



## 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

풍력발전을 포함하는 전력계통에 대한  
순간전압강하 평가 연구



宋 榮 圓

工學碩士 學位論文

풍력발전을 포함하는 전력계통에 대한  
순간전압강하 평가 연구

A Study on The Assessment of Voltage Sags in  
Power Systems Involving Wind Power Generation

指導教授 朴 昶 炫

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2013 年 2 月

釜慶大學校 大學院

電氣工學科

宋 榮 圓

# 宋榮圓의 工學碩士 學位論文을 認准함

2013年 2月



主 審 工學博士 張 允 碩 (印)

委 員 工學博士 李 鎔 旭 (印)

委 員 工學博士 朴 昶 炫 (印)

## 목 차

목차 .....	i
그림 목차 .....	ii
표 목차 .....	iii
Abstract .....	iv
<b>제 1 장 서론 .....</b>	<b>1</b>
<b>제 2 장 본론 .....</b>	<b>3</b>
2.1 순간전압강하 평가 .....	3
2.1.1 임계 거리법(critical distance method) .....	3
2.1.2 고장 위치법(fault positions method) .....	5
2.1.3 취약지역 계산을 이용한 평가 방법 .....	6
2.2 풍속 모델링 .....	8
2.3 풍력발전 출력 모델 .....	11
2.4 풍력발전 동작 특성 적용 .....	13
2.4.1 풍력발전 동작 확률 결정 .....	13
2.4.2 동작 확률을 반영하는 순간전압강하 평가 .....	16
2.5 순간전압강하 평가 절차 .....	18
<b>제 3 장 사례 연구 .....</b>	<b>20</b>
3.1 계통내 1기 풍력 발전이 존재하는 경우 .....	24
3.2 계통내 2기 풍력 발전이 존재하는 경우 .....	27
<b>제 4 장 결론 .....</b>	<b>31</b>
참고 문헌 .....	32

## 그림 목차

그림 1 방사상 계통의 사고와 임계 거리법 .....	3
그림 2 고장 위치법의 예 .....	5
그림 3 취약지역의 예 .....	7
그림 4 와이블 분포의 예 ( $c = 7$ ) .....	10
그림 5 와이블 분포의 예 ( $k = 2$ ) .....	10
그림 6 풍력발전 출력 모델 .....	11
그림 7 풍력발전 A, B의 동작상태 .....	14
그림 8 풍력발전 동작 확률 결정 .....	15
그림 9 순간전압강하 평가 절차 .....	18
그림 10 IEEE-57 모선 테스트 계통 .....	20
그림 11 52번 모선에 연결된 풍력발전의 동작 확률 결정 .....	22
그림 12 54번 모선에 연결된 풍력발전의 동작 확률 결정 .....	23

## 표 목차

표 1 풍력발전 A, B의 동작 확률 .....	16
표 2 모선과 선로들의 사고율 데이터 .....	21
표 3 풍력발전 데이터 .....	21
표 4 52번 모선과 54번 모선의 풍력 발전 동작 확률 .....	22
표 5 각 상태별 순간전압강하 평가 결과(1기 존재) .....	25
표 6 풍력발전 동작 특성을 고려한 평가 결과(1기 존재) .....	25
표 7 기존의 순간전압강하 평가 방법과의 결과 비교(1기 존재) .....	26
표 8 각 상태별 순간전압강하 평가 결과(2기 존재) .....	28
표 9 풍력발전 동작 특성을 고려한 평가 결과(2기 존재) .....	28
표 10 기존의 순간전압강하 평가 방법과의 결과 비교(2기 존재) .....	29
표 11 표 7과 표 10의 오차 비교 .....	30

# A Study on The Assessment of Voltage Sags in Power Systems Involving Wind Power Generation

Young-Won Song

*Department of Electrical Engineering*

*Graduate School*

*Pukyong National University*

## Abstract

This paper presents a method for assessing the voltage sag performance of power system involving wind power generation. Wind power generation is considered as one of the most desirable renewable energy sources. However, wind power generation have uncertain energy output and it is difficult to control the output. The existing methods of voltage sag assessment are not reflected the characteristics of wind power generation. Therefore, in order to more accurately assess the voltage sag performance, the probability of wind power operation is evaluated. In this paper, the probability is determined by combining the wind speed model with the output curve of wind turbine. The probability of wind power operation is reflected as a parameter in voltage sag assessment. The proposed method can provide more accurate results of voltage sag assessment for the case involving the wind power generation.

# 제 1 장 서 론

현대 산업은 대부분 자동화 공정을 기반으로 하고 있으며 이러한 산업 자동화 시스템은 전압변동에 민감한 반도체 소자들로 구성되어 있다. 따라서 순간전압강하와 같은 짧은 시간동안의 전압감소 현상에 의해 기기의 오동작이 발생할 수 있으며 전체 공정이 중단되어 막대한 경제적 손실을 발생 시킬 수 있다[1]. 이러한 순간전압강하 문제의 해결을 위해서는 보상 장치의 설치 등 다양한 대책 수립이 필요하다. 순간전압강하의 전압강하크기 및 빈도는 계통내 위치와 환경에 따라 다르므로 특정 부하단에 대한 효율적인 대책 수립을 위해서는 순간전압강하 평가가 선행 되어야 한다.

풍력 발전은 가장 각광받는 신재생 에너지원 중 하나로 풍력에너지의 40%를 전기 에너지로 변환할 수 있어 에너지 효율이 높고 설치비용이 태양광 발전의 약1/5 정도로 저렴한 장점을 가지고 있다[2]. 이러한 이유 때문에 풍력 발전의 사용은 점점 증가하고 있다. 그러나 풍력 발전은 그 출력이 바람에 크게 의존하기 때문에 기존의 발전 방식(원자력 발전, 화력발전 등)과는 달리 출력특성이 불규칙하다는 특성을 가진다. 이렇게 특성이 다른 신재생에너지원이 전력 계통에 연결될 경우 전력공급의 신뢰도와 전력 품질 등에 어떤 영향을 미치는지에 대한 분석이 필요하다[3]. 풍력 발전을 포함하는 계통에 대한 순간전압강하 평가의 경우에도 기존 발전원들과는 다른 불규칙적인 풍력발전의 출력 특성을 반영할 수 있어야 한다. 그러나 기존의 순간전압강하 평가 방법들은 모든 발전기는 항상 운전하는 것으로 가정하여 평가를 하고 있다. 계통내 다수의 풍력 발전이 존재할 때 그 특성을 무시하고 평가를 실시할 경우 오차가 크게 발생할 수 있다. 따라서 보다 정확한 순간전압강하 평가를 위해서는 풍력 발전의 출력 특성을 적절히 반영할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 풍속 모델링과 풍력 발전 출력 모델을

이용한 순간전압강하 평가 방법을 소개한다. 풍력 발전기가 위치한 장소의 풍속 데이터를 이용하여 확률분포 모델로 풍속 모델링을 수행하고 각 풍력 발전기에 대한 출력 특성 모델을 수립한다. 두 모델로부터 풍력발전의 동작 확률을 계산하여 평가에 반영함으로써 풍력 발전 특성을 고려한 순간전압강하 평가가 가능하다. 제안하는 방법을 이용하여 IEEE-57 모선 계통에 대해 사례 연구를 수행하였다.



