

# 최대 출력 제어 기법을 이용한 농형 유도 발전기 제어에 관한 연구

\*홍정표, \*정종원, \*원태현, \*\*권순재  
\*동의과학대학, \*\*부경대학교

## A Study on the Maximum Power Control For Cage-Type Induction Generators

\*Jeng-Pyo Hong, \*Jong-Won Jeong, \*Tae-Hyun Won, \*\*Soon-Jae Kwon  
\*Dong-Eui Institute of Technology, \*\*Pukyong National Univ.

### ABSTRACT

본 연구의 목적은 농형 유도 발전기를 이용한 가변속 독립 운전형 풍력 발전 시스템의 최대 전력 추종 제어기법을 제안한다. 제안된 기법은 M-G 세트 구성하여 풍력터빈의 역할을 하는 터빈 시뮬레이터를 직류전동기의 토크제어를 이용하여 구현하였다. 농형 유도발전기는 벡터제어를 기본으로 간접 벡터 제어를 위하여 유도발전기를 좌표 변환하여 모델링하고 이것을 기초로 제어알고리즘을 도출하였다.

### 1. 서 론

풍력 발전 시스템에는 그 규모나 발전 형태에 따라서 다양한 발전기가 사용 될 수 있다. 지금까지 소용량에는 영구 자석형 동기기, 대용량에는 유도기가 주로 사용되어 왔고 최근에는 대용량에도 영구자석 동기기의 사용이 시도되고 있다. 권선형 유도기의 경우 2차측 슬립을 제어하여 원하는 출력 특성을 얻기는 쉽지만 그 자체가 고가이고 브러시와 슬립링의 마모에 대한 유지보수가 필요하다는 단점이 있다. 한편 농형 유도기의 경우 저가이며 견고하여 유지보수비용이 거의 필요 없으므로 경제적인 측면에서 매우 유리하다. 그리고 전력전자 기술의 발달로 인해 농형 유도발전기의 문제점인 초기 여자 확립, 좁은 발전영역 등을 해결할 수 있기 때문에 독립 운전형 풍력발전 시스템에 농형 유도발전기의 사용은 경제적으로 볼 때 중요한 의미가 있다. 본 연구의 목적은 농형 유도 발전기를 이용한 가변속 독립 운전형 풍력 발전 시스템의 최대 전력 추종 제어기법을 제안한다. 제안된 기법은 M-G 세트 구성하여 풍력터빈의 역할을 하는 터빈 시뮬레이터를 직류전동기의 토크제어를 이용하여 구현하였다. 농형 유도발전기는 벡터제어를 기본으로 간접 벡터제어를 위하여 유도발전기를 좌표 변환하여 모델링하고 이것을 기초로 제어알고리즘을 도출하였다. 터빈 시뮬레이터인 직류전동기로부터 실제 풍속에 의한 터빈의 출력이 전달 되어지면 간접 벡터 제어 방식으로 동작되는 농형 유도발전기는 d-축 전류에 의해 여자가 제어되고 q-축 전류에 토크가 제어된다. 이 토크 제어에 의해 발전기는 풍속의 변화에 따라 최대 전력을 발생하도록 가변속 제어된다.

### 2. 본 론

#### 2.1 풍력발전시스템

풍력발전 시스템에서 바람의 운동에너지가 주축(Main Shaft)과 증속기(Gear)를 통해서 발전기에 토크의 형태로 공급 되면 발전기에서 공급된 토크에 비례하는 전기에너지를 생성한다. 터빈 블레이드가 회전축에 공급하는 토크는  $T_{blade}$ , 발전기에서 작용하는 토크의 방향은  $T_g$ 로  $T_{blade}$ 의 방향과 반대방향이다. 회전속도는  $\omega$ 이며, 발전기에서 생성된 전류  $i$ 는 발전기에서 전압  $V$ 의 방향으로 흘러나간다. 블레이드의 축의 회전속도와 토크는 다음과 같은 관계를 가지게 된다.

$$\omega_{blade} = \frac{1}{J_s + B}(T_{blade} + T_g) \quad (1)$$

#### 2.1.1 풍력 터빈의 입력에너지

바람이 가지는 에너지로는 풍속에 따라 크게 달라진다. 풍속이 낮을 때에는 적은 에너지가 발생하고, 풍속이 높아지면 상대적으로 에너지의 크기도 커진다. 풍력터빈 블레이드의 회전 단면에 입력되는 바람이 가지는 에너지( $P_{wind}$ )은 다음과 같이 표현 된다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A (v_{wind})^3 \quad [W] \quad (2.1)$$

여기서,  $\rho[kg/m^3]$ 는 공기의 밀도,  $A[m^2]$ 는 풍력터빈의 날개가 커버하는 면적,  $v_{wind}[m/sec]$ 는 풍속이다.

