

계통연계형 PMSG 풍력발전시스템의 LVRT 동작 분석을 위한 하드웨어 시뮬레이터

Hardware Simulator for LVRT Operation Analysis of Grid-Tied PMSG Wind Power System

이 재 욱* · 김 재 혁* · 최 영 도** · 한 병 문† · 윤영두*

(Jae-Wook Lee · Jae-Hyuk Kim · Young-Do Choi · Byung-Moon Han · Young-Doo Yoon)

Abstract - This paper introduces a hardware simulator for the LVRT operation analysis of the grid-tied PMSG wind power system with a power dissipation circuit. The power dissipation circuit, which is composed of chopper and resistor, suppresses the sudden increase of DC-link voltage in the back-to-back converter of the grid-tied PMSG wind power system. The LVRT operation was first analyzed using computer simulations with PSCAD/EMTDC. A wind power simulator including the power dissipation circuit and the fault simulator composed of variac and IGBT were built to analyze the LVRT operation. Various experiments were conducted to verify the effectiveness of the power dissipation circuit for the LVRT operation. The developed hardware simulator can be extensively utilized for the analysis of various LVRT operations of the grid-tied wind power system.

Key Words : Grid-tied wind power system, Permanent magnet synchronous generator (PMSG), Grid code, Low-voltage-ride-through (LVRT), Hardware simulator, Back-to-back (BTB) converter, Chopper

1. 서 론

최근 해상풍력에 관심이 집중되면서 풍력발전은 단지의 대형화와 개별 발전기의 대용량화가 동시에 추진되고 있다. 단일 풍력발전기에서 생산되는 전력량이 커지면서 정상운전과 사고발생 시 연계된 전력계통에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고 이에 대한 효과적인 대책을 수립하는 것이 대단히 중요하게 되었다[1-4]. 현재 대용량 풍력발전에 가장 많이 사용되는 발전기는 권선형 유도발전기와 영구자석형 동기발전기의 2 종류이다. 권선형 유도발전기는 통상 회전자 측에 BTB(back-to-back) 전압원 컨버터를 이용하여 전력계통에 결합한 이중역자 유도발전기(DFIG:Doubly Fed Induction Generator)방식으로 운용되는데 전력계통에 고장이 발생하면 회전자 측에 설치한 crow-bar를 동작시켜 LVRT(low voltage ride through) 문제를 해결한다[5]. 한편 영구자석형 동기발전기(PMSG:Permanent Magnet Synchronous Generator)는 고정자 측에 BTB 전압원 컨버터를 이용하여 전력계통에 결합한 방식으로 운용되는데 전력계통에 고장이 발생하면 BTB 전압원 컨버터의 DC link전압이 상승하여 컨버터의 소손을 유발한다[6-7]. 이 DC link 전압의 상승을

억제하는 방안으로 DC link 단에 저항을 삽입하여 열에너지로 소모하는 방법이 가능하나 DC 전압을 일정하게 유지하지 못해 교류전압의 회복 시 신속한 재가동에 어려움을 유발한다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 DC link 단에 초퍼와 저항을 삽입하여 DC link 전압을 일정하게 유지하면서 잉여 에너지를 저항에서 열에너지로 소모하는 방법이 제안되었다[8]. 그러나 제안된 방식에서는 동작분석 결과만 제시하고 DC link 전압을 억제하기 위한 구체적인 초퍼의 전압과 전류 제어에 대한 설명이 기술되어 있지 않다.

또한, LVRT 동작을 분석하는 시뮬레이터에 대한 연구로 전력소모회로가 없는 BTB 컨버터의 MSC(machine side converter)와 GSC(grid side converter)의 전류제어 및 전압제어 방법에 대한 연구가 있었다[9]. 하지만 전력소모회로 적용 시의 전반적인 특성을 체계적으로 분석하는 연구는 수행되지 못하였다.

본 논문에서는 전력소모회로를 가지고 있는 계통연계 PMSG 풍력발전의 LVRT 동작을 체계적으로 분석하기 위해 3[kW] 용량의 하드웨어 시뮬레이터를 제작하고 실험을 실시하였다. 초퍼와 저항으로 구성되어 있는 전력소모회로는 연계된 전력계통에 순간전압강하 또는 더 심각한 순간정전이 발생한 경우 BTB 전압원 컨버터의 DC link 전압이 상승하는 것을 억제하도록 동작한다. 이 전력소모회로는 DC link 전압의 상승 시에만 동작하며, 풍력 발전시스템과의 연동 없이도 풍력 발전시스템의 전력 변환 장치를 보호하는 기능을 갖는다. 영구자석형 풍력발전시스템의 터빈은 유도전동기와 모터드라이브로 모의하고 그리드의 순간전압강하와 순간정전은 별도의 모의장치를 제작하여 모의하였다. 제작한 PMSG 풍력발전 모의장치, 에너지 소모회로, 그리드

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea.

E-mail: erichan@mju.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Myongji University, Korea.

** KEPCO KEPRI, Korea

Received : April 26, 2014; Accepted : August 19, 2014

사고 모의장치를 연결하여 LVRT 상황에서의 동작을 분석하였다.

2. 풍력발전의 LVRT 계통연계 규정

풍력발전의 대용량화와 대단지화 추세에 따라 풍력발전이 전력계통의 전력품질이나 안정도에 미치는 영향도 무시할 수 없게 되었다. 풍력발전의 불안정한 출력변동, 즉 예측이 어려운 발전량 변동으로 인해 계통연계 시 계통의 안정적인 운영에 문제를 야기할 수 있게 되었다. 실제로 유럽에서는 계통의 사고 등으로 인해 풍력발전시스템이 연쇄적으로 차단되기도 하였고, 도시의 블랙아웃 현상을 가져온 사례도 발생했다고 전해지고 있다.

