

전압품질을 고려한 배전계통의 신뢰도 평가

* 윤상윤*
 송실대학교

김언석**
 한국전기연구소

배주천***
 한국전력공사

김낙경****
 (주)대동기술단

박종신***
 한국전력공사

김재철*
 송실대학교

Reliability Evaluation for Considering the Voltage Quality in Power Distribution Systems

* Yun Sang Yun* Kim Oun Seok** Bae Joo Chun*** Kim Nark Kyung****
 Park Joong Shin*** Kim Jae Chul*

* : Dept. E.E., Soongsil Univ, ** : KERI, *** : KEPCO, **** : Daedong Eng. Co. Ltd.

Abstract - This paper presents a reliability evaluation method for considering the voltage quality. The proposed evaluation methods are contained the sustained interruption, momentary interruption and voltage sag. For momentary interruption, evaluation indexes are divided the duration based index and the interruption cost index. For voltage sag, the final result of evaluation method represents the magnitude for customers' risk due to the voltage sag. The proposed method is tested using the RBTS model and a reliability data in KEPCO's system.

1. 서 론

전력계통의 신뢰도 측정은 계통 운전 계획의 수립 및 시설 투자의 배분 등을 위해 필수적으로 사용되고 있다. 지금까지 배전계통의 신뢰도 평가는 주로 영구정전의 지속시간 및 빈도에 의해 결정되어왔다. 그러나, 산업체 및 업무용 빌딩에서부터 소규모의 주택가에 이르기까지 대부분의 수용가의 전력 외란 민감 설비의 보편적 이용과 도심지 배전 계통의 단거리 고밀도화 현상은 이제까지 신뢰도 평가에 고려되지 않았던 단시간의 전력 품질 문제에 의한 피해를 증대시키고 있다. 이중에서도 순간정전 및 순간전압강하 등의 전압 크기의 품질 문제는 일반적으로 영구정전에 비해 발생 빈도가 높으며 수용가에 따라 심각한 영향을 주고 있다. 따라서 이러한 전압 크기의 품질 문제를 고려한 새로운 신뢰도 평가 방식이 요구된다.

전압 크기의 품질 문제는 대표적으로 영구정전, 순간정전 및 순간전압강하의 세 가지로 구분된다. 순간정전에 대한 연구는 주로 표준 제정, 평가 지표 제시 및 그 영향평가 등으로 구분할 수 있다. IEEE Std. 1159 및 1250에서는 순간정전에 대해 정의하였고 Warren [1]은 순간정전이 배전 신뢰도 지수에 미치는 영향을 평가하였으며, Brown [2] 등은 순간정전의 평가지표를 제시하였다. 순간전압강하에 대한 연구는 표준 제정, 수용가 모니터링 및 수용가 부하에 대한 실험 등의 실질적 영향 평가 및 순간전압강하 특성 분석 및 평가 지표 제시 등의 이론적 영향 평가 등으로 구분할 수 있다. Sekine [3] 등은 수용가 부하에 대한 실험 및 여론조사 등을 통해 수용가 부하의 영향 및 일련의 순간전압강하 현상을 분석하였으며 Lamoree [4] 등은 수용가의 대표적 민감부하에 대한 순간전압강하 영향과 대책을 제시하였다. Conrad [5] 등과 Bollen [6]은 순간전압강하 크기, 지속시간 및 빈도를 예측하는 방법을 제시하였으며, Dugan 등 [7]은 순간전압강하 발생빈도를 이용한 영향 평가 수식을 제시하였다.

