

RTDS와 MG set을 이용한 풍력 터빈 시뮬레이터 개발

진진홍*, 조창희, 김슬기, 안종보
한국전기연구원 전력연구단 신재생에너지연구그룹

Development of a Wind Turbine Simulator based on RTDS and MG set

Jeon Jinhong*, Cho Changhee, Kim Seulki, Ahn Jongbo

Electric Power Research Laboratory, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문은 풍속이 변화하는 상황에서 풍력 발전 시스템의 동작을 실시간으로 모의할 수 있는 시뮬레이터의 구성과 실험 결과를 제시한다. 본 논문에서 제시하고자하는 풍력 발전 시스템 시뮬레이터는 실시간 시뮬레이터인 RTDS(Real Time Digital Simulator)와 11kW의 AC 서보 시스템을 포함하는 전동기-발전기 실험 장치(MG set, Motor-Generator Set)로 구현되었다. RTDS는 풍속 모델과 블레이드, 터빈, 발전기를 포함하는 풍력 발전 시스템 모델을 실시간으로 모의하며 MG-set은 실시간으로 모의된 풍력 발전 시스템의 물리적 상태를 구현한다. 풍력 발전 시스템 모델의 동작점 추적과 최대출력점추종(Maximum Power Point Tracking)제어에 의한 풍력 발전 시스템 시뮬레이터의 운전 결과의 제시를 통해 시뮬레이터의 유용성을 검증하였다. 본 논문에서 제시된 시뮬레이터는 상용 실시간 시뮬레이터를 이용하여 간단한 소프트웨어의 수정을 통해 다양한 모델의 풍력 발전 시스템을 모의할 수 있으며 다양한 실험 조건에서 과도상태 및 정상상태 특성 실험이 가능하므로 풍력 발전 시스템의 발전기 특성 평가, 전력 변환 장치의 성능 시험 등에 활용이 가능하다.

1. 서 론

미래의 전력시스템은 전력 에너지가 자유롭게 발전, 송전, 배전되고 소비되는 다목적이며 유연한 시스템이 될 것이라 전문가들이 예측하고 있으며 이러한 시스템의 대표적인 사례가 마이크로그리드(Microgrid) 시스템이다. 마이크로그리드는 미래의 전력 시스템으로서 미국, EU 및 일본을 중심으로 1990년대 후반부터 본격적으로 연구가 진행되고 있다^{[1][2]}. 마이크로그리드는 분산전원이 충분한 양으로 배전계통에 도입되고 이들의 적절한 제어와 보호를 통해 배전계통과 연계 혹은 독립운전이 가능한 전원과 부하가 혼재된 전원 시스템으로 정의되어 있으며^[3] 이러한 미래전원의 핵심기술을 연구개발함으로써 원천적인 기술을 확보하기 위한 연구가 한국전기연구원에서 진행 중에 있다^{[1][2]}. 마이크로그리드를 구성하는 전원으로 신재생 에너지 전원을 적용하고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔으며 그 중 대표적인 것이 풍력 발전 시스템이다.

풍력 발전 시스템은 에너지원인 풍속의 가변성에 기인한 출력의 불규칙성으로 인해 주변 계통 수용가와 부하의 전압, 주파수 등의 전력품질을 저하시킬 수 있으며 또한 기존의 전원에서 부하로의 일방향적인 계통구성이 전원과 부하가 혼재되어 있는 계통구성으로 바뀌어서 기존의 보호협조체제로 정확한 사고검출 및 차단이 어려울 수 있다^[4]. 따라서 실제 풍력 발전 시스템을 계통에 연계하기에 앞서 풍력 발전 시스템의 과도현상 및 정상상태에 의한 주변 계통의 전기품질 및 보호체계에 미치는 영향을 검토하는 것이 필요하다. 그러나 풍속과 같은 시변성과 비선형성이 강한 자연 환경에 의해 시스템의 상태가 결정되기 때문에 실험을 위한 시스템의 상태 예측과 제원이 불가능하므로 특정 운전 조건을 제한할 수 있는 실험 장치가 필수적이다. 특정 운전 조건을 구현하는 방법으로는 풍동 실험 시스템과 같이 물리적인 현상을 재현하는 방법과 적절한 컴퓨터 시뮬레이션과 하드웨어를 동시에 이용하는 모의 실험 장치를 이용하는 방법이 있을 수 있다. 전자의 풍동 실험 시스템을 이용하는 방법은 많은 비용을 필요로 하므로 후자의 모의 실험 장치를 구현하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다^[5-10]. 현재까지 보고되고 있는 대부분의 풍력 발전 시스템 시뮬레이터는 직류 모터와 유도 발전기를 이용하며 풍력 터빈이 발전기에 가하는 토크를 직류 모터의 전류 제어를 이용하여 구현하였다^[5-7]. 또한 최근 연구에서는 교류나 직류 서보 시스템과 실시간 모의 시스템을 이용한 HILS(Hardware In Loop Simulation) 기반의 풍력 발전 시뮬레이터를 이용한 연구결과가 제시되고 있다^[8-10].

