

퍼지 위험도 평가 모델을 이용한 배전계통의 순간전압강하 영향 평가

° 윤상윤\*, 오정환\*, 한병덕\*, 김재철\*, 박중신\*\*, 임동균\*\*\*  
 \* : 숭실대학교 전기공학과, \*\* : 한국전력공사, \*\*\* : 한국전기안전공사

Assessing the Effect of Voltage Sag in Distribution System Using a Fuzzy Risk Assessment Model

Yun Sang Yun\*, Oh Jung Hwan\*, Han Byung Duk\*, Kim Jae Chul\*, Park Joong Shin\*\*, Lim Dong Gyu  
 \* : Dept. of E.E. in Soongsil Univ. \*\* : KEPCO, \*\*\* : KESCO

**Abstract** - In this paper, we propose the method for assessing the effect of voltage sag in power distribution system using fuzzy risk assessment model. The proposed method is based on SCBEMA curve that expresses the representative susceptibility curve by voltage sag for each customer type. These curves are made using the CBEMA curves obtained from the experiment for the customers' sensitive equipment. In order to transform SCBEMA curves to the probability damage by voltage sag, the fuzzy risk assessment model is used in this paper. Case studies were performed to analyze the effect of voltage sag by varying parameters. The Monte Carlo simulation method and the historical reliability data in KEPCO are used for case studies.

1. 서 론

이제까지 배전계통에서의 전력신뢰도의 평가는 주로 영구정전의 지속시간 및 빈도에 의해 결정되어왔다. 영구정전은 광범위한 영역의 수용가에 직접적인 영향을 미치는 반면, 순간전압강하 및 순간정전을 포함하는 전력 품질에 관련된 여러 문제들은 소규모의 한정된 수용가에 영향을 미치는 것이 사실이다. 그러나, 산업용에서 일반 가정에 이르기까지의 대부분의 수용가에서의 전자 및 자동화 기기의 보편적 이용과 단거리 고밀도화되는 배전계통의 구성 변화는 이러한 전력품질 문제에 의한 피해를 증대시키고 있다. 무엇보다도, 배전계통에서의 순간전압강하는 영구정전에 비해 발생빈도가 높으며 수용가 종류에 따라 영구정전에 못지 않은 피해를 입히고 있다. 따라서, 신뢰도 평가 방식과 같이 순간전압강하의 영향을 정량적으로 평가할 평가방식의 개발이 필요하다.

순간전압강하에 대한 연구는 점진적으로 발전해 왔다. 그 중심 주제는 크게 실질적인 접근 방식과 이론적 접근 방식의 두 가지로 구분할 수 있다. 실질적 접근 방식은 수용가에 대한 모니터링, 수용가 기기에 대한 영향 실험 및 여론조사를 통해 이루어졌다[1-2]. 1990년대 에 들어, 이론적 접근 방식을 이용한 많은 논문이 발표되었다. 이 방식은 순간전압강하의 크기, 지속시간 및 발생빈도를 예측하기 위한 수식[3]과 순간전압강하의 영향을 평가하기 위한 평가 수식[4]을 제시하였다. 두 가지 방식 모두 대상 계통에 대한 직접적이며 명확한 결과를 도출한다는 장점이 있으나, 그 결과를 다른 배전계통에 적용할 수 없다는 단점이 있다. 또한 이론적 접근 방식의 경우, 별도의 모니터링 계통을 필요로 하므로 순간전압강하의 평가 주체인 전력회사에서의 사용에는 많은 어려움이 있다.

본 논문은 퍼지 위험도 평가 모델과 전력회사에서 일반적으로 보유하고 있는 누적된 신뢰도 데이터를 이용한 순간전압강하 평가 방식을 제안하였다. 이를 위해 순간

전압강하의 각 수용가 종류별 대표 민감도 곡선인 SCBEMA (Specified Computer Business Equipment Manufacturer Association) 곡선을 제안하였다. 이 곡선은 실증실험을 통해 얻어진 CBEMA 곡선을 이용하여 작성하였다. 또한, 이 곡선을 기준으로 순간전압강하 크기 및 지속시간 부분의 퍼지 멤버십 함수를 작성하고 이를 바탕으로 퍼지 위험도 평가 모델을 작성하였다. 사례 연구는 선로길, 보호기기 위치 및 종류, 보호계전방식 등을 변화시킴으로써 순간전압강하의 영향을 분석하기 위해 시행되었다. 몬테카를로 시뮬레이션 방식과 한국전력공사의 누적된 신뢰도 데이터가 사례연구를 위해 사용되었다.

2. 배전계통에서의 순간전압강하

2.1 순간전압강하 발생 원인 및 특성

순간전압강하의 발생 원인으로서는 계통내에서의 사고와 대용량 부하의 기동에 의한 것으로 나누어 볼 수 있다. 그러나, 대용량 부하의 기동의 경우 사고발생시에 비해 영향이 매우 적으므로 계통내의 사고를 일반적으로 그 원인으로 본다.

