

타입별 풍력 발전기 설치에 따른 민감 부하의 순간전압강하 저감 효과 비교 분석 연구

A Study of the Mitigating Effect Comparison of Voltage Sags by WTG Types Based on the Concept of Area of Vulnerability

박 세 준* · 윤 민 한†
(Se-Jun Park · Min-Han Yoon)

Abstract - In modern society, the number of industrial customers using equipment sensitive particularly to voltage sags is rapidly increasing. As voltage sags can cause loss of information as well as false operation of the control device, it results in the vast economic damage in industrial processes. One way to mitigate voltage sags in the sensitive loads is the installation of distributed generation (DGs) on the periphery of these loads. In addition, renewable energy sources are currently in the spot light as the potential solution for the energy crisis and environmental issues. In particular, wind power generation which is connected to a grid is rising rapidly because it is energy efficient and also economically feasible compared to other renewable energy sources. On the basis of the above information, in this paper, with Wind Turbine Generators (WTGs) installed nearby the sensitive load, the analysis of the mitigating effect comparison by types of WTGs is performed using voltage sag assessment on the IEEE-30 bus test system. That is, the areas of vulnerability according to types of WTGs are expected to be different by how much reactive power is produced or consumed as WTG reactive power capability is related to the types of WTGs. Using the concept of 'Vulnerable area' with the failure rate for buses and lines, the annual number of voltage sags at the sensitive load with the installation of WTGs per type is studied. This research will be anticipated to be useful data when determining the interconnection of wind power generation in the power system with the consideration of voltage sags.

Key Words : Power quality, Voltage sag, Wind turbine generator, Area of vulnerability

1. 서 론

현대 사회에 접어들며 전력 계통에 있어서의 전력품질이 점차 이슈화되고 있다. 전류, 전압, 주파수 등의 변화로 인해 기기의 오동작이나 고장을 야기하는 모든 문제를 전력품질 문제라 한다. 이러한 전력품질에 대한 관심의 증대는 현대의 전력 기기들이 점점 전력품질에 민감해지고 있으며, 산업 공정 또한 점차 자동화 되어감에 따라 전력품질 특히 전압변동에 민감한 반도체 소자들로 주로 구성되어지기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 부하들을 민감 부하라고 통칭한다. 전력품질 문제 중 특히 RMS 전압이 정격전압 이하로 떨어지는 순간전압강하나 순간정전으로 인해 제어기의 오동작이나 민감 부하의 탈락이 발생함으로써 막대한 경제적 손실이 발생한다 [1]. 이러한 경제적 손실 외에도 순간전압강하로 인한 공급자와 수용가간의 책임 소재 분쟁 또한 증가하고 있다. 이러한 순간전압강하 문제의 대책으로서는 외란으로부터 민감 부하를 최대한 고립시키거나 충분한 용량의 변압기와 선

로 사용 또는 보상설비의 설치를 들 수 있다. 이 외에도 전압변동에 민감한 부하 모선 근처에 분산전원을 설치함으로써 순간전압강하 저감을 할 수 있는 것으로 알려져 있다 [2]. 또한, 순간전압강하 평가에 있어 취약지역(Area of Vulnerability)이라는 중요한 개념이 있다. 즉, 특정 민감 부하 모선의 주어진 한계 전압값 이하의 사고전압을 야기하는 계통 내 사고 위치들의 집합을 추정함으로써 취약지역을 산정할 수 있다. 취약지역과 계통의 선로 길이 데이터를 이용하여 정확한 취약지역의 길이를 계산할 수 있으며, 이를 기반으로 계통 내 사고율 데이터를 통해 특정 지점에서의 순간전압강하 발생횟수를 평가할 수 있다. 이러한 순간전압강하 평가 및 예측을 통해 사전에 보다 효과적인 대책 수립이 가능하다.

최근 신재생 에너지원은 에너지 고갈 위기와 환경위기에 따른 대안으로 각광받고 있다. 특히, 풍력발전은 다른 신재생에너지원에 비해 발전 효율과 경제성이 높아 공급 비중이 가장 빠르게 증가하고 있다. 본 논문에서는 위 정보들을 토대로 순간전압강하 저감 대책으로 민감 부하 모선 주변에 타입별 풍력 발전기 설치에 따른 저감 효과를 비교 검토하고자 한다. 따라서 무효전력 특성이 다른 타입별 풍력 발전기 설치로 인한 민감 모선에서의 취약지역 계산을 수행하고, 이를 토대로 관할 모선의 타입별 연간 순간전압강하 발생 횟수 비교를 수행하고자 한다. 풍력 발전기의

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Tongmyong University, Korea.
E-mail: minhan.yoon@gmail.com

* Hyundai Electric, Korea.

