

발전기 스케줄링과 부하 전압민감도를 고려한 순간전압강하 평가 프로그램 개발

(Development of a Voltage Sag Assessment Program Considering Generator Scheduling and Voltage Tolerance)

박창현*

(Chang-Hyun Park)

요 약

본 논문은 순간전압강하 추계적 평가를 위한 윈도우즈 프로그램을 소개한다. 개발된 프로그램을 통해 발전기 운전 스케줄링, 시변 사고율 및 부하 전압 민감도 특성을 고려한 순간전압강하 평가가 가능하다. 고장 계산, 취약지역 계산, 순간전압강하 발생 횟수 추산 등 다양한 분석 기능들을 가지고 있으며 컴퓨터 그래픽과 애니메이션을 이용한 효과적인 데이터 시각화 기능도 제공하고 있다. 본 논문에서는 순간전압강하 평가의 개념과 발전기 스케줄링 및 시변 사고율을 고려한 순간전압강하 평가 방법에 대한 내용도 기술한다. 또한 개발된 프로그램을 이용한 사례 연구를 통해 순간전압강하 평가에 있어서의 발전기 운전 스케줄링 및 시변 사고율의 영향을 파악한다.

Abstract

This paper presents a voltage sag assessment program. The program provides various functions for stochastic assessment of voltage sags such as short-circuit analysis, the determination of the area of vulnerability and the calculation of expected sag frequency(ESF). Effective data visualization functions based on computer graphics and animation were also implemented in the developed program. In this paper, the concept of voltage sag assessment and the assessment method considering generator scheduling and time-varying fault rates are presented. The influence of generator scheduling and time-varying fault rates on voltage sag prediction is also described by performing case studies using the developed program.

Key Words : Generator Scheduling, Power Quality, Stochastic Assessment, Voltage Sag, Windows Application

1. 서 론

* 주저자 : 부경대학교 전기제어공학부 전임강사
Tel : 051-629-6322, Fax : 051-629-6305
E-mail : spch@pknu.ac.kr
접수일자 : 2009년 2월 9일
1차심사 : 2009년 2월 13일
심사완료 : 2009년 3월 2일

순간전압강하는 가장 중요한 전력 품질 문제 중 하나로 많은 산업 공정에서의 민감 기기들의 오동작을 야기함은 물론 막대한 경제적 손실을 초래한다. 순간전압강하는 짧은 시간동안의 실효치 전압의 감

소 현상으로 전압 강하의 크기와 지속 시간으로 정의된다. IEEE Std 1159-1995[1]에 의하면 순간전압 강하는 전압의 크기가 정상 전압의 10~90[%]이고 지속시간이 0.5 사이클에서 1분 사이의 전압강하 현상으로 규정되어 있다. 이러한 순간전압강하는 주로 전력계통에서의 사고, 과부하, 큰 전동기의 기동 등에 의해서 발생하고 있으며 계통에서의 사고로 인한 순간전압강하는 전압강하 폭이 가장 크며 넓은 지역에 문제를 야기한다[2]. 양질의 전기에 대한 수요 증가와 더불어 순간전압강하에 대한 대책, 해석, 평가 등 다양한 분야의 연구가 수행되고 있다. 순간전압강하 문제에 대한 효과적인 대책 수립을 위해서는 순간전압강하 평가 및 예측이 기본적으로 수행되어야 한다. 본 논문에서는 순간전압강하 평가 및 예측에 대한 개념과 발전기 스케줄링 및 시변 사고율(time-varying fault rate)을 고려한 순간전압강하 평가 프로그램에 대해 소개한다.

2. 순간전압강하 평가

순간전압강하 평가는 주어진 전력 계통내에서의 순간전압강하 예상 발생 횟수를 추산해 보는 일련의 분석 과정이라 할 수 있다. 일반적으로 순간전압강하 평가 및 예측은 크게 두 가지 방법으로 이루어진다. 전압 모니터링에 의한 방법과 컴퓨터 시뮬레이션에 기반한 추계적(stochastic) 방법이 있다. 전압 모니터링의 경우 계통내 특정 위치에서의 순간전압강하 평가에 효과적이거나 오랜 기간 동안 전압을 모니터링 해야 하는 단점이 있다[3]. 또한 계통내 여러 개소에서 순간전압강하 평가를 위해서는 다수의 모니터링 유닛을 설치해야 한다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션에 기반한 추계적 방법들이 널리 이용되고 있다. 대표적으로는 임계 거리(critical distance)법과 고장 위치(fault position)법이 있다[2-3]. 임계 거리법은 전압 분배 모델을 기반으로 하는 가장 간단한 방법으로 배전계통과 같은 방사상 계통에 대한 평가 시 주로 활용된다. 송전 계통과 같은 망구조 계통에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 반면 고장 위치법은 방사상 계통 및 망구조 계통 모두 활용 가능하다. 계통내 많은 사고 위치를 결정하고 각 위치에서의 사