순간전압강하의 지속시간의 경우는 계전기 동작특성을 파악하면 비교적 정확히 예측할 수 있으며, 표 1에 제시된 IEEE 보호계전기 위원회의 조사결과와 같이 특정한 범위의 값으로 나타낼 수 있다[5].

표 1. 사고제거 기기 동작 시간

사고제거기기 종류	사고제거시간[cycles]		가능한 반복 횟수
	순시	한시	
방출형퓨즈	1/2	1/2-120	없음
한류형퓨즈	1/4	1/4-6	없음
리크로저	3	1-30	0-4
유입차단기	5	1-60	0-4
진공차단기	2-3	1-60	0-4

순간전압강하의 크기는 사고종류, 사고위치 및 사고점 저항에 따라 다르기 때문에 사례별로 정확히 예측한다는 것은 어려우며 일반적으로 사고해석을 통해 예측[3]하는 방식과 통계적 조사를 통해 그 분포를 분석하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 사고해석을 통해 순간전압강하 크기를 분석하였으며 이것은 곧, 배전 모선단의 전압을 계산하는 것이며 이를 위해 다음과 같은 세가지 절차가 요구된다.

- 단계 1) 사고지점의 전압을 대칭좌표법(영상, 역상, 정상)에 의해 계산한다
- 단계 2) 사고점에서 배전 모선까지의 전압강하를 보상(영상, 역상, 정상 각각에 대해)한다
- 단계 3) 보상된 전압을 각 상의 전압으로 변환한다

이제까지 순간전압강하의 영향 특성으로 제시된 대표

적인 표준 곡선으로 CBEMA 곡선(6)을 들 수 있다. 본 논문에서는 실증실험을 통해 수용가 민감부하의 CBEMA 곡선을 도출하였다. 실험 결과는 그림 1에 도시하였다.

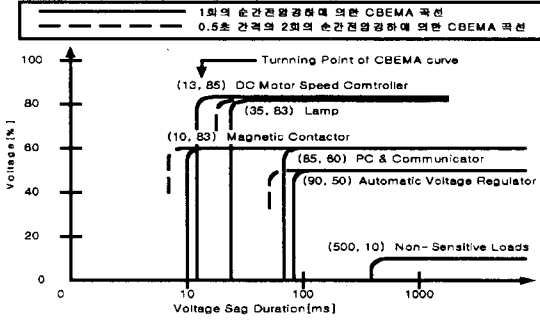


그림 1. 실험에 의해 얻어진 CBEMA 곡선

본 논문에서는 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 변수를 다음과 같이 구분하였다.

- 변수 1) 순간전압강하 지속시간 및 크기 : 순간전압강하 지속시간 및 크기는 순간전압강하에 의한 수용가 영향을 직접적으로 결정할 수 있는 변수이다.
- 변수 2) 수용가 부하 구성 : 동일한 크기 및 지속시간을 가지는 두 개의 순간전압강하가 있으며 하나는 주거지역에 발생하고 다른 하나는 업무용 빌딩에 발생하였다면 일반적으로, 후자가 더 위험하다고 판단할 것이다. 이것은 수용가 부하구성의 차이가 존재함을 의미한다.

### 3. 퍼지 위험도 평가 모델

#### 3.1 SCBEMA 곡선

순간전압강하에 의한 수용가 영향 특성 두 번째인 수용가 부하 구성의 차이를 제시한 퍼지 모델에 반영하기 위해 본 논문에서는 대표적인 수용가 종류별로 그 영향의 특성 곡선인 SCBEMA(Specified CBEMA) 곡선을 제안하였다. 그림 2에 보여진 SCBEMA 곡선의 생성절차는 다음과 같다.

- 단계 1) 각 수용가 종류별 부하구성을 가정한다.
- 단계 2) 개별 부하의 CBEMA 곡선의 변곡점과 각 부하구성을 곱한다.
- 단계 3) 모든 부하에 대해 단계 2의 결과를 합한 지점으로 이동한다. 이 점이 각 수용가 종류별 SCBEMA 곡선의 변곡점이 된다.

