



### 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

분산전원을 고려한 순간전압강하  
평가 연구



2012年 2月

釜慶大學校 大學院

電氣工學科

朴 種 日

工學碩士學位論文

분산전원을 고려한 순간전압강하  
평가 연구

A study on The Assessment of Voltage Sags  
Considering Distributed Generation

指導教授 朴昶炫

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함

2012 年 2 月

釜慶大學校 大學院

電氣工學科

朴 種 日

# 朴種日의 工學碩士 學位論文을 認准함

2012年 2月



主 審 工學博士 張 允 碩 ①

委 員 工學博士 李 鎔 旭 ①

委 員 工學博士 朴 昶 炫 ①

# 목 차

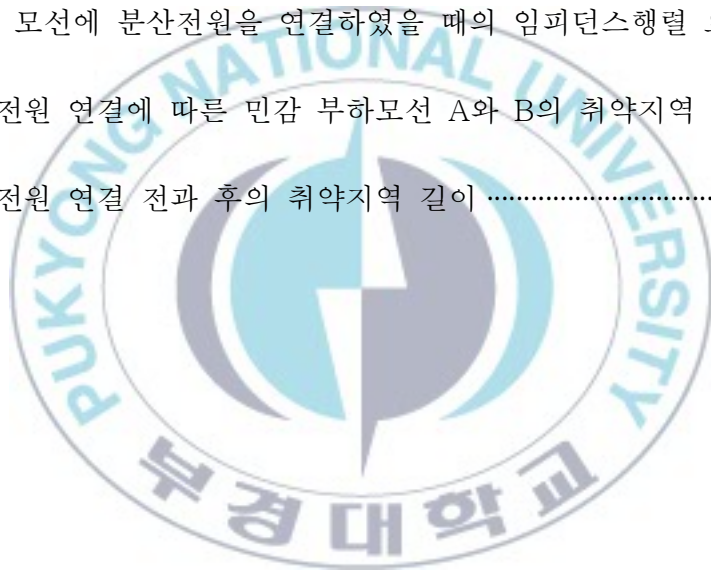
목차 .....	i
그림 목차 .....	ii
표 목차 .....	iii
Abstract .....	iv
<b>제 1 장 서론</b> .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구개요 .....	2
1.3 논문 구성 .....	3
<b>제 2 장 전력품질 해석</b> .....	4
2.1 순간전압강하 평가 및 해석 .....	4
2.2 임계 거리법과 사고 위치법 .....	5
2.3 할선법을 이용한 취약지역 기반의 평가방법 .....	9
2.3.1 취약지역 계산방법 소개 .....	10
<b>제 3 장 분산전원과 순간전압강하 평가</b> .....	16
3.1 분산전원에 따른 취약지역의 영향 .....	17
3.2 임피던스 행렬 구성법을 이용한 취약지역 계산 .....	20
<b>제 4 장 사례 연구</b> .....	28
4.1 모의계통 구성 .....	28
4.2 시뮬레이션 및 고찰 .....	30
<b>제 5 장 결론</b> .....	40
참고 문헌 .....	41

## 그림 목차

그림 1 방사상 계통의 사고와 민감 부하 .....	5
그림 2 임계 거리법을 통한 취약지역 .....	6
그림 3 사고 위치법을 적용한 모의계통의 취약지역 결정 .....	7
그림 4 사고 위치와 사고 수에 따른 취약지역 .....	8
그림 5 임의의 민감 부하에 대한 취약지역 예 .....	9
그림 6 임의의 계통에서 선로 F-T의 사고 .....	10
그림 7 사고에 따른 선로의 취약지역 .....	14
그림 8 순간전압강하 대책에 따른 소요비용 관계 .....	16
그림 9 분산전원 유무에 따른 전압강하 변화 .....	17
그림 10 발전기 운전 조건에 따른 취약지역의 변화 .....	19
그림 11 5모선 계통 예 (케이스별 분산전원 연결) .....	22
그림 12 4번 모선에서 케이스별 취약지역 .....	27
그림 13 IEEE-30 모선 계통 단선도 .....	28
그림 14 3상 사고에 대한 민감 부하 모선 A와 B의 취약지역 .....	31
그림 15 분산전원 위치에 따른 민감 부하 모선 A와 B의 취약지역 길이 감소량 .....	37
그림 16 18번 모선에 분산전원이 연결되었을 때의 취약지역 .....	39

## 표 목차

표 1 5모선 계통의 임피던스 행렬 .....	23
표 2 케이스별 대각& 비 대각 임피던스 요소 .....	25
표 3 분산전원 연결전 모의 계통의 임피던스 요소 .....	29
표 4 15번 모선에 분산전원을 연결하였을 때의 임피던스행렬 요소 .....	34
표 5 분산전원 연결에 따른 민감 부하모선 A와 B의 취약지역 길이 .....	35
표 6 분산전원 연결 전과 후의 취약지역 길이 .....	38



# A Study on The Assessment of Voltage Sags Considering Distributed Generation

Jong-Il Park

*Department of Electrical Engineering*

*Graduate School*

*Pukyong National University*

## Abstract

This paper presents a method to calculate the area of vulnerability by using the impedance building algorithm. The installation of DG (Distributed Generation) is one of the countermeasures against voltage sags in power systems. In order to estimate the effect of the DG, the voltage sag assessment should be performed based on the area of vulnerability and system fault statistics. To determine the area of vulnerability, system impedance matrix should be calculated. The calculation of the impedance matrix of large systems is time-consuming task. This paper addresses an effective scheme to calculate the area of vulnerability and system impedance matrix.



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

전력 계통에는 다양한 전력 품질 문제가 존재하며 그 발생 빈도나 영향이 각기 다른 특성을 가진다. 대표적인 전력품질 문제로 순간전압강하 현상을 들 수 있는데 그 발생 빈도나 피해 정도가 매우 크다. 짧은 시간동안의 전압 감소 현상인 순간전압강하로 인해 민감 부하가 오동작 하거나 트립될 수 있으며 이러한 문제는 산업 자동화 공정에서 막대한 경제적 손실을 유발하게 된다[1]. 순간전압강하의 원인은 전력계통에서의 사고, 과부하, 큰 전동기의 기동 등으로 알려져 있으며, 일반적으로 계통에서의 사고로 인한 순간전압강하가 전압강하 폭이 가장 크며 넓은 지역에 문제를 야기한다 [1]. 따라서 계통에서의 사고로 인한 순간전압강하가 가장 큰 관심사가 되고 있다. 이러한 순간전압강하 문제 해결을 위해 다양한 대책과 보상설비들에 대한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다[2]-[5].

순간전압강하에 대한 대책은 크게 전력 공급자 측면에서의 대책과 민감 부하 수용가 측면에서의 대책으로 나눌 수 있다. 민감 부하 수용가 측면에서의 대책으로는 대표적으로 전압 보상설비의 설치를 들 수 있다. 공급자 측면에서는 기본적으로 사고저감을 위한 대책과 함께 민감 부하단에 대한 모션 분리나 계통구성 변경과 같은 대책을 들 수 있다. 뿐만 아니라 민감 부하근처에 분산전원(Distributed Generation)을 설치하는 것도 순간전압강하 저감 대책으로 알려져 있다 [1], [6]. 공급자 측면에서의 대책들은 비교적 큰 비용이 들어가게 되지만 그 효과는 광범위하게 미칠 수 있다.

분산전원 설치의 경우 실제 여러 가지 제약조건들이 있겠으나 전압강하에 민감한 수용가가 다수 존재한다면 순간전압강하를 고려한 분산전원 설치 위치 선정 등도 고려해 볼 수 있을 것이다. 분산전원 설치로 인한 순간전압강하 저감 효과 분석이나 여러 민감 부하 수용가를 고려한 최적 설치 위치 선정 등의 분석을 위해서는 분산전원을 포함한 순간전압강하 평가가 이루어져야 한다.

## 1.2 연구개요

순간전압강하를 저감시키는 방안 중 분산전원의 설치를 들 수 있다. 분산전원의 설치는 계통 전체를 고려한 대책중 하나이며 비용이 많이 들 수 있지만 그 효과가 광범위하게 미칠 수 있다. 본 논문에서는 여러 민감부하 모션에 대해 분산전원을 설치하여 분석을 실시하였다. 발전기의 내부 임피던스와 전압 조정 능력은 계통에서의 사고로 인한 전압강하에 영향을 미치게 된다. 따라서 분산전원의 유무 및 계통에서의 연결 위치 등에 따라 취약지역에 큰 영향을 미친다. 순간전압강하 영향을 고려한 분산전원 설치를 위해 선행적으로 순간전압강하 평가를 실시하여야 한다. 순간전압강하 평가는 전력계통내의 특정 민감 부하모션에 대해서 순간전압강하 발생횟수를 예상하여 분석하는 것이다. 순간전압강하 평가를 위해서는 취약지역의 계산이 필요하다. 취약지역이란 특정 민감 부하모션에 주어진 한계전압 이하의 사고 전압을 야기하는 계통내 사고 위치들의 집합이라 할 수 있다. 특정 부하단에 대한 취약지역의 계산을 위해서는 계통의 임피던스 행렬을 알아야 한다.

일반적으로 대규모 전력계통 해석에 있어 임피던스 행렬은 어드미턴스 행렬의 역행렬 연산을 통해 얻게 된다. 다양한 위치에 분산전원을 연결하여 순간전압강하 평가를 할 경우 기존의 방법에 의하면 매번 어드미턴스 행렬의 구성과 역행렬 연산이 필요하게 된다. 대규모 계통의 경우 매우 큰 계산 부담이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 단점을 개선하기 위해서 임피던스 행렬 구성법(Impedance Building Algorithm)을 이용한 취약지역 계산방법을 소개한다. 역행렬의 연산 없이 필요한 임피던스 요소를 직접적으로 계산할 수 있어 계산 부담을 현저히 줄일 수 있다.

### 1.3 논문 구성

본 논문은 2장에서 전력품질개요 및 순간전압강하 평가방법들을 나타내었다. 할선법을 이용한 취약지역(Area of Vulnerability) 기반의 평가방법을 통해 연구를 수행하였으며 취약지역의 개념과 평가방법의 특징을 소개하였다. 3장에서는 분산전원 설치에 따른 취약지역 변화를 설명하였으며 임피던스 행렬 구성법(Impedance Building Algorithm)을 적용하여 개선된 평가방법을 나타내었다. 마지막으로 4장에서는 3장에서 소개한 임피던스 행렬 구성법을 통해 분산전원 설치에 대한 취약지역 계산을 모의하였다. 모의를 통해 순간전압강하 경감대책에 효과적인 분산전원 설치 위치를 제시하였다.

## 제 2 장 전력품질 해석

### 2.1 순간전압강하 평가 및 해석

전력 계통에서의 대표적인 전력 품질 문제 중 하나인 순간전압강하는 실효치 전압 크기 0.1~0.9[p.u.] 범위로 지속시간 0.5 cycle~1분 사이의 전압 감소현상으로 정의되어 있다[7]. 순간전압강하 발생으로 인한 막대한 경제적 손실을 경험하게 되는 민감 부하 수용가는 순간전압강하의 영향을 적게 받는 입지 또는 효율적인 대책수립이 필요하다[1]. 따라서 계통의 특정 민감 부하 수용가에 대해 순간전압강하 평가를 수행하여야 한다. 순간전압강하 평가방법에는 크게 전압 모니터링에 의한 방법과 추계적(stochastic) 분석을 기반으로 하는 시뮬레이션 방법이 있다. 모니터링 방법을 수행하기 위해서 다수의 모니터링 유닛을 설치와 오랜 기간 관리가 필요하므로 많은 경제적 비용이 소요되는 단점이 있다[8]. 반면, 시뮬레이션 방법은 계통의 변경 및 계획 단계의 계통에 대해서도 신속한 평가가 가능하다. 따라서 모니터링이 어려운 경우나 모니터링 기간이 현저히 짧은 경우에는 대부분 시뮬레이션 방법을 사용한다. 대표적으로는 임계거리(critical distance)법과 사고 위치(fault position)법이 있다[1][9]. 두 평가 방법을 이용하여 특정 민감 부하모선에 대해 순간전압강하 발생을 예측해볼 수 있다. 두 평가방법은 순간전압강하에 영향을 주는 선로나 모선에 계통의 사고율 데이터를 이용하여 순간전압강하 발생 횟수를 추산할 수 있다. 이러한 평가방법을 통해 민감 부하모선의 순간전압강하 예상횟수를 감소시키는 방안을 생각해 볼 수 있다.