본 논문에서는 순간정전 및 순간전압강하가 배전 계통의 신뢰도에 미치는 영향을 평가하기 위한 지표를 제시

하고 있다. 이를 위해, 순간정전의 경우 발생횟수 만을 기준으로 한 기존의 평가 지표와 달리 발생횟수, 지속시간 및 발생 계통의 수용가 부하 구성 등을 고려한 평가 지표를 제시하였다. 또한, 기존의 신뢰도 지수와와의 비교를 위한 순간정전 비용 산출 지수를 제시하였다. 순간전압강하의 경우, 퍼지 모델을 이용한 잠정적 위험도 평가 지수를 제시하였으며, 순간정전 및 순간전압강하의 평가 지표에 모두 부정전 전원 공급 장치 등의 전압 외란 방지 장치를 설비했을 경우의 계통의 영향 저감 요소를 고려하였다. 사례연구는 기존의 순간 정전 평가 지표와 제시한 지표와의 비교, 기존의 순간 전압강하 평가 지표와 제시한 지표와의 비교 및 정전 비용 산출을 통한 기존의 신뢰도 요소와 순간 정전과의 비교 등을 수행하여 이전의 제시된 평가방식과의 차이점을 보였다. 일반적인 신뢰도 평가방식인 몬테카를로 시뮬레이션 방식과 한국전력공사의 누적된 신뢰도 데이터 및 대표적인 배전계통 모델인 Roy Bilinton Test System (RBTS)이 사례 연구를 위해 사용되었다.

2. 전압 크기의 품질 요소

2-1. 정의

이제까지 영구정전, 순간정전 및 순간전압강하 등의 전압 크기의 품질 문제에 대한 정의를 내리고 있는 대표적인 표준은 IEEE Std. 1159 및 Std. 1250이다. Std. 1250이 지속시간에 대한 규정만을 포함하는데 비해 IEEE Std. 1159의 경우, 그 크기와 지속시간의 범위를 명확하게 규정하고 있으므로 본 논문에서는 IEEE Std. 1159에 기준하여 전압 크기의 품질 문제를 정의하였다.

2-2. 발생 메커니즘

배전계통에서의 전압 크기의 품질 문제가 발생하는 메커니즘을 그림 1의 가정된 배전계통에서의 사고 및 사고제거 과정을 통해 설명하였다. 그림 1의 모델 배전계통은 2개의 뱅크(bank)로 구성되어 있으며 각 뱅크에 2개씩의 배전 피더(feeder)가 있다고 가정한다. 그 중 피더 1과 피더 4는 상시 개로 상태인 개폐기가 설치되어 사고 발생에 의한 계통 절체가 가능하도록 되어 있다. 각 피더에 발생하는 사고는 모두 피더 시작점의 차단기가 제거 책무를 가진다고 가정한다. 차단기는 과전류(OCR) 및 지락과전류제한기(OCGR)와 재폐로계전기(reclosing relay)에 의해 동작한다고 가정한다. 피더 1의 사고지점에서 사고가 발생하면 차단기 동작에 의해 사고가 제거되고 일정시간 후 재폐로되어 사고관류 여부를 점검한 후 정해진 횟수에 따라 개로(open) 및 폐로(close)를 반복하며 정해진 횟수에 개로에 도달하면 자동적으로 로크-아웃(lock-out) 상태가 된다. 이때는 발생 사고를 영구사고로 판단하고 피더 1의 피더상에 설치된 상시 폐로 상태의 개폐기를 이용하여 사고점을 검출하고 사고구간을 고립한 후 나머지 구간을 인근 선

로로 절체한다. 순간사고(temporary fault)에 따른 차단 및 재폐로는 사고선로의 수용가 A, B, C에 순간정전을 발생시키며 인근선로 수용가 D, E, F에는 순간전압강하를 야기하게 된다. 영구사고(permanent fault)에 의해서는 이것에 사고선로 수용가 A, B, C에 대한 영구정전이 더해져서 발생하게 된다. 결국 배전계통의 신뢰도를 향상시키기 위한 방식인 재폐로에 의해 부가적인 전압 품질 문제들인 순간정전 및 순간전압강하 등이 발생한다고도 볼 수 있으며 순간전압강하의 경우 그림 1의 모델 계통이 아닌 좀더 많은 피더로 구성된 선로에 있어서는 훨씬 광범위한 인근 선로 수용가에 발생할 수 있다.

