

## 가변 풍속시 운전모드 전환을 고려한 이중여자 유도형 풍력발전기의 시뮬레이터

鄭炳昌<sup>†</sup>, 宋丞鎬<sup>\*</sup>, 沈東垓<sup>\*\*</sup>

### A Wind Turbine Simulator for Doubly-Fed Induction-type Generator with Automatic Operation Mode Change during Wind Speed Variation

Byoung-Chang Jeong, Seung-Ho Song and Dong-Joon Sim

#### 요 약

이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 다른 풍력발전 시스템에 비하여 에너지 변환 효율이 우수하고 전력변환 장치의 용량이 작아도 되는 특성이 있다. 이러한 특징을 살리기 위해서는 풍력발전 시스템에 입력되는 에너지의 변화를 고려하여 발전기의 제어기를 설계해야 한다. 본 논문에서는 상위 제어기와 하위 제어기로 구분하여 이중여자 유도 발전기의 제어기를 설계하였다. 상위 제어기는 풍력발전 시스템에 입력되는 에너지가 변화함에 따라서 발전기의 운전모드를 결정하고 제어 기준값을 계산한다. 발전기의 운전모드는 최저 속도 제어와 가변 토크 제어, 그리고 토크 제한 모드로 구성된다. 하위 제어기는 상위 제어기의 지령에 따라서 발전 시스템의 전류를 제어한다. 또한 본 논문에서는 3kW급 권선형 유도기를 사용한 이중여자 유도형 풍력발전기의 시뮬레이터를 제작하였다. 설계한 제어기는 시뮬레이터에 적용하여 실험적으로 검증하였다.

#### ABSTRACT

Controller for doubly-fed induction-type wind generation system should be designed with mechanical power on blade. The controller in this paper consists of upper level controller and lower level controller. The upper level controller determines operating modes according to mechanical input power and calculates proper reference values. There are 4 operating modes - minimum speed control, variable torque control, torque limit control and idle mode. The lower level controller performs current regulated PWM control of rotor-side converter and grid-side inverter. A wind turbine simulator is implemented using doubly-fed induction-type generator and DSP based back-to-back converter to verify the performance of designed controller experimentally.

**Key Words :** Wind turbine simulator, Doubly-fed, Operation mode

#### 1. 서 론

현대적 개념의 풍력발전 시스템은 1957년에 시작되

었으며 1970년대에 발생한 오일쇼크에 의해서 풍력발전 시스템의 개발이 탄력을 받았다<sup>[1]</sup>. 1980년대 초반에 수십kW급 상용 풍력발전 시스템이 개발되었다. 당시의 풍력발전 시스템은 3개의 블레이드를 사용하고 블레이드의 출력을 증속하여 발전기에 공급하기 위하여 기어를 사용하였다. 발전기로 농형 유도기를 사용하고 발전기의 고정자를 계통에 직접 연결하기 때문에 발전기의 회전속도는 일정하다. 그러나 풍력발전과 관련된 각종 기술이 발전하고 오랜 경험을 축적하면서 풍력발

<sup>†</sup>교신저자 : 정희원, LS산전 선임연구원

E-mail : changwin@shinbiro.com

<sup>\*</sup>정희원, 광운대 전기공학과 조교수

<sup>\*\*</sup>정희원, (주)이엠티인터내셔널 대표이사

접수일자 : 2006. 1. 9      1차 심사 : 2006. 3. 7

심사완료 : 2006. 5. 30

전 시스템의 용량이 수MW 이상으로 대형화 되었다. 풍력발전 시스템의 대형화에 의해서 발전 시스템의 효율은 높아지고 반대로 풍력발전에 의한 전력생산 원가는 2005년에 5cent/kW 수준까지 낮아졌다<sup>[2]</sup>.

풍력발전 시스템이 대형화 하면서 시스템의 효율을 높이고 기계적 스트레스를 감소시키기 위하여 전력변환 장치를 사용하여 풍속에 따라서 발전기의 회전속도를 가변하는 방식이 개발되었다. 회전속도를 가변하는 방식은 전범위에서 가변이 가능한 방식과 정격속도를 중심으로 제한된 범위에서 가변이 가능한 방식 중에서의 한 가지를 채택하고 있다. 전범위에서 가변속이 가능한 방식은 극수가 수십극인 동기기를 발전기로 사용하여 블레이드와 발전기 사이에 기어를 사용하지 않고, 발전된 전체 전력은 전력변환 장치를 통해서 계통에 공급되는 것이 일반적이다<sup>[3]</sup>. 제한된 범위에서 가변속이 가능한 방식은 4극 또는 6극인 권선형 유도 발전기를 사용하여 블레이드와 발전기 사이에 기어가 필요하다. 발전기의 고정자는 계통에 직접 연결하고 회전자는 발전 시스템 정격 용량의 30% 이내의 용량을 갖는 전력변환 장치를 연결하여 발전기를 제어한다<sup>[4~8]</sup>. 두 가지 방식 모두 에너지 변환 효율이 높지만 전범위에서 가변속이 가능한 풍력발전 시스템은 시스템 정격과 동일한 대형 전력변환 장치를 구성해야하기 때문에 시스템 전체의 정격 용량에 비하여 전력변환 장치의 용량이 작은 제한범위 가변속 시스템이 주로 사용된다. 2003년 세계 풍력발전 시장에서 점유율은 초기에 사용되던 방식이 23%, 전범위 가변속 방식이 16%, 그리고 제한범위 가변속 방식이 50%이다<sup>[9]</sup>.

제한범위 가변속 방식에서 유도 발전기는 여자전류를 고정자와 회전자 양쪽에서 인가할 수 있기 때문에 일반적으로 이중여자 유도 발전기라고 한다. 이중여자 유도 발전기를 사용하는 방식의 특징은 다음과 같다<sup>[8]</sup>. 첫째는 에너지 변환 효율이 높다. 특히 낮은 풍속에서 고정속도 방식과 비교할 경우 효율이 10%정도 높다. 둘째 타워나 기어 등 기계적인 부분의 설계를 최적화할 수 있기 때문에 시스템 가격을 낮출 수 있다. 셋째, 발전 전력의 변화가 적고 무효전력을 제어할 수 있는 등 계통연계 특성이 우수하기 때문에 계통 전력의 품질에 미치는 영향이 적다. 넷째, 전력변환 장치의 용량이 발전 시스템 전체 정격의 30% 이내로 작기 때문에 대형 전력변환 장치를 구현해야 하는 문제점이 해소된다. 이러한 특징 때문에 국내외에서 관심이 많으며 연구 개발이 활발하다.

이중여자 유도형 풍력발전 시스템에 대한 대표적인

논문으로 1996년에 발표된 Pena의 논문을 들 수 있다<sup>[10]</sup>. Pena의 논문에는 고정자 자속기준 벡터제어에 기반하여 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 제어에 서술하였으며 M-G세트를 사용한 실험을 통하여 검증하였다. 그러나 전류, 전압, 회전속도, 토크 제어에 대하여 설명하였지만 이중여자 유도형 풍력발전기의 운전 모드를 포함한 상위 제어기에 대해서는 언급하지 않았다.

이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 상위 제어기 구조에 대한 논문으로 2004년에 발표된 Hansen의 논문이 있다<sup>[11]</sup>. Hansen의 논문에서 풍력발전 시스템의 제어기는 유·무효전력과 같이 빠른 응답 특성을 갖는 전기적 제어와 블레이드의 피치 제어와 같이 느린 응답 특성을 갖는 기계적 제어로 구분하였다. 기계적 제어는 시스템 전체에 대한 감시와 전기적 제어의 지령값을 포함한 시스템 전체의 지령값 출력을 담당한다. 제어기에 대한 시뮬레이션만 수행하였다.

