

풍력발전기의 계통연계 운전시 출력변동에 따른 PCC 전압 변동 예측모델

김상진, 임지훈*, 송승호*, 성세진
 충남대학교 전기정보통신공학부, 광운대학교 전기공학과*

Prediction Model for PCC Voltage Variation due to Active Power Fluctuation of Grid Connected Wind Turbine

Sang Jin Kim, Ji Hoon Im*, Seung Ho Song* and Se Jin Seong
 Dept. of Electrical Engi. and Information & Communication Engi. Chungnam University
 Dept. of Electrical Engi. Kwangwoon University*

ABSTRACT

고립된 소규모 전력시스템에 소형 풍력발전기를 계통연계 운전할 때 나타날 수 있는 전압변동을 예측하기 위한 방법에 관해 연구하였다. 이를 위하여 고립된 계통에 연결된 기준발전소 및 부하, 변압기, 풍력발전기의 간략화된 시뮬레이션 모델을 PSCAD/EMTDC를 기반으로 구성하고 실제 설치된 풍력발전기의 운전 특성과 비교하였다. 특히, 연계점의 전압변동을 해석적으로 예측하기 위하여 전원측 등가 임피던스와 부하측 등가 임피던스로 구성된 간략화된 모델을 제안하였으며 제안된 방법으로 계산된 전압변동량이 시뮬레이션 및 실측 데이터와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이 결과는 소형 풍력발전기 계통연계 시스템 설계 및 사전검토 단계에서 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 도구로 활용될 수 있다.

1. 서 론

최근 급격한 유가상승과 온실가스로 인한 지구온난화 문제가 심각해지면서 연료비가 들지 않고 환경오염이 거의 없는 신재생에너지가 각광을 받고 있다. 풍력발전의 경우 최근 그 수요가 급증하고 있으며 세계적으로 가장 빠르게 성장하는 에너지원이다. 도서지역의 경우는 발전 연료비 및 수송비로 인한 발전비용 상승 등의 문제점 때문에 풍부한 풍력자원을 활용한 풍력발전기가 매력을 갖기에 충분하다.^[1-2]

풍력발전은 기존의 발전시스템에 비해 원동기에 해당하는 바람의 조절이 불가능하며 불규칙적으로 변동한다는 점이 근본적으로 다르다. 이와 같은 차이점들은 결국 풍력발전기가 기존 전력 시스템과 어떻게 상호작용을 할 것인지 예측하기 어렵게 만드는 요인이 된다. 따라서 풍력발전은 기존 발전제어 설비와의 병렬 운전 시 연계지점의 전력 품질이 악화 될 염려가 있고 이에 대한 사전검토와 해석이 필요하다.^[3]

본 연구는 전력 품질의 여러 요소 중에서 전압 변동의 측면에서 풍력발전기의 연계를 검토하고자 한다. 풍력발전기 출력의 변동 이외에 어떤 요소들이 PCC(Point of Common Coupling) 전압 변동에 중요한 역할을 하는지, 검토하고 설치할 풍력발전기 정격용량과 계통연계 지점의 단락 용량을 바탕으로 미리 최대 전압 변동량을 예측하고자 한다. 궁극적으로는 본 연구를 통해 소형 풍력발전 시스템을 국내의 도서지역에 설치, 운전 시에 전압변동을 포함한 전력품질의 예측이 가능하고

프로젝트 수행의 안정성과 신뢰성을 확보하여 도서지역의 전력 생산비용을 절감하고 신재생에너지원의 공급비율을 향상시키는데 기여할 것으로 기대한다.

2. 본 론

2.1 삼시도 계통의 간략화 모델

소형 풍력발전기의 계통연계 모델을 개발하고 검증하기 위해 충청남도 보령의 삼시도의 계통을 간략화하여 모델링하였다. 디젤엔진을 기반으로 기존 발전시스템과 변압기, 선로, 부하 등을 최대한 간략화하여 모델링하였으며 10[kW]급 풍력발전기가 연계된 지점을 PCC (Point of Common Coupling)로 간주하여 그림 1에 표시하였다. 구성요소별 세부 파라미터는 표 1에 나타낸 것과 같다.

