

순시전압 품질을 고려한 배전계통에서의 신뢰도 평가

윤상윤  
한전 전력연구원

김재철  
승실대학교

배주천  
한국전력거래소

Reliability Evaluation of Power Distribution Systems Considering a Momentary Voltage Quality

Yun Sang-Yun  
KEPRI

Kim Jae-Chul  
Soongsil Univ.

Bae Joo-Cheon  
Korea Power Exchange

**Abstract** - This paper presents the reliability evaluation methods considering the momentary voltage quality in power distribution systems. The voltage quality phenomena deal with this paper are sustained and momentary interruptions and voltage sags. Conventional evaluation indices and methods are summarized for the sustained interruptions, and the assessment methodologies of momentary interruptions and voltage sags are proposed. The evaluation methods are divided into the analytical method and Time Sequential Monte Carlo simulation. The proposed methods are tested using the modified RBTS (Roy Billinton Test System) form and historical reliability data of KEPCO system.

1. 서 론

배전계통의 신뢰도 평가의 목적은 계통 구성 및 요소들의 정보를 바탕으로 수용가 전력공급의 안전성(security)을 예측하기 위한 것이다. 이것은 주로 영구정전의 빈도 및 지속시간에 의해 결정되었다. 최근, 전자 및 정밀 기기의 수용가 보급과 배전계통의 단거리 고밀도화 추세는 순간적인 전압 외란에 의한 피해를 증가시키고 있다. 무엇보다도 순간정전 및 순간전압강하는 영구정전에 비해 발생 빈도가 높으며, 특정 수용가에 대한 이러한 외란들의 피해는 영구정전에 비해 훨씬 높다.

순간정전에 대한 선행연구 중 대표적인 것을 정리하면 다음과 같다. R.E.Brown 등[1]은 순간정전의 충격을 평가하기 위한 방법을 제시하였으며 IEEE Std 1366(1998)에서는 영구정전 및 순간정전에 관한 배전계통의 전력공급 신뢰도 지수들을 표준화하였다. 제시된 지수들은 평균 순간정전 빈도 지수(momentary average interruption frequency index: MAIFI)와 평균 순간정전 이벤트 빈도 지수(momentary average interruption event frequency index: MAIFE)이다. 그러나 이러한 지수들의 배전계통에서의 순간정전에서의 평가 방법론에 관한 언급은 아직까지 없다. 순간전압강하의 평가 방법에 관한 선행 연구 중 대표적인 것을 정리하면 다음과 같다. D.L.Brooks 등[2]은 시스템 평균 실효치 변동 빈도 지수(system average RMS variation frequency index: SARFI<sub>x</sub>)를 제안하였으며 IEEE Std 1546(2000)에서는 이 지수를 표준화하였다. 순간전압강하의 평가 지표는 부가적인 모니터링 시스템을 필요로 하며 각 수용가 종류별 순간전압강하의 차등적인 충격을 고려하지 않고 있다.

본 논문에서는 배전계통에서의 전압품질 현상의 충격의 정량적인 평가를 수행하기 위한 신뢰도 평가 방법을 제안한다. 이를 위해, 본 논문의 논리적 흐름은 세 가지로 구분된다. 하나는 영구정전 부분에 대한 것이며, 다른 하나는 순간정전에 의한 것이며 나머지 하나는 순간

전압강하에 관한 것이다. 순간정전에 대해, 배전계통의 환경을 고려한 평가 방법론이 제시되었다. 순간전압강하의 평가 지표를 제한하고 각 전압품질 현상의 평가 방법론들은 배전계통의 누적된 신뢰도 데이터를 이용하여 설계되었다. 제안된 평가방법들은 해석적 방식과 확률적 방식으로 구분되었으며, 확률적 방식으로는 몬테카를로 시뮬레이션 방식이 사용되었다. 한국전력공사의 누적된 신뢰도 데이터와 수정된 RBTS(Roy Billinton Test System)을 이용한 사례연구를 통해, 제안한 평가 방법들의 효과를 입증하였다.

2. 배전계통에서의 전압품질 현상

배전계통 내에서 사고가 발생하면, 차단기가 사고를 제거하기 위해 트립되며 일정시간이 경과한 후 자동적으로 재폐로 된다. 만일 사고가 일시적이거나, 차단기의 재폐로는 성공될 것이며, 정전은 일시적인 것이다. 이러한 경우에 사고선로의 수용가들은 순간정전을 경험할 것이고, 인근 선로상의 수용가들은 한번의 순간전압강하 내지 연속적인 순간전압강하를 경험할 것이다. 그러나 만일 사고가 영구적이거나 차단기 상의 재폐로 동작은 실패할 것이며 로크-아웃(lock-out)될 것이다. 이 경우 사고선로의 수용가들은 영구정전을 경험할 것이며 인근 선로의 수용가들은 연속적인 순간전압강하를 경험할 것이다.

