

가변속 풍력터빈이 연계된 배전선로의 전압변동 및 고조파 영향

김슬기 · 김응상

한국전기연구원

E-mail : blksheep@keri.re.kr, eskim@keri.re.kr

Distribution Feeder Aspects of a Variable Speed Wind Turbine in Voltage Fluctuations and Harmonics

Seul-Ki Kim and Eung-Sang Kim

Korea Electrotechnology Research Institute

요 약

본 논문의 목적은 가변속 풍력터빈이 배전망에 미치는 영향을 평가하기 위한 모의해석 모델을 제시하고 제시된 모델을 사용하여 배전망에서의 전력품질에 대한 모의해석을 수행하는 것이다. 모델링된 풍력발전 시스템은 고정피치각을 갖는 풍력터빈과 영구자석형 동기발전기로 구성되며 전력전자 인버터에 의해 가변속 운전 및 무효전력 출력제어가 이루어진다. 풍력터빈 연계에 의한 전압변동 및 고조파 문제를 언급하며, 그 영향에 대하여 제시한 모델을 사용하여 정상상태 및 동특성 해석을 수행한다. 다양한 용량과 다른 출력제어방식의 가변속 풍력터빈을 이용하여 모의하고 평가한다. 사례연구들을 통해 각기 다른 계통 상태에서 풍속의 변동 및 다른 출력제어방식에 따른 배전망의 전압변동에 미치는 영향과 고조파 문제를 보여준다. 모델링 및 모의는 PSCAD/EMTDC 프로그램을 기반으로 하여 수행한다.

Abstract — The main purpose of this paper is to present a simulation model for assessing the impacts of a variable speed wind turbine (VSWT) on the distribution network and perform a simulation analysis of voltage profiles and harmonics along the wind turbine installed feeder using the presented model. The modeled wind energy conversion system consists of a fixed pitch wind turbine and a permanent-magnet synchronous generator, in which a controllable power electronics inverter performs variable speed operation and reactive power output control. Impact analysis on voltage profiles and harmonics of a VSWT-installed distribution feeder is addressed and simulated in terms of steady state and dynamic behaviors. Various capacities and different modes of variable speed wind turbines are simulated and investigated. Case studies demonstrate how feeder voltages are influenced by capacity and control modes of wind turbines and changes in wind speed under various network conditions, and show harmonic impacts on the feeder. Modeling and simulation analysis is based on PSCAD/EMTDC a software package.

1. 서 론

풍력발전은 전력회사와 전력구매자로부터 전력공급을 위한 대체에너지원으로서 점점 더 각광받고 있으며 전력산업 규제완화 및 전력수요의 증가, 전원개발 및 전력망설비에 대한 경제적, 환경적 그리고 정치적 제한으로 인해 풍력발전의 이용이 더욱더 강조되고 있다.

풍력발전을 위한 적절한 풍력자원이 있는 장소로서 시골, 해안 및 산간지방인 경우가 많으며 이러한 지역의

부하는 대부분 방사상 배전선로에 의해 공급되고 있다. 풍력터빈의 특성 상 출력이 끊임없이 변동하고 풍속의 변동으로 탈락 및 재투입이 빈번하게 발생하므로 풍력터빈의 계통연계는 계통의 신뢰도를 저하시키고 전압변동 및 고조파, 플리커 등의 전력품질 문제를 초래할 가능성이 항상 존재할 수 있다^[1]. 따라서 풍력터빈을 배전 계통에 연계하기 위해서는 이와 같은 계통연계로 인한 문제에 대한 심도있는 연구가 절실히 요구된다.

본 논문에서는 정상상태 및 동특성 모의를 위한 가변

속 풍력터빈의 모델링이 소개되며, 풍력터빈이 설치된 배전선로에서의 전압변동 및 고조파에 미치는 영향에 대한 모의해석이 수행된다. 전압원 인버터를 이용한 가변속 풍력발전방식이 적용되며, 유효전력 및 무효전력의 출력제어가 이루어진다. 무효전력은 전압조정 또는 일정역률 목적으로 제어될 수 있으며, 본 연구에서는 두 가지 모드가 다 적용된다.

가변속 풍력터빈을 배전선로와 연계 운전 시 배전선로의 전압에 미치는 영향이 제시된다. 풍력터빈 설치 전과 후의 정상상태 전압을 비교하며, 풍력터빈의 용량과 출력제어 모드에 따른 전압변동 현상을 관찰하고, 가장 심각한 계통 시나리오를 이용한 정상상태 전압 관점에서 풍력터빈 도입용량 한계를 검토한다. 급격한 풍속의 변화에 대한 전압변동의 동특성을 전압조정모드와 역률조정모드를 갖는 풍력터빈에 대하여 해석하고 그 결과를 상호 비교한다. 즉, 각기 다른 무효전력 출력제어 방식의 가변속 풍력발전시스템의 출력변화에 따른 배전선로의 전압변동 추이를 분석한다. 또한, 풍력터빈 출력단에서의 고조파와 계통연계에 의한 배전선로 각 노드에서의 고조파 영향을 모의한다. 전력기기 및 전력계통 해석 도구인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 상기의 모델링 및 모의를 수행하였다^[2].

2. 가변속 풍력발전시스템

기본적으로 풍력발전방식은 회전자의 운전특성에 따라 고정속과 가변속의 두 가지 방식으로 나눌 수 있다^[3]. 예전에 적용된 대부분은 고정속 방식으로 유도발전기가 계통에 직접 연계된 경우와 같은 고정속 방식이었으며, 이 경우 유도기가 계통으로부터 흡수하는 무효전력을 보상하기 위해 가변 콘덴서(switched capacitor)를 설치하는 것이 일반적이다.

가변속 운전방식은 고정속 방식보다 20%~30% 정도 효율이 더 좋으며 전압변동을 감소시키고 무효전력을 계통에 공급할 수 있는 장점이 있다. 근래에 대전력 전력 전자소자의 가격하락으로 인하여 가변속 기술이 점점 경제적이며 보편화되고 있다^[4].

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 풍력터빈시스템이며, 가변속 방식으로서 전압원인버터를 통하여 배전선로에 접

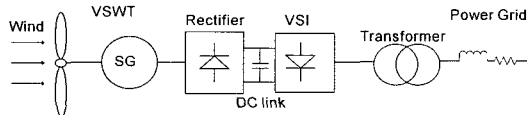


Fig. 1. The studied variable speed wind turbine.

