

임피던스 행렬 구성법을 이용한 순간전압강하 취약지역의 계산

(Calculation of the Area of Vulnerability to Voltage Sags
by using Impedance Building Algorithm)

박종일* · 박창현**

(Jong-Il Park · Chang-Hyun Park)

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.

Key Words : Area of Vulnerability, Distributed Generation, Power Quality, Voltage Sags

1. 서 론

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 전력계통에

서의 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 수용가 측면에서의 대책으로 나눌 수 있다. 수용가 측면에서의 대책으로는 대표적으로 전압 보상설비의 설치를 들 수 있다. 공급자 측면에서는 기본적으로 사고저감을 위한 대책과 함께 민감 부하단에 대한 모션 분리나 계통 구성 변경과 같은 대책을 들 수 있다. 뿐만 아니라 민감 부하근처에 분산전원(Distributed Generation)을 설치하는 것도 순간전압

* 주저자 : 부경대학교 전기공학과 석사과정

** 교신저자 : 부경대학교 전기공학과 조교수

Tel : 051-629-6322, Fax : 051-629-6305

E-mail : spch@pknu.ac.kr

접수일자 : 2011년 10월 5일

1차심사 : 2011년 10월 7일, 2차심사 : 2011년 11월 28일

심사완료 : 2011년 12월 14일

강하 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. 순간전압강하 평가를 위해서는 취약지역의 계산이 필요하다. 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.

2. 분산전원과 순간전압강하 평가

사고로 기인하는 순간전압강하는 계통에서의 오랜 기간 동안의 사고 발생 데이터를 기반으로 확률 통계적으로 평가가 가능하다. 순간전압강하 평가 결과는 계통의 특정 수용가가 순간전압강하를 어느 정도 경험하게 될지 특정 수용가에 가장 효율적인 대책은 무엇인지 등의 해석을 위해 활용된다. 뿐만 아니라 순간전압강하로 인한 경제적 손실을 추산하거나 순간전압강하를 고려한 민감 부하 수용가의 신규입지 선정 등에도 활용할 수 있다. 임계거리(critical distance)법과 사고위치(fault position)법 등의 다양한 순간전압강하 평가 방법들이 소개되어 있으나 본 논문에서는 기존 방법의 단점을 개선한 참고문헌 [7]에 소개되어 있는

취약지역을 이용한 평가방법을 기반으로 하였다[1,8-9]. 취약지역이란 주어진 한계전압 이하의 전압강하를 야기하는 계통내 사고 위치들의 집합이라고 정의할 수 있다. 취약지역은 어떠한 계통 상태와 관련된 것은 아니며 주어진 한계전압에 따라 결정되어진다. 여기서 한계전압은 특정 부하의 전압민감도일 수도 있고 순간전압강하 정의에 따라 0.9[p.u.] 이하일 수도 있다. 그림 1은 특정 민감 부하모선에 대한 취약지역의 예이다[10]. 어두운 영역이 취약지역에 해당하며 이 영역에 포함된 선로나 모선에 사고가 발생하게 되면 민감 부하가 순간전압강하로 영향을 받게 됨을 나타낸다. 즉 해당 모선의 전압이 부하의 한계전압 이하가 됨을 나타낸다.

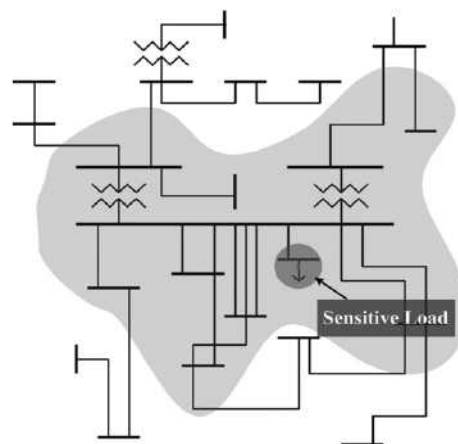


그림 1. 취약지역의 예
Fig. 1. An example of the area of vulnerability

2.1 취약지역의 계산

순간전압강하 평가에 있어 정확한 취약지역의 계산은 매우 중요하다. 취약지역의 계산은 계통에서의 사고위치를 변수로 두고 특정 사고전압을 야기하는 계통내 사고위치들을 모두 찾아 영역화하는 것이다. 계통내 K위치에서의 3상 사고로 인한 민감 부하모선 m의 사고전압 크기 계산식은 식 (1)과 같다.

