

# RTDS를 이용한 영구자석형 동기발전기를 갖는 풍력발전시스템의 과도현상 해석

논 문
60-3-16

## RTDS based Transient Analysis of PMSG Type wind Power Generation System

황철상\* · 김경훈\* · 김남원\* · 이효근\* · 서효룡\* · 박정도\*\* · 이동영\*\* · 이상진\*\* ·  
박민원\*\*\* · 유인근†

(Chulsang Hwang · Gyeong-Hun Kim · Namwon Kim · Hyo-Guen Lee · Hyo-Ryong Seo ·  
Jung-Do Park · Dong-Young Yi · Sangjin Lee · Minwon Park · In-Keun Yu)

**Abstract** - The operation of permanent magnet synchronous generator (PMSG) type wind power generation system (WPGS) can be affected by the utility condition. Consequently, transient condition of utility should be analyzed for the safe and reliable operation of WPGS. This paper presents transient analysis results of a PMSG type WPGS using real time digital simulator (RTDS). A fault condition was applied to the transient analysis of PMSG type WPGS as the transient grid condition. The simulation results were analyzed to show the operational characteristic of PMSG type WPGS under the transient phenomenon of utility.

**Key Words** : Mod-2 wind turbine, RTDS, Permanent magnet synchronous generator, Pitch control system, Back-to-back converter

### 1. 서 론

세계적인 산업 발전과 경제 성장으로 인한 에너지 소비량이 증가함에 따라 화석연료의 고갈과 환경 오염문제가 크게 대두되면서 신재생에너지에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 신재생에너지원으로는 풍력, 수력, 태양력, 등이 있으며 그 중에서도 영구적이고 무공해 자원이면서 낮 뿐 아니라 밤에도 발전이 가능한 풍력에너지가 각광 받고 있다. 풍력발전시스템은 전 세계적으로 2009년 총 설치용량이 약 157.9GW에 이르고 있으며, 현재 전기시스템에서 대부분의 널리 이용되고 있는 신재생 에너지 기술은 더욱더 성장하고 있다 [1]. 풍력발전시스템은 구성방식 및 전력망 접속여부에 따라 여러 종류로 분류하지만, 효율적인 운용을 위하여 계통 연계 방식이 필수적이나, 풍력터빈을 직접 연계하는 방식은 풍력발전기의 운전범위가 협소하여, 풍속의 가변성으로 인한 출력의 불규칙성으로 주변 계통수용가와 부하의 전압 주파수 등의 전력품질에 악영향을 미칠 우려가 있다 [2].

따라서 최근 유지비용이 적게 들며, 풍력속도에 따라 넓은 운전 범위를 가지며, 가장 발전효율이 높은 기어가 없는 가변속 운전방식으로 다극 동기발전기를 사용하며, 전력변환장치를 이용하여 생산된 전력을 계통으로 보내줌으로서 발

진된 출력을 최대한으로 활용하기 위한 계통연계형으로 진행되고 있다. 발전기로 많이 쓰이는 영구자석형 동기발전기는 높은 자속 밀도와, 안정성의 장점을 가지고 있다. 영구자석형 동기발전기를 갖는 풍력발전시스템은 기존의 시스템보다 신뢰성과 효율을 향상 시키며, 계통과 연계된 풍력발전시스템은 계통에서 과도현상 발생 시 풍력발전시스템에는 어떠한 영향을 미치는지에 대한 분석은 필수적이다. 이러한 과도현상 분석을 실제 풍력발전시스템에 적용하기에는 풍력발전시스템의 비싼 설치비용이나 안전성문제 때문에 소프트웨어 기반의 시뮬레이션이 일반적인 방법으로 많이 이용된다.