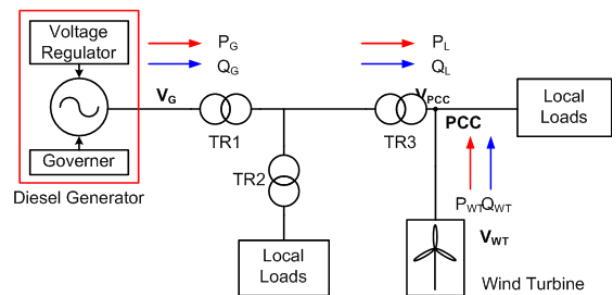


그림 1 삼시도 전력 시스템
 Fig. 1 Power System in Sapsi-do

표 1 삼시도 전력 시스템 파라미터
 Table 1 Power System Parameters in Sapsi-do

구분	설 명	비 고
Diesel Generator	자가발전기(총 4대)	150[kVA] 2대 300[kVA] 2대
TR1	380/6600[V] 변압기	750[kVA]
TR2	6600/380[V] 변압기	120[kVA]
TR3	6600/380[V] 변압기	15[kVA]
Wind Turbine	BERGEY, BWT-10240	단상 10[kW]

2. 2 삼시도 계통의 시뮬레이션 모델링

본 논문에서는 삼시도의 배전 시스템의 시뮬레이션 모델을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 개발하였고, 이를 이용하여 풍력발전기 출력변화를 모의하였다. 그림 1의 삼시도 배전 시스템을 바탕으로 시뮬레이션 모델을 구성하였으며 발전소의 여자와 가버너는 이상적인 것으로 가정하였다.

최신 디지털 신호 처리기 (DSP : Digital Signal Processor)를 채용한 계통연계형 인버터는 풍력발전뿐만 아니라 태양광, 연료 전지 등 분산전원의 가변 직류전압 출력을 일정 전압 및 일정 주파수로 유지되고 있는 전력계통에 연결하여 주는 역할을 수행한다. PWM 스위칭 방식으로 동작하는 인버터 자체의 손실이 매우 작다고 가정하면 입력되는 직류전력과 거의 동일한 교류전력을 출력하게 되고 이것은 결국 출력전류의 변동으로 나타나게 된다.

그림 2는 일반적인 계통연계형 인버터의 내부 구조와 이러한 계통연계형 인버터의 간략화된 등가 모델링을 나타내었다. 교류발전전력의 계통 연계 시에는 전력계통 전압의 위상과 동기화된 전력생산이 필수적이므로 계통연계형 인버터에서도 위상동기화 루프 (PLL : Phase Locked Loop)를 채택하여 계통 전압과 동일한 위상을 갖는 전류를 출력하도록 설계하였다.

그림 3은 삼시도의 전체 구성을 시뮬레이션 모델로 나타낸 것이다. 모든 파라미터들은 실제 파라미터들을 따랐으며 계통 연계 인버터는 발전전력의 변동에 비례하는 출력전류 제어방식으로 동작하고 있다.^[4]

시뮬레이션에서는 계통 연계 운전 시 발생하는 영향들을 전압변동의 측면에서 보기위해 풍속의 변동을 모의하여 관찰하였다. 부하가 일정한 상태에서 풍력발전기 출력이 증가하면 발전량만큼을 발전소에서 절감할 수가 있다. 풍력발전기 출력에 따라 PCC측의 RMS 전압을 시뮬레이션 모델을 통해서 관찰하게 되면 그림 4와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 풍력발전기 정격인 13[m/s]에서 약 15[V]이상의 전압변동을 나타내고 있다.^[5]

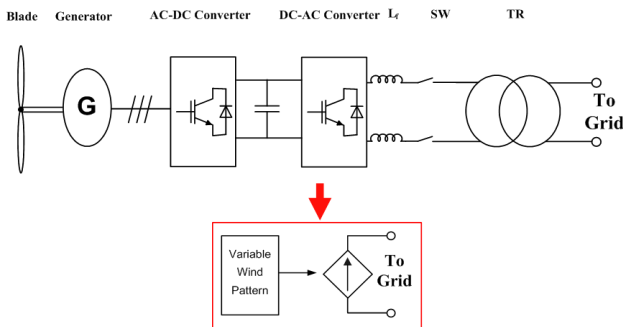


그림 2 풍력발전기 및 계통연계형 인버터 모델
Fig. 2 Wind Turbine and Grid Connected Inverter Model

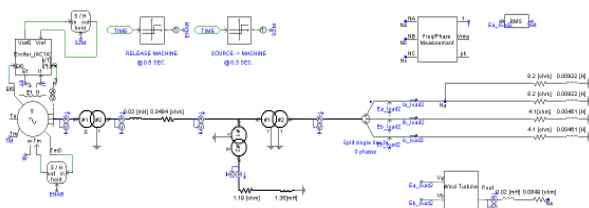


그림 3 삼시도 배전 시스템의 시뮬레이션 구성도
Fig. 3 The Whole Simulation Diagram of Power System in Sapsi-do

