

신뢰도 데이터를 이용한 배전계통의 순간전압강하 영향평가

윤상윤, 김재철, 임성정, 오정환, 김두봉, 한병덕, 김기현
 송실대학교 전기공학과

Assessing the Effect of Voltage Sag in Distribution System
 using Reliability Data

Sang-yun Yun, Jae-chul Kim, Seung-jung Lim, Jung-Hwan Oh, Du-bong Kim, Gi-hyun Kim, Byung-duk Han
 Department of Electrical Engineering in Soongsil University

Abstract - This paper presents a method to evaluate the effect of voltage sag in distribution system using the component reliability data of utilities. The proposed method is based on Specified CBEMA curve which is the probability curve of the customers' effect by voltage sag. We carried out the experiment for the customers' sensitive equipments using the test facilities in KERI. The Monte Carlo method and the historical reliability data in KEPCO are used for simulations.

1. 서 론

전력신뢰도 평가는 전력회사의 공급계통의 운용을 검토하여 적절한 운용방식을 결정하는데 있으며 이제까지 배전신뢰도의 결정기준은 계통상에 발생하는 영구정전의 발생횟수와 지속시간을 주로 사용해 왔다. 그러나 최근 들어 급속히 증가한 자동화 공정으로 인해 마이크로프로세서 및 전력전자 소자를 포함한 외란에 민감한 부하설비의 이용 등의 수용가 부하환경 급변과 단거리 고밀도화 되는 추세의 계통 토폴로지의 변화는 단시간의 외란에 의한 수용가 피해를 확산시키고 있으며 수용가의 전력품질 향상요구가 증대하고 있다.

전력공급계통은 단지 전압품질을 제어할 수 있으며 전압의 크기를 어떤 제한점 이내로 유지하는것에 전력품질이 달려있다[1]. 본 논문에서는 전력품질 문제를 전압크기의 품질(voltage magnitude quality) 문제로 제한하였다. 또한 수용가 설비의 가동정지 및 오동작을 일으키는 등 직접적인 영향을 줄 수 있는 가장 대표적인 전압크기의 품질문제로 순간정전과 순간전압강하를 들 수 있으며 본 논문에서는 순간전압강하에 대해 다루었다.

지금까지 국내외의 전압품질에 대한 선행연구들은 크게 실험적 접근방식과 개념적 접근방식을 이용한 두가지 부류로 구분할 수 있다. 실험적 접근방식은 전압품질 문제를 시뮬레이션이나 실험 및 여론조사 등에 의해 해석하는 것으로 J.Ward[2] 등은 전압외란에 의한 수용가 측 각 부하에 대한 영향 및 대책에 대해 다루었으며 Y.Sekine[3] 등은 일본에서의 순간전압강하의 피해현황과 컴퓨터 장비에 대한 그 대책을 제시하였다. J.Lamoree[4] 등은 수용가 장비에 대한 여러 가지 순간전압강하 조사결과를 요약하였다. 1990년대 들어 순간정전 및 순간전압강하의 특성을 분석하고 영향을 정량적으로 평가하기 위한 수식을 개발하는데 주력하는 개념적 접근방식을 이용한 많은 논문들이 발표되었다. L.Conrad[5] 등과 Math H.J.Bollen[6]은 순간전압강하의 크기 및 지속시간 등을 예측하는 기법을 소개하였으며, R.E.Brown[7] 등과 R.C.Dugan[8] 등은 각각 순간정전과 순간전압강하의 영향을 평가하기 위한 수식을 제시하였다. 그러나 개념적 접근방식의 경우, 기존의 신뢰도 관점에서 순간정전이나 순간전압강하 등의 경우를 추가하였을 뿐 여전히 전력회사 측면의 영향평가 방

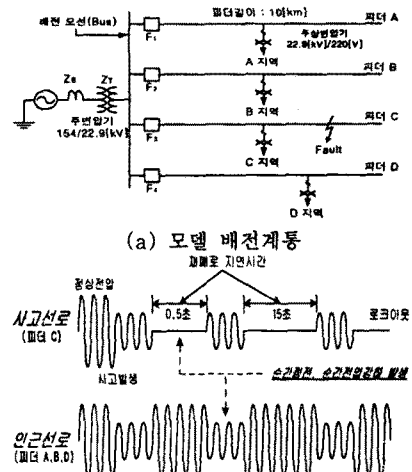
식을 고수함으로써 실제적인 수용가 영향을 분석하기에는 미흡한 실정이다. 또한 실험적 접근방식은 그 결과가 매우 제한적이며 결과에 비해 막대한 비용이 소모된다는 등의 단점이 있다.