계통운영자는 이러한 사고를 방지하고 계통의 안정적인 운영을 위해 계통에 접속하고자 하는 풍력발전이 계통의 신뢰도와 안정도를 저해하지 않도록 계통연계규정 즉 그리드 코드(Grid Code)를 두고 있다[10-12]. 계통연계규정은 일반적으로 무효전력의 조절을 위한 제어 기준, 주파수 범위에 따른 운전 기준, 전기품질 관련 기준이 있고, 또한 계통사고 시 풍력발전의 연계운전 기준을 포함하고 있다.

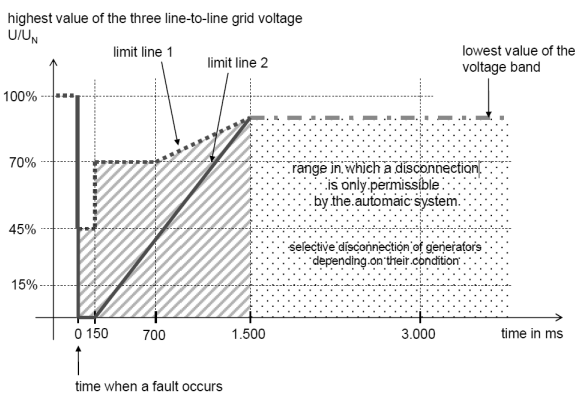


그림 1 독일의 LVRT 계통연계 규정 [13]
Fig. 1 LVRT limit curve in German Grid Code [13]

계통사고 시 풍력발전의 연계운전에 관한 기준은 각국이 자국의 계통상황에 따라 다소 상이한 기준을 가지고 있다. 그림 1은 독일의 계통사고 시 풍력 발전의 연계에 관한 LVRT(low voltage ride through) 기준이다[13]. 이 LVRT 기준은 계통사고 시 풍력발전이 계통과 연계된 상태에서 연속적으로 동작할 때 공통 연계점 PCC(point of common connection)에서의 전압 저하율, 저전압 지속시간, 회복시간에 대해 명시하고 있다. 독일의 경우 LVRT 기준이 가장 엄격하여 전압 저하율이 0[pu]으로 순간정전을 의미하고 고장의 지속시간이 0.15[s]이다. 그리고 회복전압이 0.9[pu]이고 회복시간은 1.5[s]이다.

3. 풍력발전의 LVRT 특성 분석

3.1 시뮬레이션 모델

그림 2는 5[MW] PMSG 풍력발전의 LVRT 특성을 분석

하기 위한 시뮬레이션 모델의 구성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 5[MW] PMSG 풍력발전시스템은 사고모의 장치를 통해 전력계통에 연계되어 있다. 또한 사고발생 시 LVRT 동작이 가능하도록 연계용 BTB 컨버터의 DC link 전압의 상승을 억제하기 위한 초퍼와 저항으로 구성된 전력소모회로(power dissipation circuit)를 가지고 있다. 이 전력소모회로는 DC link 전압의 변동에 따라 동작하므로, 기존의 풍력발전 시스템과 연동이 필요하지 않다. 또한 5[MW] PMSG 풍력발전기의 출력은 BTB 컨버터와 사고모의 장치 그리고 3상 6[MVA] 3.3[kV]/22.9[kV] 변압기를 통해 22.9[kV] 배전계통과 접속되어 있다.

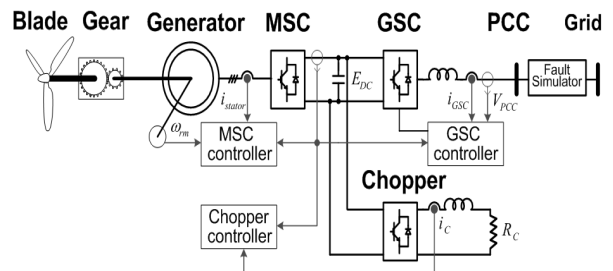


그림 2 PMSG 풍력발전의 LVRT분석 시뮬레이션 모델
Fig. 2 LVRT Analysis Model for PMSG Wind Power System

그림 3은 발전기에 결합된 컨버터 MSC(machine-side converter), 그리드에 결합된 GSC(grid-side converter), 그리고 전력소모회로에 있는 초퍼의 제어기 구성을 나타낸 것

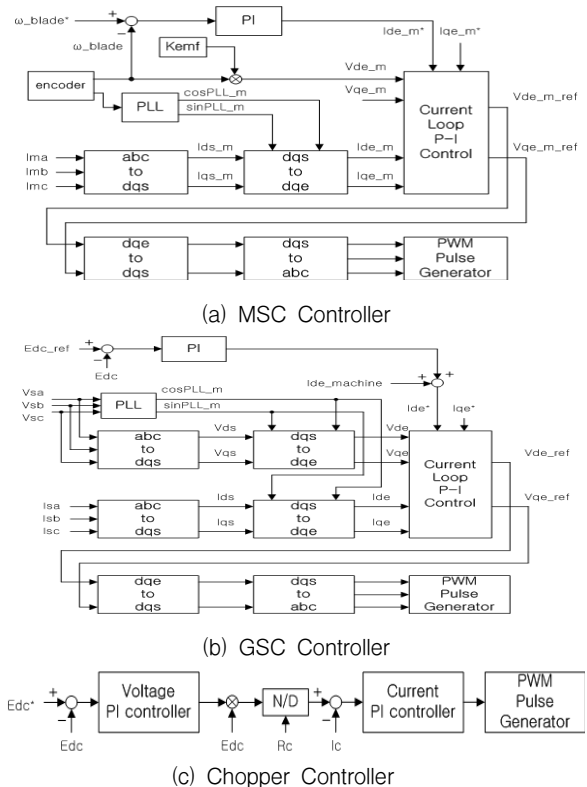


그림 3 MSC와 GSC 그리고 초퍼의 제어기 구성
Fig. 3 MSC, GSC and Chopper Controller

이다.

