

퍼지 모델을 이용한 배전 계통에서의 순간전압강하 평가 방식

論 文

49A-4-5

An Assessment Method for Voltage Sag in Power Distribution System using a Fuzzy Model

尹 尙 潤* · 吳 正 桓* · 金 彦 錫* · 金 洛 京* · 金 載 哲**

(Sang-Yun Yun · Jung-Hwan Oh · Oun-Seok Kim · Nark-Kyung Kim · Jae-Chul Kim)

Abstract - In this paper, we propose a method for assessing the effect of voltage sag in power distribution systems using a fuzzy model. The proposed method is based on the reliability data of distribution system and specified computer business equipment manufacturer association(SCBEMA) curve that express the representative power acceptability curve by voltage sag for each customer type. The SCBEMA curves are made by using the CBEMA curves obtained from the experiment for the customers' sensitive equipment. In order to transform SCBEMA curves to the differential damage by voltage sag, a fuzzy model is used. The proposed fuzzy model is composed to reflect two parameters of customers damage by voltage sag. One is the duration and magnitude of voltage sag and the other is the different risk due to the customer types. The Monte Carlo simulation method and the historical reliability data in KEPCO are used for case studies.

Key Words : Voltage Sag, CBEMA Curve, SCBEMA Curve, Risk Assessment, Power Quality

1. 서 론

배전계통에서의 전력신뢰도의 평가는 주로 영구정전의 지속시간 및 빈도에 의해 결정되어왔다. 영구정전은 광범위한 영역의 수용가에 직접적인 영향을 미치는 반면, 순간전압강하 및 순간정전을 포함하는 전력품질에 관련된 여러 문제들은 소규모의 한정된 수용가에 영향을 미쳐온 것이 사실이다. 그러나, 산업용에서 일반 가정에 이르기까지 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.

순간전압강하에 대한 연구는 크게 실질적 접근 방식과 이론적 접근 방식으로 구분할 수 있다. 실질적 접근 방식의 경우, Koval 등[1]은 수용가에 대한 모니터링을 통해 순간전압강하 발생 현황을 분석하였으며 Sekine 등[2]은 수용가 부하에 대한 실험 및 여론조사 등을 통해 수용가 부하의 영향 및 일본의 순간전압강하 현황을 분석하였다. 또한, Lamoree 등[3]은 수용가의 대표적 민감부하에 대한 순간전압강하 영향과 대책을 제시하였다. 이론적 접근 방식의 경우, Conrad 등[4]과 Bollen[5]은 순간전압강하 크기, 지속시간 및 빈도를

예측하는 방법을 제시하였으며, Dugan 등[6]은 순간전압강하 발생빈도를 이용한 영향 평가 수식을 제시하였다. 두 가지 방식 모두 특정 계통에 대한 직접적이며 명확한 결과의 도출이라는 장점을 가지고 있으나 다른 배전 계통에 그 결과를 적용하기 어려우며, 부가적 모니터링 시스템을 필요로 한다. 또한, 순간전압강하는 본질적으로 정전과는 다른 것이며 수용가 부하 특성 및 순간전압강하 자체의 특성에 따라 그 영향이 달라지므로 Dugan 등[6]과 같이 단순히 발생횟수만을 가지고는 평가하기 어려우며 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 특성 요소를 반영할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 기본적으로 전력회사에서 일반적으로 보유하고 있는 누적된 설비 신뢰도 자료를 사용한 영향평가 방식을 제안함으로써 평가방식에 보편성을 가지도록 하였다. 또한, 순간전압강하가 수용가에 미치는 영향의 특성 요소를 반영하기 위해 퍼지 모델을 사용하였다. 이를 위해, 수용가별 순간전압강하에 의한 민감도 곡선인 SCBEMA(Specified Computer Business Equipment Manufacturer Association) 곡선을 제안하였다. 이 곡선은 실증실험을 통해 얻어진 CBEMA(Computer Business Equipment Manufacturer Association) 곡선을 이용하여 작성하였다. 또한, 수용가에 미치는 순간전압강하의 특성 요인을 순간전압강하 크기 및 지속시간과 수용가 종류에 따른 차동적 위험도의 두 가지로 구분하여 제안한 퍼지 모델에 반영되도록 구성하였다. 사례 연구는 선로 길이 및 선로 종류 등의 변수들에 의해 순간전압강하의 영향을 분석하기 위해 시행하였다. 일반적인 신뢰도 평가방식의 하나인 몬테카를로 시뮬레이션 방식과 한국 전력공사의 누적된 신뢰도 데이터가 사례 연구를 위해 사용되었다.