Received : September 4, 2017; Accepted : November 13, 2012

계통 연계가 점차 높아가고 있는 현 계통 상황에서 분산 전원을 포함한 순간전압강하 평가를 수행함으로써 풍력 발전기의 계통 연계 계획 시 유용한 판단 자료로 활용될 것이라 판단된다.

따라서 본 논문에서는 순간전압강하 평가에 있어 취약지역 (Area of vulnerability)이라는 중요한 개념을 설명하고, 타입별 풍력 발전기 모델링을 포함한 순간전압강하 평가 알고리즘을 소개한다. 제안된 알고리즘을 이용하여 민감 부하에서의 순간전압 강하를 저감시키기 위해 무효전력 특성이 다른 타입별 풍력 발전기를 관찰 모션 근처에 설치하여 저감 효과를 비교 분석하고자 한다. 즉, 선로 탈락이나 발전기 탈락과 같은 외란에 대해 민감 부하 모션이 순간전압강하를 겪을 때 타입별 풍력 발전기의 출력 특성을 반영하여 타입별 풍력 발전기 설치에 의한 순간전압강하 저감 효과를 비교 검토하였다. 풍력 발전은 '지역 분산 형 전원'으로 많이 설치되고 있는 가스복합발전과 달리 출력량이 풍속에 크게 의존하기 때문에 이러한 불규칙적인 출력 특성을 고려하여 타입별 풍력 발전기 모델링을 포함한 순간전압강하 평가를 수행하였다. 이를 위해 타입별 무효전력 특성을 비교하고, 이에 따른 타입별 풍력발전기 모델링 과정을 소개하였다. 또한, 다양한 풍속 조건에 따른 타입별 무효전력 출력량을 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 사례 연구에서는 IEEE-30 모의 계통 내 특정 민감 부하 모션(BUS 30)에 대해 주변 선로 탈락(Line 27-28)과 같은 상정사고 발생 시 타입별 풍력 발전기 설치에 따른 관찰 모션의 연간 순간전압강하 발생 횟수를 비교 분석하였다. 즉, 계통 내 선로 길이 데이터를 이용하여 다양한 풍속 조건에 대해 타입별 취약지역 길이 계산을 선행하였고, 이를 기반으로 풍력 발전기가 설치될 지역의 연간 풍속 데이터와 계통 내 사고율 데이터를 이용하여 순간전압강하 평가를 수행하였다.

2. 타입별 풍력 발전기 모델링

2.1 풍속에 따른 유효전력 출력 모델링

세계 주요 업체들은 5MW급 이상의 대형 풍력발전 시스템을 개발 완료하였으며, 해상풍력발전을 중심으로 풍력 발전기 용량이 점차 대용량화되어 가고 있다. 따라서 본 논문에서는 미국 신재생에너지 분야의 대표적 국책연구기관인 NREL의 5MW baseline 모델을 근거로 발전기 모델링을 수행하였다[5]. IEEE-30 모의 계통 내 특정 민감 부하 모션 근처에 20MW 규모의 풍력발전단지를 설치한다고 가정하였고, 위의 NREL 5MW 급 풍력 발전기 데이터를 근거로 풍속에 따른 유효전력 출력 모델링을 수행하였다. 풍속에 따른 유효전력 출력량은 아래 수식을 통해 모델링 하였다 [6,7]. 정격 풍속 (v_R) 이상에서는 유효 전력 출력이 P_W^{max} 로써 일정하게 되고, 정격 풍속 이하 Cut-in 풍속 (v_{CI}) 이하거나 Cut-out 풍속 (v_{CO}) 이상에서는 풍력발전기의 출력을 0으로 한다. Cut-in 풍속과 정격 풍속 사이에서는 현재 풍속 (v)과 Cut-in 풍속의 차와 정격 풍속과 Cut-in 풍속 차이의 비를 P_W^{max} 에 곱하여 증가하도록 모의하였다. 그리고 타입별 풍

력 발전기의 무효전력 특성에 따른 민감 부하 모션에서의 순간전압강하 저감 효과를 비교 분석하기 위해 동일한 풍속 조건에 대해 타입별 유효전력 출력량은 동일하다고 가정하고 사례 연구를 수행하였다.

$$P_{wt}^* = \begin{cases} P_W^{max} \frac{v^K - v_{CI}^K}{v_R^K - v_{CI}^K} & (v_{CI} \leq v \leq v_R) \\ P_W^{max} & (v_R \leq v \leq v_{CO}) \\ 0 & (v \leq v_{CI} \text{ and } v > v_{CO}) \end{cases} \quad (1)$$