블레이드의 형상은 제작 시 결정되어지므로, 블레이드의 피치 각이 고정되었다고 가정하면 풍속과 블레이드의 회전속도의 관계가 출력계수를 결정하는 중요한 변수가 된다. 풍속과 블레이드의 회전속도의 관계는 주속 비(Tip Speed Ratio)라고 하며 그 관계식은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R}{v_{wind}} \quad (2.2)$$

여기서  $\lambda$ 는 주속 비(tip-speed ratio)이고,  $\omega_{blade}[rad/sec]$ 은 블레이드의 회전속도이며,  $R[m]$ 은 블레이드의 반경이다.

식(2.1)에 블레이드의 출력계수를 곱하면 풍력터빈 블레이드에서 변환되어지는 기계적 회전에너지 ( $P_{blade}$ )가 된다.

$$P_{blade} = P_{wind} C_p = \frac{1}{2} \rho A v_{wind}^3 \cdot C_p(\lambda) \quad (2.3)$$

식(2.2)와 식(2.3)에서 볼 때  $V_{wind}$ 가 일정하다면  $C_p - \lambda$  곡선의 x축을  $\omega_{blade}$ 로,  $C_p - \lambda$ 곡선의 y축을  $P_{blade}$ 로 대신하여 그릴 수 있다. 즉, 풍속이 일정하다더라도 회전속도가 변하게 되면  $P_{blade}$ 는  $C_p$  곡선과 같은 형태로 그림 1과 같이 그려지게 된다.

그림 1에서 알 수 있듯이 풍속이 일정하다더라도 풍력 터빈의 블레이드에 의해 변환되는 전력은 블레이드의 회전 속도에 따라서 달라지고 풍속에 따라 최대 출력을 얻을 수 있는 블레이드의 회전 속도가 다름을 알 수 있다. 따라서 풍력 터빈에 의해 변환되는 전력은 풍속에 따라 달라지며 일정한 풍속 하에서 최대 전력을 얻기 위해서는 블레이드의 회전 속도를 최대 전력을 만들어 내는 회전속도로 일정하게 유지할 필요가 있다. 본 연구에서는 발전기의 토크를 제어함으로써 회전자의 회전 속도를 최대 전력을 얻을 수 있는 회전 속도로 제어한다.

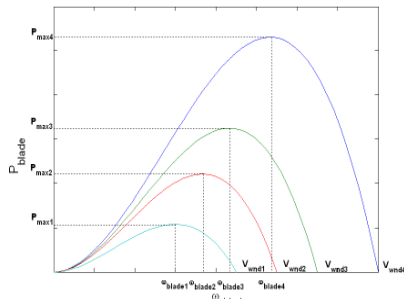


그림 1 풍력터빈의 출력특성 곡선  
Fig. 1 Power characteristic of a wind turbine

블레이드에서 변환되는 기계적 회전에너지는 연결된 축을 통해서 발전기에 공급되어진다. 블레이드에서 발전기와 연결된 축을 통하여 전달되는 토크는 다음과 같다.

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{\omega_{blade}} \quad [Nm] \quad (2.4)$$

### 2.1.2 풍력 터빈 시뮬레이터 구현

그림 1에서 풍속을 변수로 하여 최적의 주속비를 가지고 최대 출력을 발생하는 블레이드의 회전 속도는 식(2.2)에 의해서 식 (2.5)과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} \times v_{wind}}{R} \quad [rad/sec] \quad (2.5)$$

따라서, 풍속에 대한 최대 출력 값과 풍력터빈의 블레이드로부터 발생하는 최대 출력과 기계적 토크는 식(2.3)과 식(2.5)에 의해서 식 (2.6)과 (2.7)로 표현 된다.

$$P_{blade \max} = \frac{1}{2} \rho \pi R_{blade}^5 \left( \frac{\omega_m^*}{\lambda_{opt}} \right)^3 C_{p \max} \quad [W] \quad (2.6)$$

$$T_{blade} = \frac{P_{blade \max}}{\omega_m^*} \quad [Nm] \quad (2.7)$$

$T_{blade}$ 는 풍속에 따라 블레이드가 발생하는 토크이다.

실제의 풍력터빈 블레이드를 사용하여 실험을 수행하기에는 현실적인 제약이 따르므로 본 연구에서는 풍력터빈의 역할을 하는 터빈 시뮬레이터를 영구 자석형 직류전동기의 토크제어를 이용하여 구현한다.