속되어 있으며, 고정피치각의 풍력터빈, 다극 영구자석형 동기발전기^[5], 정류기 모듈 그리고 전류제어형 IGBT 전압원인버터로 구성된다.

2-1. 풍력터빈

풍력터빈은 풍력에너지를 기계적인 에너지로 바꾸어서 풍력터빈 축을 통하여 풍력발전기에 전달하며, 풍력터빈의 기계적인 출력은 식 (1)과 같이 풍속과 터빈의 형태 및 운전조건에 따라 결정되는 출력곡선에 대한 함수의 형태로 나타낼 수 있다.

$$P_M = \frac{1}{2} \rho A C_p V_{WIND}^3 \tag{1}$$

여기서, (kg/m³)는 공기밀도

A(m²)는 풍력터빈 블레이드의 회전면적

V_{WIND}(m/s)는 풍속

C_p는 풍력터빈의 출력계수

출력계수 C_p는 풍력터빈 회전자의 효율을 나타내며 제조자의 성능평가에 의한 실제 데이터를 수식화하여 얻을 수 있으며, 식(2)와 같은 Tip Speed Ratio(TSR)에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_{WIND}} \tag{2}$$

R(m)는 풍력터빈 회전자 반지름, ω(rad/s)는 회전자의 각속도이며, 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 전형적인 출력곡선이 사용되었다^[6].

2-2. 풍력터빈 출력제어

모델링 대상인 풍력발전시스템의 전체 출력제어는 전압원인버터에 의해서 이루어진다. 전류제어형 전압원인버터는 출력전류가 미리 설정해준 기준 파형을 추종하도록 하여 풍력으로 얻어진 유효전력과 적절한 제어방식을 갖는 무효전력을 출력할 수 있다. 이러한 인버터

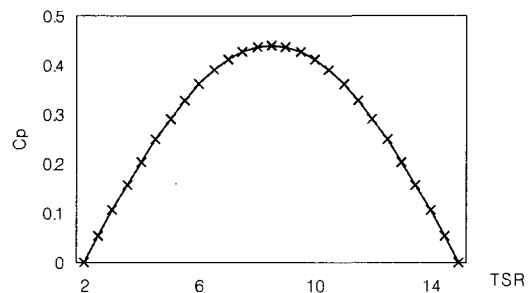


Fig. 2. C_p versus TSR curve.

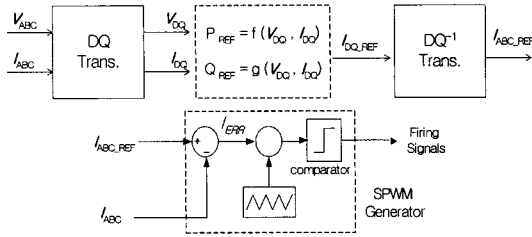


Fig. 3. DQ control of VSI.

를 이용한 계통연계 출력제어에는 여러 방식들이 적용되어 왔는데, 본 논문에서는 Fig. 3과 같은 dq 제어방식을 기반으로 하여 출력제어가 이루어진다. 동기회전 좌표계에 대한 dq축 변환을 이용하여 유효전력 성분과 무효전력 성분으로 분리하고, d축과 q축 전류의 크기를 각각 조정하여 유효전력과 무효전력이 기준값 P_{REF} 와 Q_{REF} 를 추종하게 하여 두 출력의 상호 독립적인 제어가 가능하다^[7]. 풍력터빈 출력의 기준값은 유효 및 무효출력을 제어하기 위하여 어떠한 제어방식을 사용하는가에 의해 결정되며, 이러한 값의 설정은 다음 두 절에서 설명된다. 인버터의 스위치에 점호신호를 가해주기 위하여 기준전류와 실제전류의 오차를 삼각파신호와 비교하여 점호신호를 발생하는 정현파폭변조 기술이 적용된다.

2-3. 가변속 제어

가변속 운전방식이 고정속 방식보다 주목할 만한 장점은 풍속의 변동으로부터 최대의 에너지를 끌어낼 수 있다는 것이다^[6]. 주어진 풍속에 대하여 회전자의 효율, 즉 출력계수 C_p 는 Fig. 2와 같이 TSR에 따라 달라지는데 이는 회전자의 각속도에 의존한다는 것을 의미한다. 출력계수는 Fig. 4의 출력분포 곡선에서 최대출력을 내는 회전자의 속도에서 최대가 되며, 따라서 최대의 풍

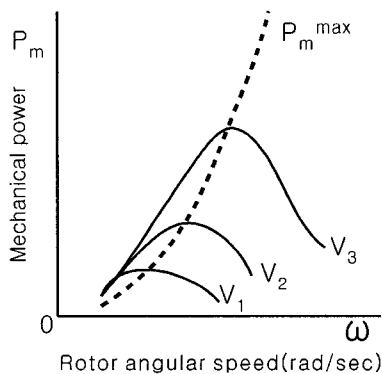


Fig. 4. WT power versus rotor speed.

력에너지를 얻기 위해서는 풍력터빈의 회전속도를 풍속의 변동에 따라서 변경시키며 운전하여 TSR이 최대 출력계수 값을 내기 위해 요구되는 값을 항상 유지할 수 있도록 해야 한다. 이와 같은 가변속 운전제어를 위하여 다음과 같이 유효전력 기준값을 설정한다.