정상적인 운전 상태에서, MSC는 블레이드의 속도제어를 통해 발전을 하고 있으며, GSC는 DC link 전압의 제어를 통해 발전된 전력을 계통으로 보낸다. 결합된 Chopper는 정상상태에서는 동작하지 않는다. 계통 전원의 비정상 상황에서는 MSC에서 발전된 전력을 계통으로 보낼 수 없으므로, DC link 전압이 상승한다. 이 때, 전력 변환 장치의 소손을 막기 위해 chopper가 동작하며, DC link 전압의 제어를 수행한다.

그림 4는 본 시뮬레이션 분석에서 고려한 프랑스 Areva사의 5[MW] PMSG 풍력발전기에 관한 외형과 성능 데이터를 나타낸 것이다. 이 풍력발전기는 풍속이 4[m/s] 일 때 발전을 시작하여 풍속이 12[m/s] 일 때 5[MW] 정격출력을 생산하기 시작하여 풍속 25[m/s] 까지는 블레이드의 피치제어로 이 출력을 유지하다가 그 이후에는 출력이 차단된다.

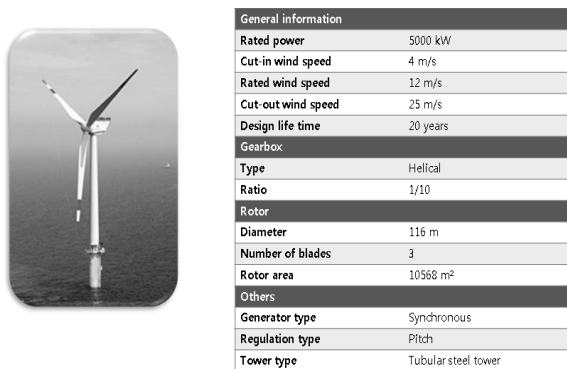


그림 4 Areva M5000의 외관 및 성능 데이터
Fig. 4 Technical Features of Areva M5000 Wind Power Generator

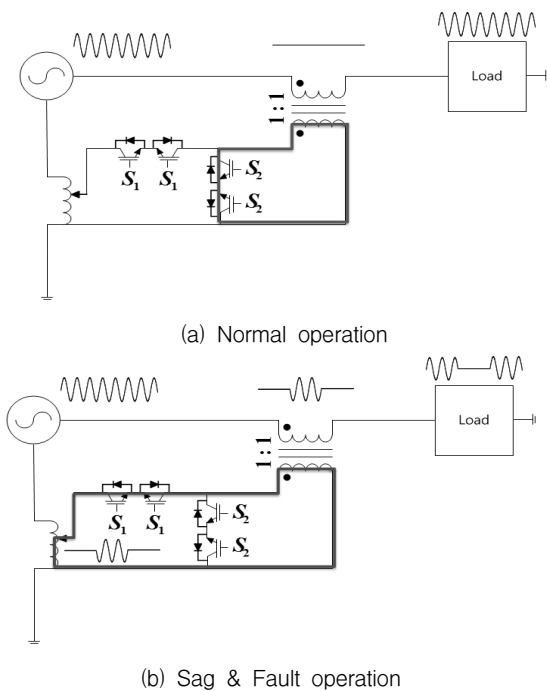


그림 5 LVRT 동작분석을 위한 사고 모의장치
Fig. 5 Fault & Sag Simulator for LVRT Operation

그림 5는 제작한 하드웨어 시뮬레이터에서 LVRT 동작을 분석하기 위해 고안한 사고모의 장치의 구성과 동작원리를 나타낸 것이다. 사고모의 장치는 시간에 따라 출력전압의 크기를 조절 가능한 탭-변압기, 2개의 양방향 IGBT 스위치, 그리고 1:1 권수비변압기로 구성되어 있다. 3상 전력계통의 사고를 각 상별로 다양하게 모의할 수 있도록 실제 시뮬레이션에서는 이 모의장치 3세트를 사용하였다. 정상 동작 시에는 스위치 S1⇒OFF, S2⇒ON 상태로 그림 5(a)와 같이 전압강하가 발생하지 않고, 반면에 그림 5(b) Sag & Fault 시에는 S1⇒ON, S2⇒OFF 상태로 탭-변압기에 의해 강하된 전압은 1:1 권수비 변압기를 통해 전원에 직렬로 주입되어 전압강하를 발생한다.

BTB 컨버터의 DC link 전압을 억제하기 위한 전력소모 회로는 2상한 초퍼와 저항으로 구성되어 있다. 초퍼에 연결되는 저항의 크기는 사고 후 DC link 전압의 허용치와 이 저항에 걸리는 전압과 흐르는 전류를 고려하여 적정하게 설정한다. 본 논문에서는 저항에서 소모되는 전력의 크기를 풍력발전의 정격용량의 2배인 10[MW]로 설정하고 이에 맞게 초퍼의 전류용량과 저항의 크기를 설정하였다. 이 경우 전류용량을 1[kA]로 잡으면 10[Ω]을 사용하면 되지만 저항에 나타나는 전압이 10[kV]로 DC link 전압보다도 높게 된다. 즉, 10[Ω]이상의 저항을 달게 되면 전류의 크기는 작지만 상대적으로 전압이 높게 된다. 따라서 전압의 크기와 강압초퍼로의 동작을 고려하여 저항 값을 2.5[Ω]으로 설정하였다. 이 경우 저항에 흐르는 전류의 크기는 2[kA] 이고 저항에 걸리는 전압은 5[kV] 이다.