두 평가 방법에 대해서 2.2장에 간략하게 설명하였다. 또한 2.3을 통해 두 평가 방법을 개선한 순간전압강하 평가를 소개하였다.

## 2.2 임계 거리법과 사고 위치법

임계 거리법은 전압 분배 모델 기반으로 특정 민감 부하의 한계전압 이하의 사고 전압값을 야기하는 사고 위치를 계산한다. 이 방법은 배전 계통과 같은 방사상 계통에 대한 평가시 매우 효과적이거나 송전 계통과 같은 망구조 계통에는 적용되지 않는 단점이 있다. 그림 1과 같이 순 리액티브 성분만으로 구성된 계통이 있을 경우 식(1)~(3)을 통해 임계거리를 구할 수 있다. PCC에 민감 부하가 연결되어 있고 PCC에서 임피던스  $Z_F$  거리에서 사고가 발생하였을 경우 PCC에서의 사고전압은 식(1)과 같이 계산된다.

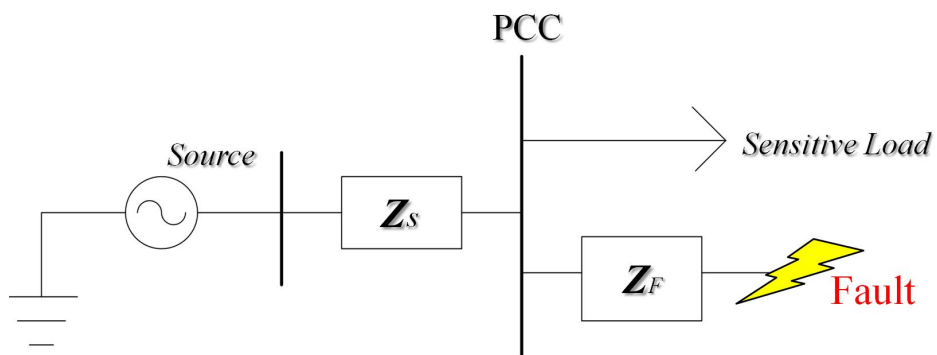


그림 1. 방사상 계통의 사고와 민감 부하

$$V_{sag} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (1)$$

여기서  $Z_F$  는 PCC와 사고 위치사이의 임피던스이며  $Z_S$  는 전원 임피던스이다. 단 사고전 계통의 전압을 1.0[p.u.]라고 가정한다.  $Z_F$  를 PCC와 사고위치 사이의 길이  $L$ 과 선로 길이당 단위 임피던스  $z$ 로 나타내면 식 (2)~(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{sag} = \frac{zL}{Z_S + zL} \quad (2)$$

$$L_{critical} = \frac{Z_S}{z} \times \frac{V_{Sag}}{1 - V_{Sag}} \quad (3)$$

그림 2는 민감 부하모선에 사고로 인한 순간전압강하를 야기할 수 있는 선로를 임계 거리법을 통해 나타낸 것이다.

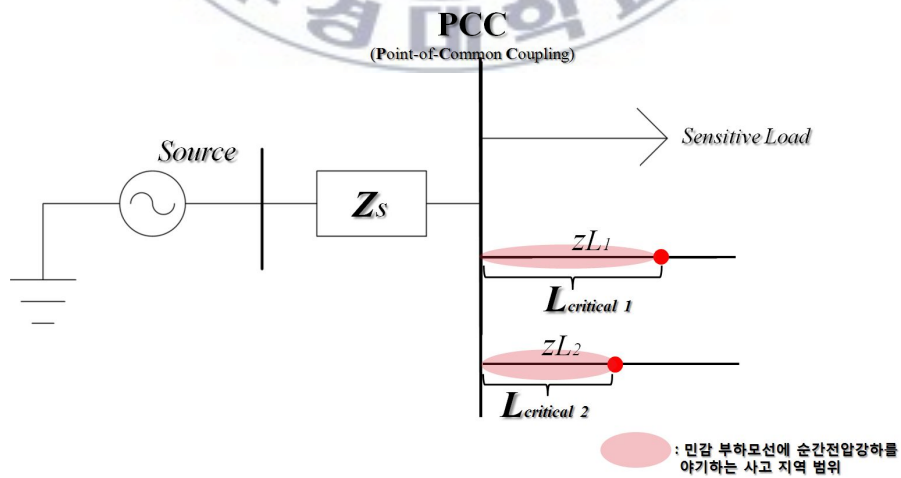


그림 2. 임계 거리법을 통한 취약지역

사고 위치(fault position)법은 방사상 계통 및 망구조 계통 모두 활용이 가능하다. 계통내 많은 사고 위치를 결정하고 각 위치에서의 사고 해석을 통해 순간전압강하 특성(크기와 지속시간)을 결정한다. 이 방법의 정확도는 모의하는 사고 위치와 사고의 수에 의해 크게 좌우된다. 따라서 대규모 계통에 적용시 매우 큰 계산 부담이 발생하는 단점이 있다. 그림 3은 사고 위치법을 통하여 모의 계통에 취약지역을 결정하는 것을 보여주고 있다. 그림3 (b)와 같이 모의 계통의 민감 부하에 대하여 각 선로를 우선적으로 분할하여야 한다. 모의하고자 하는 선로의 각 구간에서 발생하는 모든 사고는 동일한 사고 전압을 야기한다라고 가정한다.

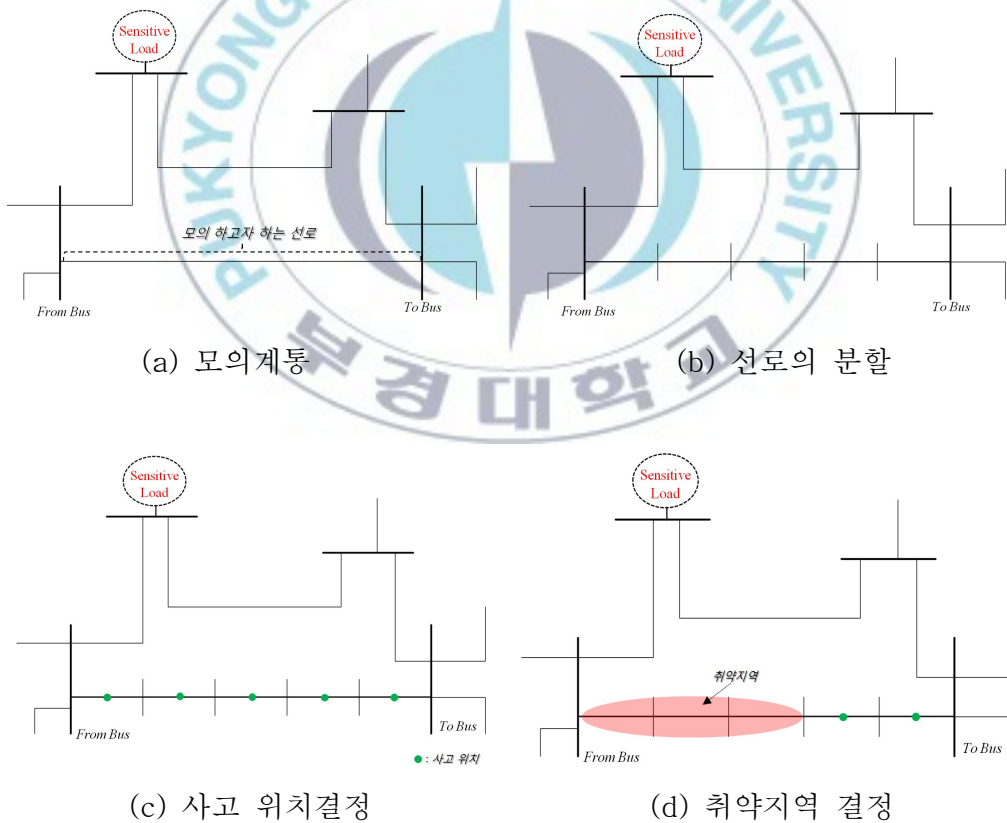
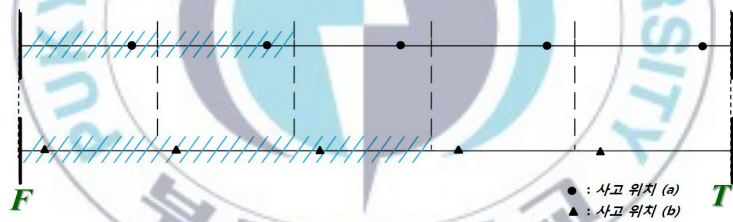


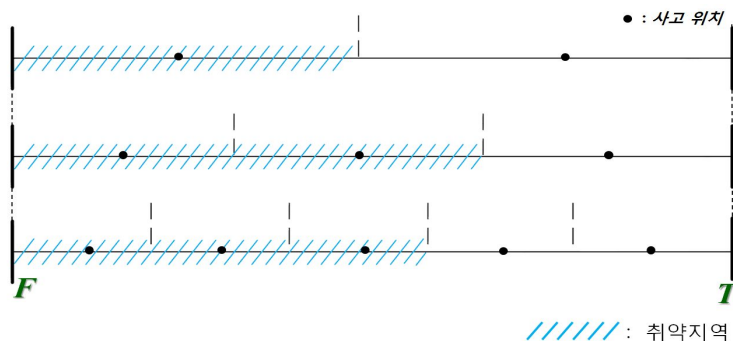
그림 3. 사고 위치법을 적용한 모의계통의 취약지역 결정

그림3 (c)와 같이 각 구간의 사고 위치를 선정하고 사고 계산을 수행한다. 민감 부하가 연결되어 있는 모선에서의 사고전압과 지속시간을 기록한다. 민감 부하의 한계전압이하가 되는 선로의 구간을 취약지역으로 선정한다. 그림3 (d)와 같이 나타낼 수 있다.

사고 위치법은 선로의 분할과 사고 위치의 선정에 따라 결과의 정확도에 영향을 준다. 그림 4를 통해 사고 위치법의 단점을 확인할 수 있다. 선로를 많이 분할한다면 평가의 정확도는 향상되나 계산량이 많아진다. 또한 한계점이 존재하는 구간에서는 사고 위치선정에 따라 결과를 다르게 나타낼 수 있다. 단점을 개선한 할선법을 이용한 취약지역기반의 평가방법을 다음절에 소개한다.



(a) 사고 위치에 따른 취약지역



(b) 사고의 수에 따른 취약지역

그림 4. 사고 위치와 사고 수에 따른 취약지역



## 2.3 할선법을 이용한 취약지역기반의 평가방법

임계 거리법은 배전계통에만 활용할 수 있는 단점과 사고 위치법은 사고 위치와 사고의 수에 영향을 받는 단점이 있다. 본 절에서는 사고 위치법을 개선한 할선법을 이용한 취약지역기반의 평가방법을 알아본다[8]. 이 평가 방법에서의 취약지역은 그림 5와 보는 것과 같이 나타내었다. 취약지역에서 사고가 일어날 경우 민감 부하모션에는 순간전압강하를 경험하게 된다.