위의 예에서 보는 바와 같이, 각 전압품질 현상들(영구정전, 순간정전, 순간전압강하)은 다음과 같은 공통적인 특징들을 가지고 있다.

- 1) 세 가지 현상들은 모두 전압크기의 변동에 관련되어 있다.
- 2) 세 가지 현상들은 동일한 발생 원인을 가지며, 그것은 배전계통 상의 사고이다.

따라서 배전계통의 사고에 의한 실제적인 신뢰도 평가를 위해서는 3가지 전압 품질 현상들이 모두 고려되어야만 한다.

3. 전압품질 현상의 평가 방법

3.1 영구 정전의 신뢰도 평가

영구정전에 대한 신뢰도평가를 위한 기본 변수들은 평균 영구 사고율,  $\lambda_{sk}$ , 평균 복구 시간,  $\gamma_k$  및 평균 연간 사고시간,  $U_k$  등의 세 가지로 나눌 수 있다. 부하점  $k$ 에 대한 각 파라미터들은 다음 수식들로 계산된다 [3].

$$\lambda_{sk} = \sum_{i \in F(k)} \lambda_{si} \quad \text{failure/year} \quad (1)$$

여기서  $\lambda_{si}$ 는 섹션  $i$ 의 연간 영구사고율을 나타내며  $i \in F(k)$ 는 부하점  $k$ 에 영구정전을 일으킬 수 있는 모든 섹션  $i$ 를 의미한다. 또한 섹션(section)이란 계통을 구성하는 선로, 기기 등을 일컫는다.

$$U_k = \sum_{i \in F(k)} \lambda_{Si} r_i \quad \text{hours/year} \quad (2)$$

여기서  $r_i$ 는 섹션  $i$ 의 평균 복구시간을 의미한다.

$$r_k = \frac{\sum_{i \in F(k)} \lambda_{Si} r_i}{\sum_{i \in F(k)} \lambda_i} \quad \text{hours/failure} \quad (3)$$

비록 위의 기본 신뢰도 지수들이 매우 중요하기는 하지만, 이것만 가지고는 완전한 시스템 신뢰도 해를 구할 수 없다. 일반적으로는 추가적인 신뢰도 지수들이 사용되며 그 중 가장 일반적으로 사용되는 지수는 시스템 평균 정전 빈도 지수(System Average Interruption Frequency Index: SAIFI)와 시스템 평균 정전 지속 시간 지수(System Average Interruption Duration Index: SAIDI)이다.

영구 정전에 대한 신뢰도 평가 방법은 해석적 방식과 확률적 방식을 사용하는 것이 일반적이다. 해석적 방식은 예측되는 평균값을 계산하려는 목적이며 비교적 계산이 간단하고 짧은 장점과 평균값 이외에는 볼 수 없다는 단점이 있다. 확률적 해석방식은 계산시간이 길며 복잡하다는 단점이 있으나, 평균 이외에 이벤트의 확률 분포를 볼 수 있으므로 계획 및 운용에 유용한 데이터를 제공한다. 본 논문에서는 확률적 해석 방식으로 몬테카를로(Monte Carlo) 방식 (4)을 사용하였다.

### 3.1.1 영구정전 평가를 위한 해석적 방법

영구정전에 대한 신뢰도 평가를 위한 해석적 방법의 일반적 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 단계 1) 시스템 구성 자료 조사
- 단계 2) 부하점의 신뢰도 파라미터 계산
- 단계 3) 시스템 신뢰도 지수 계산: 신뢰도 지수(SAIFI, SAIDI)가 다음의 수식에 의해 계산된다.

$$SAIFI = \frac{\sum_{k=1}^R \lambda_{Sk} N_k}{\sum_{k=1}^R N_k} \quad \text{int./yr} \cdot \text{customer} \quad (4)$$

여기서  $R$ 은 부하점의 개수를 나타내며  $N_k$ 는 부하점  $k$ 의 수용가 수를 의미한다.

$$SAIDI = \frac{\sum_{k=1}^R U_k N_k}{\sum_{k=1}^R N_k} \quad \text{hr/yr} \cdot \text{customer} \quad (5)$$

### 3.1.2 영구정전 평가를 위한 확률적 방법

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 영구정전에 대한 확률적 신뢰도 평가방법은 다음 단계들로 요약할 수 있다.

