

순간전압강하 누적 테이블 및 밀도 테이블 계산을 위한 취약지역 결정 방법

Method to Determine Areas of Vulnerability for Calculating Sag Cumulative Table and Sag Density Table

박 창 현* · 이 한 상†
(Chang-Hyun Park · Hansang Lee)

Abstract - This paper presents a method to calculate a sag cumulative table and density table based on the area of vulnerability to voltage sags. The expected sag performance at sensitive load points can be easily assessed through the calculation of the sag cumulative table and density table. However, the calculation of the tables regarding large power systems is very difficult task. Therefore, an efficient method for calculating the tables is needed. In this paper, the improved method to determine the areas of vulnerability is addressed and the method to calculate the tables based on the area of vulnerability is also described. The proposed scheme can be efficiently used to assess the voltage sag performance at sensitive load points in large power systems.

Key Words : Area of vulnerability, Power quality, Sag cumulative table, Sag density table, Voltage sags

1. 서 론

전압 변동에 민감한 부하들의 사용 증가와 함께 전력품질 문제로 인한 산업현장에서의 피해가 증가하고 있다. 가장 중요한 전력품질 문제로 인식되고 있는 순간전압강하의 경우 단일 이벤트 발생으로 여러 산업공정의 중단을 야기하여 막대한 경제적 손실을 발생시킬 수 있다. 수용가에 큰 피해를 입히는 순간전압강하는 일반적으로 계통에서의 사고로 기인한다. 계통에서의 사고 발생을 완벽하게 차단하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 계통에서의 사고를 줄이기 위한 대책과 함께 민감 수용가에서는 적절한 전압보상설비를 운용하는 것이 필요하다. 순간전압강하에 대한 대책은 크게 공급 계통측면에서의 대책과 부하단에서의 대책으로 구분된다. 부하단에서의 대책은 전압보상설비의 설치 운용이 대표적이며 공급 계통에서의 대책은 기본적인 사고 예방 대책과 함께 민감 수용가를 중심으로 한 계통 구성 변경 및 분산전원의 설치 등이 있다. 이러한 대책들의 적용에 있어 어떤 대책을 어느 지점에 적용하는 것이 가장 효과적인지에 대한 평가가 우선되어야 한다. 계통내 특정 지점에서의 순간전압강하 발생 정도가 어느 정도인지, 다양한 대책 적용에 따른 순간전압강하 저감효과가 어느 정도인지에 대한 평가를 바탕으로 효율적인 대책 수립이 가능하다. 이러한 순간전압강하 평가는 계통내 특정 위치에서 순간전압강하의 발생경향

을 예측하는 기술이다. 일반적으로 순간전압강하의 정의에 따라 민감부하단에서의 0.9 [p.u.]이하의 연평균 발생횟수를 추산한다. 그러나 계통에는 여러 종류의 부하들이 존재하고 각각의 전압민감도가 다양하기 때문에 순간전압강하 누적 테이블(sag cumulative table) 및 밀도테이블(sag density table)의 형태로 발생 경향을 파악하는 것이 효과적이다 [1],[2]. 순간전압강하 누적 테이블 및 밀도테이블은 다양한 한계전압에 대한 발생횟수를 추산하여 정리하는 표이다. 대규모 계통에 대해 이러한 테이블을 도출하는 것은 상당한 계산 부담이 발생하기 때문에 효과적인 방법이 필요하다. 본 논문은 순간전압강하 누적 테이블 및 밀도 테이블 도출을 위한 효과적인 취약지역(AOV: area of vulnerability) 결정 방법의 기술하고 취약지역에 기반한 테이블 계산 방법을 소개한다.

