

## 풍력발전 계통연계 모의를 위한 PSCAD/EMTDC 인버터 모듈 개발

김슬기, 김응상, 박민원, 김지원, 전진홍, 김태현  
한국전기연구원

### Development of PSCAD/EMTDC Inverter Module for Simulating Grid-connect Wind Energy Conversion System

Kim Seul-Ki, Kim Eung-Sang, Park Min-Won, Kim Ji-Won, Jeon Jin-Hong, Kim Tae-Hyun  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - 계통연계 풍력발전시스템의 특성을 고찰하기 위해서는 블레이드, wind turbine, 정류기, 인버터 등의 풍력발전시스템의 각 구성요소의 모델링과 적절한 제어 알고리즘에 대한 모의가 요구된다.

본 연구에서는 동기발전기를 풍력발전기로 사용하고 있는 계통연계형 풍력발전시스템의 출력 및 동특성을 모의하기 위한 전류제어형 전압원인버터의 PSCAD/EMTDC 모듈을 제시한다. 풍속의 가변특성에 의해 동기발전기에 들어오는 입력은 변하게 되고, 동기발전기가 동기주파수를 유지할 수 있도록 인버터에서는 이러한 입력과 동일한 출력을 낼 수 있어야 하며, 동시에 계통에서 허용하는 일정 전압과 계통주파수와 동일한 주파수를 갖는 출력을 공급해야 한다. 본 논문에서는 이를 위해 동기발전기의 주파수를 제어하는 전류제어형 전압원인버터 모듈을 소개한다. 모의를 통해 결과를 검증한다.

#### 1. 서 론

현재 풍력에너지 시스템은 그 운영방식에 따라서 독립 운전 방식과 계통연계 운전 방식 두 가지로 나눌 수 있다. 독립운전 시스템은 송배전선을 통해 상용계통과 연결되지 않고 도서지역이나 산간지역과 같이 고립된 지역에서 수용가에 직접 전력을 공급을 공급하는 방식이다. 풍력은 끊임없이 변하는 에너지로서 항상 독립운전이 가능하지 않으므로 디젤발전기와 같은 비상용 전원을 확보할 필요가 있다. 이러한 면에서 계통연계 방식이 요구되어 진다[1]. 풍력발전기로서 유도발전기가 많이 사용되고 있으나, 계통연계 시 계통으로부터 무효전력을 공급받을 필요가 없고 보다 나은 품질을 갖는 전력을 공급할 수 있는 장점으로 동기발전기의 이용도 늘고 있다[2]. 또한, 동기발전기를 이용한 풍력시스템의 모델링을 통한 시뮬레이션 연구 또한 활발히 진행되어지고 있다[3,4].

동기발전기를 이용할 때는 동기발전기가 동기를 유지할 수 있게 하여야 한다. 일반 가스터빈 발전기와 같은 화력발전기는 조속기를 통해 부하가 감소하여 주파수가 높아지면 연료 입력을 줄이고 부하가 증가하여 주파수가 낮아지면 연료 입력을 높여서 동기를 유지하도록 하나, 풍력발전기의 경우, 바람에 의한 입력이므로 입력 조절이 불가능하다. 따라서, 인버터를 통해 출력을 풍력에 의한 입력의 변화에 맞게 제어하여야 한다.

먼저 동기발전기로 구성된 계통연계형 풍력발전시스템의 인버터의 요구조건에 맞는 제어전략을 수립하고, 전자기과도현상 소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 인버터를 구성하고 제어알고리즘을 통합한 인버터 모듈을 제시한다. 성능모의를 통해서 수립된 제어전략과 제시된 인버터 모듈의 효용성을 검증한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 인버터 제어 전략

풍력발전기로 동기발전기를 사용하는 풍력발전시스템을 계통에 연계하는 경우, 인버터의 제어 목적은 다음과 같다.