본 논문에서는 전력회사에서 일반적으로 보유하고 있는 신뢰도 데이터를 이용하여 배전시스템에서의 순간전압강하의 영향을 평가하였다. 제안한 방식은 순간전압강하에 의한 수용가 설비의 영향평가의 표준으로 인정받고 있는 CBEMA 곡선을 수용가 군집에 대한 순간전압강하 영향 확률로 변형시킨 Specified CBEMA(Computer Business Equipment Manufacturer Association) 곡선을 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 기준으로 이용하였다. 이 곡선은 수용가 민감설비에 대한 실증실험을 통해 얻어진 CBEMA 곡선을 이용하였다. 사례연구에 사용한 데이터는 한국전력공사의 경인지역 J 변전소의 신뢰도 데이터를 바탕으로 하였으며, 대표적인 신뢰도 평가방식인 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 사용하였다. 사례연구를 통해, 본 논문에서 제안한 방식이 배전 시스템의 신뢰도 증진을 위한 전력회사측의 운용방식의 결정에 효과적으로 사용될 수 있음을 입증하였다.

2. 배전계통에서의 순간전압강하발생 및 예측

2.1 순간전압강하 발생 메커니즘

배전계통에서의 순간전압강하 발생원인은 사고제거를 위한 보호시스템의 동작에 의한 것이 가장 일반적이며 그림 1에 배전선로에서의 사고 발생시 재폐로에 의한 순간전압강하 발생 메커니즘을 도시하였다.



(b) 영구사고 발생시 재폐로에 의한 전압파형
 그림 1. 자동재폐로에 의한 순간전압강하 발생
 Fig. 1. The occurrence of voltage sag by automatic reclosing

2.2 순간전압강하 예측

순간전압강하의 지속시간의 경우는 계전기 동작특성을 파악하면 비교적 정확히 예측할 수 있으며 순간전압강하의 크기는 사고위치 및 사고형태에 따라 다르기 때문에 정확히 예측한다는 것은 어려우며 일반적으로 사고해석을 통해 예측[5,6]하는 방식과 통계적 조사를 통해 그 분포를 분석[1]하는 것이 일반적이다. 사고해석을 통해 그 크기를 예측하기 위해서는 기본적으로 사고지점 및 계통내의 각 부분의 임피던스 값이 요구된다. 사고해석을 위해 그림 1(a)의 모델계통을 다음 그림 2와 같이 개략도로 나타내었다.

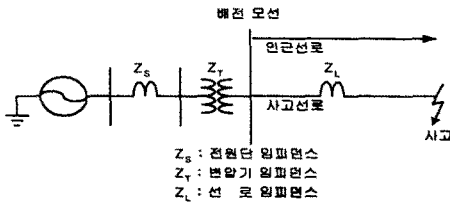


그림 2. 모델 계통의 개략도

Fig. 2. The simple diagram of model system

각 사고시의 인근선로의 순간전압강하 크기를 예측하기 위해서는 다음과 같은 두가지의 절차를 필요로 한다.

- 1) 사고점의 전압을 계산한다.
- 2) 사고점에서 배전 Bus까지의 전압강하를 보상한다.