고 해석을 통해 순간전압강하 특성(크기 및 지속시간) 및 취약지역(area of vulnerability)을 결정한다. 결정된 취약지역과 계통내 사고율을 이용하여 특정 모선 및 부하단에서의 연간 순간전압 강하 발생 횟수를 추산한다. 그러나 이 방법의 정확도는 모의하는 사고 위치와 사고의 수에 의해 크게 좌우된다. 따라서 대규모 계통에 적용시 매우 큰 계산 부담이 발생하는 단점이 있다.

본 논문에서는 [4]에서 제안되었던 2차 보간법과 할선법을 이용한 평가 방법을 이용하였다. 해당 방법은 기존의 전통적인 평가 방법들의 단점을 극복하였으며 대규모 계통에 대해서도 빠르고 정확한 취약지역의 결정 및 순간전압강하 발생 횟수 예측이 가능하다. 일반적으로 추계적 평가는 순간전압강하에 대한 취약지역과 계통의 사고율 데이터를 이용하여 이루어진다. 취약지역은 계통내 특정 지점에 특정 사고전압을 야기하는 계통내 사고 위치들의 집합이라고 할 수 있다. 따라서 순간전압강하 평가 및 예측을 위해서는 정확한 취약지역을 계산한 후 취약지역 내 선로 및 모선의 연간 사고율의 곱으로 예상 발생 횟수를 추산한다[5]. 그림 1은 ASD(Adjustable-Speed Drive)와 모터 컨택터(motor contactor)에 대한 취약지역의 예를 나타낸다. 취약 지역 내에 사고가 발생하면 해당 기기들의 전압민감도 한계값 이하의 사고전압이 야기되어 순간전압강하로 인해 기기가 영향을 받게 됨을 나타낸다.

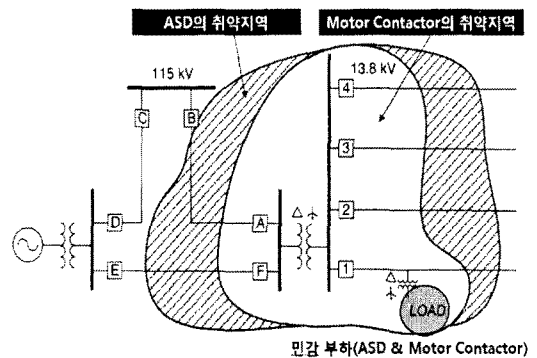


그림 1. 취약지역 사례도(6)
Fig. 1. An example of the area of vulnerability(6)

발전기 스케줄링과 부하 전압민감도를 고려한 순간전압강하 평가 프로그램 개발

특정 부하에 대한 순간전압강하 영향 평가를 위해서는 해당 부하의 전압민감도 특성을 알 필요가 있다. 일반적으로 부하의 전압민감도 특성은 제조사, 공인 표준, 실험 등을 통해서 취득할 수 있다[7]. 민감 부하에 대한 ITIC(Information Technology Industry Council), CBEMA(Computer and Business Equipment Manufacturers Association), SEMI(Semiconductor Equipment and Materials International)와 같은 전압 민감도 표준 곡선들이 소개되어 있다. 이러한 공인 전압민감도 특성 곡선들은 관련 단체들에 의해 제공되고 있으며 해당 기기들의 전압 민감도는 이러한 특성 곡선들을 근거로 가능할 수 있다. 그림 2는 ITIC 곡선의 예를 나타낸다. 전압의 크기와 지속시간이 곡선의 아래 부분(under voltage condition)에 해당되면 해당 기기가 전압강하로 오동작 함을 나타낸다. 특정 부하에 대한 순간전압강하 발생 횟수 추산을 위해서는 주어진 전압 민감도를 기준으로 취약지역을 계산하여야 한다.