## 제 2 장 본 론

### 2.1 순간전압강하 평가

순간전압강하 평가는 계통내 특정 지점에서의 연간 순간전압강하의 발생 횟수를 추산하는 기술로서 장기적인 계통 특성 분석의 한 분야라 할 수 있다. 순간전압강하 평가는 크게 모니터링에 의한 방법과 시뮬레이션을 이용한 추계적 방법이 있다. 일반적으로 알려진 시뮬레이션 기반 순간전압강하 평가 방법으로 임계 거리법(critical distance method), 고장 위치법(fault positions method) 및 정확한 취약지역 계산을 이용한 방법 등이 있다 [4-7].

#### 2.1.1 임계 거리법 (Critical distance method)

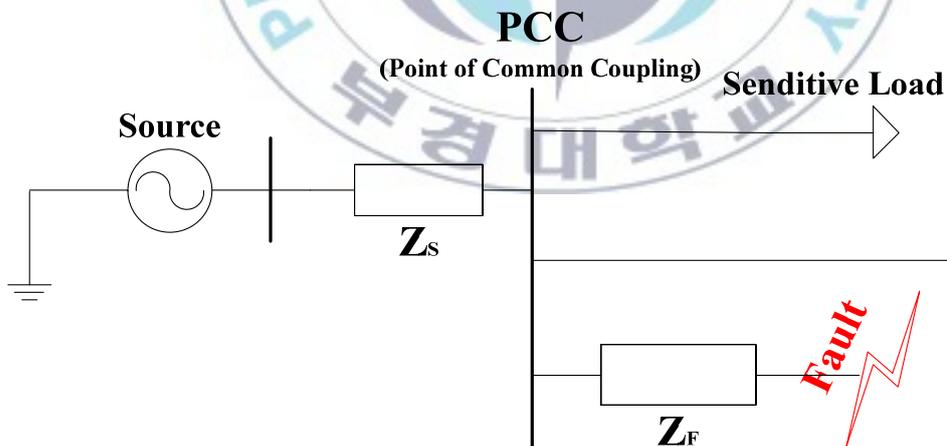


그림 1 . 방사상 계통의 사고와 임계 거리법

임계 거리법은 전압 분배 모델을 기반으로 하여 순간전압강하 평가를 수행하는 방법으로 방사상 계통에는 효과적이거나 망구조 계통에는 적용할 수 없는 약점을 가진다. 그림 1과 같은 방사상 계통에서 사고가 발생 했을 때 PCC에서의 사고 전압은 식 (1)과 같이 계산된다.

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

여기서

$Z_F$  : PCC와 사고 위치사이의 임피던스

$Z_S$  : 전원 임피던스

$V^{pre}$  : 사고전 전압

$Z_F$ 를 PCC와 사고위치 사이의 길이와 선로의 단위 길이당 임피던스로 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서

$z$  : 선로의 단위 길이당 임피던스

$L$  : PCC와 사고위치 사이의 길이

식 (2)를 PCC와 사고위치 사이의 길이  $L$ 에 대한 수식으로 정리하면 식 (3)과 같이 되며 이때 구해지는  $L$ 을 임계거리라 한다.

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

식 (3)과 같이 임계거리가 구해지면 임계거리 값과 임계거리에 포함된 모선과 선로의 사고율을 곱하여 순간전압강하 평가를 수행한다.

### 2.1.2 고장 위치법(fault positions method)

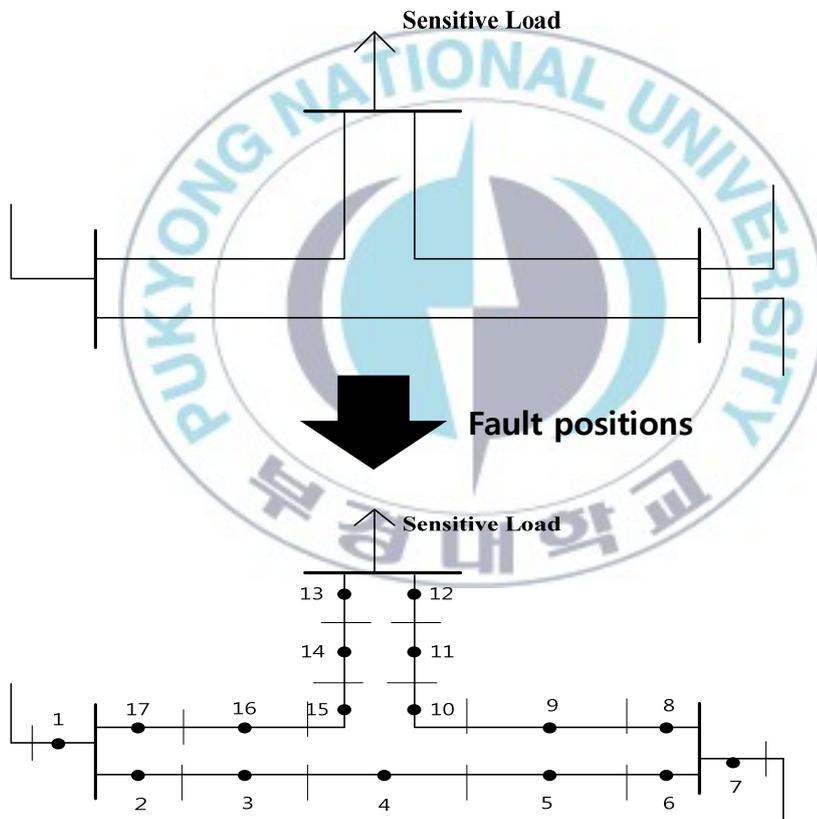


그림 2. 고장 위치법의 예

고장 위치법은 그림 2와 같이 계통내 많은 사고 위치(fault positions)를 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.

### 2.1.3 취약지역 계산을 이용한 평가 방법

취약지역 계산을 이용한 평가 방법은 2차 보간법 및 할선법을 이용해 정확한 취약지역을 계산하고 계통의 사고율을 이용하는 평가 방법으로 상기 두 방법들의 단점을 모두 극복한 방법이라 할 수 있다.

취약지역은 특정 기기의 전압 민감도 또는 주어진 전압 한계 값 이하의 사고 전압을 야기하는 계통내의 사고 위치들의 집합으로 정의된다. 그림 3과 같이 계통내 특정 부하단에 대해 취약지역을 구할 수 있으며 이 취약지역에 포함된 선로 및 모선의 사고율을 이용해 순간전압강하 발생 횟수 추산을 하게 된다. 어두운 계통 영역에 사고가 발생하게 되면 해당 민감 부하가 순간전압강하로 영향을 받음을 나타낸다.

본 논문에서는 취약지역 계산을 이용한 평가 방법을 기반으로 풍력 발전을 모델링하여 순간전압강하 평가를 수행하였다.