- 1) 일정전압 및 주파수 제어 - 인버터의 출력이 계통의 전압 수준과 동일한 출력전압과 계통주파수와 동일한 주파수를 가져야 한다.
- 2) 전류제어 - 풍속은 일정하지 않고 계속해서 변동하는 특성이 있다. 바람에 의해 회전하는 블레이드를 통해 동기발전기에 입력되는 기계토크는 계속해서 변동하게 되고, 인버터의 전류제어를 통해서 발전기에 들어오는 에너지를 최대한 전력으로 변환하여 계통에 공급한다. 본 논문에서는 무효전력의 수수는 없이 역률이 1.0인 전력을 출력하도록 한다.
- 3) 동기발전기의 동기 제어 - 동기발전기로부터 출력되는 전기토크 또는 전기에너지가 풍력에 의한 기계토크 또는 기계 에너지와 동일하지 않으면, 발전기는 동기를 상실하여 일정 시간 지속되는 경우 탈조되어 발전기 자체에 손상을 입을 뿐만 아니라 더 이상의 발전을 할 수 없을 위험이 있다. 따라서, 인버터를 통해서 동기발전기의 회전자의 각 주파수가 동기 주파수를 이루도록 제어하여야 한다. 이는 일종의 전류제어로서 식(1)의 동기발전기의 출력-속도 관계식에 의해 동기발전기에 입력되는 기계토크에 의한 입력과 출력되는 전기출력이 균형을 이루도록 전류를 제어함으로써 동기를 유지할 수 있다.

$$P_{mech} - P_{elec} = \omega_0 I \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$P_{mech}$ 는 기계토크에 의한 입력,  $P_{elec}$ 는 발전기 출력,  $\omega_0$ 는 동기 각 주파수,  $I$ 는 관성모멘트,  $\omega$ 는 회전자의 각 주파수이다[5].

풍력발전시스템이 연계될 계통이 대규모 계통이라고 하면, 비교적 소용량(수백 kW이하)의 풍력시스템 출력단의 전압은 계통전압에서 연계선로 임피던스에 의한 전압강하 또는 상승분을 더한 값으로 계통전압과 거의 동일한 전압을 유지할 수 있다. 따라서, 60Hz의 주파수를 갖고 동기발전기의 회전자 각 주파수가 동기 각주파수를 유지하도록 하는 기준전류를 설정하고 SPWM 스위칭 방식을 통해 이를 추종하도록 하여 1), 2), 3)의 제어 전략을 달성할 수 있다.

인버터의 제어 성능을 알아보기 위해 모의할 풍력발전기는 그림1의 PSCAD/EMTDC에서 제공되는 동기발전기 모듈을 사용하였으며 또한 제공되는 여자기 모듈을 사용하여 정류기의 DC link의 전압이 인버터가 적절한 전압을 낼 수 있는 수준을 유지하도록 하였다.

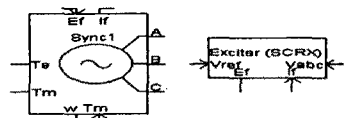


그림 1 제공되는 동기발전기 및 여자기 모듈

## 2.2 PSCAD/EMTDC 인버터 모듈.

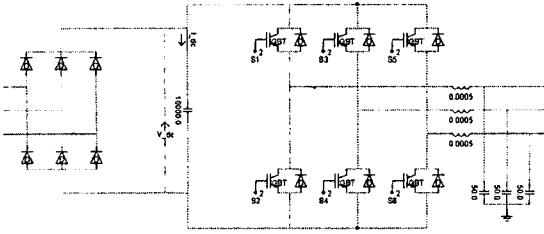


그림 2 인버터 모듈 (AC-DC-AC 전환부)

그림 2와 같이 다이오우드 6개를 사용하여 3상 정류기를 구성하고 IGBT 6개를 사용하여 3상 인버터를 구성한다. 인버터 출력단의 전압이 계통전압 크기와 60Hz의 일정한 주파수를 가지도록 하면서 동시에 전류를 제어하기 위해 기준크기와 기준위상각을 가지는 기준 전류를 설정하고 동기발전기의 각주파수가 동기화 되도록 기준 전류를 제어한다.

