

PMSG 풍력발전시스템에서 전원 저전압 발생시 비틀림 진동 동특성 시뮬레이션 및 실험

권순형¹, 송승호[†]

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

Sun-Hyung Kwon¹, and Seung-Ho Song[†]

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. The simulation based on MATLAB/SIMULINK has validated at the transient state of the PMSG and an experiment using 3kW simulator has validated the LVRT control.

Keywords: low-voltage ride-through(LVRT), permanent magnet synchronous generator(PMSG), machine side converter(MSC), grid side converter(GSC), wind turbine

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. 이러한 비틀림 진동을 감소하기 위해 기계적인 설계로 인한 진동보상, 풍력 발전 시스템의 상위제어기에서 진동저감 제어에 의존한다. 하지만 전력변환장치인 인버터에서 drive train에서 발생하는 진동을 저감하는 제어의 개발이 미비한 실정이다. 풍력 발전시스템에서 LVRT 제어시 토크의 변동에 인한 축 비틀림 진동을 저감하는 제어 알고리즘을 인버터에 적용하여 제시하고자 한다.

풍력발전기 운전중 계통사고시 DC-Link 전압 상승을 막기 위한 방법으로 계통측 컨버터에서 초과 저항을 동

작하여 유효전력을 소비하고, 발전기측 컨버터에서는 토크를 줄여 발전량을 감소시킨다. 이 논문에서는 초과저항 설계 및 초과저항 제어와 풍력발전기 2-mass 모델링을 이용해 토크의 갑작스런 변화에 의한 축비틀림 진동현상을 분석하였다. 축 비틀림 진동을 수학적 모델링하고 전원사고시 초과저항 제어 및 발전기측 컨버터 토크 제어전략을 Matlab/Simulink 시뮬레이션으로 증명하였다.

2. 시스템 모델링 및 제어 전략

PMSG을 사용한 풍력발전 시스템의 전체 구성은 그림1과 같다. 블레이드 피치제어로 입력된 기계적 토크는 PMSG와 발전기측 컨버터를 거쳐 전기에너지로 변환되고,

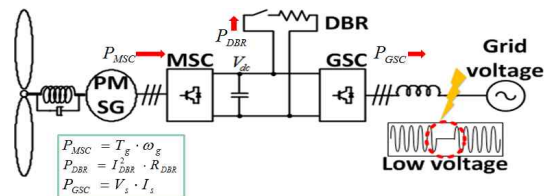


Fig. 1 PMSG type variable speed wind power system

Paper number: TKPE-2013-18-3-2 ISSN: 1229-2214
[†] Corresponding author: ssh@kw.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Kwangwoon University
 Tel: +82-2-940-5762 Fax: +82-2-940-5141
¹ Electrical Control Engineering Team, Hyundai Mobis
 Manuscript received Aug. 30, 2012; accepted Jan. 14, 2013

변환된 전기에너지는 계통측 컨버터를 통하여 계통으로 공급된다. 이때 발전기측 컨버터는 최적의 출력을 내기 위해 회전자속의 속도를 제어하고, 계통측 컨버터는 주파수 변환 및 역률제어를 수행한다^[1].

2.1 풍력터빈의 2-mass 모델링

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(ω_r)와 발전기속도(ω_g)에 차이가 발생하는데, 축의 비틀림을 마치 로터와 발전기가 스프링(K_{sh})으로 연결되어 있다고 볼 수 있다. 그림 2를 수학적으로 모델링을 하면 식 (1)-(3)으로 표현할 수 있다.

$$T_r - T_{sh} = J_r \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + B_r\omega_r \tag{1}$$

$$T_{sh} - T_g = J_g \cdot \frac{d\omega_g}{dt} + B_g\omega_g \tag{2}$$

$$T_{sh} = \frac{K_{sh}}{s} \cdot (\omega_g - \omega_r) + B_{sh} \cdot (\omega_g - \omega_r) \tag{3}$$

위의 모델링 식에서 마찰계수를 무시한 이상적인 2-mass 시스템에서 발전기 토크로부터 발전기 속도($T_g \rightarrow \omega_g$)에 이르는 전달 함수들을 구하면 식 (4)가 된다. 이 전달함수를 사용하여 Bode plot를 그리게 되면 ω_0 의 공진 주파수 성분이 나타난다^[2].

$$\frac{\omega_g(s)}{T_g(s)} = \frac{1}{J_g s} \cdot \frac{s^2 + K_{sh}/J_r}{s^2 + K_{sh}(1/J_g + 1/J_r)} \tag{4}$$

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 파괴를 야기시킬 수 있다. 그러므로 저전압 발생시 직류단 전압을 제어하기 위한 제어방법으로는 직류단에 초과저항을 설치하여 제어하는 방법과 발전전력을 줄이는 방법이 있다. 그림 3은 저전압 발생시 두가지 제어방법을 전력흐름도를 이용하여 설명하였다.