2000년에 Muller는 계통에 연결되어 운전중인 실제 풍력발전 시스템의 출력을 측정하여 발표하였다<sup>[12]</sup>. 측정된 발전기는 1.5MW급 이중여자 유도형 풍력발전 시스템이고 측정된 결과로 풍속, 토크, 유효전력 지령값 그리고 실제 발전된 유효전력을 보여주고 있다. 실제 측정된 데이터를 제시하였지만 실제로 설치되어 운전중인 풍력발전 시스템의 입력 풍속을 임의로 제어할 수 없기 때문에 속도와 토크 그리고 발전량의 관계를 명확하게 확인할 수는 없었다.

이중여자 유도형 풍력 발전기에 대한 제어 알고리즘을 검증하고 계통에 연결되어 운전할 때 계통과의 상호 반응을 분석하기 위해서는 실제 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 실험실 환경에 맞게 축소된 시뮬레이터가 필요하다. 그러나 실제 풍력발전 시스템과 유사한 제어 알고리즘을 적용하여 기계적 입력 에너지의 변동에 따라서 발전기를 제어한 연구는 발표되지 않았다.

본 논문은 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 제어를 설계하고 실험세트에 적용하여 검증하는 것을 목표로 하였다. 설계한 제어기는 상위 제어기와 하위 제어기로 구성된다. 상위 제어기는 발전을 개시해야 할 시점과 발전을 종료 할 시점을 판단하며 기계적 입력 에너지가 변동함에 따라서 발전기의 유효전력을 최적으로 제어하고 동시에 유도 발전기 고정자와 계통측 컨버터의 무효전력을 제어한다. 또한 발전을 개시하는 시점과 종료하는 시점에서 고정자와 계통사이에서 과도 전류가 발생하지 않도록 제어한다. 설계한 알고리즘을

적용하여 3kW급 권선형 유도기를 사용한 이중여자 유도형 풍력발전기 시뮬레이터를 개발하였으며 기계적 입력 에너지가 변동할 때 실험하여 설계한 알고리즘을 검증하였다. 기계적 입력 에너지는 블레이드 대신 직류 전동기를 사용하여 공급하였다<sup>[13]</sup>.

## 2. 풍력 발전 시스템 모델링 및 제어기 구성

이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 그림 1과 같이 블레이드와 발전기 전력변환 장치를 포함한 기계구조 부분과 각 부분의 제어기를 포함한 시스템 제어기로 구성된다. 블레이드의 출력은 기어에서 증속되어 발전기에 공급되고 발전기는 권선형 유도기를 사용한다. 고정자는 차단기를 통하여 계통에 직접 연결하고 회전자는 전력변환 장치를 통해서 계통에 연결한다. 전력변환 장치는 동일한 구조의 컨버터 두대를 back-back으로 연결하여 구성하였다. 회전자에 연결된 컨버터는 Machine-Side Converter라고 하며 발전기를 제어하고 계통에 연결된 컨버터는 Grid-Side Converter라고 하며 직류단 전압을 일정하게 제어한다. 필터는 인버터의 스위칭에 의한 고조파를 제거하는 역할을 담당한다. 시스템 제어기는 회전속도와 발전량에 따라서 발전기의 운전모드와 제어 기준값을 계산하고 발전기 제어기는 전압과 전류를 제어한다.

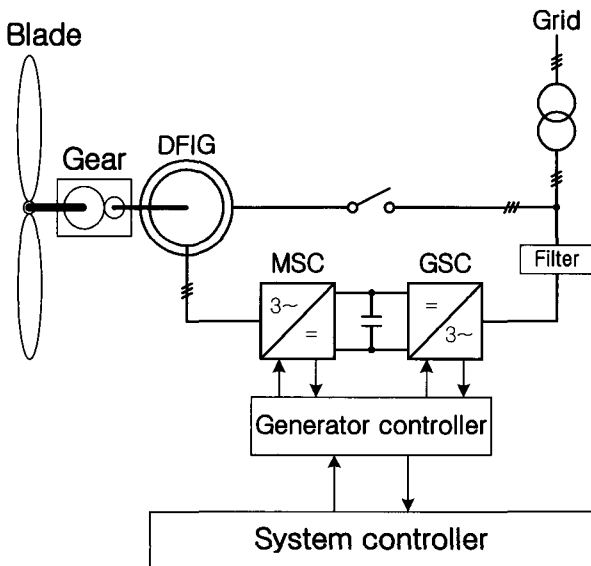


그림 1 이중여자 유도형 발전 시스템  
Fig. 1 Doubly-fed induction type wind generation system

이 장에서는 먼저 블레이드의 에너지 변환 특성에 대해서 모델링하였으며 시스템 제어기에서 운전모드의 전환에 대하여 설명하였다. 끝으로 이중여자 유도 발전기의 제어기 구성에 대해서 설명하였다.

### 2.1 블레이드의 모델링

이중여자 유도형 풍력발전 시스템에 입력되는 에너지는 블레이드에서 변환된 기계적 에너지  $P_{blade}$ 로 식 (1)과 같다.<sup>[13]</sup>

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p(\lambda) \quad [W] \quad (1)$$

단,  $A$ 는 블레이드의 회전단면적[m<sup>2</sup>],  $\rho$ 는 공기의 질량으로 약 1.225kg/m<sup>3</sup>,  $V_{wind}$ 는 풍속[m/sec],  $C_p(\lambda)$ 는 블레이드의 출력계수로 주속비  $\lambda$ 의 함수

그림 2는 블레이드의 출력계수곡선이다. 블레이드의 주속비는 풍속과 블레이드 끝 회전속도의 비율로서 다음 식과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{R_{blade} w_{blade}}{V_{wind}} \quad (2)$$

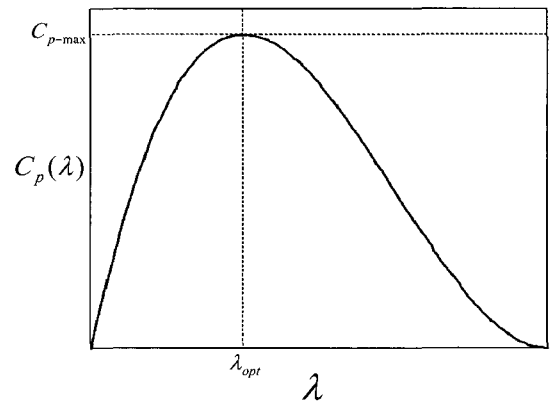


그림 2 블레이드의 출력계수 곡선  
Fig. 2 Blade power coefficient curve

식 (2)에서  $R_{blade}$ 는 블레이드의 회전반경[m],  $w_{blade}$ 는 블레이드의 회전 각속도[rad/sec]를 의미한다. 식 (1)에 식 (2)를 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho \frac{R_{blade}^3 w_{blade}^3}{\lambda^3} C_p(\lambda) \quad [W] \quad (3)$$

풍속이 일정할 때 블레이드는 특정한 주속비  $\lambda_{opt}$ 에서 최대 출력계수  $C_{p-max}$ 를 갖는다. 만일 블레이드가 항상 최대 출력계수를 유지하도록 발전기를 제어한다면 식 (3)은 다음과 같아진다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho \frac{R_{blade}^3 w_{blade}^3}{\lambda_{opt}^3} C_{p-max} \quad [W] \quad (4)$$

$$= K_{blade} w_{blade}^3$$

단,  $K_{blade} = \frac{1}{2} A \rho \frac{R_{blade}^3 C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3}$

최대 출력계수에서 운전하는 블레이드의 기계적 출력은 풍속의 3승에 비례한다. 기계적 출력은 회전속도와 토크의 곱에 비례하므로, 식 (4)에서 최대 출력계수에서 운전하는 블레이드의 토크를 정리하면 다음과 같다.

