

## Non-Rectangular Sag를 고려한 새로운 Sag의 평가 방법

원동준\*, 정일엽\*, 김종문\*, 안선주\*, 문승일\*, 서장철<sup>1</sup>, 최중웅<sup>2</sup>  
 \*서울대학교 전기컴퓨터공학부, <sup>1</sup>(주)LG산전

### A New Characterizing Method for Non-Rectangular Sag

D.J. Won\*, I.Y. Chung\*, J.M. Kim\*, S.J. Ahn\*, S.I. Moon\*, J.C. Seo<sup>1</sup>, J.W. Choe<sup>2</sup>  
 \*Seoul National University, <sup>1</sup>LG Industrial Systems

**Abstract** - This paper presents a new method to characterize sag event. Power quality monitoring algorithm to analyze PQ problems is described. This paper shows that conventional characterizing method which makes use of only sag magnitude and sag duration has some limitations. It characterizes non-rectangular sag as more severe one. In addition, it can't count on voltage tolerance characteristics of each apparatus. In order to solve these problems, this paper present a new characterizing method and it properly characterizes non-rectangular sag considering the voltage tolerance characteristics.

RMS 값의 비를 백분율로 나타내며, 지속시간은 전압이 기준전압 이하에 전압이 머물러 있는 시간으로 정의하였다. 그러나 이러한 방법은 사고가 제거되면 전압이 즉시 회복된다는 가정(rectangular sag) 하에 적용되었으므로, 기기의 전압 내성 특성에 따른 영향을 정확히 고려해 줄 수 없고, 특히 유도기의 재가속에 의해 발생하는 non-rectangular sag의 경우 실제의 영향보다 과대 평가되는 경향이 있다.

따라서 본 논문에서는 non-rectangular sag의 경우 까지 포함하여 기기에 미치는 영향을 판별할 수 있는 새로운 sag의 평가 방법을 제안하도록 한다. 이 방법은 기존의 전력품질 측정장비에서 측정된 최저전압과 평균 전압, 지속시간을 이용하여 non-rectangular sag의 전압 파형을 근사한다. 또한 기기의 전압 내성 특성에 따른 한계전압을 이용해 sag의 지속시간을 새롭게 정의함으로써 sag가 기기에 미치는 영향을 정확히 고려할 수 있도록 하였다.

## 1. 서 론

지금까지 전력시스템에서 전력품질은 정전시간, 전압 적정률, 주파수유지율 등의 목표관리에 의해 적정 전력 품질을 유지하는 것을 뜻하였다. 그러나 최근 정보통신 기기, 정밀제어기기 등의 사용이 증가하면서 전력 수용가들은 민감한 장비나 프로세스의 올바른 동작을 위해 점점 더 높은 수준의 전력 품질을 요구하고 있다. 주로 분(minute) 단위 이상에서 정의되는 신뢰도와는 달리 전력품질은 전압 sag나 swell과 같이 몇 주기나 수 초 사이의 매우 짧은 순간의 이벤트들을 다룬다. 순간전압 변동(sag, swell), 고조파(harmonics), 전압불평형(unbalance), 순간정전(interruption), 과도전압변동(transient), 플리커(flicker) 등과 같은 새로운 개념의 전력품질은 아직까지 정확한 측정 및 평가가 이루어지지 않아 피해내역을 파악하기가 어려울 뿐 아니라 구체적인 개선 대책도 마련되어 있지 않은 실정이다. 따라서 전력 품질을 측정하여 이를 분석, 진단해야할 필요성이 커지고 있다. 본 논문에서는 이처럼 중요성을 더해가고 있는 전력품질 모니터링 시스템에 사용되는 알고리즘을 간략하게 살펴보도록 한다[1].

한편 인근 선로의 단락 사고, 과부하, 그리고 모터의 기동 시에 발생하는 sag는 컴퓨터, 정밀 제어 기기, ASD(Adjustable-Speed-Drive) 등과 같이 전압 변동에 민감한 기기에 영향을 미치는데 어떠한 기기들은 전압이 90% 이하로 떨어진 채 1~2 주기 정도만 지속되어도 피해를 입기도 한다. 한 번의 sag로 인한 수용가의 피해는 순간정전의 경우보다 작지만, sag의 발생 횟수가 훨씬 많기 때문에 전체적인 영향은 훨씬 크다. 또한 정전 사고의 경우는 바로 주변의 계통에서 사고가 난 경우에 발생하지만, sag는 멀리 떨어진 곳에서의 사고에 의해서도 발생할 수 있기 때문에 sag로 인한 영향을 정확히 평가하는 것은 매우 중요하다[2].