2.2 풍력 발전기 타입별 무효전력 출력 모델링

풍력 발전기의 계통 내 무효전력 공급 능력은 타입별로 다른 특성을 갖는다. 즉, 분산 전원으로 계통에 투입된 풍력 발전기의 타입별 무효전력 특성에 따라 계통 내 무효전력을 얼마나 공급하고 소모하느냐에 따라 민감 부하 모션의 취약지역 또한 달라진다. Type 1, 2 풍력 발전기는 유도 전동기를 사용한다. 구조가 간단하고 비교적 저렴한 설치비용으로 많은 국가에서 보편적으로 채택되고 있다. 그러나 계통 연계 지점에서의 전압 조정 능력이 부족함에 따라 유도 전동기만을 사용하는 풍력 발전기는 계통에 무효 전력을 공급하지 못 한다. 즉, 이러한 풍력 발전기는 초기 기동 시 많은 양의 전류를 소모할 뿐만 아니라 발전을 위해 계통으로부터 많은 양의 무효 전력을 소모한다. 전력조류 계산 모델에서 Type 1, 2 풍력 발전기의 계통 내 무효전력 소모량은 보통 유효전력 출력량의 50% 정도로 모델링 할 수 있다[3]. 본 논문에서의 모델링 및 취약지역 해석 과정에서는 Type 1과 Type 2의 구분이 무의미하기에 이제부터는 Type 2로 통칭하기로 한다.

유도 전동기와 달리, Type 3과 Type 4의 풍력 발전기는 역률을 컨버터와 발전기의 정격 용량 범위 안에서 원하는 값으로 조정할 수 있다[4]. 또한, 계통 연계 지점에서 전압을 조정할 수 있다. 따라서 Type 3, 4 풍력 발전기의 경우 자체적으로 무효전력을 제어할 수 있으며, 선로 탈락이나 발전기 탈락과 같은 외란 발생 시에 계통에 무효전력을 공급해 영향을 감소시킬 수 있다.

그림 1은 Type 3 풍력 발전기의 무효전력 특성을 보여준다 [8]. 즉, Type 3의 경우 컨버터와 발전기의 정격 용량 범위 안에서 역률을 조정함으로써 무효전력을 자체적으로 제어할 수 있다. 따라서 Type 3 풍력 발전기가 계통 내 전압 조정에 관여할 경우 발전기의 Q_{max} 와 Q_{min} 는 그림 1에 제시된 역률 범위를 기반으로 설정될 수 있다. 예를 들면, ± 0.95 의 역률 범위에서 Type 3 풍력 발전기의 Q_{min} 과 Q_{max} 는 100MW 유효전력 출력량에 대해 33Mvar와 -33Mvar로 설정될 수 있다[3]. Type 4 풍력 발전기의 경우 Type 3와 마찬가지로 자체적으로 무효전력을 제어할 수 있으며, 무효전력의 제어 범위는 컨버터의 용량에 따라 달라질 수 있다. 본 논문의 사례연구에서는 영국 그리드 코드에 맞게 공급되는 ABB사의 5MW 급 Type 4 풍력 발전기의 사례를 참조하여 Full-power Converter의 용량을 6MVA로 가정하였다 [13].