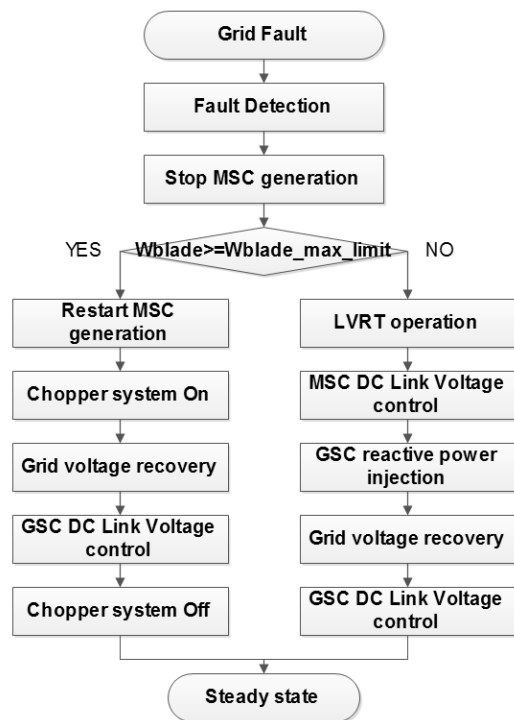
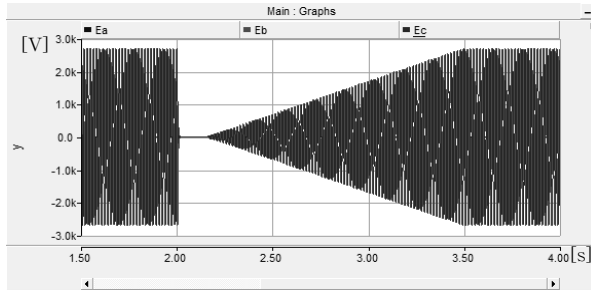
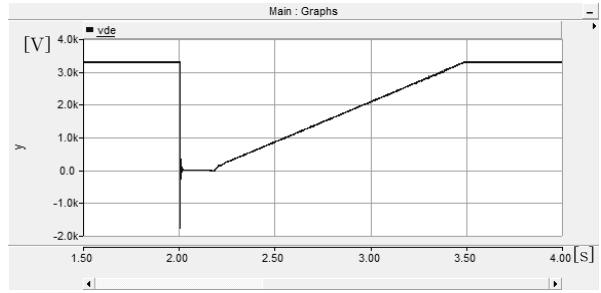


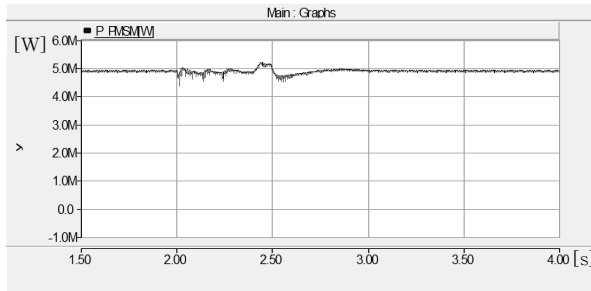
그림 6 풍력발전의 LVRT 운영전략
Fig. 6 Operation scheme for Wind Power System under Grid Fault