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{w_{blade}}$$

$$= \frac{1}{2} A \rho \frac{R_{blade}^3 w_{blade}^2}{\lambda_{opt}^3} C_{p-max} \quad [Nm] \quad (5)$$

$$= K_{blade} w_{blade}^2$$

식 (5)와 같이 최대 출력계수에서 운전하는 블레이드의 토크는 회전속도의 제곱에 비례하며 발전기의 토크를 가변하여 제어할 때 토크 기준값을 계산하기 위하여 사용한다.

**2.2 이중여자 유도 발전기의 운전모드**

이중여자 유도 발전기에서 전기적으로 제어해야 할 주요 항목을 그림 3에 표시하였다. 차단기의 과도 전류, 고정자와 회전자에 유효전력을 합한 발전기 유효전력과 고정자 무효전력은 회전자측 컨버터에서, 직류단 전압과 계통측 컨버터의 무효전력은 계통측 컨버터에서 제어한다. 또한 그림 3에는 시스템 각 부분의 전류와 유·무효전력을 표시하였다. 전류는 그림 3의 화살표와 같이 계통에서 발전기로 흐를 때 (+)로 하였으며 이 규칙은 전력변환 장치를 통하여 발전기로 흐르는 전류에도 적용된다. 각 부분의 유·무효전력 역시 그림 3의 화살표와 같이 계통에서 발전기로 공급될 때 (+)로 하였다. 예를 들면, 이중여자 유도형 풍력발전 시스템에서 발전이 이뤄질 때 계통으로 유효전력을 공

급하기 때문에 계통 유효전력  $P_{grid}$ 는 (-)의 부호를 갖는다.

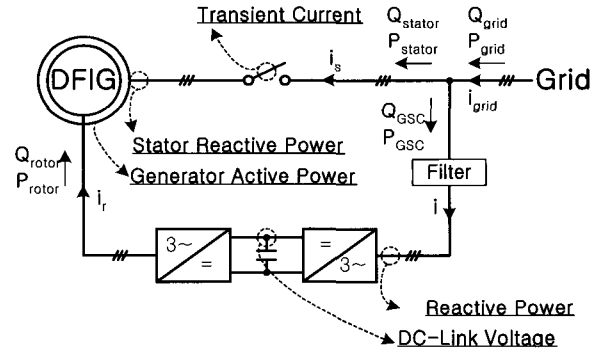


그림 3 이중여자 유도 발전기의 제어 항목  
Fig. 3 Control items of DFIG

이중여자 유도형 풍력발전기의 운전모드는 유효전력을 기준으로 구분하였으며 무효전력은 고정자와 회전자에서 일정하게 제어하였기 때문에 본 논문에서는 생략하였다.

이중여자 유도형 풍력발전 시스템에서 시스템 각 부분의 손실을 무시할 수 있고 회전속도가 일정하다면 계통에 공급하는 유효전력과 발전기의 고정자와 회전자 유효전력을 더한 발전기 전체 유효전력과 블레이드의 기계적 출력은 모두 동일하다.

블레이드의 기계적 출력은 2.1절에서 살펴본 것과 같이 풍속과 블레이드의 회전속도에 따라서 달라진다. 풍속을 임의로 가변 할 수 없기 때문에 주어진 풍속 조건에서 블레이드의 기계적 출력은 블레이드의 회전속도에 따라서 달라진다. 만일 정격 용량과 가격을 고려하지 않은 이상적인 풍력발전 시스템이라면 식 (4)와 같이 블레이드가 항상 최대 출력계수에서의 주속비  $\lambda_{opt}$ 에서 동작하도록 제어함으로써 최대 유효전력을 얻을 수 있다. 그러나 풍력발전 시스템의 경제성을 고려하여 정격 용량이 제한하기 때문에 항상 최대 출력계수에서 운전하는 것은 불가능하다.

블레이드가 최적의 상태에서 풍력발전 시스템을 운전하기 위하여 발전기에서 회전속도를 직접 제어하거나 전기적 에너지로 변환하는 토크를 제어한다. 풍속과 회전속도 그리고 발전량 등의 다양한 조건에 따라서 회전속도와 토크 제어를 조합하여 사용하며 조건에 따라서 제어가 달라지는 것을 운전모드라고 한다.

Hansen의 논문에서는 이중여자 유도형 풍력발전 시

시스템의 제어기를 설계하였으며 시뮬레이션 결과를 제시하였다<sup>[11]</sup>. 설계한 제어기에서 운전모드는 최저 속도 제어, 가변 속도 제어, 최대속도 제어, 그리고 발전량 제한 제어로 구성된다. 풍속이 낮은 경우 블레이드는 설정된 발전기의 회전속도 범위보다 낮은 회전속도에서 최대 에너지를 출력한다. 이때는 블레이드의 회전속도, 즉 발전기의 회전속도를 설정된 회전속도 범위에서 최저값으로 제어한다. 반대로 풍속이 높은 경우 블레이드의 최대 출력점이 설정된 회전속도 범위보다 높기 때문에 최대 회전속도로 제어하고 발전량이 시스템의 정격 용량보다 많은 경우에는 발전량을 정격으로 제한한다. 그리고, 블레이드의 기계적 출력이 최대가 되는 회전속도가 설정된 발전기의 회전속도 범위에 존재한다면 풍속을 사용하여 발전기의 회전속도 기준값을 계산하여 발전기를 가변 속도로 제어하였다.

그러나, 풍력발전 시스템에서 블레이드의 회전 단면적은 넓고 풍속은 블레이드 뒤쪽의 한 점에서 측정하기 때문에 블레이드의 회전에 영향을 받는다. 이러한 이유로 측정된 풍속을 블레이드에 작용하는 실효 풍속이라고 단정할 수는 없고, 일반적으로는 풍력발전 시스템의 cut-in과 cut-out, 그리고 블레이드의 피치 제어 등에만 사용하고 발전기의 회전속도 제어에는 사용하지 않는다.

본 논문에서는 속도 제어와 토크 제어를 혼합하여 운전모드를 설계하였다. 운전모드는 발전량과 회전속도에 따라서 최저 속도 제어, 가변 토크 제어, 그리고 토크 제한 제어로 구성된다. 최저 속도 제어는 Hansen의 논문과 동일하다. 그러나 발전량이 설정값보다 증가할 경우 발전기의 토크를 가변하면서 제어한다. 그리고 토크 기준값이 발전기의 토크 정격보다 큰 경우에는 발전기 토크를 정격으로 제한하였다. 설계한 운전모드로 제어하였을 때 발전기의 토크와 발전량 변화 패턴을 그림 4에서 보여준다. 그림 4(a)는 발전기의 토크 패턴으로 회전 속도를 제어하는 경우는 실선으로 표시하였으며 토크를 제어하는 경우는 점선으로 표시하였다. 그림 4(b)는 고정자와 회전자 유효전력을 합한 발전기의 유효전력 패턴이다.

그림 5는 이중여자 유도 발전기의 운전모드 사이의 관계이다. 발전량을 제어하는 3가지 모드와 제어하지 않는 대기 모드를 합하여 4가지 운전모드의 관계와 각 모드사이의 전환 조건을 표시하였다. 그리고 대기 모드와 속도 제어 모드 사이의 전환에는 과도 전류를 방지하기 위한 동기 투입과 계통 분리 알고리즘이 사용된다.

