

# PMSG 풍력발전시스템에서 전원 저전압 발생시 비틀림 진동 동특성 시뮬레이션

권순형\*, 송승호\*, 최주엽\*, 정승기\*, 최익\*\*  
광운대학교 전기공학과\*, 광운대학교 로봇학부\*\*

## Simulation of Dynamic Torsional Vibration during Grid Low Voltage in a PMSG Wind Power Generation System

Sun Hyung Kwon\*, Seung Ho Song\*, Ju Yeop Choi\*, Seung Gi Jeong\*, Ick Choy\*\*  
Dept. of Electrical Eng. Kwangwoon Univ\*, Dept. of Robot. Kwangwoon Univ\*\*

### ABSTRACT

A wind generator system model includes wind model, rotor dynamics, synchronous generator, power converter, distribution line and infinite bus. This paper investigates the low Voltage Ride Through capability of PMSG wind turbine in a variable speed. The drive train of a wind turbine on 2 mass modeling can observe the shaft torsional vibration when the low voltage occur. To reduce the torsional vibration when the low voltage occur, this paper designs suppression control algorithm of the torsional vibration and implements simulation. A Matlab/Simulink is used to investigate the response during the transient state.

### 1. 서 론

PMSG 풍력발전 시스템은 블레이드와 발전기를 직접 구동하거나 기어박스를 사용하여 다극형 동기발전기를 사용하는 방식이다. 실제 운전중인 풍력시스템에서 발전기와 블레이드가 각각의 속도를 가지면서 축이 비틀리는 현상이 일어난다. 축 비틀림 현상으로 토크의 변화에 따라 진동이 발생하는데 이를 비틀림 진동이라 한다.

풍력발전기 운전중 계통사고시 DC Link 전압 상승을 막기 위한 방법으로 계통측 컨버터에서 DB저항을 동작하여 유효전력을 소비하고, 발전기측 컨버터에서는 토크를 줄여 발전량을 감소시킨다. 이 논문에서는 DB저항 설계 및 DB저항 제어와 풍력발전기 2 mass 모델링을 이용해 토크의 갑작스런 변화에 의한 축비틀림 진동현상을 분석하였다. 축 비틀림 진동을 수학적 모델링하고 전원사고시 DB저항 제어 및 발전기측 컨버터 토크 제어전략을 Matlab/Simulink 시뮬레이션으로 증명하였다.

### 2. 시스템 모델링 및 제어 전략

PMSG를 사용한 풍력발전 시스템의 전체 구성은 그림1과 같다. 블레이드 피치제어로 입력된 기계적 토크는 PMSG와 발전기측 컨버터를 거쳐 전기에너지로 변환되고, 변환된 전기에너지는 계통측 컨버터를 통하여 계통으로 공급된다. 이때 발전기측 컨버터는 최적의 출력을 내기 위해 회전자의 속도를 제어하고, 계통측 컨버터는 주파수 변환 및 역률제어를 수행한다.

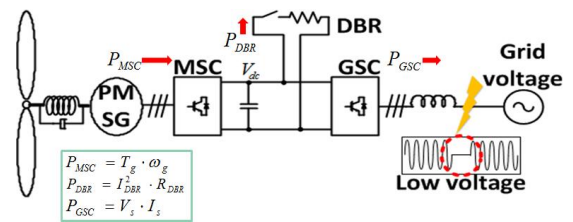


그림 1 PMSG형 가변속 풍력발전 시스템  
Fig. 1 PMSG type variable speed wind power system

### 2.1 풍력터빈의 2-mass 모델링

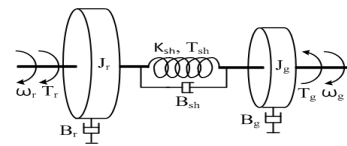


그림 2 Drive train의 2-mass 모델  
Fig. 2 2-mass model of drive train

그림 2는 풍력터빈 drive train의 2 mass 모델을 보여주고 있다. drive train의 복잡한 시스템을 축소하면 대표적으로 로터관성과 발전기관성으로 나누어 2 mass 모델링 한다. 이때 축 비틀림으로 인해 로터속도( $\omega_r$ )와 발전기속도( $\omega_g$ )에 차이가 발생하는데, 축의 비틀림을 마치 로터와 발전기가 스프링( $K_{sh}$ )으로 연결되어 있다고 볼 수 있다.

$$\frac{\omega_g(s)}{T_r(s)} = \frac{1}{J_g s} \cdot \frac{s^2 + K_{sh}/J_r}{s^2 + K_{sh}(1/J_g + 1/J_r)} \quad (1)$$

발전기 토크로부터 발전기 속도( $T_g \rightarrow \omega_g$ )에 이르는 전달 함수들을 구하면 식 (1)가 된다. 이 전달함수를 사용하여 Bode plot를 그리게 되면  $\omega_0$ 의 공진 주파수 성분이 나타난다.