주어진 풍속에서 가변속 풍력터빈으로부터 끌어낼 수 있는 최대출력 P_M^{max} 는 식 (3)과 같이 표현될 수 있으며, 이는 다시 (4)와 같은 간단한 형태로 나타낼 수 있다^[8]. 여기서 P_M^{max} 는 로터의 회전속도의 세제곱에 비례함을 알 수 있다. 식 (3)과 (4)에 따라 출력 기준값을 정하고 이를 추종하도록 유효전력을 제어함으로써 최대출력을 얻기 위한 가변속 운전이 가능하다.

$$P_M^{max} = 0.5\pi\rho R^5 \frac{C_p^{max}}{\lambda_{OPT}^3} w^3 \tag{3}$$

$$P_M^{max} = K_P w^3 \tag{4}$$

여기서, C_p^{max} 는 출력계수의 최대값

λ_{OPT} 는 Fig. 2의 출력곡선에서 C_p 가 최대값을 가지도록 하는 최적 λ

K_P 는 풍력터빈 상수

2-4. 무효전력 제어

유도기기와 같은 비동기발전기와 달리 동기발전기는 switched capacitor나 정지형 무효전력 보상기와 같은 외부 무효전력 공급원에 의존하지 않고도 무효전력을 공급할 수 있는 능력이 있다^[9]. 동기발전기를 이용하는 가변속 풍속터빈은 유효전력을 공급하는 것과 는 별개로 인버터의 출력제어에 의해 무효전력원으로서 동작할 수 있다. 다양한 출력제어모드에 따라서 공급할 무효전력 출력양이 결정되는데, 종류로는 역률제어, 무효전력량제어, 전류제어 및 전압제어 방식이 있다. 본 연구에서는 일정역률제어와 전압조정모드가 적용된다.

역률제어(Power Factor Control) 모드에서는 풍력터빈의 출력이 일정한 역률을 유지하도록 무효전력 출력을 제어하는 것으로서, 인버터가 추종하도록 하는 기준값 Q_{REF} 는 식 (5)에 의해 설정된다.

$$Q_{REF} = P_{REF} \frac{\sqrt{1-PF^2}}{PF} \tag{5}$$

PF는 출력의 역률이고, P_{REF} 는 가변속 풍력터빈의 유효전력 출력 기준값이다.

전압조정 또는 전압보상(Voltage Compensation) 모드에서는 가변속 풍력터빈이 접속된 모선의 전압크기를 일정한 수준으로 유지할 수 있도록 무효전력의 수급이 제어된다. 조절하려는 전압의 크기가 기준값이 되며, 이 값

은 전력회사가 공급하는 전압 허용범위 내에 있어야 한다.

2-5. 무효전력 출력한계

본 연구의 모의 대상인 가변속 풍력발전시스템의 무효전력 출력범위는 인버터의 정격 용량에 의해 식(6)과 같이 결정될 수 있다.

이를 P-Q 평면으로 도시하면 Fig. 5와 같이 원점을 중심으로 하고 반지름이 인버터 MVA 정격과 동일한 원이 되며, 풍력터빈이 전력을 생산하는 관점에서 볼 때, 굵은 실선으로 표시한 반원 부분이 풍력터빈의 P-Q 출력 영역이 된다. 따라서 주어진 풍속에 대하여 풍력터빈의 유효전력 P_{WT} 이 출력될 때, 무효전력 출력 범위가 정해진다.

$$Q_{WT} \leq \sqrt{S_{INV}^2 - P_{WT}^2} \quad (6)$$

P_{WT} 와 Q_{WT} 는 각각 가변속 풍력터빈의 유효 및 무효전력 출력이며 S_{INV} 는 인버터의 MVA 정격이다.

3. 가변속 풍력터빈에 의한 전압 및 고조파 영향

가변속 풍력시스템을 배전계통에 연계하는 경우의 전압변동 문제는 단기간(1분 이내)의 변동과 장기간(1분 이상)의 변동의 두 영역으로 나눌 수 있다. 고조파는 유도발전기가 직접 계통에 물려 있는 풍력발전방식에서는 나타나지 않으며, 전력전자 인버터를 사용하여 계통에 연계한 가변속 방식에서 발생한다.

3-1. 단기 전압변동

단기간의 전압변동은 풍력터빈의 유효전력 및 무효전

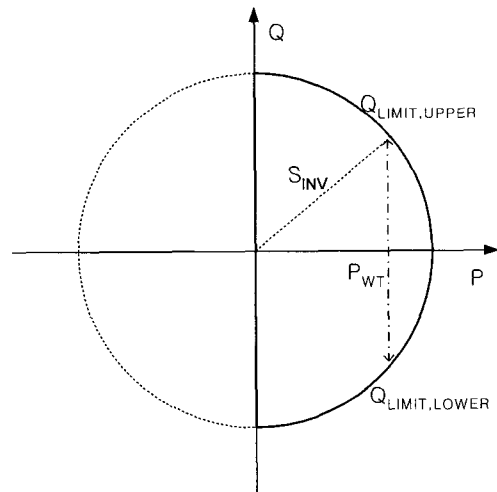


Fig. 5. Reactive capability limits.

력 출력의 변동에 의해 발생되며, 전압변동의 수준은 배전망에 접속된 풍력터빈의 규모와 배전계통의 구성에 따라 달라진다.

풍력터빈의 출력변동은 풍속변동, 돌풍, tower shadow 효과 및 블레이드의 피치가 제어와 같은 연속운전 중에 야기될 수 있으며, 풍력터빈의 탈락 및 재투입과 같은 개폐조작에 따라 일어날 수 있다. 잦은 미세한 풍속변동에 의한 출력변동은 풍력터빈과 발전기의 회전질량이 충분히 크므로 실제로는 무시할 수 있는 수준이며, 바람이 타워를 지날 때 블레이드에서의 풍속이 감소되는 tower shadow 효과도 출력변동을 일으킬 수 있으나, 가변속 풍력터빈의 경우 입력토크 변동에 대한 보상이 가능하므로 고정속 발전방식에서만 이러한 현상이 나타난다^[10]. 여기서 고려되는 풍력터빈은 고정 피치각을 가지므로 블레이드 피치각 제어에 의한 영향 또한 무시할 수 있다. 따라서 단기간의 전압변동 해석에서는 돌풍과 같은 풍속의 급격한 변동과 풍력터빈의 분리와 투입과 같은 개폐조작 운전이 배전선로의 모선 전압에 상당한 영향을 주는 요소로 고려할 수 있다. 모의연구에서 이러한 요소들에 초점을 맞추어 전압변동의 동특성 해석을 수행한다.

3-2. 장기 전압변동

장기간의 전압변동은 장기간 동안의 배전계통 구성, 계통의 부하 상태, 풍력터빈의 규모 및 출력상태 그리고 출력제어방식에 대한 배전선의 전압변동의 평균값을 나타낸다. 즉 일련의 계통 및 풍력상태에 대한 정상상태 전압변동으로 정의한다. 풍력터빈을 계통에 연계하고 연계 규모 및 위치를 결정하기에 앞서 사전 준비 단계에서 전압변동에 대한 광범위한 정상상태 해석이 수행되어야 한다.