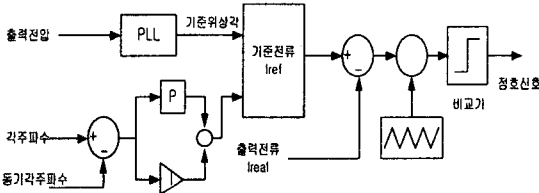


그림 3 기준전류 설정 및 SPWM 스위칭 제어

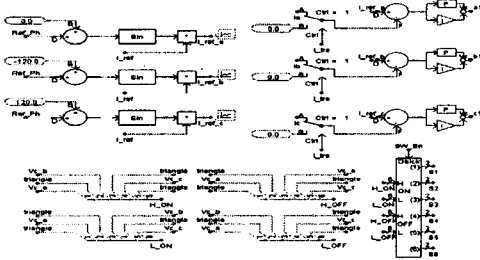


그림 4 IGBT 구동회로

본 연구에서는 유효전력의 수수에 의한 동기제어에 초점을 맞추므로 무효전력 수수는 고려하지 않는다. 따라서 인버터가 무효전력은 내지 않고 유효전력만을 출력(즉 역률이 1인 출력)하게 하기 위하여 식(2)에 의해 인버터 출력전류의 위상각은 출력전압의 위상각과의 차이가 0이어야 하므로 SPWM 전류제어를 위한 기준전류의 위상각을 인버터 출력전압의 위상각과 일치하도록 두면 된다. EMTDC에서 지원하는 PLL(Phase Locked Loop)을 이용하여 기준 위상각을 출력전압 위상각과 같도록 설정할 수 있다.

$$P = V_{inv} I_{inv} \cos \theta, \quad Q = V_{inv} I_{inv} \sin \theta \quad (2)$$

P와 Q는 인버터의 유효전력출력과 무효전력 출력,  $V_{inv}$ 는 인버터 출력전압,  $I_{inv}$ 는 인버터 출력전류,  $\theta$ 는 출력전압과 출력전류의 위상각차이다.

기준전류의 크기는 동기발전기 회전자 각주파수 제어를 위해 동기발전기의 각주파수 기준값과 측정값의 오차에 적절한 gain을 갖는 PI제어를 사용하여 설정한다. 이와 같이 기준크기와 기준위상각을 갖는 기준크기

를 설정하고, SPWM을 이용하여 IGBT의 스위칭을 제어하고 실제전류가 기준전류를 추종하도록 한다.

그림 3은 위에서 언급한 기준전류의 크기 및 위상각 설정과 이렇게 설정된 기준전류를 추종하기 위한 SPWM스위칭 신호 발생에 대한 제어블록을 나타낸 것이다. 그림 4는 기준전류 발생기와 기준전류 추종을 위한 IGBT 스위칭 구동 회로를 나타낸다.

## 2.3 인버터 모듈 성능 모의

계통연계형 인버터 모듈이 제어방식에 따라서 정확하게 동작을 하는가를 검토하기 위해 다음 그림5와 같이 동기발전기, 정류기, 인버터와 무한모션으로 이루어진 모의 계통을 구성하였다. 그림 6은 그림 5의 모의계통을 PSCAD/EMTDC에서 모의한 회로도이다.