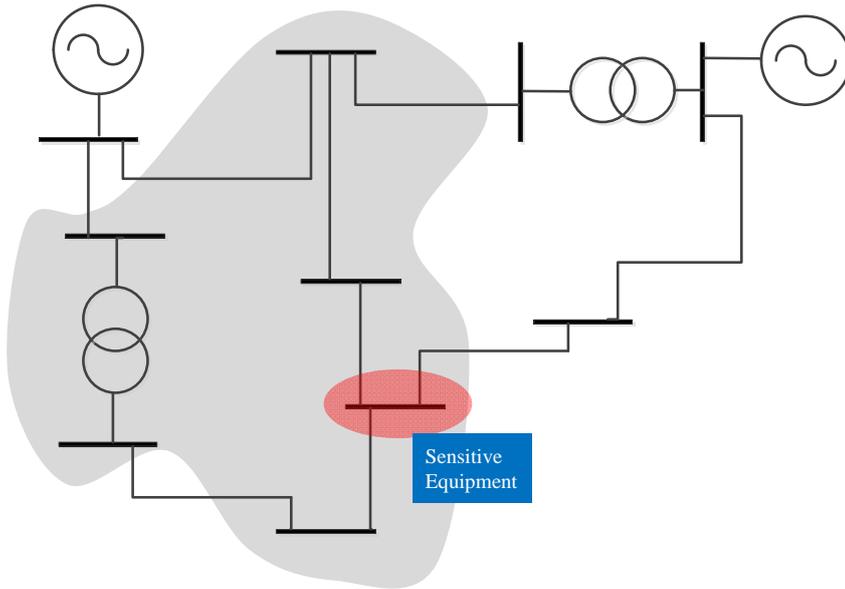


그림 3. 취약지역의 예



## 2.2 풍속 모델링

풍속은 그 불확실성으로 인해 정확한 예측은 불가능하나 확률적 방법을 이용해 풍속을 모델링 하는 것은 가능하다. 풍속의 확률모델에 관한 연구는 많이 이루어져 왔으며 포아송 분포, 피아송 III형 분포, 와이블 분포, 카이(레일리) 분포, 야코부스의 분포식, 오루송 분포식 등이 제안되어 있다[8]. 또한 평균 풍속  $\mu$ 와 표준편차  $\sigma$ 를 갖는 정규 확률 분포로 가정하는 공통풍속모델(Common wind speed model)을 사용하기도 한다[9]. 이 중에서 실제 풍속 확률 분포와 유사하여 압도적으로 많이 사용되는 것이 와이블(weibull) 확률 분포 함수이다. 와이블 확률 분포 함수는 식 (4)와 같이 표현 된다[10]. 그리고 그림 4와 그림 5는 풍속의 와이블 확률 분포의 예를 보여준다.

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (4)$$

여기서

$V$  : 풍속 [m/s]

$c$  : 척도 계수(Scale factor) [m/s]

$k$  : 형상 계수(Shape factor)

척도 계수  $c$ 는 바람의 평균 속도와 관계가 있기 때문에 [m/s]의 단위를 가지며 척도 계수가 클수록 빠른 바람이 부는 확률이 높다. 형상 계수  $k$ 는 풍속 분포의 편차와 관련이 있다. 형상 계수 값이 2인 경우를 레일리(Rayleigh) 확률 분포라 한다. 와이블 확률 분포가 2개의 파라미터인 척도

계수와 형상 계수를 갖는데 대하여 레일리 확률 분포는 척도 계수만을 파라미터로 하는 함수가 된다. 그 결과 레일리 확률 분포는 평균 풍속에만 의존하는 것이 되어 풍속 분포를 추정이 용이해진다[8]. 풍력 터빈 제작사는 보통 레일리 확률 분포를 이용하여 풍력 터빈의 성능에 대한 자료를 제공한다[10].

와이블 분포에서 척도 계수는 식 (5)와 같다.

$$c = \frac{V_m}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \quad (5)$$

여기서  $V_m$ 은 풍속의 평균이고 형상 계수  $k$ 가 2인 레일리 확률 분포의 경우 감마 함수는 약 0.886의 값을 가진다. 따라서 식 (5)는 식 (6)과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$c = \frac{V_m}{0.886} \quad (6)$$

대부분의 경우 풍력 발전이 설치된 장소의 평균 풍속을 알고 있다. 따라서 레일리 확률 분포로 풍속을 모델링할 수 있다[10].

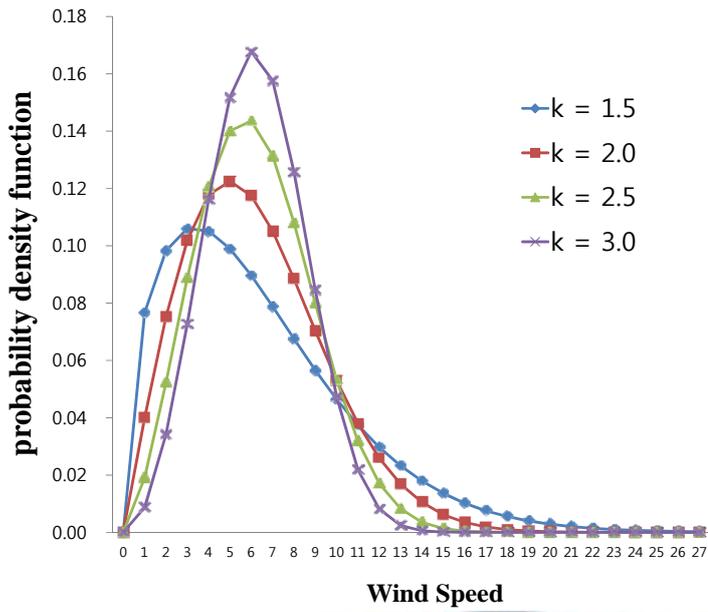


그림 4. 와이블 분포의 예 ( $c = 7$ )

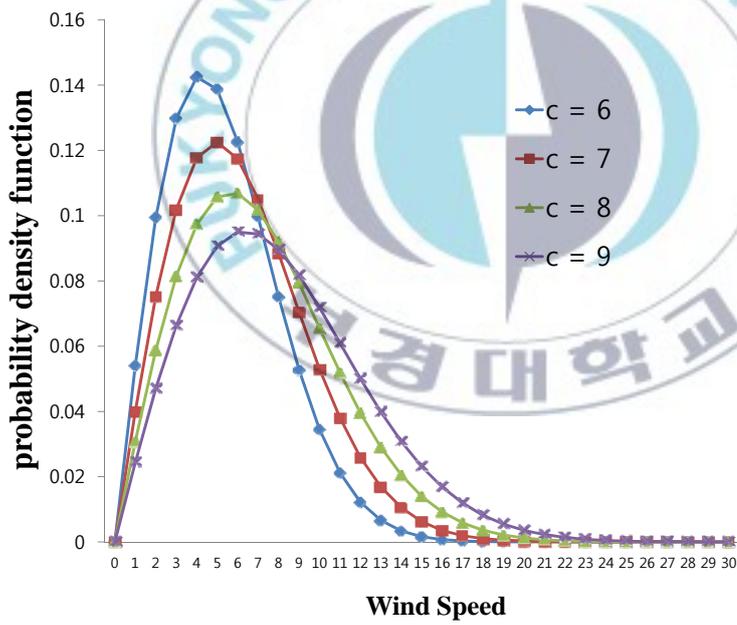


그림 5. 와이블 분포의 예 ( $k = 2$ )

## 2.3 풍력발전 출력 모델

풍력 발전기의 출력은 풍속에 크게 의존한다. 일반적으로 풍력 발전기는 시동 풍속(cut-in wind speed)에서 풍력발전은 출력을 내기 시작하며 정격 풍속(rated wind speed)에 도달하면 정격 출력을 발생시킨다. 정격 풍속 이상 중단 풍속 이하의 풍속 범위에서는 풍속에 상관없이 출력이 일정하다. 그리고 중단 풍속(cut-out wind speed) 이상에서는 발전기 보호를 위하여 풍력발전을 중지시킨다. 그림 6은 풍력발전의 출력 특성 그래프를 나타내고 있으며 식 (7)는 풍력발전기의 출력을 나타낸다[11]. 풍력 발전기마다 고유한 출력 특성을 가진다. 따라서 순간전압강하 평가시 개별 풍력발전기 별로 출력 모델을 결정해야 한다.