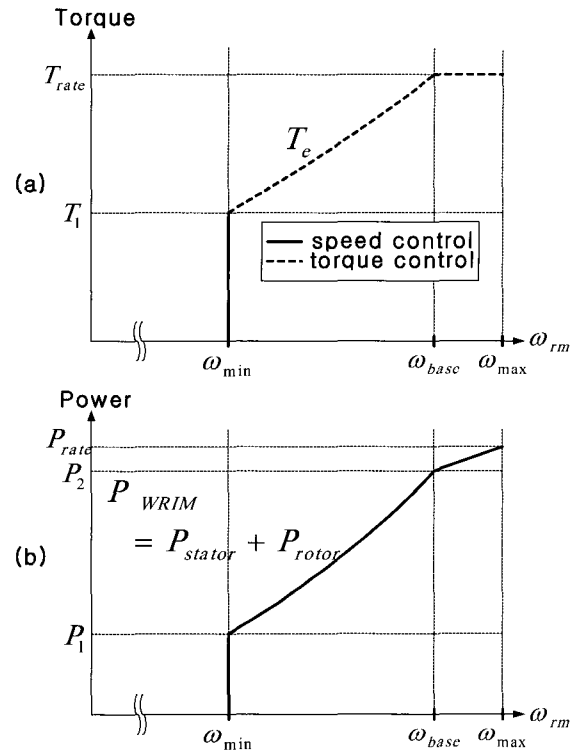


그림 4 발전기 운전 곡선  
(a) 토크 (b) 계통 유효전력

Fig. 4 Generator operating curve against the rotational speed  
(a) torque (b) grid active power

이 절에서 그림 5의 4가지 운전모드와 과도 전류를 방지하기 위한 알고리즘에 대하여 설명하였다.

### 2.2.1 대기 모드

대기 모드는 블레이드의 회전속도가 설정값보다 낮은 경우이다. 발전기의 고정자는 계통에서 분리되어서 제어를 수행하지 않고 회전속도만 관측한다. 회전속도가 그림 5에 표시한 것과 같이  $w_{start}$ 보다 높아지면 고정자를 계통에 연결하고 최저속도 제어 모드로 전환한다.

대기 모드에서 동기화 모드로 전환 할 때 고정자에 발전기 자화 전류가 유입되기 때문에 정격의 몇 배에 이르는 돌입 전류가 발생한다. 돌입 전류를 억제하기 위하여 동기화 제어 알고리즘을 사용하였다<sup>[14]</sup>. 최저속도 제어 모드에서 대기 모드로 전환 할 때에는 고정자에 흐르는 전류가 '0'으로 제어된 상태에서 고정자와 계통을 분리하였다.

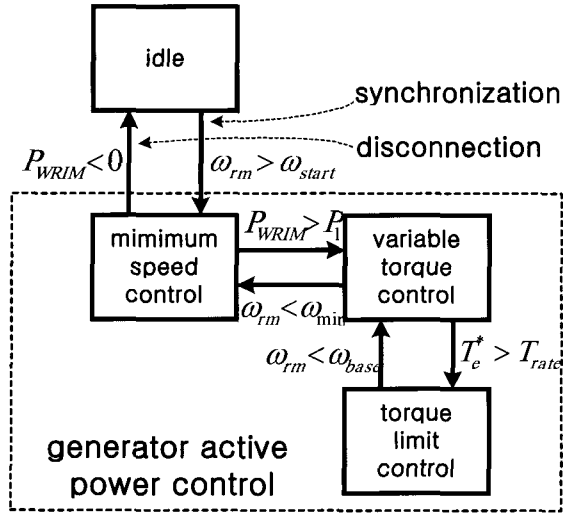


그림 5 이중여자 유도 발전기의 운전모드  
Fig. 5 Operating mode of DFIG

2.2.2 최저 속도 제어 모드

풍속 변동에 의해서 발전기의 회전속도가  $w_{start}$ 보다 높아지면 고정자를 계통에 연결하고 발전기를 제어한다. 대기 모드에서 발전을 시작하면 처음에는 최저 속도 제어 모드로 운전하고 발전기의 유효전력이  $P_1$ 보다 많아지면 가변 토크 제어 모드로 전환한다. 이 모드에서는 풍속이 증가하여 블레이드의 기계적 출력이 증가하면 회전속도를 일정하게 제어하기 위하여 그림 4(a)와 같이 토크를 증가시킨다. 만일 풍속이 감소하여 발전기 유효전력이 '0'보다 작아지면 즉 유도기가 전동기로 동작하면 발전을 종료하고 대기 모드로 전환한다.

2.2.3 가변 토크 제어 모드

발전기 유효전력이  $P_1$ 보다 많아지면 발전기의 토크를 제어한다. 발전기의 회전속도  $w_{rm}$ 과 블레이드의 회전속도는 식 (7)과 같이 기어비에 반비례하기 때문에 구동부에서 손실이 무시할 만큼 작다면 발전기의 회전축에 공급되는 토크는 블레이드의 토크에 비례하고 기어비에 반비례한다. 최대 출력점에서 운전하는 블레이드 토크는 식 (5)와 같기 때문에 발전기 토크는 식 (5)를 기어비로 나눈 값으로 제어한다. 발전기 토크의 기준값  $T_e^*$ 은 식 (7)과 같다<sup>[11]</sup>.

$$w_{blade} = \frac{w_{rm}}{GR} \quad [\text{rad/sec}] \quad (6)$$

$$T_e^* = \frac{T_{blade}}{GR} = K_{blade} \frac{w_{rm}^2}{GR^3} \quad [\text{Nm}] \quad (7)$$

단,  $GR$ 은 기어의 1차측에 대한 2차측의 회전속도 비율을 의미한다.

이 운전모드에서는 발전기의 토크를 회전속도의 제곱에 비례하게 제어하기 때문에 토크는 그림 4(a)와 같고 발전기 유효전력은 그림 4(b)와 같이 회전속도의 3승에 비례한다.

풍속 변동에 의해서 발전기의 회전속도가  $w_{min}$ 이하로 낮아지면 운전모드를 최저 속도 제어 모드로 변경하여 발전기의 회전속도를  $w_{min}$ 으로 제어한다. 반대로 식 (7)과 같이 계산된 발전기 토크 기준값이 정격 토크보다 높아지면 토크 제한 모드로 변경하여 발전기의 토크를 정격으로 제어한다.

2.2.4 토크 제한 모드

발전기의 토크가 정격보다 높아질 경우 발전기에는 과전류가 흐르기 때문에 열이 발생하고 발전기 손상의 원인으로 작용한다. 이러한 이유로 식 (7)과 같이 계산된 토크 기준값이 정격 토크보다 커질 경우 발전기의 토크를 정격으로 제한하여 운전한다. 이 모드에서는 토크는 일정하지만 회전속도는 증가할 수 있기 때문에 발전기 유효전력은 그림 4(b)와 같이 선형적으로 증가한다.

회전속도가 변동하여 식 (7)과 같이 계산된 토크 기준값이 정격보다 토크 가변 제어 모드로 전환한다. 이때 전환하는 회전속도는  $w_{base}$ 이다.

2.3 이중여자 유도 발전기의 제어

그림 6은 이중여자 유도기의 제어를 위한 하위 제어기와 운전모드를 담당하는 상위 제어기의 일부가 결합된 제어 블록도이다. 제어기는 회전자측 컨버터 제어기와 계통측 컨버터 제어기로 구분할 수 있으며, 제어기의 동작과 정지는 상위 제어기에 의해서 결정된다.

회전자측 컨버터 제어기는 고정자 자속을 기준으로 벡터 제어를 수행하며 고정자 자속은 직접 측정하지 않고 전압과 전류를 사용해서 계산한다<sup>[10]</sup>. 자속의 위상각과 회전속도로부터 계산된 슬립에 비례하는 위상각은 회전자 전류의 d-q 변환과 컨버터에서 합성해야 할 3상 전압 기준값을 계산할 때 사용한다. 고정자 무효전력은 일정하게 제어하고 있으며 무효전력의 제어

결과는 회전자의 d축 전류이다. 발전기의 유효전력은 운전모드에 따라서 그림 7과 같은 제어블록으로 제어하며 유효전력의 제어 결과는 회전자의 q축 전류이다. 회전자 전류는 d축과 q축 전류를 분리하여 제어하고 그 결과는 컨버터에서 합성해야할 전압 기준값이다.