2.2.1 초과 저항 제어

계통 사고 발생시에는 계통측으로 출력되던 전력이

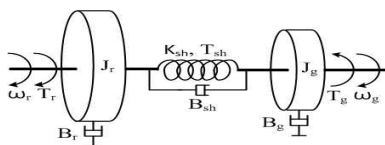


Fig. 2 2-mass model of drive train

갑자기 없어지거나 줄어들게 되므로 잉여전력이 발생하고 직류단 전압이 상승하여 시스템이 과전압으로 손상될 염려가 있다.

그림 4은 계통 사고 발생시 DC-Link전압 상승을 막기위한 초과저항제어 알고리즘을 보여주고 있다. 전원 저전압 발생시 제한된 DC-Link전압 V_{dc_limit} 는 초과저항제어기 지령값이 된다. 피드백되는 V_{dc} 가 지령값보다 증가할 경우 두 차에 의한 오차는 초과저항제어기로 입력된다. 제어기의 출력값은 Limiter를 거쳐 Carrier wave와 비교하여 PWM형태의 초과저항 trigger을 출력하게 된다. 이 때 PWM 주파수는 Carrier wave의 주파수로 정해진다. 초과저항 트리거는 계통 사고시 발전기측 컨버터 제어에 사용되는데 트리거주파수는 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 5에서 K_{LV} 는 0~1사이의 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 초과저항에서 소비해야 하는 전력은 감소하게 된다. 따라서 초과저항용량이 줄어 비용적인 측면이나 열 손실을 줄일 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

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 발생

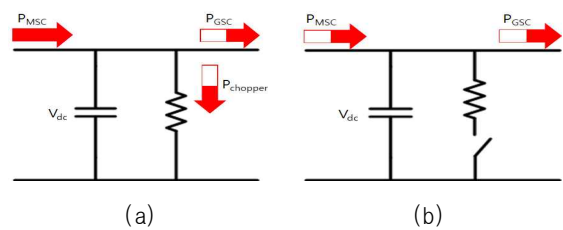


Fig. 3 LVRT control in low-voltage
(a) chopper control in low-voltage
(b) torque control in low-voltage

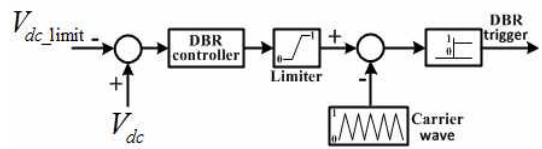


Fig. 4 DC-Link chopper-resistance control block diagram

하여 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 감소하기 위해 식 (5)와 같이 초과저항 트리거 신호에 따라 발전기측 부하토크를 임의의 비율로 저감하는 제어전략을 제안하였다.

$$\begin{cases} T_{g_ref} = K_{LV} \cdot T_{g_MPPT} & \text{when DBR} = \text{ON} \\ T_{g_ref} = T_{g_MPPT} & \text{when DBR} = \text{OFF} \end{cases} \quad (5)$$

발전기측 토크 감소를 펄스열 형태로 수행할 경우 연속적으로 토크를 감소하는 기존의 방법에 비해 전체 토크 감소량은 줄어들며 그 결과 속도증가량도 줄어들게 된다. 제안된 방법은 발전기에 인가되는 토크에 리플이 발생하지만 이 리플주파수는 큰 관성을 가진 구동계의 공진 주파수와 멀리 떨어져 있으므로 공진에 의한 비틀림 진동의 발생은 줄어든다.

