

Wavelet 변환을 이용한 voltage sag의 검출기법에 관한 연구

김철환, 이종포, 여상민, 강윤식, 강진수
성균관대학교

채영무
충주대학교

A Study on the Detection Algorithm of Voltage Sag using Wavelet Transform

C.H. Kim, J.P. Lee, S.M. Yeo, Y.S. Kang, J.S. Kang
Sungkyunkwan University

Y.M. Chai
Chungju National University

Abstract - In recent years, both electric utilities and end users have expressed their deep concerns about the quality of electric power. Especially, voltage sag which is one of power quality disturbance is very serious power quality problem on the power system. Voltage sag is a decrease to between 0.1 and 0.9 pu in rms voltage magnitude on the power system for durations from 0.5 cycles to 1 minute. These voltage sags are usually caused by fault conditions, overloads, and starting of large motors. The wavelet transform has attracted considerable attention in the field of power quality analysis recently. It has proved to be a powerful tool to study those transients that have time-localized information. In this paper, different types of voltage sags are simulated by using EMTP. This paper proposes the effective technique for voltage sag detection using wavelet transform.

1. 서 론

전력의 품질은 전력계통의 고유한 전원 전압과 주파수를 유지하는 것이다. 이에 반해, 외란은 정격 전압의 크기와 주파수에서 변동, 왜곡 혹은 정현과 전압 파형의 이탈을 나타낸다.

1980년대 후반 이후, 전력의 품질은 전력산업에 있어 가장 중요한 관심사 중의 하나가 되었으며, 개개 형태의 전력계통 외란들의 집합의 개념인 '전력품질(Power Quality)'이라는 용어로 정의되었다. 이와 같이, 전력품질에 주요한 영향을 끼치는 외란으로는 Voltage Sag, Voltage Swell, 정전, 과전압, 부족전압, 전압변조, 파형왜곡, Surge 등이 있다. 이러한 전력계통의 전력품질에 영향을 미치는 요소 중 가장 일반적인 현상인 Voltage Sag는 계통 사고, 과부하 변동, 대용량 전동기의 기동에 의해 발생되며, 전압의 실효치가 짧은 기간동안 감소하는 현상이다[1].

특히 최근에는 전력품질 외란에 민감한 설비의 증가로 인하여, 전력계통의 효율적인 운용, 관리에 대한 요구가 증가하고 있다. 따라서, 전력계통을 모니터링하고 외란을 검출 및 분석하는 방법에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 그러나, 모니터링에 의해 수집된 데이터 양이 너무 방대하고 전력의 품질 외란을 검출하고 분류하는 방법에 관한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다. Kajihara가 1968년 전력품질이란 용어를 사용한 이후, 전력품질에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, Voltage Sag의 현상에 대한 연구와 검출기법에 대한 연구도 매우 다양하게 이루어지고 있다[2-7].

본 논문에서는 신호 분석 방법인 웨이브렛을 이용하여 신속하고 정확한 Voltage Sag 검출 기법을 제시할 것이다. 따라서, 가장 효과적인 Voltage Sag 검출 기법을 통해 수집된 데이터를 분류할 수 있고, Voltage Sag 발생원인을 파악함으로서 이에 대한 Voltage Sag 저감 기법을 찾을 수 있을 것이다.

2. Voltage Sag

Voltage Sag는 매우 짧은 시간(0.5(cycle)~1(minute))동안 일시적으로 실효전압의 크기가 0.1~0.9(pu)로 감소하는 현상이다[8-9]. Voltage Sag는 주로 전동기의 기동시 정격속도로 가속하는 동안, 전력계통에서 고장이 발생하여 고장을 제거하기 위해서 스위치가 동작할 때, 과도 부하의 변화에 의해서 발생한다.