계통측 컨버터는 계통 전압을 기준으로 벡터 제어를 수행하기 때문에 측정된 계통 전압으로부터 전압의 위상각을 계산한다. 계통측 컨버터는 컨버터 세트의 직류단 전압과 계통측 컨버터의 무효전력을 제어하기 위하여 전류를 제어한다. 계통측 컨버터의 전류는 유효전력에 비례하는 q축 전류와 무효전력에 비례하는 d축 전류로 분류할 수 있다.

발전기의 유효전력은 운전모드에 따라서 회전속도와 토크를 제어하며 제어 블록으로 표현하면 그림 7과 같다. 회전속도 제어기는 PI 제어기로 구성되고 출력은 토크 기준값이 된다. 토크 제어는 회전속도에 비례하게 토크 기준값을 계산한다. 그리고 운전모드에 따라서 속도 제어기 출력과 토크 제어기 출력 중에서 하나

를 선택한다. 토크 기준값이 정격보다 크면 정격으로 제한하고 토크 상수로 나눠서 회전자 q축 전류 기준값을 계산한다.

그림 6의 제어기로 제어할 때 고정자와 회전자에서 모든 손실을 무시할 수 있다면 그림 4(b)의 발전기 유효전력은 그림 8과 같이 고정자와 회전자 유효전력으로 분리할 수 있다.

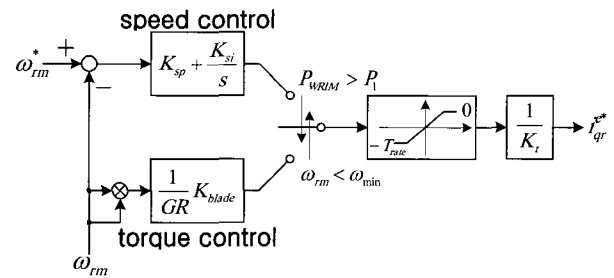


그림 7 유효전력 제어 블록  
Fig. 7 Control block for active power control

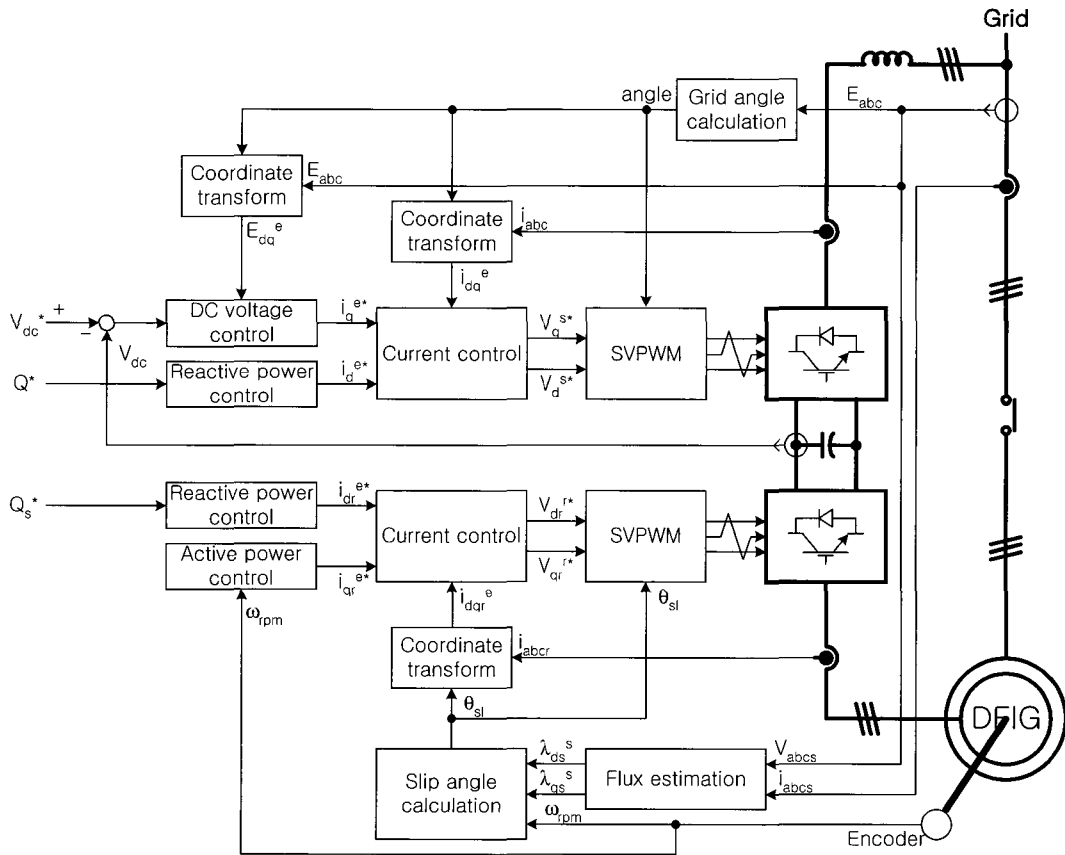


그림 6 제어 블록도  
Fig. 6 Control block diagram

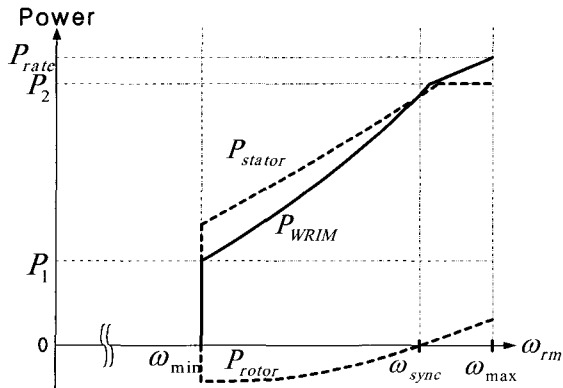


그림 8 컨버터 손실과 유효전력 곡선  
Fig. 8 Converter loss and active power

그림 8과 같이 회전자 유효전력은 고정자 유효전력에 비례하고 슬립에는 반비례한다. 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{rotor} = -sP_{stator} = -\frac{s}{1-s}P_{mech} \quad [W] \quad (8)$$

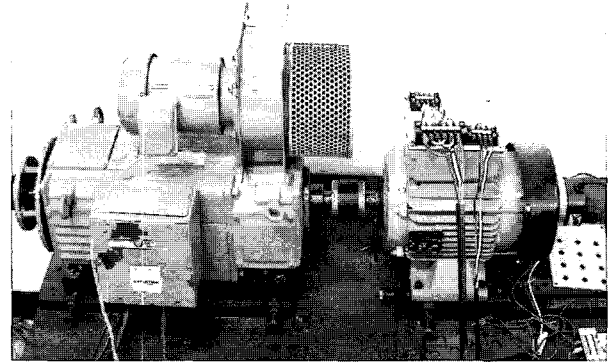
단,  $s$ 는 유도기의 슬립,  $P_{mech}$ 는 유도기의 회전자에 공급된 기계적 출력

### 3. 시뮬레이터 구현

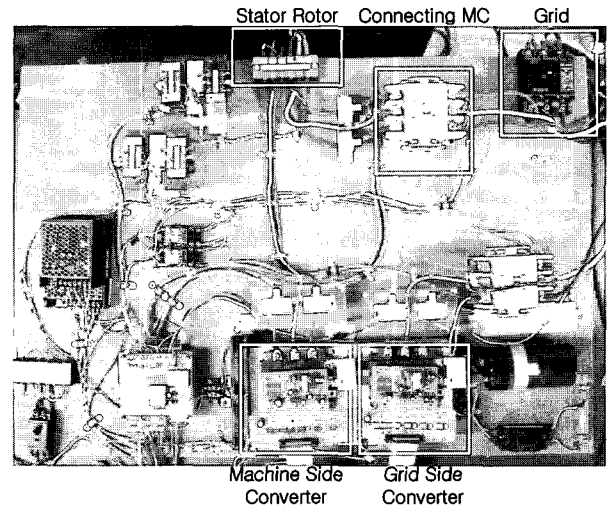
본 논문에서 구현한 이중여자 유도형 풍력발전기의 시뮬레이터의 구성은 그림 9와 같이 구성되고 사양은 표 1과 같다.