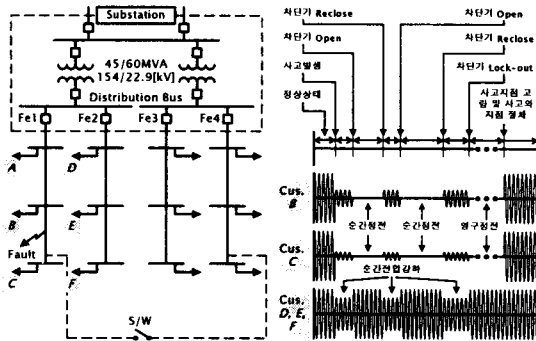


그림 1. 배전 계통 사고제거에 따른 전압 품질 문제의 발생 메커니즘

2-3. 특성 요소의 결정

전압 크기의 품질 문제의 특성 요소의 결정은 상(phase)에 따른 발생 빈도, 지속시간 및 크기의 등의 결정으로 나눌 수 있다.

1) 상(phase)의 카운트

영구정전이나 순간정전의 경우, 국내 배전계통과 같이 3상 일괄 차단 및 재폐로를 시행하는 경우에는 각 상에 공통적으로 영향을 미치게 되므로 각 상간의 영향차이는 없다고 볼 수 있다. 그러나, 순간전압강하의 경우는 보통 사고 종류에 따라 3상에 각기 다른 영향을 줄 수 있다. 1개의 사고에 대해 1개, 2개 내지 모든 3상의 전압이 순간전압강하를 일으킬 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 어떤 사고에 대해 모든 3상이 동일한 확률 값을 가지게 된다고 가정하였다. 만일 3상 사고에 의해 발생한 순간전압강하라면, 순간전압강하 1회로 간주하였다. 이것은, 각 상이 1/3회 씩으로 간주됨을 의미한다 [8]. 따라서, 1선지락 및 선간단락의 경우도 영향 받는 상에 대해 각기 1/3씩으로 간주된다.

2) 빈도(frequency) 및 지속시간과 크기

전압 품질 문제의 발생 빈도에 대한 논의는 많은 의견으로 분분히 나누어진다. 무엇보다도 해당 계통의 신뢰도 자료(reliability data)는 가장 분명한 자료로 이용될 수 있을 것이다. 계통내의 발생 사고의 분석과 이의 종류(일시, 영구)를 집계한 전력회사의 이 자료는 이전부터 공통적으로 누적되고 있으며 이것을 이용하여 충분히 그 발생빈도를 해석할 수 있을 것이다. 그러나 순간정전 및 순간전압강하의 경우, 앞서의 그림 1에서처럼 1번의 사고발생에 의해 수 차례의 연속적인 이벤트의 발생이 뒤따른다는 문제점이 있다. 연속적인 순간정전 및 순간전압강하의 특성 정의를 위해서는 무엇보다도 연속적인 이벤트 사이에 상관관계가 있는가를 분석해보아야 할 것이다. 본 논문에서는 실증실험 결과를 그림 2에 도시하였다. 그림 2의 실선부분은 개별적인 순간정전 및 순간전압강하에 의한 민감부하의 CBEMA 곡선이며, 점

선부분은 국내 배전계통의 재폐로 계통기의 운전방식에 따른 0.5초 간격의 연속적인 전압 변동에 대한 민감부하의 CBEMA 곡선을 도시한 것이다. 이를 통해, 몇몇 부하에서는 연속적인 전압 변동에 의해 그 충격이 누적됨을 볼 수 있으며 그것은 지속시간에만 국한하여 발생함을 알 수 있다. 실험결과를 통해 실험 부하에 대한 누적 충격이 일부에만 국한되며 그 충격 또한 심하지 않은 것으로 판단하였다. 따라서, 본 논문에서는 연속적인 순간전압강하 및 순간정전에 의한 충격의 누적효과는 고려하지 않았다.