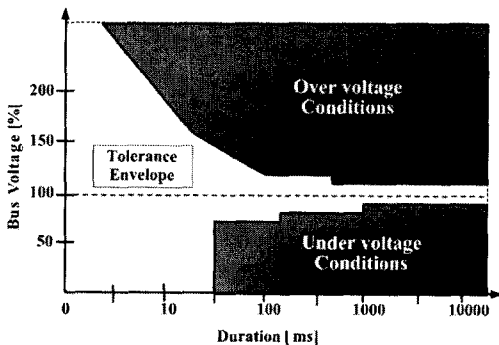


그림 2. 전압 민감도 곡선(ITIC Curve)
Fig. 2. Voltage-tolerance curve(ITIC curve)

3. 순간전압강하 평가에 있어서의 발전기 스케줄링과 시변 사고율

3.1 발전기 스케줄링과 시변 사고율

전력 계통에서의 발전기 운전 스케줄링 및 시변 사고율은 순간전압강하 추계적 평가에 있어 매우 중요한 요소이다[8]. 그러나 현재 대부분의 순간전압강하 평가 연구에서는 이러한 조건들을 고려하지 않고

있다. 순간전압강하 평가에 있어서의 발전기 스케줄링과 시변 사고율의 영향은 [8]에서 소개된 바 있다. 발전기의 전압조정과 임피던스는 계통 모션 전압에 큰 영향을 끼치며 계절적 특성에 따른 사고율의 변화 또한 순간전압강하 평가에 큰 영향을 끼친다. 따라서 보다 정확한 순간전압강하 평가를 위해서는 일년 동안의 발전기 운전 스케줄링 및 시변 사고율을 고려해야 한다. 일반적으로 순간전압강하 평가는 시스템의 장기적인 특성을 보는 것으로 주간 또는 월간 운전계획을 고려하면 충분하다. 발전기의 운전여부가 계통 모션 전압에 큰 영향을 미치므로 발전기 스케줄링을 고려한 순간전압강하 평가를 위해서는 운전 상황에 따라 각각 취약지역을 계산하여야 한다 [8]. 계통내 발전기의 동작 유무에 따라 취약지역의 크기와 형태가 변하게 된다.

일반적으로 순간전압강하 평가에 있어 연평균 사고율을 주로 이용하나 계통에서의 사고는 날씨의 영향을 크게 받는바 계절적 특성을 반영할 필요가 있다. 이에 연평균 사고율과 계절적 특성을 고려한 가중치를 두어 시변 사고율을 정의할 수 있다[8]. 그림 3은 연평균 사고율과 계절적 영향을 고려한 시변 가중치의 예를 보여주고 있다. 시변 사고율은 연평균 사고율과 해당 기간에 대한 가중치의 곱으로 표현할 수 있다. 본 논문에서 소개하는 순간전압강하 평가 프로그램을 이용하여 발전기 운전 스케줄 및 시변 사고율을 고려한 순간전압강하 평가가 가능하다.

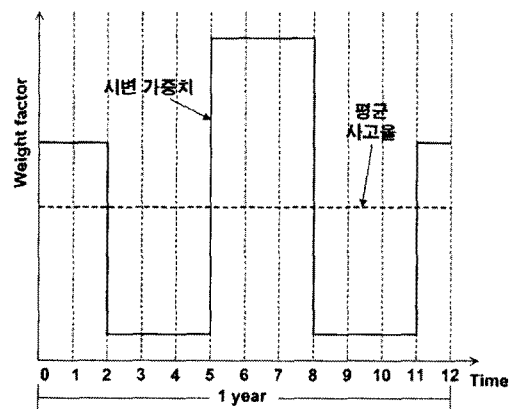


그림 3. 평균 사고율과 시변 사고율 가중치
Fig. 3. Average fault rate and time-varying weather weight factor

3.2 순간전압강하 발생 횟수 추산

본 절에서는 발전기 운전 스케줄링과 시변 사고율을 고려한 순간전압강하 발생 횟수 추산 방법에 대해서 소개한다. 발전기 월별 운전 계획을 고려할 때의 순간전압강하 발생 횟수 추산은 다음과 같은 절차로 이루어진다.

1) 발전기 운전 조건에 따라 취약지역을 각각 계산한다. 취약지역은 SLGF(Single line-to-ground fault), LLF(Line-to-line fault), DLGF(Double line-to-ground fault) 및 3PF(3-phase fault)의 각 사고 형태, 각 페이지에 대해 따로따로 계산되어야 한다[9-10].