3-3. 고조파

전력전자 인버터를 사용하는 풍력터빈의 경우, 풍력터빈의 연속운전동안 고조파 전류가 방출될 수 있다. 유도발전기만을 사용하는 풍력터빈에 대해서 고조파방출이 보고된 바는 있으나, 이로 인한 접속된 장비의 피해 사례가 알려진 것은 없다. 또한, 계통에 직접 연계된 동기발전기를 사용하는 풍력터빈의 경우, IEC 60034-1의 회전전기기의 정격 및 특성에 관한 규격에 의해 아주 제한된 고조파 및 내부고조파를 방출하게 규정되어 있다. 또한, 인버터를 사용하는 풍력터빈의 경우라도 풍력터빈의 시동이나 개폐조작과 같은 아주 짧은 시간의 고조파 방출은 해가 없는 것으로 간주되고 있다^[11]. 본 논문의 사례연구에서는 풍력터빈의 출력단자모선 및 배전선 각 모선의 전압 고조파를 살펴본다.

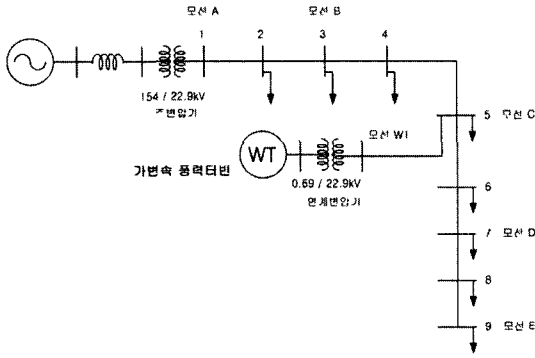


Fig. 6. One-line diagram of distribution feeder with VSWT.

4. 사례연구

가변속 풍력터빈 연계 시 전압변동 및 고조파의 영향을 모의하기 위하여 Fig. 6의 배전계통을 고려한다. 보다 일반적인 결과를 얻기 위하여 전형적인 배전계통을 단순화하였다.

풍력터빈의 접속지점은 배전변전소로부터 약 10 km 떨어진 WT 모선에 위치하고 있으며, 각 노드 간의 선로의 길이는 모두 동일하게 2 Km로 둔다. 1번 노드를 제외한 모든 노드는 0.9의 지상역률을 갖는 동일한 양의 유효전력 및 무효전력 부하가 접속되어 있다고 가정한다. 변전소의 주 변압기는 154/22.9 kv의 변환비를 가지며 정격은 45MVA이고 2차측 모선 전압은 허용된 범위 내에서 조절이 가능하다. 22.9 kv 선로는 ACSR 160 mm² 가공 케이블로서 등가 임피던스는 0.182+j0.391[km]이며 최대 선로용량은 10MVA이다.

풍력발전의 투입용량에 따른 전압변동의 영향을 모의

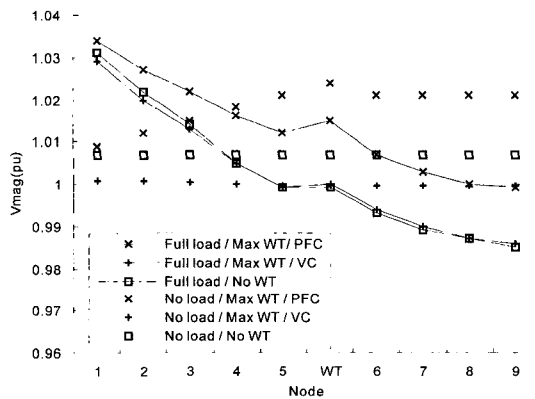


Fig. 7. Voltage profiles under system combinations in table 1.

하기 위해 1, 2, 3, 4 그리고 5MVA의 풍력발전을 적용하고, 출력제어전략에 따라 역률조정모드와 전압조정모드인 경우 각각에 대하여 모의를 수행하고, 그 결과를 비교하였다. 역률조정경우 출력 역률 목표값은 0.98 이상이고, 전압조정경우, 풍력터빈 출력단자 모선의 전압이 1.0 pu가 되도록 설정하였다.

4-1. 정상상태 해석 - 전압변동

변전소 주 변압기의 2차측은 배전선로의 접속된 부하의 양에 따라 조정될 수 있는 탭을 가지고 있다. 모의 수행을 위한 2차 측 권선의 전압은 다음과 같이 설정된다: (1) 경부하 시간대 1.0 pu, (2) 중부하 시간대 1.036 pu

Fig. 7은 Table 1의 배전선로의 부하(최대부하 및 무부하), 풍력터빈의 출력(최고출력 및 0 출력)와 출력제어모드(역률조정 및 전압조정)의 상태 조합에 대한 전압변동 모의 결과를 나타낸다. 풍력터빈의 정격용량은 3MVA이다.

Fig. 7에서 실선과 점선은 각각 최대부하와 무부하를 의미하며, 곡선 위의 X 기호와 + 기호는 역률조정모드와 전압조정모드를, 그리고 □ 기호는 풍력터빈이 가동되지 않는 경우를 표시한다. 역률조정모드로 출력제어가 되고 있는 풍력터빈의 경우 최대부하와 무부하 상태에서 배전선로 모든 노드의 전압을 상승시키고 있음을 볼 수 있다. 만약 변전소 모선전압이 높게 설정되어 있는 중부하 시간대에 선로의 부하가 갑자기 낮은 수준으로 하락하게 되는 경우 보다 심각한 전압상승 현상이 발생하여 공급전압의 허용범위를 초과할 가능성을 배제할 수 없다. 전압조정 모드의 경우 역률조정 모드에 비해 상당히 다른 결과를 보여주고 있다. 전압조정을 위한 무효전력 보상에 의해 풍력터빈 및 배전선로 전압이 터빈이 없는 경우와 비교해서 비슷한 수준이거나 오히려 낮은 결과를 보인다. 이는 역률제어 시, 일정한 역률을 갖는 무효전력을 선로에 공급함으로써 인해서 선로의 전압을 상승시키는 효과를 하며, 전압제어의 경우, 터빈의

Table 1. Combinations of feeder loadings, wind turbine outputs and control modes.