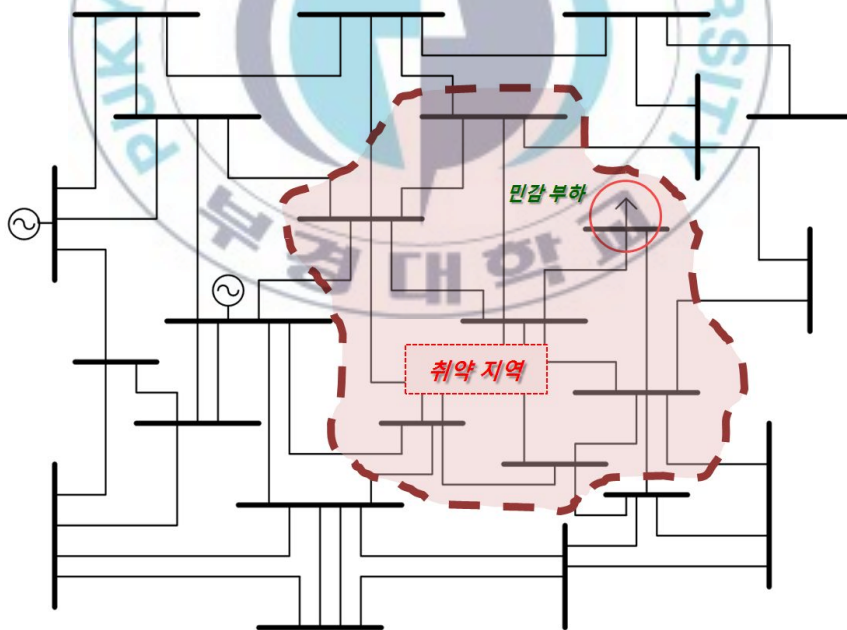


그림 5. 임의의 민감 부하에 대한 취약지역 예

### 2.3.1 취약지역 계산방법 소개

취약지역을 계산하기 위해 계통내 임의의 모선에서의 사고전압을 계산할 수 있는 전압강하 계산식을 유도하여야 한다. 그림 6과 같이 임의의 선로 F-T사이 k에서 사고가 발생할 때 사고 위치에서의 테브닌 등가 임피던스  $Z_{KK}$ 와 사고위치 k와 특정 모선 m사이의 전달 임피던스  $Z_{mK}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 p는 선로의 비율을 뜻하며 0과 1사이의 값이며  $Z_C$ 는 선로 임피던스를 나타낸다.

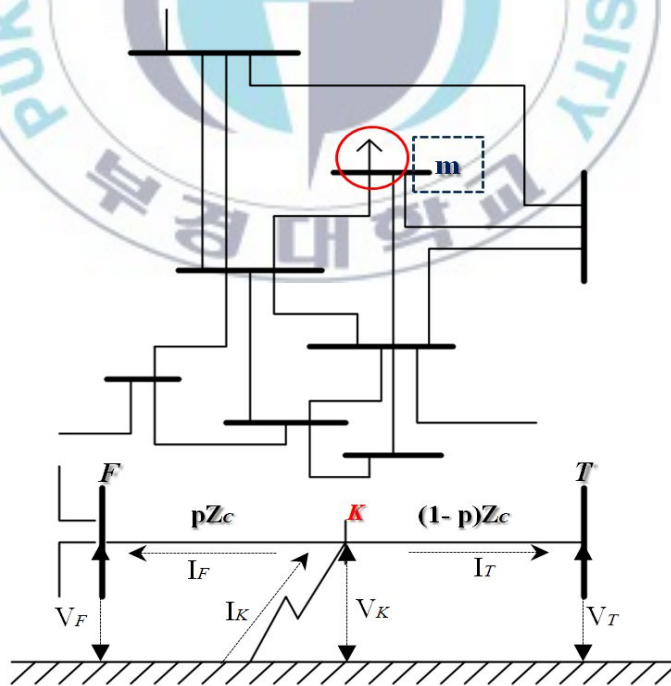


그림 6. 임의의 계통에서 선로 F-T의 사고

$$Z_{mK} = Z_{mF} + (Z_{mT} - Z_{mF})p \quad (4)$$

$$Z_{KK} = (Z_{FF} + Z_{TT} - 2Z_{FT} - Z_C)p^2 + \{Z_C - 2(Z_{FF} - Z_{FT})\}p + Z_{FF} \quad (5)$$

여기서  $Z_{mF}$  및  $Z_{mT}$  는 특정 모선 m과 모선 F, 모선 m과 모선 T 사이의 전달 임피던스를 나타낸다.  $Z_{FF}$  및  $Z_{TT}$ 는 모선 F와 T에서의 테브닌 등가 임피던스이며  $Z_{FT}$ 는 모선 F와 모선 T사이의 전달 임피던스이다. 이와같은 테브닌 및 전달 임피던스는 계통의 임피던스 행렬( $Z$ )로부터 쉽게 찾을 수 있다. 임피던스 행렬은 계통의 어드미턴스 행렬( $Y$ )의 역행렬로부터 얻을 수 있다. 일반적으로 대규모 계통의 경우 어드미턴스 행렬에 대한 삼각분해 등을 이용하여 계통 임피던스 행렬을 계산한다. 순간전압강하 평가를 위한 취약지역 계산은 평형 및 불평형 사고 모두에 대해 이루어져야 한다. 따라서 정상, 역상, 영상 회로에 대한 테브닌 등가 임피던스 및 전달 임피던스를 모두 알아야 한다. 첨자 0은 영상, 1은 정상, 2는 역상을 나타낸다[9].

$$Z_{mK}^0 = Z_{mF}^0 + (Z_{mT}^0 - Z_{mF}^0)p \quad (6)$$

$$Z_{mK}^1 = Z_{mF}^1 + (Z_{mT}^1 - Z_{mF}^1)p \quad (7)$$

$$Z_{mK}^2 = Z_{mF}^2 + (Z_{mT}^2 - Z_{mF}^2)p \quad (8)$$

$$Z_{KK}^0 = (Z_{FF}^0 + Z_{TT}^0 - 2Z_{FT}^0 - Z_C^0)p^2 + \{Z_C^0 - 2(Z_{FF}^0 - Z_{FT}^0)\}p + Z_{FF}^0 \quad (9)$$

$$Z_{KK}^1 = (Z_{FF}^1 + Z_{TT}^1 - 2Z_{FT}^1 - Z_C^1)p^2 + \{Z_C^1 - 2(Z_{FF}^1 - Z_{FT}^1)\}p + Z_{FF}^1 \quad (10)$$

$$Z_{KK}^2 = (Z_{FF}^2 + Z_{TT}^2 - 2Z_{FT}^2 - Z_C^2)p^2 + \{Z_C^2 - 2(Z_{FF}^2 - Z_{FT}^2)\}p + Z_{FF}^2 \quad (11)$$

$$V_K^{pref} = V_F^{pref} + (V_T^{pref} - V_F^{pref}) \quad (12)$$

여기서  $V_F^{pref}$  와  $V_T^{pref}$ 는 모선 F와 T의 사고전 전압을 의미하며 조류계산을 통해 값을 알 수 있다.

(1) 1선 지락사고 (SLGF) [8]

임의의 선로 F-T 사이 K위치에서의 1선 지락 사고시 임의의 모선 m에서의 각 상 사고 전압 계산식은 다음과 같다. 단 a는  $e^{j120^\circ}$  이다.

$$V_{A,m}^{fault} = V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^0 + Z_{mK}^1 + Z_{mK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad (13)$$

$$V_{B,m}^{fault} = a^2 V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^0 + a^2 Z_{mK}^1 + a Z_{mK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad (14)$$

$$V_{C,m}^{fault} = a V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^0 + a Z_{mK}^1 + a^2 Z_{mK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad (15)$$

(2) 선간 단락사고 (LLF)[8]

임의의 선로 F-T 사이 K위치에서 B와 C상 사이에 선간 단락사고가 발생했을 경우 임의의 모선 m에서의 각 상 사고 전압 계산식은 다음과 같다.

$$V_{A,m}^{fault} = V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^1 - Z_{mK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad (16)$$

$$V_{B,m}^{fault} = a^2 V_{A,m}^{pref} - \frac{a^2 Z_{mK}^1 - a Z_{mK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad (17)$$

$$V_{C,m}^{fault} = a V_{A,m}^{pref} - \frac{a Z_{mK}^1 - a^2 Z_{mK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad (18)$$

## (3) 2선 지락사고 (DLGF)[8]

임의의 선로 F-T 사이 K위치에서 B와 C상 사이에 2선 지락사고가 발생했을 경우 임의의 모선 m에서의 각 상 사고 전압 계산식은 다음과 같다.

$$V_{A,m}^{fault} = V_{A,m}^{pref} - \frac{\{(Z_{mK}^1 - Z_{mK}^0)Z_{KK}^2 + (Z_{mK}^1 - Z_{mK}^2)Z_{KK}^0\}}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} V_K^{pref} \quad (19)$$

$$V_{B,m}^{fault} = a^2 V_{A,m}^{pref} - \frac{\{(a^2 Z_{mK}^1 - Z_{mK}^0)Z_{KK}^2 + (a^2 Z_{mK}^1 - a Z_{mK}^2)Z_{KK}^0\}}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} V_K^{pref} \quad (20)$$

$$V_{C,m}^{fault} = a V_{A,m}^{pref} - \frac{\{(a Z_{mK}^1 - Z_{mK}^0)Z_{KK}^2 + (a Z_{mK}^1 - a^2 Z_{mK}^2)Z_{KK}^0\}}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} V_K^{pref} \quad (21)$$

## (4) 3상 평형사고 (3PF)[8]

임의의 선로 F-T 사이 K위치에서 3상사고가 발생했을 경우 임의의 모선 m에서의 각 상 사고 전압 계산식은 다음과 같다. 3상평형 사고해석에서는 정상 회로만 고려하면 된다.

$$V_m^{fault} = V_m^{pref} - \frac{Z_{mK}^1}{Z_{KK}^1} V_K^{pref} \quad (22)$$

선로를 따라 발생하는 사고로 인한 전압강하는 2차 곡선 형태와 유사하다고 가정하였기 때문에 선로에는 최대 2개의 한계점(critical point)이 존재한다. 사고 형태별 전압강하 계산식들의 정상, 역상, 영상 임피던스들은 모두 미지수 p에 대한 수식이다.

임의의 모선  $m$ 의 사고전압을 기지값으로 한계 전압값을 대입하면  $p$ 에 대한 전압 방정식을 알 수 있다. 그러나 전압 방정식의 미지수  $p$ 는 4차이상  
의 고차 방정식이 되므로 직접적으로 해를 구할 수 없다. 따라서  $p$ 에 대한  
2차 보간 방정식을 구하여 할선법을 계산한다. 선로 F-T의 사고 위치  $p$ 를  
찾아 민감 부하모선에 대한 영역화를 통해 취약지역을 계산한다.

임의의 모선에 대한 선로의 취약지역은 그림 7과 같이 4가지의 경우를  
생각해 볼 수 있다[8].

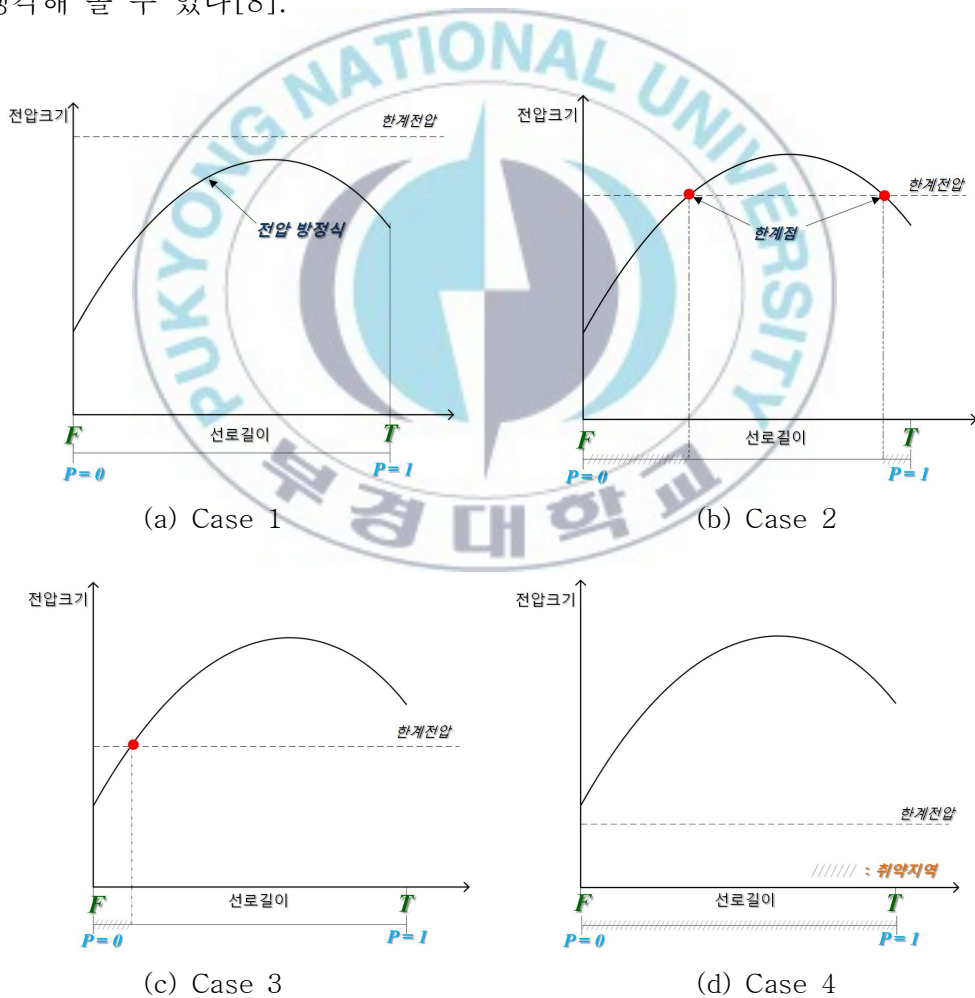


그림 7. 사고에 따른 선로의 취약지역

- Case 1 : 한계 전압값이  $p = 0$ 과  $p = 1$ 에서의 사고 전압 모두 보다 작으면 해당 선로는 취약지역에 포함되지 않는다.
- Case 2 : 한계 전압값이  $p = 0$ 과  $p = 1$ 에서의 사고 전압 모두 보다 크고  $0 \leq p \leq 1$ 에서의 사고 전압 최대값보다 작으면 해당 선로에서는 두 개의 한계점이 존재한다. 해당 선로의 두 부분이 취약지역에 포함이 된다.
- Case 3 : 한계 전압값이  $p = 0$ 과  $p = 1$ 에서의 사고 전압 사이의 값이면 해당선로에서는 하나의 한계점이 존재한다. 해당 선로의 한 부분이 취약지역에 포함이 된다.
- Case 4 : 한계 전압값이  $0 \leq p \leq 1$ 에서의 사고 전압 최대값 보다 크면 해당 선로는 전체가 취약지역에 포함된다.