2) 계산된 취약지역과 시변 가중치를 고려한 계통 내 선로 및 모선의 사고율을 이용하여 월별 순간전압강하 발생 횟수를 추산한다. 불평형 사고에 대한 순간전압강하 발생횟수는 식 (1)을 이용하여 계산하며 3상 평형 사고에 대한 순간전압강하 발생횟수는 식 (2)를 이용하여 계산한다[8].

$$ESF_{UF}(M) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left[\sum_{B \in ABM_{ij}} BFR_i(M) + \sum_{L \in ALM_{ij}} l_L \times LFR_i(M) \right] \quad (1)$$

$$ESF_{BF}(M) = \sum_{B \in ABM_{ij}} BFR_i(M) + \sum_{L \in ALM_{ij}} l_L \times LFR_i(M) \quad (2)$$

여기서,

ESF : Expected sag frequency

i : 사고형태(1: SLGF, 2: LLF, 3: DLGF, 4: 3PF)

j : 페이지(1: phase a, 2: phase b, 3: phase c)

B and L : 시스템 모선과 선로

l_L : 취약지역에 포함된 선로 L 의 길이

ABM_{ij} : M 월에 대한 취약지역(사고형태 i , 페이지 j)에 포함된 모선들의 집합

ALM_{ij} : M 월에 대한 취약지역(사고형태 i , 페이지 j)에 포함된 선로들의 집합

$BFR_i(M)$: M 월에 대한 모선 사고율(사고형태 i)

$LFR_i(M)$: M 월에 대한 선로 사고율(사고형태 i)

최종적으로 각 상에 대한 연간 순간전압강하 발생 횟수는 식 (3)과 같이 계산되어진다.

$$ESF_{SP} = \sum_{M=1}^{12} [ESF_{UF}(M)/3 + ESF_{BF}(M)] \quad (3)$$

4. 순간전압강하 평가 프로그램

해외에서는 순간전압강하 평가를 위한 프로그램이 몇몇 개발되어 소개되고 있다. 대부분 고장 위치법에 기반을 둔 프로그램들로 대표적으로 Electrotek Concepts사의 Voltage Sag Predictor와 Advanced Systems for Power Engineering사의 ASPEN One Liner라는 프로그램이 있다. 그러나 국내에서는 순간전압강하 평가를 위한 전용 프로그램의 개발이 전무한 상태이다. 이에 기존에 소개된 평가 방법들의 문제점을 개선한 알고리즘[4]을 기반으로 순간전압강하 평가 프로그램을 개발하였다.

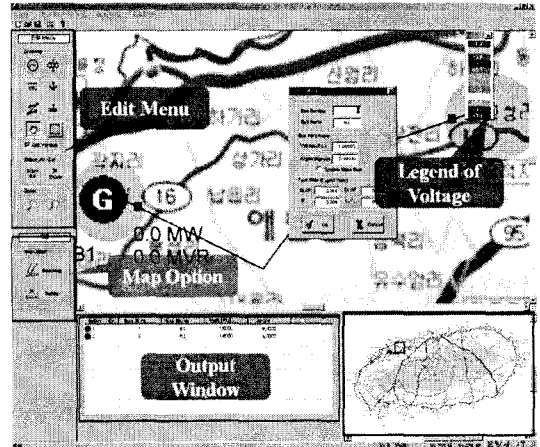


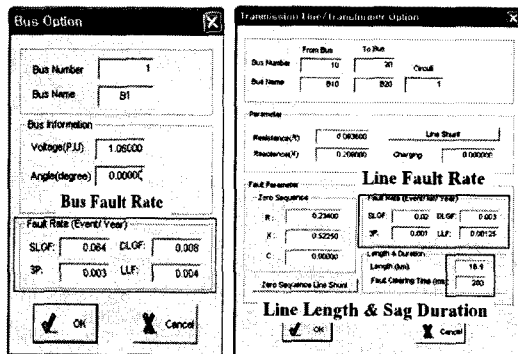
그림 4. 메인 화면과 맵 모드에서의 계통 구성
Fig. 4. Main window and system edit on a map

개발된 프로그램은 C++ 언어를 이용하여 객체지향 개념에 따라 설계되었다[11]. 프로그램의 유지보수 및 확장성 등을 고려하여 프로그램의 여러 분석 모듈들은 모두 DLL(Dynamic Linked Library)로 만들어졌다[11]. 개발된 프로그램의 주화면은 그림 4와 같으며 메뉴, 툴바, 다이얼로그바, 상태바, 출력창, 탐색 창으로 구성되어 있다. 본 논문에서 소개하는 순간전압강하 평가 프로그램의 초기 버전은 [11]에서 상세하게 설명되어 있다. 개발된 프로그램은 전력계

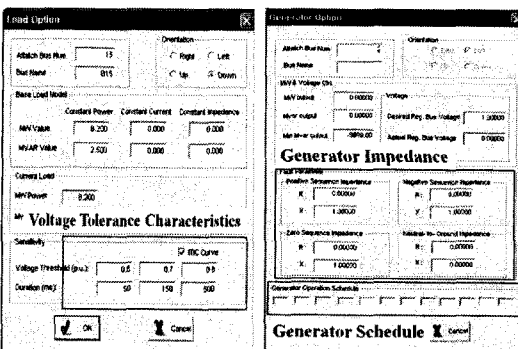
발전기 스케줄링과 부하 전압민감도를 고려한 순간전압강하 평가 프로그램 개발

통 상용 해석 프로그램인 PowerWorld Simulator와 같은 편리한 계통 드로잉 기능을 가지고 있으며 전형적인 단선도 형태로 계통을 구성하는 일반 모드와 지리 정보와 같이 계통을 구성하는 맵 모드를 제공한다.