- 단계 1) 시스템 각 섹션들에 대한 난수를 발생시키고 이것을 확률분포 함수에 따라 TTF(time to failure) 값으로 변환한다.
- 단계 2) 최소의 TTF를 가지는 요소를 선택한다.
- 단계 3) 최소의 TTF를 가지는 요소에 새로 두개의 난수를 발생시키고 이것을 RT(the repair time)와 ST(the switching time) 값으로 변환한다.
- 단계 4) 부하점의 고장 발생 및 지속시간을 기록한다.
- 단계 5) 단계 4를 고장난 섹션에 의해 영향받는 모든 부하점에 대해 반복한다.
- 단계 6) 만일 이전의 사고 이벤트에 의한 복구 시간과 새로운 사고 지속시간이 겹친다면, 새로운 복구

시간에서 겹친 시간만큼 제거한다.

- 단계 7) 고장 복구된 요소에 새로운 랜덤수를 발생시키고 새로운 TTF 값으로 변환한다. 만일, 시뮬레이션 한 것이 1년을 넘지않으면 단계 2로 가고 그렇지 않으면 단계 8로 진행한다.
- 단계 8) 모든 부하점에 대해 연간 사고 횟수 및 지속시간을 기록한다.
- 단계 9) 시스템 지수를 계산하고 연간 값으로 기록한다.
- 단계 10) 만일 정해진 시뮬레이션 기간이 안됐다면 단계 2로 가고 그렇지 않으면 단계 11로 진행한다.
- 단계 11) 모든 부하점에 대해 평균 사고 횟수와 지속시간을 계산한다.
- 단계 12) 시스템 지수의 평균값을 계산한다.

## 3.2 순간정전의 신뢰도 평가

순간정전의 신뢰도 평가를 위한 기본 파라미터는 평균 순간 사고율  $\lambda_{Mk}$ 이며 다음과 같다.

$$\lambda_{Mk} = \sum_{i \in F(k)} \lambda_{Mi} \quad \text{failure/year} \quad (6)$$

여기서  $\lambda_{Mi}$ 는 섹션  $i$ 의 연간 순간사고율이다. 두 가지 순간정전에 대한 지수들이 IEEE Std 1366(1998)에서 제시되었다. 하나는 순간정전에 관련된 것이며 다른 하나는 순간정전 이벤트에 관련된 것이다. 각 지수를 정의하면 다음과 같다.

- 순간 평균 정전 빈도 지수(momentary average interruption frequency index: MAIFI)
- 순간 평균 정전 이벤트 빈도 지수(momentary average interruption event frequency index: MAIFI<sub>E</sub>)

그러나 위의 지수들은 배전계통에 적합한 평가 방법론은 포함하고 있지 않다. 본 논문에서는 순간정전의 신뢰도 평가를 위한 해석적이며 확률적인 방법론을 제안하였다. 확률적 해석방식에는 몬테카를로 시뮬레이션 기법이 사용되었다.

### 3.2.1 순간정전 평가를 위한 해석적 방법

순간정전의 해석적 신뢰도 평가를 위한 과정은 다음과 같이 요약된다.

- 단계 1) 시스템 구성에 관한 데이터 수집
- 단계 2) 부하점의 신뢰도 파라미터 계산
- 단계 3) 시스템 신뢰도 지수 계산

$$MAIFI = \frac{\sum_{k=1}^R N_{Mk} N_k}{\sum_{k=1}^R N_k} = \frac{\sum_{k=1}^R (\sum_{i \in F(k)} (\lambda_{Mi} \times P_i) \times N_k)}{\sum_{k=1}^R N_k} \quad \text{int./yr} \cdot \text{customer} \quad (7)$$

여기서  $N_{Mk}$  및  $N_k$ 는 부하점  $k$ 의 순간정전 횟수 및 수용가 수를 나타낸다.  $\lambda_{Mi}$ 는 부하점  $k$ 의 순간사고율,  $P_i$ 는  $i$ 번째 재페로의 성공률을 의미한다.

$$MAIFI_E = \frac{\sum_{k=1}^R N_{MEk} N_k}{\sum_{k=1}^R N_k} = \frac{\sum_{k=1}^R \lambda_{Mk} N_k}{\sum_{k=1}^R N_k} \quad \text{int./yr} \cdot \text{customer} \quad (8)$$

여기서  $N_{MEk}$ 는 부하점  $k$ 의 순간정전 이벤트 횟수를 나타낸다.