### 2.2 전원 저전압 발생시 제어 전략

Full power converter방식은 전원 저전압 발생시 계통으로 출력하는 유효전력의 감소로 인해 DC Link 측에 과전압이 발생하여 전력변환 컨버터의 과피를 야기 시킬 수 있다.

## 2.2.1 Dynamic Braking Resistor(DBR) 제어

계통 사고 발생시에는 계통측으로 출력되던 전력이 갑자기 없거나 줄어들게 되므로 잉여전력이 발생하고 직류단 전압이 상승하여 시스템이 과전압으로 손상될 염려가 있다.

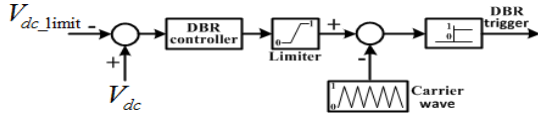


그림 3 직류단 DBR 제어 블록도  
Fig. 3 DC-Link DBR control block diagram

그림 3은 계통 사고 발생시 DC Link전압 상승을 막기위한 DBR제어 알고리즘을 보여주고 있다. 전원 저전압 발생시 제한된 DC Link전압  $V_{dc\_limit}$ 는 DBR제어기 지령값이 된다. 피드백되는  $V_{dc}$ 가 지령값보다 증가할 경우 두 차에 의한 오차는 DBR제어기로 입력된다. 제어기의 출력값은 Limiter를 거쳐 Carrier wave와 비교하여 PWM형태의 DBR trigger을 출력하게 된다. 이 때 PWM 주파수는 Carrier wave의 주파수로 정해진다. DBR trigger는 계통 사고시 발전기측 컨버터 제어에 사용되는데 trigger주파수는 2 mass 모델링의 공진주파수보다 높은 주파수로 선정한다.

## 2.2.2 발전기측 컨버터 제어전략

바람의 입력으로 생산된 블레이드 토크는 발전기측 컨버터에서 MPPT 알고리즘을 통해 출력되는 부하토크와 평형을 이루어 발전기에서 최대파워를 출력한다. 그림 4에서  $K_{LV}$ 는 0~1 사이의 값으로 전원 저전압 발생시 MPPT알고리즘으로 계산된 부하토크를  $K_{LV}$ 값의 비율로 감소하는 gain으로 사용된다. 발전기측 부하토크의 감소로 발전기에서 생산되는 전력 또한 감소하게 된다. 선정된  $K_{LV}$ 의 비율로 발전전력이 감소한다면 LVRT시 DBR에서 소비해야 하는 전력은 감소하게 된다. 따라서 DBR용량이 줄어들 비용적인 측면이나 열 손실을 줄일 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

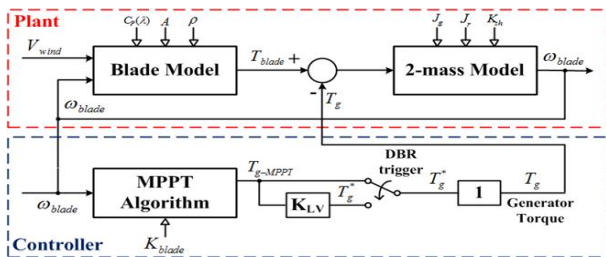


그림 4 제안된 LVRT시 발전기 토크제어 전략  
Fig. 4 Proposed generator torque control strategy for LVRT

MPPT 알고리즘으로 계산된 부하토크가 감소하면 로터의 속도가 증가하게 된다. 이 때 드라이브 트레인을 2 mass 모델링하여 동특성을 해석한다면, 갑작스런 토크변화로 인해 로터와 발전기 사이에 속도차이가 발생하여 축 비틀림 진동현상이

발생한다. 일정비율의 토크 감소 방법에는 다양한 고조파를 포함하게 된다. 고조파 중에서 드라이브 트레인의 고유 진동주파수 성분 포함되어 있다면 축 비틀림 진동현상이 발생하게 된다. 이와 같은 비틀림 진동현상을 억제하기 위해서 블레이드 토크 및 발전기 부하 토크에 포함된 공진 주파수 성분을 제거하거나 진동을 억제하는 제어전략이 필요하다.