그림 9(a)는 직류 전동기(왼쪽)와 권선형 유도 발전기(오른쪽) 세트이다. 실제 블레이드를 사용하여 발전기에 토크를 공급하면 경제적·공간적 제약이 있기 때문에 시뮬레이터에서는 직류 전동기를 사용하여 발전기에 토크를 공급하였다<sup>[13]</sup>. 직류 전동기는 토크를 제어하며 0~2200rpm 범위에서 전기자 전류와 토크를 일정한 비율로 유지하기 위하여 계자를 정격의 0.8로 제어하였다. 직류 전동기에서 공급하는 토크는 풍속과 발전기 회전속도의 변화에 따라서 가상의 블레이드에서 변환되는 기계적 토크와 같다. 시뮬레이터에서 모의한 블레이드의 특성에 따르면 정격 풍속에서 발전기는 약 1930rpm으로 회전하고 전체 발전량은 3400W이다.

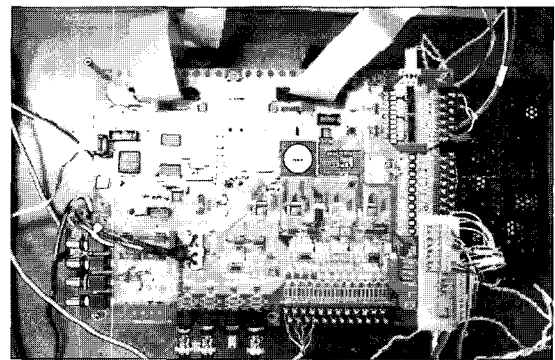
그림 9(b)는 권선형 유도기 제어를 위한 전력변환 장치와 계통연결 부분이다. 윗부분에 고정자를 계통에



(a)



(b)



(c)

그림 9 시뮬레이터 세트

- (a) 전동기-발전기 세트 (b) 전력변환 장치
- (c) 제어보드

Fig. 9 Simulator set

- (a) M-G set (b) converter set
- (c) DSP control board



표 1 시뮬레이터 사양  
Table 1 Simulator specification

정격풍속		12m/s
직류기	정격 용량	5500W
	정격 회전속도	1750 rpm
발전기	고정자 정격 용량	3000W
	고정자/회전자 전압	220V/128V
	극수	4

연결하고 분리하기 위한 자기 접촉기(Connecting MC)가 있다. 아랫부분에 직류단 커패시터를 공유하는 회전자측 컨버터와 계통측 컨버터가 있다. 두 대의 컨버터는 IPM을 사용하여 구현하였다. 계통측 컨버터에 의해서 계통에 고조파가 공급되지 않도록 하기 위하여 인덕터를 사용하였다. 발전기를 제어하기 위하여 그림 6과 같이 교류 전류 6곳, 교류 전압 4곳, 그리고 직류단 전압을 측정하였다. 그림 (b)의 왼쪽부분이 측정용 센서와 제어 보드를 연결하기 위한 인터페이스 회로이다.

그림 9(c)는 DSP를 사용한 제어보드이다. DSP는 TI사의 TMS320VC33을 사용하였으며 엔코더 입력, AD 입력, DA 출력, 그리고 digital IO 기능을 갖추었다. 2장에서 설계한 제어를 구현하도록 DSP의 프로그램을 개발하였다. DSP의 제어에 의해서 두 대의 컨버터 스위칭을 위한 공간벡터 PWM 신호를 발생한다. 제어 보드의 윗부분이 PWM 신호 출력부분이다.

#### 4. 시뮬레이터 동작 특성

직류 전동기에서 토크 입력을 변동하면서 이중여자 유도 발전기의 특성을 시험하였으며 동특성을 설계된 제어기와 비교하였다. 실험 결과는 먼저 이중여자 유도기의 회전자 전압과 전류의 일반적인 특성을 보여주었으며, 발전기의 운전모드에 따라서 동기화 모드, 발전량 제어 모드, 그리고 계통 분리 모드의 순으로 제시하였다. 발전량 제어 모드에서는 회전자 전압과 전류의 특성, 고정자 무효전력의 제어, 각 부분에서의 유효전력, 그리고 회전속도에 대한 토크와 유효전력 곡선을 보여주었다.

그림 10은 대기 모드에서 최저 속도 제어 모드로 전환 할 때 고정자와 계통 전압을 동기시키는 제어 알고리즘의 결과이다. 계통의 전압은 (a)와 같이 일정한 크기를 갖고 위상은 고정되어 있다. 동기화 제어를 수행

하는 영역은 소구간 ①, ②, ③이다. 회전자 전류를 제어하면 고정자에 유기되는 전압을 계통 전압에 동기시킬 수 있다. 소구간 ①에서는 회전자 전류를 정격 자화 전류까지 서서히 증가시킨다. 소구간 ②에서 회전자 전류를 정격 자화 전류로 일정하게 제어하기 때문에 고정자에 일정한 크기의 전압이 유기된다. 소구간 ③에서는 측정된 계통과 고정자 전압의 위상차를 '0'으로 고정자 전압의 크기는 계통 전압과 같게 제어하고 동기를 판단하여 차단기를 동작시킨다. 소구간 ④는 최저 속도 제어 모드이다. 차단기가 고정자와 회전자를 연결하기 때문에 고정자 전압은 계통 전압과 동일하고 고정자에 전류가 흐른다.

발전기를 최저 속도 제어 모드에서 대기 모드로 전환하기 위하여 고정자 전류를 '0'으로 제어하고 고정자와 계통사이에 위치한 차단기를 off 시킬 때 고정자 전류는 그림 11과 같다. 분리를 위한 제어는 두개의 영역으로 분리할 수 있다.

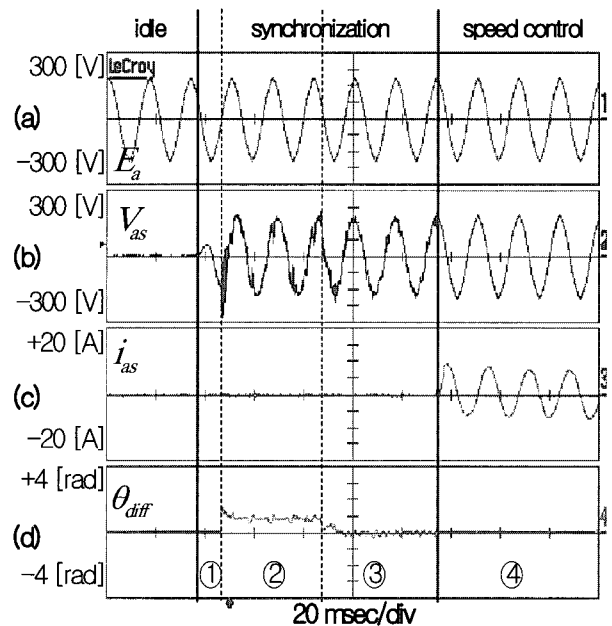


그림 10 발전기 계통 투입시 동기화 제어에 의한 과도상태  
(a) 계통의 a상 전압 (b) 고정자의 a상 전압  
(c) 고정자의 a상 전류  
(d) 계통과 고정자 전압의 위상차