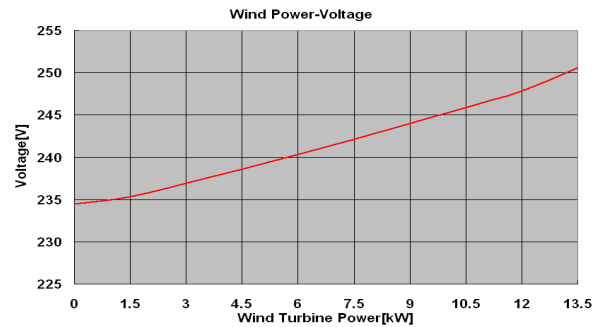


그림 4 풍속변동시 PCC 전압변동 시뮬레이션
Fig. 4 Simulation about PCC Voltage Variation by Wind

2. 3 전압변동해석

그림 5와 같이 고립계통 연계모델은 내연 발전기 출력전압 V_G 는 일정한 크기를 갖는 이상 전압원으로 가정하였고 풍력발전기의 출력전류 I_{WT} 는 풍속변동에 따라 가변하는 전류원으로 가정하였다. 연구대상인 전력계통에 연계된 부하는 모두 수동 RLC 부하로 가정하였고 실제로는 여러 개의 부하가 각각 다른 지점에 연결되는 형태이지만 이것을 등가적으로 해석하면 그림 5와 같이 계통연계지점에서의 등가 부하 임피던스로 모델링 할 수 있다.

이 부하 등가 임피던스 Z_{LL} 에는 계통연계 지점으로부터 부하 Z_{load} 에 이르는 라인 임피던스 Z_L 까지 포함된 것으로 간주한다. 부하전류 I_L 이 일정할 때, 풍력발전기의 출력전류 I_{WT} 가 변동하면 식 (1)에 보인 것과 같이 내연 발전기 출력전류 I_G 가 변동한다.

$$I_G + I_{WT} = I_L \quad (1)$$

이 때 계통연계지점의 전압 V_{PCC} 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. PCC 전압은 기존 내연 전압원 V_G 에 의한 첫 번째 항과 풍력발전기 전류원 I_{WT} 에 의한 두 번째 항으로 구성된다.

$$V_{PCC} = \left(\frac{Z_{LL}}{Z_{LL} + Z_G} \right) (V_G + Z_G I_{WT}) \quad (2)$$

$$\Delta V_{PCC} = Z_{effd} \cdot I_{WT} \quad (3)$$

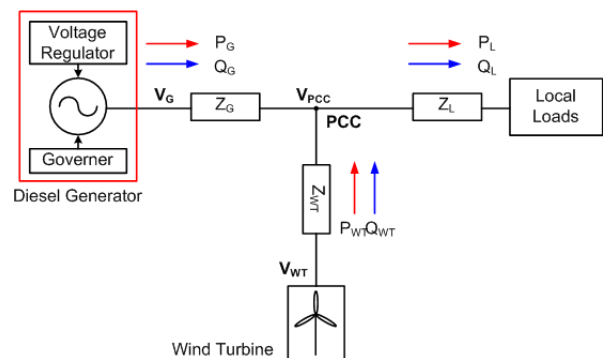


그림 5 고립계통 풍력발전기 연계 간략화 모델
Fig. 5 Simplified Isolated Grid Connection Model with Wind Turbine

PCC전압을 기준전압으로 할 때 전류원 I_{WT} 에 의한 전압변동분 ΔV_{PCC} 는 식 (3)과 같이 표현되며 I_{WT} 에 의한 ΔV_{PCC} 는 Z_{effect} 에 비례하는 것을 알 수 있다. Z_{effect} 는 식 (4)와 같이 Z_G 와 Z_{LL} 의 병렬 임피던스에 해당한다. 여기서 한 가지 주의할 점은 전류원 I_{WT} 와 직렬로 연결된 라인 임피던스 Z_{WT} 는 PCC 전압 변동에 영향을 미치지 않으며 대신 식 (5)와 같이 전류 I_{WT} 의 변화에 따라 풍력발전기 단자전압 V_{WT} 에 영향을 미친다.

$$Z_{effect} = \frac{Z_{LL} \cdot Z_G}{Z_{LL} + Z_G} \quad (4)$$

$$V_{WT} = V_{PCC} + Z_{WT} \cdot I_{WT} \quad (5)$$

$$Z_G = \frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_L + Z_L Z_1}{Z_L} \quad (6)$$

2.2절의 삼시도 모델을 바탕으로 모든 임피던스를 그림으로 나타내면 그림 6과 같다. 그림 6을 위의 그림 5와 같이 간략화된 형태로 바꾸게 되면 Z_G 는 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