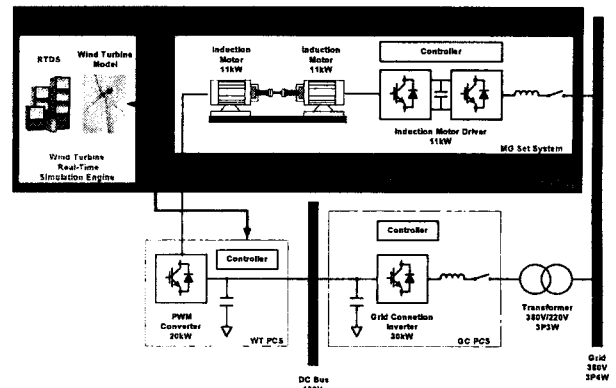
본 논문은 풍속이 변화하는 상황에서 풍력 발전 시스템의 동작을 실시간으로 모의할 수 있는 시뮬레이터의 구성과 실험 결과를 제시한다. 본 논문에서 제시하고자하는 풍력 발전 시스템 시뮬레이터는 실시간 시뮬레이터인 RTDS와 11kW의 AC 서보 시스템을 포함하는 전동기-발전기 실험 장치로 구현되었다. RTDS는 풍속 모델과 블레이드, 터빈, 발전기를 포함하는 풍력 발전 시스템 모델을 실시간으로 모의하며 MG-set은 실시간으로 모의된 풍력 발전 시스템의 물리적 상태를 구현한다. 풍력 발전 시스템 모델의 동작점 추적과 최대출력점추종제어에 의한 풍력 발전 시스템 시뮬레이터의 운전 결과의 제시를 통해 시뮬레이터의 유용성을 검증하였다. 본 논문에서 제시된 시뮬레이터는 상용 실시간 시뮬레이터를 이용하여 간단한 소프트웨어의 수정을 통해 다양한 모델의 풍력 발전 시스템을 모의할 수 있으며 다양

한 실험 조건에서 과도상태 및 정상상태 특성 실험이 가능하므로 풍력 발전 시스템의 발전기 특성 평가, 전력 변환 장치의 성능 시험 등에 활용이 가능하다.

