2003년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집(2003.4.24~26)

농형유도발전기를 이용한 독립형 풍력발전시스템의 가변속 제어

김 형 균, 이 강 주, 이 동 춘, 석 줄 기
영남대학교 전자정보공학부

Adjustable Speed Control of Stand-Alone Wind Power Generation System using Squirrel-Cage Induction Generators

Hyeung-Kyun Kim, Kang-Ju Lee, Dong-Choon Lee, Jul-Ki Seok
Yeungnam University

Abstract - This paper proposes a stand-alone adjustable speed wind power generation system using a cage-type induction generator. Indirect vector control is used, where the q-axis current controls the generator speed and the d-axis current controls the excitation level. The generator speed is adjusted according to the wind speed so as to produce the maximum output power. The generated power is charged in the battery bank through ac/dc PWM converter. The proposed scheme has been verified by the experimental results.

1. 서 론

최근 대체에너지 개발에 대한 관심이 급속히 고조되고 있다. 이미 풍력과 태양광 발전에서는 많은 연구가 진행되어 선진국에서는 실용화 단계에 들어가 있다[1]. 국내에서도 현재 제주도에서 상용운전을 하고 있고, 새만금, 태백, 포항 등지에서도 풍력발전을 하고 있거나 풍력발전단지 조성을 추진하고 있다. 그러나 아직 풍력자원에 비해 발전량이 저조하고, 기술력도 전적으로 선진국에 의존하고 있는 실정이다. 풍력발전 시스템은 규모나 형태에 따라 다양한 발전기를 적용할 수 있다. 지금까지 소용량 발전에는 동기기, 대용량 발전에는 권선형 유도기가 주로 사용되어 왔다[2][3]. 권선형 유도기는 슬립링의 마모에 기인한 보수문제가 있어 최근에는 농형유도기가 주목을 받고 있다.

본 연구에서는 저가이며 유지보수가 거의 필요 없는 농형 유도발전기를 사용하여 섬이나 산간 오지 등 고립된 지역에 전력공급이 가능한 독립형 풍력발전시스템을 개발하고자 한다. 농형 유도발전기는 벡터제어 방식으로 제어되며 d-축 전류에 의해 자속을 제어하여 여자의 크기를 제어하며 q-축 전류에 의해 토크를 제어하여 발전기의 속도를 제어한다. 그리고 풍속의 변화에 따라 주어진 풍속에서 최대의 전력을 발생하는 가변속 제어를 수행한다. 발전기의 출력은 ac/dc PWM 컨버터를 통해 배터리 뱅크에 저장되고, 또한 태양광 발전이나 디젤엔진 등의 다른 발전시스템으로부터 발생된 에너지도 저장 가능하므로 하이브리드 시스템으로 사용될 수도 있다. 배터리에 저장된 에너지를 인버터를 사용하여 교류부하에 전력을 공급할 수 있다.

직류전동기의 토크제어로 터빈 블레이드의 특성을 모의하고 농형유도발전기의 가변속 제어에 의해 최대전력 추종 제어시스템을 구현한다.

2. 유도발전기의 여자 방식

풍력발전은 계통 연계형과 독립형으로 크게 구분된다. 계통 연계형은 전력계통이 부하가 되어 발전전력을 계통에 넘겨주지만 고립된 지역의 전력공급을 위한 독립형에서는 발전전력이 부하에 직접 공급되거나 에너지 저장장치에 저장되었다가 필요시 부하에 알맞은 형태로 변환되어 사용된다. 그림 1은 독립형 유도발전 시스템의 구성을 보인다.

유도기가 전동기로 동작하든 발전기로 동작하든 여자전류를 공급받아야 한다. 독립형 유도발전시스템에서 발전기에 여자전류를 공급하는 방법으로 발전기 출력단에 캐패시터를 병렬로 연결하는 자기여자 방식이 있다. 이 방법은 가격이 저렴하고 구조가 간단하지만 회전속도에 따라 출력전압이 크게 변하고 임계속도 이하에서는 유기전압이 발생되지 않은 단점이 있다 따라서 풍속의 변화가 많은 풍력발전 시스템에는 적합하지 않다[4][5].

다음으로 인버터를 이용하는 여자방식이 있다. 초기여자는 인버터의 직류측에 연결된 배터리를 사용하고 정상적으로 발전이 시작되면 배터리를 분리하고 인버터를 통한 전류제어에 의해 여자를 공급한다. 그러나 이 방법은 인버터의 직류측 전압을 일정하게 제어하기 위해 q축 전류를 사용해야 하므로 최대전력제어를 위한 발전기 속도 제어를 수행할 수 없다[6].