다음 그림 1은 전형적인 Voltage Sag 현상에 대한 RMS 전압을 나타내고 있는데, RMS 전압의 크기 및 지속시간은 Voltage Sag의 중요한 요소가 된다. 이 경우 전압의 크기는 Voltage Sag 발생 전의 20%의 값으로 감소하였음을 알 수 있고, 약 3 주기의 지속시간을 가지고 있다. 즉, Voltage Sag는 크기와 지속시간으로서 정의된다.

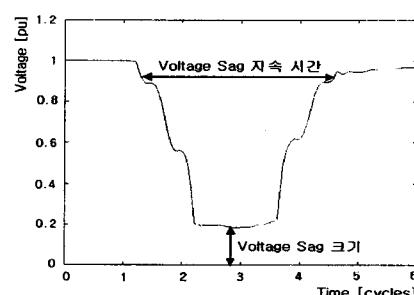


그림 1. RMS Voltage

일반적으로, Voltage Sag의 크기는 전력계통상에서 고장의 위치와 소비자와의 거리, 계통 구성, 고장점 저항 등에 의해 결정되며, 지속시간은 고장이 발생한 순간부터 제거될 때까지의 시간으로 결정된다. 다음 그림 2에서는 여러 가지 Voltage Sag의 발생원인으로부터 크기와 지속시간의 차이를 나타내고 있다[8].

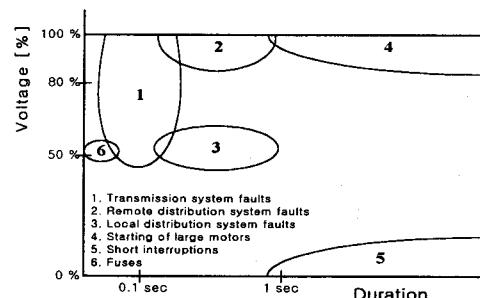


그림 2. 여러 가지 Voltage Sag의 크기와 지속시간

한편, Voltage Sag의 발생은 크기와 지속시간에 관련하여 컴퓨터 장치나 다른 제어장치들이 중단 또는 오동작 될 수 있으며 데이터 손실도 초래한다. Voltage Sag에 민감

한 설비로는 전동기 Contactor, 고효율 방전등, 가변속 구동 장치, PLC(Programmable Logic Controllers) 등이 있다. 전동기 Contactor는 1[cycle] 이상, 0.5[pu] 이하의 전압으로 유지되면 동작을 하지 않고, 고효율 방전등은 0.8[pu] 정도의 전압에서 소등하게 된다. 다음 그림 3에서는 Voltage Sag에 민감한 설비의 동작 범위를 나타내고 있다[2].

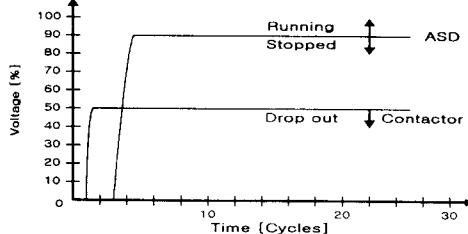


그림 3. Voltage Sag에 민감한 설비의 동작 범위

3. Voltage Sag 검출 기법

3.1 신호 분석 방법

본 연구에서 사용할 웨이브렛 변환은 마더 웨이브렛을 scale하고 shift시켜 만들어진 가변 윈도우로 분석을 수행하게 되며, 이를 가변 윈도우를 웨이브렛이라 부른다. 마더 웨이브렛 $\psi_{a,b}(t)$ 는 대부분 짧고 진동적인 함수로서 평균값이 0이고, 양쪽 끝에서 급격히 감쇄하는 형태를 갖는다 [10].

웨이브렛 변환은 크게 연속 웨이브렛 변환과 이산 웨이브렛 변환이 있다. 여러 단계의 웨이브렛 변환을 수행하게 되면, 엄청나게 많은 양의 데이터가 산출되고 분석시간도 길어지므로 문제가 된다. 따라서, 2의 역승 형태에 기초한 scale과 shift를 선택한다면, 분석은 더욱 효율적으로 수행될 것이다. 이러한 분석은 이산 웨이브렛 변환을 통해서 구현된다[10-11].