2. 순간전압강하 평가 기술

2.1 순간전압강하 평가

순간전압강하 평가는 오랜 기간 전압 모니터링을 통한 통계적 분석 방법과 계통 데이터와 사고율 등을 이용한 시뮬레이션 기반의 방법이 소개되어 있다. 모니터링의 경우 오랜 기간 동안의 전압 측정과 기록이 이루어져야 한다. 반면 시뮬레이션을 이용한 평가 방법은 데이터만 있으면 바로 결과를 얻을 수 있고 다양한 운전조건의 반영이나 계획 계통에 대한 평가도 가능한 장점이 있다. 순간전압강하의 대표적인 원인은 계통에서의 사고이며 계통에서의 사고 발생은 무작위성의 현상이므로 순간전압강하 발생경향의 정확한 예측은 어렵다. 따라서 특정 기간 또는 특정 날짜의 순간전압강하 발생 가능성 및 정도를 예측하는 것은 불가능하다. 그러나 오랜 기간 동안 기록된 계통 사고 데이터를 바탕으로

* Depart. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea

† Corresponding Author : School of Electrical & Railway Engineering, Kyungil University, Korea

E-mail : hslee80@kiu.ac.kr

Received : February 13, 2014; Accepted : May 13, 2014

장기적인 경향 예측은 유효하다. 일반적으로 순간전압강하 평가에서는 연평균 발생경향을 추산하고 있다. 이러한 추산 결과를 바탕으로 경제성 평가와 병행해 최적의 대책 수립이 가능하다. 특정 민감부하단에서의 순간전압강하 평가 결과가 N [sags/year]회로 추산되었다면 이는 수년 동안 해당위치에서는 연평균적으로 N 회 정도 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 내년 또는 특정 년도에 N 회 정도 발생한다는 것을 의미하지는 않는다. 시뮬레이션에 기반한 순간전압강하 평가 방법이 몇몇 소개되었다[3]-[7]. 대표적인 시뮬레이션 기반 순간전압강하 평가 방법으로 임계 거리법(critical distance method)과 고장 위치법(fault positions method) 등이 있다. 임계 거리법은 전압 분배 모델을 기반으로 하여 순간전압강하 평가를 수행하는 방법으로 방사상 계통에만 적용가능한 단점이 있다. 고장 위치법은 계통내 많은 사고 위치를 결정하여 각 위치에서 고장계산을 실시하여 순간전압강하 평가를 수행하는 방법으로 방사상 계통이나 망구조 계통에서 모두 적용 가능하여 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법이다. 그러나 고장 위치법은 모의하는 계통에서의 사고 위치 선정 및 그 수에 의해 정확도가 크게 좌우된다. 따라서 대규모 계통에 적용하여 정확한 순간전압강하 평가 결과를 도출하기 위해서는 매우 많은 고장계산이 필요하여 비효율적이다. 따라서 대규모 계통에서도 순간전압강하 누적 테이블 및 밀도테이블을 용이하게 도출할 수 있는 방법이 필요하다.

2.2 순간전압강하 누적 테이블과 밀도 테이블

다양한 부하들의 전압 민감도에 대한 영향 평가 및 대책 수립을 위해서는 보다 세분화된 한계전압에 대한 평가가 필요하다. 따라서 순간전압강하 밀도 테이블 및 순간전압강하 누적 테이블 등의 데이터 양식을 통한 순간전압강하 평가가 필요하다[1]. 순간전압강하 누적 테이블은 표 1과 같은 형태로 세분화된 전압 레벨에 대한 누적 값을 표로써 나타내는 방법이다. 표를 통해 특정 한계전압이하의 순간전압강하가 어느 정도 발생하는지를 직관적으로 확인할 수 있다. 크기와 지속시간을 모두 고려하여 나타내기도 한다.

표 1 순간전압강하 누적테이블(연평균 전압강하 횟수)
Table 1 Voltage sag cumulative table

크기 [p.u.]	ESF(expected sag frequency) [sags/year]
0.9	49.9
0.8	25.4
0.7	15.8
0.6	10.9
0.5	3.0
0.4	6.2
0.3	4.9
0.2	4.2
0.1	3.5

순간전압강하 밀도 테이블은 특정 전압강하 구간별로 발생 경향을 나타내는 표이다. 표 2는 밀도테이블의 예이다. 밀

도 테이블은 해당 민감부하 지점에서 어느 전압 범위의 순간전압강하가 많이 발생할지 적게 발생할지를 용이하게 파악할 수 있는 장점이 있다.