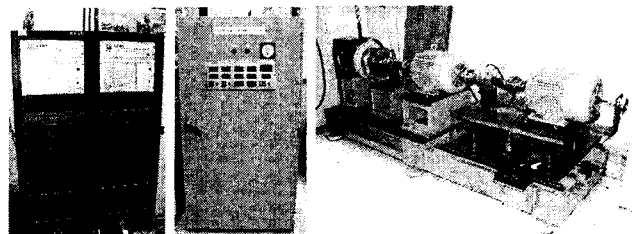
2. 본 론

2.1 풍력 발전 시스템 시뮬레이터 구성 및 사양

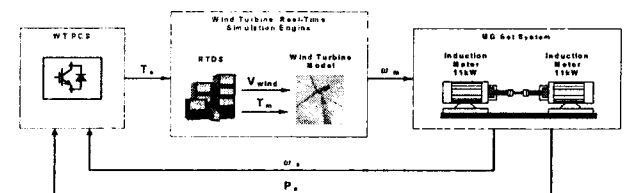
풍력 발전 시스템은 풍속과 같은 시변성과 비선형성이 강한 자연 환경에 의해 시스템의 상태가 결정되기 때문에 실험을 위한 시스템의 상태 예측과 제원이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 풍력 발전 시스템의 계통 연계 실험을 위하여 실시간 시뮬레이터인 RTDS와 11kW MG-set을 이용하여 풍력 발전 시스템 시뮬레이터를 구성하였다. 개발된 풍력 발전 시스템 시뮬레이터의 구성은 그림 1과 같다. 그림 1의 구성도에 표현된 바와 같이 풍력 발전기 시뮬레이터는 실시간 모의 엔진에 의한 풍력 터빈부와 AC 서보 시스템으로 구현된 발전기 부분으로 구성되어 있다. 풍력 터빈부는 풍력 터빈 모델을 RTDS 내부에 소프트웨어 모델로 구현하였으며 발전기 부분은 MG-set을 사용하여 실제 유도 발전기를 이용하여 구현하였다. 시뮬레이터 구성에 사용된 RTDS와 MG-set은 그림 2에 나타내었다.



〈그림 1〉 풍력 발전시스템 시뮬레이터 구성도



〈그림 2〉 풍력 발전시스템 시뮬레이터 구성품 (RTDS, AC Servo Controller, MG-Set)



〈그림 3〉 풍력 발전기 시뮬레이터의 동작

개발된 풍력 발전기 시뮬레이터의 동작을 간략히 설명하면 다음과 같다. RTDS에서 풍속 모델과 풍력 터빈 모델을 이용하여 풍력 발전 시스템의 상태를 실시간으로 모의하며 RTDS에서 모의된 시스템의 상태 중 풍력 발전기의 회전속도가 MG-set 제어기의 입력으로 사용되어 MG-set의 유도 전동기를 결정된 회전속도로 제어한다. 이 때 MG-set의 유도 발전기에 연결된 PWM 컨버터는 풍력 발전 시스템의 최대출력점추종제어 알고리즘에 의해 유도 발전기로부터 전기적인 출력을 발생시키며 발생되고 있는 출력으로부터 토크를 계산하여 RTDS로 궤환시킨다. RTDS는 PWM 컨버터로부터 입력받은 현재 출력 토크와 풍속에 의해 풍력 터빈에 인가되는 입력 토크를 이용하여 전체 시스템을 모의한다. 이러한 동작을 간략히 블록선도로 나타내면 그림 3과 같다.

2.2 실험결과

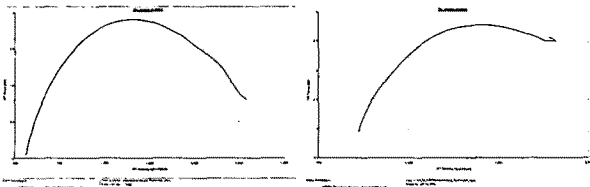
풍력 발전기 시뮬레이터 시스템의 성능 검증을 위하여 다양한 실험을 실행하였으며 실험 결과를 통해 개발된 풍력 발전기 시뮬레이터 시스템의 유용성을 검증하고자 한다. 이를 위해서 풍력 발전기를 구현한 MG-set의 성능은 RTDS의 속도 명령에 대한 MG-set의 속도 명령 추종 성능과 풍력 PCS의 출력 변화에 같은 외란에 대한 속도 제어의 강인성을 통해 검증하고자 한다. 또한 풍력 터빈 모델은 특정 풍속 조건에서 풍력 발전기 시뮬레이터의 운전점 궤적을 검토하여 모델링의 정확성을 검증하였으며 풍력 발전기 시뮬레이터의 성능 및 유용성을 위해서 풍력 발전기의 주요한 파라미터인 회전관성 정수 변화에 따른 운전 결과를 제시한다. 본 논문에서 사용된 풍력 터빈 모델의 주요 파라미터와 전력변환장치의 주요 사양은 각각 표 1과 표 2에 나타내었다.