본 연구에서도 인버터 여자방식을 택한다. 인버터의 직류단에 에너지 저장용 배터리가 있으며 이로부터 초기여자를 공급받는다. 발전이 시작되면 d-축 전류로 여자를 제어하고 주어진 풍속에 대해 최대전력을 발생하도록 q-축 전류로 발전기의 속도를 제어한다. 여기서는 [6]과는 달리 인버터의 직류전압을 제어할 필요가 없으므로 속도제어가 가능하다.

3. 터빈시뮬레이터 구성

본 연구에서는 풍력터빈의 역할을 수행하는 터빈 시뮬레이터를 직류전동기의 토크제어를 이용하여 구현한다. 그림 2는 터빈 시뮬레이터의 전체 구성을 보인다. 직류전동기 제어를 위해 단상 반브리지 PWM 정류기와 전브리지 dc-dc 컨버터가 사용된다. 앞단의 반브리지 PWM 정류기는 두 개의 IGBT 스위치로 구성되고 단상 입력으로부터 원하는 직류출력을 발생하며 제동시 발생하는 회생전력을 전원 측으로 회생할 수 있다[7].

3.1 터빈블레이드 모델

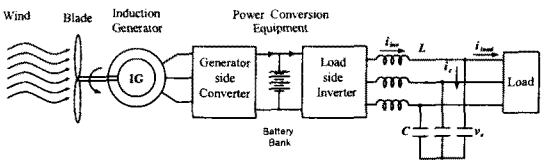

그림 1. 독립형 유도발전시스템

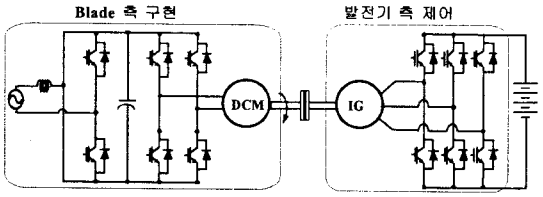

그림 2. 터빈시뮬레이터의 구성도

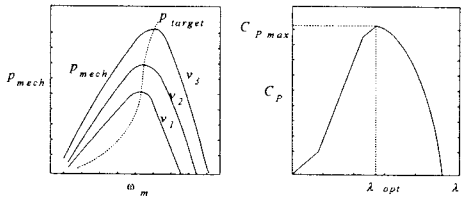

그림 3. 풍력터빈의 출력전력 곡선

그림 3의 좌측은 터빈의 회전속도에 대한 출력전력의 변화를 나타내고, 우측은 C_p와 주속비의 관계를 나타낸다. 주속비 λ는 풍속에 대한 블레이드 끝점의 속도의 비로 정의된다.

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V} \tag{1}$$

여기서 R은 블레이드의 반경[m], ω_m은 회전속도[rad/s], V는 풍속[m/s]이다. C_p는 터빈의 전력변환계수로서 풍력에너지로부터 터빈블레이드에 흡수되는 에너지의 비를 나타낸다. 이 계수는 터빈의 형상과 풍속에 따라 달라지지만 주속비의 함수로 나타내면 그림 3의 우측과 같다. 풍속의 변화에 따라 터빈이 λ_{opt} 점에서 동작한다면 전력계수는 $C_{p\,\max}$점이 되어 풍속의 변화에 관계없이 항상 최대전력점에서 동작하게 된다. 식 (1)로부터 최대출력을 발생하는 속도 지령치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} \times V}{R} \tag{2}$$

바람으로부터 블레이드에 전달되는 에너지와 블레이드가 발생하는 기계적 토크는 식 (3)과 식 (4)로 표현된다.

$$P_{blade} = 0.5\rho\pi\, R_m^5 \frac{C_{p\,\max}}{\lambda_{opt}^3}\, \omega_m^{*3} \tag{3}$$

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{\omega_m^*} \tag{4}$$

여기서, T_{blade}는 풍속에 따라 블레이드가 발생하는 토크이다. 이 값은 블레이드를 모의한 직류전동기에서 발생해야 하는 토크 지령치이다.

$$T_{blade} = T_{DCM} = k\phi i_a \tag{5}$$

직류전동기의 출력은 기계적 손실을 제외하고 농형유도발전기로 전달되며 식 (6)과 같다.

$$T_{blade} - T_{load} = J\frac{d\,\omega_m}{dt} \tag{6}$$

T_{gen} 는 손실 부분을 포함한 유도발전기에 의해서 발생하는 역토크이고 T_{blade}와 T_{gen}가 같게 되는 속도에서 평형을 이루고 동작하게 된다[8]~[10].