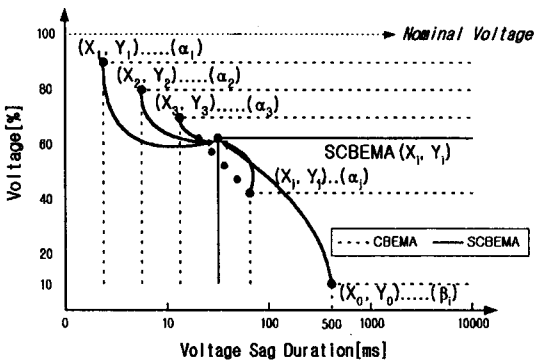


그림 2. SCBEMA 곡선

SCBEMA 곡선의 변곡점은 식 (1)에 의해 계산한다.

$$(X_i, Y_i) = \left( \sum_{j=1}^n (X_j \times \alpha_j) + X_0 \times \beta, \sum_{j=1}^n (Y_j \times \alpha_j) + Y_0 \times \beta \right) \quad (1)$$

여기서,

- $X_j$  = i번째 수용가의 j번째 민감부하의 CBEMA곡선 변곡점 X 좌표 값
- $Y_j$  = i번째 수용가의 j번째 민감부하의 CBEMA곡선 변곡점 Y 좌표 값
- $X_0$  = i번째 수용가 비 민감부하의 CBEMA곡선 변곡점 X 좌표 값
- $Y_0$  = i번째 수용가 비 민감부하의 CBEMA곡선 변곡점 Y 좌표 값
- $\alpha_j$  = i번째 수용가의 j번째 민감부하의 구성을
- $\beta$  = i번째 수용가의 비 민감부하 구성을

#### 3.1 퍼지 모델의 구성

본 논문에서 순간전압강하 위험도 평가를 위해 제안한 퍼지 모델은 앞서 설명한 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 변수 첫번째인 순간전압강하 지속시간 및 크기를 다음 규칙 2가지로 모델에 반영하였다.

- 규칙 1) If Voltage\_Sag.Magnitude is large then Risk is increased
- 규칙 2) If Voltage\_Sag.Duration is long then Risk is increased

또한 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 변수 두번째인 수용가 부하 구성의 특성을 모델에 반영하기 위해 SCBEMA 곡선의 변곡점을 입력 변수의 퍼지 멤버십 함수의  $\beta$  값으로 선택하였다. 본 논문에서는 퍼지 멤버십 함수로 식 (2)를 선택하였다(7).

$$\mu[x] = \begin{cases} 0 & \text{for } x \leq \alpha \\ 0.5 \times ((x - \alpha) / (\beta - \alpha))^2 & \text{for } \alpha < x < \beta \\ 1 - 0.5 \times ((\gamma - x) / (\gamma - \beta))^2 & \text{for } \beta \leq x < \gamma \\ 1 & \text{for } \gamma \leq x \end{cases} \quad (2)$$

여기서,

- $x$  = 퍼지 집합의 정의구역의 임의 값
- $\alpha$  = 멤버십 값이 0인 정의구역 값
- $\beta$  = 멤버십 값이 0.5인 정의구역 값
- $\gamma$  = 멤버십 값이 1인 정의구역 값

순간전압강하 위험도 평가 모델의 구조는 그림 3과 같다.

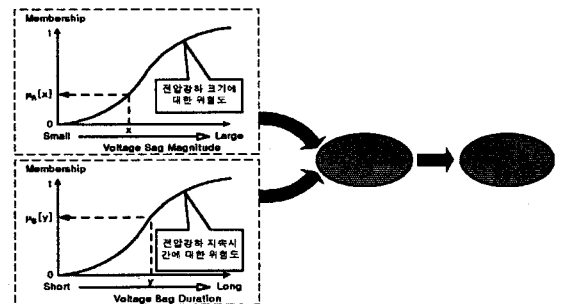


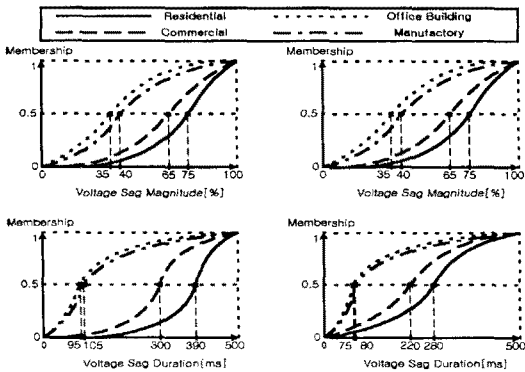
그림 3. 순간전압강하 위험도 평가 모델

#### 4. 사례연구

본 논문에서 사례연구에 사용된 계통은 참고문헌 [8]에 제시된 RBTS Bus 2번을 사용하였다. 또한 사례연구에 이용된 설비 신뢰도 데이터는 한국전력공사의 경인지역 한국전력공사 배전계통의 누적된 신뢰도 데이터를 사용하였으며 [9] 이를 표 2에 나타내었다. 연속적 순간전압강하의 누적 충격은 실험결과에 의해 순간전압강하 지속시간에 대해 약 30[%]로 하였다. 그림 4는 사례연구에 이용된 입력변수의 퍼지 멤버십 함수를 나타내었다. 수용가 종류는 RBTS 모델에 제시한 것과 같이 4가지로 구분하였다.