표 2 순간전압강하 밀도테이블(연평균 전압강하 횟수)
Table 2 Voltage sag density table

크기 [p.u.]	ESF(expected sag frequency) [sags/year]
0.8-0.9	18.0
0.7-0.8	7.7
0.6-0.7	3.9
0.5-0.6	2.3
0.4-0.5	1.4
0.3-0.4	1.0
0.2-0.3	0.4
0.1-0.2	0.4
0.0-0.1	1.0

2.3 순간전압강하 취약지역

순간전압강하 평가에 있어 취약지역이라는 개념을 이용한다. 취약지역은 특정 민감부하단에 피해를 입히는 즉 순간전압강하를 야기할 수 있는 계통내 사고 영역으로 정의된다. 그림 1은 특정 민감부하단을 기준으로 한 한계전압 0.9 [p.u.]의 취약지역의 예이다. 어두운 영역에 포함된 선로 및 모선에 사고가 발생했을 때 해당 민감부하모선에 0.9 [p.u.] 이하의 순간전압강하가 발생한다는 것을 의미한다. 정확한 취약지역을 계산하고 취약지역내 포함된 선로 및 모선의 연평균 사고율을 이용해 해당 지점에서의 연평균 순간전압강하 발생 경향을 추산할 수 있다.

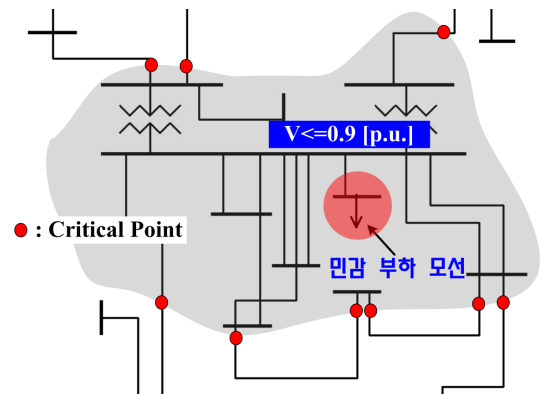


그림 1 순간전압강하 취약지역의 예
Fig. 1 Example of an area of vulnerability to voltage sag

1선 지락사고에 대한 취약지역 계산 방법을 요약하면 다음과 같다. 임의의 모선 F 와 T 사이의 선로 A 상 K 위치에서의 1선 지락 사고가 발생했을 경우 해당 사고로 인한 민감부하모선 m 의 A 상 사고전압 크기는 식(1)과 같다.

$$|V_{A,m}^{fault}| = \left| V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^0 + Z_{mK}^1 + Z_{mK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \right| \quad (1)$$

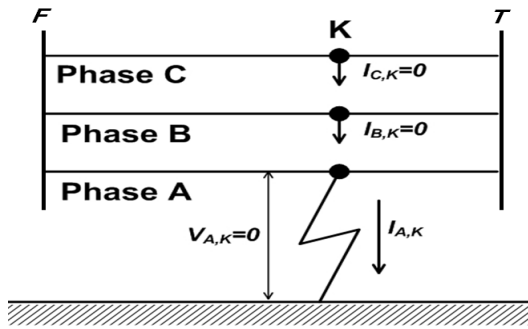


그림 2 1선 지락사고
Fig. 2 Single line-to-ground fault

$V_{A,m}^{pref}$ 는 모선 m 의 사고전 전압이며 V_K^{pref} 는 사고위치 K 에서의 사고전 전압이다. $Z_{mK}^0, Z_{mK}^1, Z_{mK}^2$ 는 모선 m 과 사고위치 K 사이의 영상, 정상, 역상 시퀀스 전달 임피던스(sequence transfer impedance)이며 $Z_{KK}^0, Z_{KK}^1, Z_{KK}^2$ 는 사고위치 K 에서 본 계통의 시퀀스 등가 임피던스(sequence driving-point impedance)이다. 식(1)에서의 각 시퀀스 임피던스 Z_{mK}^{012} 와 Z_{KK}^{012} 는 식 (2)~(3)과 같이 나타낼 수 있다[6],[8]. 변수 p 는 F - T 선로상의 사고위치를 나타내는 변수로 선로 길이에 대한 사고위치 K 의 비율이며 0과 1사이의 값이다.