3. 시뮬레이션

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

표 1에서 발전기 관성(J_g), 로터 관성(J_r), 축 강성(K_{sh})의 파라미터 값을 이용하여 식 (4)에 대입하면 그림 7과 같이 공진점이 19.5[rad/sec]에서 발생하는 것을 알 수

Table 1 Parameters of simulation

Parameter	Value	Unit
Rate power(P_{rate})	2.0	MW
Rate speed(W_{rate})	18	rpm
Pole	120	
Inertia of generator(J_g)	$0.950 \cdot 10^6$	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
Inertia of rotor(J_r)	$3.800 \cdot 10^6$	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
Shaft rigidity(K_{sh})	$288.3 \cdot 10^6$	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$
Torque constance(K_T)	688.34	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$
DC-Link voltage(V_{dc})	1100	V
Chopper resistor	1.96	Ω
Grid voltage(V_{grid})	690	V

있고, 공진주파수(f_0)는 3.1Hz인 것을 알 수 있다.

이 시뮬레이션에서 풍속은 정격 풍속인 11[m/sec]로 일정하다고 가정하였다. 그림 8는 LVRT구간에서 발전기측 부하토크 지령값을 일정비율로 감소시키는 기존의 방법에 대한 시뮬레이션 결과이다. 0~5초 동안은 풍력발전 시스템의 과도상태를 보여준다. 그림 8 (a)에서 계통전압은 10초에서 500ms동안 정격의 15% 저전압이 발생하였다. 그림 (b)은 계통의 저전압으로 인해 DC-Link 전압은 상승한다. 그림 (c),(e)에서 보듯이 1400V이상이 되면 초과 저항의 트리거 신호가 펄스열로 인가되고 부하토크는 기존의 값에서 약 50%로 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

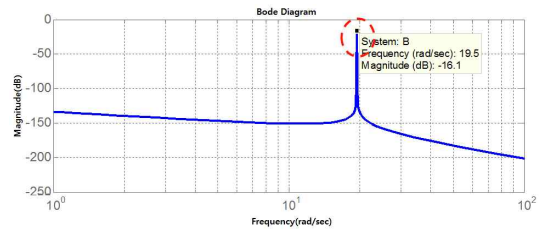


Fig. 7 Bode plot of 2-mass system

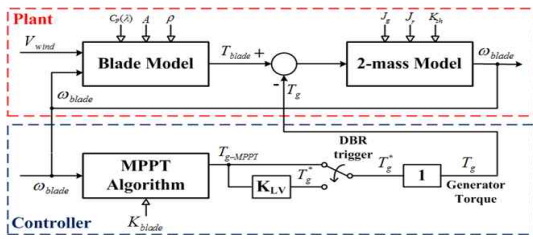


Fig. 5 Proposed generator torque control strategy for LVRT

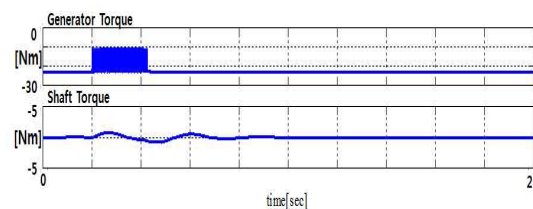


Fig. 6 Shaft torque during LVRT control

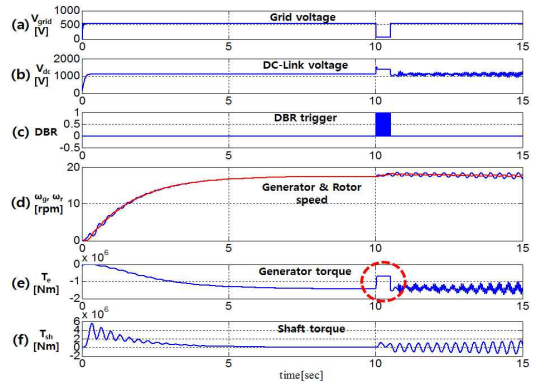


Fig. 8 Torque reduction method with constant ratio during LVRT

주기로 발산한다. 그림 (d)에서 보듯이 그 결과 발전기 속도와 로터의 속도 역시 발산하고 있다.