선로부하	터빈출력	제어모드
1	최대	역률조정 (PFC)
		전압조정 (VC)
		×
2	0	×
		역률조정 (PFC)
		전압조정 (VC)
3	최대	역률조정 (PFC)
		전압조정 (VC)
		×
4	0	×
		역률조정 (PFC)
		전압조정 (VC)
5	최대	역률조정 (PFC)
		전압조정 (VC)
		×
6	0	×
		역률조정 (PFC)
		전압조정 (VC)

Table 2. Voltage fluctuation percentage [%] for different WT controls.

노드	1	2	3	4	5	6	WT	7	8	9
역률조정	2.7	2	1.5	1.3	2.2	2.5	2.8	3.2	3.4	3.6
전압조정	3	2.1	1.1	0.7	0.8	0.8	1.4	1.9	2	2.2
풍력터빈 적용 전	2.4	1.5	0.7	0.2	0.8	0.8	1.4	1.8	2	2.2

출력단자 전압이 설정치 1.0 pu를 유지하도록 선로로부터 무효전력을 흡수하고 있기 때문이다.

Table 2는 풍력터빈이 적용된 경우의 배전선로 각 노드에서의 전압변동율을 나타낸 것이다. 풍력발전의 연계에 의해서 배전선로의 전압변동 폭이 커짐을 알 수 있으며, 역률제어 시 1번 및 2번 노드를 제외한 모든 노드에서 전압제어보다 큰 변동폭을 나타낸다.

일반적으로 풍력발전시스템과 같은 분산전원의 배전계통 연계 시의 허용용량은 변전소 주변압기의 탭비가 최대로 설정되고, 선로의 접속된 부하가 최소수준이며, 풍력터빈의 출력이 최대인 상태가 동시에 일어나는 최악의 시나리오(worst case scenario)를 고려하는 결정론적인 방법으로 결정될 수 있다^[12]. 풍력터빈의 출력을 점진 증가시키다가 연계된 배전선로의 전압이 규정된 허용한계 초과하기 직전 단계에서의 용량이 설치한계용량이 된다. 이러한 방법은 풍력터빈과 같이 평균 출력이 정격출력이 20~30% 수준이며, 풍속에 따라 수시로 가동과 정지를 반복하는 전원에 대해서는 극히 제한적인 방법이지만, 한편으로는 이러한방법론을 통해서 최악의 계통상황에서도 공급전압 허용범위를 벗어나지 않고 운전될 수 있는 풍력터빈의 용량이 얼마인가에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 이러한 정보는 보다 현실적이고 유연한 한계용량을 산정을 위하여 필수적이라고 할 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 worst case 모의 결과를 보여준

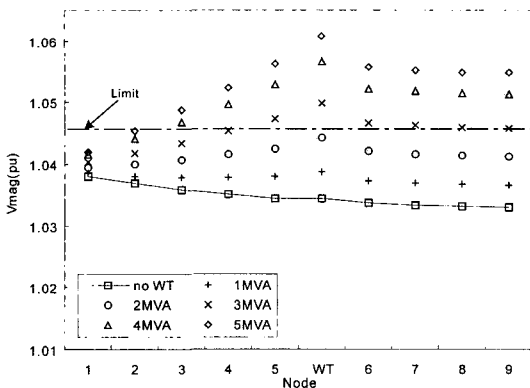


Fig. 8. Voltage profiles with WT of PFC mode in worst-case.

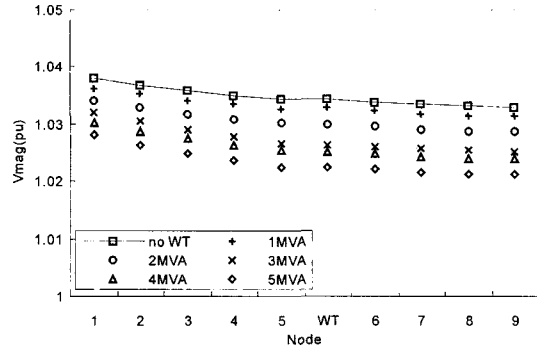


Fig. 9. Voltage profiles with WT of VC mode in worst-case.

다. 변전소 모선전압은 1.038 pu이며, 선로의 부하는 최대부하 시의 10% 수준이며, 연계된 가변속 풍력터빈은 최대출력의 90%를 선로에 공급하고 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 2MVA를 초과하는 용량의 풍력발전을 연계할 경우, 전압규정한계 1.0455 pu를 초과하게 되므로 최악의 시나리오에 근거한 해당 배전선로에서의 가변속 풍력터빈 허용한계용량은 2MVA라고 할 수 있다. 이 용량을 초과하는 가변속 풍력발전시스템을 이 배전선로에서 접속운전하기 위해서는 과전압이 발생하는 노드에서의 적절한 전압상승 방지 대책이 수립되어야 한다. 예를 들어, 3MVA 용량 연계 시 4번 및 9번 노드에서 과전압현상이 예상되므로, 이에 대처할 수 있는 전압조정 대책이 필요하다.

이러한 과전압상태를 해소하기 위한 방법으로 여러 가지 있을 수 있으나, 가변속 풍력터빈의 무효전력 출력을 전압조정모드를 통해 제어함으로써 다소 경감시킬 수 있다. Fig. 9에서 보듯이 전압조정 제어전략이 적용된 경우, 이미 배전선로의 전압이 약 1.03 PU에서 1.04 PU 사이의 상당히 높은 수준에 있기 때문에, 연계된 가변속 풍력터빈은 무효전력을 흡수하여 출력단자 전압을 낮추려고 할 것이고, 이에 의해 용량에 따라 차이는 있지만 다소간의 전압하강효과를 얻을 수 있다. Fig. 9에서 적용된 용량이 클수록 선로 전압수준이 낮게 유지되고 있다.