식(2.7)에 의해 계산된 토크 값은 블레이드를 모의한 직류전동기에서 발생하는 토크지령치가 되며 식 (2.8)과 같다.

$$T_{blade} = T_{dcn} = K_T i_a \quad [Nm] \quad (2.8)$$

여기서  $K_T$ 는 영구 자석형 직류전동기의 토크상수이고,  $i_a$ 는 전기자 전류이다.

이러한 풍력터빈 시뮬레이터의 출력은 영구 자석형 직류전동기의 기계방정식을 통해서 발전기로 전달되며 식(2.9), 식 (2.10)과 같다.

$$T_{blade} - T_g = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad [Nm] \quad (2.9)$$

$$\omega_{dcn} J \frac{d\omega_{dcn}}{dt} = P_{dcn} - P_g = \frac{1}{2} \rho A C_p V_{wind}^3 - P_g \quad [W] \quad (2.10)$$

여기서  $T_{blade}$ 는 직류전동기에 의해서 발생하여 농형 유도발전기에 전달되는 기계적인 입력토크이고  $T_g$ 는 농형 유도발전기에 의해서 발생하는 역토크이다. 이 두 토크가 같게 되는 속도에서 평형을 이루고 입력되는 토크가 전부 전기적 에너지로 변환된다.

그림 2는 본 논문에서 사용된 농형 유도발전기의 입력 토크를 발생하기 위한 풍력 터빈 시뮬레이터의 구성을 보인다. 영구자석형 직류전동기(Permanent Magnet DC Motor)를 사용함으로써 계자자속을 정격으로 일정하게 유지하고 전기자 전류를 제어하여 풍속에 대응되는 토크를 발생한다.

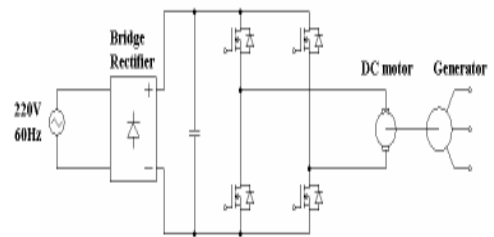


그림 2 터빈시뮬레이터 구성도  
Fig. 2 Turbine simulator

### 2.2 시뮬레이션 및 결과유도발전기의 벡터 제어

본 연구에서 제안된 풍력발전 시스템의 개략도는 그림 3과 같다. 실제 풍속을 이용하여 터빈으로 동력을 만들어내는 것은 많이 비용과 여러 가지 제약이 있으므로 본 연구에서는 직류전동기를 가지고 실제 풍력터빈을 모의하도록 하는 M-G 세트 구성을 하였다.

그림 3에 보여진 시스템에서 인버터의 직류 측에는 초기 충전 회로가 있어서 발전기가 전압을 확립을 하기 위한 초기

전류를 공급하고 전압 확립이 이루어지고 나면 다이오드에 의해 인버터 측과 차단되어 진다.

본 시스템에서 부하는 인버터 직류 측에 접속되어 있으며 해석과 실험의 편의 상 부하는 저항 부하인 경우만을 고려하였다.

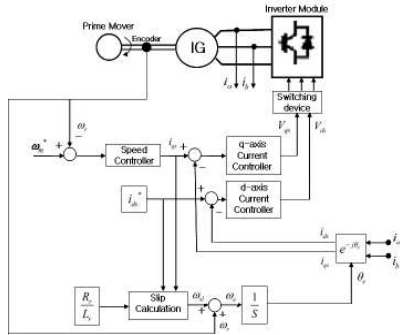


그림 3 풍력 발전 시스템의 제어 블록도.

Fig. 3 Control block diagram of Wind Power Generator System.

본 연구에서 제안한 시스템의 동작 특성을 살펴보기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 Psim 을 사용하여 수행하였다. Psim 프로그램으로 유도전동기의 회전자 왜고 자속 기준 벡터제어를 위한 시스템 제어 블록선도를 만들어 PI제어에 의한 속도제어에 대한 시스템의 특성을 해석하였다.

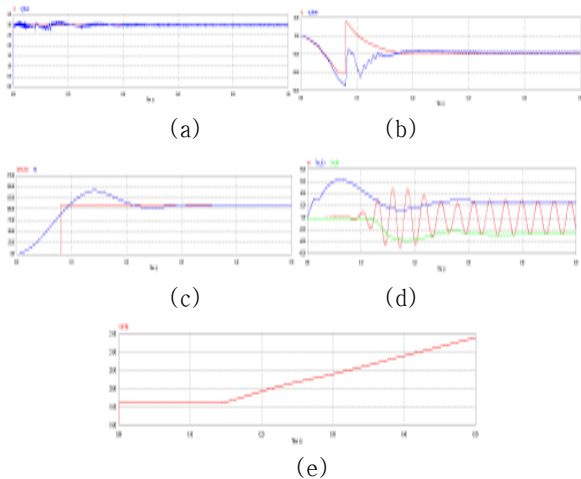


그림 4 스텝 입력의 시뮬레이션 결과(1).