Sag가 발생하면 전압의 파형에 왜곡이 생기는데 기존의 방법은 sag를 크기와 지속시간으로 평가하였다. Sag의 크기는 정상시 전압의 RMS 값에 대한 최저전압의

## 2. 본 론

### 2.1 전력품질 모니터링 알고리즘

전력품질 다음과 같이 크게 두 가지로 구분하여 생각할 수 있다. 첫째는 순시 전압 변동 및 과도상태 전압과 같이 순간적으로 전압이나 전류가 변동하는 것(disturbance)이며, 다른 하나는 비교적 긴 시간동안에 전압이나 전류의 파형에 변동이 발생하거나 노이즈가 발생하는 것(steady state variation)으로 고조파, 플리커 및 과전압과 저전압 등이 이에 속한다.

이러한 전력 품질을 측정하는 과정을 그림 1에 간략히 나타내었다. 우선 3상과 중성선 등 선로의 전압, 전류를 측정하여 디지털 신호로 바꾸어 주고(data acquisition), 이 디지털 신호로부터 다양한 신호 처리 알고리즘을 통해 전압과 전류의 RMS 값, 고조파 성분, 그리고 주파수 등 기본적인 데이터를 측정한다(characterizing). 이렇게 측정된 기본 데이터를 분석하여 전력품질 이벤트를 감지하고(power quality analysis) 전력품질 이벤트와 저장된 사고 파형을 통계적으로 분석한다(statistical analysis)[3].

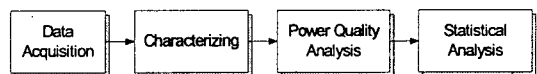


그림 1 전력품질 측정을 위한 흐름도

### 2.2 기존의 sag 평가 방법

Sag가 발생하면 상당히 큰 고주파 전압 성분이 생기고 사고 후에 과도 전압 상승(overshoot)이 발생하며, 불평형 사고의 경우 위상각 점프도 생기는 등 전압의 파형에 왜곡이 생긴다. 그러나 이러한 모든 요소들을 다 고려할 수는 없기 때문에 크기와 지속시간만으로 sag의

특성을 나타내는 것이 가장 일반적이다. 실제 모니터링 시스템에서 sag의 크기와 지속시간을 정하는 방법을 살펴보면 다음과 같다.

전력품질 모니터들은 매 주기별로 전압의 RMS 값을 계산한다. 이렇게 계산된 RMS 값들을 이용해 sag의 특성을 나타내는 하나의 값을 정하는 방법은 다양하게 존재하는데, 대부분의 모니터들은 최저 RMS 전압으로 sag의 크기를 나타낸다. 많은 경우에 최저전압 근처에서 전압이 비교적 일정하게 유지되고, 전기 기기들은 전압이 어느 이하로 떨어지면 동작을 멈추기 때문에 최저 RMS 전압으로 sag의 크기를 나타내는 것은 어느 정도 타당성이 있다. Sag의 크기를 수치화 하여 나타낼 때는 평상시 전압의 RMS 값에 대한 최저전압의 비율 백분율로 표시한다. Sag의 지속시간은 사고 발생시간과 사고 제거시간으로부터 결정되며, 지금까지의 방법들에서는 전압의 RMS 값이 주어진 기준전압( $V_{thr}$ ) 이하에 머물러 있는 시간으로 정의하였다. 이 기준전압은 각 모니터 별로 조금씩 다르지만 대부분의 경우 평상시 전압의 90%를 적용하고 있다.

