

풍력터빈시뮬레이터와 매트릭스 컨버터를 이용한 PMSG 풍력발전 시스템 모델 개발

윤동진·한병문·리위롱*·차한주**
명지대학교, 전남대학교*, 충남대학교**

Development of PMSG wind power system model using wind turbine simulator and matrix converter

Dong-Jin Yun·Byung-Moon Han·Yu-Long Li·Han-Ju Cha
Myung-Ji University, Chon-Nam University, Chung-Nam University

ABSTRACT

This paper describes development of PMSG wind power system model using wind turbine simulator and matrix converter. The wind turbine simulator, which consists of an induction motor with vector drive, calculates the output torque of a specific wind turbine using simulation software and sends the torque signal to the vector drive after scaling down the calculated value. The operational feasibility of interconnected PMSG system with matrix converter was verified by computer simulations with PSCAD/EMTDC software. The simulation results confirm that matrix converter can be effectively applied for the PMSG system.

1. 서 론

최근 신재생에너지에 대한 관심이 높아지면서 풍력 발전에 대한 연구 또한 활발하게 이루어지고 있는 추세이다. 현재 풍력발전시스템에서 사용되는 발전기에는 농형유도발전기, 권선형 유도 발전기, 그리고 영구자석동기발전기가 있는데 최근에는 가용풍속범위가 넓고 증속기가 필요 없는 영구자석동기발전기가 많이 사용되고 있다. 또한 이를 계통에 연계하는 방법으로 Back-to-Back 컨버터를 이용한 AC-DC-AC 변환방식이 널리 사용되고 있다.^[1]

그러나 이러한 방식은 교류-직류-교류 3단계의 전력변환을 필요로 하여 AC-AC 직접변환방식에 비해 손실이 크고 DC-Link를 구성하는 리액터와 직류 커패시터로 인해 시스템 규모가 커지는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 AC-AC 직접변환이 가능한 Matrix 컨버터를 이용하여 PMSG 풍력발전 시스템을 계통에 연계하는 모델을 개발하였다. 또한 보다 정확한 분석을 위해 Nordex 1.5MVA 블레이드를 모델링한 Wind turbine simulator를 구현하여 실제 풍력발전에서와 같은 특성 분석이 가능하도록 하였다.

2. 본 론

2.1 풍력터빈 시뮬레이터 [2]

2.1.1 블레이드 수학적 모델링

블레이드의 모델링을 위해 공기가 가지고 있는 역학적인 특성에 대해 수학적 모델링이 필요하다. 풍속 V_{wind} 의 바람이

불 때, 풍속이 가지는 역학적 에너지는 다음과 같이 나타난다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p \quad (1)$$

A 는 블레이드의 회전 단면적(m^2)으로 $A = \pi R_{blade}^2$ 이고, ρ 는 공기의 밀도로 약 $1.225[kg/m^3]$ 을 나타낸다. C_p 는 에너지 출력계수(Power Coefficient)로서 공기가 가지고 있는 역학적 에너지가 블레이드를 거쳐 블레이드의 기계적 에너지로 변화할 때의 그 효율을 말한다. 따라서 C_p 는 풍속과 블레이드의 회전속도의 비율인 주속비(λ)에 의해 변화하게 된다.

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R_{blade}}{V_{wind}} \quad (2)$$

ω_{blade} : 블레이드의 회전 각속도

R_{blade} : 블레이드의 회전자 반경

식 (1)을 통해 공기의 운동에너지에 의해 생성된 블레이드의 에너지를 블레이드의 회전속도로 나누어 주면 블레이드가 발전기에 전달하는 토크값(T_{blade})을 계산할 수 가 있다.

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{\omega_{blade}} \quad (3)$$

2.1.2 블레이드 관성모델링

블레이드의 관성을 모의하기 위해 실제 풍력발전 시스템에서 사용하고 있는 모델인 Nordex G70모델의 사양을 참조하였다. Nordex G70은 1.5[MVA] 정격에 받지름 34[m]의 블레이드로 구성되어 있으며 3개의 블레이드의 총중량은 17.7 [ton]이다.