그림 9은 LVRT구간에서 제안된 펄스형태의 토크 감소 방법 시뮬레이션 결과이다. 그림 9 (a)에서 계통전압은 그림 7과 동일한 크기와 지속시간의 저전압이 발생하였다. 그림 (b)은 DC-Link 전압의 증가를 보여준다. 그림 (c)을 보면 DC-Link 전압이 1400V이상 증가하였을 때 초과 저항 트리거는 on/off한다. 그림 (e)에서는 기존의 토크지령을 K_{LV} 로 곱한 후 초과저항 트리거신호에 맞춰 부하토크 지령값을 펄스열의 형태로 하여 감소한다. 현재 K_{LV} 값은 0.5로 설정되어 있다. 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 발전기 축 부하토크 감소로 인해 진동이 발생하지만 10.5초 이후에 0으로 수렴한다.

이렇게 토크변화에 따라 과도상태에서 축 토크 및 발전기, 로터의 속도에 진동은 정상상태에서 보다 비틀림 진동의 크기는 큰 것을 알 수 있다. 그림 8의 경우는 토크의 변화가 일정비율로 감소시 10.5초 이후 제어가 불가능하게 되는 최악조건의 시뮬레이션을 보여 주고 있다. 그림 10은 발전기의 회전속도의 제곱에 비례하여 발전기의 토크 기준값을 계산하는 회전속도 추종 토크 제어 블록 다이어그램을 보여주고 있다. K_{blade} 는 블레이드의 기계적 출력에 대한 회전속도의 계수를 의미한다. 실제실험과의 차이점은 시뮬레이션의 경우 이상적인 발전기의 파라미터를 이용하여 마찰계수(B)는 무시하였다. 이로 인해 발전기의 속도가 공진주파수 주기의 리플이 발생할 경우 리플을 감소시키는 마찰계수는 존재하지 않기 때문에 축의 비틀림 진동을 저감하는 제어를 하지 않는다면 그림 8의 파형처럼 진동발산할 수 있다.

4. 실험

계통의 사고시의 PMSG 시스템의 동특성을 살펴보기

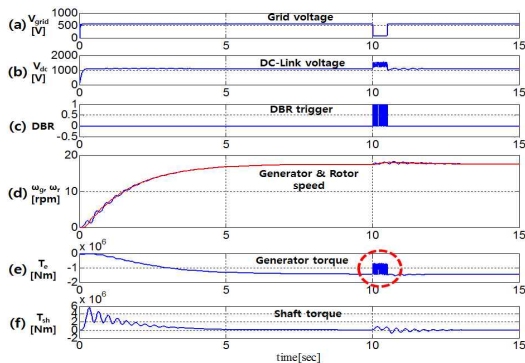


Fig. 9 Proposed torque reduction method of pulse type during LVRT

Table 2 Parameters of M-G set

	Parameter	Value	Unit
generator	Rate power	3540	kW
	Rate speed	1200	rpm
	Pole	8	
	Inertia of generator(J_g)	0.0068	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
	add inertia	0.075	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
	Torque constance(K_T)	2.40	$\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$
rotor	Inertia of rotor(J_r)	0.015	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
	add inertia	0.312	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
shaft	Shaft rigidity(K_{sh})	162.86	$\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$
	Shaft length	1000	mm
	Shaft diameter	12	mm

위해서 3kW 축소 시뮬레이터를 구성하고 동특성을 실험하였다. 본 논문에서 이론적으로 제안한 전원 저전압 발생시 PMSG 시스템의 동특성과 저전압 발생시 초과저항과 발전기축 컨버터의 동시제어 알고리즘을 시뮬레이터로 검증하였다. 그림 11은 시뮬레이터의 실제구성으로 블레이드를 모의하는 유도 전동기와 동기 발전기 세트이다. 좌측이 유도 동기는 Motor Drive를 이용하여 제어할 수 있으며 토크 지령다이얼을 이용하여 토크출력 제어가 가능하다.

표 2는 실험에 사용된 M-G set의 파라미터를 보여주고 있다. 실제 2MW 풍력 발전 시스템의 블레이드와 발전기 관성비를 고려하여 유도 전동기와 동기 전동기축에 추가관성을 설치하였다. 전동기와 발전기 사이를 얇고 긴축으로 연결하여 부하토크의 변화에 따라 비틀림 진동 현상을 발전기축 엔코더의 출력신호를 이용하여 관찰하였다. 2MW 풍력 발전 시스템 시뮬레이션의 공진주파수 파라미터인 3.1Hz를 만족하기 위해서 얇고 긴축을 설계하였다. 3kW M-G set의 작성 관성에서 3.1Hz의 공진 주파수를 맞추기 위해서는 축의 지름이 10mm 이하로 낮아지거나, 길이가 2m까지 길어지는 경우 발생한다. 실험실 환경에 맞게 축 설계를 하기 위해 공진주파수는 7.9Hz로 맞추었다.