### 2.3 기존 평가방법의 문제점

기존의 방법은 rectangular sag의 경우만을 고려하여 최저전압의 크기와 지속시간만으로 sag를 평가하였으므로 유도기의 재가속에 의한 non-rectangular sag가 발생했을 때 그 영향을 실제의 경우보다 과도하게 부풀려 평가하는 경향이 있고, 지속시간을 결정할 때 기준전압을 일률적으로 적용하기 때문에 기기의 전압 내성 특성에 따른 sag의 영향을 반영해 주지 못하는 한계점이 있다.

#### 2.3.1 Non-rectangular sag의 과대평가 문제

기존의 방법은 사고제거 후에 전압이 곧바로 평상시 전압으로 회복되는 경우만을 고려하여 평가하는데, 유도기가 설치되어 있는 경우에는 사고가 제거된 후에도 이처럼 전압이 즉시 회복되지 않는다(4). 유도기의 출력 또는 전압의 제곱에 비례하므로 전압이 조금만 떨어져서도 토크와 속도는 크게 낮아진다. 사고가 제거되면 유도기는 공극의 필드를 회복하기 위해 평소의 10배에 달하는 전류를 소모한다. 공극에 자속이 회복되면 모터는 재가속을 시작하는데, 이때에도 매우 큰 전류를 필요로 한다. 이러한 유입 전류에 의해 이차적인 sag가 발생하게 되며, 이러한 sag는 수 초 이상 지속된다.

기존의 방법으로는 유도기의 재가속에 의한 non-rectangular sag의 영향이 실제보다 과대 평가된다. 다시 말해 짧고 깊은 순간 전압 강하 이후 긴 시간동안 서서히 전압이 회복되는 특성을 갖는 non-rectangular sag가 긴 시간동안 깊은 전압 강하를 가지는 rectangular sag처럼 평가되고, 따라서 기기에 미치는 영향이 실제보다 더 크게 판단되는 것이다.

#### 2.3.2 일률적 전압기준 설정의 문제

기기별로 동작 전압의 범위와 순간 전압 강하에 견딜 수 있는 시간은 모두 다르다. 각 기기별로 전압의 공급이 정상적으로 이루어지지 않을 때 얼마나 오랫동안 동작할 수 있는지를 나타내는 그래프를 전압 내성 곡선(voltage tolerance curve)이라고 하며 이는 각 기기가 sag에 견딜 수 있는 정도를 나타낸다. 정류기를 사용하여 AC전원을 DC로 변환하는 전원 장치들은 입력 전압이 어느 한계 이하로 떨어지지 않으면 제어 상치에 의해 출력 전압이 일정하게 유지된다. 이 때 제어기가 동작할 수 있는 한계전압을 알면 그 한계전압 이하의 전압이 공급될 때에도 기기가 동작할 수 있는 최대 시간을 결정할 수 있다. 이때 한계전압을  $V_{min}$ , 최대 시간을  $T_{max}$ 라고 하면 기기의 특성을 그림 2와 같은 전압 내성 곡선으로 나타낼 수 있다.

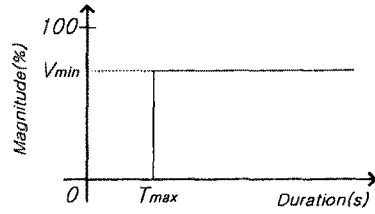


그림 2 전압 내성 곡선

각 기기마다 이러한 전압 내성 특성이 다르기 때문에 같은 사고에 대해서도 기기에 따라 받는 영향이 서로 다르다. 그런데, 기존의 방법은 sag 지속시간을 결정할 때 일정한 기준전압에 따라 정하기 때문에 이러한 기기의 특성에 따른 sag의 영향을 고려할 수가 없다.

### 2.4 새로운 sag 평가 방법

앞에서 언급한 문제점을 개선하기 위해서는 각 기기의 전압 내성 특성을 고려하고, non-rectangular sag도 적절하게 평가할 수 있는 새로운 sag 평가 방법이 필요하다. 본 논문에서는 기존의 방법에서 이미 측정된 sag의 최저전압( $V_{sag}$ ), sag 동안의 평균전압( $V_{avg}$ ), 그리고 기기의 전압 내성 곡선(voltage tolerance curve)에 의해 결정되는 기기의 한계전압( $V_{min}$ )을 이용하여 sag 지속시간  $d'$ 을 새롭게 정의한다. 그림 2와 같은 전압 내성 곡선을 갖는 기기의 경우  $V_{min}$  이하의 전압이  $T_{max}$  이상의 시간동안 지속되는 sag에만 영향을 받는다. 따라서 전압이  $V_{min}$  이하에 머무르는 시간을 새로운 지속시간  $d'$ 로 정의하면, sag가 이 기기에 영향을 미치는지 여부를 판단할 수 있다.