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

V_m^{pref} 는 모선 m의 사고전 전압이며 V_K^{pref} 는 사고위치 K에서의 사고전 전압이다. Z_{mK} 는 모선 m과 사고위치 K사이의 전달 임피던스(transfer impedance)이며 Z_{KK} 는 사고위치 K에서 본 계통의 등가 임피던스(driving-point impedance)이다. 임의의 모선 F와 T사이의 선로상 K위치에 사고가 났을 때 사고전 전압 V_K^{pref} 및 임피던스 Z_{mK} 와 Z_{KK} 를 식 (2)~(4)와 같이 나타낼 수 있다[7-8,11]. 변수 p는 F-T선로상의 사고 위치를 나타내는 변수로 선로 길이에 대한 사고위치 K의 비율이며 0과 1사이의 값이다.

$$V_K^{pref} = V_F^{pref} + (V_T^{pref} - V_F^{pref})p \quad (2)$$

$$Z_{mK} = Z_{mF} + (Z_{mT} - Z_{mF})p \quad (3)$$

$$Z_{KK} = (Z_{FF} + Z_{TT} - 2Z_{TF} - Z_C) p^2 + \{Z_C - 2(Z_{FF} - Z_{FT})\} p + Z_{FF} \quad (4)$$

V_F^{pref} 및 V_T^{pref} 는 선로 양단 모선 F와 T에서의 사고전 전압을 나타낸다. Z_{mF} 및 Z_{mT} 는 모선 m과 모선 F, 모선 m과 모선 T 사이의 전달 임피던스이다. Z_{FF} 및 Z_{TT} 는 모선 F와 T에서 본 계통 임피던스이며 Z_{FT} 는 모선 F와 모선 T사이의 전달 임피던스이다. 상기 임피던스들은 계통의 임피던스 행렬(Z_{Bus})로부터 바로 찾을 수 있다. 따라서 식 (2)~(4)로 구성되는 식 (1)을 이용하여 주어진 전압 한계값을 야기하는 임의의 선로 F-T에서의 임계점(사고위치) p를 찾을 수 있다. 모든 선로에 대해 임계점을 찾아 영역화하면 전체 취약지역이 얻어지게 된다. 보다 상세한 계산방법은 참고 문헌 [7]에 기술되어 있다.

2.2 분산전원에 따른 취약지역의 영향

분산전원은 기존 전력회사의 대규모 전원과 달리 수용가 부하모선에 분산배치가 가능한 소형발전기를 말한다. 민감 부하 근처에 분산전원이 연결될 경우 순간전압강하 저감 효과를 얻을 수 있다. 순간전압강하에 대한 하나의 대책으로서 이미 알려져 있다. 그

림 2는 분산전원 유무에 따른 전압강하 변화를 보여주고 있다.

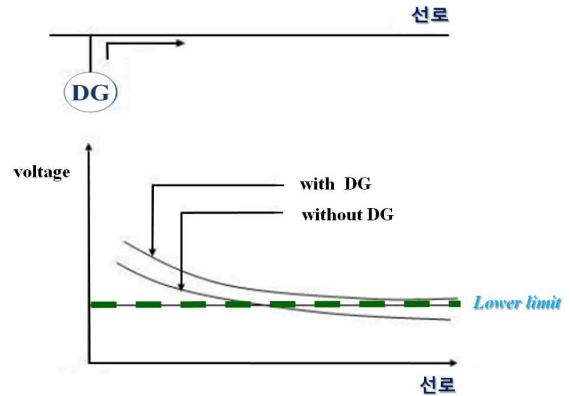


그림 2. 분산전원 유무에 따른 전압강하 변화
Fig. 2. Change of voltage sags with DG operation

계통내 특정 위치에 분산전원이 연결될 경우 저감효과가 어느 정도이며 여러 민감 수용가들을 고려할 때 최적의 설치 위치는 어디가 될 것인지 등의 분석이 필요하다. 즉 분산전원을 포함한 순간전압강하 평가가 이루어져야 한다. 분산전원의 유무 및 연결위치는 특정 민감 부하 모선에 대한 취약지역에 큰 영향을 준다. 해석 목적에 따라 분산전원은 다양한 형태로 모델링된다. 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. 다른 조건이 동일할 경우 분산전원에 가까운 수용가일수록 취약지역이 작다.