### 3.2.2 순간정전 평가를 위한 확률적 방법

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 순간정전에 대한 확률적 신뢰도 평가방법은 다음의 단계들로 요약할 수 있다.

- 단계 1) 시스템 내의 각 요소들에 대한 난수를 발생하고 이것을 확률분포 함수에 따라 TTMF(time to momentary failure)로 변환한다.
- 단계 2) 최소의 TTMF 값을 가지는 요소를 선택한다.
- 단계 3) 또 다른 난수를 발생시켜 이것을 재페로 상황으로 변환한다.
- 단계 4) 부하점의 순간정전 및 순간정전 이벤트를 기록하고 지속시간도 기록한다.
- 단계 5) 고장난 색선에 의해 영향 받는 모든 부하점들에 대해 단계 4를 반복한다.
- 단계 6) 수리된 요소에 대해 새로운 난수를 발생시키고 이것은 새로운 TTF 값을 변환한다. 만일 시뮬레이션 시간이 1년을 넘지 않았으면 단계 2로 가고, 그렇지 않으면 단계 7로 진행한다.
- 단계 7) 모든 부하점에 대한 연간 순간정전 및 순간정전 이벤트를 기록한다.
- 단계 8) 시스템 지수를 계산하고 연간 값을 기록한다.
- 단계 9) 만일 정해진 시뮬레이션 시간이 안됐으면 단계 2로 가고 그렇지 않다면 단계 10으로 진행한다.
- 단계 10) 모든 부하점에 대한 평균 순간정전 및 순간정전 이벤트 횟수를 계산한다.
- 단계 11) 시스템 지수의 평균값을 계산한다.

### 3.3 순간전압강하의 신뢰도 평가

순간전압강하의 신뢰도 평가를 위한 기본 파라미터는 개별 수용가의 순간전압강하에 의한 위험도이며 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다 [5].

$$R_{VS} = (\mu_D[t_{TD}] + \mu_M[M_{VS}]) / 2 \quad (9)$$

여기서  $\mu_D[t_{TD}]$  및  $\mu_M[M_{VS}]$ 는 순간전압강하 지속시간 ( $t_{TD}(ms)$ ) 및 순간전압강하 크기 ( $M_{VS}(\%)$ )에 대한 멤버십 값을 의미한다. 순간전압강하의 평가 지표는 참고 문헌 [5]에서 제안되었으며 시스템 평균 순간전압강하 위험도 지수(aystem average voltage sag risk index: SAVSRI)로 정의되었으며 그 형태는 식 (10)에 나타내었다. SAVSRI는 수용가 당 순간전압강하의 연간 위험도를 나타내며, 만일 SAVSRI가 1이라면, 수용가의 전체 부하가 적어도 일년에 한번 가동정지 내지 오동작을 일으킬 위험이 있다는 것을 나타낸다.

$$SAVSRI = \frac{\sum R_{VS}}{\text{Total No. of Customer Served}} \quad (10)$$

본 논문에서는 순간전압강하에 대한 해석적, 확률적 신뢰도 평가 방법을 제안하였다.

#### 3.3.1 순간전압강하 평가를 위한 해석적 방법

순간전압강하의 해석적 신뢰도 평가를 위한 과정은 앞서의 영구정전 및 순간정전과 같으며 다만 달라지는 점은 순간전압강하의 경우 영구사고와 순간사고에 의해 모두 발생하므로 이 두가지 요소를 모두 고려해야 한다는 점이다. 시스템 신뢰도 지수를 계산하기 위한 산식은 식 (11)과 같이 표현된다. 식 (11)은 영구사고에 의해 발생하는 순간전압강하 위험도 및 순간사고에 의해 발생되

는 순간전압강하 위험도를 모두 고려한 것이다.

$$SAVSRI = \frac{\sum_{k=1}^R R_{VSK} N_k}{\sum_{k=1}^R N_k} = \frac{\sum_{k=1}^R (\sum_{i \in VS(k)} \lambda_{Si} R_{VSSk} + \lambda_{Mi} R_{VSMk}) \times N_k}{\sum_{k=1}^R N_k} \quad (11)$$

여기서,  $R_{VSK}$ 는 부하점  $k$ 의 순간전압강하 위험도를 의미한다.  $R_{VSSk}$  및  $R_{VSMk}$ 는 부하점  $k$ 의 영구 및 일시 사고에 의한 순간전압강하 위험도를 나타낸다.