## 제 3 장 분산전원과 순간전압강하 평가

순간전압강하를 경감시키는 대책들은 다양하며 그 대책들의 적용시에 소요되는 비용은 상대적이다. 그림 8은 순간전압강하 대책에 따른 소요비용 관계를 나타낸 것으로 부하측에 가까워질수록 대책에 드는 비용이 적고 전원측에 가까워질수록 대책에 드는 비용이 많은 것을 나타내고 있다. 그러나 이것은 단일 부하를 고려할 때의 경우이며 공급 계통측면에서의 대책 비용은 많이 소요될 수 있으나 그 효과는 광범위하게 미칠 수 있으므로 다수의 민감 부하가 넓은 지역에 걸쳐 분포할 때는 계통측면에서의 대책이 더 효과적일 수도 있다.

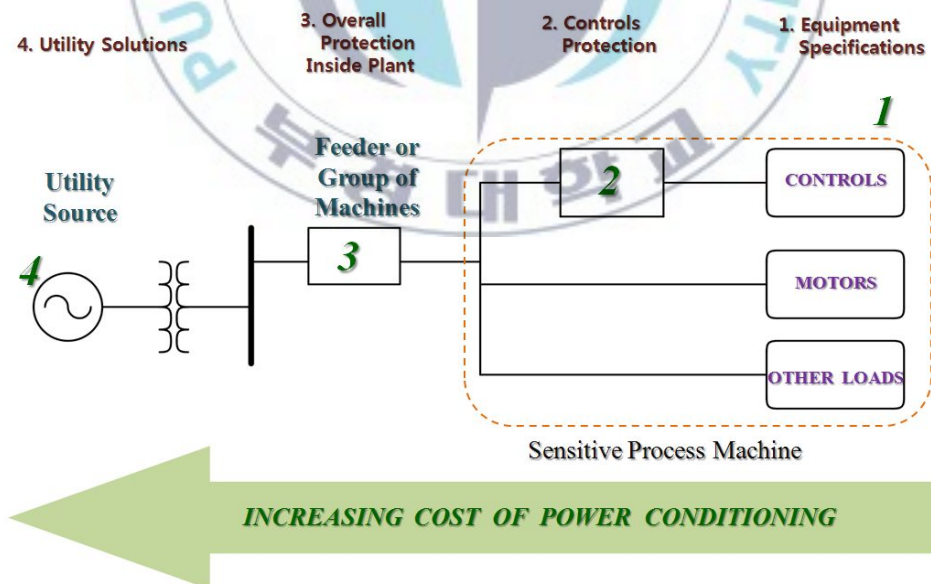


그림 8. 순간전압강하 대책에 따른 소요비용 관계[10]



계통 전체를 고려한 대책으로 분산전원의 설치나 모선 분할 및 다회선화 등을 고려할 수 있다. 이에 본 연구에서는 분산전원 설치에 따른 순간전압강하 발생과 경제적 손실에 대한 영향 분석을 실시하였다. 신재생 에너지원 확대와 스마트 그리드화 등의 영향으로 다양한 분산전원이 계통에 설치되고 있다. 분산전원은 순간전압강하를 저감시키는 효과를 줄 수 있는 것으로 알려져 있다.

### 3.1 분산전원에 따른 취약지역의 영향

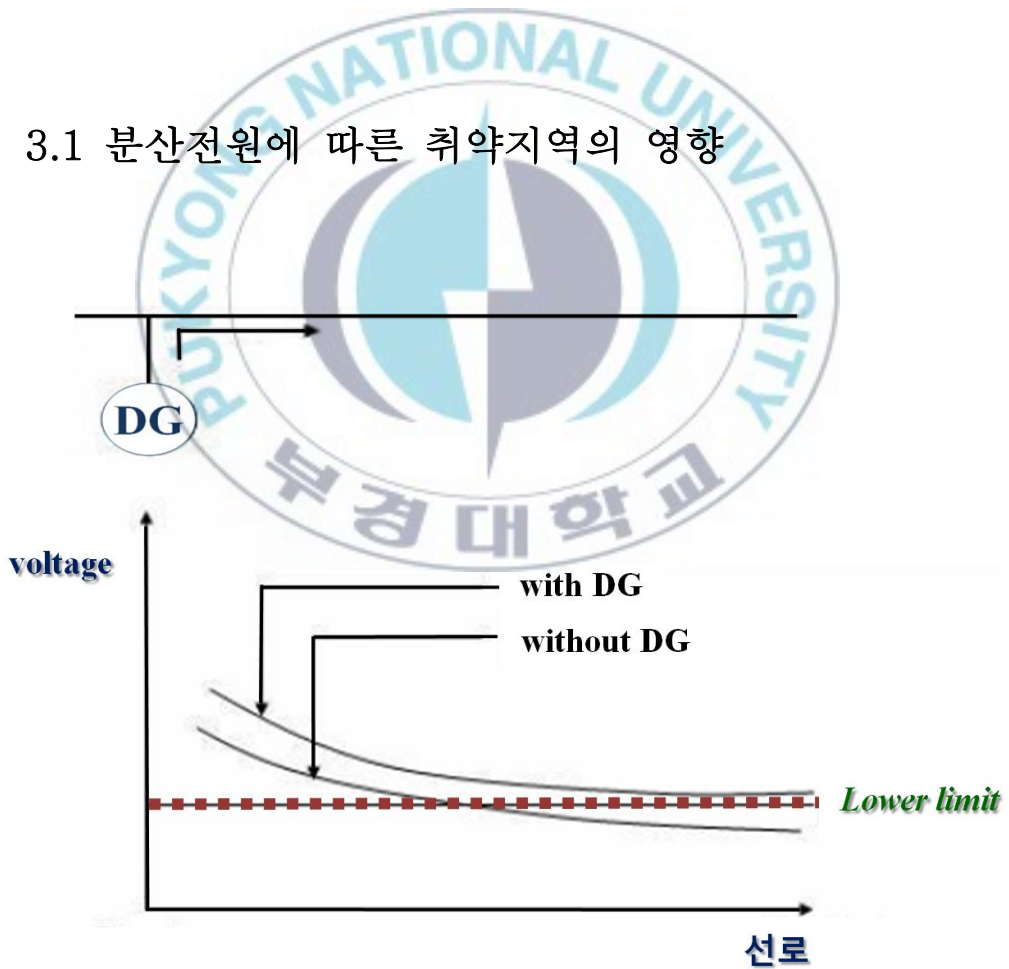
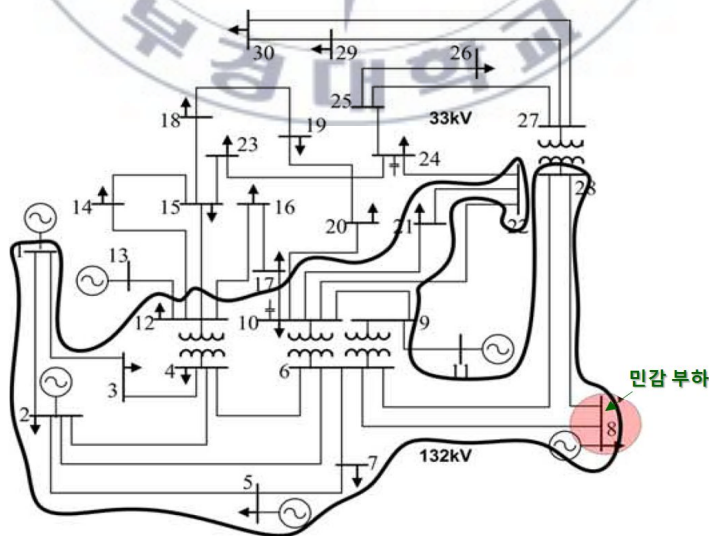


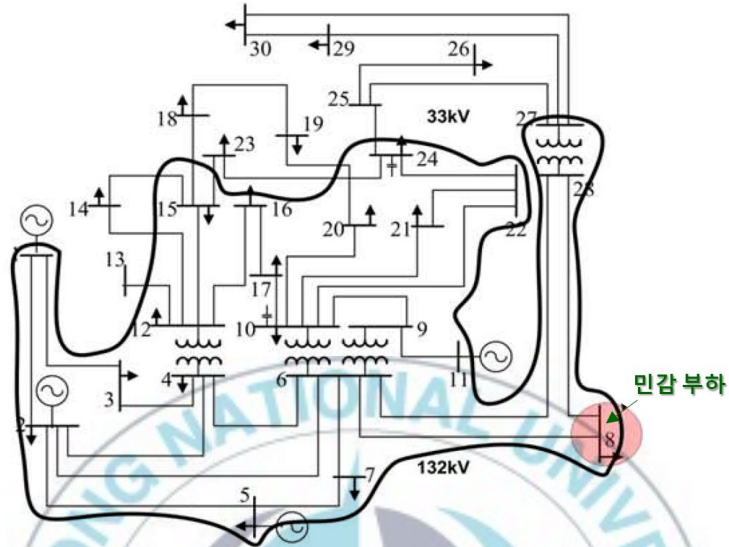
그림 9. 분산전원 유무에 따른 전압강하 변화

분산전원은 기존 전력회사의 대규모 전원과 달리 민감 부하모선에 분산배치가 가능한 소형발전기를 말한다. 민감 부하 근처에 분산전원이 연결될 경우 순간전압강하 저감 효과를 얻을 수 있다. 그림 9는 분산전원 유무에 따른 전압강하 변화를 보여주고 있다. 계통내 특정 위치에 분산전원이 연결될 경우 저감효과가 어느 정도이며 여러 민감 부하 수용가들을 고려할 때 최적의 설치 위치는 어디가 될 것인지 등의 분석이 필요하다. 즉 분산전원을 포함한 순간전압강하 평가가 이루어져야 한다. 분산전원의 유무 및 연결 위치는 특정 민감 부하 모선에 대한 취약지역에 큰 영향을 준다. 순간전압강하 평가나 사고 전압 및 사고 전류의 계산에 있어서는 일반적으로 분산전원을 하나의 등가 임피던스로 모델링하게 된다. 따라서 분산전원 연결에 따라 계통의 임피던스 행렬이 변하게 되고 취약지역이 달라진다. 그림 10은 모의 계통에 대해서 발전기 운전 조건에 따른 취약지역의 변화를 보여주고 있다[11].