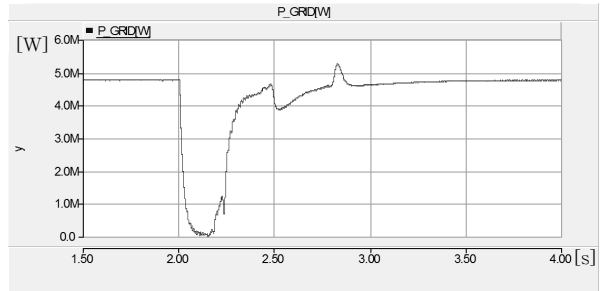
(a) Grid instantaneous voltage



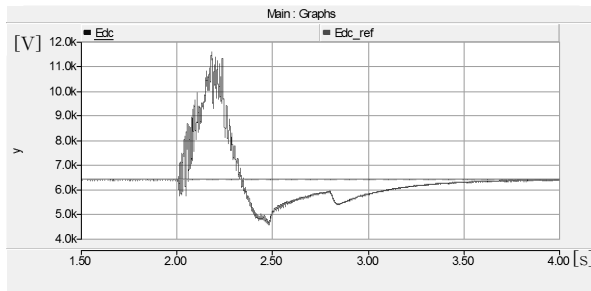
(b) Grid RMS voltage



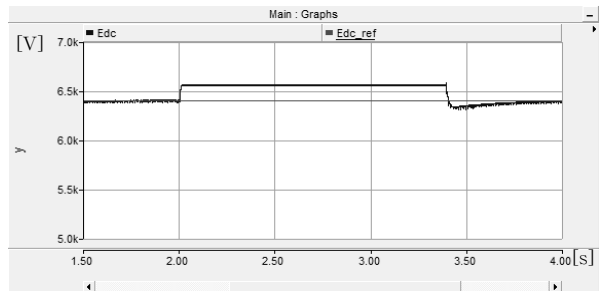
(c) Wind turbine power



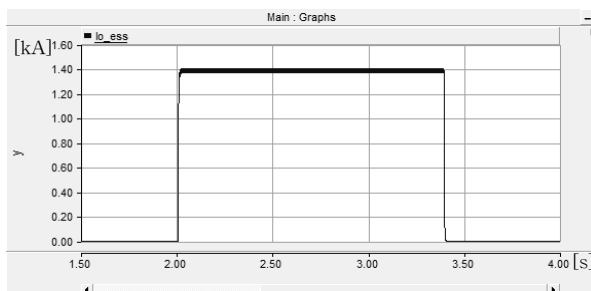
(d) PCC power



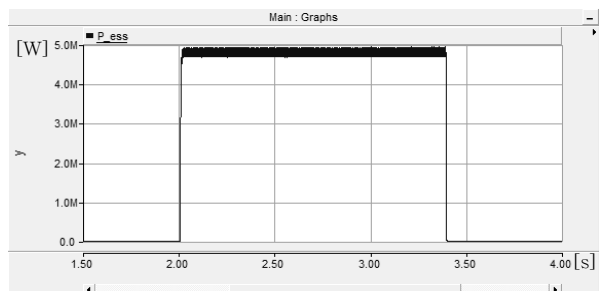
(e) DC link voltage



(f) DC link voltage



(g) Current flowing through chopper



(h) Power consumed by chopper

그림 7 LVRT 동작 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation Results for LVRT Operation

3.2 LVRT 운용 방안

계통사고 발생 시 PMSG 풍력발전의 운용전략은 그림 6과 같다. 먼저 사고가 발생하면 계통 연계점에서 센서를 통해 사고를 감지하고 LVRT 기준을 만족하도록 풍력발전을 바로 탈락시키지 않고 계통과 연계되어 있으면서 계통의 복전에 도움을 주어야 한다. LVRT 기준에 따라 사고발생 후 회복하는 동안 풍력발전이 생산한 전력을 MSC(machine-

side converter)에서 흡수하지 않으면 블레이드의 회전속도가 계속해서 상승하게 되고 이 속도가 한계치를 넘게 되면 블레이드가 파손되는 위험을 초래한다. 따라서 블레이드의 한계속도를 정해 놓고 이 한계속도를 초과하지 않는 경우 MSC에서 DC link 전압 제어를 수행하고 반대편의 GSC (grid-side converter)에서는 무효전력을 투입하면서 계통전압을 회복하도록 한다.

한편 한계속도를 초과한 경우 계통이 회복되지 않았어도

블레이드의 기계적 과손을 방지하기 위해 발전을 계속 할 수밖에 없는데, 발전기에서 생산된 전력을 소모시키기 위해 DC link 단에 강압초퍼와 저항으로 구성된 전력소모회로를 설치한다.

초퍼가 동작하는 조건은 DC link 전압이 미리 설정된 전압보다 높아지는 경우이다. 정상적인 동작 상황에서는 GSC의 전압 제어로 DC link 전압은 상승하지 않는다. 하지만, 비정상 동작 상황에서는 DC link 전압이 상승하여, 초퍼가 동작하게 된다. 초퍼는 미리 설정된 값으로 DC 전압을 일정하게 제어한다.

이 초퍼는 발전된 잉여에너지를 소모하다가 계통전압이 회복되면 GSC에서 다시 DC link 전압 제어를 수행하고, DC link 전압이 설정된 전압보다 낮아지면, 초퍼는 동작을 멈춘다. 만일 계통전압이 장시간 회복되지 않으면 블레이드의 피치제어(pitch control)를 통해 발전량을 점차 줄인다. 그 동안 발전된 전력은 초퍼를 통해 모두 소모하며, DC link 전압은 일정하게 유지하여, 전원 전압이 회복되는 시점에 바로 GSC가 동작하도록 한다.

3.3 시뮬레이션 결과

계통연계 PMSG 풍력발전의 정상동작 시 성능을 분석하는 시뮬레이션 모델에 관해서는 이미 참고문헌에 상세하게 나와 있다[14]. 이를 이용하여 본 논문에서는 먼저 5[MW] PMSG 풍력발전의 풍속에 따른 출력변동을 상세하게 분석하였다. 이를 기반으로 LVRT 동작을 분석할 때는 최악의 상황을 고려하기 위해 정격 풍속인 12[m/s]로 고정하고 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 사고모의 장치는 2[s]에서 사고가 발생하여 0.15[s] 동안은 전압이 0[pu]이고 1.5[s] 후에는 정상전압으로 회복한다고 가정하여 독일의 LVRT 기준과 동일하게 모의하였다.

그림 7(a)와 (b)는 위에서 설명한 사고모의에 의한 풍력 발전기에 걸리는 전압의 순시파형과 실효치의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7(c)는 풍속을 12[m/s]로 유지한 상태에서 계통에 사고가 발생 후 회복될 때 터빈의 출력을 나타낸 것이다. 터빈의 출력은 사고동안 출력의 과도적 변동은 있으나 아주 심하지 않다. 그림 7(d)는 그리드에 공급되는 전력의 변동을 나타낸 것인데 사고동안은 터빈의 출력이 계통으로 전달되지 못함을 알 수 있다. 그림 7(e)는 DC link 전압의 변동을 나타낸 것이다. 사고동안은 DC link 전압이 일시적으로 상승하다가 계통의 전압이 회복을 시작하면서 서서히 감소하기 시작한다. 하지만, 계통의 사고로 인해, 짧은 시간 안에 전압이 상승하기 때문에, 이를 대비하기 위한 운용 전략이 없는 경우, 전력 변환 장치의 소손이 발생할 수 있다.

그림 7(f)는 초퍼와 저항으로 이루어진 전력소모회로를 적용한 경우 DC link 전압의 변동을 나타낸 것이다. 사고가 발생하기 전에는 6.4[kV]로 일정전압 제어가 이루어지고 있다가 사고가 발생하면 DC link 전압이 상승하게 된다. DC link 전압이 정격치의 5%까지 상승하면 초퍼가 동작하여 일정전압을 유지함을 알 수 있다. 그림 7(g)와 7(h)는 초퍼에 흐르는 전류와 소모전력을 나타낸 것이다. 그 후, 계통이 복구되면, GSC가 동작하여, DC link 전압을 제어하며, DC 전압은 6.4[kV]로 복구하고, 초퍼는 동작을 멈춘다.