본 논문에서는 실시간 계통연계형 시뮬레이터인 RTDS를 이용하여 영구자석형 동기발전기를 갖는 풍력발전시스템에 과도현상이 일어났을 때의 현상을 분석해 보았다. 영구자석형 동기발전기와 계통은 풍력발전기로부터 최대출력을 낼 수 있게 해주는 최대출력추종제어와 DC-link 전압을 일정하게 제어해주는 양방향 전력변환장치를 통해 연결되어 있다. 풍력발전기가 갖는 한계이상의 출력을 내지 못하게 날개의 각을 조절하는 Pitch angle control과 계통측 전력변환장치에서의 유·무효전력 제어, 풍력 발전기와 계통사이에서 흐르는 전압, 전류, 회전속도, 출력량에 대해 볼 수 있다 [3] - [6]. 시뮬레이션에서는 1선 지락 사고를 모의하였으며 계통의 사고현상으로부터 풍력발전시스템이 어떻게 동작하는지에 대해 알아보았다 [7].

### 2. 풍력 발전 시스템

본 논문에서 이용한 풍력발전기 모델은 영구자석형 동기발전기를 갖는 풍력발전시스템이다. 그림 1과 같이 영구

\* 정 회 원 : 창원대 공대 전기공학과 석·박사과정  
\*\* 정 회 원 : 위덕대 공대 에너지전기공학부 교수  
\*\*\* 정 회 원 : 창원대 공대 전기공학과 교수  
† 교신저자, 시니어회원 : 창원대 공대 전기공학과 교수  
E-mail : yuik@changwon.ac.kr  
접수일자 : 2010년 9월 13일  
최종완료 : 2011년 1월 19일

자석형 동기발전기, 발전기측 전력변환장치, DC-link, 계통측 전력변환장치로 구성되어 있으며 발전기측 전력변환장치에서는 최대출력을 얻기 위한 MPPT제어를 하고 계통측 전력변환장치에서는 DC-link 전압을 일정하게 유지시켜주고 발전된 유효전력을 계통으로 보내주게 된다.

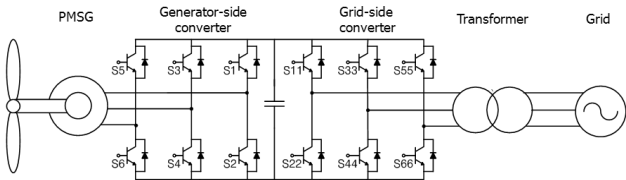


그림 1 영구자석형 동기발전기를 갖는 풍력발전기  
Fig. 1 Permanent magnet synchronous generator with back-to-back converter

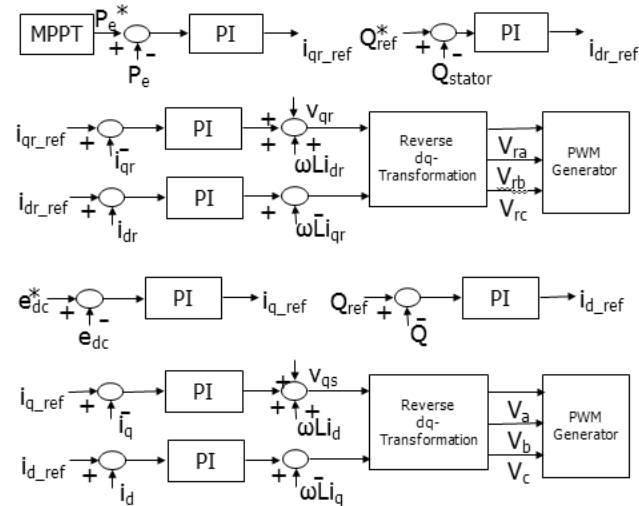


그림 2 양방향 전력변환장치 제어 알고리즘  
Fig. 2 Control diagram of back-to-back converter

그림 2에서는 각 전력변환장치에 제안된 제어 알고리즘을 보여준다. 본 논문에서는 풍력 발전 시스템에서 계통 배전선로에 과도현상 중의 하나인 1선 지락고장을 발생 시키게 되는데 과도현상이 발생할 경우 발전기의 속도가 증가할 뿐만 아니라 발전기의 출력은 감소하게 된다. 따라서 고장 발생 시 풍력발전시스템의 안정화를 위해 발전기의 출력을 일정하게 유지하도록 터빈의 Pitch 각을 조정하여 출력을 제어하게 되고 풍속이 정격 풍속보다 높을 경우에도 일정한 출력을 낼 수 있도록 Pitch angle control을 적용하였다 [8].