순간전압강하 평가에 필요한 시스템 데이터, 신뢰도 데이터 및 전압 민감도 데이터들은 다이얼로그 박스를 통해 입력 가능하다. 발전기 데이터 입력창을 통해 임피던스 및 운전 스케줄을 입력할 수 있으며 선로, 모선, 부하 입력창을 통해 계통 사고율, 전압 민감도 등도 용이하게 입력 가능하다. 그림 5는 대표적인 계통 구성요소들의 데이터 입력창을 나타내며 그림 6은 월별 사고율 가중치 입력창을 나타낸다.



(a) 모선데이터 입력 (b) 선로 데이터 입력
(a) Bus data input (b) Line data input



(a) 부하데이터 입력 (b) 발전기 데이터 입력
(a) Load data input (b) Generator data input

그림 5. 데이터 입력 다이얼로그 박스
Fig. 5. Dialog boxes for data input

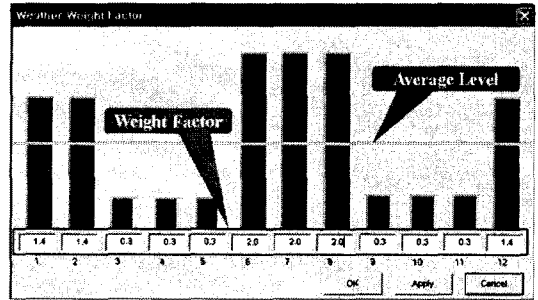
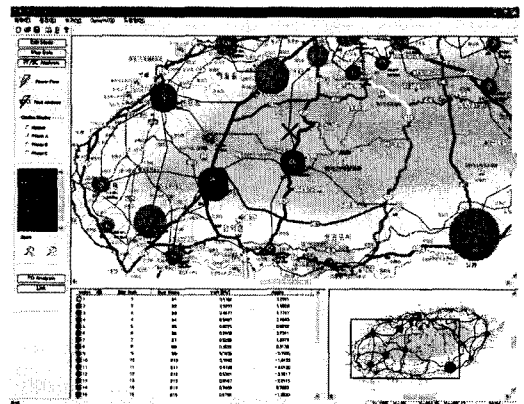
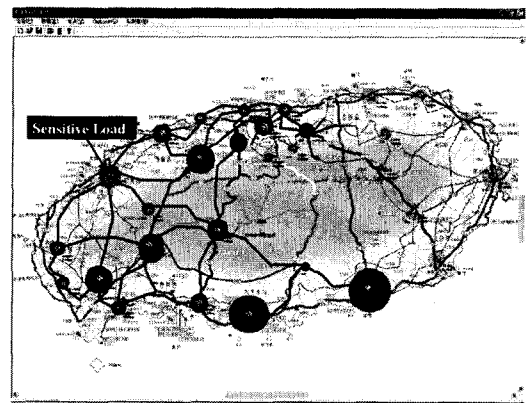


그림 6. 사고율 가중치 입력 다이얼로그 박스
Fig. 6. Dialog box for weather weight factor input



(a) 고장 계산 결과 화면(맵 모드)
(a) Short-circuit analysis result(map mode)



(b) 취약지역 계산 결과 화면(맵 모드)
(b) Area of vulnerability result(map mode)

그림 7. 계산 결과의 시각화[11]
Fig. 7. Visualization of analysis results[11]

개발된 프로그램은 컴퓨터 그래픽을 이용한 효과적인 시각화 기능을 제공한다. 모선 전압 레벨에 따른 색깔 변화를 통해 계통내 전압 분포를 용이하게 파악할 수 있도록 하였으며 취약지역 계산 결과 또한 계통도에 직접 표현하여 실제 크기와 형태를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 그림 7 (a)는 맵 모드에서의 고장 계산 결과 화면을 (b)는 취약지역 계산 결과 화면을 보여주고 있다.