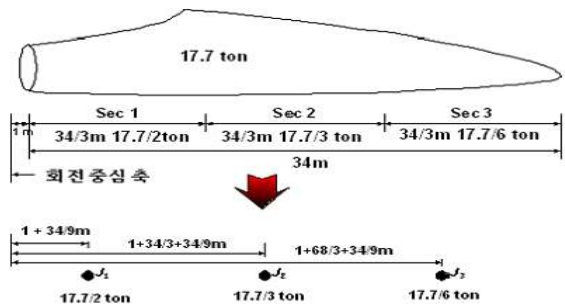


그림 1. 블레이드의 관성계산을 위한 등가중량
Fig 1. Weight for Blade Inertia Calculation

블레이드가 회전할 때 각 부분의 관성이 다르기 때문에 무게 중심점을 기준으로 3개의 구간을 나누어 관성을 구하였다. 블레이드의 전체 관성은 식(5) 과 같다

$$J_{blade} = J_1 + J_2 + J_3 = 3955000 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (5)$$

2.2 매트릭스 컨버터

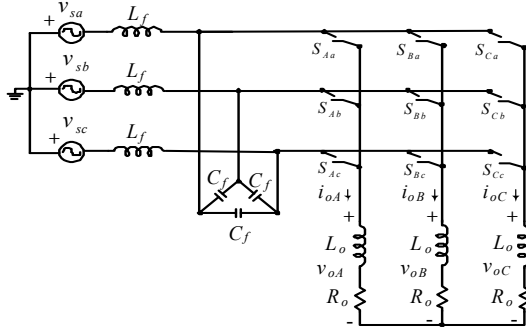


그림 2 매트릭스 컨버터의 시스템 구성
fig. 2 System configuration of matrix converter

매트릭스 컨버터는 9개의 스위치의 배열 구성과 제어를 통하여 출력전압의 주파수와 크기, 입력측의 역률을 가변할 수 있는 전력변환기이다. 매트릭스 컨버터의 구성과 제어의 핵심은 4상한 양방향 스위치로 볼 수 있다. 위의 그림 2에서와 같이 매트릭스 컨버터는 가변전압, 가변주파수의 출력 전압을 합성하기 위해 게이팅 신호로 제어가 가능한 9개의 양방향 스위치를 사용한다.

9개의 스위치를 동작시키기 위해 기존에 사용되었던 공간 벡터 변조 방법은 제안된 방법에 비해 연산 과정이 복잡하고, 많은 테이블을 필요로 하는 단점을 가진다.

본 논문에서는 이러한 단점을 피하기 위해 캐리어를 이용한 매트릭스 변조 방법^[3]을 사용하였다. 이 방법은 캐리어를 이용하여 각 상의 스위칭 상태를 바로 구할 수 있고, 스위칭 상태에서 직접 게이팅 신호를 얻을 수 있으므로 그 구현이 간단하다는 장점을 가지고 있다. 또한 캐리어를 이용하므로, 매트릭스 컨버터의 변조 방법을 직관적으로 이해하기 쉽다.

2.3 제안하는 PMSG 풍력발전 시스템

그림 3은 본 논문에서 제안하는 매트릭스 컨버터를 이용한 PMSG 풍력 발전 시스템의 제어를 전력회로를 포함하여 제어블록다이어그램으로 나타낸 것이다. Wind turbine model을 이용한 가상 blade를 통하여 PMSG 풍력 발전 시스템에 T_{blade} 을 공급한다. 매트릭스 컨버터의 제어부에서는 PMSG의 동기위상각을 계산하여 최대 출력점 제어를 위한 기준전류지령을 생성한다. 생성된 기준전류지령은 실제 전류와 함께 PI 전류제어기, d-q 역변환을 거쳐 원하는 기준 상전압 지령 다시 생성한다. 기준 상전압 지령은 캐리어를 이용한 매트릭스 변조 방법을 통해 PWM 신호를 생성하고 이는 매트릭스 컨버터의 IGBT 게이트 드라이브를 거쳐 매트릭스 컨버터의 9개의 스위치에 신호를 인가하게 된다.

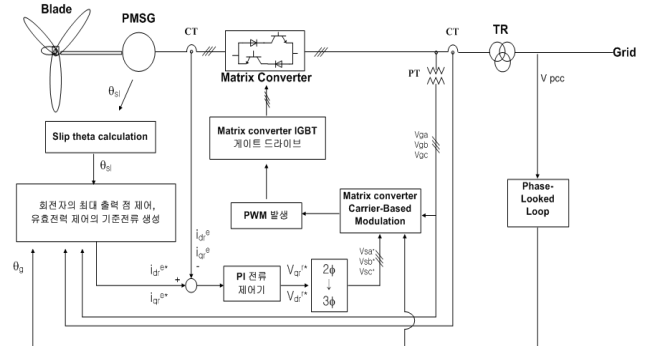


그림 3 제안된 PMSG 풍력발전 시스템의 제어 블록도
fig. 3 Control block of proposed PMSG wind power system

또한 매트릭스 컨버터의 제어부에서 PMSG 풍력발전시스템에서 생성되는 전압의 주파수와 크기를 계통 전압에 맞추기 위해 Phase-Locked Loop를 통해 계통의 기준 위상각을 가져 오고 이를 기준으로 하여 기준 신호를 생성하게 된다.