### 3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 그림 3과 같이 실시간 계통연계형 시뮬레이터인 RTDS의 소프트웨어 RSCAD를 이용하여 시스템을 모델링하였으며 풍력발전기에 사용된 터빈은 Mod-2 wind turbine 모델을 사용하였다. 시스템의 과도현상을 일으키기 위해 fault logic을 구성하였다.

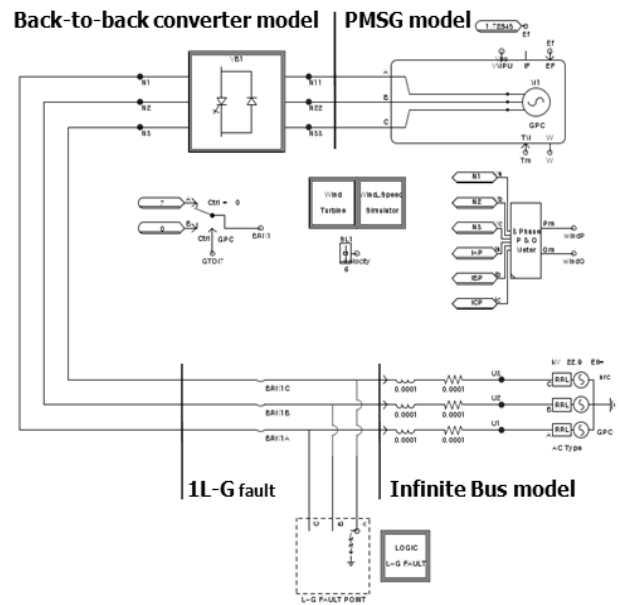


그림 3 모델링된 풍력발전시스템 회로도  
Fig. 3 System setup in RTDS

표 1 계통의 사양

Table 1 Parameters of Grid

Voltage RMS (L-L)	22.9 (kV)
Fault time	2.0 - 2.17 (s)
Fault condition	Single line-to-ground
Frequency	60 (Hz)

표 2 발전기의 사양

Table 2 Parameters of Mod-2 wind turbine

Rated power	3.0 (MW)
Capacity	0.002 (pu)
Stator resistance	0.12 (pu)
Rated voltage (L-G)	0.69 (kV)

그림 4의 그래프는 계통의 상 전압을 나타내고 있으며 전압 평형이 이루어지다가 2초에서 1선 지락 사고현상이 일어나면서 전압이 하강하고 불균형적인 현상이 나타나고 있다. 양방향 전력변환장치와 계통사이에 차단기가 설치 되어있으며 차단기는 과도현상 발생 0.17초 이후에 동작하고 차단기의 동작으로 풍력발전기와 계통의 연결이 끊어지게 된다. 그림 5, 6은 풍력터빈과 계통의 출력 전류를 나타내고 있다. 2초 후, 각 상전류는 불균형적이고 전류가 증가한다. 차단기가 동작하면서 전력변환장치와 계통의 연결이 끊어지면 전류가 0이 된다.