실제 모니터링 시스템의 경우 전압 파형에 관한 완전한 데이터를 갖고 있지 않으므로 최저전압, 평균전압, 지속시간 등과 같이 기존에 측정된 값으로부터 sag동안의 전압 파형을 근사하여야 한다. 본 논문에서는 k차 중근식을 이용하여 파형을 근사하였는데, sag가 시작되는 시점의 시간 t를 0으로 하면 sag 동안의 실제 전압 파형을 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$V(t) = \begin{cases} V_{sag} & (0 \leq t \leq m \cdot d) \\ V_{sag} + (V_{thr} - V_{sag}) \cdot \sqrt{\frac{t - m \cdot d}{(1 - m)d}} & (m \cdot d \leq t \leq d) \end{cases} \quad (1)$$

이 식에서  $m \cdot d$ 는 전압이 최저전압  $V_{sag}$ 에 머물러 있는 시간을 의미하며, 따라서  $m$ 은 0과 1사이의 값을 갖는다. 식 (1)을 이용해 근사한 전압의 파형이 그림 3에 보여지고 있다.

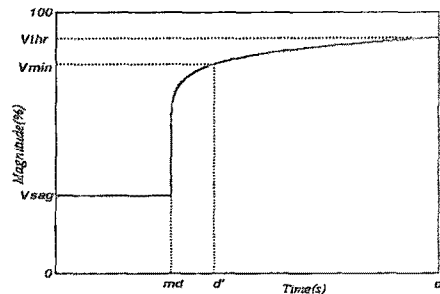


그림 3 Non-rectangular sag의 전압 파형 근사

앞에서 언급한 바와 같이 전압의 파형에 대한 데이터가 없기 때문에  $m$  을 바로 알아낼 수는 없다. 그러나 측정된 값들을 이용하면 다음과 같은 관계에 의해서  $m$  을 계산할 수가 있다. 우선 평균전압  $V_{avg}$  는

$$V_{avg} = V_{sag} + \frac{k}{k+1}(1-m) \cdot (V_{thr} - V_{sag}) \quad (2)$$

이고, 따라서  $m$  은 다음과 같다.

$$m = 1 - \frac{k+1}{k} \cdot \frac{V_{avg} - V_{sag}}{V_{thr} - V_{sag}} \quad (3)$$

sag기간  $d'$  을 전압이 기기의 한계전압  $V_{min}$  이하에 머무르는 시간으로 정의하였으므로, 식 (1)과 (3)을 이용하면

$$V_{min} = V_{sag} + (V_{thr} - V_{sag}) \cdot k \sqrt{\frac{d' - m \cdot d}{(1-m)d}} \quad (4)$$

이고, 따라서  $d'$  은

$$\begin{aligned} d' &= d \cdot \left[ m + (1-m) \cdot \left( \frac{V_{min} - V_{sag}}{V_{thr} - V_{sag}} \right)^k \right] \\ &= d \cdot \left[ 1 - \left( \frac{k+1}{k} \cdot \frac{V_{avg} - V_{sag}}{V_{thr} - V_{sag}} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{V_{min} - V_{sag}}{V_{thr} - V_{sag}} \right)^k \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

과 같이 구할 수가 있다.

완전한 rectangular sag 는 전압이  $V_{sag}$  에 계속 머물러 있다가 순간적으로 정상 전압으로 회복된 경우이므로, 평균전압과 최저전압의 크기가 같다. 식 (5)에서  $V_{avg}$  와  $V_{sag}$  가 같으면  $d$  와  $d'$  이 같아지므로 제안된 방법은 rectangular sag 에 대해서도 정확한 결과를 보장한다. 만약 전압의 파형이 점차 non-rectangular 하게 되면 평균전압과 최저전압의 차이는 커질 것이고, 이 차이가  $d'$  를 정하는 데 반영되므로 non-rectangular sag 의 특성을 기존의 방법에 비해 정확하게 나타낼 수 있다. 또한 같은 크기의 sag 에 대해서도 기기의 한계전압에 따라  $d'$  가 결정되므로, sag 가 각 기기에 미치는 영향도 고려해 줄 수 있음을 알 수 있다.