2.4 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션 모델

그림 4는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링한 전체시스템의 구성도이다. 이 모델은 Nodex 70 모델을 기반으로 한 풍력 터빈시뮬레이터와 PMSG(영구자석형 동기발전기), 매트릭스 컨버터, 계통으로 구성되어 있다.

표 1은 시뮬레이션에서 사용한 회로정수를 나타내고 있다.

표 1. 시뮬레이션 회로정수

Table 1. Circuit Parameters of Simulation Model

| | |
|------------------------|------------------------|
| 전원 전압 | 220V |
| 전원 주파수 | 60Hz |
| 계통연계형 리액터 | 2.5mH |
| R_{blade} (블레이드의 길이) | 34 m |
| ρ | 1.225 kg/m^3 |
| λ | 5.01 |
| C_p | 0.323 |
| 발전기 정격 | 2kW |
| 발전기 정격 회전속도 | 1800rpm |
| 발전기 극수 | 4극 |
| 변압기 용량 | 0.02 MVA |
| 변압비 | 380V: 380V |

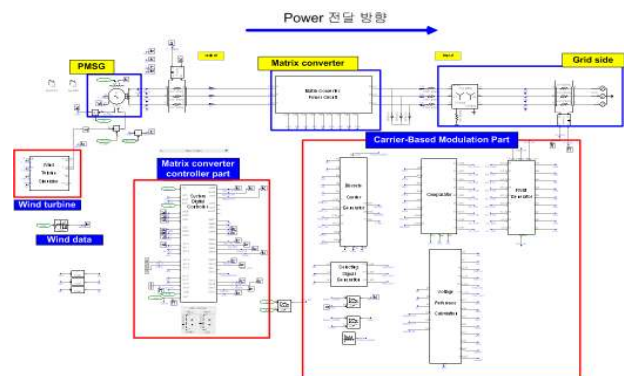


그림 4 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델
fig. 4 Simulation model using PSCAD/EMTDC

시뮬레이션 시나리오는 표2.와 같이 실시하였다.

표 2. 시뮬레이션 시나리오
Table 2. Simulation scenario

| 시뮬레이션 시간 | Wind Speed |
|----------|------------|
| 0sec | 0 m/sec |
| 0.05 sec | 3 m/sec |
| 2.5 sec | 8 m/sec |
| 5 sec | 8 m/sec |
| 7.5 sec | 10 m/sec |
| 10 sec | 10 m/sec |
| 12.5 sec | 13 m/sec |
| 15 sec | 13 m/sec |
| 17.5 sec | 9 m/sec |
| 20 sec | 9 m/sec |

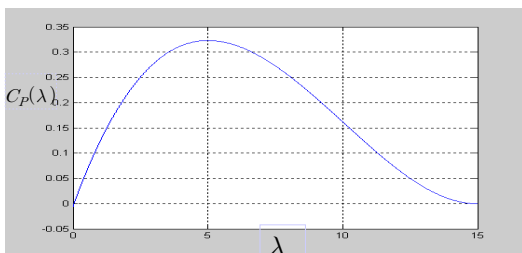


그림 5. 주속비와 출력계수 곡선
Fig 5. Tip Speed Ratio and Power Coefficient

매트릭스 컨버터의 최대 출력점 제어는 λ (주속비)가 5.01일 때 C_p 는 최대출력 값인 0.323을 갖기 때문에 회전자의 속도를 제어해서 C_p 를 5.01로 유지하도록 하여 PMSG 풍력 발전기가 항상 그 풍속에서 최대의 출력이 나올 수 있게 하였다.