4-2. 동특성 해석 - 전압변동

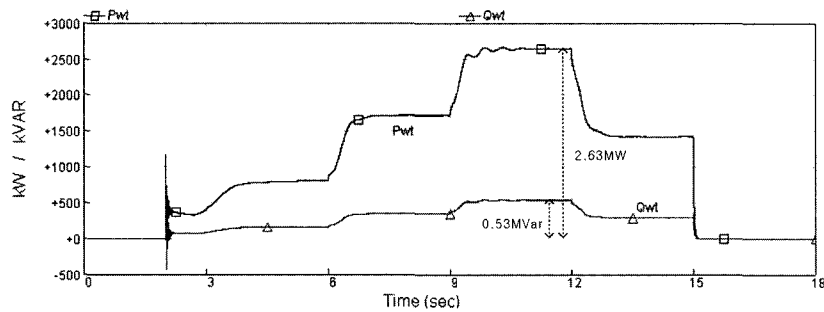
바람의 간헐적인 특성은 풍력터빈의 출력을 계속해서 변동시키며, 계통과 병렬 운전 투입 및 정지를 빈번하게 발생시킬 수 있다. 이로 인해 배전선로의 심각한 전압변동이 야기될 수 있다. 앞에서 언급했듯이 여기서는 급격한 풍속변동 및 풍력터빈의 개폐 운전으로 인한 전압변동에 대한 동특성 모의를 수행하였다. 배전선로에는 중부하가 걸려 있고, 주 변압기의 탭은 1.036 pu로 설

Table 3. Dynamic simulation scenario.

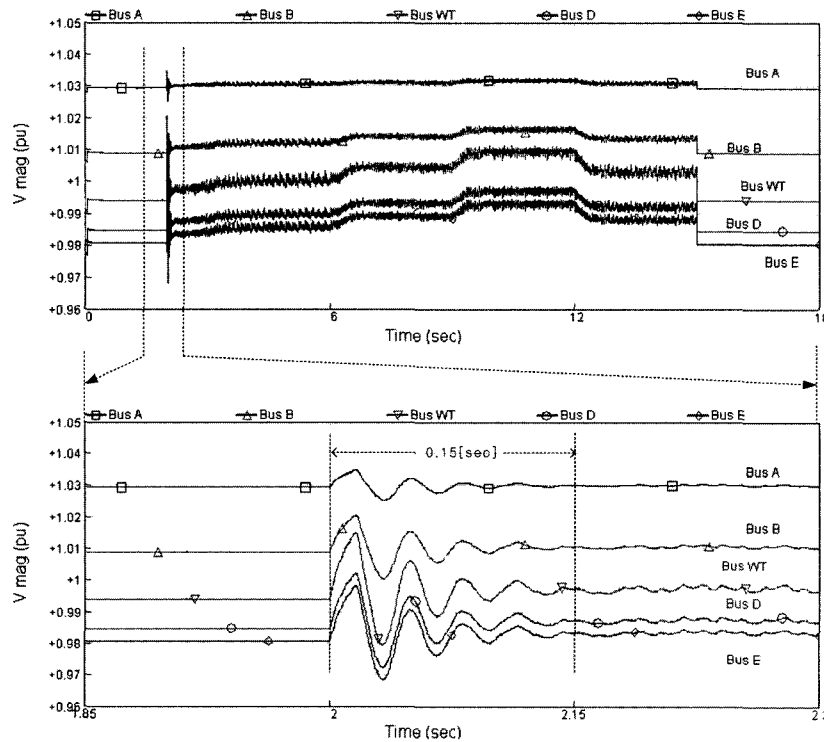
시각[초]	0~2	2~6	6~9	9~12	12~15	15~18
풍속	6.5 m/s	10.3 m/s	13.7 m/s	15 m/s	12.2 m/s	6.5 m/s
VSWT	정지		운전			정지

정되어 있으며, 연계운전 중인 풍력터빈의 정격용량은 3MVA이다. 또한 정격풍속은 15.38 m/s이며, 시동풍속은 7.2 m/s, 정지풍속은 25 m/s로 두었다. Table 3에 나와 있는 순서를 통해 모의를 수행하였다.

Fig. 10은 풍력터빈의 역률을 0.98로 제어한 경우의 결과이다. Fig. 10(a)에서 풍속의 변동에 따른 유효전력 및 무효전력 출력의 변동을 보여준다. 출력이 변동함에 따라 배전선로 각 모선에서의 전압이 변동하고 있으며, 출력변동곡선과 전압변동곡선의 형태가 거의 동일하다. 이를 통해 풍력터빈이 설치된 배전선로의 전압이 풍속의 변동에 의한 직접적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한, 변전소에서 멀고 풍력터빈 모선에 가까울수록 풍속변동에 의한 모선전압의 변동이 크고, 터빈 모선 이후부터 선로말단까지의 모선은 터빈 모선과 유사



(a) Real and reactive power fluctuation of WT



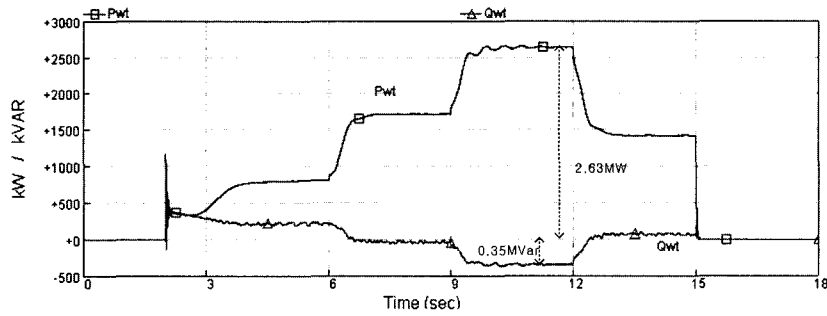
(b) Dynamic voltage profile across feeder

Fig. 10. Results of simulation with WT of PFC scheme.