* 正 會 員 : 崇 實 大 電 氣 工 學 科 博 士 科 程

** 正 會 員 : 崇 實 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

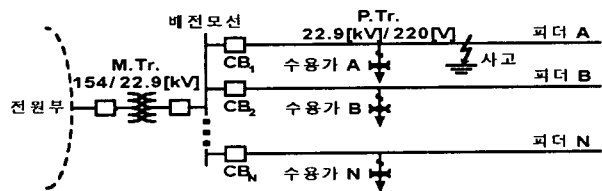
接 受 日 字 : 1999年 11月 6日

最 終 完 了 : 2000年 3月 6日

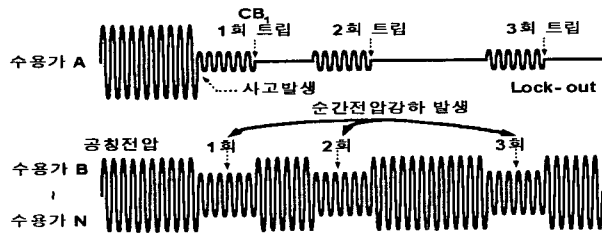
2. 배전계통에서의 순간전압강하

2.1 순간전압강하의 발생 메커니즘

배전 계통에서의 순간전압강하는 계통 사고와 대응량 부하의 기동으로 인하여 발생하며, 이 중에서 계통내의 사고를 그 원인으로 보는 것이 일반적이다[7]. 그림 1(a)의 배전 계통 모델시스템에서 사고가 발생했을 경우, 차단기가 사고를 제거하기 위해 개방되며 수 초 후에 자동적으로 재폐로 된다. 이러한 재폐로는 전력공급의 신뢰도를 향상시키지만 같은 모선에 연결된 인근 선로의 수용가들은 수 차례의 순간전압강하를 경험하게 된다. 그림 1(b)는 영구사고 시 사고수용가 및 인근선로 수용가의 전압 파형을 도시한 것이다.



(a) 모델 배전 계통



(b) 영구사고 시 차단기 동작에 의한 수용가의 전압 파형

그림 1 배전 계통 모델 및 사고제거 동안의 전압 파형
Fig. 1 Distribution system model and voltage waveform during fault clearing

2.2 순간전압강하의 발생 빈도, 지속시간 및 크기

본 논문에서는 배전 계통에서의 순간전압강하 발생의 원인을 배전 계통 내의 사고로 제한하였다. 따라서, 순간전압강하의 발생 빈도는 배전 계통의 사고 발생의 빈도에 관련되며 그것은 전력회사에서 일반적으로 보유하고 있는 누적된 설비 신뢰도 자료와 일치한다. 그림 1(b)와 같이 동일한 사고에 의해 연속적으로 발생하는 순간전압강하의 경우 그 횟수는 1회로 한다[8].

순간전압강하의 지속시간은 보호 기기의 사고제거 시간에 관련되어 있다. 이것은 보호기기의 특성곡선인 시간-전류 곡선(time-current curve: T-C curve)을 통해 구할 수 있다. 예를 들어, 그림 1(a)의 모델 배전 계통의 사고 시 순간전압강하의 총 지속시간 T_{TD} (total duration time)는 식 (1)과 같다. 여기서 T_{RO} (relay operation time)는 계전기의 동작시간이며 식 (2)와 같이 가정하였다[9]. T_{CBO} (circuit breaker operation time)는 차단기의 동작시간이라고 정의하였다.

$$T_{TD} = T_{RO} + T_{CBO} \quad (1)$$

$$T_{RO} = \left(\frac{39.85}{I^{1.95} - 1} + 1.084 \right) \times 6 \times M [\text{cycles}] \quad (2)$$

여기서, I : 탭 전류 값의 배수

$$\left(= \text{전류크기} \times \frac{1}{CT\text{비}} \times \frac{1}{\text{Tap 정정치}} \right)$$

M : 시간배율

그림 1(a)의 모델 배전계통에서 3상 단락 사고가 발생했으며 1회 재폐로 후 사고가 제거되었다고 가정한다. 사고전류의 크기, 계기용 변류기(CT)의 권수비 및 탭(tap) 정정치가 각각 2000[A], 600:5[A] 및 3[A]이며 피더 시작점의 과전류 계전기의 시간배율 M이 4.4로 지정되어 있다고 하면, 탭 전류 값의 배수인 I는 5.56이 되므로 그 사고에 대한 모델 배전 계통에서의 총 순간전압강하 지속시간은 식 (1)과 (2)에 의해 67.05[cycles]로 계산할 수 있다. 그림 1(b)와 같이 동일 사고에 의해 연속적으로 발생하는 순간전압강하의 경우 그 지속시간은 가장 긴 것을 기준한다[8].

순간전압강하의 크기는 사고전류의 크기와 관련되어 있다. 그림 1(a)의 방사상 배전 계통의 경우, 인근 피더에서의 순간전압강하 크기는 배전 모선에서의 순간전압강하 크기와 거의 일치한다. 따라서, 본 논문에서는 순간전압강하의 크기를 사고해석[4]을 통해 계산하였다.

2.3 순간전압강하에 의한 수용가 영향 변수

본 논문에서는 순간전압강하에 의해 수용가에 영향을 줄 수 있는 변수를 다음과 같이 두가지로 구분하였다.

첫째로는 순간전압강하 지속시간 및 크기를 들 수 있다. 이제까지, 순간전압강하 지속시간 및 크기에 의한 수용가 영향 분석을 위한 일반적인 방법은 순간전압강하에 의한 수용가 부하의 민감도 곡선을 구하는 것을 이용해 왔으며 CBEMA(Computer Business Equipment Manufacturer Association) 곡선[10]이 대표적이다. 그림 2는 CBEMA 곡선의 전형적 형태를 나타낸 것으로 본 논문에서는 순간전압강하와 관련된 아래쪽 곡선만을 다루었다.