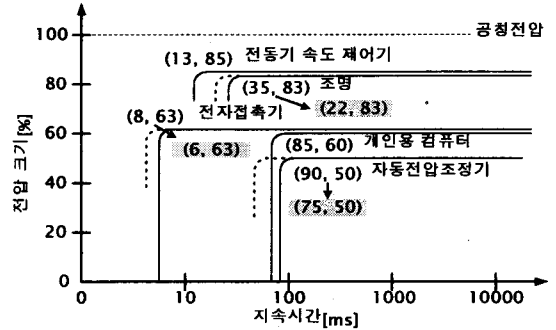


그림 2. 전압품질 요소에 의한 수용가 설비 실험결과와 CBEMA 형태 표현

순간정전의 경우, 크기는 0(p.u.)으로 일정하며 지속시간의 경우 보호계전 방식에 따라 달라진다. 따라서, 그 영향의 차이는 지속시간에 의해 결정된다. 또한, 순간전압강하의 경우, 크기는 사고에 따라 달라지며 지속시간의 경우도 사고크기에 따른 보호계전 방식에 따라 달라진다. 따라서, 수용가에 미치는 영향의 차이는 그 크기 및 지속시간에 의해 결정된다. 식 (1)에서 식 (3)까지에 순간정전 및 순간전압강하의 지속시간 및 크기를 정의하였다. 식 (1)의 T_{MI} 는 순간정전의 지속시간을 정의한 식이며 식 (2)와 식 (3)은 각각 순간전압강하의 지속시간 및 크기를 정의한 식이다. 식 (3)의 순간전압강하 크기의 계산식은 방사상 배전계통에서의 계통 사고에 의한 인근선로의 순간전압강하 크기를 계산하기 위한 것이며, 배전모선에서 수용가까지의 부하전류에 의한 전압강하 분은 미미하므로 고려하지 않았다. 따라서, 배전모선단에 발생하는 순간전압강하 크기는 배전모선단 전압에서 식 (3)과 같이 도출할 수 있다.

$$T_{MI} = \text{Max}(t_{MI}^n) \quad (1)$$

여기서,

$$t_{MI}^n = \text{1개의 사고에 의해 발생한 } n\text{번째 재폐로 무전압 시간 } (n = 1, \dots, k)$$

$$T_{VS} = \text{Max}(t_{VS}^n) \quad (2)$$

여기서,

$$t_{VS}^n = \text{1개의 사고에 의해 발생한 } n\text{번째 순간전압강하 지속시간 } (n = 1, \dots, k)$$

$$t_{VS}^1 = \text{사고발생 시의 순간전압강하 지속시간}$$

$$t_{VS}^k = \text{(k-1) 번째 재폐로에 의한 순간전압강하 지속시간}$$

$$M_{VS} = (1 - |V^{low}|) \times 100[\%] \quad (3)$$

여기서,

$|V^{f_{max}}|$ = 사고상의 배전모선의 전압

3. 평가 방식의 개발

3-1. 영구정전

식 (4)에는 영구정전의 평가 기준으로 사용되고 있는 시스템 신뢰도 지수인 SAIFI를 나타내었다. 본 논문에서는 정전비용을 평가하기 위한 지수인 시스템 평균정전비용(system average interruption cost index: SAICI)을 정의하였고 이를 식 (5)에 나타내었다. 이는 다음절에서 설명할 순간정전비용 지수와 비교되었다.

- 시스템 평균정전횟수(SAIFI : System Average Interruption Frequency Index)

$$SAIFI = \frac{\sum \text{수용가 정전 횟수}}{\text{전체 수용가 호수}} / \text{yr} \quad (4)$$

- 시스템 평균정전비용(SAICI : System Average Interruption Cost Index)

$$SAICI = \frac{\sum \text{수용가 정전비용}}{\text{전체 수용가 호수}} / \text{yr} \quad (5)$$

3-2. 순간정전

이제까지 발표된 순간정전의 평가지표로는 참고문헌 [2]의 평균 순간정전 발생횟수(momentary average interruption frequency index: MAIFI)가 있다. MAIFI는 발생횟수를 기준으로 작성된 영향 평가 지표이다. 본 논문에서는 순간정전의 특성을 포함하는 새로운 평가지표인 시스템 평균 순간정전 위험도 지수(SAMIRI : System Average Momentary Interruption Risk Index)를 제안하였으며 이를 식 (6)에 나타내었다.

$$SAMIRI = \frac{\sum \text{순간정전의위험도}}{\text{전체 수용가 호수}} / \text{yr} \quad (6)$$

순간정전의 영향 평가를 위해 본 논문에서 제안된 또 다른 방법은 순간정전 비용을 평가하는 지표인 시스템 평균 순간정전 비용 지수(SAMICI : System Average Momentary Interruption Cost Index)이며 식 (7)에 나타내었다.