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

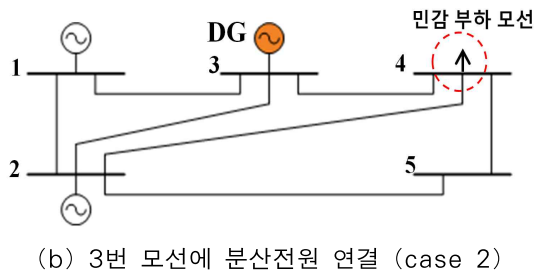
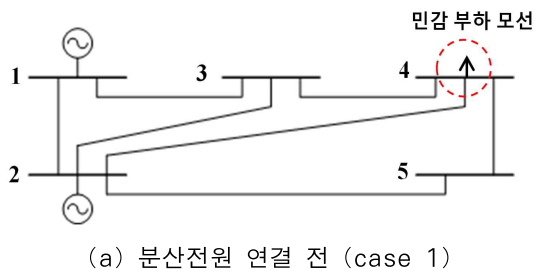


그림 3. 5모선 계통 예
Fig. 3. An example of 5-bus system

그림 3은 제안하는 방법을 설명하기 위한 임의의 5모선 계통도이다. 그림 3 (a)는 분산전원 연결전의 케이스이며 분산전원 연결에 따른 취약지역 변화의 비교 기준이 된다. 발전기의 내부 임피던스는 $j0.3$ [p.u.]으로 가정하였으며 민감 부하모선은 모선 4로 결정하였다. 표 1은 분산전원 연결전 계통의 임피던스 행렬이다.

표 1. 5모선 계통의 임피던스 행렬
Table 1. Impedance matrix of the 5-bus system

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 d에 분산전원이 연결되었을 때 임피던스 행렬의 대각요소들과 전달 임피던스 요소들을 식 (5)~(7)를 통해 역행렬의 연산 없이 바로 계산할 수 있다.

$$Z_{driving}^{new} = \begin{bmatrix} Z_{11} \\ Z_{22} \\ \vdots \\ Z_{mm} \\ \vdots \\ Z_{nn} \end{bmatrix}^{old} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} Z_{1d} & Z_{d1} \\ Z_{2d} & Z_{d2} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{md} & Z_{dm} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{nd} & Z_{dn} \end{bmatrix}^{old} \quad (5)$$

$$Z_{transfer}^{new} = \begin{bmatrix} Z_{1m} \\ Z_{2m} \\ \vdots \\ Z_{nm} \\ \vdots \\ Z_{nm} \end{bmatrix}^{old} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} Z_{1d} & Z_{dm}^{old} \\ Z_{2d} & Z_{dm}^{old} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{md} & Z_{dm}^{old} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{nd} & Z_{dm}^{old} \end{bmatrix}^{old} \quad (6)$$

$$Z_{ll} = z_g + Z_{dd} \quad (7)$$

여기서 $Z_{driving}^{new}$ 와 $Z_{transfer}^{new}$ 는 임의의 모선 d에 분산전원이 연결되었을 때의 테브닌 등가 임피던스와 전달 임피던스를 나타낸다. z_g 는 분산전원의 내부 임피던

스, d는 분산전원이 연결되는 모선, m은 민감 부하 모선을 나타낸다. 그림 3 (b)와 같이 3번 모선에 분산전원이 연결되었을 때의 테브닌 등가 임피던스와 전달 임피던스는 식 (8)~(10)과 같이 계산된다. 계산된 임피던스 요소를 이용하여 취약지역을 빠르게 찾을 수 있다.