〈표 1〉 풍력터빈 모델 파라미터 〈표 2〉 전력변환장치 사양

항 목	사 양	항 목	사 양
제어 형식	고정피치, Stall	전력 변환장치	3상 PWM 컨버터
정격용량	10kW	스위칭주파수	10 kHz
블레이드 반경	3.9m	정격출력	20 kVA
공기 밀도	0.55 kg/m ³	출력 전압	직류 0V ~ 600V
정격회전속도	74rpm	입력 전압	교류 0V ~ 250V
정격 풍속	12m	입력 주파수	0.1 Hz ~ 120 Hz
시동 풍속	4m	효율	95% 이상(정격)
정지 풍속	25m	과부하 능력	150% 1분
최대출력계수	0.44	기기 소음	60dB 이하
회전관성	0.4[s]	냉각방식	강제 공냉식

2.2.1 풍력 발전기 모델 운전점 검토

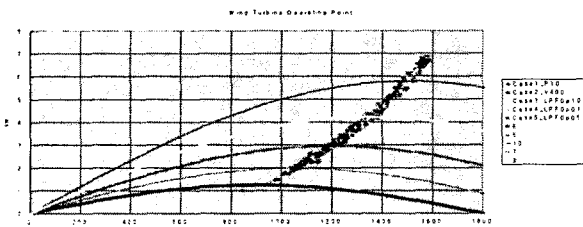
풍력 터빈 모델의 정확성을 검증하기 위하여 일정 속도의 풍속에서 발전기 출력을 변화 시켰을 때의 시뮬레이터의 동작점 궤적을 구하여 보았으며 그 결과는 그림 4에 제시하였다. 동작점 궤적을 구하기 위하여 일정 풍속 조건에서 풍력 PCS의 출력을 임의로 가변하여 그 때의 풍력 발전기 회전속도와 출력의 관계를 그래프로 표시하였다. 그림 4는 각각 풍속이 8m/sec, 10m/sec 일 때의 풍력 발전기 시뮬레이터의 동작점 궤적을 나타낸다. 제시된 결과는 풍력 발전기 모델의 동작점을 이론적으로 계산한 결과와 일치함을 확인하였다.



〈그림 4〉 풍력 발전기 시뮬레이터 동작점 궤적(풍속 8m/s, 10m/s)

2.2.2 MPPT 제어 확인

풍력 발전기 시뮬레이터의 유용성 검증을 위하여 시뮬레이터의 실험 결과 재현성을 검토하였다. 이를 위하여 여러 가지 반복적인 실험을 통해 시뮬레이터의 운전 결과가 충분한 재현성을 가지고 있는지를 아래의 결과를 통해 제시하고자 한다. 또한 풍력 PCS에 적용되어 있는 MPPT 알고리즘의 검증을 위해 풍력 발전기의 동작점 궤적과 풍력 PCS의 운전점을 비교 검토하였다. 그 결과는 그림 5에 제시하였다.

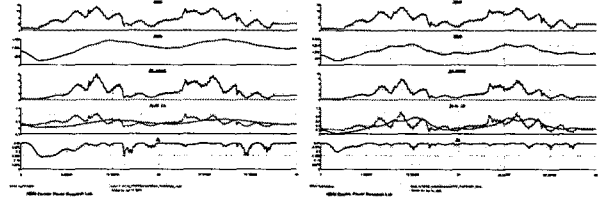


〈그림 5〉 풍력 터빈 모델 동작점 궤적과 MPPT 운전점

그림 5에 제시된 반복실험에 시뮬레이터 운전점 궤적은 반복 실험 시 풍력 발전기 시뮬레이터의 회전 속도와 출력을 비교한 것으로 반복 실험 시 동일한 회전속도와 출력을 발생시키고 있음을 확인할 수 있으며 이를 통해 개발된 풍력 발전기 시뮬레이터의 재현성을 검증하였다. 또한 풍속에 따른 이론적으로 계산된 풍력 터빈 모델의 동작점 궤적과 실험 결과로 제시된 풍력 발전기 시뮬레이터의 MPPT 운전 곡선을 표시하였다. 그림 5에 나타나고 있는 바와 같이 풍력 발전기 시뮬레이터의 MPPT 운전점은 모두 이론적으로 계산된 동작점 궤적의 최대출력점에 위치하고 있음을 알 수 있으며 이를 통해 구현된 MPPT 알고리즘에 대한 성능을 확인하였다.