3상사고의 경우와 같이 정상분만으로 구성되는 사고에서는 다음 식 (1)과 같은 간단한 전압분배만으로 거의 정확한 전압강하 값을 계산할 수 있다.

$$V_{\text{avg}} = \frac{Z_L}{Z_S + Z_{Tr} + Z_L} \quad (1)$$

- Z_S : 전원의 정상분 임피던스
Z_{Tr} : 주 변압기의 정상분 임피던스
Z_L : 선로의 정상분 임피던스

식 (1)의 경우는 3상사고일 경우에만 해당하며, 1상 사고일 경우나 선간사고(phase-to-phase fault)의 경우는 정상분, 역상분 및 영상분의 각각으로 나누어 해석하여야 한다. 이와 같은 고장해석을 통해 계산한 결과를 EMTF 시뮬레이션을 통한 결과와 비교하여 표 1에 나타내었다.

표 1. 순간전압강하 크기의 예측

Table 1. Prediction of voltage sag magnitude (사고해석결과/시뮬레이션결과)

배전Bus에서 사고지점까지의 선로길이	사고종류		
	1선지락	선간단락	3상사고
1[km]	33/34[%]	58/57[%]	20/20[%]
2[km]	50/49[%]	64/62[%]	34/34[%]
3[km]	60/58[%]	69/67[%]	44/44[%]
4[km]	67/65[%]	73/71[%]	51/51[%]
5[km]	72/69[%]	76/74[%]	57/57[%]
6[km]	76/73[%]	79/77[%]	61/62[%]
7[km]	78/76[%]	80/79[%]	65/65[%]
8[km]	81/79[%]	82/80[%]	68/68[%]
9[km]	82/81[%]	83/82[%]	71/71[%]
10[km]	84/82[%]	84/83[%]	73/73[%]

3. 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 평가 기준

3.1 수용가 영향의 유추 특성

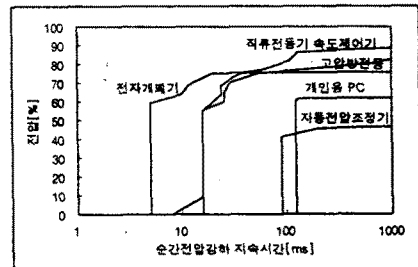
본 논문에서 제시한 영향평가 기준은 다음의 두가지 유추 가능한 특성을 포함하도록 구성하였다.

1) 수용가 종류에 따른 영향 : 동일한 순간전압강하 1회가 발생했다고 가정할 때 A지역의 경우 변화가의 업무용 빌딩이라 가정하고 B지역의 경우 일반주택이라고 가정할 때 순간전압강하의 위험도는 A지역의 경우가 B지역에 비해 상대적으로 클 것이다.

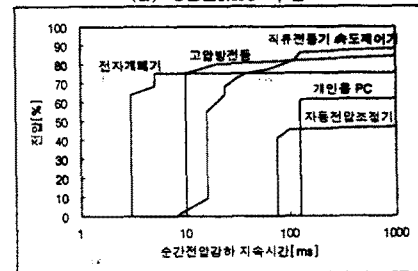
2) 순간전압강하 크기에 따른 영향 : 변화가의 업무용 빌딩인 A지역에 대해, 10[%] 전압강하가 10회 발생한 경우와 80[%]의 순간전압강하가 1회 발생한 경우 발생한 순간전압강하의 위험도는 80[%] 1회의 경우가 10[%] 10회의 경우에 비해 상대적으로 클 것이다.

3.2 CBEMA 곡선

본 논문에서 제시한 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 기준을 작성하기 위해 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 표준으로 쓰이고 있는 CBEMA 곡선을 실증실험을 통해 도출하였으며 그 결과는 다음 그림 3과 같다. (a)의 경우는 1회의 단독적으로 발생하는 순간전압강하에 대한 설비영향을 시험한 것이며, (b)의 경우는 2회의 연속적으로 발생하는 순간전압강하에 대한 설비영향을 시험한 것으로 각각 반복 5회 이상의 시험결과를 평균하여 도시한 것이다.



(a) CBEMA 곡선



(b) 누적 CBEMA 곡선(0.5초 간격)

그림 3. 실험결과

Fig. 3. The results of the experiment

3.3 Specified CBEMA 곡선

이미 언급한 순간전압강하 영향의 유추특성을 포함하는 평가지표로서 본 논문에서는 Specified CBEMA 곡선을 제안하였다. 이 곡선은 발생 순간전압강하에 대한 수용가 집단의 영향 곡선이다.