$$Z_{mK}^{012} = Z_{mF}^{012} + (Z_{mT}^{012} - Z_{mF}^{012})p \quad (2)$$

$$Z_{KK}^{012} = (Z_{FF}^{012} + Z_{TT}^{012} - 2Z_{FT}^{012} - Z_C^{012})p^2 + \{Z_C^{012} - 2(Z_{FF}^{012} - Z_{FT}^{012})\}p + Z_{FF}^{012} \quad (3)$$

Z_{mF}^{012} 및 Z_{mT}^{012} 는 모선 m 과 모선 F , 모선 m 과 모선 T 사이의 시퀀스 전달 임피던스이다. Z_{FF}^{012} 및 Z_{TT}^{012} 는 모선 F 와 T 에서 본 시퀀스 계통 임피던스이며 Z_{FT}^{012} 는 모선 F 와 모선 T 사이의 전달 임피던스이다. 상기 임피던스들은 계통의 시퀀스 임피던스 행렬(Z_{Bus}^{012})로부터 바로 찾을 수 있다. 따라서 식(2)와 (3)으로 구성되는 식(1)을 이용하여 주어진 전압 한계값을 야기하는 임의의 선로 F - T 에서의 임계점(사고위치) p 를 찾을 수 있다. 모든 선로에 대해 임계점을 찾아 영역화하면 전체 취약지역이 얻어지게 된다.

식(1)은 p 에 대한 고차 방정식으로 직접적으로 해를 구하기가 어렵다. 따라서 2차 보간식과 할선법(secant method) 등의 수치해석 방법을 이용하여 근사해를 구하게 된다[6]. 즉, 각 선로마다 주어진 한계전압에 대해 전압강하식과 2차 보간식을 구성하고 해당 보간식의 해를 초기값으로 할선법을 적용하여 임계점을 찾는 것이 취약지역 계산의 주요 절차이다. 그러나 참고문헌[6]의 방법을 통해 순간전압강하 테이블을 계산하기 위해서는 모든 선로 및 한계전압에 대해 2차 보간식의 도출과 계산을 수행해야 한다. 기본적으로 취약지역의 계산과 순간전압강하 평가는 계산 부담이 큰 해석 부분이다. 따라서 대규모 계통에 대해 기존의 방법을 이용하여 순간전압강하 테이블을 도출하는 것은 상당한 계산 시간이 필요하게 된다. 대규모 계통내 여러 위치에 대한 순간전압강하 테이블을 용이하게 계산할 수 있도록 취약지역 계

산 방법의 개선이 필요하다.

3. 누적 테이블 및 밀도 테이블의 계산

3.1 취약지역 결정 방법

민감부하단에 대한 순간전압강하 누적 테이블 및 밀도 테이블을 얻기 위해서는 한계전압을 변경하면서 취약지역 계산 절차를 반복 수행해야 한다. 다양한 한계전압에 대해 그림 3과 같이 취약지역을 결정해야 한다. 그림 3에서는 민감부하단을 중심으로 한계전압 0.5, 0.7, 0.9 [p.u.]에 대한 취약지역을 나타내고 있다. AOV1에 대해서 순간전압강하 평가를 수행하게 되면 해당 부하단에서의 0.5 [p.u.]이하의 순간전압강하 발생 횟수를 추산할 수 있고 AOV2, AOV3에 대해서 평가를 수행하게 되면 0.7, 0.9 [p.u.]이하의 순간전압강하 발생 횟수를 추산할 수 있다. 또한 AOV2에서 AOV1을 뺀 영역에 대해서 평가를 할 경우 0.5 [p.u.]에서 0.7 [p.u.]사이의 크기를 가지는 순간전압강하 횟수를 추산할 수 있다.

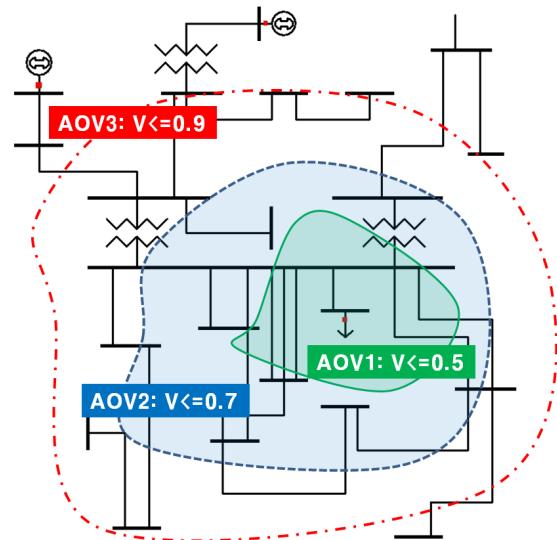


그림 3 한계전압에 따른 취약지역 결정
Fig. 3 Areas of vulnerability according to voltage magnitudes