Fig. 4 Simulation result of step response (1).

그림 4는 스텝 속도 명령으로 1000[rpm]을 인가하였을 때 속도응답과 q축 전류 와 d 축 전류 그리고 발전기의 한 상의 전류와 토크를 나타내고 있다. 여기서 자속분의 전류  $i_{ds}$ 는 3[A]로 유지 시켰고 스텝 속도 명령은 0.08초에 인가하였고 초기 충전회로는 0.1초에 차단시켰다. 그림 4의 (a)는 d축 전류를 보이고 3[A]로 잘 제어 되고 있다. (b)는 q축 전류를 나타내고 있다. (c)는 속도 응답으로써 정상상태에 도달하는 시간이 0.4초 이내에 도달하고 있고, (d)는 발전기의 한상의 전류와 터빈 시뮬레이터인 직류전동기의 토크와 농형 유도 발전

기의 토크를 나타낸다. (e)는 인버터의 직류 측의 전력을 나타낸 것으로 초기 충전회로의 차단 시점인 0.1초 이후부터 전력이 증가하여 발전되고 있음을 보이고 있다.

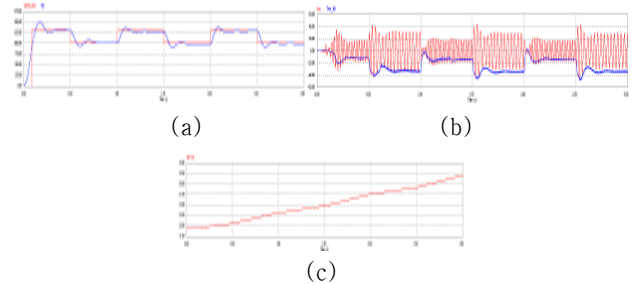


그림 5 스텝 입력의 시뮬레이션 결과(2).

Fig. 5 Simulation result of step response (2).

그림 5는 스텝 속도 명령이 1400[rpm]에 1000[rpm]으로 주기적으로 변할 때 속도 응답을 보인다. (a)는 속도 응답 파형으로 정상 상태 도달 시간이 0.4초 이내로 도달하고 있다. (b)는 농형 유도 발전기의 한 상의 전류와 토크를 나타내고 (c)는 인버터의 직류 측의 발전되는 전력으로 로터의 회전 수가 달라짐에 따라 즉, 농형 유도 발전기의 토크가 변화함에 따라서 발전되는 전력 곡선의 기울기가 달라지고 있음을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 농형 유도발전기를 이용한 독립 운전형 풍력 발전시스템을 연구대상으로 하고 풍속의 변화에도 항상 최대 전력 점으로 동작할 수 있는 가변속 제어 시스템을 제안하고 Psim 프로그램으로 시뮬레이션 하였으며 실험으로 그 타당성을 검증하였다.

직류발전기의 토크제어에 의해 터빈 시뮬레이터를 구현하여 풍력 터빈 블레이드의 특성을 모의하였으며 발전기의 벡터 제어에 의해 최대 전력제어를 위한 가변속 시스템을 구현하였다. d-축 전류로 여자제어를 하며 q-축 전류로 발전기 토크를 제어하여 최대 전력을 발생하는 속도로 제어를 시뮬레이션하여 만족할만한 결과를 보였다.

제안된 제어 기법을 M-G set를 이용한 풍력터빈 시뮬레이터를 통해 타당함을 보였고 제안된 제어기법을 실제 풍력발전 시스템에 적용하였을 시 기존의 제어방식에 비해 발전 효율의 증대가 기대된다. 또한 다양한 부하 실험을 통하여 발전된 전력의 안정성을 확보하고 실제 풍속데이터를 수집하여 시간에 따라 급속하게 변화하는 풍속에 대하여 제안된 기법을 적용하는 연구가 수행 되어야 할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] Ricardo J. Mantz and Carlos F. Christiansen, " Dynamical Sliding Mode Power Control of Wind Driven Induction Generator ", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 15, No. 4, 2000.
- [2] Roberto Leidhold, Guillermo Garcia, Maria Ines Valla, "Induction Generator Controller Based on the Instantaneous Reactive Power Theory", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, No.3, 2002.