2.2.3 관성상수 변화에 따른 시스템 응답 변화

풍력 발전기 시뮬레이터의 유용성 검증을 위하여 주요 파라미터 변화에 대한 풍력 발전 시스템의 특성 변화를 관찰하였다. 풍력 발전 시스템의 시간 응답에 영향을 주는 변수는 많이 있지만 그 중에 가장 중요한 것은 풍력 터빈과 발전기의 회전관성이며 회전관성이 크기에 따라 풍속의 변화에 얼마나 민감하게 출력이 변화할 수 있는지에 대한 시스템 특성이 결정된다. 풍력 발전기 모델의 회전관성상수를 각각 6, 2로 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다.



〈그림 6〉 풍력 발전기 시뮬레이터 주요 운전 결과 (관성정수 6,2)

그림 5의 결과에서 회전관성이 커질수록 풍속의 변화에 대한 풍력 발전기 회전 속도의 변화가 작음을 알 수 있다. 풍력 발전기 회전 속도가 작게 변함에 따라 출력 전력 및 토크도 작게 변화하고 이에 따라 풍력 발전기 변환 효율을 나타내는 CP 계수도 과도 상태에서 크게 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 MPPT 운전에 대한 결과도 CP 계수가 최대값인 0.44에서 운전되고 있음을 통해 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 풍속이 변화하는 상황에서 풍력 발전 시스템의 동작을 실시간으로 모의할 수 있는 시뮬레이터의 구성과 실험 결과를 제시하였다. 개발된 풍력 발전 시스템 시뮬레이터의 구성과 기본적인 동작방법에 대하여 설명하였으며 풍력 발전 시스템 모델의 동작점 궤적과 최대출력점추종제어에 의한 풍력 발전 시스템 시뮬레이터의 운전 결과의 제시를 통해 시뮬레이터의 유용성을 검증하였다. 본 논문에서 제시된 시뮬레이터는 상용 실시간 시뮬레이터를 이용하여 간단한 소프트웨어의 수정을 통해 다양한 모델의 풍력 발전 시스템을 모의할 수 있으며 다양한 실험 조건에서 과도상태 및 정상상태 특성 실험이 가능하므로 풍력 발전 시스템의 발전기 특성 평가, 전력 변환 장치의 성능 시험 등에 활용이 가능하다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 자율적 수요관리형 마이크로그리드 개발 최종보고서, 한국전기연구원, 2006년 1월
- [2] 제동연계형 분산전원 통합 제어시스템의 개발 최종보고서, 한국전기연구원, 2006년 5월
- [3] Lasseter, et. al., "White Paper on Integration of Distributed Energy Resources", The CERTS Microgrid Concept, April 2002
- [4] Z. Chen, E. Spooner, "Grid Interface for Renewable Energy Sources", IPENC'97 Hangzhou China, pp256-261, 1997
- [5] 정병창 외 3인, "풍력 터빈 모의 실험을 위한 가변 토크 입력형 시뮬레이터", 대한전기학회논문지, 51B권 8호, pp467-474, 2002년 8월
- [6] 권세진 외 8인, "750kW gearless형 풍력발전 시스템용 모의시험 장치의 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp1190-1192, 2004년 7월
- [7] Charles Lemogo Kana, et. al., "System Management of a Wind-Energy Converter", IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 16 No 3, pp375-381, May 2001
- [8] Hossein Madadi Kojabadi, et. al., "Development of a Novel Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems Using an Inverter-Controlled Induction Motor", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 19 No 3, pp547-552, September 2004
- [9] Chrisitan Dufour, et. al., "A Real-Time Simulator for Doubly Fed Induction Generator based Wind Turbine Applications", IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp3597-3603, 2004
- [10] Seung-Ho Song, et. al., "Emulation of Output Characteristics of Rotor Blades Using a Hardware-In-Loop Wind Turbine Simulator", APEC 2005, Volume 3, pp1791 - 1796, March 2005