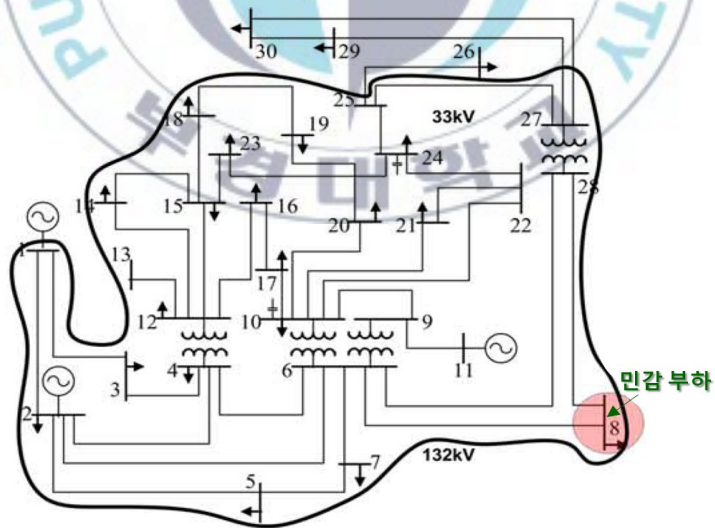


(a) Case 1

제 3장 분산전원과 순간전압강하 평가



(b) Case 2



(c) Case 3

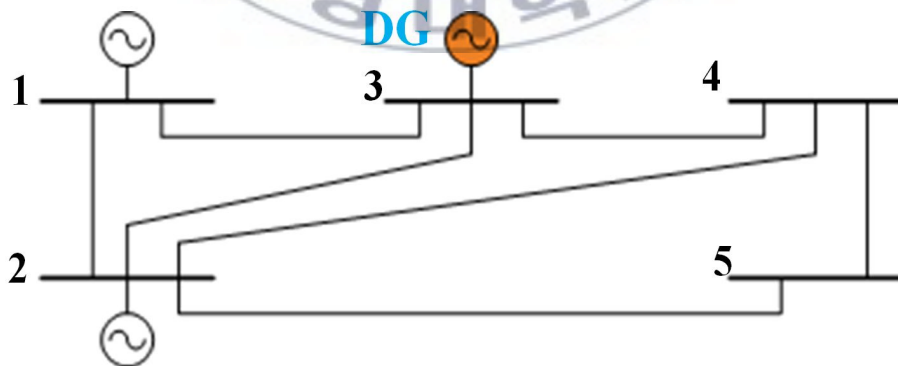
그림 10. 발전기 운전 조건에 따른 취약지역의 변화[11]

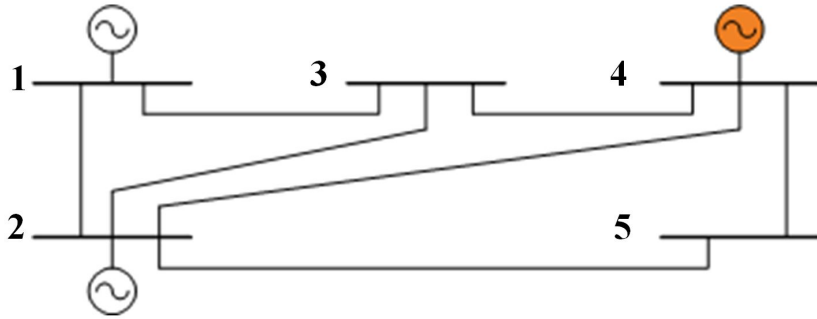
모의 계통은 총 6개의 발전기를 지니고 있으며 8번 모선에 대해 발전기 운전조건을 달리하였다. 모의한 결과는 3상 사고에 대한 취약지역을 나타낸 것이다. 그림 10 (a)는 발전기 전부가 동작하고 있을 때의 취약지역이며 (b)는 3개가 동작하지 않을 때의 취약지역을 보여주고 있다. 발전기 동작 여부에 따라 취약지역이 크게 변화함을 알 수 있다. 발전기 전압 조정과 임피던스는 계통 모선 전압에 큰 영향을 끼친다. 다른 조건이 동일할 경우 분산전원에 가까운 민감 부하 수용가일수록 취약지역이 작다.

### 3.2 임피던스 행렬 구성법을 이용한 취약지역 계산

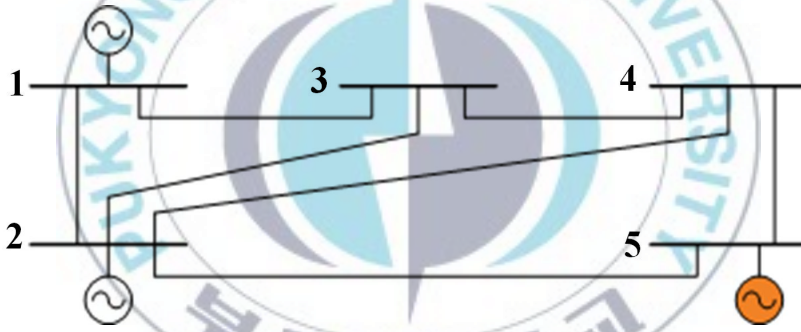
순간전압강하 평가시 분산전원 연결 효과를 반영하기 위해서는 계통의 임피던스 요소가 수정되어야 한다. 기존의 평가 방법에 의하면 분산전원의 연결로 변경된 계통의 어드미턴스 행렬을 먼저 계산하고 이에 대한 역행렬 계산을 통해 평가시 필요한 임피던스 요소값들을 얻게 된다. 이러한 절차는 대규모 계통의 경우 어드미턴스 행렬의 구성과 역행렬 연산에 매우 큰 계산 부담이 생기기 때문에 효과적이지 못한 단점이 있다. 역행렬의 연산에는 다양한 방법이 있으나 대규모 계통의 경우 LU분해법 등을 이용한다. LU분해법을 이용하더라도 대규모 계통의 경우 상당한 계산 부담이 발생하게 된다. 따라서 본 논문은 임피던스 행렬 구성법을 적용하여 기존 방법의 단점을 개선하였다. 역행렬 연산 없이 임피던스 행렬 구성법을 적용하여 분산전

원 연결에 따른 임피던스 행렬의 변화 요소만을 직접적으로 계산할 수 있다. 임피던스 행렬 구성법에는 일반적으로 4가지의 규칙이 존재한다. 그 규칙 중 기준노드와 이미 존재하는 노드사이 에 새로운 임피던스가 연결될 때의 임피던스 행렬 요소 계산법(Addition a branch with impedance between existing node and the reference node)을 적용하였다[12].





(c) 4번 모선에 분산전원 연결 (case 3)



(d) 5번 모선에 분산전원 연결 (case 4)

그림 11. 5모선 계통 예 (케이스별 분산전원 연결)

그림 11은 임피던스 행렬 구성법을 이용한 취약지역 계산 방법을 설명하기 위한 임의의 5모선 계통도이다. 그림 14 (a)는 분산전원의 연결전의 케이스이며 분산전원 연결에 따른 취약지역 변화의 비교 기준이 된다. 발전기의 내부 임피던스는  $j0.3[\text{p.u.}]$ 으로 가정하였으며 민감 부하모선은 모선 4로 결정하였다. 표 1은 분산전원 연결전 모의 계통의 임피던스 행렬을 나타낸 것이다.

표 1. 5모선 계통의 임피던스 행렬

모 선 번호	1	2	3	4	5
1	0.0012 + j0.0220	-0.0012 + j0.0080	-0.0006 + j0.0115	-0.0007 + j0.0108	-0.0010 + j0.0089
2	-0.0012 + j0.0080	0.0012 + j0.0220	0.0006 + j0.0185	0.0007 + j0.0192	0.0010 + j0.0211
3	-0.0006 + j0.0115	0.0006 + j0.0185	0.0206 + j0.0777	0.0166 + j0.0659	0.0059 + j0.0343
4	-0.0007 + j0.0108	0.0007 + j0.0192	0.0166 + j0.0659	0.0214 + j0.0805	0.0076 + j0.0396
5	-0.0010 + j0.0089	0.0010 + j0.0211	0.0059 + j0.0343	0.0076 + j0.0396	0.0299 + j0.1073

분산전원 연결로 인해 임피던스 행렬의 대각 요소들과 민감 부하모선과 나머지 모선들과의 전달 임피던스 요소들이 변하게 된다. 임의의 모선  $d$ 에 분산전원이 연결되었을 때 임피던스 행렬의 대각요소들과 전달 임피던스 요소들을 식 (26)~(28)을 통해 역행렬의 연산 없이 바로 계산할 수 있다.

$$Z_{driving}^{new} = \begin{bmatrix} Z_{11} \\ Z_{22} \\ \vdots \\ Z_{mm} \\ \vdots \\ Z_{nn} \end{bmatrix}^{old} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} Z_{1d} Z_{d1} \\ Z_{2d} Z_{d2} \\ \vdots \\ Z_{md} Z_{dm} \\ \vdots \\ Z_{nd} Z_{dn} \end{bmatrix}^{old} \quad (26)$$

$$Z_{transfer}^{new} = \begin{bmatrix} Z_{1m} \\ Z_{2m} \\ \vdots \\ Z_{mm} \\ \vdots \\ Z_{nm} \end{bmatrix}^{old} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} Z_{1d} Z_{dm}^{old} \\ Z_{2d} Z_{dm}^{old} \\ \vdots \\ Z_{md} Z_{dm}^{old} \\ \vdots \\ Z_{nd} Z_{dm}^{old} \end{bmatrix}^{old} \quad (27)$$

$$Z_{ll} = z_g + Z_{dd} \quad (28)$$

여기서,  $z_g$  는 분산전원의 내부 임피던스,  $d$ 는 분산전원이 연결되는 모선,  $m$  은 민감 부하모선을 나타낸다.

그림 14 (b)와 같이 3번 모선에 분산전원이 연결되었을 때의 테브닌 등가 임피던스와 전달 임피던스는 다음과 같이 계산된다. 계산된 임피던스 요소를 이용하여 취약지역을 빠르게 찾을 수 있다. 역행렬의 연산없이 취약지역의 계산이 가능해 대규모 계통에 효과적으로 적용가능하다.

$$Z_{driving}^{new(case2)} = \begin{bmatrix} Z_{11} \\ Z_{22} \\ Z_{33} \\ Z_{44} \\ Z_{55} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} Z_{13} Z_{31} \\ Z_{23} Z_{32} \\ Z_{33} Z_{33} \\ Z_{43} Z_{34} \\ Z_{53} Z_{35} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.0012 + j0.0220 \\ 0.0012 + j0.0220 \\ 0.0206 + j0.0777 \\ 0.0214 + j0.0805 \\ 0.0299 + j0.1073 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} -0.0004 - j0.0001 \\ -0.0004 - j0.0001 \\ -0.0207 + j0.0084 \\ -0.0149 + j0.0056 \\ -0.0041 + j0.0009 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0016 + j0.0209 \\ 0.0016 + j0.0190 \\ 0.0015 + j0.0219 \\ 0.0088 + j0.0404 \\ 0.0282 + j0.0964 \end{bmatrix}$$



$$Z_{transfer}^{new(case2)} = \begin{bmatrix} Z_{14} \\ Z_{24} \\ Z_{34} \\ Z_{44} \\ Z_{54} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} Z_{13}Z_{33} \\ Z_{23}Z_{33} \\ Z_{33}Z_{33} \\ Z_{43}Z_{33} \\ Z_{53}Z_{33} \end{bmatrix}$$