5. 사례 연구

5.1 테스트 시스템 및 사례

IEEE 30-모선 계통에 대해 개발된 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8과 같이 해당 계통에는 모선 1, 2, 5, 8, 11, 13에 6개의 발전기가 연결되어 있다[4,12]. 사고전 계통의 모선 전압은 1.0 p.u.로 가정하였으며 변압기 결선은 모두 접지된 Y 결선으로 가정하였다. 순간전압강하 지속시간은 계통 전압 레벨에 따라 표 1과 같이 가정하였고 15번 모선에 연결된 부하 A의 전압 민감도 특성은 그림 9와 같다.

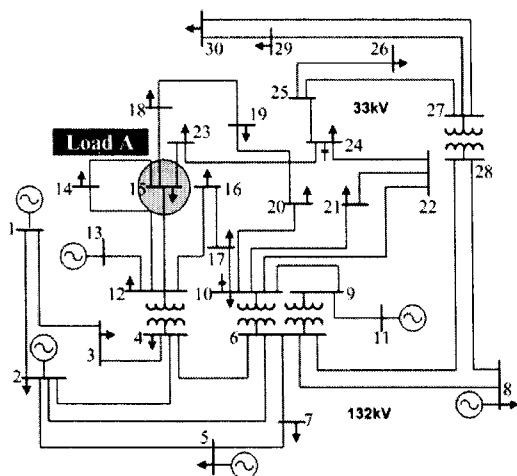


그림 8. IEEE 30 모선 계통 단선도
Fig. 8. Single-line diagram of IEEE-30 bus system

표 1. 가정된 순간전압강하 지속시간
Table 1. Assumed sag durations at different voltage levels

Voltage Level(kV)	Duration(ms)
132	100
33	200

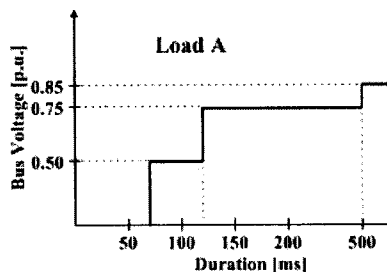


그림 9. 부하 A의 전압민감도 곡선
Fig. 9. Voltage-tolerance curve of load A

발전기 스케줄링 및 시변 사고율을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우의 두 가지 케이스에 대해 15번 모선에 연결된 부하 A에 피해를 야기하는 순간전압강하의 연간 발생 횟수를 추산해 보았다.

1) Case 1 : 계통내 모든 발전기는 연중 운전하고 있으며 모선 및 선로의 연평균 사고율은 각각 0.12 (event/year)와 5.62(event/100[km]/year)이다. 상해한 계통 사고율은 표 2에 정리되어 있다.

표 2. 모선 및 선로 사고율
Table 2. Bus and line fault rates

Type of Fault	Fault Type Distribution (%)	Bus Fault Rate (Event/year)	Line Fault Rate (Event/100[km]/year)
SLGF	80	0.096	4.496
LLF	5	0.006	0.281
DLGF	11	0.013	0.618
3PF	4	0.005	0.225

2) Case 2 : 6개 발전기의 운전 스케줄과 계절적 특성을 고려한 시변 사고율을 반영하여 모의하였다. 일 년 동안의 발전기 운전 스케줄은 그림 10과 같고 시변 사고율 가중치는 그림 11과 같다고 가정하였다.

발전기 스케줄링과 부하 전압민감도를 고려한 순간전압강하 평가 프로그램 개발

Generator	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	(Jan.-Feb.)	(Mar.-Apr.)	(May.-Jun.)	(Jul.-Aug.)	(Sep.-Oct.)	(Nov.-Dec.)
1	■	■	■	■	■	■
2	■	■	■	■	■	■
5	■	■	■	■	■	■
8	■	■	■	■	■	■
11	■	■	■	■	■	■
13	■	■	■	■	■	■

■ in operation □ out of operation

그림 10. 발전기 운전 스케줄
Fig. 10. Assumed schedule of the six generators

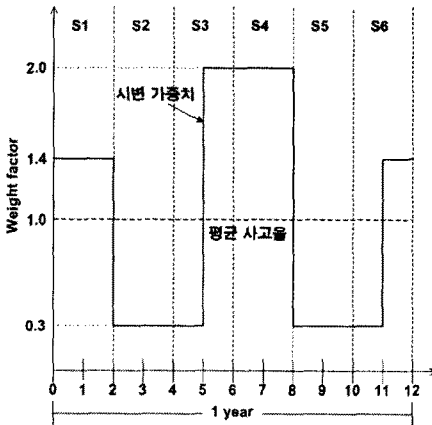
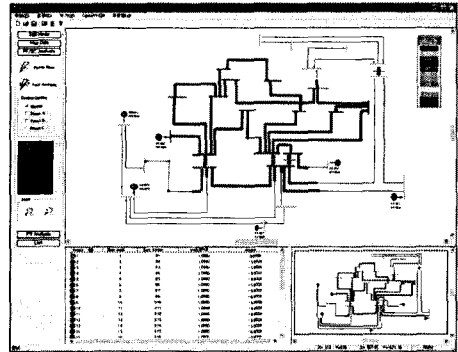