Specified CBEMA 곡선은 배전변압기 단위의 수용가 집단을 대상으로 작성된다. 전력공급은 최종적으로 배전변압기에 의해 이루어지며 배전변압기 단위의 수용가 집단은 국내의 경우 동력용과 전동용의 두가지로 나뉘어진다. 그 기준은 표 2와 같으며 1개 배전변압기 단위의 수용가 특성은 거의 동일하다 할 수 있다.

표 2. 수용가 종류 구분

Table 2. The classification of customers types

수용가 특성		비고
변화가	고밀도	유흥업소 밀집지역
	중밀도	일반상가건물 밀집지역
	저밀도	시장, 대로변
주택가	대형	고소득층(전용면적 40평 이상)
	중형	중산층(전용면적 15-30평대)
	소형	전용면적 15평 이하
농어촌	농사용	농사용기기 공급용
	주거용	농가주택
심야	임시	
	심야 갑	심야시간대만 사용
	심야 을	주야간 동시 사용
	가로등	순수 종량등
동력용		산업체의 동력부하에 전력 공급

Specified CBEMA 곡선은 다음과 같은 식 2에 의해 결정된다. 즉, 몇가지의 국내 배전 수용가의 민감부하에 대해 어떤 1개의 지역특성과 특성 수용가 집단이 모여있는 배전변압기 단위의 수용가 특성에 따라 수용가 민감부하별 CBEMA 곡선의 변곡지점(turning point)을 수용가 특성별 민감부하 구성율을 곱해 전체를 합한 지점으로 이동시키는 것이다. 이렇게 하면 확률적으로 평균적인 수용가 특성별 민감부하 곡선이 작성될 수 있을 것이다. 그림 4는 이것을 도시한 것이다.

$$SCBEMA_i(X_j, Y_j) = \sum_{j=1}^k (X_j \times \alpha_j, Y_j \times \alpha_j) \quad (2)$$

- X_i = i 수용가 군 SCBEMA 곡선의 변곡지점 x좌표
- Y_i = i 수용가 군 SCBEMA 곡선의 변곡지점 y좌표
- X_j = j 번째 민감부하 CBEMA 곡선의 변곡지점 x좌표
- Y_j = j 번째 민감부하 CBEMA 곡선의 변곡지점 y좌표
- α_j = j 번째 민감부하 구성율 ($0 \leq \alpha_j \leq 1$)

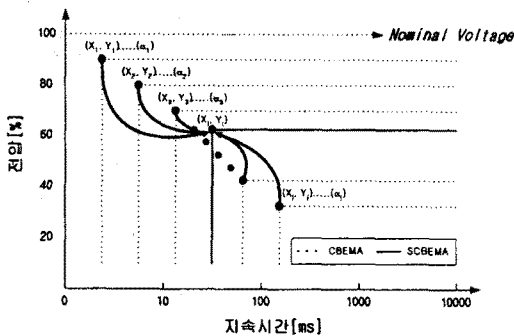


그림 4. Specified CBEMA 곡선
Fig. 4. Specified CBEMA curve

4. 사례연구

본 논문에서 제시한 순간전압강하에 의한 수용가 영향 기준의 효용성을 검증하기 위해 전력회사의 히스토리컬(historical)한 신뢰도 데이터를 이용한 신뢰도 평가 방식을 사용하였다. 이를 위해 신뢰도 평가의 대표적 방법으로 널리 사용되고 있는 몬테카를로(Monte Carlo) 기법을 사용하였다.

4.1 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션은 랜덤수(random number) 발생을 통해 시스템의 상태(state)를 샘플링하며, 이를 이용하여 시스템의 잠재적 신뢰도를 평가한다. 이 중에서도 본 논문에서는 계산시간의 단축을 위해 시스템 상태 추정 변수를 제한하는 Tabulating Method를 사용하였다.