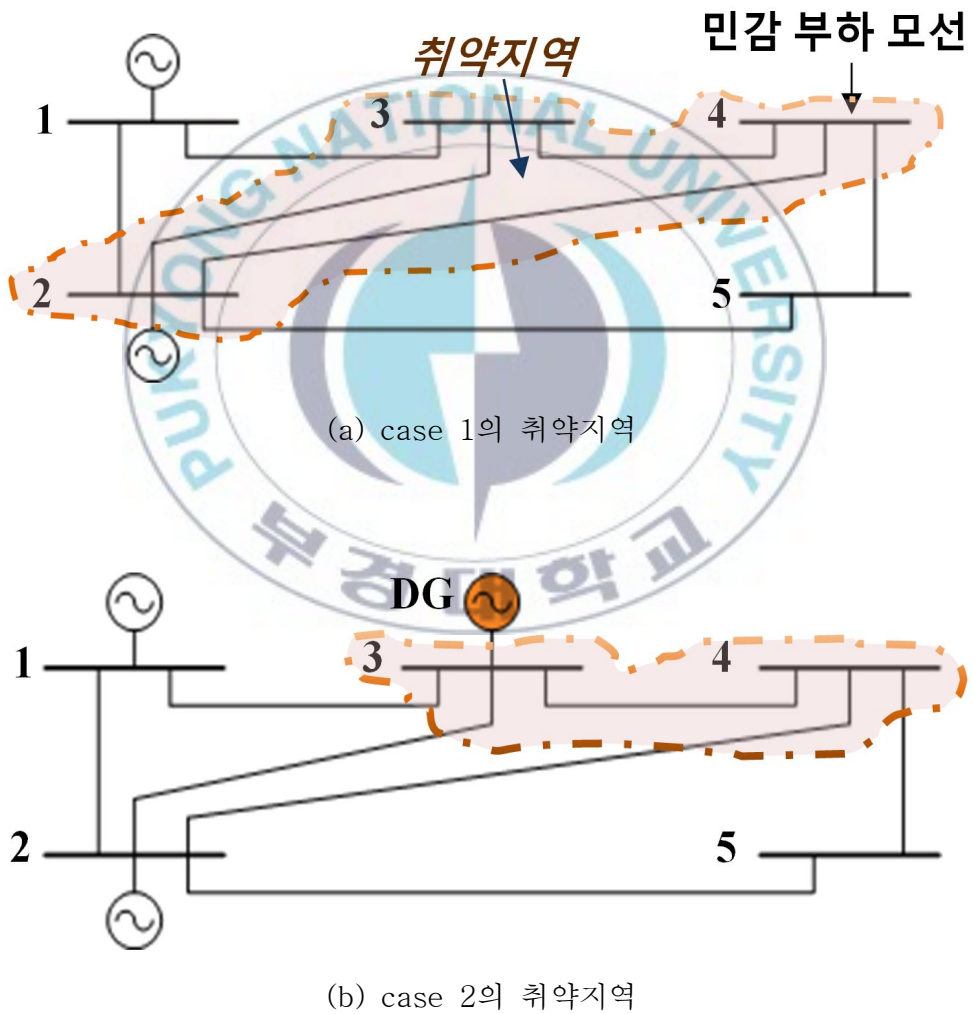
$$= \begin{bmatrix} -0.0007 + j0.0108 \\ 0.0007 + j0.0192 \\ 0.0166 + j0.0659 \\ 0.0214 + j0.0805 \\ 0.0076 + j0.0396 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} -0.0027 + j0.0002 \\ -0.0043 + j0.0006 \\ -0.0175 + j0.0068 \\ -0.0149 + j0.0056 \\ -0.0078 + j0.0023 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0008 + j0.0037 \\ -0.0003 + j0.0078 \\ 0.0011 + j0.0186 \\ 0.0088 + j0.0404 \\ 0.0027 + j0.0187 \end{bmatrix}$$

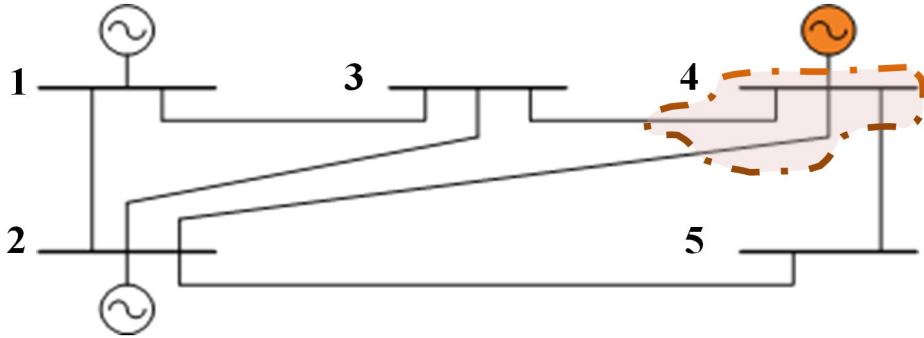
$$Z_{ll} = 0.0206 + j0.3777$$

표 2. 케이스별 대각& 비 대각 임피던스 요소

모선 번호	case 2		case 3		case 4	
	$Z_{KK}$	$Z_{4K}$	$Z_{KK}$	$Z_{4K}$	$Z_{KK}$	$Z_{4K}$
1	0.0016 + j0.0209	-0.0008 + j0.0037	0.0015 + j0.0211	-0.0007 + j0.0028	0.0015 + j0.0215	-0.0004 + j0.0083
2	-0.0016 + j0.0190	-0.0003 + j0.0078	0.0016 + j0.0188	-0.0008 + j0.0051	0.0016 + j0.0189	0.0006 + j0.0131
3	-0.0015 + j0.0219	0.0011 + j0.0186	0.0084 + j0.0386	0.0010 + j0.0181	0.0195 + j0.0692	0.0152 + j0.0560
4	0.0088 + j0.0404	0.0088 + j0.0404	0.0015 + j0.0222	0.0015 + j0.0222	0.0195 + j0.0691	0.0195 + j0.0691
5	-0.0282 + j0.0964	0.0027 + j0.0187	0.0272 + j0.0931	-0.0000 + j0.0108	0.0014 + j0.0237	-0.0002 + j0.0086

표 2는 임피던스 행렬 구성법을 적용하여 각 케이스별 대각요소들과 전달 임피던스 요소들을 나타내었다. 모든 모선의 전압을 1.0 [p.u.]로 가정한 뒤 취약지역을 계산하면 그림 12와 같이 도시화할 수 있다.





(c) case 3의 취약지역



(d) case 4의 취약지역

그림 12. 4번 모선에서 케이스별 취약지역

그림 12 (a)~(d)는 각 케이스별 4모선에서의 취약지역을 나타낸다. 분산전원에 대해 취약지역 감소량을 비교 분석하기 위해 그림 12 (a)가 기준이 된다. 취약지역을 감소시키기 위해 가장 효과적인 순서로 case 3, case 2, case 1이 된다. 민감 부하모선에 가까울수록 취약지역의 크기가 줄어드는 것을 알 수 있으며 이는 발전기 내부 임피던스 요소가 변경되었기 때문이다. 따라서 임피던스 행렬 구성법을 통해 효과적으로 케이스별 취약지역 계산을 수행할 수 있다.

## 제 4 장 사례 연구

### 4.1 모의계통 구성

그림 13과 같은 IEEE-30 모선 계통에 대해 임피던스 행렬 구성법을 적용하여 취약지역 계산을 수행하였다. 모의 계통은 1, 2, 5, 8, 11, 13번 모선에 6개의 발전기가 연결되어 있으며 4개의 변압기와 37개의 선로로 구성되어 있다. 모든 변압기의 결선은 접지된 Y로 가정하였고 발전기의 정상 임피던스는  $j0.3[\text{p.u.}]$ 로 가정하였다.

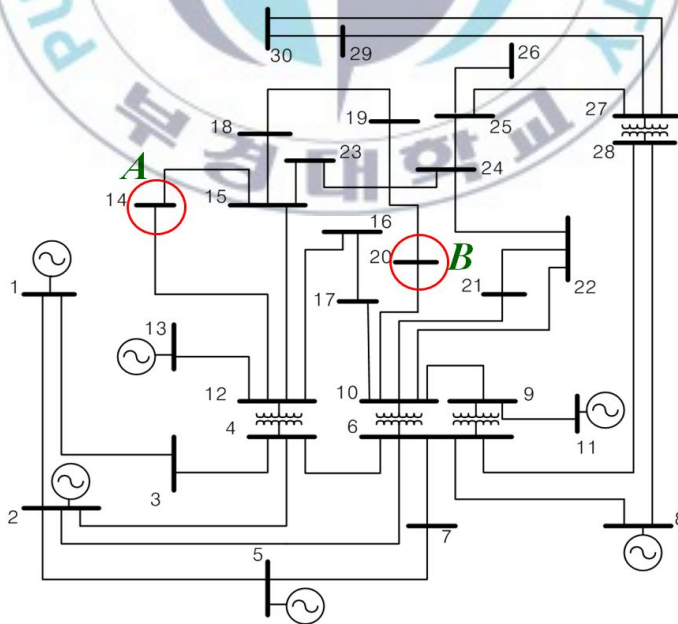


그림 13. IEEE-30 모선 계통 단선도

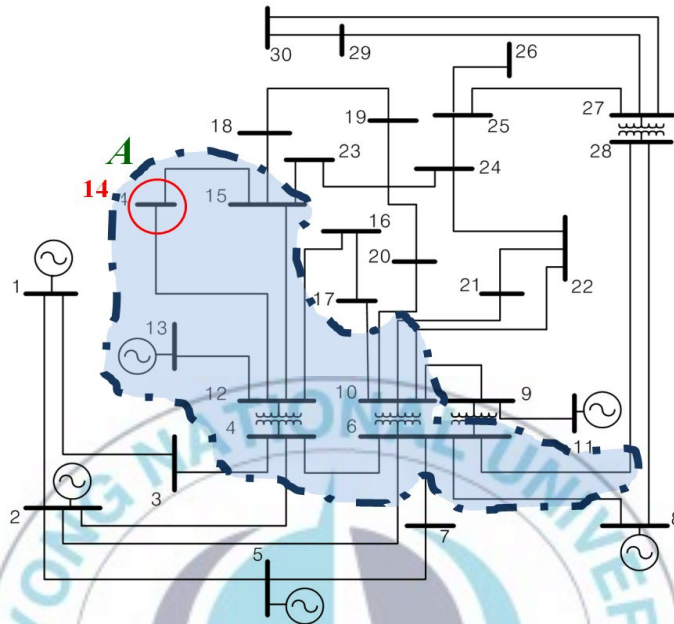
표 3. 분산전원 연결전 모의 계통의 임피던스 요소

모 선 번호	임피던스 요소 [p.u.]		
	$Z_{KK}$	$Z_{K14}$	$Z_{K20}$
1	$0.0087 + j0.0960$	$-0.0017 + j0.0381$	$-0.0017 + j0.0394$
2	$0.0057 + j0.0828$	$-0.0015 + j0.0397$	$-0.0012 + j0.0416$
3	$0.0155 + j0.1126$	$0.0029 + j0.0547$	$0.0022 + j0.0550$
4	$0.0087 + j0.0922$	$0.0043 + j0.0585$	$0.0034 + j0.0586$
5	$0.0123 + j0.1140$	$-0.0029 + j0.0348$	$-0.0021 + j0.0377$
6	$0.0064 + j0.0826$	$0.0017 + j0.0536$	$0.0041 + j0.0593$
7	$0.0197 + j0.1207$	$0.0001 + j0.0459$	$0.0019 + j0.0504$
8	$0.0093 + j0.0982$	$-0.0000 + j0.0483$	$0.0020 + j0.0535$
9	$0.0073 + j0.1450$	$-0.0021 + j0.0698$	$0.0073 + j0.0991$
10	$0.0152 + j0.1617$	$-0.0046 + j0.0934$	$0.0105 + j0.1415$
11	$0.0025 + j0.1734$	$-0.0013 + j0.0412$	$0.0043 + j0.0585$
12	$0.0113 + j0.1526$	$0.0107 + j0.1437$	$-0.0019 + j0.1018$
13	$0.0052 + j0.1664$	$0.0073 + j0.0980$	$-0.0013 + j0.0694$
14	$0.1002 + j0.2776$	$0.1002 + j0.2776$	$0.0026 + j0.1197$
15	$0.0461 + j0.2034$	$0.0191 + j0.1724$	$0.0141 + j0.1354$
16	$0.0500 + j0.2374$	$0.0023 + j0.1225$	$0.0049 + j0.1185$
17	$0.0355 + j0.2085$	$-0.0018 + j0.1023$	$0.0083 + j0.1345$
18	$0.0895 + j0.2939$	$0.0105 + j0.1447$	$0.0465 + j0.2107$
19	$0.0865 + j0.2943$	$0.0054 + j0.1283$	$0.0658 + j0.2552$
20	$0.0761 + j0.2787$	$0.0026 + j0.1197$	$0.0761 + j0.2787$
21	$0.0363 + j0.1991$	$-0.0036 + j0.0965$	$0.0104 + j0.1390$
22	$0.0381 + j0.2003$	$-0.0032 + j0.0975$	$0.0103 + j0.1382$
23	$0.0927 + j0.2894$	$0.0121 + j0.1458$	$0.0116 + j0.1320$
24	$0.0778 + j0.2549$	$0.0028 + j0.1103$	$0.0083 + j0.1274$
25	$0.1108 + j0.3740$	$-0.0023 + j0.0895$	$0.0012 + j0.1027$
26	$0.3652 + j0.7540$	$-0.0023 + j0.0895$	$0.0012 + j0.1027$
27	$0.0599 + j0.3626$	$-0.0049 + j0.0765$	$-0.0026 + j0.0872$
28	$0.0184 + j0.1229$	$0.0013 + j0.0551$	$0.0038 + j0.0612$
29	$0.2178 + j0.6607$	$-0.0049 + j0.0765$	$-0.0026 + j0.0872$
30	$0.2487 + j0.7185$	$-0.0049 + j0.0765$	$-0.0026 + j0.0872$