본 논문에서는 계통 사고 발생시 부하토크 감소로 인한 축 비틀림 진동을 줄이기 위해 축의 공진 주파수보다 높은 주파수의 DBR 트리거 신호에 맞춰 발전기측 부하토크를 줄이도록 제어하였다. 펄스주기에 따라 토크리플이 발생하지만 이 리플 주파수는 큰 관성을 가진 축의 공진 주파수와 멀리 떨어져 있으므로 공진에 미치는 영향이 적을 것으로 판단하였다. 발전기측 토크를 펄스형태로 줄일 경우 결국 속도는 증가하지만 일정비율의 토크 감소 방법으로 부하를 감소하는 경우와 비교하면 속도증가량은 줄어들게 된다.

## 2.3 시뮬레이션

풍력발전 시스템을 Matlab/simulink로 블레이드, PMSG, 계통을 모델링하고 MSC와 GSC, DBR을 모델링하였다. 표 1의 2MW PMSG 풍력발전시스템의 파라미터를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Parameters of simulation

Parameter	Value	Unit
Prate_PMSG : PMSG 정격 용량	2.0	MW
Rate_speed : PMSG 정격 속도	18	rpm
P_PMSG : 극수	120	
$J_g$ : 발전기 관성	$0.950 \times 10^6$	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
$J_r$ : 로터 관성	$3.800 \times 10^6$	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
$K_{sh}$ : 축 강성	$288.3 \times 10^6$	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$
$K_T$ : 토크상수	688.34	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$
$V_{dc}$ : DC Link 전압	1100	V
DBR : Dynamic Braking Resistor	1.96	$\Omega$
$V_{Grid}$ : 계통전압	690	V

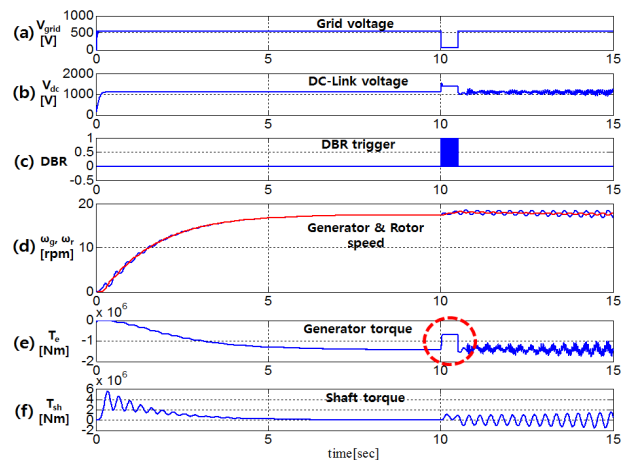


그림 5. LVRT구간에서 일정비율의 토크 감소 방법 시뮬레이션  
Fig. 5 Torque reduction method with constant ratio during LVRT

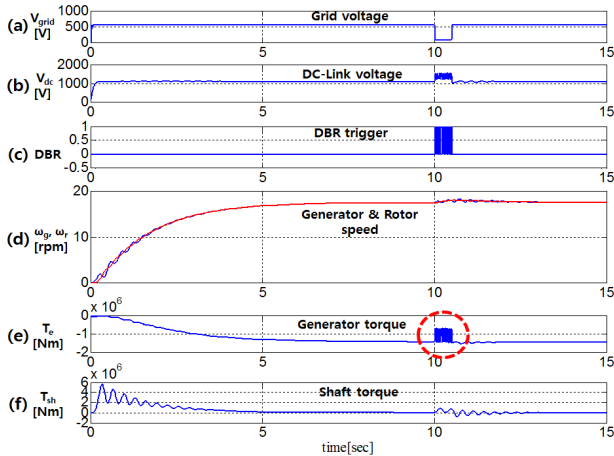


그림 6 LVRT구간에서 제안된 펄스형 토크 감소 방법 시뮬레이션  
Fig. 6 Proposed torque reduction method of pulse type during LVRT