Fig. 10 Synchronization of DFIG stator voltage to the grid voltage  
(a) a-phase voltage of grid  
(b) a-phase voltage of stator  
(c) a-phase current of stator  
(d) phase difference between grid and stator

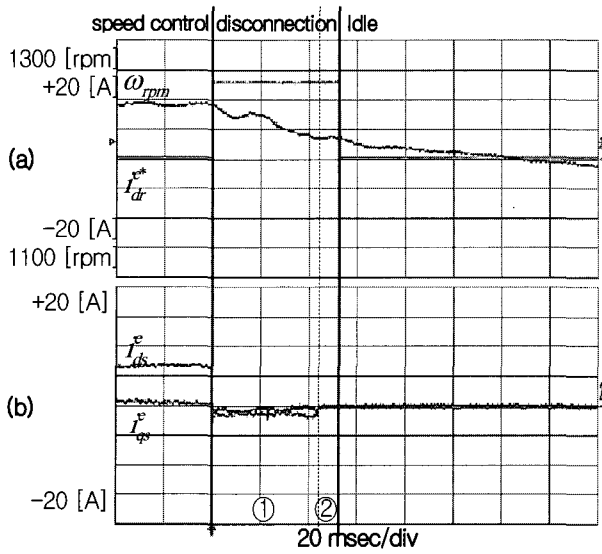


그림 11 발전기의 계통 분리시 영전류 제어에 의한 과도상태  
 (a) 회전속도와 회전자 d축 전류 기준값  
 (b) 고정자 d-q축 전류  
 Fig. 11 Transient state by disconnection control between stator and grid  
 (a) rotating speed and rotor d-axis current reference  
 (b) stator d-q axis current

최저 속도 제어 모드에서 대기 모드로 절환 해야 한다고 판단하면 회전자의 토크분 전류인 q축 전류는 '0'으로 제어하고 여자분 전류인 d축 전류는 그림 11(a)와 같이 정격 자화전류로 제어하여 고정자에 흐르는 전류를 '0'으로 한다. 그리고 고정자 전류가 일정 시간 동안 '0'에 가까운 값을 유지하면 차단기의 off 신호를 발생한다. 이때가 소구간 ①이다. 실제로 차단기가 off 상태로 되면 그림 11(b)의 소구간 ②와 같이 고정자 전류가 '0'으로 된다. 그리고 이 상태를 설정시간동안 유지하면 차단기가 off 되었다고 판단하여 회전자 전류의 제어를 종료하고 이중여자 유도 발전기는 대기 모드로 절환한다. 대기 모드에서 발전기는 무부하 상태가 되며 블레이드의 기계적 출력이 없을 경우 발전기의 회전속도는 그림 11(a)와 같이 서서히 감소한다.

그림 12는 최저 속도 제어 모드에서 가변 토크 제어 모드로 전환 할 때 각 부분의 유효전력이다. 그림 3에서 정한 유효전력의 부호에 따르면 유효전력이 (-)로 증가할수록 계통으로 많은 유효전력을 공급하는 것이다.

고정자와 회전자 유효전력의 합인 발전기 유효전력이 적은 경우에는 회전속도를 최저 속도로 제어한다.

시뮬레이터에서 설정한 속도 변동 범위는 동기속도의 70%에서 110%이므로 최저 속도 제어 모드에서는 동기속도의 70%인 1260rpm으로 일정하게 제어한다. 최저 속도 제어 모드에서 직류 전동기의 토크를 증가시키면 각 부분의 유효전력은 증가한다.

발전기의 토크를 제어하기 시작하면 직류기의 토크가 증가함에 따라서 회전속도가 증가한다. 회전속도가 증가함에 따라서 고정자와 계통 공급 유효전력은 증가하지만 회전자 유효전력은 '0'에 가까워진다. 그림 12(c)에서 원으로 표시한 부분은 토크 기준값이 정격 토크 보다 크기 때문에 토크를 정격 토크로 제어한 경우를 보여준다. 토크가 제한되면 고정자 유효전력은 일정하게 유지되고 회전자 유효전력은 회전속도의 변화에 따라서 달라진다.

그림 12(d)에서 원으로 표현한 부분은 회전자에서도 유효전력을 추출하여 계통에 공급하는 것을 보여준다. 그림 8에서는 이상적인 경우에 유효전력을 제시하였기 때문에 동기속도에서 회전자 유효전력의 부호가 바뀌지만 실제로는 유도기에 동손이 존재하기 때문에 동기속도보다 높은 회전속도에서 유효전력의 부호가 바뀐다.

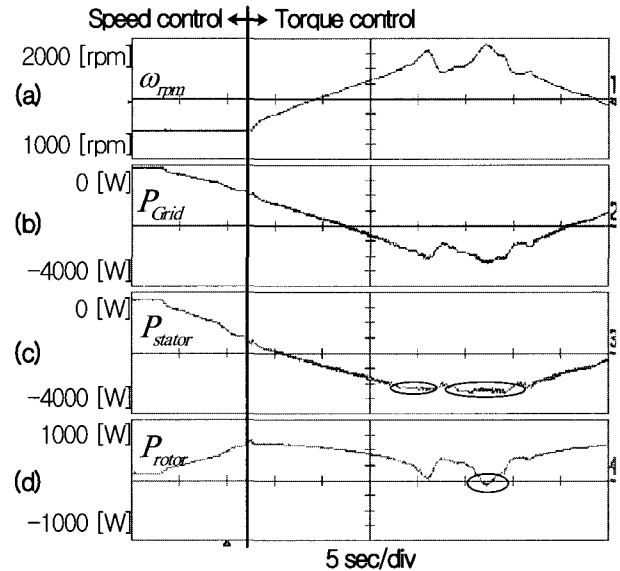


그림 12 기계적 입력 변화에 따른 DFIG의 속도 및 유효전력 변화  
 (a)회전속도 (b)발전량  
 (c)고정자 유효전력 (d)회전자 유효전력  
 Fig. 12 Speed and active power of DFIG during the mechanical input power variation  
 (a)rotating speed (b)grid active power  
 (c)stator active power (d)rotor active power