### 3.3.2 순간전압강하 평가를 위한 확률적 방법

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 순간전압강하에 대한 확률적 신뢰도 평가방법은 다음의 단계들로 요약할 수 있다.

- 단계 1) 시스템 내의 각 요소들에 대해 난수를 발생시키고 이것을 확률 함수에 따라 TTF 및 TTMF 값으로 변환한다.
- 단계 2) 최소의 TTF 및 TTMF를 가지는 요소를 결정한다.
- 단계 3) 제약조건 및 누적된 신뢰도 데이터에 의해 사고 종류, 재페로 상황 등을 발생시킨다.
- 단계 4) 영구 및 순간사고 부분에 의해 영향 받는 부하점의 순간전압강하 지속시간 ( $t_{TD}$ ) 및 크기 ( $M_{VS}$ )를 계산한다.
- 단계 5) 모든 부하점에 대해 단계 4를 반복한다.
- 단계 6) 각 부하점에 대한 순간전압강하 위험도를 계산하여 기록한다.
- 단계 7) 새로운 난수를 발생시키고 이것들을 새로운 TTF 및 TTMF로 변환한다. 만일 시뮬레이션 시간이 1년을 초과하지 않았으면 단계 2로 가고, 그렇지 않으면 단계 8로 진행한다.
- 단계 8) 연간 시스템 지수(SAVSRI)를 계산하고 이것을 기록한다.
- 단계 9) 만일 총 시뮬레이션 시간이 정해진 시간보다 작으면 단계 2로 가고, 그렇지 않으면 단계 10으로 진행한다.
- 단계 10) 평균 시스템 지수를 계산한다.

## 4. 사례연구

### 4.1 사례연구를 위한 데이터

사례연구를 위해 수정된 R BTS (Roy Billinton Test System) 배전 bus 2번을 사용하였다 [6]. 테스트 시스템의 구성은 그림 1에 나타내었다.

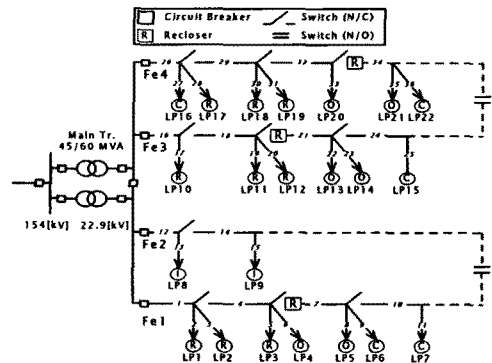


그림 1. 사례연구를 위한 시스템

사례연구에 사용된 누적된 계통 신뢰도 데이터는 표 1에 나타내었다. 이 데이터는 한국전력공사의 누적된 신뢰도 자료를 이용하였다.

표 1. 사례연구를 위한 신뢰도 데이터

계통 요소	영구		일시
	연간 사고율	사고 당 복구 시간	연간 사고율
선로	0.034 /km	0.5 hour	0.160 /km
차단기	0.002	3 hour	-
리크로저	0.002	3 hour	-
스위치	0.002	3 hour	-

몬테카를로 시뮬레이션을 위해 지수형 확률 분포 (exponential probability distribution) 함수가 사용되었으며 시뮬레이션 기간은 50,000 년으로 설정되었다. 사례연구에 이용된 기타 설비 운용 및 동작에 대한 자료는 참고문헌 [5]를 이용하였다.

#### 4.2 사례연구 결과

각 피더별 영구정전, 순간정전 및 순간전압강하에 의한 사례연구 결과를 표 2에서 표 4까지에 나타내었으며, 그림 2와 3에 확률분포를 도시하였다.