4.1.1 Tabulating Method

몬테카를로 시뮬레이션은 시스템의 크기에 의해 영향 받지 않으며 발생 샘플의 개수에 대해서만 영향을 받기 때문에 대규모 시스템의 영향평가에는 적합하나 균등분포의 랜덤수 발생시의 계산시간의 과도한 소비라는 단점을 지니고 있다. 이를 보완하기 위한 방법으로 균등분포로 발생시킨 랜덤수를 일정한 구역으로 나누어 대표값만을 시스템 상태로 사용하는 Tabulating Method를 이용한다. 이 방식의 진행절차는 다음과 같다.

- Step 1) 균등분포의 [0, 1] 사이의 랜덤수를 발생
- Step 2) 발생 랜덤수가 할당될 세부구역을 결정
- Step 3) 세부구역에 대해 형성된 표로부터 실제 시스템 상태(state)를 결정할 랜덤변수 선택

Tabulating Method의 기본적 알고리즘은 식 (3)과 같다.

$$x_i = F^{-1}\left(\frac{i-0.5}{k}\right) \quad (3)$$

x : 랜덤변수(random variate)

F : 누적확률분포함수

본 논문에서의 랜덤수는 사고 위치이며 Tabulating Method를 이용하여 164개의 노드로 대응시켰다.

4.2 배전 모델

본 논문에서 사용한 배전 모델의 주요 파라미터는 표 3과 같으며 그 세부구성도는 그림 5와 같이 구성하였다. 피더 및 분기선의 사고율의 경우 참고문헌 [10]과 경인 지역 J변전소의 사고기록을 통해 설정하였다.

표 3. 모델시스템의 파라미터

Table 3. The parameter of model system

	사례 1	사례 2	사례 3
보호기기 구성	Ry-F	Ry-F	Ry-R-F
피더길이	10(km)	10(km)	10(km)
분기선길이	16(km)	16(km)	16(km)
수용가 개소	15[/피더]	15[/피더]	15[/피더]
피더수	4	4	4
배전변압기	15[/피더]	15[/피더]	15[/피더]
주피더사고율	0.2(km/y)	0.2(km/y)	0.2(km/y)
분기선사고율	0.5(km/y)	0.5(km/y)	0.5(km/y)
순간전압강하의 누적충격	고려 않음	고려됨	고려됨
피더 구성			
피더 1	대도시 중심부 사무용 빌딩 밀집지역		
피더 2	공단 밀집지역		
피더 3	중소도시 지역		
피더 4	농어촌 지역		

5. 결론

본 논문을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 순간전압강하의 지속시간 및 그 크기는 사고분석을 통해 예측가능하며 다양한 사고종류에 대해 검증해본 결과 예측방식의 정확성을 확인하였다.
- 2) 순간전압강하의 의한 수용가 영향평가의 기준에 기본적으로 포함되어야할 유추 특성을 수용가 종류와 순간전압강하의 두가지 특성으로 가정하였다.
- 3) 수용가 설비에 대한 순간전압강하 영향평가의 기준으로 쓰이는 CBEMA 곡선을 배전변압기 단위의 수용가 군집의 순간전압강하에 의한 수용가 영향평가의 기준인 Specified CBEMA를 제안하였다. 제시한 선은 수용가 영향의 확률적 곡선이다.
- 4) 제시한 영향평가 기준을 가지고 순간전압강하에 의한 수용가 영향 평가를 하기 위해, 전력회사측에서 일반적으로 보유하고 있는 신뢰도 데이터를 이용하여 사례연구를 시행하였다. 사례연구는 신뢰도 평가기법인 몬테카를로 기법을 이용하여 시험선로에 대해 보호기기의 종류를 변환하면서 이루어졌다. 사례연구를 통해 본 논문에서 제시한 영향 평가 방식이 계통 구성의 변화에 따라 효과적인 평가기법으로 이용될 수 있음을 보였다.