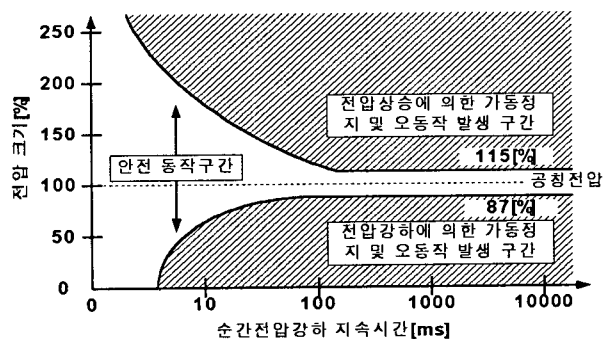


그림 2 전형적인 CBEMA 곡선
Fig. 2 Typical CBEMA curve

본 논문에서는 국내 수용가의 대표적 민감부하에 대한 순간전압강하 영향을 측정하기 위해, 참고문헌 [11]의 실험실 실험을 통해 각 민감부하들의 CBEMA 곡선을 도출하였다. 실험결과를 나타낸 그림 3의 빗금친 부분 즉, 각 곡선의 내부에 해당하는 지속시간 및 크기의 순간전압강하가 발생하면 해당부하가 가동정지 내지 오동작을 일으킬 수 있음을 나타낸다. 그림 3에서, 순간전압강하 지속시간 및 크기는 완벽한 논리곱(logical AND)의 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 순간전압강하의 지속시간 및 크기가 모두 곡선 내부에 해당할 경우만 개별 부하에 대한 그 위험도는 1이며 이외의 경우는 그 위험도가 0이다. 비 민감부하에 대한 CBEMA 곡선의 변곡점 X 및 Y 좌표 값은 참고문헌 [12]의 순간전압강하 지속시간 중 일시(temporary)에 해당하는 지속시간 중 최소값인 3000[ms]와 정전의 표준인 10[%]로 각각 선정하였다. 물론, 이 실험결과 및 비 민감부하에 대한 가정은 절대적인 것은 아니며, 다만 본 논문에서 제시하고자 하는 순간전압강하에 의한 수용가 영향 평가의 기초자료로 쓰기 위한 것이다.

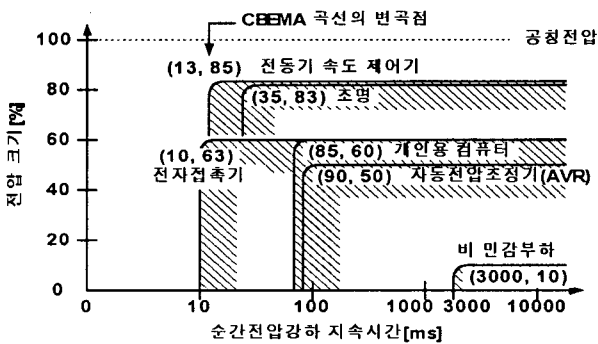


그림 3 수용가 민감부하에 대한 실험 결과
Fig. 3 Experiment results for customers' sensitive loads

둘째는, 수용가 종류에 따른 순간전압강하 위험도의 차이이다. 동일한 크기 및 지속시간을 갖는 두 개의 순간전압강하가 일반 주택용 수용가 및 업무용 빌딩에 각각 발생했다고 하고, 수용가에 미치는 위험도의 크기를 평가한다면 일반적으로 후자가 더 위험하다고 할 것이다.

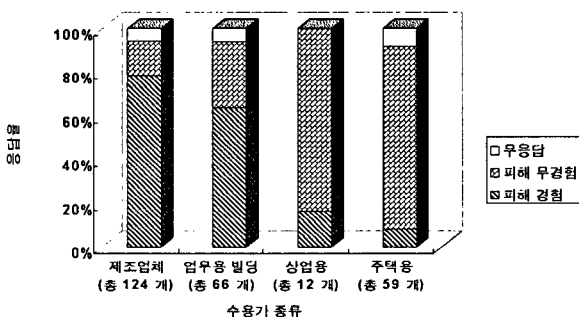


그림 4 순간적인 가동정지 및 오동작에 의한 피해 경험
Fig. 4 Damage experience due to the momentary shutdown or malfunction of equipment.

그것은 수용가 부하구성의 차이가 존재함을 의미한다. 그림 4는 순간적인 부하 가동정지 및 오동작 경험 유무에 대한 수용가 종류별 조사결과를 보여준다[13]. 이로부터 수용가 종류별로 순간전압강하에 의한 차등적인 위험도가 존재함을 알 수 있다.

3. 순간전압강하 영향 평가 방식

3.1 SCBEMA 곡선

CBEMA 곡선은 개별 부하에 대한 순간전압강하 피해를 분석하기 위해 이용될 수는 있으나 수용가는 여러 가지 개별 부하로 구성되기 때문에, CBEMA 곡선으로 직접적으로 평가할 수 없다. 따라서, 본 논문에서 제시하고자 하는 영향 평가 방식의 개발을 위해서는 수용가 부하별 순간전압강하의 민감도 곡선인 CBEMA 곡선과 같이, 어떤 수용가 개소 전체에 대한 순간전압강하 민감도 곡선이 요구된다. 이를 SCBEMA(Specified Computer Business Equipment Manufacturer Association) 곡선이라 정의하였다. SCBEMA 곡선은 각각의 부하에 대한 CBEMA 곡선과 수용가 각각의 부하별 구성을 이용하여 작성하는 수용가 부하 전체의 대표 민감도 곡선으로 그 생성 절차는 다음과 같다. 전형적인 SCBEMA 곡선의 생성을 그림 5에 나타내었다.