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

$$= \begin{bmatrix} 0.0012 + j0.0220 \\ 0.0012 + j0.0220 \\ 0.0206 + j0.0777 \\ 0.0214 + j0.0805 \\ 0.0299 + j0.1073 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} -0.00013 - j0.00001 \\ -0.00034 - j0.00002 \\ -0.00560 + j0.00320 \\ -0.00410 + j0.00220 \\ -0.00110 + j0.00040 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} 0.0012 + j0.0216 \\ 0.0013 + j0.0211 \\ 0.0130 + j0.0624 \\ 0.0162 + j0.0694 \\ 0.0290 + j0.1043 \end{bmatrix}$$

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

$$= \begin{bmatrix} -0.0007 + j0.0108 \\ 0.0007 + j0.0192 \\ 0.0166 + j0.0659 \\ 0.0214 + j0.0805 \\ 0.0076 + j0.0396 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_{ll}} \begin{bmatrix} -0.00091 + j0.00019 \\ -0.00140 + j0.00040 \\ -0.00560 + j0.00320 \\ -0.00480 + j0.00260 \\ -0.00250 + j0.00120 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} -0.0011 + j0.0084 \\ -0.0002 + j0.0154 \\ 0.0090 + j0.0507 \\ 0.0152 + j0.0675 \\ 0.0048 + j0.0328 \end{bmatrix}$$

$$Z_{ll} = 0.0206 + j0.3777 \quad (10)$$

4. 사례 연구

4.1 모의 계통과 사례

그림 4와 같은 IEEE-30 모선 계통에 대해 제안한

방법을 적용하여 취약지역 계산을 수행하였다. 해당 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 $j0.3$ [p.u.]로 가정하였다. 모선 14 (A)와 20 (B)를 민감 부하 모선으로 결정하였으며 한계전압 0.5[p.u.]에 대해 취약지역을 계산하였다. 취약지역의 길이를 계산하기 위한 각 선로의 길이는 참고문헌 [7]에 제시되어 있다. 계통의 총 선로 길이는 1,493.8[km]이다. 보다 자세한 계통 데이터는 참고문헌 [7]과 [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 방법을 기반으로 취약지역 계산을 수행하였다.

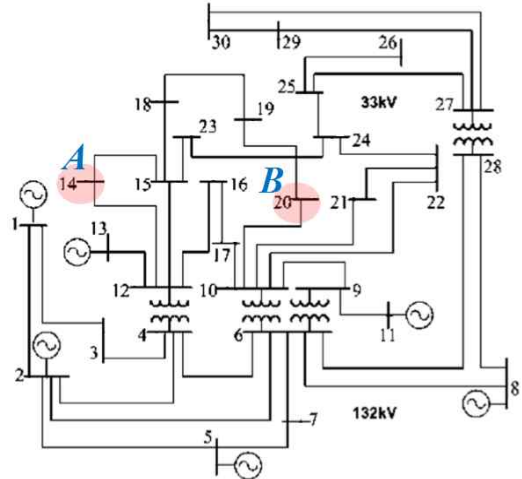
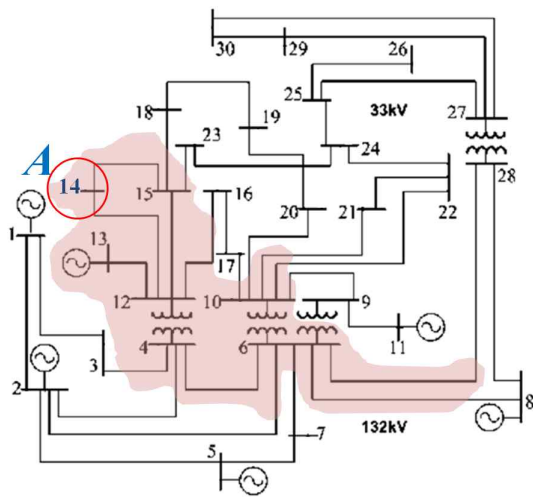


그림 4. IEEE-30 모선 계통 단선도
Fig. 4. Single-line diagram of IEEE-30 bus system

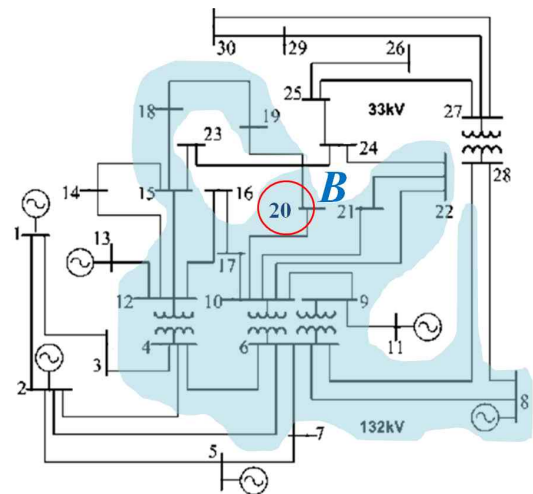
4.2 모의 결과

그림 5 (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 모선 A의 취약지역



(b) 민감 부하 모선 B의 취약지역

그림 5. 3상 사고에 대한 민감 부하 모선 A와 B의 취약지역(한계전압 0.5[p.u.])