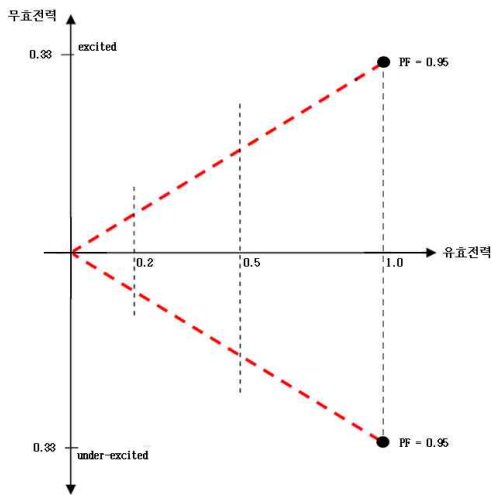


그림 1 Type 3 풍력 발전기의 무효전력 특성 [8]
 Fig. 1 Reactive power operation of Type 3 WG

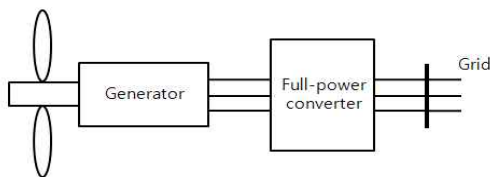


그림 2 Type 4 풍력 발전기 구성
 Fig. 2 The schematic diagram of Type 4 WG

2.4 다양한 풍속 조건에 따른 타입별 무효전력 출력량 비교

2.1~2.3절을 토대로 타입별 무효전력 특성을 반영하여 MATLAB을 통해 다양한 풍속 조건에 따른 타입별 무효전력 출력량을 비교하고자 한다. 즉, IEEE-30 모의 계통의 민감 부하 모선(BUS 30)에서 25km 떨어진 BUS 29에 20MW 규모의 풍력발전단지를 설치한다고 가정하고 주변 선로 탈락(Line 27-28)과 같은 상정 사고 발생 시 민감 부하 근처에 설치된 타입별 풍력발전기의 무효전력 출력량을 비교 분석하였다. BUS 29가 위치한 미국 버지니아 주(Virginia) 보터토티 카운티(Botetourt county) 클로버데일(Cloverdale) 지역의 2010년 연간 시간당 실제 풍속을 미국 국립기후자료센터인 National Climatic Data Center(NOAA)로부터 확보하여 시뮬레이션에 활용하였다[9].

다양한 풍속 조건에 따른 타입별 무효전력 출력량 차이를 살펴보기 위해 2010년 5월 12일(평균 풍속 10.56 m/s) 케이스를 통해 타입별 무효전력 출력량 비교 분석을 수행하였다.

다양한 풍속 조건에 따른 타입별 무효전력 출력량 차이를 그림 3을 통해 확인할 수 있다. 정격 풍속 11.4 m/s 이상일 때 Type 2, Type 3, Type 4의 타입별 무효전력 출력량은 -0.1, 0.066, 0.1327 pu 로 일정함을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. Cut-In 풍속과 정격 풍속 사이에서는 타입별 다른 특성을

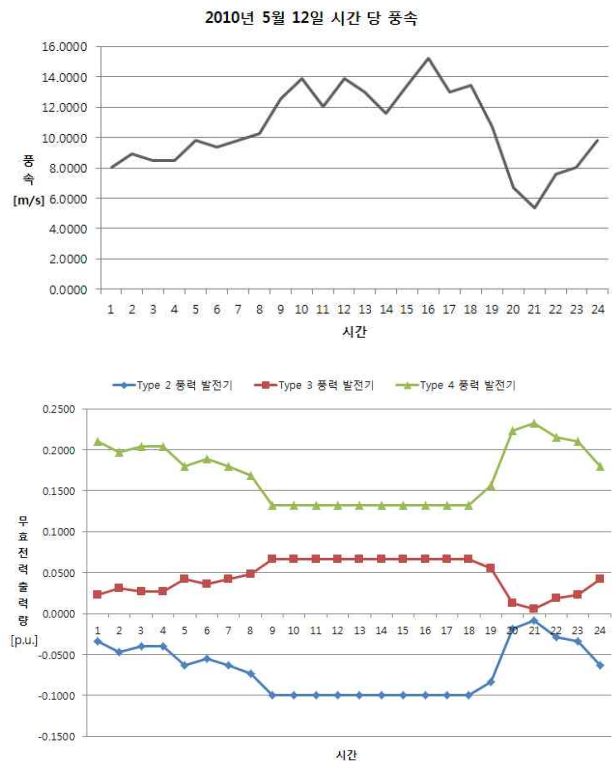


그림 3 2010년 5월 12일 풍속 데이터와 타입별 무효전력 출력량 비교
 Fig. 3 Wind speed versus reactive power output by WG type

확인할 수 있었다. Type 2 풍력 발전기의 경우 무효전력 소모량이 풍속에 비례하여 증가함을 확인할 수 있다. Type 3의 경우 무효전력 출력량이 풍속에 비례하여 증가함을 확인할 수 있었으며, 반대로 Type 4의 경우 무효전력 출력량이 풍속과 반비례함을 확인할 수 있다. 즉, 모든 풍속 조건에 상관없이 많은 무효전력을 출력하는 Type 4와 달리 Type 3는 낮은 풍속에서는 비교적 무효전력 출력량이 적고, 풍속이 높아짐에 따라 점차 비례하여 무효전력 출력량이 많아짐을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 이러한 타입별 무효전력 출력 특성의 차이는 타입별 풍력발전기 설치에 따른 민감 부하에서의 서로 다른 순간전압강하 저감 효과를 가져온다.