이산 웨이브렛 변환은 고역필터와 저역필터를 사용하는 2가지 필터링의 개념으로 확장될 수 있으며, 일반적으로 저역필터를 approximation(A)라고 명하고, 고역필터를 detail(D)라고 명한다. 다음 그림 4는 여러 개의 고역필터 (D1, D2, D3, ..., Dn)와 저역필터(A1, A2, A3, ..., An)로 구성된 웨이브렛 필터 뱅크를 보여준다. 원신호 S는 다음 식 (1)과 같이 재구성될 수 있다.

$$S = D1 + D2 + D3 + \dots + Dn + An \quad (1)$$

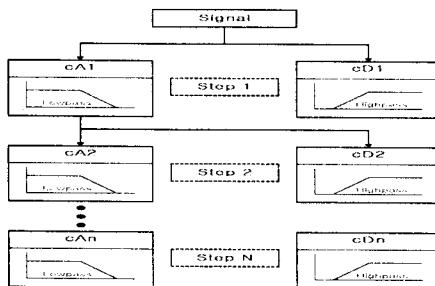


그림 4. 고역과 저역 필터로 구성된 필터뱅크

3.2 Voltage Sag 검출 알고리즘

Voltage Sag 검출 알고리즘은 Detail 1 성분의 계수값에 대하여 Moving window 개념을 사용하여 한 샘플씩 이동하면서 구할 수 있는 $d1$ 계수값의 합을 이용하였다. 또한 마더 웨이브렛으로는 발생시간과 소멸시간, 연산량 등을 고려하여 보았을 경우, 가장 적합한 마더 웨이브렛으로

알려져 있는 Daubechies 4를 이용하였다. 다음 그림 5는 웨이브렛 변환을 이용한 Voltage Sag 검출 알고리즘을 나타내고 있다.

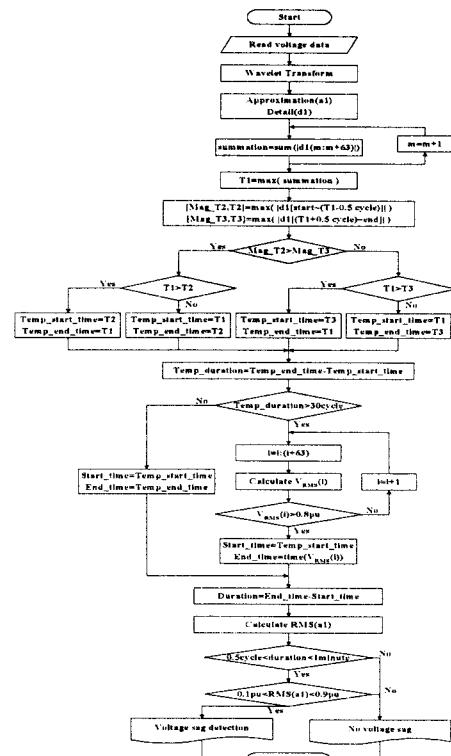


그림 5. Voltage sag 검출 알고리즘

4. 시뮬레이션 및 결과

4.1 모델 계통

본 논문에서는 Voltage Sag의 모델링과 제안된 알고리즘의 시험을 위하여 다음 그림 6과 같은 계통을 모델링하였다. 230[kV]의 전원을 가지는 본 전력계통은 5개의 강압용 변압기, 6개의 역률 개선용 커패시터 백크, 7개의 선형 부하 및 대용량 유도전동기 부하 등으로 구성되어 있으며, STEP 1 변압기를 기준으로 크게 송전계통과 배전계통으로 구분된다. 본 모델 계통은 EMTP를 이용하여 모델링하였으며, 한 주기당 64 샘플, 3840[Hz] 샘플링 주파수를 가진다. 송전계통의 모델링에 있어서는 전원과 230kV 모선사이에서는 각각 400[Ω]을 갖는 서지 임피던스를 고려한 전원등가선으로 표현하였으며, 230kV와 REC 모선 사이의 송전선로는 PI 등가 모델로 나타내었다. 배전계통의 모델링에 있어서는 Δ-Y 결선으로 구성된 여러 가지 용량의 변압기를 통하여 연결되는 여러 가지 모선에서 다양한 형태의 부하와 역률개선용 커패시터를 표현하였다.