$$SAMICI = \frac{\sum \text{순간정전에의한정전비용}}{\text{전체 수용가 호수}} / \text{yr} \quad (7)$$

3-3. 순간전압강하

본 논문에서는 참고문헌 [9]에서 소개한 바 있는 위험도 평가를 이용하여 순간전압강하 영향을 평가하였으며 이를 시스템 평균 순간전압강하 위험도(system average voltage sag risk index: SAVSRI)라 정의하였으며 식 (8)에 나타내었다.

$$SAVSRI = \frac{\sum \text{순간전압강하의위험도}}{\text{전체 수용가 호수}} / \text{yr} \quad (8)$$

4. 사례연구

본 논문에서는 사례연구를 위한 시험계통으로 참고문헌 [9]에서 언급한바 있는 RBTS(Roy Billinton Test Ssystem) 배전 Bus2번 모델을 사용하였다. 모델은 국내 계통환경에 맞추어 보호기기의 설치 환경 및 보호방식 등이 선정되었다. 사례연구 결과 중 순간전압강하에

의한 평가 결과인 SAVSRI를 표 1에 나타내었다.

표 1. 순간전압강하 평가 결과(SAVSRI)

Customer	SAVSRI	Customer	SAVSRI
피더1	0.048	수용가10	0.024
피더2	0.134	수용가11	0.024
피더3	0.025	수용가12	0.024
피더4	0.045	수용가13	0.106
수용가1	0.047	수용가14	0.106
수용가2	0.047	수용가15	0.037
수용가3	0.047	수용가16	0.067
수용가4	0.235	수용가17	0.044
수용가5	0.235	수용가18	0.044
수용가6	0.072	수용가18	0.044
수용가7	0.072	수용가20	0.222
수용가8	0.134	수용가21	0.222
수용가9	0.134	수용가22	0.067

5. 결 론

본 논문은 배전계통에서의 전압 크기의 품질 문제를 신뢰도 평가할 수 있는 방식을 제안하였다. 순간정전의 경우는 자체의 특성을 이용한 위험도 평가와 정전비용을 평가할 수 있는 지표를 제시하였으며, 순간전압강하의 경우 위험도 평가를 통한 영향 평가 지표를 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] C. M. Warren, "The Effect of Reducing Momentary Outages on Distribution Reliability Indices," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7, No.3, pp.1610-1617, July 1992.
- [2] R. E. Brown, S. Gupta, R. D. Charistie, S.S Venkata, R. Fletcher, "Distribution System Reliability Assessment: Momentary Interruptions and Storms," IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.12, No.4, pp.1569-1575, October 1997.
- [3] Y.Sekine and T.Yamamoto, "Present State of Momentary Voltage Dip Interferences and the Countermeasures in Japan," Cigre 36-206, pp.1-5, August 1992.
- [4] Jeff Lamoree, Dave Mueller, Paul Vinett, William Jones, and Merck Samotyj, "Voltage Sag Analysis Case Studies," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 30, No. 4, pp.1083-1089, July/August 1994.
- [5] Larry E. Conrad et al., "Proposed Chapter9 for Predicting Voltage Sags(Dip) in Revision to IEEE Std 493, the Gold Book," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 30, No. 3, pp.805-821, May/June 1994.
- [6] Math H. J. Bollen, "Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 32, No. 6, pp.1414-1423, May/June 1994.
- [7] R. C. Dugan, D. L. Brooks, Marek Waclawiak, and Ashok Sundaram, "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp.254-259, January 1998.1
- [8] L. E. Conrad and M. H. J. Bollen, "Voltage Sag Coordination for Reliable Plant Operation," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 33, No. 6, November/December 1997, pp. 1459-1464.
- [9] 윤상윤, 오정환, 김연석, 김낙경, 김재철, "퍼지모델을 이용한 배전 계통에서의 순간전압강하 평가 방식," 대한전기학회 논문지, 제 49A권, 제 4호, pp. 42-46, 2000년 4월.