3. 순간전압강하 평가

3.1 취약지역(Area of Vulnerability)

순간전압강하 평가란 계통 내 사고에 대한 특정 기기 및 설비의 취약 범위(정도)를 평가해 보는 방법론이다. 순간전압강하 평가에 있어 취약지역(Area of vulnerability)이라는 중요한 개념이 있다. 즉, 특정 기기의 전압 민감도 또는 특정 민감 부하 모선의 주어진 한계 값 이하의 사고전압을 야기하는 계통 내 사고 위치들의 집합을 추정함으로써 취약지역을 산정할 수 있다. 기기 및

설비에 대한 취약지역 결정시 한계 전압이라 함은 계통 내 사고 등의 외란에 대해 오동작이나 탈락 없이 견뎌낼 수 있는 최소한의 전압 크기로 정의한다. 전압 범위 설정에 의한 취약지역 표시의 예는 그림 4를 통해 확인할 수 있다. 즉, 열은 영역에 포함된 선로 및 모선에 사고가 발생하면 해당 민감 부하 모선의 전압이 0.8pu 이하로, 마찬가지로 짙은 영역에 사고가 발생하면 해당 민감 부하 모선 전압이 0.5pu 이하가 됨을 나타낸다.

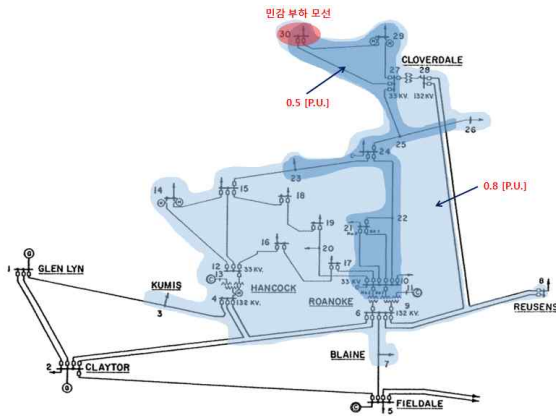


그림 4 취약지역(Area of vulnerability) 개념
 Fig. 4 The concept of Area of Vulnerability

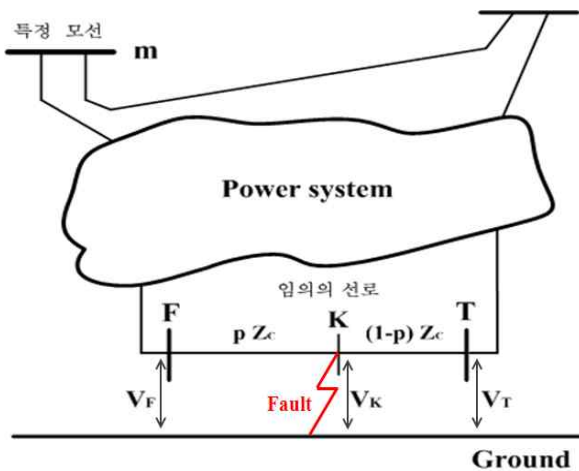


그림 5 임의의 선로 F-T에서의 사고 모식도
 Fig. 5 The schematic diagram of a fault in power system

취약지역을 계산하기 위해 그림 5에 나타난 바와 같이 임의의 선로 F-T의 사고 위치 K를 변수로 두고 선로 상에서 발생하는 사고로 대한 특정 모선 m에서의 사고 전압을 계산할 수 있는 전압강하 계산식을 구성하고자 한다. 사고 전압 계산을 위해서는 Driving-point impedance(임피던스 행렬의 대각요소)와 Transfer impedance(임피던스 행렬의 비대각 요소)를 알아야 한다. 사고 위치 K에서의 Driving-point impedance Z_{kk} 와 사고 위치 K와 특정 모선 m 사이의 Transfer impedance Z_{mk} 는 각각 아래와

같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{mk} = Z_{mF} + (Z_{mT} - Z_{mF})p \quad (2)$$

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

변수 p는 0과 1 사이의 값이며, p의 값에 따라 선로 위 사고의 위치가 결정된다. Z_C 는 선로 임피던스를 나타낸다. Z_{mk} 와 Z_{KK} 를 구하기 위한 Z_{mF} , Z_{mT} , Z_{FF} , Z_{TT} , Z_{FT} 는 계통의 임피던스 행렬(Z-BUS matrix)로부터 구할 수 있다. 또한, 취약지역 계산을 위해서는 Moving fault position K에서의 사고 전 전압 V_K^{pref} 을 알아야 한다. V_K^{pref} 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_K^{pref} = V_F^{pref} + (V_T^{pref} - V_F^{pref})p \quad (4)$$

위 수식에서 V_F^{pref} 와 V_T^{pref} 은 임의의 선로 양단 모선 F와 T에서의 사고 전 전압을 의미한다.