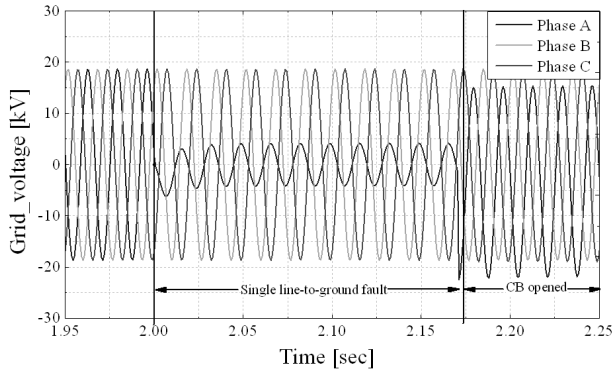


그림 4 계통의 상전압  
Fig. 4 Phase voltage of utility

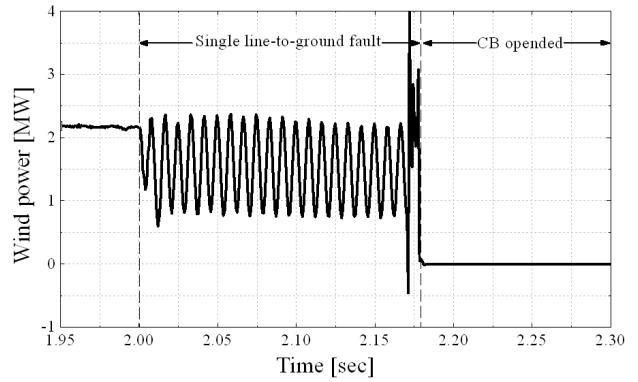


그림 7 풍력 터빈의 출력  
Fig. 7 Wind turbine power

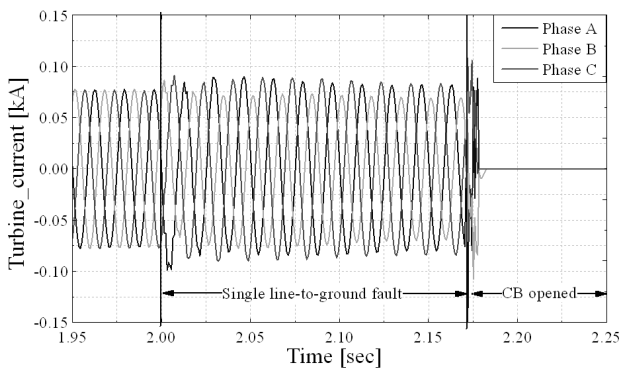


그림 5 풍력터빈의 출력 전류  
Fig. 5 Output currents of wind turbine

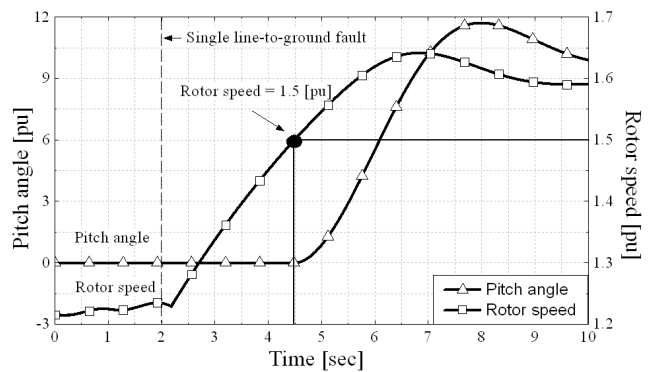


그림 8 회전 속도와 영구자석형 동기발전기의 피치각  
Fig. 8 Rotor speed and pitch angle of PMSG

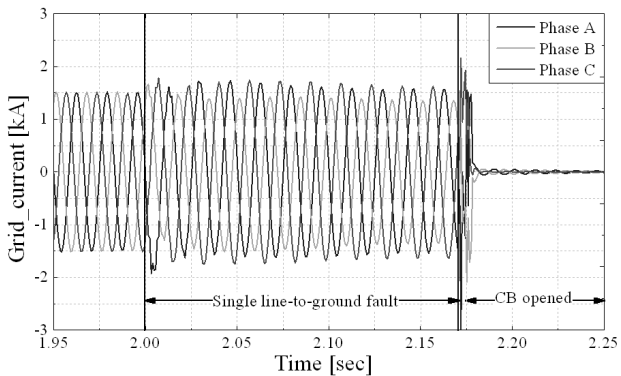


그림 6 계통의 출력 전류  
Fig. 6 Output currents of grid

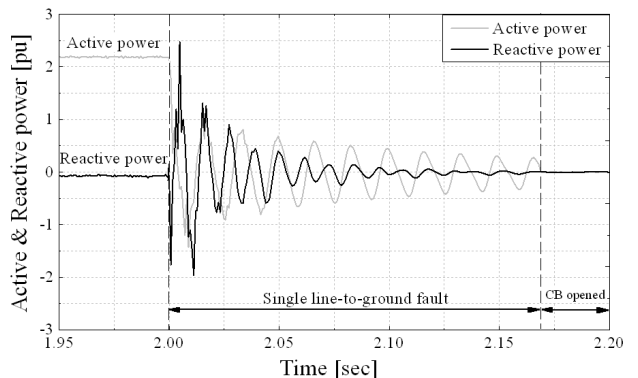


그림 9 계통측 전력변환장치의 유·무효 전력  
Fig. 9 Active and reactive power of grid-side converter

그림 7을 보면 풍력 터빈의 출력이 일정하게 유지되며 과도현상이 흔들리게 되며 차단기가 동작하는 2.17초 이후에는 계통과 연결이 끊어지면서 출력이 0이 된다.

그림 8은 터빈의 회전속도와 pitch angle의 관계를 나타내고 있다. 사고 발생 시 회전속도가 증가하고 회전속도가 1.5(pu)일 때, 터빈 정격이상의 회전속도로부터 터빈을 보호하기 위해 Pitch angle control이 시작되고 제어에 의해 회전 속도가 일정하게 유지되어 가는 것이 나타나게 된다. 1.5(pu)는 시뮬레이션을 위해 임의로 설정한 값이다.