그림 11. 시변 사고율 가중치(8)
Fig. 11. Time-varying weather weight factor(8)

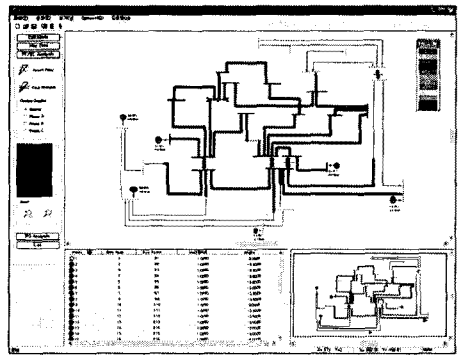
5.2 결 과

5.2.1 전형적인 순간전압강하 평가(Case 1)

현재 일반적으로 알려진 순간전압강하 평가 절차를 기반으로 모선 15에 연결된 부하 A에서의 순간전압강하 발생 횟수를 추산하였다. 부하 A의 전압 민감도를 고려하여 4가지 사고 형태에 따른 취약지역을 계산하였다. 그림 12는 SLGF와 3PF에 대한 취약지역을 나타낸다. 굵게 표시된 선로 및 모선에 사고가 발생하게 되면 부하 A의 전압 한계값 이하의 사고전압이 야기되어 부하 A가 영향을 받게 됨을 나타낸다. 계산 결과 부하 A에 피해를 가하는 순간전압강하가 연간 약 13번 발생 할 수 있다고 추산되었다. 그림 13은 개발된 프로그램의 계산 결과 출력 화면을 보여준다.



(a) SLGF에 대한 취약지역 계산 결과
(a) Area of vulnerability due to SLGF for load A



(b) 3PF에 대한 취약지역 계산 결과
(b) Area of vulnerability due to 3PF for load A

그림 12. 취약지역 계산 결과(Case 1)
Fig. 12. Areas of vulnerability for load A(Case 1)

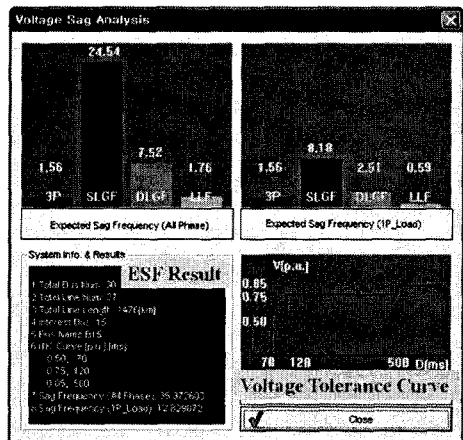
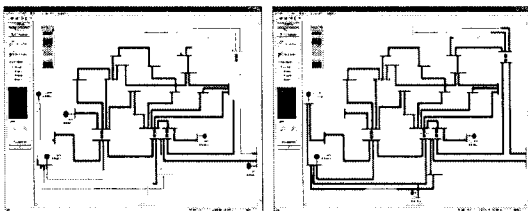


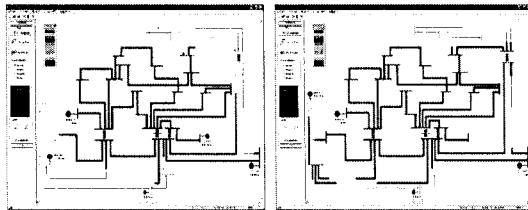
그림 13. 순간전압강하 발생 횟수 계산 결과 화면
Fig. 13. Result window of the expected sag frequency calculation

5.2.2 발전기 스케줄링 및 시변 사고율을 고려한 평가(Case 2)

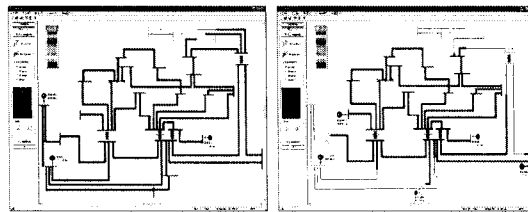
발전기 운전 스케줄링 및 시변 사고율을 고려하여 순간전압강하 발생 횟수를 추산하였다. 발전기 운전 조건에 대해 각각 취약지역을 계산하였다. 그림 14는 발전기 운전조건에 따른 취약지역(3PF)의 변화를 보여준다. 크기와 형태가 발전기 운전 조건에 따라 변함을 알 수 있다. 발전기 운전 조건 및 시변 사고율을 고려한 계산 결과 표 3과 같이 부하 A에 피해를 가하는 순간전압강하가 연간 약 20번 발생할 수 있다고 추산되었다. 발전기 운전조건 및 시변 사고율을 고려하는 것과 하지 않는 것에 따라 순간전압강하 평가 결과가 크게 차이가 날수 있음을 보이고 있다.