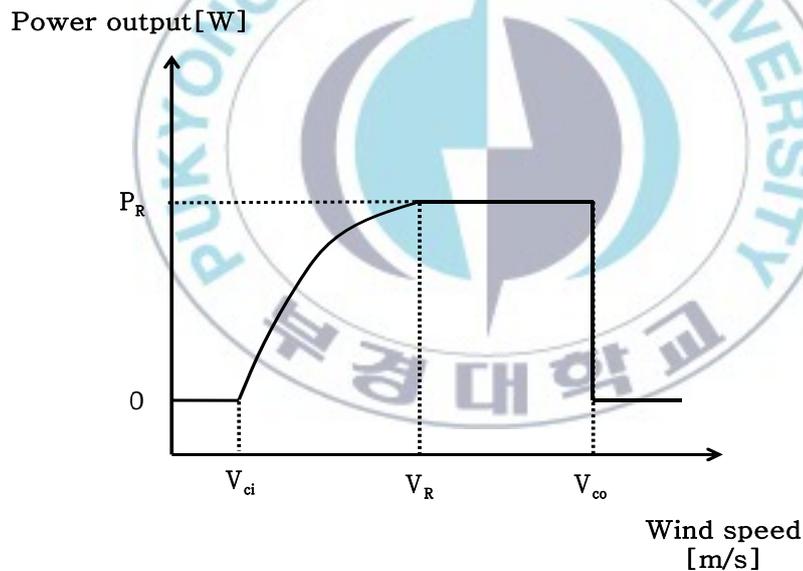


그림 6. 풍력발전 출력 모델

$$\begin{aligned}
P &= 0 & 0 \leq V \leq V_{ci} \\
&= P_R(A + BV + CV^2) & V_{ci} \leq V \leq V_R \\
&= P_R & V_R \leq V \leq V_{\infty} \\
&= 0 & V_{\infty} \leq V
\end{aligned}
\tag{7}$$

여기서

$P_R$ : 정격 출력 [W]

$V_{ci}$ : 시동 풍속(Cut-in wind speed) [m/s]

$V_R$ : 정격 풍속(Rated wind speed) [m/s]

$V_{\infty}$ : 중단 풍속(Cut-out wind speed) [m/s]



## 2.4 풍력발전 동작 특성 적용

일반적으로 풍력발전이 출력을 내고 있을 때 전원으로써 계통에 연결되고 출력이 존재하지 않을 때 계통에서 분리된다고 할 수 있다. 순간전압강하 평가시 이러한 특성은 매우 중요하다. 전원으로써 계통에 연결되어 동작할 때와 그렇지 않을 때 계통의 임피던스 특성이 달라지고 그에 따라 순간전압강하 발생과 과급에도 일정부분 영향을 미치게 된다. 따라서 풍력발전의 동작 특성 모델링하여 그 데이터를 순간전압강하 평가에 반영할 필요가 있다.

### 2.4.1 풍력발전의 동작 확률 결정

계통내 N개의 풍력발전이 존재할 때 조건에 따라  $\sum_{i=0}^N {}_N C_i$  조합의 동작 상태가 존재할 수 있다.

만약 계통내 A와 B 두기의 풍력발전이 존재 한다면 그림 7과 같이 풍력발전 A가 단독으로 동작하는 경우( $ST_A$ ), 풍력발전 B가 단독으로 동작하는 경우( $ST_B$ ), 풍력 발전 A, B가 동시에 동작하는 경우( $ST_{AB}$ ), 풍력발전 A, B 모두 동작하지 않는 경우( $ST_0$ )의 4가지 상태가 존재하게 된다. 여기서  $ST_i$

는 N개의 풍력발전기가 존재할 때의  $\sum_{i=0}^N {}_N C_i$  가지 조합의 동작 상태 중 하나의 동작 상태를 의미한다.

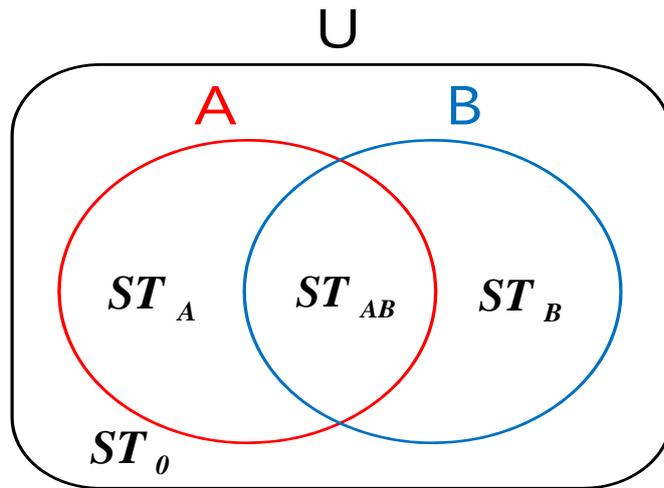


그림 7. 풍력발전 A, B의 동작상태

풍력 발전의 동작 특성을 반영하기 위해서 풍속 모델과 출력 모델로부터 상태별 동작 확률을 계산한다. 동작 확률을 결정하기 위해서 먼저 개별 풍력 발전의 동작 확률을 계산한다. 그림 8과 같이 풍속의 확률분포 모델과 풍력발전의 출력 모델을 결합하여 동작 확률을 도출한다[9]. 식 (8)과 같이 풍속값이 풍력발전기의 종단 풍속과 시동 풍속 사이의 값이면 풍력 발전기가 동작한다고 할 수 있다. 그리고 식 (9)와 같이 풍속값이 시동 풍속 미만이거나 종단 풍속 이상일 경우는 풍력 발전기가 동작하지 않는 경우로 볼 수 있다.

$$V_{ci} \leq V \leq V_{co} \quad (8)$$

$$V \leq V_{ci} \text{ and } V \geq V_{co} \quad (9)$$

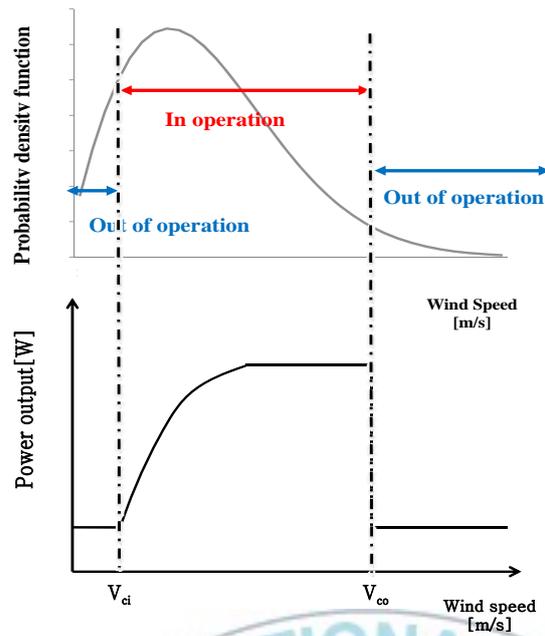


그림 8. 풍력발전 동작 확률 결정

이때 개별 풍력발전의 동작 확률은 식 (9)와 같이 결정할 수 있다. 여기서  $f(V)$ 는 레일리 확률 분포이다. 개별 풍력발전기가 동작하는 확률  $P(I)$ 는 시동 풍속에서 중단 풍속까지  $f(V)$ 를 적분한 값이 된다. 그리고 개별 풍력발전기가 동작하지 않는 확률  $P(O)$ 는 풍속이 0일 때부터 시동 풍속까지  $f(V)$ 를 적분한 값과 중단 풍속에서 무한대 풍속까지  $f(V)$ 를 적분한 값의 합이 된다.

$$P(I) = \int_{V_{ci}}^{V_{co}} f(V) dV \quad (9)$$

$$P(O) = \int_0^{V_{ci}} f(V) dV + \int_{V_{co}}^{\infty} f(V) dV$$

개별 동작확률을 결정하였다면 전체 동작 상태별 풍력발전의 동작 확률

을 계산한다. 예를 들면 그림 8과 식 (9)에 의해 풍력 발전 A, B의 동작 확률이 표 1과 같이 계산되었다고 가정한다.