- 단계 1) 개별 부하의 CBEMA 곡선을 구함
- 단계 2) 각 수용가 종류별 부하 구성을 부여함
- 단계 3) 각 부하의 CBEMA 곡선 변곡점에 각 부하별 구성을 곱함
- 단계 4) 각 수용가 종류별로 모든 구성 부하에 대해 단계 3의 절차를 행하여 합산한 점을 구함. 이 점이 각 수용가 종류별 SCBEMA 곡선의 변곡점이 됨

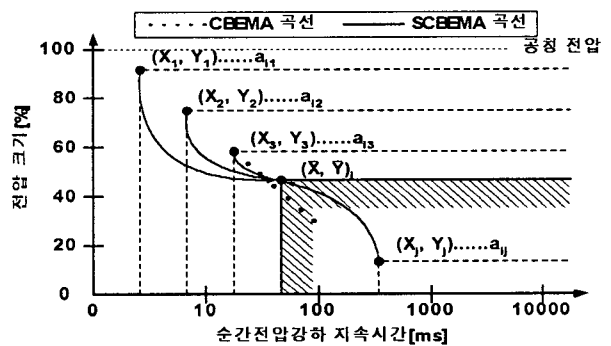


그림 5 SCBEMA 곡선의 생성
Fig. 5 Generation of SCBEMA curve

i 번째 수용가의 SCBEMA 곡선의 변곡점은 식 (3)에 의하여 계산한다.

$$(\bar{X}, \bar{Y})_i = \left(\sum_{j=1}^n (X_j \times a_{ij}), \sum_{j=1}^n (Y_j \times a_{ij}) \right) \quad (3)$$

여기서,

$(\bar{X}, \bar{Y})_i$: i 번째 수용가 SCBEMA 곡선의 변곡점 좌표
 X_j : j 번째 부하 CBEMA 곡선의 변곡점 X 좌표 값
 Y_j : j 번째 부하 CBEMA 곡선의 변곡점 Y 좌표 값
 a_{ij} : i 번째 수용가의 j 번째 부하 구성을

3.2 순간전압강하 영향 평가를 위한 퍼지모델

SCBEMA 곡선은 개별적인 CBEMA 곡선들의 평균적 개념이므로, CBEMA 곡선에서와 같이 순간전압강하 지속시간 및 크기에 대해 완벽한 논리값이 성립하지 않는다. 즉, SCBEMA 곡선 내부나 외부에 발생한 순간전압강하는 순간전압강하 크기 및 지속시간에 대해 차등적인 위험도를 가진다. 순간전압강하에 의한 수용가 영향 특성의 첫 번째 변수인 순간전압강하 크기 및 지속시간에 의한 차등적 위험도의 경우, 퍼지 멤버십 함수를 이용하여 모델에 반영되었다[14]. 본 논문에서는 퍼지 멤버십 함수로서 S형(sigmoid) 함수를 사용하였으며 그림 6에 도시하였다[15]. 그림 6에서 α , β , γ 는 각각 멤버십 소속정도(degree of membership)가 0, 0.5, 1.0인 정의구역 값을 나타낸다.

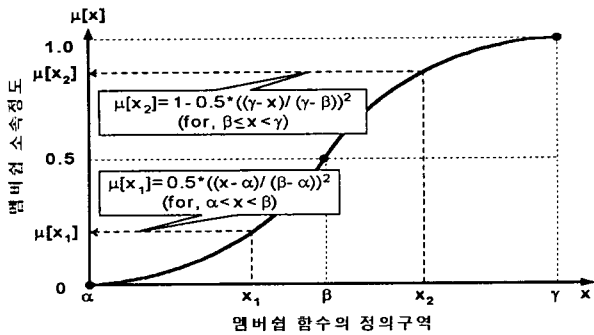


그림 6 시그모이드 형태의 퍼지 멤버십 함수
 Fig. 6 Sigmoid shaped fuzzy membership function

두 번째 변수인 수용가 종류는 퍼지 멤버십 함수의 모양을 결정하는데 이용되었다. 멤버십 함수의 모양은 멤버십 함수의 정의구역 중 곡선의 변곡점에 해당하는 β 값을 설정하는 것으로 결정된다. 즉, SCBEMA 곡선의 변곡점 X 좌표인 순간전압강하 지속시간 값을 순간전압강하 지속시간에 대한 퍼지 멤버십 함수의 β 값인 $\beta_{시간}$ 으로 설정하였으며, SCBEMA 곡선의 변곡점 Y 좌표인 전압 크기 값을 전압강하의 크기로 환산하여 순간전압강하 크기에 대한 퍼지 멤버십 함수의 β 값인 $\beta_{크기}$ 로 설정하였다.

SCBEMA 곡선의 경우 CBEMA 곡선과는 달리 완벽한 논리값의 형태가 아니므로 퍼지 연산자로 퍼지 평균 논리값(fuzzy mean AND) 연산자[14]를 사용하였으며 식 (4)에 나타내었다. 식 (4)에서 R_{vs} 는 개별 순간전압강하의 지속시간 및 크기에 대한 위험도 값으로 정의되었다.

$$R_{vs} = (\mu_D[x] + \mu_M[y])/2 \tag{4}$$

여기서,

$\mu_D[x]$: 순간전압강하 지속시간 x의 퍼지집합 D(순간전압강하의 지속시간)에 대한 멤버십 소속정도
 $\mu_M[y]$: 순간전압강하 크기 y의 퍼지집합 M(순간전압강하의 크기)에 대한 멤버십 소속정도

그림 7에 본 논문에서 제안한 퍼지모델을 도시하였다.