순간전압강하 테이블 계산을 위한 본 논문에서 제안하는 순간전압강하 취약지역 계산 절차는 그림 4와 같다. 먼저 다양한 전압범위에 대한 순간전압강하 테이블 계산을 위해 상한 한계전압 (V_{th-max}), 하한 한계전압 (V_{th-min}) 및 테이블 단위전압 ($V_{th-unit}$)을 결정한다. 다음으로 조류계산을 통해 사고전 계통 전압을 계산한다. 다음 계통 임피던스 행렬을 계산한다. 불평형 사고에 대한 취약지역 계산을 할 때는 시퀀스 임피던스 행렬을 계산한다. 전압강하식을 구성하고 선로의 양단($p=0, 1$)과 중간 지점($p=0.5$)에서의 전압강하 크기를 계산하여 그 값을 가지고 2차 보간식을 구성한다. 설정한 하한 한계전압(V_{th-min})에 대해 보간식의 해를 계산하여 해가 0과 1 사이에 있는지 판단한다. 0과 1 사이에 해가 존재하지 않으면 해당선로에서는 취약지역이 존재하지 않는 것

이므로 다음선로로 이동한다. 사이의 값이 있으면 그 값을 초기값으로 할선법을 적용하여 정확한 임계점을 계산하고 저장한다. 초기 설정한 상한 한계전압(V_{th-max})을 넘지 않을 때까지 테이블 단위전압($V_{th-unit}$) 만큼 증가시키면서 보간식 해를 구하는 것부터 반복 수행한다. 제안하는 절차를 통해 계산된 임계점으로부터 각 한계전압의 취약지역을 구할 수 있음은 물론 전압 밀도별 취약지역도 용이하게 계산할 수 있다. 선로에서 모든 한계전압에 대해 2차 보간식의 도출과 계산을 수행하지 않고 설정한 한계전압 범위 및 단위전압에 대한 취약지역을 계산할 수 있다. 보간법의 계산량을 고려할 때 대규모 계통에서의 전체적인 계산 부담은 크게 줄어들게 된다.

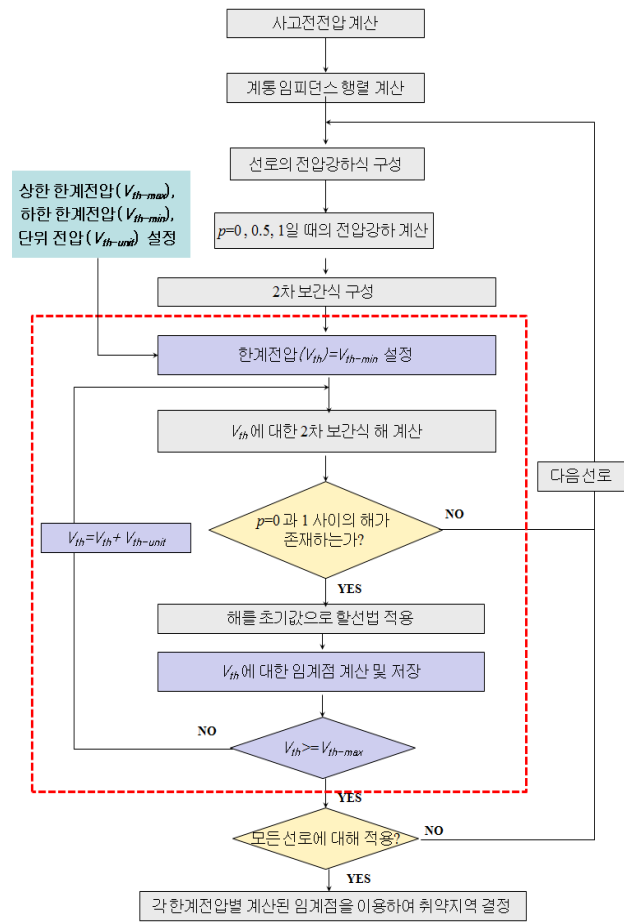


그림 4 순간전압강하 테이블 계산을 위한 취약지역 결정 절차
 Fig. 4 Method to determine areas of vulnerability for calculating voltage sag tables