표 1. 풍력발전 A, B의 동작 확률

	풍력 발전A	풍력 발전B
$P(I)$	0.6	0.7
$P(O)$	0.4	0.3

이때 전체 4가지의 동작 상태별 풍력발전의 동작 확률은 식 (10)과 같이 계산된다.

$$P(ST_{AB}) = P(A \cap B) \quad (10)$$

$$P(ST_0) = P(A^c \cap B^c)$$

$$P(ST_A) = P(A) - P(A \cap B)$$

$$P(ST_B) = P(B) - P(A \cap B)$$

여기서  $P(ST_j)$ 는  $ST_j$ 상태에서의 동작 확률을 의미한다.

## 2.4.2 동작 확률을 반영하는 순간전압강하 평가

풍력발전의 동작 확률이 결정되면 그 값을 식 (11)과 같이 순간전압강하 평가에 반영한다.

$$ESF = \sum_{j=0}^{OS} [P(ST_j) \times SF_{ST_j}] \quad (11)$$

여기서  $ESF$ (Expected Sag Frequency)는 연평균 순간전압강하 발생 횟수, OS는  $\sum_{i=0}^N {}_N C_i$  조합의 동작 상태 수,  $SF_{ST_j}$ 는  $ST_j$  상태에서의 순간전압강하 평가 결과를 의미한다. 즉,  $ST_j$  상태에서의 풍력발전 동작 확률값과  $ST_j$  상태에서의 순간전압강하 평가 결과를 곱하고 모든 동작 상태에 대한 결과값을 합함으로서 연평균 순간전압강하 발생 횟수를 추산한다. 예를 들면 풍력발전 A가 단독으로 동작하는 경우( $ST_A$ ), 풍력발전 B가 단독으로 동작하는 경우( $ST_B$ ), 풍력 발전 A, B가 동시에 동작하는 경우( $ST_{AB}$ ), 풍력발전 A, B 모두 동작하지 않는 경우( $ST_0$ )의 4가지 상태에 대해 각각 순간전압강하 평가를 실시한다. 그 다음 식 (11)에 의해 순간전압강하 평가 결과를 다음과 같이 도출한다.

$$ESF = [P(ST_{AB}) \times SF_{ST_{AB}}] + [P(ST_0) \times SF_{ST_0}] \\ + [P(ST_A) \times SF_{ST_A}] + [P(ST_B) \times SF_{ST_B}]$$



## 2.5 순간전압강하 평가 절차

풍력발전이 포함된 계통에 대한 순간전압강하 평가 절차를 정리하면 그림 9와 같다.

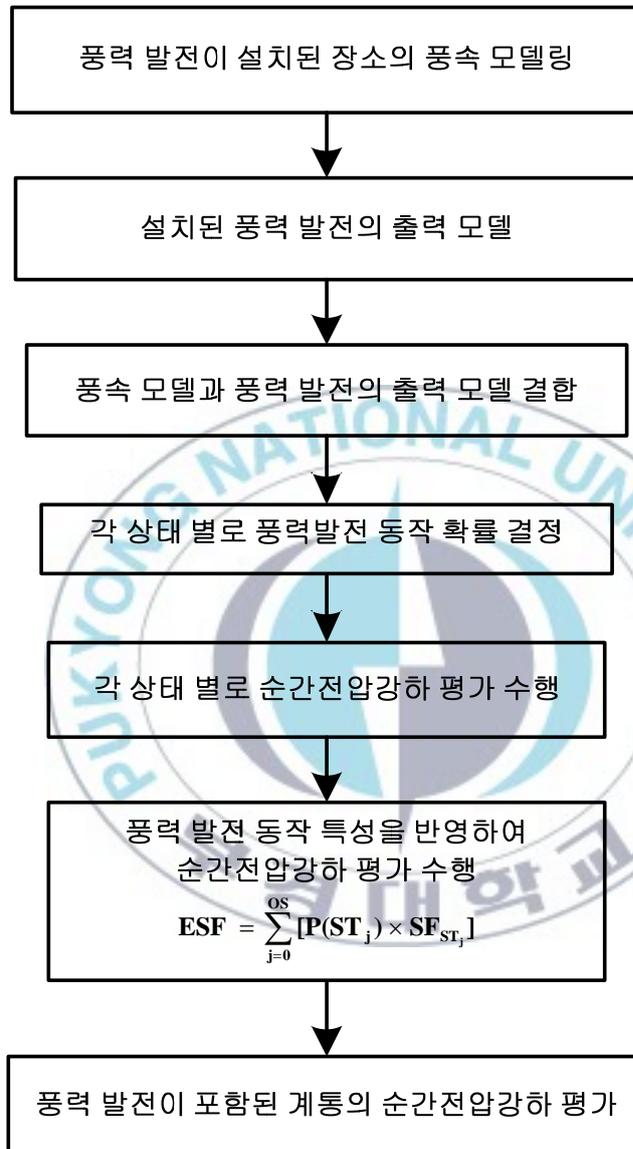


그림 9. 순간전압강하 평가 절차

먼저 풍력 발전이 설치된 장소의 풍속을 모델링한다. 풍속의 정확한 예측은 불가능하므로 확률 모델을 이용하여 모델링할 수 있다. 본 논문에서는 레일리 확률 분포 모델을 이용하여 풍속을 모델링하였다. 다음으로 풍력 발전기의 출력 모델을 수립한다. 그 다음 풍속 모델과 출력 모델을 결합하여 상태에 대한 풍력발전 동작 확률 값을 결정한다. 다음으로 각 상태별로 순간전압강하 평가를 수행하고 식 (11)에 의해 최종 결과 값을 도출한다.



## 제 3 장 사 례 연 구

그림 10과 같은 IEEE-57 모선 계통을 이용하여 제안하는 방법에 대한 사례연구를 실시하였다. 해당 계통은 57개의 모선과 62개의 선로, 7기의 발전기, 16기의 변압기로 구성되어 있다. 자세한 계통 데이터는 참고문헌 [12]에 정리되어 있다. 모든 발전기의 정상, 역상, 영상 시퀀스 임피던스는 각각  $j0.2$ ,  $j0.2$ ,  $j0.1$ 로 가정하였다. 순간전압강하 평가를 위해 필요한 계통의 사고율 데이터는 표 2에 정리되어 있다[7].