4. LVRT 동작의 실험적 분석

4.1 하드웨어 시뮬레이터

그림 8은 PMSG 풍력발전의 LVRT 동작을 실험적으로 분석하기 위한 하드웨어 시뮬레이터의 전체 구성을 나타낸 사진이다. 풍력발전 시뮬레이터에서는 주어진 풍속데이터를 가지고 PC 상에서 수리모형을 통해 터빈의 최대토크를 산출한 후 MG(motor-generator)세트의 유도전동기 드라이브에 공급하여 풍력터빈의 출력특성을 모의한다. 유도전동기와 결합된 PMSG 발전기는 공급된 토크에 따라 발전출력을 형성하고 BTB 컨버터를 거쳐 그리드에 변압기와 고장모의 장치를 거쳐 3상 220[V] 전원에 연결된다. MG 세트의 특성 데이터는 표 1과 같다.

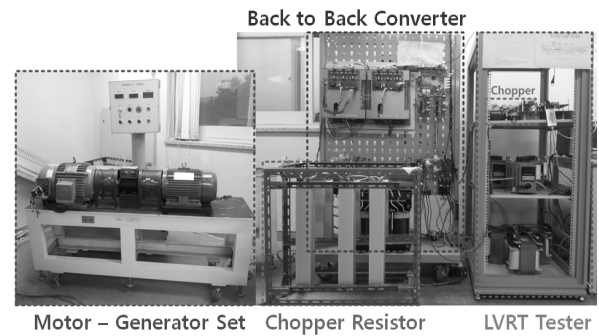


그림 8 PMSG 풍력발전의 LVRT 동작모의를 위한 하드웨어 구성

Fig. 8 Hardware Experimental Set-up for LVRT operation Analysis of PMSG Wind Power System

표 1 MG 세트 특성 데이터

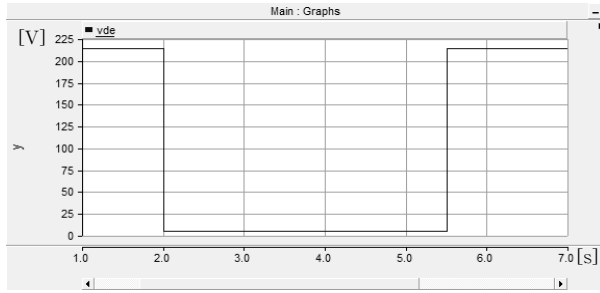
Table 1 Parameters for M-G Set

| | |
|----------------------------------|-----------|
| M-G Set input voltage | 380 [V] |
| Input rated frequency | 60 [Hz] |
| Motor rated Power | 7.5 [kW] |
| Motor rated rotational speed | 1750 rpm |
| Generator rated Power | 5.5 [kW] |
| Generator rated rotational speed | 1750 rpm |
| Generator pole | 6 pole |
| Generator rated output voltage | 190 [V] |
| Generator rated output frequency | 87.5 [Hz] |

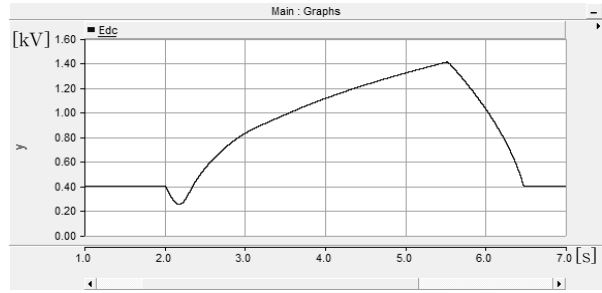
표 2 BTB 컨버터의 특성 데이터

Table 2 Parameters for BTB Converter

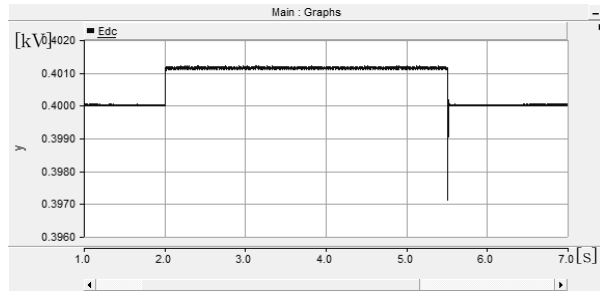
| | |
|---------------------------|--------------|
| Input voltage | 220 [V] |
| Input rated frequency | 60 [Hz] |
| DC link Voltage reference | 400 [V] |
| DC link capacitance | 1500 [uF] |
| Switching frequency | 10 [kHz] |
| Grid connected reactor | 5 [mH] |
| Transformer | 220:220[Y-Y] |
| Transformer capacity | 5 [kVA] |



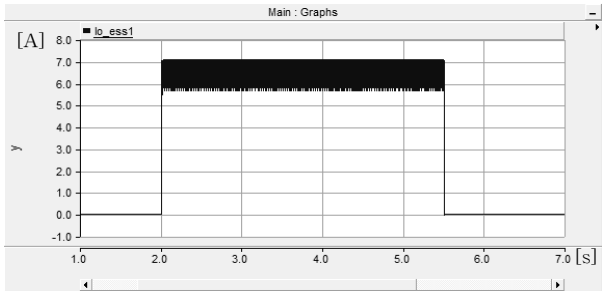
(a) Fault & Sag Simulator Voltage



(b) DC Link Voltage without Chopper



(c) DC Link Voltage with Chopper



(d) Current flowing through chopper

그림 9 LVRT 동작 시뮬레이션 결과파형
Fig. 9 Simulation Results for LVRT Operation

BTB 컨버터는 10[kHz] 스위칭 PWM으로 동작하는 2대의 인버터로 MSC와 GSC로 구성되어있다. MSC는 PMSG와 연결되어 최대출력점 추적을 위한 속도 제어와 무효전력 제어를 수행한다. GSC는 계통과 연결되어 DC link 전압을 일정하도록 제어하고 무효전력제어를 수행한다. BTB 컨버터의 특성 데이터는 표 2와 같다.