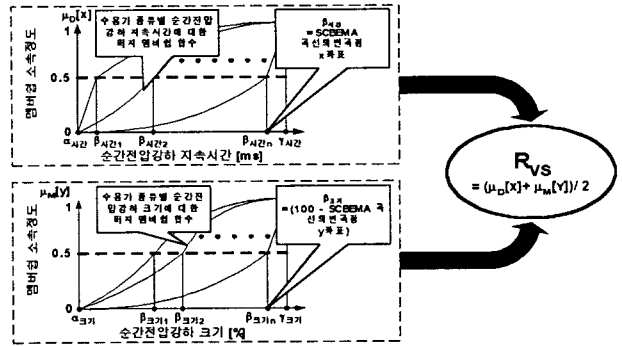


그림 7 순간전압강하 평가를 위해 제안된 퍼지 모델
 Fig. 7 Proposed fuzzy model for assessing voltage sag

3.3 순간전압강하의 영향 평가 모델

본 논문에서 제안한 평가방식의 흐름도를 그림 8에 나타내었다.

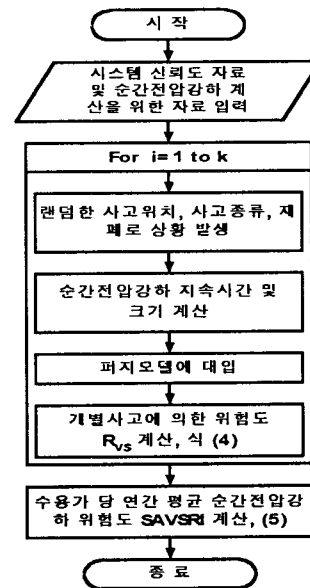


그림 8 제안한 평가 방식의 흐름도
 Fig. 8 Flowchart of proposed assessment method

본 논문에서 제안한 영향 평가모델은 기본적으로 누적된 설비 신뢰도 자료를 이용하여 순간전압강하의 수용가 영향을 평가하는 방식이며 따라서, 순간전압강하의 발생 빈도를 포함하고 있다. 다만, 기존의 평가방식이 단순히 발생 빈도를 평가 지표로 하고 있는데 반해 본 논문에서 제시한 방

식은 여기에 순간전압강하의 영향 특성 변수인 순간전압강하 자체의 특성과 수용가 영향 특성을 반영하고 있다.

영향평가 모델은 다음과 같은 3단계로 구성되어 있다. 신뢰도 평가에 널리 이용되는 몬테카를로 시뮬레이션 방식[16]이 사용되었다.

단계 1) 랜덤수 발생. 순간전압강하의 지속시간 및 크기의 결정에 영향을 주는 변수인 사고위치, 사고종류, 재폐로 상황(재폐로 성공, 실패 상황) 등을 주어진 계통의 누적된 신뢰도 자료(예: 표 1) 및 제약조건(예: 표 3의 사고종류 비율 및 재폐로 성공률 자료)에 의해 랜덤하게 발생

단계 2) 개별 사고에 대한 위험도 평가. 단계 1에 의해 결정된 랜덤변수와 보호기기 동작특성에 의해 순간전압강하 지속시간 및 크기를 결정하고 이를 제안한 퍼지 모델에 적용하여 개별 사고에 대한 위험도(R_{vs}) 계산

단계 3) 수용가 당 연간 평균 위험도 계산. 지정한 반복 횟수(k)까지의 개별 사고에 대한 순간전압강하 위험도(R_{vs})를 합산하고 최종적으로, 주어진 평가 계통의 연간 신뢰도 자료와 수용가 수(Total No. of Customer)에 근거하여 연간 수용가 당 평균 순간전압강하 위험도(SAVSRI) 계산

제안한 순간전압강하 영향 평가 방식의 최종 결과는 연간 수용가 당 평균 순간전압강하 위험도이며 시스템 평균 순간전압강하 위험도 지수(system average voltage sag risk index: SAVSRI)라 정의하였고 식 (5)에 나타내었다.

$$SAVSRI = \frac{\sum R_{vs}}{\text{Total No. of Customer}} / \text{yr} \quad (5)$$

4. 사례연구

4.1 모의 계통

본 논문에서 사례연구에 사용된 모의 계통은 참고문헌 [17]에 소개된 RBTS(Roy Billinton Test System) 배전시스템 모델의 피더 2번을 국내 실정에 적합하도록 수정[18]하여 사용하였다. 모의 계통의 선로 구성은 그림 9에 나타내었다. 모의 계통은 모두 4개의 22.9[kV] 피더로 구성되어 있으며 1개의 배전 변전소에서 전력을 공급받고 있다. 또한 22개의 부하지점에 전력을 공급하며 상시 폐로(close) 상태인 10개의 개폐기(switch)가 설치되어 있다. 원래 모델에 대해 수정된 부분은 다음 네 가지로 요약할 수 있다[18]. 첫째로, 주 변압기는 1개(154/22.9[kV-Y])이며 연계운전은 다른 주 변압기의 선로들과 연계된다. 둘째로, 수용가 종류는 주택용, 상업용, 업무용 빌딩, 제조업체의 4종류로 구성되어 있다고 가정한다. 셋째로, 보호기기로는 피더 맨 앞단의 차단기와 선로중단의 리크로저가 설치되어 있다고 가정하며 계통특성과 국내 배전계통 운전지침에 따라 동작특성을 설정한다. 넷째로, 선종은 가공 3상 선로 내지 지중 3상 케이블로 구성되어 있다고 가정하였다. 수정사항은 한국전력공사의 일반적인 국내 배전 계통 운전지침[19]에 따른다.