Fig. 5. Areas of vulnerability for sensitive load buses A and B due to 3PF(voltage threshold 0.5[p.u.])

본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 다양한 위치에 분산전원이 연결되었을 때 취약지역의 변화를 계산해 보고 순간전압강하 저감 효과를 분석해 보았다. 기존의 발전기 모선을 제외한 모든 모선들에 분산전원을 연결하여 모의를 수행하였다. 식 (11)~(13)의 계산식은 제안된 방법에 따른 15번 모선에 분산전원을 연결하였을 때의 임피던스 행렬 요소의 계산과정을 보여주고 있다. 민감 부하 모선 A에 대한 임피던스 행렬 요소 계산 과정이다.

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

$$\begin{aligned}
 Z_{transfer(15DG)}^{new} &= \begin{bmatrix} Z_{114} \\ \vdots \\ Z_{1514} \\ \vdots \\ Z_{3014} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} Z_{115} & Z_{1414} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{1515} & Z_{1414} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{3015} & Z_{1414} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -0.0017 + j0.0381 \\ \vdots \\ 0.0191 + j0.1724 \\ \vdots \\ -0.0049 + j0.0765 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} -0.0071 + j0.0004 \\ \vdots \\ -0.0363 + j0.0123 \\ \vdots \\ -0.0154 + j0.0013 \end{bmatrix} \quad (12) \\
 &= \begin{bmatrix} -0.0014 + j0.0249 \\ \vdots \\ 0.0020 + j0.1029 \\ \vdots \\ -0.0049 + j0.0477 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$Z_u = 0.0461 + j0.5334 \quad (13)$$

민감 부하 B의 임피던스행렬 요소도 식 (14)~(15)와 같이 바로 계산할 수 있다.

임피던스 행렬 구성법을 이용한 순간전압강하 취약지역의 계산

$$Z_{transfer(15DG)}^{new} = \begin{bmatrix} Z_{120} \\ \vdots \\ Z_{1520} \\ \vdots \\ Z_{3020} \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} Z_{115} & Z_{2020} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{1515} & Z_{2020} \\ \vdots & \vdots \\ Z_{3015} & Z_{2020} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -0.0017 + j0.0394 \\ \vdots \\ 0.0141 + j0.1354 \\ \vdots \\ -0.0026 + j0.0872 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_u} \begin{bmatrix} -0.0056 + j0.0003 \\ \vdots \\ -0.0285 + j0.0095 \\ \vdots \\ -0.0121 + j0.0004 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$= \begin{bmatrix} -0.0014 + j0.0290 \\ \vdots \\ 0.0010 + j0.0808 \\ \vdots \\ -0.0024 + j0.0646 \end{bmatrix}$$

$$Z_u = 0.0461 + j0.5334 \quad (15)$$

민감 부하모선 A와 B에 대해 테브닌 등가 임피던스는 공통요소로 사용되므로 한번만 계산하면 된다. 표 2는 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. 순간전압강하 저감 대책으로서의 분산전원의 효과를 확인할 수 있다. 기타 나머지 모선들에 대해서도 분산전원을 연결하고 제안한 방법을 기반으로 모의를 수행하였다.

표 3은 기존의 발전기 모선을 제외한 나머지 모선에 분산전원이 추가되었을 때의 취약지역 계산 결과를 보여주고 있다. 계산 결과는 취약지역에 포함된 계통 선로들의 길이의 합으로 길이가 길수록 취약지역이 넓음을 의미하며 순간전압강하를 경험할 확률이 크다는 것을 나타낸다.