또한 전력계통의 사고를 모의하기 위해 앞에서 설명한 탭-변압기와 IGBT 스위치, 그리고 1:1 변압기로 구성된 사고모의 장치를 제작하였다. 다만 계통의 전압강하를 연속적으로 모의하고 각상별 전압강하를 달리할 목적으로 단상 슬라이더스 3대와 1:1 단상변압기 3대를 사용하여 사고모의 장치를 제작하였다. 그러나 이 사고모의 장치는 전압회복을 Ramp 형태로 모의가 불가능하여 Step 형태로 모의하였다. DC link 과도전압 상승을 억제하는 전력소모회로의 초퍼는 IGBT 듀얼 모듈을 사용하여 제작하였고 10[kHz]로 스위칭 동작을 한다.

4.2 LVRT 컴퓨터 시뮬레이션

제작한 LVRT 동작분석을 위한 하드웨어 실험장치를 테스트하기 전에 실험장치의 동작을 사전에 분석할 목적으로 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 먼저 사고모의 장치가 2[s]에서 전압이 0[pu]로 되고 3.5[s] 후에 전압회복이 Step 형태로 상승하는 것으로 가정하였다. 이는 독일의 LVRT 규정에 비해 상당히 혹독한 상황으로, LVRT 동작을 실험적으로 분석하는데 충분히 타당성이 있다고 판단하여 step 형태의 전압 회복 상황을 채택하였다.

그림 9(a)는 사고모의장치의 출력전압을 RMS 값으로 표시한 것이다. 그림 9(b)는 초퍼가 동작하지 않았을 때 풍력

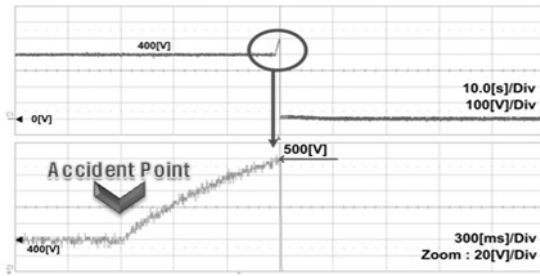
발전의 출력이 전력계통에 전달되지 못하면서 BTB 컨버터의 DC link 전압이 상승하는 것을 나타낸 것이다. 이 경우 최대전압은 정격전압에 대해 3배 이상으로 상승함을 알 수 있다. 그림 9(c)는 초퍼가 동작하여 DC link 전압이 상승하지 않고 일정하게 제어되는 것을 보인 것이다. 계통전압이 회복하게 되면 다시 GSC에서 전압제어를 수행하게 되고 초퍼는 동작을 멈추게 된다. 그림 9(d)는 초퍼에 흐르는 전류와 전력의 크기를 나타낸 것인데 비교적 일정한 전류제어가 이루어짐을 알 수 있다.

4.3 LVRT 동작특성 실험

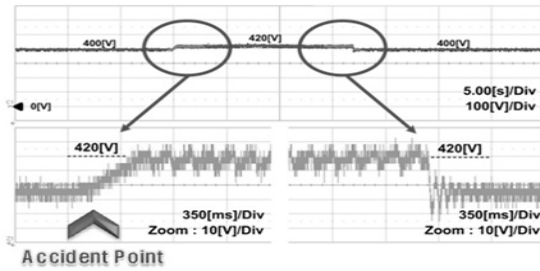
앞 절의 시뮬레이션 결과와 비교분석하기 위해 제작한 하드웨어 시뮬레이터를 가지고 LVRT 동작분석을 위한 실험을 실시하였다. 먼저 사고모의 장치를 이용하여 3.5[s] 동안 전력계통의 전압이 0[pu]가 될 때 DC link 전압의 변동을 측정하였다. 다만 실험에서는 DC link 전압이 너무 크게 상승할 경우 소자의 내압 때문에 커패시터와 IGBT의 소손이 생길 수 있어 DC link 전압의 정상치가 400[V]이므로 500[V] 이상이 될 경우 시스템을 shut-down 하였다.

그림 10(a)는 전원에 사고가 발생하였을 때 BTB 컨버터의 DC link 단에 나타나는 전압의 크기를 보인 것인데 400[V]에서 500[V]까지 상승하다가 계통전원이 차단됨을 알 수 있다. 이 경우 시뮬레이션에서와 마찬가지로 계통에 사고가 발생하면 GSC에서의 DC Link 전압을 일정하게 제어하는 것이 불가능하고 발전기에서 생산되는 전력이 DC link 전압을 상승시킨다.