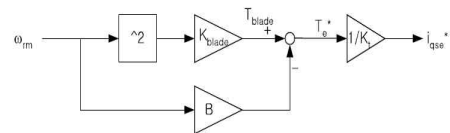


Fig. 10 Torque control block diagram

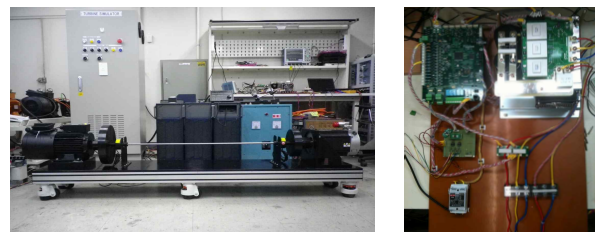


Fig. 11 MG-set and machine side converter

발전기측 컨버터는 제어보드와 전력변환장치, 전류센서가 연결되어 있다. 엔코더 외부 인터페이스를 이용해 유도 전동기와 동기 발전기의 엔코더 신호를 제어보드로 입력할 수 있다. 동기 발전기의 전류를 측정하기 위해 2개의 전류센서가 연결되어 있고 직류단 전압을 측정하는 전압 센서가 연결되어 있다. 직류단에는 초퍼저항과 계통측 컨버터를 모의할 수 있는 저항이 병렬로 연결되어 있다. 계통측 컨버터를 모의하기 위한 저항은 직류단 전압을 유지할 수 있도록 발전기로부터 발전된 전력을 소비하도록 설계하였다. 저항과 직류단 사이에는 자기접촉기로 연결되어 있어 제어보드의 D/O를 이용해 전원 저전압 사고를 모의할 수 있도록 하였다.

그림 12은 블레이드 시뮬레이터에서 동기 발전기 속도 제어시 발전기측 컨버터의 부하토크의 스텝변화에 따른 결과 파형이다. 실험 결과에서 보면 부하토크 변화시 발전기 속도는 공진주파수 주기로 진동을 하는 것을 알 수 있다. 축 설계시 계산한 7.9Hz와 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

그림 13은 발전기에서 발전 전력을 생산하고 있을때 자기 접촉기를 이용하여 모의 전원 저전압 발생 실험 결과이다. 실험 결과에서 보듯이 자기 접촉기 오프시 계통 모의 저항으로 흐르는 전류는 흐르지 못하고 이에 따라 직류단 전압은 상승하는 것을 알 수 있다. 이 실험을 통하여 저항을 사용하여 계통을 모의 가능성을 판단하였다.

그림 14와 그림 15은 전원 저전압 발생시 직류단 제어 알고리즘을 실험으로 증명하였다. 발전기 속도는 축 공진주파수로 인해 회전시 속도에 리플성분이 존재한다. 시뮬레이션에서 존재하지 않는 정상상태에서의 속도리플성분은 실제 실험에서만 존재한다. 그 이유는 M-Gset 사이 축으로 연결시 정확한 축 정렬의 오차보상에 한계

로 인해 리플성분이 존재하게 된다. 그렇지만 정상상태에서의 속도리플 크기는 정격 속도의 1%미만으로 시험에 영향을 미치지 않을 것으로 판단하여 실험을 진행하였다.

그림 14는 전원 저전압 발생시 발전기측 컨버터에서 부하토크를 일정하게 감소할 경우 발전기속도의 공진주파수의 최대값은 약 1130rpm까지 증가하였다. 그림 15은 부하토크를 초퍼저항 트리거신호와 동기화하여 감소할 경우 발전기 속도의 변동이 거의 없이 LVRT제어를 할 수 있는 것을 실험으로 증명하였다.