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

표 2. 15번 모선에 분산전원을 연결하였을 때의 임피던스 행렬 요소 계산 결과

Table 2. Calculation results of impedance matrix terms after connecting DG with bus 15

모 선 번 호	임피던스 요소 [p.u.]		
	Z_{1515}	Z_{1514}	Z_{1520}
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

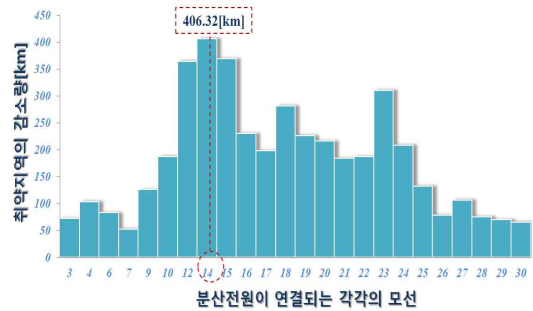
표 3. 분산전원 연결에 따른 민감 부하 모선 A와 B의 취약지역 길이

Table 3. Lengths of the areas of vulnerability for buses A and B

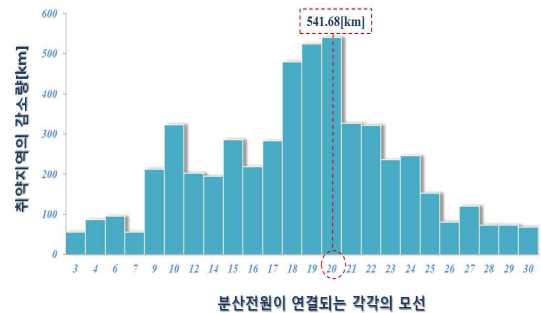
분산전원 위치	취약지역 [km]	
	모선 A	모선 B
3	376.95	532.85
4	345.49	501.53
6	366.10	493.30
7	396.29	533.17
9	323.06	375.46
10	261.42	264.60
12	84.44	385.46
14	42.42	393.03
15	80.13	302.27
16	218.78	369.52
17	250.84	305.03
18	167.37	108.13
19	222.26	63.81
20	233.06	47.07
21	264.94	261.33
22	261.62	266.28
23	138.38	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

민감 부하 모선을 고려한 최적의 분산전원 설치 위치를 찾기 위해서는 전체 모선에 대한 취약지역 감소율을 기준으로 판단하는 것이 바람직하다. 그림 6 (a)와 (b)는 각 분산전원 연결 위치에 따른 취약지역의 감소량을 나타내고 있다. 그림 6 (c)는 두 민감 부하모선에 대한 취약지역 감소량의 합을 보여주고 있다. 계산결과에 따르면 분산전원을 18번 모선에 연결할 경우 두

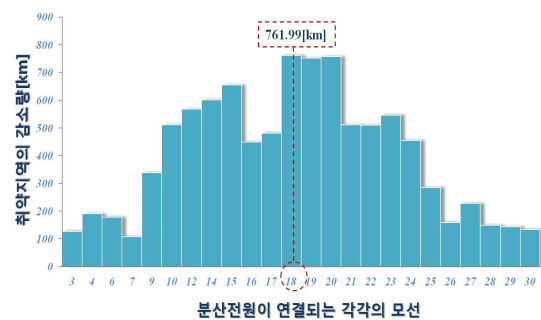
민감 부하모선에 대한 취약지역이 가장 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 18번 모선에 분산전원을 연결할 경우 부하모선 A와 B에 대한 순간전압강하 저감 효과가 가장 크다는 것이다. 분산전원 위치 선정에는 다양한 제약조건이 있겠으나 순간전압강하 취약지역만을 고려했을 때는 18번 모선이 최적위치가 되겠다.