그림 9는 계통측 전력변환장치의 유·무효전력의 관계를 보여준다. 1선 지락 발생 전, 풍력터빈의 출력은 계통으로 유효전력 제어에 의해 보내지고 있으며 무효전력은 0으로 제어되는 것을 볼 수 있다. 하지만 1선 지락 사고 현상이 나타나면서 무효전력 제어로 무효전력이 증가한다. 과도 상태 이후에는 유효전력 제어에 의해 발전되는 전력은 계통으로 보내어지고 무효전력은 0으로 제어된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 실시간 계통형 시뮬레이터 RTDS를 이용한 영구자석형 동기발전기를 갖는 풍력발전시스템의 과도현상을 해석 하였다. 실제 시스템에 적용하기에는 비용이나 안정성 문제로 인해 적용해보지 못하는 과도현상을 실제 시스템과 유사한 시스템을 시뮬레이션으로 모델링하여 과도현상에 대한 시스템의 제어와 동작에 대해 알아보았다. 과도현상시, 풍력 터빈과 계통의 출력 전압, 전류에 어떤 현상이 일어나는지 볼 수 있었고 시스템 보호를 위해 제안된 Pitch angle control, 유효, 무효전력 제어에 의해 시스템이 안정되게 동작하는 것을 볼 수 있었다. 향후 RTDS의 장점인 실제 하드웨어와 연결하여 사용할 수 있는 장점을 이용하여 실제 시스템의 제어를 하는 제어기를 이용한 RTDS와 제어기를 연계한 control-hardware-in-the loop simulation (CHLS)에 대해 연구할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