5. 결 론

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

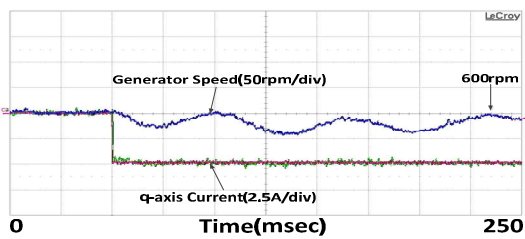


Fig. 12 Shaft resonance at transient status

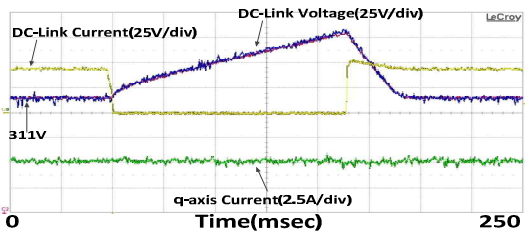


Fig. 13 DC-Link voltage during low-voltage

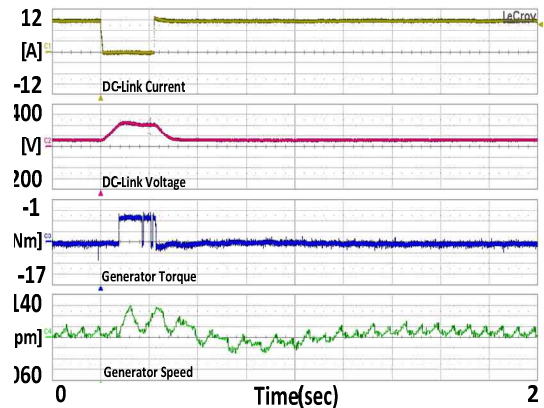


Fig. 14 MSC torque control during low-voltage

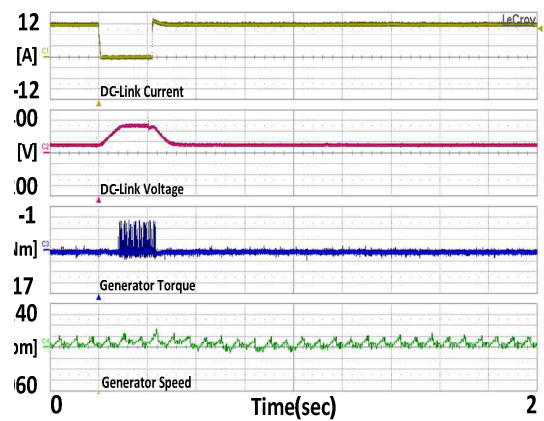


Fig. 15 Torque reduction method of pulse type during low-voltage

비틀림 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. 전원의 사고발생시 초퍼저항과 발전기측 컨버터 토크제어를 함께 제어하는 방법의 알고리즘을 제시 하였고, 3kW급 시뮬레이터를 이용해 실험적으로 증명하였다.

이 논문은 2009년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.



권순형(權純炯)

1984년 7월 12일생. 2010년 광운대 전기공학과 졸업. 2010년~2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 현대모비스 연구원.



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 28일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2000년~2005년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2006년~2011년 광운대 전기공학과 부교수. 2012년~현재 광운대 전기공학과 교수.

References

- [1] Jeong-Jae Kim, Seung-Ho Song, "PSCAD / EMTDC Simulation Model of Variable Speed Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Machine," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, pp. 610-617, Dec. 2005.
- [2] 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, Sep. 1993.
- [3] E-ON Netz GmbH, "Grid Code - High and Extra High Voltage," 2008.
- [4] 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, Sep. 2008.
- [5] GE Energy, "Modeling of GE Wind Turbine-Generators for grid studies," Apr. 2010.
- [6] Anca D. Hansen, Nicolas A. Cutululis, Helen Markou, Poul Sorensen, Florin Iov, "Grid Fault and Design-basis for Wind Turbines Final report," *Riso DTU National Laboratory for Sustainable Energy*, Jan. 2010.
- [7] E.L van der Hooft, P.Schaak, T.G. van Engelen, "Wind Turbine Control Algorithms," Dec. 2003.
- [8] Andrew Causebrook, David J, Atkinson and Alan G. Jack, "Fault Ride-Through of Large Wind Farms Using Series Dynamic Braking Resistors," *IEEE Transactions on power systems*, Vol. 22, No. 3, Aug. 2007.
- [9] Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Phill Cartwright, Mike Hughes, "Wind Energy Generation," WILEY, 2009.