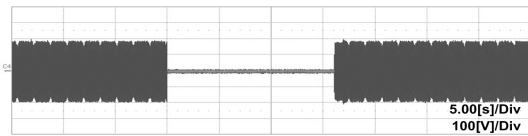
그림 10(b)는 400[V]로 DC link 전압을 일정하게 제어하는 상황에서 계통에 사고가 발생한 경우 초퍼가 일정전압을



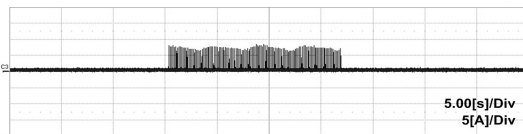
(a) DC link voltage without chopper



(b) DC link voltage with chopper



(c) Phase A voltage during fault



(d) Chopper current during fault

그림 10 하드웨어 시뮬레이터의 LVRT 동작 특성 결과 파형
Fig. 10 LVRT Experimental Results for PMSG Wind Power System

유지하고 있는 것을 나타낸 것이다. 여기서 초퍼는 DC link 전압이 420[V]가 되면 동작하는 것으로 가정하였고 초퍼의 제어신호는 풍력발전과 연동함이 없이 DC link 전압을 통해 독립적으로 계통사고를 인식하고 동작한다. 따라서 DC link 전압의 상승을 억제하는 chopper는 풍력 발전 시스템과 연동 없이, 풍력 발전 시스템 보호용으로 효과적으로 사용될 수 있다. 그림 10(c)는 계통의 A상 전압을 나타낸 것으로 사고 상황을 인지하기 위한 파형이다. 그림 10(d)는 초퍼의 전류 파형을 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통연계 PMSG 풍력발전의 LVRT 동작을 분석하는 하드웨어 시뮬레이터를 소개하고 있다. 제안하는 하드웨어 시뮬레이터는 풍력발전 시뮬레이터, 전력소모회로, 그리고 사고모의 장치로 구성되어 있다.

풍력발전 시뮬레이터는 유도전동기와 PMSG 발전기로 구성된 MG 세트와 2대의 PWM 컨버터로 구성된 BTB 컨버

터를 이용하여 제작하였다. 전력소모회로는 초퍼와 저항으로 구성되어 있고, 사고모의 장치는 IGBT 스위치와 탭-변압기와 1:1 변압기로 구성되어 있다.

제안하는 하드웨어 시뮬레이터는 3[kW] 용량으로 계통과 연계된 PMSG 풍력발전의 LVRT 동작을 실제와 가깝게 모의할 수 있는 특성을 갖는다. LVRT 동작에서 잉여전력을 제거하는 초퍼와 저항으로 구성된 전력소모회로는 구성과 제어가 간단하면서도 충분한 시스템 보호성능을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

제안하는 하드웨어 시뮬레이터는 계통과 연계된 PMSG 풍력발전이 연계된 교류계통의 사고에 대한 영향을 실험실에서 체계적으로 분석하고 그 대책을 마련하는데 유용하게 사용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20133010021790)입니다.

References

- [1] "Wind turbines and wind farms database", The Wind Power, Available: <http://www.thewindpower.net/>
- [2] "The World Wind Energy Annual Report 2012", WWEA(World Wind Energy Association)
- [3] Tildy Bayar, Associate Editor, "Manufacturing, Policy Clarity Needed To Advance UK's Offshore Wind Success", Renewable Energy World, 14 Jun 2013
- [4] "EU renewable energy policy", Europe 2020, Feb 2013
- [5] Xing-jia Yao, Li-zhe LIANG, Hu Chen and Zuo-xia XING, "Control Strategy Study of DFIG with LVRT," Energy and Environment Technology, 2009.
- [6] Wang xin , Cao Mingfeng, Qiu Li, Chai Lulu, Qin Bin "Control of Direct-drive Permanent-magnet Wind Power System Grid-Connected Using Back-to-back PWM Converter," ISDEA(Intelligent System Design and Engineering Applications), No. 478-481, 16-18 Jan. 2013
- [7] Thanh Hai Nguyen, Dong-Choon Lee, "Improved LVRT Capability and Power Smoothing of DFIG Wind Turbine Systems", Journal of Power Electronics, Vol. 11, No. 4, pp. 568-575, 2011.
- [8] Mian Wang, Ye Tian, Xia Feng, and Guozhu Chen, "A Hybrid LVRT Control Scheme for PMSG Wind Power System", Power Electronics and Motion Control Conference, Vol. 2, pp. 1173-1177, 2012.
- [9] H. Shin, S. Sul, J. Lee, "LVRT Control Strategy of Grid-connected Wind Power System", Journal of the Korean Institute Power Electronics, Vol. 16, No. 2, pp. 182-190, 2011.

- [10] Pengxin Wangwei , “A new lvr method applied on the integration of distributed wind power generation,” Electricity Distribution (CICED), No. 1-4 , 10-14 Sep. 2012
- [11] Zhou Linyuan, Liu jinjun, and Liu Fangcheng, “Low Voltage Ride-Through of Wind Farms Using STATCOM Combined with Series Dynamic Breaking Resistor”, IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2010.
- [12] S.M. Muyeen, Rion Takahashi, Toshiaki Murata, Junji Tamura. “Low voltage ride through capability enhancement of fixed speed wind generator”, IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009.
- [13] “Grid Code for High and Extra High Voltage”, E.ON Netz GmbH, 1st April 2006
- [14] Y. choy, B. Han, J. Lee, and G. Jang, “Real-Time Hardware Simulator for Grid-Tied PMSG Wind Power System”, Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 6, No. 3, pp. 375-383, 2011.



한 병 문(韓炳文)

1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 미 아리조나 주립대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). Westinghouse 중앙연구소 선임연구원. 현재 명지대 전기공학과 교수 및 부총장.



윤 영 두(尹泳斗)

2002년 서울대 전기공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2010년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 삼성전자 생산기술연구소 책임연구원. 현재 명지대 전기공학과 조교수.

저 자 소 개



이 재 욱(李在旭)

1988년 1월 24일생. 2012년 명지대 전기공학과 졸업. 2012년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김 재 혁(金載赫)

1988년 12월 18일생. 2013년 명지대 전기공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 석·박사 통합과정.



최 영 도(崔泳道)

1973년 10월 8일생. 2000년 명지대학교 전기전자공학부 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 한전 전력연구원 해상풍력연구사업단 근무.