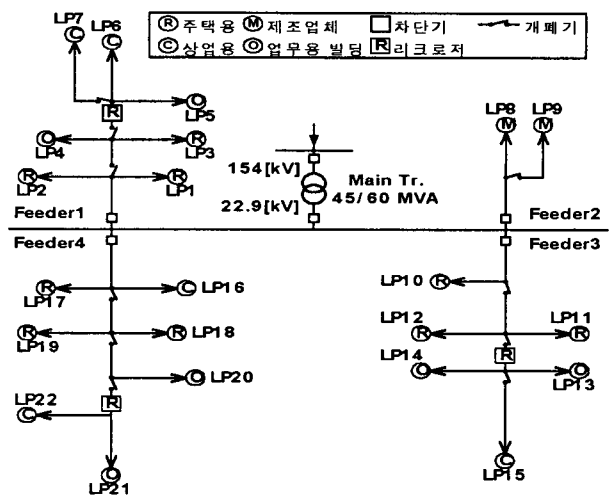


그림 9 사례연구를 위한 모의 계통
Fig. 9 Test system for case studies

4.2 사례연구 및 결과분석

사례연구를 위한 신뢰도 자료는 표 1의 경인지역 배전선로의 신뢰도 자료를 이용하였다[20].

표 1 누적된 설비 신뢰도 자료
Table 1 Historical component reliability data

설비 \ 사고율	영구사고[/yr]	순간사고[/yr]
가공선로	0.017/km	0.080/km
지중선로	0.011/km	0.001
차단기	0.005	0.000
리크로저	0.005	0.000
개폐기	0.002	0.000

사례연구에 이용된 SCBEMA 곡선은 그림 10에 도시하였다. 그림 10의 SCBEMA 곡선의 변곡점은, 그림 3의 실험 결과와 표 2의 수용가 부하 구성율을 이용하여 작성하였다.

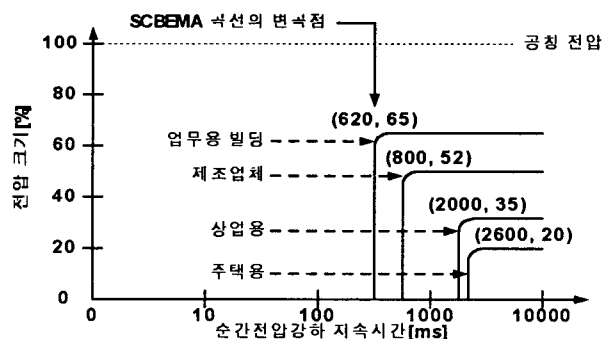


그림 10 사례연구에 이용된 SCBEMA 곡선
Fig. 10 SCBEMA curves used in case studies

표 2의 수용가 부하 구성율은 참고문헌 [13]의 조사결과를 바탕으로 작성된 것이다. 퍼지 멤버십 함수의 각 변수인 α , γ 는 순간전압강하 지속시간에 대해 각각 0과 3000으로 설정하였으며, 순간전압강하 크기에 대해 각각 0과 100으로 설정하였다. 순간전압강하의 크기 및 지속시간을 계산하기 위한 자료를 표 3에 나타내었다. 사고종류, 재폐로 성공률 및 시스템 임피던스 등은 참고문헌 [13]의 국내 배전계통의 자료를 이용하였다. 계전기(OCR 및 OCGR) 모델의 경우 참고문헌 [9]의 디지털 타입의 계전기 중 강 반한시(very inverse) 타입의 시간-전류(time-current) 특성을 이용하였으며, 각 사례연구의 계통 구성에 따라 참고문헌 [19]의 국내 보호계전 지침에 근거하여 사례연구 및 피더별로 각기 다른 한시 및 순시요소의 Tap 정정치(I) 및 한시요소 시간 배율(M)을 결정하였으며 순시요소 동작시간의 경우 참고문헌 [9]에 근거해 1.5~2.4[cycles] 사이에서 랜덤하게 산출하였다. 리크로저의 경우, 아날로그(analog) 타입인 웨스팅하우스(Westinghouse)의 ESV 타입 리크로저의 단락(phase) 순시 2번과 단락 지연 1번 특성곡선, 지락(ground) 순시 1번과 지락 지연 2번 특성곡선을 근사하여 계통구성에 따라 참고문헌 [19]의 보호계전지침에 따라 각각 다른 Tap 정정치를 적용하여 수식의 형태로 사용하였다. SCBEMA 곡선에 따른 각 수용가별 퍼지 멤버십 함수는 그림 11에 도시하였다.

표 2 수용가 부하 구성율
Table 2 Customer loads composition ratio

수용가 종류	주택용	상업용	업무용 빌딩	제조업체
조명	0.1	0.23	0.207	0.147
전동기(전자접촉기)	0	0	0.119	0.526
전동기(속도 제어기)	0	0.05	0.36	0.044
개인용 컴퓨터	0.03	0.07	0.086	0.017
자동전압조정기	0	0	0.031	0.004
비 민감부하	0.87	0.65	0.197	0.262

사례연구는 순간전압강하에 의한 잠정적인 최대 위험도를 구하기 위한 목적으로 시행하였다. 따라서, 사고점 저항은 무시하였다. 세부 사례연구는 다음의 4가지에 대해 시행되었다. 각 사례연구는 각기 5만회의 사고모의를 시행하였으며 각 사고모의 별로 각각 순간전압강하 크기 및 지속시간을 결정하였다. 또한, 결과의 신뢰성을 위해 이를 10회 이상 반복 모의하여 그 평균값을 사례연구 결과로 하였다. 사례연구를 위해 구축된 컴퓨터 프로그램은 MS VISUAL BASIC을 이용하여 작성되어 윈도우(WINDOW) 환경에서 모의되었다.