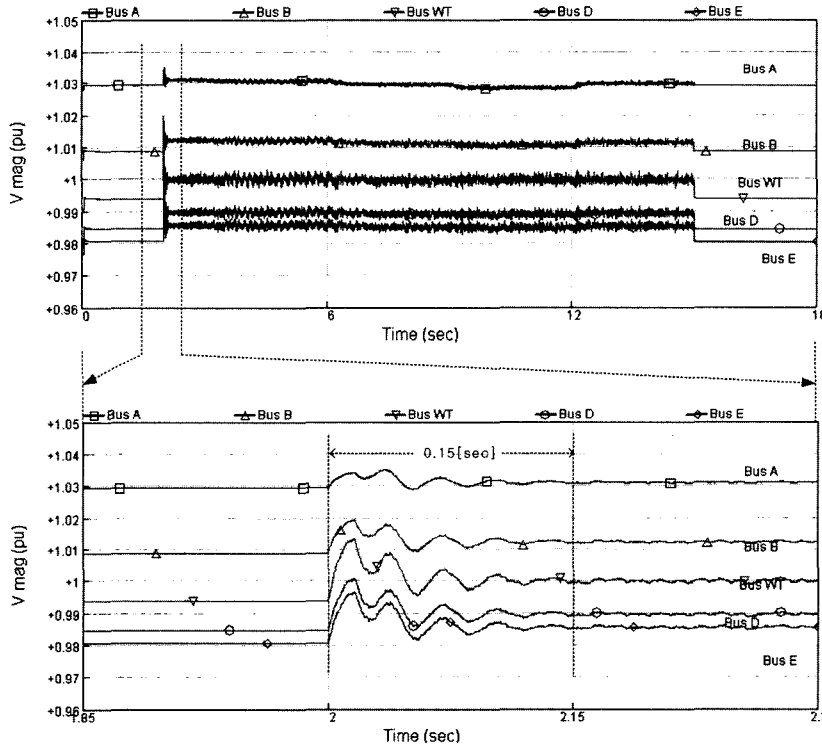
한 수준의 전압변동을 보이고 있어, 다른 모선들에 비해 풍력터빈 연계에 의한 영향을 많이 받고 있다. Fig. 10(b)의 아래 그래프는 위의 그래프에서 풍력터빈이 계통에 병입 운전되는 순간을 확대한 그래프로서 병입 시 변동폭이 정격전압의 약 3% 수준인 왜란이 발생했다가 약 0.15초 뒤에 감쇄되고 있음을 보여준다. 정밀부하를 가진 수용가에서는 이러한 전압왜란을 감지할 수도 있다.

전압조정모드의 풍력터빈의 경우, Fig. 11과 같이, 풍

속에 의한 모선의 전압변동이 두드러지지 않으며, 이는 Fig. 11(a)의 출력곡선을 통해 알 수 있듯이 WT 모선의 전압을 일정하게 유지하는 방향으로 무효전력을 출력하기 때문이다. 즉 Fig. 10(a)와 11(a)의 무효전력이 출력제어전략에 따라 상이하게 출력되고 있으며, 선로의 전압은 무효전력의 수급과 밀접한 관련이 있기 때문이다. 두 출력모드의 비교를 통해 역률조정모드에 비해서 풍력터빈의 주변 모선들이 풍속으로 인한 터빈의 출력변동의 영향을 덜 받는다는 것을 확인할 수 있다. Fig.



(a) Real and reactive power fluctuation of WT



(b) Dynamic voltage profile across feeder

Fig. 11. Results of simulation with WT of VC scheme.

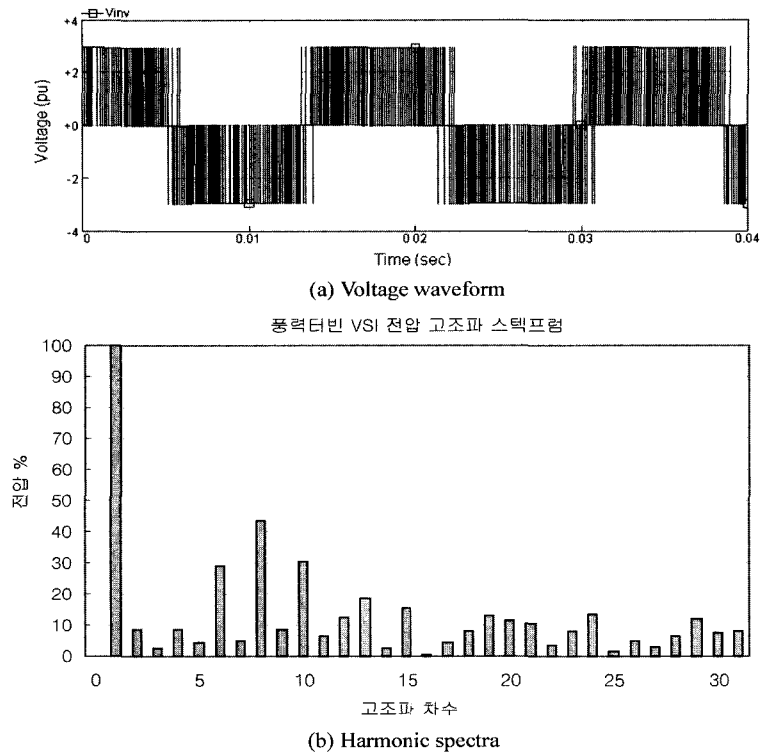


Fig. 12. Voltage waveform and harmonic spectra at VSI bus.

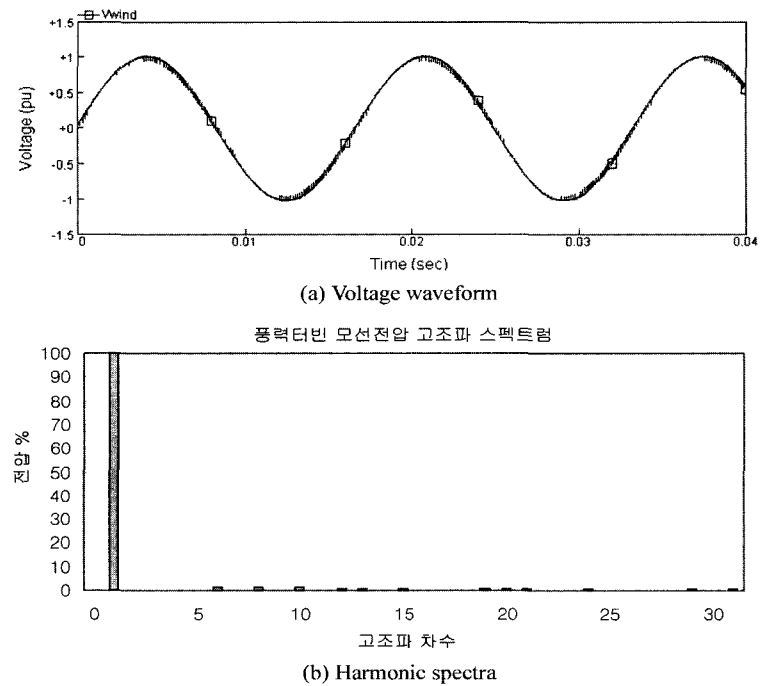


Fig. 13. Voltage waveform and harmonic spectra at bus WT.