표 2. 각 피더별 SAIFI 및 SAIDI 비교

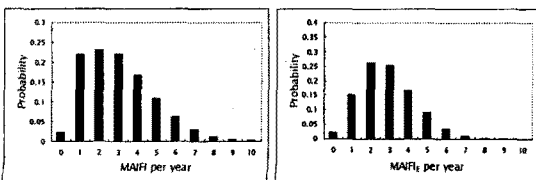
피더	SAIFI		SAIDI	
	해석적 방식	몬테카를로 방식	해석적 방식	몬테카를로 방식
피더1	0.4558	0.4567	0.1295	0.1291
피더2	0.3039	0.3050	0.0917	0.0925
피더3	0.3886	0.3891	0.1216	0.1217
피더4	0.4501	0.4477	0.1282	0.1304

표 3. 각 피더별 MAIFI 및 MAIFI<sub>E</sub> 비교

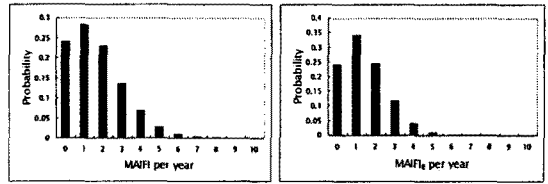
피더	MAIFI		MAIFI <sub>E</sub>	
	해석적 방식	몬테카를로 방식	해석적 방식	몬테카를로 방식
피더1	2.5079	2.5004	2.1316	2.1275
피더2	1.6638	1.6642	1.4160	1.4159
피더3	2.1297	2.1345	1.8125	1.8161
피더4	2.4697	2.4666	2.1019	2.0986

표 4. 각 피더별 SAVSRI 비교

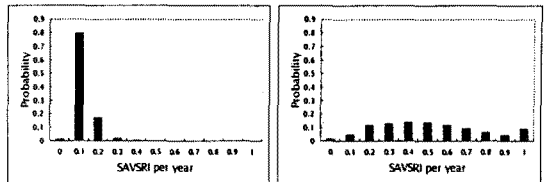
피더	SAVSRI	
	해석적 방식	몬테카를로 방식
피더1	0.0673	0.0695
피더2	0.4759	0.4764
피더3	0.0404	0.0405
피더4	0.0718	0.0716



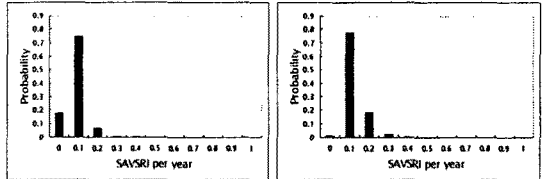
(a) 피더 1(MAIFI) (b) 피더 1(MAIFI<sub>E</sub>)  
Fig. 2. 각 피더들에 대한 MAIFI 및 MAIFI<sub>E</sub>의 확률 분포 (계속)



(c) 피더 2(MAIFI) (d) 피더 2(MAIFI<sub>E</sub>)  
Fig. 2. 각 피더들에 대한 MAIFI 및 MAIFI<sub>E</sub>의 확률 분포



(a) 피더 1 (b) 피더 2



(c) 피더 3 (d) 피더 4  
Fig. 3. 각 피더들에 대한 SAVSRI의 확률 분포

#### 5. 결 론

본 논문에서는 배전계통에서의 복합적인 신뢰도 평가의 새로운 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 영구 정전, 순간 정전 및 순간전압강하라는 세 가지 전압 품질 문제를 포함한다. 제안한 평가 방법은 평가 방법론 자체의 일반성과 각 전압품질 요소에 의한 수용가 상의 실질적인 충격을 반영하였다. 일반성을 갖추기 위해, 전력회사에서 일반적으로 보유하고 있는 데이터인 누적된 신뢰도 자료를 이용하였다. 순간정전 및 순간전압강하에 대한 해석적, 확률적 평가 방식이 제안되었다. 확률적 평가 방식으로는 몬테카를로 방식이 사용되었다. 제안한 평가 방법은 전반적인 배전계통 관점에서의 전압 품질 문제의 좀더 실질적인 평가도구로 사용될 수 있을 것이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] R. E. Brown et al., "Distribution system reliability assessment: momentary interruptions and storms," IEEE Trans. on PWRD, vol. 12, no. 4, pp. 1569-1575, October 1997.
- [2] D. L. Brooks et al., "Indices for assessing utility distribution system RMS variation performance," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 13, No. 1, pp. 254-259, January 1998.
- [3] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability evaluation of power systems (second edition), New York: Plenum Press, 1996.
- [4] R. Billinton and W. Li, Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods, New York: Plenum Press, 1994.
- [5] 윤상운 외, "퍼지모델을 이용한 배전계통에서의 순간전압강하 평가 방법," 전기학회 논문지, 제 49A권, 제 4호, pp. 177-184, 2000년 4월.
- [6] R. N. Allan et al., "A reliability test system for educational purposes -Basic distribution system data and results," IEEE Trans. on PWRD, vol. 6, no. 2, pp. 813-820, May 1991.