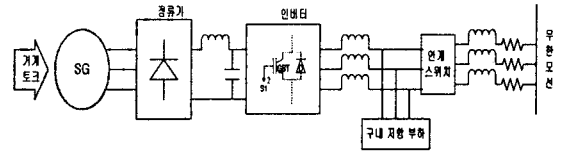


그림 5 모의계통 구성도

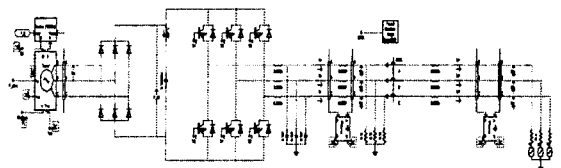
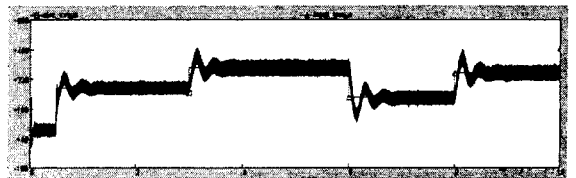


그림 6 PSCAD/EMTDC 모의계통

동기발전기는 정격용량 450kW로 두고 계통 측의 선간전압 및 상전압은 380/220V(rms)이다. 풍력발전시스템에는 60kW의 저항부하가 발전시스템 구내 부하로서 연결되어 있다. 동기발전기와 DC link 전압을 유지하기 위한 여자기는 제공되는 모듈을 사용하였고, 무한모션으로는 일정한 전압 및 위상각을 유지하는 3상 전압원 모델을 사용하였다. 정류기 및 인버터와 인버터에 내장된 필터는 본 논문에서 제안된 모듈이며, 연계스위치를 통해 계통에 연계하였다. 계통연계 전에는 전압원인버터를 전압제어 모드로 두고 동기발전기의 회전자 각을 고정시킨 후 출력전압이 계통전압과 동일하도록 한 후, 연계스위치를 닫으면서 발전기의 회전자 각을 풀고 인버터를 전류제어 모드로 전환하였다. 계통연계 시 풍속의 가변에 의한 입력변화로써 동기발전기에 투입되는 기계토크의 값을 변화시키면서 이에 대한 인버터의 응답특성을 검토하였다. 계통연계 후 인버터에서 계통으로 유입되는 출력이 기계토크에 의한 동기발전기 출력의 변화를 쫓아가면서, 동기발전기 회전자 각 주파수가 동기화 유지되는지를 검토하였다. 또한, 출력단의 전압이 적정하고 출력전류가 기준전류를 추종하는지를 확인하였다.



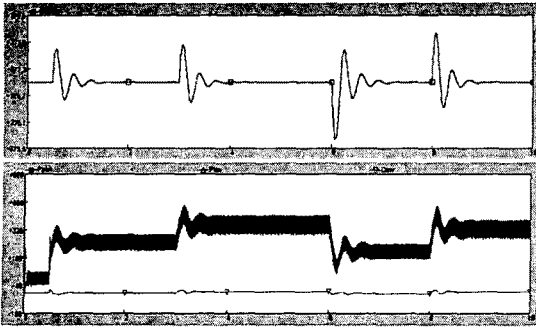


그림 7 (a) 동기발전기의 입력 기계토크(Mech\_torque)와 출력 전기토크(Elec\_torque)  
 (b) 동기발전기 회전자속의 각 주파수  
 (c) 동기발전기 출력(Pgen)과 인버터 출력(Pinv, Qinv)

그림 7의 (a)에서 동기발전기에 입력되는 기계토크(가는 실선)가 갑자기 변할 때, 인버터의 전류제어를 통해 인버터에서 뽑아내는 동기발전기의 전기출력이 기계토크 입력의 변화를 제대로 추종하고 있으며, 이러한 입출력의 균형에 의해서 그림 7의 (b)에서 동기발전기 회전자의 각 주파수가 동기( $60\text{Hz} \times 2\pi = 377 \text{ rad/sec}$ )를 유지하고 있음을 볼 수 있다. 또한, 그림 (c)에서 전압과 전류의 위상이 동일하도록 출력되므로 무효전력은 공급되지 않고 있으며 인버터의 유효전력 출력은 동기발전기의 유효전력 출력과 같다. 동기발전기에서 발생하는 모든 유효전력이 인버터 출력단을 통해 계통과 부하로 공급되고 있다.