3.2 취약지역에 기반한 평가

한계전압별 계산된 취약지역을 바탕으로 순간전압강하 누적 발생횟수를 식(4)와 같이 추산할 수 있다.

$$ESF_V = \sum_{B \in AB_V} BFR + \sum_{L \in AL_V} l_L \times LFR \quad (4)$$

여기서,

- ESF_V 는 한계전압 V 에 대한 누적 횟수 [sags/year]
- B 와 L 는 모선 및 선로
- l_L 는 취약지역에 포함된 선로의 길이 [km]
- AB_V 는 한계전압 V 에 대한 취약지역에 포함된 모선
- AL_V 는 한계전압 V 에 대한 취약지역에 포함된 선로
- BFR 와 LFR 는 모선 및 선로의 연평균 사고율

순간전압강하 누적 테이블을 산출하게 되면 밀도테이블도 용이하게 계산할 수 있다. 취약지역 계산 과정에서 특정 전압범위의 영역을 정의하여 식(4)를 통해 결과를 얻을 수 있지만 식(5)과 같이 누적 결과를 이용해 계산할 수도 있다.

$$ESF_{V_i-V_j} = ESF_{V_j} - ESF_{V_i} \quad (5)$$

여기서,

- $ESF_{V_i-V_j}$ 는 전압범위 V_i-V_j 에 대한 횟수
- ESF_{V_i} 는 한계전압 V_i 에 대한 누적 횟수
- ESF_{V_j} 는 한계전압 V_j 에 대한 누적 횟수

4. 사례 연구

4.1 모의 계통

그림 5와 같은 IEEE-57 모선 계통에 대해 제안하는 방법을 이용하여 순간전압강하 평가를 수행하였다. 해당 계통은 57개의 모선과 62개의 선로, 7기의 발전기, 16기의 변압기로 구성되어 있다. 자세한 계통 데이터는 참고문헌[9]에 정리되어 있다. 모선 17, 19, 54의 3개 모선을 민감부하 모선으로 가정하였으며 각각에 대해 제안하는 방법을 이용하여 누적 테이블과 밀도 테이블을 도출하였다. 순간전압강하 평가를 위한 모선 및 선로의 사고율은 표 3과 같다. 해당 사고율은 실제 계통의 5년 동안의 사고데이터를 바탕으로 도출되었다.

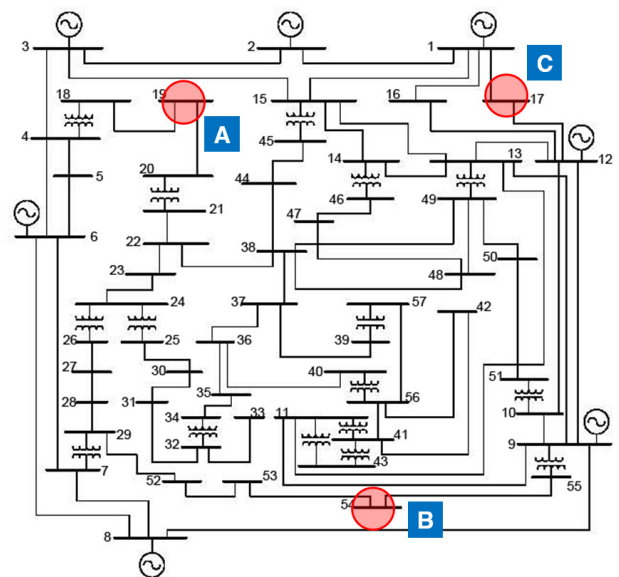


그림 5 IEEE-57 테스트 모선 계통
 Fig. 5 IEEE-57 test bus system

표 3 사고율 데이터

Table 3 Fault rate

사고형태	모선 사고율 [faults/year]	선로사고율 [faults/year-km]
SLGF	0.0202	0.0244
LLF	0.0053	0.0034
DLGF	0.0017	0.0059
3PF	0.0075	0.0016