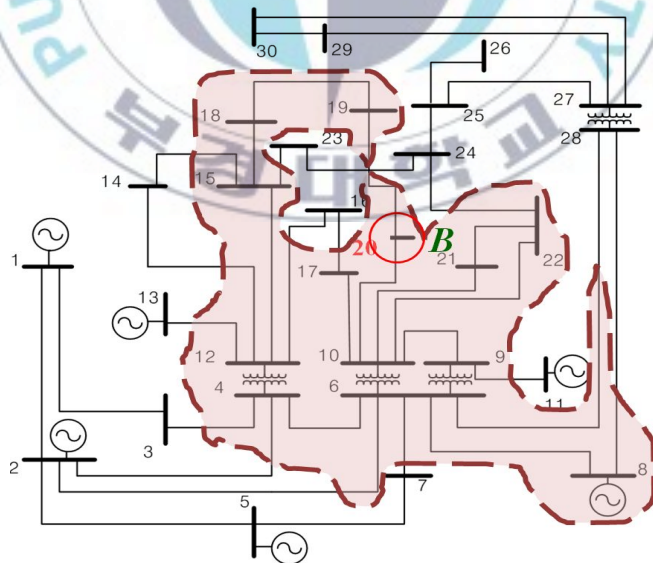
모선 14(A)와 20 (B)을 민감 부하 모선으로 결정하였으며 한계전압 0.5[p.u.]에 대해 취약지역을 계산하였다. 취약지역의 길이를 계산하기 위한 각 선로의 길이는 참고문헌[8]에 제시되어 있다. 계통의 총 선로 길이는 1,493.8[km]이다. 표 3은 민감 부하 A와 B의 취약지역 계산을 위한 분산전원 연결전 임피던스 요소이다. 보다 자세한 계통 데이터는 참고문헌 [8]와 [13]에 소개되어 있다. 분산전원 연결에 따른 순간전압강하 취약지역의 영향을 분석하기 위해 분산전원 연결이 없는 베이스 케이스에서의 취약지역을 먼저 계산하였다. 또한 분산전원이 연결되었을 경우의 취약지역 변화를 분석하기 위해 제안한 임피던스 행렬 구성법을 적용하여 취약지역 계산을 수행하였다.

## 4.2 시뮬레이션 및 고찰

그림 14 (a)와 (b)는 분산전원 연결이 없는 베이스 케이스에서의 3상 평형 사고에 대한 민감 부하 모선 A와 B의 취약지역 결과이다. 제시된 선로의 길이를 기준으로 할 때 민감 부하 A에 대한 취약지역에 포함된 선로의 길이는 448.74[km]이고, 민감 부하 B에 대한 취약지역에 포함된 선로의 길이는 588.75[km]로 계산되었다. 이 취약지역의 길이는 해당 모선이 순간전압강하로 인한 피해를 받을 확률이 얼마나 큰지를 가늠해 볼 수 있는 기준이 된다. 즉 계통에서의 사고 발생 확률이 동일하다고 가정할 때 취약지역이 넓을수록 순간전압강하 발생 확률이 크다는 의미이다.



(a) 민감 부하 모션 A의 취약지역



(b) 민감 부하 모션 B의 취약지역

그림 14. 3상 사고에 대한 민감 부하 모션 A와 B의 취약지역

본 논문에서 제안된 방법을 이용하여 다양한 위치에 분산전원이 연결되었을 때 취약지역의 변화를 계산해 보고 순간전압강하 저감 효과를 분석해보았다. 기존의 발전기 모선을 제외한 모든 모선들에 분산전원을 연결하여 모의를 수행하였다. 다음의 계산식은 임피던스 행렬 구성법을 적용한 방법에 따른 15번 모선에 분산전원을 연결하였을 때의 임피던스 행렬 요소의 계산과정을 보여주고 있다. 민감 부하 모선 A에 대한 임피던스 행렬요소 계산과정이다. 민감 부하모선 A와 B에 대해 테브닌 등가 임피던스는 공통 요소로 사용되므로 한번만 계산하면 된다.

$$\begin{aligned}
 Z_{driving}^{new}(15DG) &= \begin{bmatrix} Z_{11} \\ \vdots \\ Z_{1515} \\ \vdots \\ Z_{3030} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} Z_{115} & Z_{151} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{1515} & Z_{1515} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{3015} & Z_{1530} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0.0087 + j0.0960 \\ \vdots \\ 0.0461 + j0.2034 \\ \vdots \\ 0.2487 + j0.7185 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} -0.0016 - j0.0002 \\ \vdots \\ -0.0417 + j0.0197 \\ \vdots \\ -0.0075 - j0.0003 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0.0093 + j0.0931 \\ \vdots \\ 0.0162 + j0.1227 \\ \vdots \\ 0.2505 + j0.7046 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$Z_u = 0.0461 + j0.5334$$



$$\begin{aligned}
 Z_{transfer(15DG)}^{new} &= \begin{bmatrix} Z_{114} \\ \vdots \\ Z_{1514} \\ \vdots \\ Z_{3014} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} Z_{115} Z_{1414} \\ \vdots \\ Z_{1515} Z_{1414} \\ \vdots \\ Z_{3015} Z_{1414} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -0.0017 + j0.0381 \\ \vdots \\ 0.0191 + j0.1724 \\ \vdots \\ -0.0049 + j0.0765 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} -0.0071 + j0.0004 \\ \vdots \\ -0.0363 + j0.0123 \\ \vdots \\ -0.0154 + j0.0013 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -0.0014 + j0.0249 \\ \vdots \\ 0.0020 + j0.1029 \\ \vdots \\ -0.0049 + j0.0477 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

민감 부하 B의 임피던스행렬 요소도 아래와 같이 바로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Z_{transfer(15DG)}^{new} &= \begin{bmatrix} Z_{120} \\ \vdots \\ Z_{1520} \\ \vdots \\ Z_{3020} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} Z_{115} Z_{2020} \\ \vdots \\ Z_{1515} Z_{2020} \\ \vdots \\ Z_{3015} Z_{2020} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -0.0017 + j0.0394 \\ \vdots \\ 0.0141 + j0.1354 \\ \vdots \\ -0.0026 + j0.0872 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} -0.0056 + j0.0003 \\ \vdots \\ -0.0285 + j0.0095 \\ \vdots \\ -0.0121 + j0.0004 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -0.0014 + j0.0290 \\ \vdots \\ 0.0010 + j0.0808 \\ \vdots \\ -0.0024 + j0.0646 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

표 4. 15번 모선에 분산전원을 연결하였을 때의 임피던스행렬 요소

모 선 번호	임피던스 요소 [p.u.]		
	$Z_{KK}$	$Z_{K14}$	$Z_{K20}$
1	0.0093+ j0.0931	-0.0014+ j0.0249	-0.0014+ j0.0290
2	0.0062+ j0.0796	-0.0013+ j0.0259	-0.0010+ j0.0308
3	0.0155+ j0.1066	0.0016+ j0.0359	0.0012+ j0.0402
4	0.0084+ j0.0854	0.0025+ j0.0384	0.0020+ j0.0428
5	0.0128+ j0.1116	-0.0022+ j0.0226	-0.0016+ j0.0281
6	0.0064+ j0.076i	0.0004+ j0.0348	0.0033+ j0.0445
7	0.0200+ j0.1164	-0.0005+ j0.0298	0.0016+ j0.0377
8	0.0096+ j0.0933	-0.0006+ j0.0313	0.0017+ j0.0401
9	0.0081+ j0.1340	-0.0028+ j0.0442	0.0069+ j0.0790
10	0.0172+ j0.1415	-0.0051+ j0.0587	0.0103+ j0.1143
11	0.0028+ j0.1696	-0.0016+ j0.0261	0.0041+ j0.0466
12	0.0111+ j0.1163	0.0075+ j0.0973	-0.0041+ j0.0654
13	0.0052+ j0.1495	0.0051+ j0.0664	-0.0028+ j0.0446
14	0.0925+ j0.2186	0.0925+ j0.2186	-0.0031+ j0.0734
15	0.0162+ j0.1227	0.0020+ j0.1029	0.0010+ j0.0808
16	0.0515+ j0.2085	0.0007+ j0.0811	0.0039+ j0.0860
17	0.0372+ j0.1858	-0.0028+ j0.0656	0.0077+ j0.1056
18	0.0750+ j0.2385	-0.0007+ j0.0874	0.0381+ j0.1656
19	0.0791+ j0.2517	-0.0023+ j0.0782	0.0601+ j0.2158
20	0.0719+ j0.2423	-0.0031+ j0.0734	0.0719+ j0.2423
21	0.0376+ j0.1771	-0.0048+ j0.0604	0.0096+ j0.1106
22	0.0392+ j0.1777	-0.0047+ j0.0609	0.0094+ j0.1094
23	0.0764+ j0.2330	0.0000+ j0.0879	0.0025+ j0.0865
24	0.0741+ j0.2245	-0.0025+ j0.0679	0.0044+ j0.0941
25	0.1111+ j0.3544	-0.0042+ j0.0554	-0.0001+ j0.0760
26	0.3655+ j0.7344	-0.0042+ j0.0554	-0.0001+ j0.0760
27	0.0617+ j0.3487	-0.0049+ j0.0477	-0.0024+ j0.0646
28	0.0184+ j0.1165	0.0001+ j0.0356	0.0030+ j0.0459
29	0.2196+ j0.6468	-0.0049+ j0.0477	-0.0024+ j0.0646
30	0.2505+ j0.7046	-0.0049+ j0.0477	-0.0024+ j0.0646

표 4는 15번 모선에 분산전원을 연결하였을 때의 임피던스행렬 요소를 나타내었다. 계산된 임피던스 행렬을 이용해 취약지역을 계산한 결과 부하모선 A에 대한 취약지역의 전체 길이는 80.13[km]로 계산되었으며 B에 대한 취약지역의 길이는 302.27[km]로 계산되었다. 분산전원과 가까운 A에 대한 취약지역이 크게 감소하였으며 B에 대한 취약지역도 어느 정도 감소하였다. 분산전원 위치에 따른 순간전압강하 저감 효과를 확인할 수 있다.