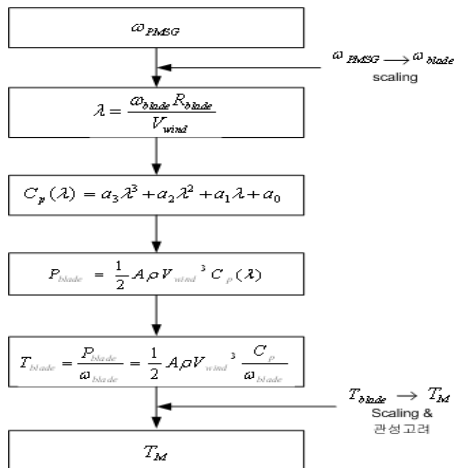


그림 6. 모터토크 산출 알고리즘
Fig 6 Motor Torque Calculation Algorithm

그림 6는 1.5MVA의 블레이드에서 생성된 T_{blade} 를 2kW의 PMSG로 입력 될 수 있는 전동기의 T_{motor} 로 scale을 맞추는 과정을 설명한 것이다.

그림 7는 풍속에 따라 1.5MVA 영구자석풍력발전 시스템의 블레이드에서 발생하는 토크, 출력, C_p , 유효전류 그리고 회전속도를 나타낸 것이다.

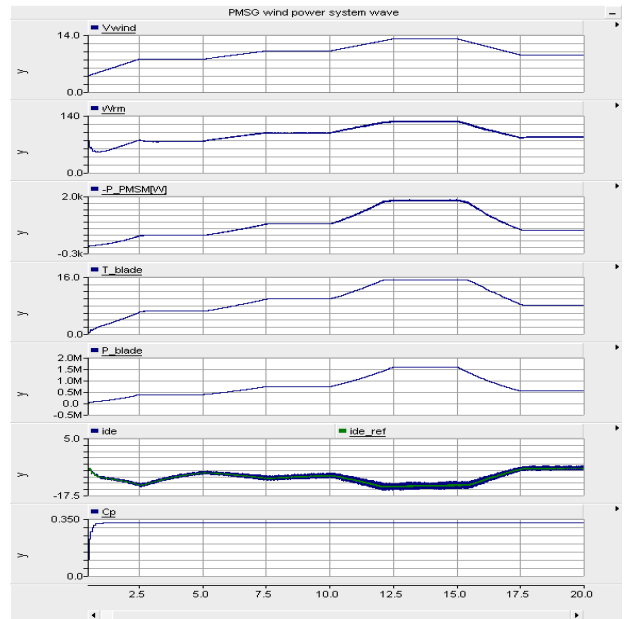


그림 7 풍속에 따른 PMSG Wind power system의 토크, 출력, C_p
fig. 7 C_p , Torque, power and speed for velocity

수학적 모델링을 통해 구현된 Wind turbine simulator는 최대 풍속 13[m/s]에서 약 1.5MW에 도달하는 것을 알 수 있으면 이렇게 생성된 토크와 회전속도는 다시 2kW 발전기의 입력토크와 회전속도로 스케일링된다.

유효전력(ide)는 최대 출력점 제어(MPPT)을 위한 ide_ref에 의해 제어되고 그 결과 w 를 능동적으로 제어하여 C_p 가 일정하게 유지되는 것을 확인 할 수가 있다.

3. 결론

본 논문은 PMSG wind power system을 AC-AC 직접변환이 가능한 Matrix converter와 연계한 모델을 제시하여 기본특성 분석을 위한 이론적 검토를 실시하고 이를 바탕으로 시뮬레이션 모델을 개발하여 동작과 성능을 확인하였다. 또한 실제 블레이드를 모델링한 wind turbine simulator와 연계하여 보다 정확한 동특성을 구현하였다. 추후 제한하는 시스템이 실제 풍력발전기에 활용가능함을 하드웨어적으로 검증할 목적으로 전체시스템의 하드웨어 축소모형을 제작하여 실험을 실시할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Dr. Eggaert, S. Franko, "Innovative Variable Speed Drive for Doubly Fed Wind Turbine Application," 2002 Global Wind Power Conference, July 2002
- [2] 이두영, 윤동진, 정종규, 양승철, 한병문, 송승호 "영구자석 동기발전기 풍력시스템의 하드웨어 시뮬레이터 개발", 대한전기학회 논문지, 57B권 6호, pp.951-958, 2008
- [3] Yulong Li, Nam-Sup Choi*, Byung-Moon Han, Kyoung Min Kim, Buhm Lee, and Jun-Hyub Park, "Direct Duty Ratio Pulse Width Modulation Method for Matrix Converters", International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 6, no. 5, pp.660-669, 2008