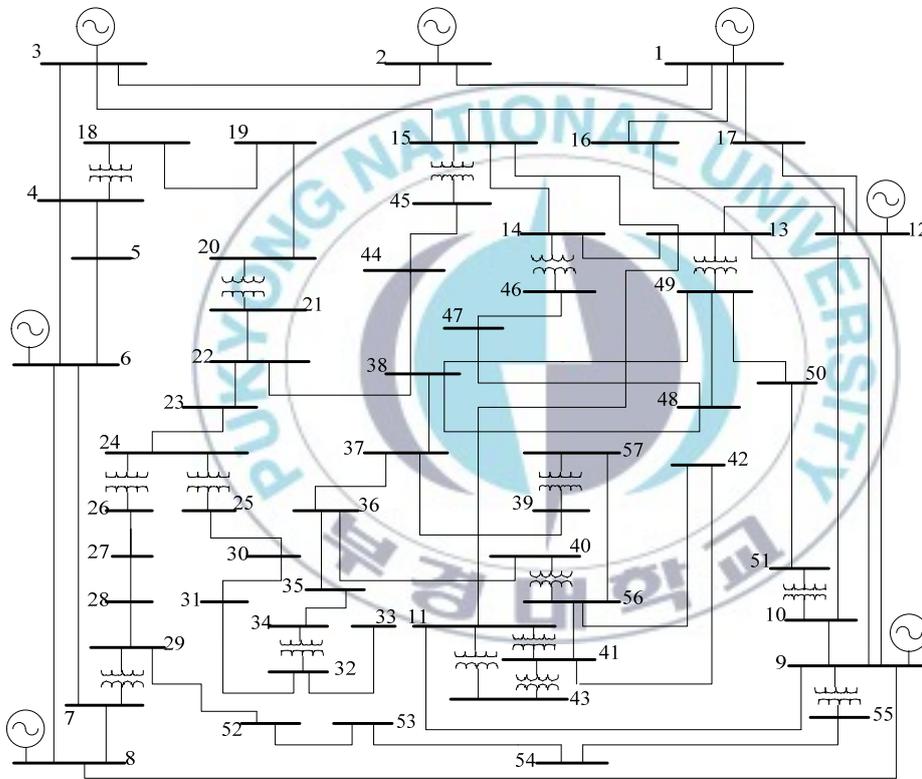


그림 10. IEEE-57 모선 테스트 계통

표 2. 모선과 선로들의 사고율 데이터

사고 형태	모선 사고율 [Event/Year]	선로 사고율 [Event/100km/Year]
1선 지락사고 (SLGF)	0.064	2.000
선간 단락사고 (LLF)	0.004	0.125
2선 지락사고 (DLGF)	0.008	0.300
3상사고 (3PF)	0.003	0.100

민감 부하모선은 53번 모선으로 가정하였고 52번 모선과 54번 모선에 풍력 발전이 설치된다고 가정하였다. 설치되는 풍력 발전 데이터는 제주의 한림 풍력 발전단지와 성산 풍력 발전 단지의 모든 풍력 발전기를 하나의 등가풍력발전기로 가정한 데이터를 사용하였다. 표 3에 상세한 데이터를 나타내었다[9]. 한림 풍력 발전 데이터는 52번 모선, 성산 풍력 발전 데이터는 54번 모선에 적용하였다. 모든 풍력 발전기의 정상, 역상, 영상 시퀀스 임피던스는 각각  $j0.28$ ,  $j0.28$ ,  $j0.12$ 이다. 상기 데이터들을 이용하여 풍력 발전의 동작 확률을 결정하였다.

표 3. 풍력발전 데이터

	52번 모선(한림)	54번 모선(성산)
시동 풍속[m/s]	5	5
정격 풍속[m/s]	14	15
중단 풍속[m/s]	25	25
풍속 범위[m/s]	0 ~ 35	0 ~ 45
풍속의 평균[m/s]	6.4	8.5
풍속의 표준편차	9	11

표 3의 풍속 데이터를 이용하여 레일리 확률 분포 모델로 52번 모선과 53번 모선의 풍속을 모델링하였고, 출력 데이터를 이용하여 풍력 발전의 출력 모델을 수립하였다. 풍속 및 출력 모델을 결합하여 개별 풍력 발전 동작 확률을 결정하였다. 개별 풍력 발전 동작 확률은 그림 11과 그림 12에 나타내었으며 표 4에 정리하였다.

표 4. 52번 모선과 54번 모선의 풍력 발전 동작 확률

	52번 모선	54번 모선
$P(I)$	0.679	0.802
$P(O)$	0.318	0.196

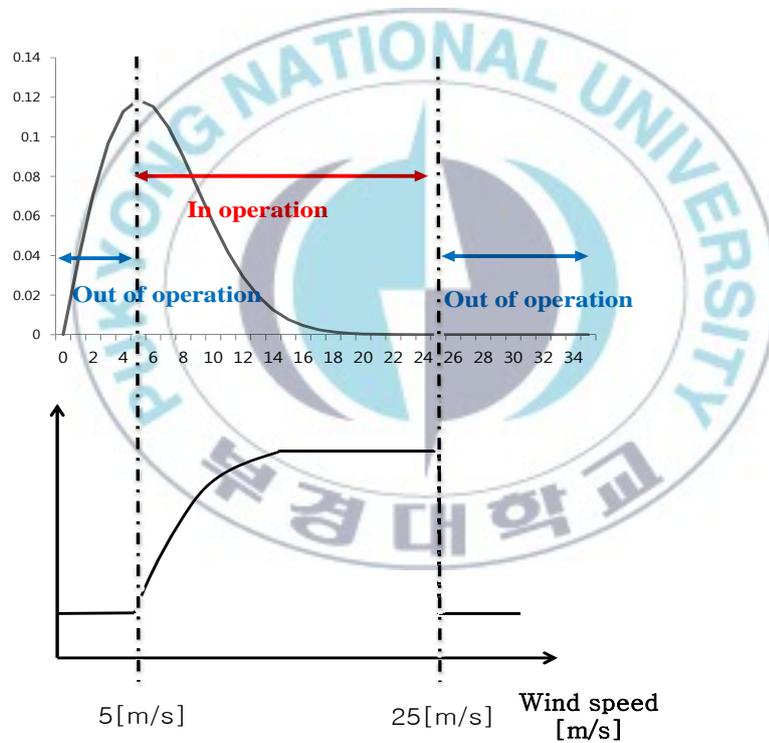


그림 11. 52번 모선에 연결된 풍력발전의 동작 확률 결정

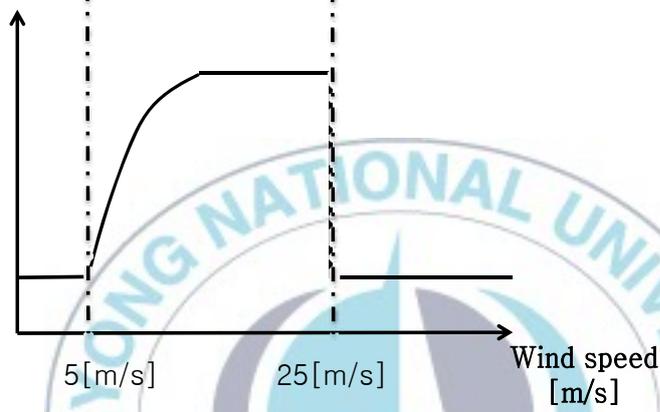
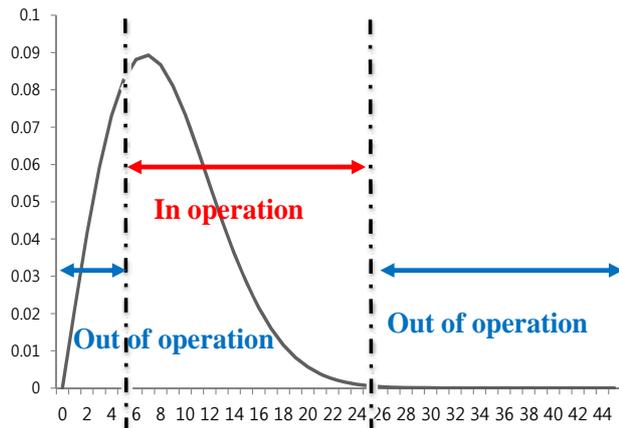