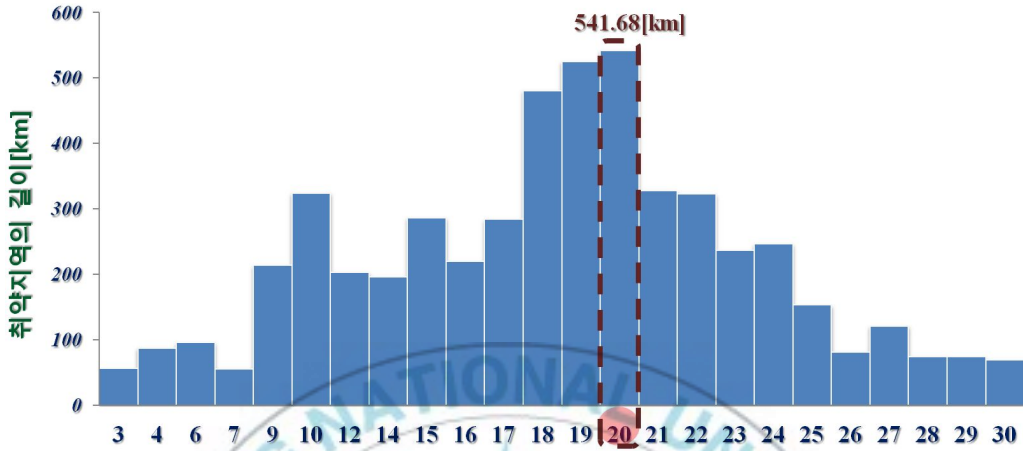
표 5. 분산전원 연결에 따른 민감 부하모선 A와 B의 취약지역 길이

분산전원 위치	취약지역 [km]	
	모선 A	모선 B
3	376.95	532.85
4	345.49	501.53
6	366.10	493.30
7	396.29	533.17
9	323.06	375.46
10	261.42	264.60
12	84.44	385.46
14	42.42	393.03
15	80.13	302.27
16	218.78	369.52
17	250.84	305.03
18	167.37	108.13
19	222.26	63.81
20	233.06	47.07
21	264.94	261.33
22	261.62	266.28
23	138.38	352.55
24	240.38	342.38
25	316.64	435.85
26	370.72	507.23
27	341.17	467.85
29	373.62	514.88
29	379.03	515.12
30	383.46	519.71

기타 나머지 모선들에 대해서도 분산전원을 연결하고 임피던스 행렬 구성법을 적용한 방법으로 모의를 수행하였다. 표 5는 기존의 발전기 모선을 제외한 나머지 모선에 분산전원이 추가 되었을 때의 취약지역 계산 결과를 보여주고 있다. 민감 부하모선과 가까운 곳에 분산전원을 설치할수록 취약지역의 크기가 크게 줄어드는 것을 알 수 있다. 즉 민감 부하모선에 바로 분산전원을 연결할 경우 해당 모선에 대한 저감효과가 가장 크다. 그러나 다수의 민감 부하 모선을 고려한 최적의 분산전원 설치 위치를 찾기 위해서는 전체 모선에 대한 취약지역 감소율을 기준으로 판단하는 것이 바람직하다. 그림 15는 분산전원 위치에 따른 민감 부하 모선 A와 B의 취약지역 길이 감소량을 나타내었다. 그림 15 (a)와 (b)는 각 분산전원 연결 위치에 따른 취약지역의 감소량을 보여주고 있다. 그림 15 (c)는 두 민감 부하 모선에 대한 취약지역 감소량의 합을 보여주고 있다.

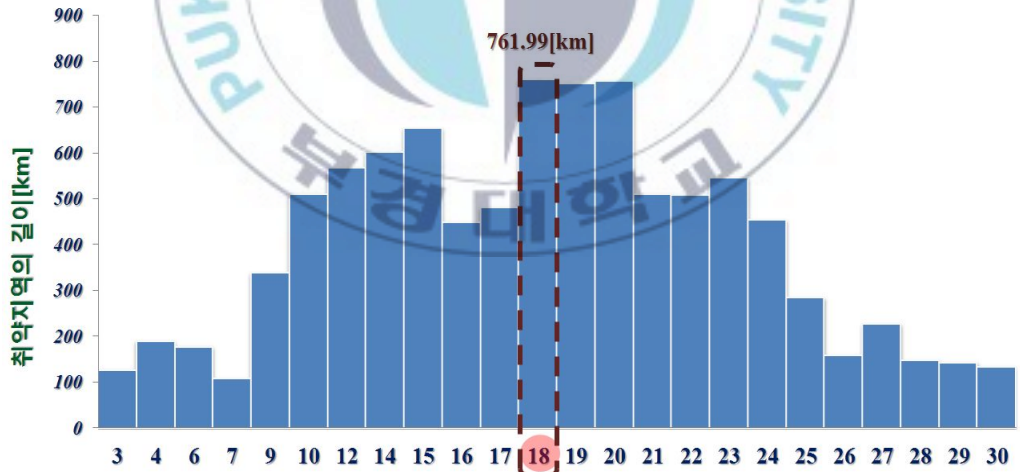


(a) 분산전원 위치에 따른 모선 A의 취약지역 감소량



분산전원이 연결되는 각각의 모선

(b) 분산전원 위치에 따른 모선 B의 취약지역 감소량



분산전원이 연결되는 각각의 모선

(c) 모선 A와 B의 취약지역 감소량 합

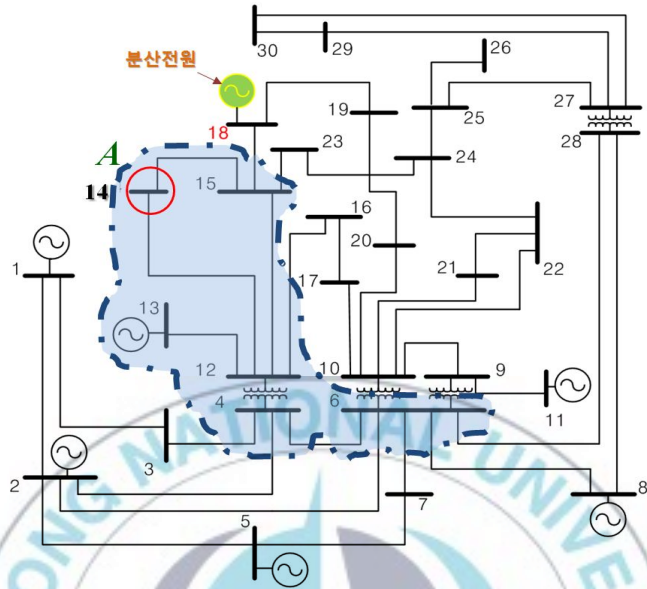
그림 15. 분산전원 위치에 따른 민감 부하 모선 A와 B의 취약지역 길이 감소량

계산결과에 따르면 분산전원을 18번 모선에 연결할 경우 두 민감 부하모선에 대한 취약지역이 가장 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 18번 모선에 분산전원을 연결할 경우 부하 모선 A와 B에 대한 순간전압강하 저감 효과가 가장 크다는 것이다. 분산전원 위치 선정에는 다양한 제약조건이 있겠으나 순간전압강하 취약지역만을 고려했을 때는 18번 모선이 최적 위치가 되겠다.

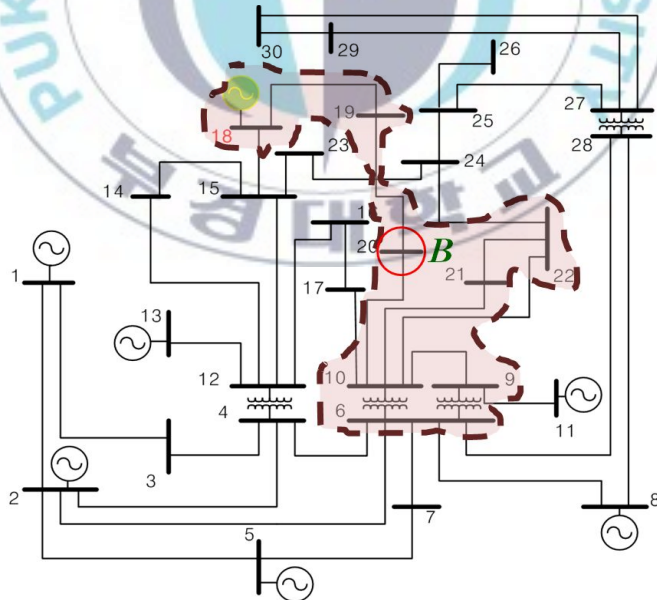
표 6. 분산전원 연결 전과 후의 취약지역 길이

	취약지역 (Area of Vulnerability)[km]	
	분산전원 연결 전	18번 모선에 분산전원 연결 후
모 선 A	448.74	167.37
모 선 B	588.75	108.13

표 6은 분산전원 연결전 취약지역의 전체 길이와 분산전원을 18번 모선에 연결하였을 때의 취약지역 계산 결과를 나타내고 있다. 분산전원의 연결에 따라 민감 부하모선 A와 B의 취약지역 감소율은 각각 62.7[%], 81.63[%]이다. 18번 모선에 분산전원을 연결 하였을 때의 취약지역을 그림 16에 도시하였다. 분산전원의 연결전의 결과인 그림 14와 비교하여 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다.



(a) 민감 부하 모선 A의 취약지역



(b) 민감 부하 모선 B의 취약지역

그림 16. 18번 모선에 분산전원이 연결되었을 때의 취약지역

## 제 5 장 결 론

분산전원 설치로 인한 순간전압강하 저감 효과 분석이나 순간전압강하를 고려한 분산전원 최적 위치 선정 등을 위해서는 순간전압강하 평가가 필요하다. 본 논문에서는 순간전압강하 평가를 통해 분산전원 연결에 따른 취약지역의 변화를 효과적으로 분석할 수 있는 방법을 소개하였다. 순간전압강하 평가를 위한 취약지역 계산을 위해서는 기본적으로 계통의 임피던스 행렬 요소를 알아야 한다. 기존의 취약지역 계산 방법에 의하면 먼저 분산전원 연결에 따른 계통 어드미턴스 행렬을 구성하고 이의 역행렬 계산을 통해 임피던스 행렬 요소를 얻게 된다. 분산전원의 위치선정을 위해 각 모선에 분산전원을 연결하여 모의할 때마다 새로운 어드미턴스 행렬의 계산과 역행렬 연산을 반복해야 하기 때문에 많은 계산량이 요구된다. 즉 대규모 계통에 대해 여러 위치에서의 분산전원 연결 효과를 분석하기 위해서는 매우 큰 계산 부담이 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 임피던스 행렬 구성법을 이용하여 역행렬 연산 없이 직접적으로 임피던스 행렬 요소를 계산할 수 있는 방법을 제안하였다. 임피던스 행렬의 테브닌 등가 임피던스와 전달 임피던스 요소만을 바로 계산할 수 있어 빠른 취약지역 계산이 가능하다. 본 논문에서 제안된 방법을 기반으로 대규모 계통에서의 순간전압강하 평가를 고려한 분산전원 최적 설치 위치 선정등에 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.



## 참 고 문 헌

- [1] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, Piscataway, NJ, 2000, IEEE Power Engineering Series.
- [2] Jovica V. Milanovic, C. P. Gupta., "Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags–Part I: The Methodology," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 21, no. 2, pp.918–924, Apr. 2006.
- [3] Jovica V. Milanovic, C. P. Gupta., "Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags–Part II : Practical Implementation," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 21, no. 2, pp.925–932, Apr. 2006.
- [4] Zhang, L., Bollen, Math H. J., "Characteristic of Voltage Dips(Sags) in Power Systems," IEEE Trans. Power Delivery, vol.15, pp.827–832, Apr. 2000.
- [5] Arrillaga, J., Watson, N. R., Chen, S. "Power System Quality Assessment", New York: John Wiley & Sons, pp. 1–32. 2000.
- [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] IEEE 1159, Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 1995.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty., *Electrical power systems quality*. McGraw–Hill, 2003.

[11] 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.

[12] H. Saadat, *Power System Analysis*, 2nd ed., Singapore: McGraw–Hill, 2004, pp. 369–382.

[13] IEEE 30–bus Test Case, [Online]. Available: [http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30bus.htm](http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm)

## 감사의 글

2년이라는 석사과정을 마치고 졸업을 앞두고 많은 생각들을 하였습니다. 처음에는 실수도 많이 하였고 졸업할 수 있을까라는 생각도 하였습니다. 최고의 연구실 분위기와 꼼꼼하게 지도해주신 박창현 교수님과 후배 송영원에게 감사드립니다. 많은 것을 보고 경험하고 연구를 할 수 있어서 정말 뜻 깊었습니다. 또한 논문을 심사해 주신 장윤석 교수님, 이용욱 교수님께 감사드립니다. 이름이 같아서 저를 더 아껴주시고 챙겨주신 배종일 교수님께 감사드립니다.

또한 우리 패밀리 “최영선, 최영근, 예석진, 허지훈, 권경민, 김용주, 전찬영, 김정훈” 항상 정신적인 멘토가 되었기에 좋은 결실을 맺을 수 있었습니다.

마지막으로 나의 아내 김지현과 2012년에 태어날 우리 딸에게 이 작은 기쁨을 전하고 아직 못한 사위를 믿어주신 장인어른과 장모님께 감사의 인사를 드립니다. 하고 싶은 공부를 끝까지 하게 해주신 어머니, 아버지께 진심으로 감사드립니다. 언제나 형보다 더 듬직한 사랑하는 내 동생에게 감사의 인사를 전합니다. 무한하고 끝없는 시대에 나의 이 작은 업적은 점과도 같을 수도 있지만 동시대에 살아가는 저에게 고마운 분들과 함께할 수 있어 정말 감사드립니다.

2012년 12월

박 종 일 올림