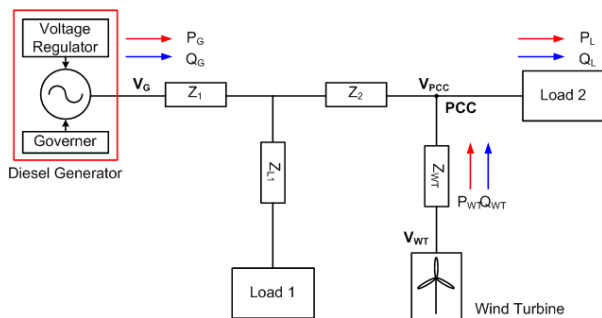


그림 6 삼시도 전력 시스템의 간략화된 임피던스 구성도
Fig. 6 Simplified Impedance Diagram of Power System in Sapsi-do

풍력발전기출력-PCC전압변동

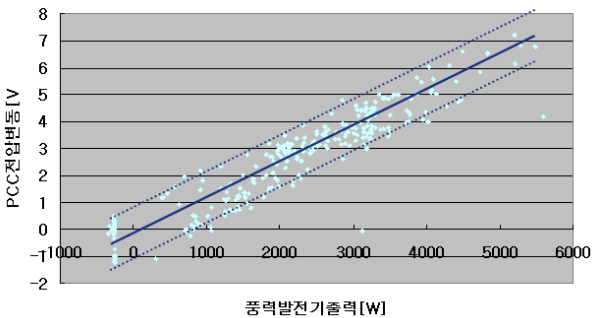


그림 7 풍력발전기 출력에 대한 PCC전압 변동량 측정값
Fig. 7 PCC Voltage Variation Amplitude by Wind Turbine Output Power

표 2 풍력발전기 출력변동 시 PCC 전압변동량 비교표
Table 1 PCC Voltage Variation comparative table by Wind

구분	5.5[kW] 발전 시 전압변동량[V]
PSCAD 모델	6.4
간략화 예측모델	6.5
실측결과	6.9

2. 4 실측데이터

삼시도의 실제 데이터 취득은 PCC단에 전력측정계를 설치하여 측정하였으며 이 데이터를 바탕으로 풍력발전기 출력에 대한 전압변동량을 보면 그림 8과 같이 나타난다. 실제발전소의 여자기성능 때문에 타원안의 점들과 같은 평소 전압 운전범위가 존재하기 때문에 측정된 점들은 실선과 같이 연결가능하며 약 5.5[kW]생산 시 약 7[V]정도의 전압변동을 나타내고 있다. 표 2에서 실제 파라미터들을 대상으로 삼시도 모델과 예측모델의 결과 그리고 실제 측정데이터를 비교하였다. 계산에 따라 약간의 오차만 존재하고 세 개의 데이터는 일치하는 결과를 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 도서지역과 같이 고립된 소규모 계통에서 기존 발전설비와 병렬로 연결된 풍력발전기의 출력 변동 시 나타나는 전압변동을 분석하고 차후 풍력발전기 설치위치의 변동이나 부하 변동을 고려한 연계지점의 전압변동량 예측이 가능하도록 하였다. 풍력발전량의 변동에 따라서 전압강하의 크기 변동이 발생하고 수용가 전압변동(상승)이 필연적으로 발생한다. 소규모 고립형 계통의 간략화된 모델의 전압변동을 해석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시뮬레이션 모델을 개발하였고 좀 더 일반화된 등가회로 해석을 통해 전압변동량을 해석적으로 구할수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법과 시뮬레이션 및 실측 결과가 약 7% 이내의 오차 범위로 일치함을 확인하였다. 앞으로 발전기의 과도 상태 동특성을 고려한 좀더 정밀한 시뮬레이션 모델의 개발과 더불어 부하 용량 대비 풍력발전의 비율을 증가시키기 위한 추가적인 풍력발전기 제어 방법에 대한 연구가 필요하다.

이 논문은 “소규모 전력망 Low Penetration 풍력-디젤 복합발전 연계시스템 실증 및 구성 기준 연구”과제의 일부분으로 연구되었습

참 고 문 헌

- [1] 송승호, 김일환, 한병문, “풍력발전기의 전기적 특성과 계통 연계시 상호작용”, 전력전자학회 학회지, 6호, 제8권, pp. 21-27, 2003.
- [2] J. G. Slootweg, W. L. Kling, "Is the Answer Blowing in the Wind?", IEEE Power & Energy Magazine, pp. 26-33, no. 6, 2003.
- [3] 정원욱, 윤기갑, 김숙철, 이학주, “양양풍력발전 계통연계에 따른 전압변동 분석”, 한국풍력에너지학회 춘계국제학술대회논문지, pp35-40, 2007
- [4] 김정재, 송승호 “영구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력발전시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발” 전력전자학회 논문지 2005.12 pp610-617
- [5] www.windturbinewarehouse.com/pdfs/bergey/Bergey Excel-S 10kW Turbine Specs.03.pdf