4. 농형유도발전기의 최대전력제어

그림 4는 최대 전력점에서의 발전을 위해 속도제어를 수행하는 발전기측 PWM 인버터의 제어 블럭도이다. 이 인버터의 입력전압은 발전기의 출력전압이며 풍속이 변하면 주파수와 전압의 크기가 변하게 된다. 인버터를 통해 ac/dc 변환을 하며 출력전압은 배터리의 전압으로 클램핑 된다. 풍속의 변화에 관계없이 $C_{p\,\max}$인 점에서 λ_{opt}를 유지하며 운전할 때 최대 전력을 발생할 수 있다.

5. 실험 결과 및 검토

표 1은 시뮬레이터에 사용된 블레이드의 사양, 직류전동기, 유도발전기의 파라미터를 나타낸다. 실험에 사용된 배터리는 12[V], 65[AH]의 유닛 12개를 직렬로 연결하여 144[V]로 하였다. 제어보드는 전동기 제어와 발전기 제어를 위해 2개의 DSP보드를 사용하였다. 풍속의 변화는 함수발생기를 이용하여 모의하였는데 직류옵셋을 갖는 1[Hz]의 삼각파를 사용하였으며 2개의 DSP 보드에서 함수발생기의 출력을 AD컨버터를 통해 동시에 읽어 들여 풍속으로 인식하게 하였다.

그림 5는 풍속이 5[m/s]→6[m/s]→5[m/s]로 변화하 경우의 여러 가지 파형을 보인다. (a)는 풍속, (b)는 블

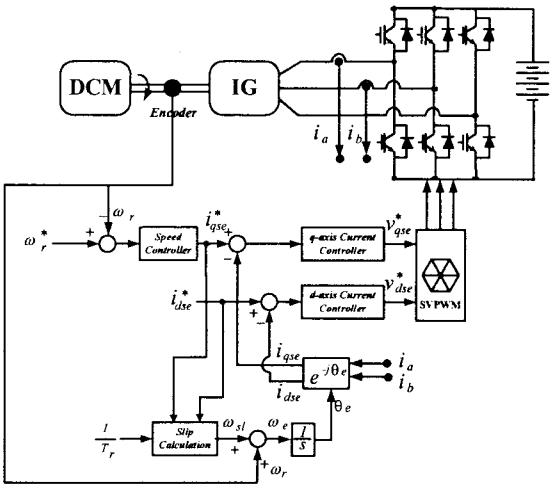

그림 4. 발전기의 제어블럭도

표 1. 파라미터

블레이드	직류 전동기	유도 발전기.
R_{blade} = 1.9[m] $C_{p\,\max}$ = 0.43 λ_{opt} = 16.5	P = 3[kW] V_{rated} = 220[V] I_a = 13.6[A] T_{rated} = 22[Nm] Poles = 4	P = 3[kW] V_{rated} = 230[V] I_{rated} = 10.9 [A] ω_{rated} = 1430[rpm] Poles = 4

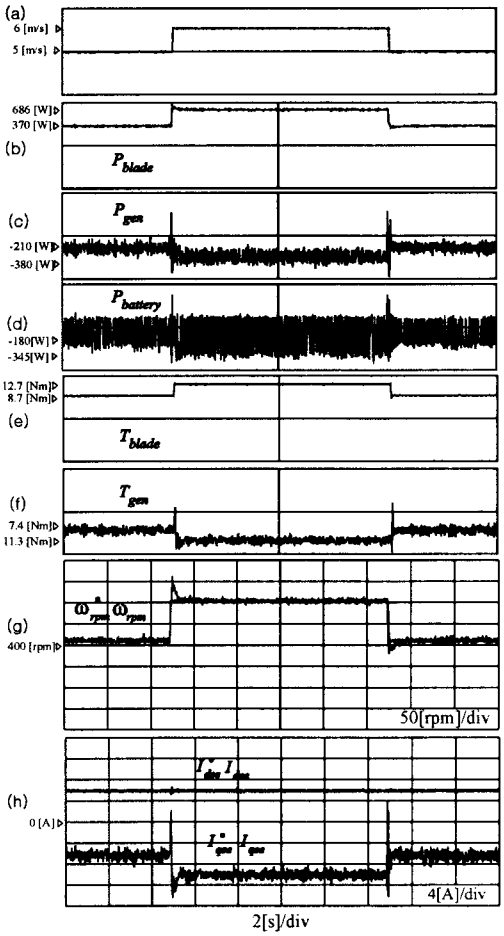

그림 5 유도발전기의 제어특성(풍속이 5[m/s]→6[m/s]→5[m/s]로 변하는 경우)

