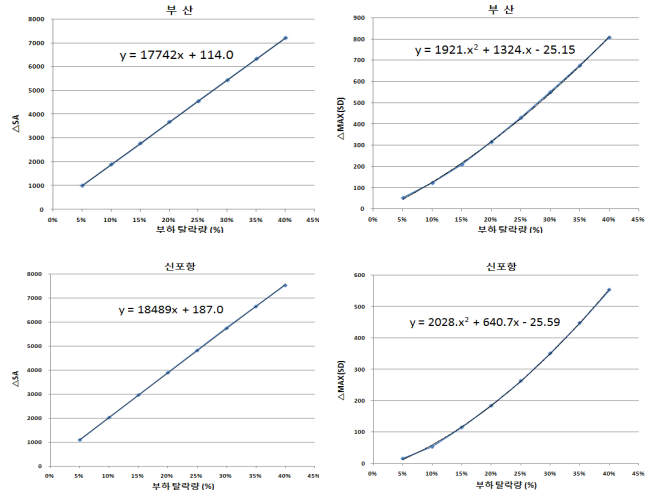
〈표 1〉 울산 지역 부하 탈락량에 따른 SA 및 SD 변화

부하 탈락량	한 주기 후 SA 변화량			한 주기 내 최대 SD 변화량		
	SA(Va)	SA(Vb)	SA(Vc)	SD(Va)	SD(Vb)	SD(Vc)
5%	3.25×10^2	3.08×10^2	3.20×10^2	15.22	18.47	16.77
10%	4.53×10^2	4.27×10^2	3.82×10^2	40.25	46.90	43.05
15%	5.49×10^2	5.85×10^2	5.04×10^2	75.41	77.52	74.80
20%	6.79×10^2	7.24×10^2	6.26×10^2	115.90	112.36	113.74
25%	8.03×10^2	8.58×10^2	7.36×10^2	156.18	148.89	152.83
30%	8.87×10^2	9.91×10^2	8.48×10^2	197.69	185.27	192.29
35%	1.00×10^3	1.12×10^3	9.62×10^2	243.21	223.95	232.77
40%	1.12×10^3	1.25×10^3	1.07×10^3	289.73	264.35	271.93

그림 4에서는 울산 지역에서 30%용량의 부하를 탈락시켰을 때, 신울산3에서 측정된 삼상의 SA와 SD의 평균값을 그래프로 나타내었다. 다음의 추세선을 통하여 각각의 그림에 표기된 수식을 얻을 수 있고, 이 수식을 이용하여 SA와 SD값에 따른 부하 탈락량을 계산할 수 있다. 본 논문에서는 SA가 SD값보다 더욱 선형적인 특성을 나타내므로, SA의 간단한 1차식을 통해 더 효율적이고 정확한 부하 탈락량을 계산하도록 알고리즘을 작성하였다. 울산 지역뿐만 아니라 부산, 포항에서 부하 탈락 시, 발생 지점으로부터 가장 가까운 북부산3에서 측정된 SA와 SD의 평균값의 특징이 모두 유사하다는 것을 그림 5에서 살펴볼 수 있다.



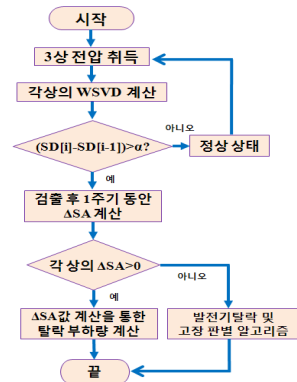
〈그림 4〉 울산지역 30% 부하 탈락시 신울산3에서 측정된 SA와 SD의 평균값



〈그림 5〉 부산, 포항지역 30% 부하 탈락시 SA와 SD의 평균값

3.3 부하 탈락 검출 알고리즘

다음 그림 6은 부하 탈락 검출 알고리즘이다. 여기서 α는 2로 선정하였고, 부하 탈락 지점을 알고 있다는 가정 하에 부하 탈락 시 나타나는 SD값 변화의 비교를 통해서, 부하 탈락 시점 이후 한 주기 뒤의 SA값의 변화량을 이용하여 부하 탈락량을 계산한다.



〈그림 6〉 부하 탈락 검출 알고리즘

4. 결 론

본 논문에서는 광역보호 및 안정화 확립을 위한 기술 개발을 위해 WSVD를 이용한 전력계통의 문제점을 분석하였다. EMTP-RV를 통해 우리나라 남부지역의 345kV계통을 모델링하여 부산, 울산 및 포항 등 세 지역에서 다양한 크기의 부하 탈락을 모의하였으며, 부하 탈락 시 계통에서 나타나는 WSVD의 SA와 SD값의 변화와 특징을 분석하였다. 그 결과 세 지역에서 부하 탈락 시 나타나는 SA와 SD값의 특징이 유사함을 관찰하였고, 선형적인 특성을 갖는 SA값을 통해 부하 탈락량을 계산할 수 있었으며, 이 결과들을 통해 부하 탈락을 검출하는 알고리즘을 개발하였다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

[1] Chul-Hwan Kim and etc. "A Novel Fault-Detection Technique of High-Impedance Arcing Fault in Transmission Lines Using the Wavelet Transform", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No.4, pp. 921-929, October 2002.
 [2] Kirk Baker, "Singular Value Decomposition Tutorial", July 2005.
 [3] 김규호, 송경빈, 김일동, 양정재, 조범섭, "전력계통 신뢰도 강화를 위한 저주파계전기의 적정 부하차단 방안", 대한전기학회 논문지, Vol. 59A No. 7, pp. 1214-1220, March 2010.