위 수식들을 통해 구한 Sequence impedance들과 pre-fault voltage equation을 이용하여 사고 위치 K에서 3상 사고가 발생했을 때 특정 부하 모선 m에서의 사고 전압식을 유도할 수 있고 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[11]

$$V_m^{fault} = V_m^{pref} - \frac{Z_{mK}^1}{Z_{KK}^1} V_K^{pref} \quad (5)$$

위의 수식들을 이용하여 특정 부하 모선 m에 주어진 전압 한계값을 야기하는 임의의 선로 F-T에서의 사고 위치 p를 찾을 수 있다. 계통 내 모든 선로에 대해 한계점(critical point) 위치 p를 찾게 되면 주어진 전압 한계값에 대한 취약지역을 결정할 수 있다. 그러나 사고 전압의 크기는 변수 p에 대한 4차 이상의 고차 분수 방정식이므로 직접적으로 해를 구하기 어렵다. 이에 2차 보간 방정식과 수치해석 방법 중 하나인 할선법을 이용하여 수치해석학적으로 근사해를 구한다[11].

3.2 풍력 발전기를 포함한 순간전압강하 평가

순간전압강하 평가를 위해서는 계통의 연결정보, 시퀀스 임피던스(정상, 역상, 영상), 그리고 모선별 사고 전 전압을 입력 데이터로 사용한다. 따라서 풍력 발전기가 투입된 계통의 순간전압강하 평가를 위해 입력 데이터인 사고 전 전압을 풍력 발전기를 포함한 계통의 전력조류 계산을 통해 구한 후 이를 입력 데이터로 사용하였다.

먼저 풍력 발전기가 설치될 지역의 실제 풍속 정보와 풍력 발전기 데이터(Rating, Cut-In Wind Speed, Cut-Out Wind Speed 등)를 이용하여 풍속에 따른 유효전력 출력 모델링을 수행한다. 다음으로 타입별 무효전력 특성을 고려한 무효전력 출력 모델링을 통해 타입별 풍력 발전기 모델링을 포함한 계통의 전력조류 계산을 수행한다. 타입별 풍력발전기를 포함한 순간전압강

하 평가 알고리즘은 다음과 같다.

WECC의 Power Flow Modeling Guide[3]를 근거로 Type 2 풍력 발전기의 경우 무효전력 소모량은 유효전력 출력량의 1/2로 모델링하여 부하 모션(PQ BUS)로 계통에 투입한다. Type 3과

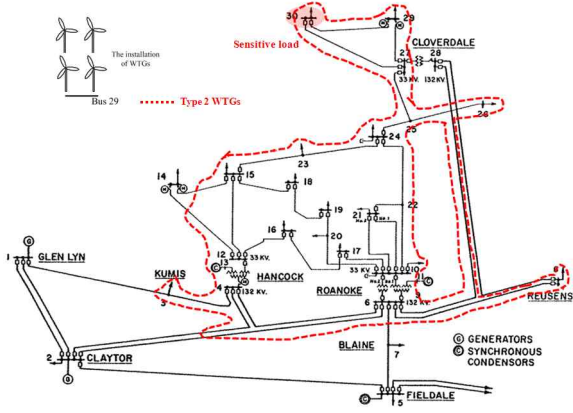


그림 6 Type 2 풍력 발전기 설치에 따른 민감 부하의 취약지역
Fig. 6 AOV with type 2 WG installation

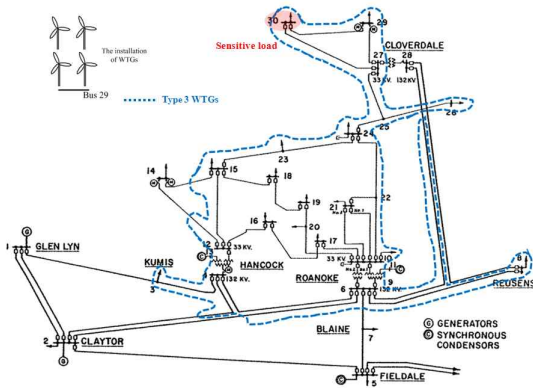


그림 7 Type 3 풍력 발전기 설치에 따른 민감 부하의 취약지역
Fig. 7 AOV with type 3 WG installation

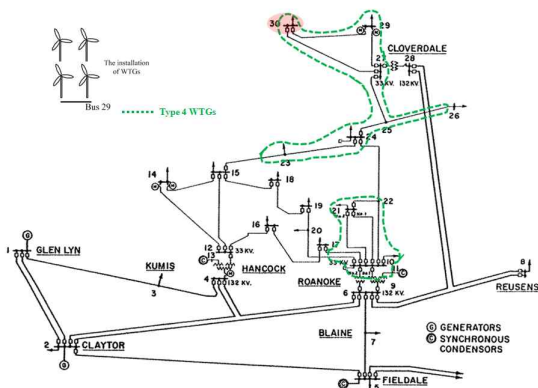


그림 8 Type 4 풍력 발전기 설치에 따른 민감 부하의 취약지역
Fig. 8 AOV with type 4 WG installation

표 1 타입별 풍력발전기 설치에 따른 Case 별 취약지역 결과

Table 1 The AOV length by WG type and wind speed

	None	Type 2	Type 3	Type 4
Case 1 (5.49 m/s)	1075.9 [km]	1056.2 [km]	1048.3 [km]	264.2 [km]
Case 2 (9.03 m/s)	1075.9 [km]	1053.4 [km]	713.4 [km]	260.5 [km]
Case 3 (13.50 m/s)	1075.9 [km]	1098 [km]	465.9 [km]	260.8 [km]