- 사례 1) 모든 피더가 가공선이며 리크로저 설치 않됨
- 사례 2) 모든 피더가 지중선이며 리크로저 설치 않됨
- 사례 3) 모든 피더가 가공선, 사례 1에 비해 선로길이가 3배
- 사례 4) 모든 피더가 가공선, 사례 1에 비해 선로길이가 3배이며 리크로저 설치됨

표 3 순간전압강하 크기 및 지속시간 계산을 위한 자료
Table 3 Data for the calculation of voltage sag magnitude and duration

항 목	내 용			
사고점저항	무시(0[Ω])			
재폐로 횟수	차단기: 순시 1회, 한시 1회 리크로저: 순시 2회, 한시 1회			
재폐로 성공율	첫번째: 70[%], 두번째: 15[%]			
사고종류 비율(%)	1선지락(80), 선간단락(15), 3상사고(5)			
사고 제거 시간	OCR (OCGR)	순시	1.5~2.4[cycles]	
		한시	식 (2) 참조	
	차단기	4[cycles]		
	리크로저	Phase	순시	$T_{RO} = 60.554 \times I^{-1}$
		한시		$T_{RO} = 1.075 \times I^{-0.5}$
Ground	순시		$T_{RO} = 141.53 \times I^{-1}$	
	한시		$T_{RO} = 5.9411 \times I^{-0.5}$	
계통 임피던스 [%]	가공선	Z0: 9.87 + j22.68, Z1(=Z2): 3.86 + j7.42		
	지중선	Z0: 4.46 + j1.56, Z1(=Z2): 1.43 + j 2.37		
	변압기 (45/60 [MVA])	Z0(=Z1=Z2): j31.9 (자기용량 기준(self base): j14.3)		
	전원	Z0: 0.27 + j 1.52, Z1(=Z2): 0.09 + j0.96		

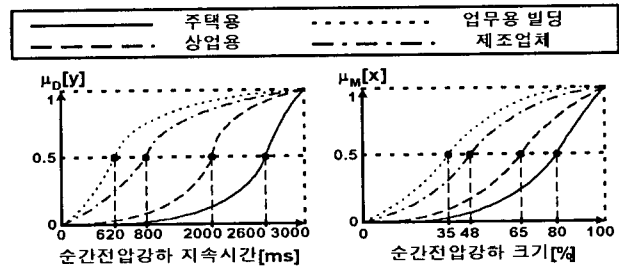


그림 11 사례연구에 이용된 퍼지 멤버십 함수
Fig. 11 Fuzzy membership functions used in case studies

사례연구 결과를 표 4에 나타내었다. 사례연구 결과는 순간전압강하의 위험도인 SAVSRI와 신뢰도 지수인 시스템 평균 영구정전 발생횟수(system average interruption frequency index: SAIFI)를 비교하였다. 만일, SAVSRI 지수가 1이라면 이것은 연간 1수용가의 전체 부하가 순간전압강하에 의해 1회 가동정지 내지 오동작을 일으킬 위험성이 있다는 것을 의미한다. 사례연구 결과에서 알 수 있듯이, 선로 길이가 길어지며 재폐로를 시행할수록 순간전압강하에 의한 위험도가 증가함을 알 수 있다. 재폐로를 시행하며 선로 길이가 타 선로의 3배인 사례 3과 4의 경우가 가장 높은 순간전압강하 위험도를 나타냄을 볼 수 있다. 또한, 재폐로를 시행하는 사례 1의 경우가 완전 지중이며 재폐로를 시행하지 않는 사례 2에 비해 높은 순간전압강하 위험도를 가짐을 알

수 있다. 이것은 선로가 길어질수록 사고 발생횟수 즉, 순간 전압강하 발생횟수가 높아지며 재폐로를 할수록 보호기기의 순시 동작 뿐만 아니라 한시 동작을 할 수 있는 기회가 많아지므로 생긴 결과라 할 수 있다. SAIFI의 경우, 가공선로이며 선로 길이가 길어질수록 높은 값을 가지며 이는 사고을 때문에 생기는 결과라 할 수 있으며 이중 동일한 선로 길이를 가지는 사례 3과 4의 경우 선로중간의 리크로저 설치로 인해 사례 4의 경우가 사례 3에 비해 상당히 SAIFI가 감소함을 볼 수 있다. 피더별로는, 피더 2의 경우가 상대적으로 선로길이가 짧으므로 타 선로에서의 사고 파급을 많이 받으며 순간전압강하에 민감한 제조업체 수용가로만 이루어져 있으므로 순간전압강하의 위험도가 월등히 높은 것으로 나타났다.

표 4 사례연구 결과

Table 4 Results of case studies

사례연구 항목		피더			
		피더 1	피더 2	피더 3	피더 4
사례 연구 1	SAVSRI	0.089	0.665	0.094	0.089
	SAIFI	0.146	0.067	0.131	0.135
사례 연구 2	SAVSRI	0.017	0.093	0.018	0.017
	SAIFI	0.092	0.038	0.088	0.094
사례 연구 3	SAVSRI	0.120	0.965	0.121	0.119
	SAIFI	0.450	0.159	0.373	0.407
사례 연구 4	SAVSRI	0.135	1.128	0.098	0.094
	SAIFI	0.272	0.158	0.246	0.257