그림 12. 54번 모선에 연결된 풍력발전의 동작 확률 결정

### 3.1 계통내 1기의 풍력 발전이 존재하는 경우

계통내 52번 모선에만 풍력 발전이 존재 한다고 가정한다. 이때 1기의 풍력 발전만 존재 하므로 52번 모선에 설치된 풍력발전이 단독으로 동작하는 경우( $ST_{52}$ ), 52번 모선에 설치된 풍력 발전이 동작하지 않는 경우( $ST_0$ )의 2가지 동작 상태를 가진다. 이 때 각 동작 상태  $ST_j$ 에 대한 풍력발전 동작 확률은 개별 풍력 발전의 동작 확률과 동일하며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(ST_{52}) = P(52BUS) = 0.679$$

$$P(ST_0) = P(52BUS^c) = 0.318$$

다음으로  $ST_j$  상태별로 순간전압강하 평가를 수행하였으며 그 결과는 표 5에 정리하였다. 표 5의  $ST_j$  상태별 순간전압강하 평가 결과와 식 (9)에 의해 풍력 발전 동작 특성을 반영한 최종 순간전압강하 평가 결과는 표 6과 같다.

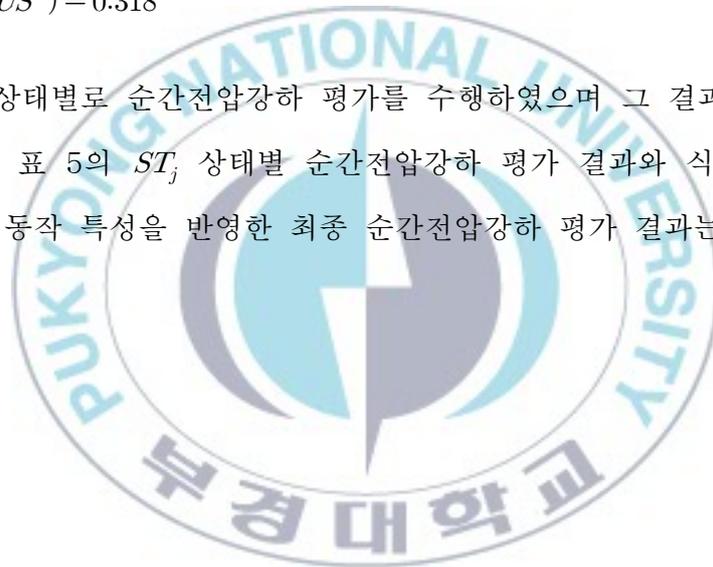


표 5. 각 상태별 순간전압강하 평가 결과(1기 존재)

Voltage sag magnitude [p.u.]	$ST_{52}$	$ST_0$
$\leq 0.9$	12.045	17.164
$\leq 0.8$	4.573	10.826
$\leq 0.7$	2.358	5.945
$\leq 0.6$	1.422	3.617
$\leq 0.5$	0.886	2.586
$\leq 0.4$	0.655	1.665
$\leq 0.3$	0.531	0.947
$\leq 0.2$	0.440	0.538
$\leq 0.1$	0.220	0.247

표 6. 풍력발전 동작 특성을 고려한 평가 결과(1기 존재)

Voltage sag magnitude [p.u.]	ESF [sags/year]
$\leq 0.9$	13.637
$\leq 0.8$	6.548
$\leq 0.7$	3.491
$\leq 0.6$	2.116
$\leq 0.5$	1.424
$\leq 0.4$	0.974
$\leq 0.3$	0.662
$\leq 0.2$	0.470
$\leq 0.1$	0.228

표 7은 계통내 1기의 풍력 발전이 존재할 때 기존의 순간전압강하 평가 방법을 적용한 경우와 본 논문에서 제안하는 평가 방법을 적용한 결과를 비교한 표이다. 풍력발전의 동작 특성을 반영한 경우와 그렇지 않은 경우의 평가 결과는 작게는 3% 많게는 37% 정도의 오차를 보인다.

표 7. 기존의 순간전압강하 평가 방법과의 결과 비교(1기 존재)

Voltage sag magnitude [p.u.]	기존의 방법 [sags/year]	제안하는 방법 [sags/year]	오차[%]
≤0.9	12.045	13.637	11.671
≤0.8	4.573	6.548	30.164
≤0.7	2.358	3.491	32.464
≤0.6	1.422	2.116	32.785
≤0.5	0.886	1.424	37.771
≤0.4	0.655	0.974	32.787
≤0.3	0.531	0.662	19.733
≤0.2	0.440	0.470	6.385
≤0.1	0.220	0.228	3.413

### 3.2 계통내 2기의 풍력 발전이 존재하는 경우

전력계통내 2기의 풍력 발전이 존재하므로 52번 모선에 설치된 풍력발전이 단독으로 동작하는 경우( $ST_{52}$ ), 54번 모선에 설치된 풍력발전이 단독으로 동작하는 경우( $ST_{54}$ ), 52번 모선과 54번 모선에 설치된 풍력 발전이 동시에 동작 하는 경우( $ST_{52,54}$ ), 52번 모선과 54번 모선에 설치된 풍력 발전이 모두 동작하지 않는 경우( $ST_0$ )의 4가지 상태가 존재하게 된다. 이 때 각 상태  $ST_j$ 에 대한 풍력발전 동작 확률은 다음과 같이 구해진다.

$$P(ST_{52,54}) = P(52BUS \cap 54BUS) \\ = 0.679 \times 0.802 = 0.545$$

$$P(ST_0) = P(52BUS^c \cap 54BUS^c) \\ = 0.318 \times 0.196 = 0.062$$

$$P(ST_{52}) = P(52BUS) - P(52BUS \cap 54BUS) \\ = 0.679 - 0.545 = 0.134$$

$$P(ST_{54}) = P(54BUS) - P(52BUS \cap 54BUS) \\ = 0.802 - 0.545 = 0.257$$

다음으로  $ST_j$  상태별로 순간전압강하 평가를 수행하였으며 그 결과는 표 8에 정리하였다. 표 8의  $ST_j$  상태별 순간전압강하 평가 결과와 식 (9)에 의해 풍력 발전 동작 특성을 반영한 최종 순간전압강하 평가 결과는 표 9과 같다.

표 10은 계통내 2기의 풍력 발전이 존재할 때 기존의 순간전압강하 평가 방법을 적용한 경우와 본 논문에서 제안하는 평가 방법을 적용한 결과를 비교한 표이다. 풍력발전의 동작 특성을 반영한 경우와 그렇지 않은 경우의

평가 결과는 작게는 11% 많게는 41% 정도의 오차를 보인다.