4.2 취약지역 계산 및 평가 결과

3개의 민감 부하모선에 대해 제안하는 방법에 따라 취약 지역을 계산하였다. 모의에 사용된 상한 및 하한 한계전압은 각각 0.9[p.u.]와 0.1[p.u.]이고 테이블 단위전압은 0.1[p.u.] 단위로 설정하였다. 취약지역은 각 한계전압 및 사고 형태에 따라 각각 결정되었다. 그림 6은 모선 19에서의 한계전압 0.3, 0.4, 0.5 [p.u.]에 대한 취약지역 결과이다. 계산된 취약지역을 바탕으로 순간전압강하 누적 테이블을 계산하였다. 표 4는 3개의 민감부하모선에 대한 순간전압강하 누적 테이블 결과이다. 모선 17에서는 0.9 [p.u.] 이하의 순간전압강하가 연평균 11.22회 정도 발생할 것으로 추산되었으며 모선 54에서는 19.86회 정도로 추산되었다. 누적 테이블을 통해 해당 지점에서의 순간전압강하 발생 경향을 파악할 수 있을 뿐 아니라 부하들의 전압 민감도를 알 경우 누적 테이블을 통해 해당 부하들의 피해 가능 정도도 추산 가능하다. 예로서 19번 모선에 0.7 [p.u.]의 전압민감도를 가지는 부하가 연결되어 있다고 가정하자. 즉 해당 부하는 0.7 [p.u.]이하의 공급 전압에 대해 오동작 할 수 있음을 나타낸다. 따라서 누적 테이블의 결과로부터 해당 부하는 연평균 9.42회 정도 피해를 입을 수 있음을 추정할 수 있다.

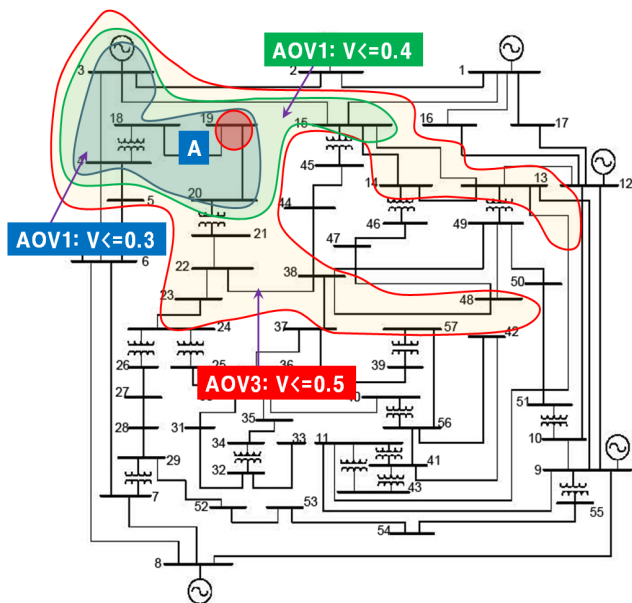


그림 6 19번 모선에 대한 취약지역 계산 결과 (3상 사고)
Fig. 6 Result of the area of vulnerability for Bus19 (3-phase fault)

계산된 누적테이블로부터 순간전압강하 밀도테이블을 도출하였다. 표 5는 3개의 모선에 대한 밀도테이블의 결과이다. 모선 17의 경우 전압강하크기 0.7 에서 0.8 [p.u.] 범위의 순간전압강하가 연평균 2.34회 정도 발생할 것으로 추산되었으며 모선 19의 경우 0.5에서 0.6 [p.u.] 범위의 순간전압강하는 연평균 2.40회 정도 발생할 것으로 추산되었다. 밀도테이블을 통해 특정 전압범위에 대한 순간전압강하 발생 정도를 용이하게 파악할 수 있다.