(a) 분산전원 위치에 따른 모선 A의 취약지역 감소량



(b) 분산전원 위치에 따른 모선 B의 취약지역 감소량

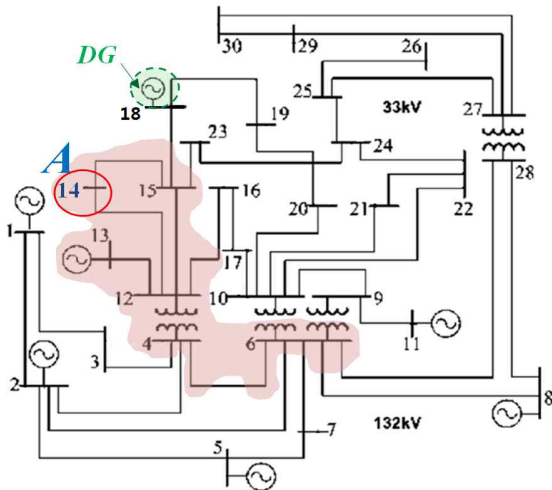


(c) 모선 A와 B의 취약지역 감소량 합

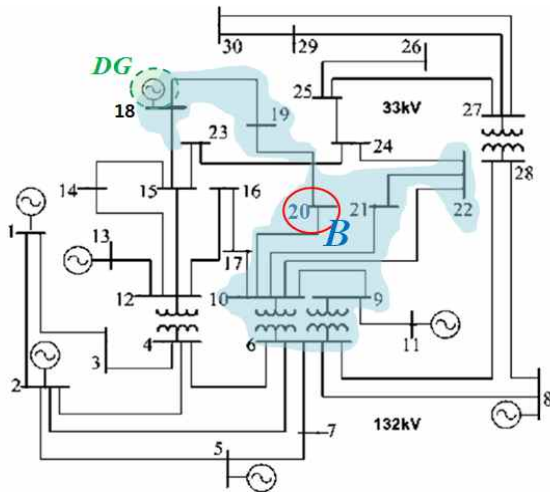
그림 6. 분산전원 위치에 따른 민감 부하 모선 A와 B의 취약 지역 길이 감소량

Fig. 6. Length decrease of the areas of vulnerability for buses A and B according to the DG locations

표 4는 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 연결하였을 때의 취약지역을 그림 7에 도시하였다. 분산전원의 연결전의 결과인 그림 5와 비교하여 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다.



(a) 민감 부하 모선 A의 취약지역



(b) 민감 부하 모선 B의 취약지역

그림 7. 18번 모선에 분산전원이 연결되었을 때의 모선 A와 B의 취약지역
Fig. 7. Areas of vulnerability for buses A and B after connecting DG with bus 18

표 4. 분산전원 연결 전과 후의 취약지역 길이
Table 4. Lengths of the areas of vulnerability before and after connecting DG with bus 18

	취약지역[km]	
	분산전원 연결 전	18번 모선에 분산전원 연결 후
모선 A	448.74	167.37
모선 B	588.75	108.13

5. 결론

본 논문에서는 분산전원 연결에 따른 순간전압강하 취약지역의 변화를 효과적으로 분석할 수 있는 방법을 소개하였다. 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. 제안된 방법은 분산전원 설치로 인한 순간전압강하 저감 효과 분석 및 대규모 계통에서의 분산전원 최적 위치 선정 등에 효과적으로 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2011-0014423)

References

- [1] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, Piscataway, NJ, IEEE Power Engineering Series, 2000.
- [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] Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power System“, IEEE std. 493-1997, Chapter 9.
- [7] Z. X. Han, “Generalized method of analysis of simultaneous faults in electric power system,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, no. 10, pp. 3933-3942, Oct. 1982
- [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] G. Olguin, Voltage dip (sag) estimation in power systems based on stochastic assessment and optimal monitoring, Ph.D. dissertation, Dept. Energy Environ., Div. Electr. Power Eng., Chalmers Univ. Technol., Goteborg, Sweden, 2005.
- [10] 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., vol. 4, no. 6, pp. 683 - 693, 2010.
- [11] Y. S. Lim and G. Strbac, “Analytical approach to probabilistic prediction of voltage sags on transmission networks,” Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Distrib., vol. 149, no. 1, pp. 7-14, Jan. 2002.
- [12] H. Saadat, Power System Analysis, 2nd ed., Singapore: McGraw-Hill, pp. 369-382, 2004.
- [13] IEEE 30-bus Test Case, [Online]. Available: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm.

◇ 저자소개 ◇



박종일 (朴鍾日)

1982년 5월 21일생. 2010년 부경대학교 졸업. 현재 부경대학교 전기공학과 석사과정.



박창현 (朴昶炫)

1974년 12월 25일생. 2001년 인하대학교 졸업. 2007년 고려대학교 석박사통합과정 졸업(박사). 현재 부경대학교 전기공학과 조교수.