5. 결 론

본 논문은 배전 계통에서의 순간전압강하 영향을 평가하기 위한 방법을 제시하였다. 기존의 연구들이 순간전압강하에 의한 개별 부하의 영향을 평가하거나, 단순한 발생 빈도만을 가지고 평가하는데 비해 본 논문에서는 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 특성을 고려한 평가방식을 제안하였다. 이를 위해, 수용가 종류별 순간전압강하 영향의 대표성 곡선인 SCBEMA 곡선과 순간전압강하 영향 평가를 위한 퍼지 모델을 제시하였다. 사례연구를 통해 얻어진 본 논문의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 제안한 평가방식이 대상 계통의 누적된 신뢰도 자료, 보호기기 특성 및 시스템 구성 자료 등이 확보된다면 대상 배전 계통에 대한 순간전압강하의 영향을 평가하기 위해 활용될 수 있음을 보였으며 둘째, 제안한 평가방식에 순간전압강하에 의한 수용가 영향의 특성에 의한 수용가 종류별 영향 차이가 반영됨으로써 좀더 현실적인 평가가 가능함을 보였다.

기본적으로, 본 논문에서 제안한 방식은 부하별 CBEMA 곡선 및 수용가 종류별 부하 구성의 체계적 자료가 요구된다. 따라서, 제안된 곡선을 현장 적용하기 위해서는 전력회사 및 수용가에서의 이러한 구체적인 자료를 얻기 위한 추가적 노력이 요구된다. 그러나, 날이 갈수록 심각해지는 순간전압강하의 피해를 고려해볼 때, 이러한 부가적 노력은 감

수되어야 할 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호: 981-0901-002-2)과 주식회사 대동기술단의 연구비 지원으로 이루어졌으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] D. O. Koval and M. B. Hughes, "Canadian National Power Quality Survey: Frequency of Industrial and Commercial Voltage Sags," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 33, no. 3, pp. 622-627, May/June 1997.
- [2] 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.
- [3] J. Lamoree, D. Mueller, P. Vinett, W. Jones, and M. Samotyj, "Voltage Sag Analysis Case Studies," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 30, no. 4, pp. 1083-1089, July/August 1994.
- [4] L. 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.
- [5] 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.
- [6] R. C. Dugan, D. L. Brooks, M. Wacławiak, and A. Sundaram, "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 1, pp. 254-259, January 1998.
- [7] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, 1996.
- [8] L. E. Conrad and Math H. J. Bollen, "Voltage Sag Coordination for Reliable Plant Operation," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 33, no. 6, pp. 1459-1464, November/December 1997.
- [9] 경보전기, Digital Overcurrent Relay 사양서, 경보전기, 1996년.
- [10] ANSI/IEEE Standard 446-1987, IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications (IEEE Orange Book).
- [11] 김재철, 윤상윤, 오정환 및 임성정, "배전계통의 순시전압변동에 의한 수용가측 영향의 현황 분석," 한국조명·전기설비학회 논문지, 제 12권, 제 4호, pp. 37-46, 1998년 11월.

- [12] IEEE Standard 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- [13] 한국전력공사 전력연구원, 송배전 재폐로 방식의 최적화 연구, 한국전력공사, 1997년 12월.
- [14] E. Cox, Fuzzy Systems Handbook, Academic Press, p. 167-216, 1999.
- [15] H. Bandemer and S. Gottwald, Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Methods with application, Wiley, p. 18-20, 1995.
- [16] R. Billinton and W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Press, 1994.
- [17] 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, pp. 813-820, May 1991.
- [18] S. Y. Yun, J. H. Oh, S. J. Rim and J. C. Kim, "An Enhanced Method for Assessing the Effect of Voltage Sag in Power Distribution System," 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Conference Proceeding, vol. 1, pp. 518-523, July 1999.
- [19] 한국전력공사 배전처, 배전보호기술서, 한국전력공사, 1995년.
- [20] 한국전력공사 배전처 배전계획부, 배전선로 공급신뢰도 현황, 한국전력공사, 1995년 11월.

저 자 소 개



윤 상 윤 (尹 尙 潤)

1970년 8월 28일 생. 1998년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 주 관심분야는 전력품질 해석 및 대책 및 배전계통 보호 방식

Tel : 02-817-7966
E-mail : drk@ee.ssu.ac.kr



오 정 환 (吳 正 桓)

1971년 1월 17일 생. 1994년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1996년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 주 관심분야는 적용 및 지능형 재폐로, 전력 신뢰도 및 전력품질

Tel : 02-817-7966
E-mail : raven@ee.ssu.ac.



김 언 석 (金 彦 錫)

1965년 2월 11일 생. 1989년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 한국전기연구소 전력시험연구센터 선임기술원. 주 관심분야는 전력설비 시험 및 계측 자동화

Tel : 0343-420-6061
E-mail : oskim@keri.re.kr



김 낙 경 (金 洛 京)

1953년 6월 24일 생. 1984년 인천대 전기공학과 졸업. 1994년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 주식회사 대동기술단 대표이사. 주 관심분야는 전력 설비 설

계, 배전계통 부하관리 및 예측

Tel : 02-332-3329
E-mail : nkkim@dd-eng.com



김 재 철 (金 載 哲)

1955년 7월 22일 생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988~현재 숭실대 공대 전기공학과 교수 주 관심분야는

전력계통 안정도, 배전계통 적용 및 지능형 재폐로 방식, 배전 자동화 시스템, 전문가 시스템, 배전계통 부하관리 및 예측, 전력품질, 전력계통 제어분야의 인공지능적용 및 전력설비 진단

Tel : 02-820-0647
E-mail : jckim@ee.ssu.ac.kr