Type 4 풍력 발전기의 경우 발전기 모션(PV BUS)으로 계통에 투입하게 되는데 무효전력 출력량이 Q_{max} 보다 클 경우 Q 출력량을 Q_{max} 값으로 고정, Q_{min} 보다 작을 경우 Q 출력량을 Q_{min} 값으로 고정하고 이후 부하 모션(PQ BUS)로 취급하여 반복 계산을 수행한다. 이러한 과정을 통해 얻은 각 모션의 전압크기를 이용하여 풍력 발전기를 포함한 순간전압강하 평가를 수행할 수 있다.

그림 6-8은 풍력 발전기가 설치될 지역(BUS 29)인 클로버데일(Cloverdale)의 풍속 조건이 5.49m/s(Case 1)일 때, 선로 탈락(Line 27-28) 상정 사고 발생 시 민감 부하 근처(BUS 29)에 타입별 풍력 발전기설치에 따른 관찰 모션(BUS 30)의 3상 사고에 대한 타입별 취약지역 결과를 나타낸다.

관찰 모션의 한계 전압값은 0.5pu 로 설정하였으며, 위 결과들을 토대로 타입별 풍력 발전기 설치에 따른 취약지역 길이를 비교 분석하고자 한다. 풍속에 따른 취약지역의 변화를 분석하기 위해 Case 2(평균풍속 9.03 m/s)와 Case 3(평균풍속 13.50 m/s) 시나리오에 대해서도 타입별 취약지역을 계산하였다. 다양한 풍속 조건에 따른 타입별 풍력 발전기 설치에 따른 민감 부하에서의 Case 별 취약지역 결과는 표 1과 같다. 즉, 취약 지역이 넓을 수록 관찰 모션이 순간전압강하로 피해를 입을 확률이 높다고 판단할 수 있다.

계통 내 무효전력을 제어 못 하는 Type 2 풍력 발전기를 설치할 경우 다양한 풍속 조건에 따라 아주 미비하게 취약지역이 줄어들거나(= 순간전압강하로 피해를 입을 확률이 작아지거나) 오히려 더 늘어남을 확인할 수 있었다. Type 3과 Type 4 풍력 발전기를 설치할 경우 민감 부하 모션의 취약지역이 감소함을 확인할 수 있었는데, 풍속 조건에 따라 서로 다른 감소 패턴을 확인할 수 있다. Type 4 풍력 발전기를 설치할 경우 순간적인 전압 강하에 대해 풀(Full) 컨버터 타입의 무효전력 제어 범위가 곧 전압 제어 범위를 가지게 되므로 다양한 풍속 조건에 대해 민감 부하 모션의 취약지역이 약 810[km] 정도 크게 감소함을 확인할 수 있다. 그러나 정격 용량 대비 작은 용량의 컨버터가 전압 제어를 하게 되며 2.2절에서 설명한 바와 같이 유효전력의 출력량에 따라 무효전력 제어 범위가 바뀌는 Type 3 풍력 발전기를 설치할 경우 취약지역 감소량이 풍속 조건에 크게 좌우됨을 확인할 수 있다. 즉, 비교적 낮은 풍속(Case 1)에서는 취약지역 감소량이 Type 2 풍력 발전기를 설치하는 경우와 큰 차이가 없지만, 풍속 크기가 커질수록 감소량이 크게 증가함을 확인할 수



그림 9 2010년 5월 29일 시간당 풍속에 따른 타입별 취약지역 길이 변화

Fig. 9 Variation of AOV length by WG type according to wind speed

있다.

따라서 민감 부하 모션 근처에 Type 4 풍력 발전기를 설치할 경우 다른 Type 에 비해 취약지역 감소량이 가장 큰 것(= 순간전압강하로 피해를 입을 확률이 가장 작음)을 확인할 수 있다.