표 2. 사례연구에 이용된 신뢰도 데이터

사고요소	영구사고[/yr]	일시사고[/yr]
가공선로	0.017/km	0.080/km
지중케이블	0.011/km	0.000/km
차단기	0.005	0.000
리크로저	0.005	0.000
스위치	0.002	0.000



(a) 누적 충격 비교 (b) 누적 충격 비교  
그림 4. 각 수용가 종류별 퍼지 멤버십 함수

시험선로 상의 수용가에 대한 순간전압강하의 충격을 평가하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 방식이 이용되었다. 시뮬레이션 절차는 다음과 같다.

- 단계 1) 사고위치, 사고종류 및 재폐로 상황 등을 제한 조건에 만족하도록 랜덤하게 발생시킨다. 이 결과로부터, 순간전압강하 크기 및 지속시간을 계산한다.
- 단계 2) 제안한 퍼지모델에 대해 단계 1에서 도출된 크기 및 지속시간을 가지고 최종 위험도를 수용가 종류 및 피더별로 계산하며 영구정전의 발생횟수도 계산한다.

4개의 사례연구가 시험선로에 대해 시행되었다.

- 사례연구 1) 모든 피더가 가공선  
 사례연구 2) 모든 피더가 지중선  
 사례연구 3) 모든 피더가 가공선. 사례 1에 비해 선로 길이가 2배  
 사례연구 4) 모든 피더가 가공선, 선로 중단에 리크로저 설치함

사례연구 결과를 표 3에 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 퍼지 연산에 의한 최종 위험도와 시스템 평균영구정전발생횟수지표(system average interruption frequency index : SAIFI)를 비교하였다.

표 3. 순간전압강하 위험도 평가 결과 및 SAIFI [int/system customer/year]

사 례	사례 1	사례 2	사례 3	사례 4
피더 1	0.241/0.273	0.056/0.178	0.293/0.541	0.277/0.126
피더 2	2.275/0.113	0.309/0.070	3.532/0.201	1.472/0.091
피더 3	0.252/0.258	0.057/0.169	0.303/0.543	0.287/0.136
피더 4	0.243/0.288	0.056/0.185	0.295/0.556	0.282/0.168

#### 5. 결 론

본 논문은 퍼지 모델을 이용하여 배전계통에서의 순간전압강하의 영향을 평가하기 위한 방식을 제안하였다. 본 논문으로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

기존의 CBEMA 곡선이 수용가 종류별로 순간전압강하의 영향을 평가하기에 부적합하므로 수용가 종류별 순간전압강하의 대표성 곡선인 SCBEMA 곡선을 제안하였다. 또한, 제안된 SCBEMA 곡선은 퍼지 멤버십 함수에 의해 확률적 위험도 모델로 변환되었다. 이를 이용하여 기존에 모니터링 시스템 등의 부가적 설비 및 여론조사 등에 의존하던 순간전압강하 영향의 평가를 정량적 방법에 의해 평가할 수 있도록 하는 방식을 제시하였다. 그러나, 본 논문에서 제시한 방식은 부하별 CBEMA 곡선 및 수용가 대표 패턴에 대한 부하구성물의 체계적 데이터가 요구된다. 따라서, 제안된 방식을 실제 적용하기 위해서는 전력회사에서의 이러한 특별한 데이터를 얻기 위한 부가적 노력이 요구된다.

한국전력공사 배전계통의 누적된 신뢰도 데이터를 이용하여 사례연구를 실시하였으며 이를 통해 제안한 방식이 효과적으로 이용될 수 있음을 보였다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Y. Sekine, T. Yamamoto, S. Mori, N. Saito, and H. Kurokawa, "Present State Momentary Voltage Dip Interferences and The Countermeasures in Japan," *CIGRE 36-206*, September 1992.
- [2] Jeff Lamoree, Dave Mueller, Paul Vinett, William Jones, and Merek Samotyj, "Voltage Sag Analysis Case Studies," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol.30, No.4, July/August 1994, pp.805-821.
- [3] 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, May/June 1994, pp.805-821.
- [4] 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, January 1998, pp.254-259.
- [5] IEEE Power System Relaying Committee Report, "Distribution line protection practices-Industry survey results," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.PD-3, April 1988, pp.514-524.
- [6] ANSI/IEEE Standard 446-1987, *IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications(IEEE Orange Book)*.
- [7] Hans Bandemer and Siegfried Gottwald, *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Methods with application*, Wiley, 1995, p.18-20.
- [8] R.N.Allan, R.Billinton, I.Sjarief, L.Goel, and K.S.So, "A Reliability Test System for Educational Purpose Basic Distribution System Data and Results", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.6, No.2, May 1991, pp.813-820.
- [9] 한국전력공사 배전처 배전계획부, *배전선로 공급신뢰도 현황*, 한국전력공사, 1995년 11월. p.23-p.149.