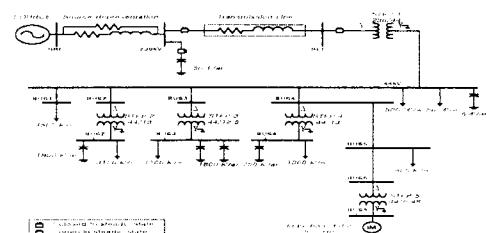


그림 6. 모델 전력계통도

Voltage Sag 현상 모의는 그림 5에 나타난 모델 전력계 통도에서 송전계통과 배전계통으로 크게 나누어 모의하였다. 또한 다양한 경우의 Voltage Sag를 모의하기 위하여, 1선 지락 및 선간 단락 고장, 3상사고 등의 고장 유형과 고장 위치, 고장 발생각, Voltage Sag의 지속시간 등을 변화시켜 20가지 경우를 발생시켜보았다.

4.2 Voltage Sag 검출 결과

다음 그림 7은 db4 웨이브렛 변환을 이용한 4단계까지의 분해시 변환 결과의 예를 보여준다. 샘플링 주파수는 3840[Hz]이므로, d1 계수 값에서는 1920~960[Hz] 주파수 성분, d2 계수 값에서는 960~480[Hz], d3 계수 값에서는 480~240[Hz], d4 계수 값에서는 240~120[Hz]의 주파수 성분을 나타낸다.

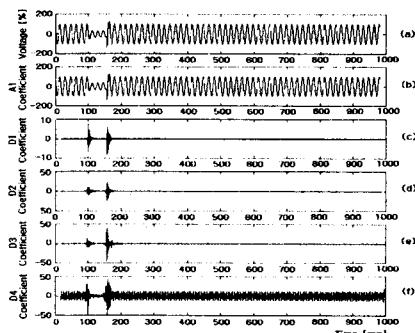


그림 7. 웨이브렛 변환 결과

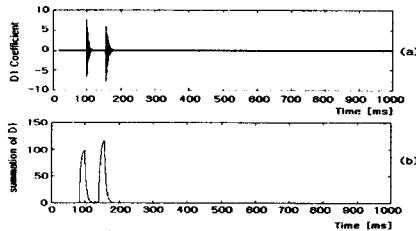


그림 8. d1 계수 값 및 계수값의 합

그림 8은 그림 7에서 보여준 db4 웨이브렛 변환을 이용한 4단계까지의 분해시 웨이브렛 변환 결과 중 d1 계수값 및 d1 계수값의 합을 나타내고 있다. 그림 8(a)는 d1 계수값을 나타내고 있으며, 그림 8(b)는 Moving window 개념을 사용하여 한 샘플씩 이동하면서 구한 d1 계수값의 합을 나타내고 있다. 그림 8에서의 Voltage Sag는 표 1에서의 Case 10의 경우로서 발생시간 추정 결과는 98.4[ms]이고, 소멸시간 추정 결과는 155.7[ms]이다. 발생시간 추정 오차 및 소멸시간 추정 오차는 각각 0.0104[cycle], 0.0051[cycle]으로 빠른 검출 결과를 보이고 있다. 다음 표 1은 20가지 경우에 대한 Voltage Sag의 검출 결과를 정리한 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 전력품질에 영향을 미치는 여러 가지 외란 중 전력계통 내에서 가장 빈번히 발생하는 Voltage Sag 현상에 대한 검출 알고리즘을 제시하였다. 전력계통의 외란과 같이 아주 짧은 시간동안 존재하는 과도 현상을 분석하는데 많은 이점을 가지고 있는 웨이브렛을 사용하여 알고리즘을 구성하였다. 또한 제안한 알고리즘의 성능을 시험하기 위하여 EMTP를 이용하여 여러 개의 변압기, 역률 개선용 커페시터 뱅크, 선형부하 등이 있는 송·배전 계통을 모델링하였으며, 20가지의 Voltage Sag를 발생하여,

제시한 알고리즘을 시험하였다.