이 시뮬레이션에서 풍속은 정격 풍속인 11[rad/sec]으로 일정하다고 가정하였다. 그림 5는 LVRT구간에서 발전기측 컨버터 부하토크를 일정비율의 토크 감소 방법의 시뮬레이션 결과이다. 0~5초 동안은 풍력발전 시스템의 과도상태를 보여준다. (a)에서 보면 10초에서 500ms동안 계통전압은 정격에 15% 저전압이 발생하였다. 그림 (b)은 계통의 저전압으로 인해 DC Link 전압은 상승한다. 그림 (c),(e)에서 보듯이 1400V 이상이 되면 DBR 트리거는 on/off하고 부하토크는 일정한 비율로 정격에 약 50% 감소한다. 그림 (e)에서 발전기 토크가 음의 값인 이유는 발전모드로 운전하고 있기 때문이다. 그림 (f)에서 보면 10.5초 이후 계통전압이 정격으로 회복되면서 갑작스런 부하토크 변동으로 인해 축 토크가 수렴하지 않고 3.1Hz의 공진주파수 주기로 발산한다. 그림 (d)에서 보듯이 그 결과 발전기속도와 로터의 속도 역시 발산한다.

그림 6은 LVRT구간에서 제안된 펄스형태의 토크 감소 방법 시뮬레이션 결과이다. 그림 (a)에서 보듯이 10초에서 500ms동안 정격에 15% 저전압이 발생하였다. 그림 (b)은 DC Link 전압의 증가를 보여준다. 그림 (c)을 보면 DC Link 전압이 1400V이상 증가하였을 때 DBR 트리거는 on/off한다. 그림 (e)에서는  $K_{LV}$ 상수를 0.5로 선정하여 DBR 트리거신호에 맞춰 발전기측 컨버터에서 부하토크를 50% 감소한다. 그림 (d)에서 보듯이 부하토크 감소로 발전기, 로터 속도는 정격에서 약 0.5[rpm] 증가하지만 10.5초 이후 계통전압이 정상상태로 회복될 경우 발전기와 로터의 속도는 정격속도로 수렴한다. 그림 (f)에서 보면 축 토크 역시 발전기측 부하토크 감소로 인해 진동이 발생하지만 10.5초 이후에 0으로 수렴한다.

### 3. 결론

본 논문에서는 영구자석형 동기발전기(PMSG)를 사용한 가변속 풍력발전 시스템을 2 mass 모델링하여 축의 비틀림 진동 원인을 분석하였다. 계통사고 발생시 DBR제어 뿐만 아니라 발전기측 부하토크를 줄여 발전전력을 줄여야 한다. DBR 제어와 발전기측 컨버터에서 LVRT능력을 서로 분담한다면 DBR의 용량을 줄일 수 있어 비용절감 효과가 있다. 하지만 발전기측 부하토크가 변할 경우 로터와 발전기를 연결하는 축에서 비틀

림 진동현상이 일어나게 된다. 이 비틀림 진동현상을 줄이기 위한 토크 감소 방법을 제시하였고 시뮬레이션 결과를 통해 제어특성을 검증하였다. MSC의 토크변화 외에 바람과 풍력발전기의 특성 등으로 인해 블레이드 입력토크에 진동성분이 포함되므로 축의 비틀림 진동현상을 유발하는 경우가 생긴다. 추후 블레이드 입력측 맥동 모델을 포함하여 정상운전 및 계통사고로 인한 비틀림 진동을 효과적으로 억제하는 제어전략에 관한 연구를 수행할 예정이다.

본 연구는 2011(2차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20093021020030)

### 참고 문헌

- [1] 송승호, 임지훈, “풍력발전시스템의 계통연계를 위한 선진국 그리드코드의 분석과 LVRT 기술조사”, 풍력 한국 에너지학회 학술대회논문집, pp.93 97, 2008. 10.
- [2] 김정재, 송승호, “영구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력발전 시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발”, 전력전자학회 논문지, pp.610 617, 2005. 12.
- [3] 유니슨, “영구자석형 가변속 풍력발전기의 최대 출력 제어”, 유니슨 위탁과제 최종보고서, 2003.
- [4] Seung Ho Song, Jun Keun Ji, Seung Ki Sul, Min Ho Park, “Torsional vibration suppression control in 2 mass system by state feedback speed controller”, Second IEEE Conference on Control Applications, pp.129 134, 1993, September.
- [5] E ON Netz GmbH, “Grid Code High and Extra High Voltage”, 2008.
- [6] A.D. Hansen, G. Michalke, “Multi pole permanent magnet synchronous generator wind turbines’ grid support capability in uninterrupted operation during grid faults”, IET Renewable Power Generation, pp.333 348, 2008. September.
- [7] GE Energy, “Modeling of GE Wind Turbine Generators for grid studies”, 2010, April.