표 8. 각 상태별 순간전압강하 평가 결과(2기 존재)

Voltage sag magnitude [p.u.]	$ST_{52,54}$	$ST_{52}$	$ST_{54}$	$ST_0$
$\leq 0.9$	7.069	12.045	14.2015	17.164
$\leq 0.8$	2.574	4.573	5.411	10.826
$\leq 0.7$	1.303	2.358	3.175	5.945
$\leq 0.6$	0.962	1.422	1.854	3.617
$\leq 0.5$	0.803	0.886	1.166	2.586
$\leq 0.4$	0.605	0.655	0.866	1.665
$\leq 0.3$	0.496	0.531	0.626	0.947
$\leq 0.2$	0.312	0.440	0.367	0.538
$\leq 0.1$	0.151	0.220	0.178	0.247

표 9. 풍력발전 동작 특성을 고려한 평가 결과(2기 존재)

Voltage sag magnitude [p.u.]	ESF [sags/year]
$\leq 0.9$	10.181
$\leq 0.8$	4.078
$\leq 0.7$	2.211
$\leq 0.6$	1.415
$\leq 0.5$	1.016
$\leq 0.4$	0.743
$\leq 0.3$	0.561
$\leq 0.2$	0.357
$\leq 0.1$	0.173

표 10. 기존의 순간전압강하 평가 방법과의 결과 비교(2기 존재)

Voltage sag magnitude [p.u.]	기존의 방법 [sags/year]	제안하는 방법 [sags/year]	오차[%]
≤0.9	7.069	10.181	30.565
≤0.8	2.574	4.078	36.874
≤0.7	1.303	2.211	41.064
≤0.6	0.962	1.415	32.055
≤0.5	0.803	1.016	21.006
≤0.4	0.605	0.743	18.566
≤0.3	0.496	0.561	11.662
≤0.2	0.312	0.357	12.529
≤0.1	0.151	0.173	12.591

표 11은 표 7과 표 10의 오차 값을 비교한 결과 이다. 계통내 1기의 풍력 발전이 존재하는 경우와 2기의 풍력 발전이 존재하는 경우의 오차가 감소한 경우도 있지만 2기의 풍력 발전이 존재 할 때 전반적으로 오차가 증가하는 경향을 보인다. 계통내 풍력 발전이 증가 할수록 이런 오차는 증가 할 수 있다.

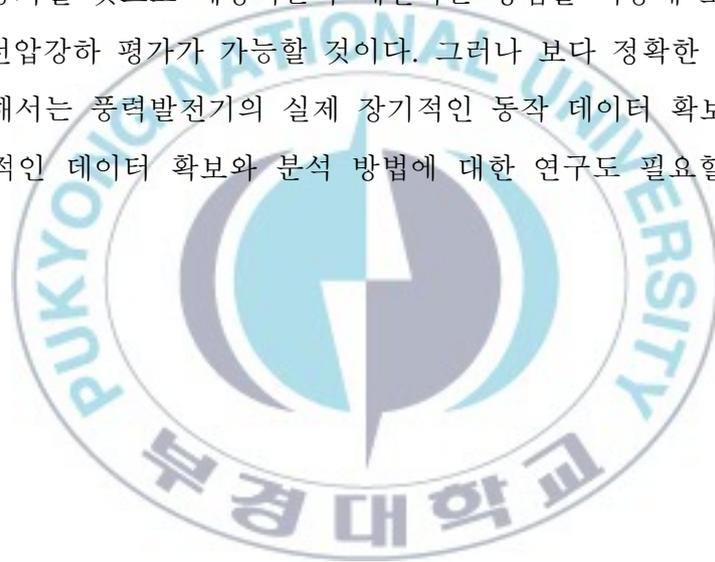
표 11. 표 7과 표 11의 오차 비교

Voltage sag magnitude [p.u.]	1기의 풍력 발전 존재시 오차 [%]	2기의 풍력 발전 존재시 오차 [%]
≤0.9	11.671	30.565
≤0.8	30.164	36.874
≤0.7	32.464	41.064
≤0.6	32.785	32.055
≤0.5	37.771	21.006
≤0.4	32.787	18.566
≤0.3	19.733	11.662
≤0.2	6.385	12.529
≤0.1	3.413	12.591



## 제 4 장 결 론

본 논문에서는 풍력발전의 동작 특성을 반영한 순간전압강하 평가 방법에 대해 기술하였다. 기존의 순간전압강하 평가 방법에서는 풍력 발전의 특성을 반영할 수 없기 때문에 다수의 풍력 발전이 계통에 존재할 경우 평가 결과의 오차가 커 질 수밖에 없다. 제안하는 방법에서는 풍속과 발전기 출력 모델을 평가에 반영함으로써 보다 정확한 평가가 가능하다. 확률적으로 모델링된 풍속 모델과 풍력 발전의 출력 모델을 이용하여 풍력 발전의 동작 확률을 결정하고 그 값을 순간전압강하 평가에 반영하였다. 앞으로 풍력 발전은 꾸준히 증가할 것으로 예상되는바 제안하는 방법을 이용해 보다 신뢰도 높은 순간전압강하 평가가 가능할 것이다. 그러나 보다 정확한 풍력발전 모델링을 위해서는 풍력발전기의 실제 장기적인 동작 데이터 확보가 필요한 만큼 지속적인 데이터 확보와 분석 방법에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.



## 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]송승호 역, 태양광 풍력발전과 계통연계기술, 성안당, 2011
- [3]Leon Freris, David Infield, Renewable Energy in Power Systems, Wiley, 2011
- [4]M. H. J. Bollen, "Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, no. 6, pp. 1414-1423, Nov./Dec. 1996.
- [5]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, Jan.-Feb. 1991.
- [6]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, No1, pp. 152-162, 1999.

[7]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, Jul. 2007.

[8]고경남, 허종철 공역, 풍력공학입문, 문운당, 2006.

[9]Kyeonghee Cho and Jaeseok Choi, "Web based Online Real-time Reliability Integrated Information System in Composite Power System Considering Wind Turbine Generators ", The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.60 No.7, pp. 1305-1313, 2011.

[10]J. H. Jang, Fundamentals of Wind Turbine, Interscience, 2010.

[11]Masters, C.L., Mutale, J., Strbac, G., Curcic, S. and Jenkins, N., "Statistical evaluation of voltages in distribution systems with embedded wind generation", IEE Proc.-Gener, Transm and Distrib, vol.147, no.4, pp. 207 - 212, 2000.

[12]IEEE 57-Bus Test Case, [Online]. Available:  
[http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf57/pg\\_tca57bus.htm](http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf57/pg_tca57bus.htm).

## 감사의 글

졸업을 앞두고 이런저런 생각을 하게 됩니다. 학과 공부를 더 하고 싶다는 생각에 석사과정을 선택하긴 했지만 막상 닥쳐보니 버거운 나날들이었습니다. 끝까지 할 수 있을까? 하는 생각을 수십 수백번 이었고 중간에 포기하고 싶은 순간도 무수히 많았습니다. 이러한 일들이 지나고 보니 추억이 됩니다. 훗날 내 인생을 되돌아보았을 때 이 2년 동안의 시간 때문에 웃을 수 있을 것 같습니다. 그리고 이 시간들을 자랑스러워 할 수 있을 것 같습니다.

석사를 한다고 할 때 응원해 주신 나의 가족들, 아마 어머니, 아버지, 형, 형수님이 없었으면 중간에 포기 했을지도 모릅니다. 나에게 무한한 사랑을 주고 배려해 주신 나의 가족에게 감사드립니다. 그리고 석사 과정동안 전폭적인 지지와 지원을 아끼지 않고, 제가 부족한 부분을 꼼꼼하게 지도해 주신 박창현 교수님께 감사드립니다. 처음 실험실에 들어와 힘들 때 많은 위로와 격려를 주시고 때로는 친구처럼 때로는 형처럼 저를 대해주신 박종일 선배님께도 감사드립니다. 대학을 갓 입학한 신입생 때부터 지금까지 나의 대학생활에 활력을 불어 넣어주고 힘이 되어준 농구 동아리 스타피쉬 선후배 여러분에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

2013 년 2월

송 영 원 올림