표 1. 웨이브렛 변환을 이용한 Voltage Sag 검출 결과

Case	발생시간		소멸시간		a1 계수의 RMS[pu]
	시간 추정 [ms]	오차 [cycle]	시간 추정 [ms]	오차 [cycle]	
1	63.0	0.0312	512.5	0.0000	0.5357
2	80.2	0.0211	146.9	0.0207	0.5558
3	182.3	0.0211	522.9	0.0080	0.5608
4	507.8	0.0293	737.5	0.0183	0.5318
5	147.4	0.0187	346.9	0.0125	0.7755
6	91.1	0.0570	211.5	0.0208	0.5007
7	230.7	0.0590	499.0	0.0397	0.8034
8	195.0	0.0468	628.4	0.0469	0.5395
9	124.5	0.0292	541.7	0.0020	0.7083
10	95.8	0.0322	301.0	0.0006	0.5991
11	98.4	0.0104	155.7	0.0051	0.3644
12	57.3	0.0605	410.9	0.0231	0.5811
13	564.1	0.0104	820.8	0.0100	0.3897
14	214.1	0.0590	629.2	0.0000	0.8419
15	79.9	0.0367	512.5	0.0000	0.7557
16	694.0	0.0625	922.9	0.0483	0.7053
17	320.1	0.0471	632.3	0.0025	0.5451
18	416.1	0.0313	652.3	0.0248	0.2645
19	150.3	0.0399	257.6	0.0284	0.7395
20	50.3	0.0158	685.2	0.0938	0.8849
	평균	0.0360	평균	0.0203	
	오차	[cycle]	오차	[cycle]	

표 1에서 보는 바와 같이 평균 0.028[cycles]정도의 오차를 가지고, Voltage Sag를 검출해내고 있음을 알 수 있으며, 따라서, 제안한 알고리즘은 Voltage Sag를 검출하는데 효과적인 방법이다.

참고 문헌

- Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill.
- Mark F. McGranaghan, David R. Mueller, Marek J. Samotyi, "Voltage Sag in Industrial Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, pp. 397-403, 1993.
- Kai Yao, Don Koval, Wilsun Xu, John Salmon, "Modelling Consumer Voltage Sags Caused by Distribution Primary Faults", Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 3, pp. 1277-1282, 1999.
- Antony C. Parsons, "A Wavelet-Based Procedure for Automatically Determining the Beginning and End of Transmission System of Voltage Sags", IEEE 0-7803-4403-0, pp. 1310-1315, 1998.
- O. Poisson, P. Rioual, M. Meunier, "New Signal Processing Tools Applied to Power Quality Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 561-566, 1998.
- 남상원, "특징벡터 결합과 신경회로망을 이용한 전력의 외자동 식별", 기초전력공학공동연구소, 최종보고서, 1997.
- 고영훈, 김철환, "웨이브렛 변환을 이용한 Voltage Sag 검출", 대한전기학회, Vol. 49, No. 1, 2000. 9.
- Mario Fabiano Alves, Tatiana Nesralha Ribeiro, "Voltage Sag : An Overview of IEC and IEEE Standards and Application Criteria", Proceedings of the 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 2, pp. 585-589, 1999.
- M.H.J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems : Voltage Sags and Interruptions", New York, IEEE Press, 1999.
- M. Misiti, G. Oppenheim, "Wavelet Toolbox", The MATH WORKS Inc, 1996.
- C. Sidney Burrus, Ramesh A. Gopinath, Haitao Guo, "Introduction to Wavelets and Wavelet Transform", Prenticehall, 1998.