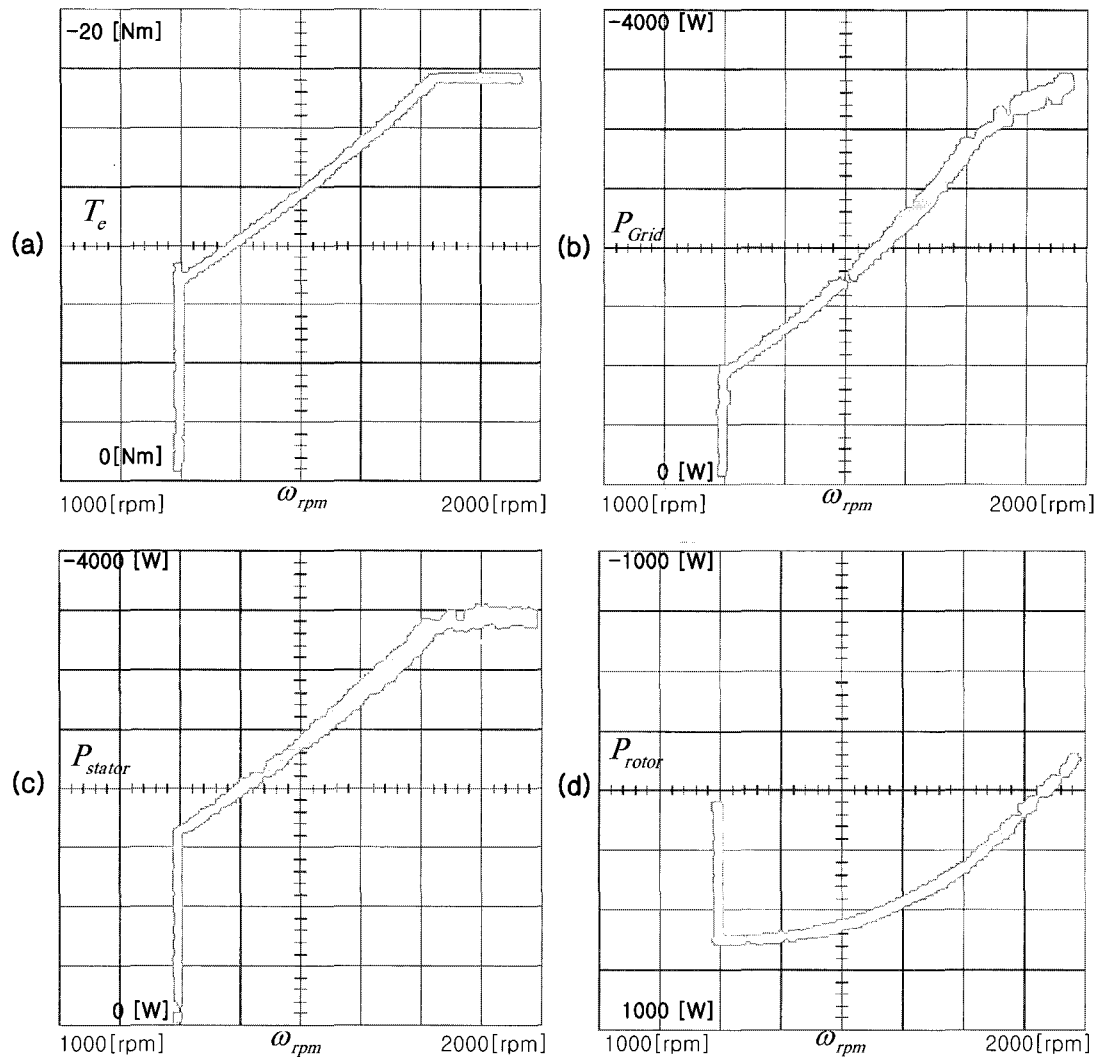


그림 13 회전속도에 따른 유효전력 및 토크 곡선(실험파형)

(a)발전기 토크 (b)발전량 (c)고정자 유효전력 (d)회전자 유효전력

Fig. 13 Active power and torque curve against the rotational speed(experimental)

(a)torque (b)grid active power (c)stator active power (d)rotor active power

그림 13은 시뮬레이터를 운전했을 때 회전속도에 따른 토크와 유효전력 특성을 보여준다. 그림 13(a)는 발전기의 토크로 그림 4(a)와 같은 패턴으로 제어된다. 그림 4(b)는 발전기가 이상적인 경우 고정자와 회전자의 유효전력이지만 그림 13(b)는 발전기에 공급된 기계적 에너지 중에서 발전기와 컨버터에서의 손실을 제외하고 실제 계통에 공급하는 유효전력을 의미한다. 전체 유효전력에 비교했을 때 손실이 크지 않기 때문에 그림 4(b)와 그림 13(b)가 유사한 패턴을 갖는다. 그림 13(c)와 (d)는 고정자와 회전자의 유효전력이다. 고정자 유효전력은 그림 8과 비슷한 패턴을 갖지만 회

전자 유효전력은 권선저항에서의 손실 때문에 회전자 유효전력은 동기속도보다 높은 회전속도에서 부호가 바뀐다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 발전기의 운전모드를 고려하여 이중 여자 유도형 풍력발전기의 제어기를 설계하였고 3kW 급 시뮬레이터를 구현하였다. 제어기를 설계하기 위하여 블레이드를 모델링하고 풍력 발전기의 기계적 입력에 대해서 분석하였다. 설계한 발전기 제어기는 상위

제어기와 하위 제어기로 구분하였다. 제어의 시작과 정지 그리고 조건에 따른 운전모드와 각 운전모드에서의 제어 기준값은 상위 제어기에서 담당하고 하위 제어기는 상위 제어기의 지령에 따라서 발전기의 전류를 제어하여 시뮬레이터가 실제 발전기와 같이 발전기의 회전축에 입력되는 기계적 에너지에 따라서 스스로 운전하도록 하였다. 발전기에 대한 제어의 시작에서부터 제어의 종료까지 1주기를 실험하여 결과를 분석하였다. 개발된 이중여자 유도형 풍력 발전기 시뮬레이터는 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 계통에 연계했을 때 동특성을 분석하고 제어 알고리즘을 개선하기 위하여 활용될 것이다.

### 참 고 문 헌

[1] L. H. Hansen, P. H. Madsen, F. Blaabjerg, H. C. Christensen, U. Lindhard, K. Eskildsen, "Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines", 2001 IEEE Industrial Electronics Society Conference, pp. 2000-2005, 2001.

[2] John Dunlop, "U.S. Wind Market Overview", Workshop on Renewable Energy for Minnesota, 2005.

[3] <http://www.enercon.de/>

[4] <http://www.gepower.com/home/index.htm>

[5] <http://www.repower.de/>

[6] <http://www.newage-avkseg.com/intro.html>

[7] M. Kuhn, M. Becker, "Enron Wind 3.6 Offshore : Example for the Next Generation of Offshore Wind Turbines", 2002 Global Wind Power Conference and Exhibition, July, 2002.

[8] Dr. Eggert, S. Franko, "Innovative Variable Speed Drive for Doubly Fed Wind Turbine Application," 2002 Global Wind Power Conference, July 2002.

[9] Fred Blaabjerg, "Various Wind Electric Arrangements", Workshop on Renewable Energy for Minnesota, 2003.

[10] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", IEE Proc.-Electr, Power Appl., Vol. 143, No. 3, May, pp. 231-241, 1996.

[11] Anca D. Hansen, Florin Iov, Poul Soerensen, Frede Blaabjerg, "Overall Control Strategy of Variable Speed Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine," 2004 Nordic Wind Power Conference, March 2004.

[12] S. Muller, M. Deicke, Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT

Converters Linked to the Rotor," IAS 2000 Conference Record, Vol. 4, pp. 2249-2254, 2000.

[13] 정병창, 정세종, 송승호, "가변관성 모의기능을 가진 풍력 터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘", 전력전자학회논문지 Vol. 8, No. 3, pp.266~273, 2003.

[14] 정병창, 권태화 송승호, 김일환, "회전자축 PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중여자 유도형 풍력발전기의 계통 투입 알고리즘", 전기학회논문지 Vol 52 No. 10, pp. 528~534, 2003.

본 연구는 기초전력연구원 과제인 신재생에너지 발전의 계통연계 기초기술 개발 연구 (과제번호: R-2004-B-125)의 지원으로 수행되었음.

### 저 자 소 개



#### 정병창(鄭炳昌)

1976년 1월 26일생. 1998년 전북대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~2006년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2006년 4월~현재 LS산전 선임연구원.



#### 송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학). 1992년~1995년 포스콘 기술연구소 연구원. 2000년~2006년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2004년~2005년 미국 위스콘신대 방문교수. 2006년~현재 광운대 전기공학과 조교수.



#### 심동준(沈東竣)

1967년 11월 19일생. 1990년 서울대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학). 1992~1996년 포스콘 기술연구소 연구원. 1996~1999년 포항산업과학연구소 연구원. 2000년~현재 (주)이엠티인터내셔널 대표이사.