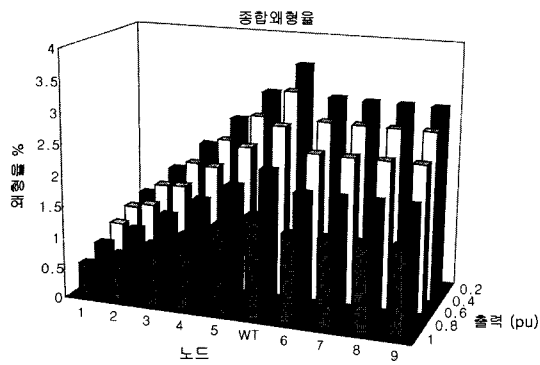


Fig. 14. THD of feeder voltages with different levels of WT output.

11(b)의 아래 그래프에서도 마찬가지로 풍력발전이 계통에 병입되는 순간 어느 정도의 동요가 일어남을 보여 주고 있다.

4.3. 고조파 왜형

계통연계 인버터에 의한 고조파 영향을 해석하였다. 풍력터빈의 인버터의 스위칭 주파수는 7.2 kHz이고, 시스템은 평형 3상으로 운전되고 있다고 가정한다. 필터 전단 인버터 후단의 전압파형 및 고조파 스펙트럼이 Fig. 12에 나와 있으며, Fig. 13은 풍력터빈 모션에서의 전압파형과 고조파 스펙트럼을 나타낸 것이다. 필터를 통해서 대부분의 고조파가 제거되었음을 알 수 있다. Fig. 14는 풍력터빈의 출력수준에 따른 배전선로 각 노드 전압의 종합왜형율을 나타낸 것이다. 풍력터빈 인근 노드일수록 고조파의 영향이 크며, 또한 풍력발전의 출력이 정격에 가까울수록 고조파 왜곡이 감소되고 있음에 유의한다. 주목할 점은 풍력터빈 노드에서 변전소 방향으로 가까이 갈수록 선로 노드의 종합왜형률이 점차적으로 감소하는데 비해, 터빈 노드 이후부터 선로 말단 지점까지의 왜형률은 거의 동일한 수준이다. 이는 전압변동에서와 마찬가지로 고조파 영향의 경우도 연계된 가변속 풍력터빈 이후부터의 선로 말단 지점까지가 취약한 노드임을 의미한다.

5. 결 론

본 논문에서는 효율이나 제어의 이점으로 인해 점점 더 그 이용이 증가되고 있는 가변속 풍력발전시스템이 연계된 배전선로의 전압에 미치는 영향을 제시된 모델을 사용하여 수행하였다. 배전선로 전압에 대한 정상상태 및 동특성 해석을 수행하였으며, 선로 각 지점에서 전압고조파 영향을 모의하였다. 풍력터빈의 영향을 모

의하기 위한 모델링 및 모의방법 또한 기술하였다.

정상상태 해석을 통해 선로의 부하상태, 변전소모선 전압 및 풍력터빈의 출력과 출력제어전략에 따른 배전선로의 전압변동 현상을 분석하였다. 최악의 시나리오 모의를 통한 정상상태 관점에서의 배전선로의 풍력터빈 허용한계용량을 검토했다. 동특성 해석에서는 가변속 풍력터빈의 출력제어모드에 따라 연속운전 및 스위칭 운전시의 전압의 변동패턴이 달라짐을 보였으며, 전압조정을 위한 출력제어가 전압변동 측면에서 보다 유리함을 알 수 있었다. 선로 각 지점의 고조파 영향을 모의하였으며, 풍력발전 연계지점부터 선로 말단까지가 상대적으로 취약함을 확인했다.

모의를 수행한 계통은 실제계가 아닌 전형적인 배전선로를 가정한 간단계통으로서 가변속 풍력발전시스템 연계 시 전압변동 및 고조파로 인한 영향에 대한 특성을 살펴보기 위한 것이다. 따라서, 본 연구결과는 특성 및 변동 경향 파악을 위한 방법론을 제시한 데에 의미를 둘 수 있으나, 배전계통의 구성이 매우 다양하므로, 모든 계통에 대하여 일괄적으로 적용하는 데에는 무리가 있다. 향후 실제계통 데이터를 바탕으로 하여 대상계통의 적정도입 용량 산정 등의 계통연계를 위한 사전 분석과 관련된 연구를 심화해 나갈 것이다.

참고문헌

- Chen, Z. and Spooner, E.: "Grid Power Quality with Variable Speed Wind Turbines", IEEE Trans. Energy Conversions, 16(2), 148 (2001).
- Manitoba HVDC Research Center: PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software User's Manual, Version 3 (1998).
- Heier, S.: "Grid Interconnection of Wind Energy Conversion Systems", Chichester: Wiley (1998).
- Mukund R. Patel: "Wind and Solar Power Systems", pp. 81-82. CRC Press, USA (1999).
- Spooner, E., Williamson, A.C. and Catto, G.: "Modular Design of Permanent-magnet Generators for Wind Turbines", IEE Proc.-B, Electric Power Applications, 143(5), 388 (1996).
- Murdoch, A., Barton, R.S., Winkelmann, J.R. and Javid, S.H.: "Control Design and Performance Analysis of a 6 MW wind Turbine Generator", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-102(5), 1340 (1983).
- 김슬기, 김응상: "전압원인버터를 이용한 계통연계형 풍력발전의 출력제어 모의 및 해석", 한국에너지공학회 논문지, 12(2), 154 (2003).
- Eduard Muljadi and Butterfield, C.P.: "Pitch-Con-

- trolled Variable Speed Wind Turbine Generation”, IEEE Trans. on Industry Applications, 37(1), 240 (2001).
9. Kundur, P.: “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, Inc., 191 (1994).
 10. Jeff W. Smith and Daniel L. Brooks: “Voltage Impacts of Distributed Wind Generation on Rural Distribution Feeders”, in Proceedings of 2001 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 1, 492 (2001).
 11. IEC (International Electrotechnical Commission): Wind Turbine Generator Systems IEC 61400-21 Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines (2001).
 12. Nigel C. Scott, David J. Atkinson and James E. Morrell: “Use of Load Control to Regulate Voltage on Distribution Networks with Embedded Generation”, IEEE Trans. Power Systems, 17(2), 510 (2002).