표 4 순간전압강하 누적 테이블 결과

Table 4 Voltage sag cumulative table

전압강하크기 [p.u.]	ESF [sags/year]		
	Bus 17	Bus 19	Bus 54
0.9	11.22	28.79	19.86
0.8	5.59	14.99	11.84
0.7	3.25	9.42	7.62
0.6	1.80	5.37	5.11
0.5	1.06	2.97	3.98
0.4	0.66	2.17	3.23
0.3	0.44	2.00	2.90
0.2	0.23	1.71	2.75
0.1	0.10	1.41	2.49

표 5 순간전압강하 밀도 테이블 결과

Table 5 Voltage sag density table

전압강하크기 [p.u.]	ESF [sags/year]		
	Bus 17	Bus 19	Bus 54
0.8-0.9	5.63	13.80	8.02
0.7-0.8	2.34	5.57	4.22
0.6-0.7	1.45	4.05	2.51
0.5-0.6	0.74	2.40	1.13
0.4-0.5	0.40	0.80	0.75
0.3-0.4	0.22	0.17	0.33
0.2-0.3	0.21	0.29	0.15
0.1-0.2	0.13	0.30	0.26
0.0-0.1	0.10	1.41	2.49

5. 결 론

본 논문에서는 대규모 계통에서의 순간전압강하 누적테이블 및 밀도테이블 계산을 위한 효과적인 방법을 소개하였다. 제안하는 취약지역 결정 절차를 바탕으로 다양한 한계전압에 대한 취약지역의 임계점을 저장하고 취약지역에 포함된 선로 및 모선의 사고율을 이용하여 누적 횟수를 계산할 수 있다. 계산된 횟수로부터 누적테이블 계산이 가능하고 그 결과를 바탕으로 밀도테이블도 구할 수 있다. 순간전압강하 평가는 계산 부담이 큰 해석으로서 다수의 위치에 대한 순간전압강하 테이블을 계산하는 것은 쉽지 않다. 본 논문에서는 기존의 순간전압강하 평가를 위한 취약지역 계산 절차에서 각 한계전압에 대한 2차 보간식 및 사고 전압 연산부분의 계산 부담을 줄여 빠른 순간전압강하 테이블 계산 방법을 제안하였다. 제안하는 방법에서는 한번의 2차 보간식 구성으로 한계전압을 바꿔가며 임계점을 저장하고자

하는 것으로 2차 보간법의 계산량을 고려할 때 전체적인 계산 부담은 크게 줄어들게 된다. 제안하는 평가 방법을 통해 민감부하단에서의 순간전압강하 발생 경향을 용이하게 파악할 수 있으며 순간전압강하를 고려한 계통 설계 및 최적 대책 수립 등에 효과적으로 활용 가능하다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음

References

- [1] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, Piscataway, NJ, 2000 IEEE Power Engineering Series.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw-Hill, 2002, ch.3.
- [3] M. H. J. Bollen, "Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 6, pp. 1414 - 1423, 1996.
- [4] L. Conrad, K. Little, and C. Grigg, "Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault-clearing Voltage Dips". IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 27 no.1, pp.167 - 172, 1991.
- [5] M. R. Qader, M. H. J. Bollen, and R. N. Allan, "Stochastic Prediction of Voltage sags in a Large Transmission System," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 35, No. 1, pp. 152-162, 1999.
- [6] C. H. Park and G. Jang, "Stochastic Estimation of Voltage Sags in a Large Meshed Network," IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 3, pp. 1655-1664, 2007.
- [7] C. H. Park, J. H. Hong, and G. Jang, "Assessment of system voltage sag performance based on the concept of area of severity", IET Gener. Transm. Distrib., 4 (6), pp. 683 - 693, 2010.
- [8] Z. X. Han, "Generalized Method of Analysis of Simultaneous Faults in Electric Power Systems," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-101, no.10, pp. 3933-3942, Oct. 1982.
- [9] IEEE 57-Bus Test Case, [Online]. Available: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf57/pg_tca57bus.htm.

저 자 소 개



박창현 (朴 昶 炫)

1974년 12월 25일생. 2007년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2008년~현재 부경대학교 전기공학과 부교수
E-mail : spch@pknu.ac.kr



이한상 (李 漢 相)

1980년 1월 17일생. 2003년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2012년~현재 경일대학교 전기·철도공학부 조교수
E-mail : hslee80@kiu.ac.kr