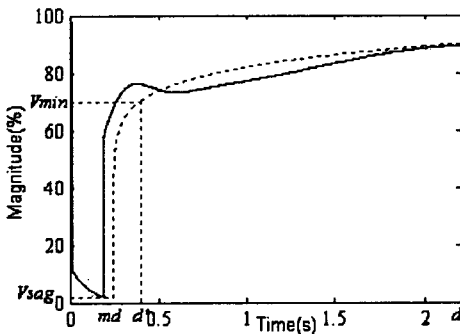


그림 4 Non-rectangular sag에 적용한 결과  
(실선: 실제 파형, 점선: 근사 결과)

그림 4는 non-rectangular sag에 제안한 방법을 적용한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 실선은 최저전압이 2(%), 지속시간이 2.2(s), 평균전압이 73(%)인 non-rectangular sag의 실제 파형을 나타내고 있고, 점선은 이 값들을 이용해  $k$ 를 10으로 하여 근사한 파형을 나타낸다. 이러한 sag가 발생한 지역에 한계전압 ( $V_{min}$ )이 70(%)이고, 최대시간( $T_{max}$ )이 500(ms)인 전압 내성 특성을 갖는 기기가 설치되어 있다고 가정하면, 기존의 방법에서는 이러한 경우 크기가 2%인 sag가 2.2(s) 동안 지속된다고 측정하기 때문에 이 기기는 심각한 피해를 입는다고 판단할 것이다. 그러나 이 논문에서 제안한 방법을 적용하면 새롭게 계산된 sag 지속시간  $d'$ 이 396(ms)이므로 이 기기는 이러한 sag로부터 피해를 입지 않는다고 판단한다. 기기의 특성을 고려할 때 이런 판단이 훨씬 합리적이라고 할 수 있다.

제안하는 방법은 여러 가지 장점을 가지고 있는데, 이를 요약해 보면 다음과 같다.

- rectangular sag와 non-rectangular sag 두 가지 경우 모두 특성을 정확하게 나타낼 수 있다.
- 기존의 방법에서 측정된 값들을 이용하기 때문에 이 방법을 적용하기 위하여 별도의 부가적인 측정을 하지 않아도 된다.
- 이미 설치되어 있는 전력품질 모니터와 기존에 구축된 데이터베이스에 곧바로 적용할 수 있다.
- 전압 내성 특성이 서로 다른 기기들이 한 수용가에 설치되어 있는 경우 모니터의 추가 설치 없이 각 기기에 미치는 영향을 판단할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 기존의 sag 평가 방법을 살펴보고 sag를 평가하는 새로운 방법을 제시하였다. Sag의 크기와 지속 시간으로 sag를 평가하는 기존의 평가 방법은 non-rectangular sag를 실제보다 더욱 심각한 것으로 판단하며, 개별 기기에 미치는 영향을 적절히 평가해 주지 못하였다. 새롭게 제시된 방법은 최저전압과 평균전압, 지속시간을 이용하여 non-rectangular sag의 전압 파형을 근사하고, 기기의 전압 내성 특성에 따른 한계전압을 이용해 sag의 지속시간을 새롭게 정의하였다. 이 방법을 적용하면 non-rectangular sag를 합리적으로 평가하며, 각 기기별 전압 내성 특성을 감안하여 sag를 평가할 수 있다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Mark McGranaghan, "Trends in Power Quality Monitoring", *IEEE Power Engineering Review*, vol.21, Issue 10, Oct.2001
- [2] Math H. J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions", New York: IEEE Press, 2000
- [3] 원동준 외, "전력품질 모니터링 및 알고리즘에 관한 연구", 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, 2001.11.16~17, pp.269~271
- [4] Math H. J. Bollen, "The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.31, No.4, pp.667~674, 1995