실제 시간당 풍속에 따른 타입별 취약지역 길이의 변화패턴을 그림 9를 통해 살펴볼 수 있다. Type 2와 Type 4는 3~11[m/s]의 풍속 변화에 취약지역의 길이 변화 폭이 크지 않음을 확인할 수 있었으며, 반대로 Type 3의 경우 풍속 변화에 따라 취약지역의 길이 변화 폭이 큼을 확인할 수 있다. 또한, Type 3와 4 모두 풍속 크기에 비례하여 취약지역이 줄어들었음(= 순간전압강하로 피해를 입을 확률이 작아짐)을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 IEEE-30 모의 계통 내 민감 부하에서의 순간 전압강하 피해를 저감시키기 위해 무효전력 특성이 다른 타입별 풍력 발전기를 민감 부하 근처에 설치하여 피해 저감효과를 비교 분석하였다. 보다 정확한 평가를 위해 풍속 모델링과 타입별 풍력발전 출력 특성을 포함한 순간전압강하 평가 알고리즘을 구성하여 시뮬레이션을 모의하였다.

다양한 풍속 조건에 따른 타입별 풍력 발전기 설치에 따른 민감 부하에서의 취약지역 감소량은 Type 2의 경우 풍속 조건에 따라 아주 미비하게 취약지역이 감소하거나 오히려 더 증가함을 확인할 수 있었다. Type 3와 Type 4 풍력 발전기를 설치할 경우 풍속 범위에 따라 서로 다른 감소 패턴을 확인할 수 있다. 즉, Type 4 풍력 발전기의 경우 풍속 크기에 상관없이 모든 풍속 조건에 민감 부하 모션의 취약지역이 대폭 감소하였으나, Type 3 풍력 발전기의 취약지역 감소량은 풍속 조건에 크게 좌우됨을 확인할 수 있다. 예를 들어, 낮은 풍속에서는 취약지역 감

소량이 Type 2 풍력 발전기를 설치하는 경우와 큰 차이가 없지만, 풍속 크기가 커질수록 취약지역 감소량이 크게 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 다양한 풍속 조건에 따른 타입별 취약지역 계산과 계통 내 사고율 데이터를 이용하여 타입별 순간전압강하 평가(타입별 연간 순간전압강하 발생 횟수 추산)를 수행하였다.

풍력 발전기의 계통 연계가 점차 늘어가고 있는 현 계통 상황에서 풍력 발전기(분산 전원)를 포함한 순간전압강하 평가를 수행함으로써 풍력 발전기의 계통 연계 계획 시 순간전압강하 측면에서 유용한 판단 자료로 활용될 것이라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (NRF-2017R1C1B5018073)

References

- [1] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, Piscataway, NJ, 2000, IEEE Power Engineering Series.
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw-Hill, 2002, ch.3.
- [3] WECC Wind Power Plant Power Flow Modeling Guide, WECC Wind Generator Modeling Group, May. 2008.
- [4] Lianxiang Tang, Yan. A, Marti. L, Fuerth. J, "Determination of distributed generation capacity from a voltage regulation perspective", IEEE PES, pp. 1-8, 2012.
- [5] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Feb. 2009.
- [6] BOROWY B.S., SALAMEH A.M., "Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind/PV system", IEEE Trans. Energy Convers., pp. 482-488, 1994.
- [7] GAVANIDOU E.S., BAKIRTZIS A.G., "Design of a standalone system with renewable energy sources using trade-off methods", IEEE Trans. Energy Convers., pp. 4248, 1992.
- [8] I. Erlich, M. Wilch, C. Feltes, "Reactive Power Generation by DFIG Based Wind Farms with AC Grid Connection", Power Electronics and Applications, 2007 European Conference.
- [9] Annual hourly wind speed Data of Cloverdale, Virginia, National Climatic Data Center(NOAA), [Online]. Available: <http://www.noaa.gov/>

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] IEEE 30-Bus Test Case, [Online]. Available: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tc_a30bus.htm
- [13] Converter rating on UK grid code, [Online]. Available: [http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/c4de28147e528b0cc1257a8b00595934/\\$file/PCS6000Wind_3BHS351272_E01_RevA.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/c4de28147e528b0cc1257a8b00595934/$file/PCS6000Wind_3BHS351272_E01_RevA.pdf)

저 자 소 개



박 세 준 (Se-Jun, Park)

1986년 5월 17일생. 2012년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업(공학사). 2014년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년~2015년 현대중공업 미래기술연구소. 2015년~현재 현대일렉트릭

E-mail : sejun.park@hyundai-electric.com



윤 민 한 (Min-Han, Yoon)

1984년 8월 16일생. 2009년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업(공학사). 2015년 동대학원 전기공학과 졸업(석박사통합). 2015년~2017년 한국전기연구원 선임기술원. 2017년~현재 동명대학교 전기공학과 조교수

E-mail : minhan.yoon@gmail.com