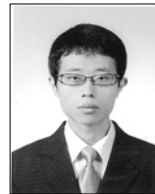
- [1] A. Abedini, and A. Nasiri, "PMSG Wind Turbine Performance Analysis During Short Circuit Faults," *IEEE Electrical Power Conference*, pp.160 - 165, October 2007.
- [2] S-K Kim and E-S Kim, "Modeling and Analysis of Control Scheme Voltage Source Inverter Based Grid-connection of Wind Turbine," *The journal of the Korea Society for Energy Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 154-163, June 2003.
- [3] The European Wind Energy Association (EWEA) and the European Commission's Directorate General for Transport and Energy (DG TREN). *Wind Energy-The Facts*. [Online]. 2003 Available: [http://www.ewea.org/06projects\\_events/proj\\_WEfacts.htm](http://www.ewea.org/06projects_events/proj_WEfacts.htm).
- [4] W. Qiao, G-K. Venayagamoorthy, and R-G. Harley, "Real-Time Implementation of a STATCOM on a Wind Farm Equipped With Doubly Fed Induction Generators," *IEEE Transaction on Industry Application*, Vol. 45, No. 1, pp. 1073-1080, Jan/Feb, 2006.
- [5] K-H. Kim, Y-J. Kim, M. Park, I-K Yu, and B-M Song, "RTDS-based real time simulations of grid-connected wind turbine generator systems," *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp. 2085-2090, May. 2010.
- [6] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, "Wind energy generation modelling and control," *New York: Wiley*, Sep 2009 pp. 101-103.
- [7] Yang Zhenkun, Liang Hui, and Sun Chuanyang, "A DSP control system for the grid-connected inverter in wind energy conversion system," *The 8th International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 29- 29, September 2005.
- [8] D-J. Park, Y-J. Kim, M-H. Ali, M. Park, and I-K. Yu, "A Novel Real Time Simulation Method For Grid-connected Wind Generator System by Using RTDS," *The 10th International Electrical Machines and Systems*, pp. 1936-1941, Oct. 2007.

#### 저 자 소 개



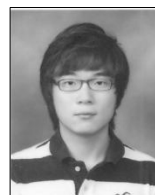
#### 황 철 상 (黃 喆 相)

1984년 10월 6일생. 2010년 창원대학교 전기공학과 졸업 (공학학사), 2010년 2월 ~ 현 한국전기연구원 신재생 에너지 그룹 학·연과정, 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정



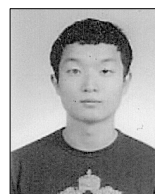
#### 김 경 훈 (金 慶 勳)

1982년 10월 1일생. 2006년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2006년 8월 ~ 2007년 2월 한국전기연구원 신재생 에너지 그룹 위촉연구원, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



#### 김 남 원 (金 南 源)

1987년 1월 4일생. 2010년 창원대학교 전기공학과 졸업 (공학학사), 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정



#### 이 효 근 (李 孝 根)

1984년 10월 25일생, 2010년 창원대학교 전기공학과 졸업 (공학학사), 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정



**서 호 룡 (徐 孝 龍)**

1980년 10월 27일생. 2006년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



**박 민 원 (朴 敏 遠)**

1970년 2월 12일생, 1995년 창원대 전기공학과 졸업, 2002년 일본 오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(공학석사, 공학박사), 2001년 10월 ~ 2004년 8월 한국 전기연구원 차세대 초전도 응용기술 개발 사업단 기술팀장, 2004년 9월~현재 창원대학교 전기공학과 부교수



**유 인 근 (劉 仁 根)**

1954년 2월 18일생, 1981년 동국대학교 졸업, 1983년 한양대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년 6월 ~ 1988년 2월 한국 전기연구원 선임연구원(지중송전연구실장), 1988년 3월 ~ 현재 창원대학교 전기공학과 교수



**이 상 진 (李 相 鎭)**

1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 졸업, 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사), 1996년 4월 ~ 1997년 12월 한국 고속철도건설공단 차량연구실 선임연구원, 1996년 5월 ~1997년 4월 프랑스 Ecole Centrale de Lille-1,2EP 객원연구원, 2008년 7월 ~ 2009년 6월 MIT Francis Bitter Magnet Laboratory 객원연구원, 1998년 3월 ~ 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수



**박 정 도 (朴 正 道)**

1969년 10월 6일생. 1992년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수



**이 동 영 (李 東 映)**

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1990년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년~1986년 삼성반도체통신(주) 사원, 1995년~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원, 1996년~1997년 한전 전력연구원 선임연구원, 1997년~현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수