(a) S1에 대한 취약지역 (a) S1 (Jan. - Feb.)
(b) S2에 대한 취약지역 (b) S2 (Mar. - Apr.)



(c) S3에 대한 취약지역 (c) S3 (May. - Jun.)
(d) S4에 대한 취약지역 (d) S4 (Jul. - Aug.)



(e) S5에 대한 취약지역 (e) S5 (Sep. - Oct.)
(f) S6에 대한 취약지역 (f) S6 (Nov. - Dec.)

그림 14. 발전기 운전 스케줄에 따른 취약지역 변화
Fig. 14. Variation of the area of vulnerability with incorporation of the generator schedule

표 3. 발전기 운전 스케줄 및 시변 사고율을 고려한 순간전압강하 평가 결과

Table 3. Result with incorporation of the generator operation schedule and the time-varying fault rate

발전기 운전 조건	ESF(Events/year)
S1	3.222
S2	1.404
S3	2.661
S4	10.181
S5	0.849
S6	1.966
Total ESF (Events/year)	20.283

6. 결 론

본 논문에서는 순간전압강하 추계적 평가를 위한 윈도우즈 프로그램을 소개하였다. 개발된 프로그램을 통해 발전기 스케줄링, 시변 사고율 및 부하 전압 민감도 특성을 고려한 순간전압강하 평가가 가능하게 되었다. 순간전압강하 평가의 개념과 평가에 있어서의 발전기 스케줄링 및 시변 사고율의 영향에 대해서도 소개하였다. 현재 국내에서의 순간전압강하 평가 프로그램의 개발이 전무한 실정에서 개발된 프로그램은 순간전압강하 평가 및 예측 연구에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 앞으로 더욱더 다양한 분석 기능의 개발과 인터페이스 개선을 통해 프로그램의 업그레이드를 수행할 것이다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부 전력기술개발사업(R-2005-1-396-001)의 지원으로 연구되었음.

References

(1) IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality(ANSI).
(2) M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, Piscataway, NJ, 2000, IEEE Power Engineering Series.
(3) 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.
- [4] C. H. Park and G. Jang, "Stochastic estimation of voltage sags in a large meshed network," IEEE Trans. Power Deliv., Vol.22, No.3, pp. 1655- 1664, 2007.
- [5] T. Thasananutariya and S. Chatratana, and R. N. Allan, "Stochastic prediction of voltage sags in an industrial estate," Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005, Vol.2, Iss., 2-6, 2005.
- [6] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw-Hill, 2002, ch.3.
- [7] J. V. Milanovic, and C. P. Gupta, "Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology," IEEE Trans. Power Deliv., Vol.21, No.2, pp. 918-924, 2006.
- [8] C. H. Park, G. Jang, and R. Thomas, "The influence of generator scheduling and time-varying fault rates on voltage sag prediction," IEEE Trans. Power Deliv. Vol.23, No.2, pp. 1243- 1250, 2008.
- [9] M. T. Aung, J. V. Milanovic, and C. P. Gupta, "Propagation of asymmetrical sags and the influence of boundary crossing lines on voltage sag prediction," IEEE Trans. Power Deliv., Vol.19, No.4, pp. 1819-1827, 2004.
- [10] J. Wang, S. Chen, and T. T. Lie, "System voltage sag performance estimation," IEEE Trans. Power Deliv., Vol.20, No.2, pp. 1738- 1747, 2005.
- [11] C. H. Park, G. Jang, C. H. Kim, and J. C. Kim, "Development of a user-friendly application for voltage sag analysis," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.1, No.2, pp. 145-152, 2006.
- [12] IEEE 30-bus Test Case, [Online]. Available: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm

◆ 저자소개 ◆

박창현 (朴昶炫)

1974년 12월 25일생. 2001년 인하대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2007년 고려대학교 전기공학과 석박사 통합과정 졸업(박사). 2007년 고려대학교 BK21 박사 후 과정. 현재 부경대학교 전기제어공학부 전임강사.