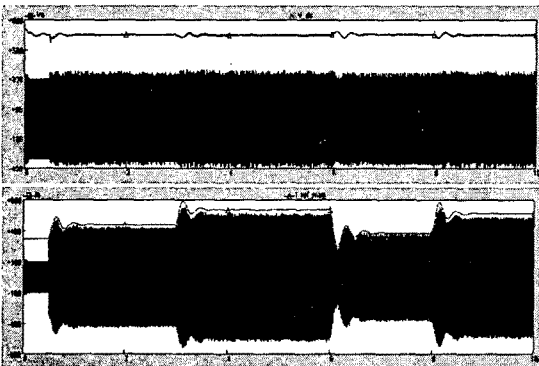


그림 8 (a) 인버터 출력전압(Va)와 DC link 전압  
 (b) 기준전류크기(I\_ref\_mag)와 인버터 출력전류(Ia)

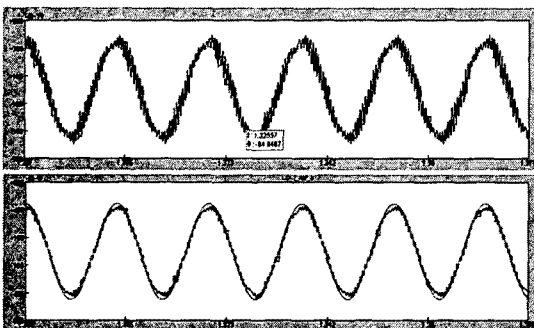


그림 9 (a) 인버터 출력전압(A상)  
 (b) 인버터A상의 기준전류(I\_ref\_a)와 출력전류(Ia)

풍력에 의한 동기발전기에 투입되는 입력과 인버터를 통해 발생하는 출력이 동일하게 유지됨으로써 dc link의 전압도 일정하게 유지된다(그림 8 (a)). 그림 8(b)에서는 SPWM 제어에 의해 출력전류가 기준전류의 크기를 비교적 잘 따라가고 있음을 확인할 수 있다. 그림 9의 (a)와 (b)에서 무효전력 수치가 0이 되도록 인버터 출력전압과 출력전류의 위상이 같게 제어되고, 출력 상전압의 크기는 계통 상전압의 크기와 비슷하게 유지되며, 인버터의 출력전류가 기준전류를 잘 따라가고 있음을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

동기발전기를 갖는 풍력발전시스템의 인버터 모델을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구성하고 계통연계를 위해 필요한 제어 알고리즘을 포함한 인버터 모듈을 제시하였다. 동기발전기의 동기 유지를 위한 전류제어를 위해 기준전류의 크기와 위상각을 설정하여 이를 추종하는 방식을 이용하였다. 동기발전기의 입력 기계토크를 가변하였을 때의 인버터 제어전략에 의한 동기발전기 및 인버터의 응답특성과 출력전압과 전류를 검토하여 제시된 인버터 모듈의 효용성을 확인하였다.

추후 계통연계형 풍력발전시스템의 각 구성요소들에 대한 적절한 모델링과 제어운용방식을 통합하여 응용특성, 입출력 특성 및 최적의 운전전략에 대한 구체적인 연구가 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] H. Mohamed, Chika O. Nwankpa, "Stochastic Analysis and Simulation of Grid-Connected Wind Energy Conversion System, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.15, No.1, pp.85-90, March 2000
- [2] Mukund R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", CRC press, 1999
- [3] A.S.Neris, N.A. Vovos, G.B Giannakopoulos, "A VARIABLE SPEED WIND ENERGY CONVERSION SCHEME FOR CONNECTION TO WEAK AC SYSTEMS", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 1, pp.122-127, March 1999
- [4] Z. Chen, E. Spooner, "Grid Power Quality with Variable Speed Wind Turbines", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 16, No. 2, pp.148-154, June 2001
- [5] Allen J. Wood, "Power Generation Operation, and Control", A Wiley-Interscience Publication, 2nd edition, 1996