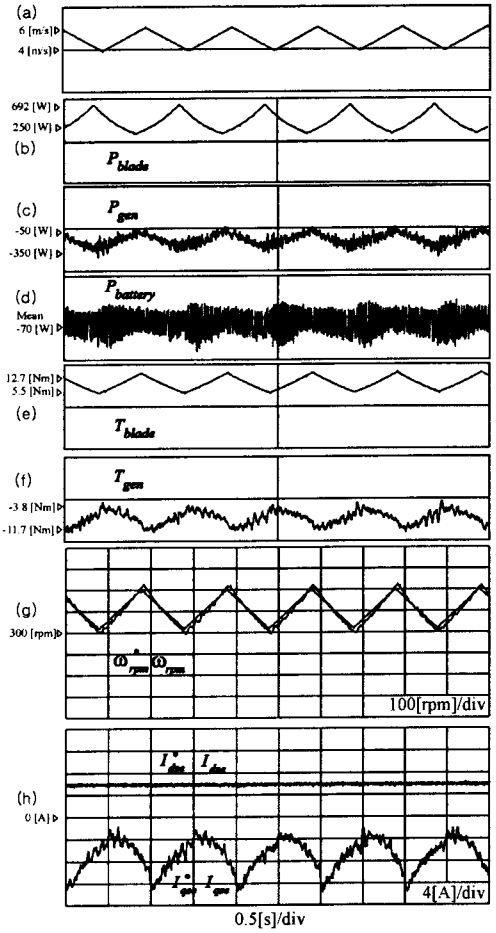

그림 6 유도발전기의 제어특성(풍속이 1[Hz]주파수로 계속적으로 변화할 경우)

레이드의 입력전력, (c)는 유도발전기의 출력, (d)는 배터리의 충전전력 (e)는 블레이트 토크 (f)는 발전기의 유기토크이다. 그리고 (g)는 발전기의 속도, (h)는 발전기의 d, q-축 전류 응답을 보인다. 그림 6은 풍속이 4~6[m/s]의 크기로 1[Hz]의 주파수로 변화할 경우의 파형을 보인다. (a)-(h)는 그림 5에 대응된다. 유도기의 발전전력은 상전압과 상전류로부터 계산하였고 손실로 인하여 전동기의 출력보다 작게 나타난다. 풍속의 변화에 대해 최대전력을 발생하는 속도를 잘 추종하고 있음을 보인다.

6. 결 론

본 연구에서는 유지보수가 거의 필요없는 농형유도발전기를 이용한 독립형 풍력발전시스템의 최대전력제어를 구현하였다. 유도발전기의 벡터제어방식으로 제어하였고 d-축 전류를 통해 여자를, q-축 전류를 통해 속도제어를 실시하였다. 그리고 풍속에 관계없이 항상 최대전력을 출력하는 λ_{opt}점에서 운전하도록 제어하였다. 출력전력은 인버터를 통해 배터리에 직접 충전되고 이는 다시 다른 인버터를 통해 독립부하에 공급될 수 있다. 차후 부하측 인버터 제어에 관한 연구를 계속 진행할 예정이다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-00936-0) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

[1] "Global Wind Energy Market Report", AWEA Report, 1999.
[2] Siegfried Heier "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems" John Wiley & Sons, 1998
[3] 김두훈, 류지윤 "해외 풍력발전기술의 동향과 전망", 전기학회지, vol.50, no.6, pp.19-24, Jun. 2001
[4] S. A. Daly, A. M. de Paor and R. J. Simpson,"Modelling and xcontrol of a wind-driven induction generator for water storage heating" IEE Proc., vol.130, pt.A, no.9, pp.587-595, Dec.1983
[5] A. K. Tandon, S. S. Murthy, and G. J. Berg, "Steady state analysis of capacitor self-excited induction generators", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-103, no.3, pp.612-618, Mar. 1984
[6] 기태훈, "벡터제어 방식에 의한 자립형 유도발전기의 제어", 서울대학교 전기공학과 석사학위논문, 1991.
[7] 김태윤, 이지명, 석줄기, 이동춘 "유도전동기 구동을 위한 저가형 단상-3상 AC/CD/AC PWM 컨버터", 전력전자학회논문지, vol.7 no.4, pp.322-331, Aug. 2002
[8] 구성영, 이동춘, "풍력발전용 농형 유도발전기의 최대 출력제어", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.288-292, 2001
[9] M. R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", CRC Press, 1999
[10] 정병창, 송승호, 노도한, 김동용 "풍력터빈 모의실험을 위한 가변 토오크 입력형 시뮬레이터" 전기학회논문지, vol.51B, no. 8, pp.467-473, Aug. 2002