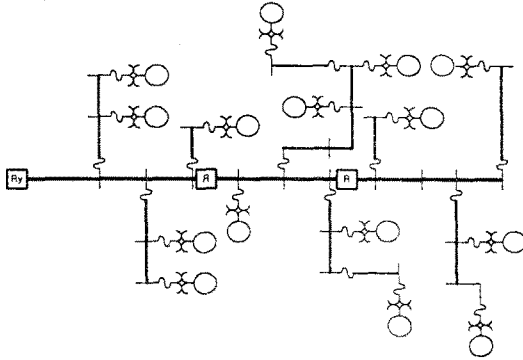
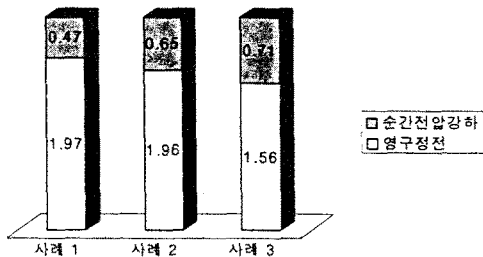


그림 5. 사례연구 3의 모델 배전계통
Fig. 5. The model distribution system in case study 3

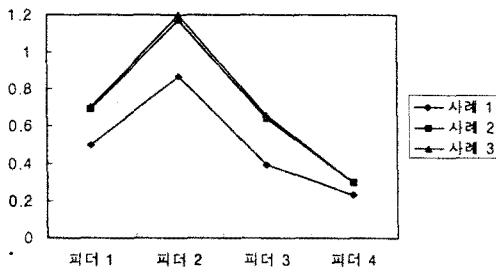
4.3 사례연구 결과

사례연구를 통해 그림 6과 같은 결과를 도출하였다. 각 사례에 대해 동일하게 4만회의 반복시행을 시행하였으며 그 평균값을 도출하였다. 그림 6(a)의 경우는 4개 지역의 연간 1개 수용가 평균 영구정전, 순간전압강하의 평균값을 비교한 것이며 그림 6(b)의 경우는 각 피더별로 연간 1개 수용가 평균 순간전압강하 영향을 비교한 것이다.

사례연구를 통해 본 논문에서 제시한 방식을 이용하여 순간전압강하의 잠재적 위험도를 파악할 수 있음을 알 수 있으며, 영구정전과 비교해 볼 때 상당한 위험요소가 될 수 있음을 알 수 있다. 또한 지역별로 볼 때 공단지역이 밀집해 있는 피더 2와 대도시 중심부 사무용 빌딩 밀집지역인 피더 1이 순간전압강하에 대한 잠재적 위험도가 높은 것으로 나타났다.



(a) 사례연구별 영구정전, 순간전압강하 횟수



(b) 사례연구별 각 피더별 순간전압강하 횟수

그림 6. 사례연구 결과
Fig. 6. The result of case studies

[참고 문헌]

- [1] R.C.Dugan, Mark F.McGranaghan and H.Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, pp.9-80, 1996.
- [2] J.Ward et al., "Power Quality Two Different Perspectives," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol.5, No.3, pp.1501-1513, July 1990.
- [3] Y.Sekine et al., "Present State of Momentary Voltage Dip Interferences and the Countermeasures in Japan," *CIGRE* 36-206, September 1992.
- [4] J.Lamoree et al., "Voltage Sag Analysis Case Studies," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.30, No.4, pp.1083-1089, July/August 1994.
- [5] L.Conrad, K.Little, and C.Grigg, "Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault-clearing Voltage Dips," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.27, No.1, pp.167-172, January 1991.
- [6] Math H.J.Bollen, "Fast Assessment Methods for Voltage sags in Distribution Systems," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol.32, No.6, pp.1413-1423, November/December 1996.
- [7] R.E.Brown et al., "Distribution System Reliability Assessment Momentary Interruptions and Storms," *IEEE PES Proceedings* 96 SM, pp.1-6, 1996.
- [8] R.C.Dugan et al., "Indices for Assessing Utility distribution System RMS Variation Performance," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol.13, No.1, pp.254-259, January 1998.
- [9] 한국전력공사 전력연구원, 송배전선로 재패로 방식의 최적화 연구, 한국전력공사, 1997년 12월.
- [10] 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.