論文 9-1-11

농형 유도발전기를 이용한 독립형 풍력발전시스템의 최대출력제어

金炯均*, 李東椿†, 石줄기**

Maximum Output Power Control for Stand-Alone Wind Power Generation System Using Cage-Type Induction Generators

Hyeung-Gyun Kim, Dong-Choon Lee, and Jul-Ki Seok

요 약

본 논문에서는 농형유도발전기를 이용한 독립형 풍력발전시스템의 최대전력 추종제어기법을 제안한다. 농형 유도발전기는 벡터제어 방식으로 동작되는데 d-축 전류에 의해 여자가 제어되고 q-축 전류에 토크가 제어된다. 이 토크 제어에 의해 발전기는 풍속의 변화에 따라 최대전력을 발생하도록 가변속 제어된다. 발전된 전력은 ac/dc PWM 컨버터에 의해 직류 출력단 배터리뱅크로 충전된다. 제안된 기법은 M-G세트로 구성된 터빈시뮬레이터를 이용하여 실험적으로 검증된다.

ABSTRACT

In this paper, a maximum output power control of stand-alone cage-type induction generator systems for wind power generation is proposed. The induction generator is operated in a vector-controlled mode, which is excited with d-axis current and of which torque is controlled with q-axis current. The generator speed is controlled by this torque, along which speed the generator produces the maximum output power. The generated power charges the battery bank for energy storage through an ac/dc PWM converter. The proposed scheme has been verified for the wind turbine simulator system which consists of M-G set.

Key Words : Wind power generation, cage-type induction generator, maximum power tracking, turbine simulator

1. 서 론

최근 화석연료 에너지원의 고갈과 전력수요의 증가에 따라 대체에너지의 개발에 대한 관심이 점차 고조되고있다. 더구나 환경적인 요소를 고려하면 대체에너지의 실용화 연구는 더욱 활성화되어야 할 것이다. 대체에너지 중에서 풍력발전과 태양광 발전에 상당한 진전이 있어 왔으며 풍력발전은 발전단가가 저렴하여 그 시장 전망이 매우 밝다[1].

이미 유럽과 미국에서는 친환경적 청정에너지원으로 풍력발전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 상당량 보급되어 발전가치를 인정받고 있는 실정이다. 국내에서 현재 제주도에서 상용운전을 하고 있고, 새만금, 태백, 포항 등지에서도 풍력발전을 하고 있거나 단지 조성을 계획하고 있다. 그러나 풍력자원에 비해 아직 풍력 발전량이 매우 저조하고 기술적인 면에서도 일부에서 국산화를 시도하고 있지만 아직 선진국에 의존하고 있는 실정이다.

* 학생회원, 영남대 전기공학과 대학원 석사과정
† 교신저자 : 정회원, 영남대 전자정보공학부 부교수
E-mail : dclee@yu.ac.kr
** 정회원, 영남대 전자정보공학부 조교수
접수일자 : 2003. 8. 4 1차 심사 : 2003. 8. 11
2차 심사 : 2003. 9. 19 3차 심사 : 2003. 11. 3
심사완료 : 2003. 11. 14

풍력발전 시스템에는 그 규모나 발전형태에 따라서 다양한 발전기를 사용될 수 있다. 지금까지 소용량에는 영구자석형 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 농형유도발전기의 문제점인 초기 여자의 확립, 좁은 발전영역 등을 해결할 수 있기 때문에 풍력발전에 농형 유도발전기의 사용은 경제적으로 볼 때 중요한 의미가 있다[2][3][4].

본 연구에서는 저가이며 유지보수가 거의 필요 없는 농형 유도발전기를 사용하여 섬이나 산간 오지 등 고립된 지역에 전력을 공급하기 위한 독립형 풍력발전시스템의 최대전력제어 기법을 제안하고 구현하고자 한다. 농형 유도발전기는 벡터제어 방식으로 제어되는데 d-축 전류로 자속을 제어하여 여자의 크기를 제어하고 q-축 전류로 토크전류를 제어하여 발전기의 속도를 제어한다. 그리고 주어진 풍속에서 최대의 전력을 발생하는 동작점으로 제어하기 위해 풍속에 따라 가변속 제어를 실시한다. 권선형에서는 운전되는 속도범위가 좁아 최대출력으로 동작하기가 곤란하지만 농형에서는 가변속 제어에 의해 넓은 구간에서 최대출력 동작이 가능하다. 발전기의 출력은 ac/dc PWM 컨버터를 통해 직류로 변환되어 출력단의 배터리 뱅크에 저장된다. 이 배터리에는 태양광발전 혹은 디젤 엔진 등과 같은 다른 에너지원으로부터 발생된 에너지가 저장되어 하이브리드 시스템으로 사용될 수도 있다. 이 배터리의 에너지를 인버터를 사용하여 교류 부하에 공급할 수 있다. 풍속에 따라 직류전동기의 토크제어에 의해 풍력터빈의 특성을 모의하며 유도발전기 측에서는 최대출력운전을 위한 속도제어를 실시한다. 이 제시된 알고리즘은 2대의 DSP 제어기를 사용한 실험으로부터 그 타당성이 입증된다.

2. 독립형 풍력발전시스템

풍력발전은 독립형과 계통연계형으로 나뉠 수 있다. 계통연계형은 전력계통이 부하가 되어 발전전력을 계통으로 넘겨 주지만 섬이나 산간 오지 등 고립된 지역의 전력공급을 위한 독립형 시스템에서는 발전전력이

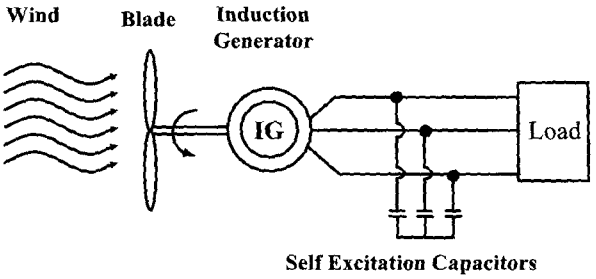


그림 1 커패시터 여자 방식의 유도발전 시스템
Fig. 1 Capacitor-excited induction generator system

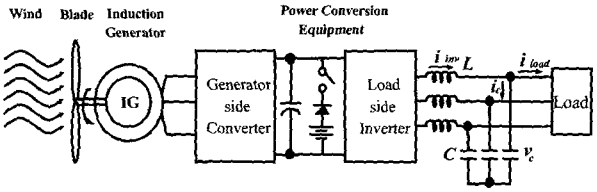


그림 2 인버터 여자방식의 유도발전 시스템
Fig. 2 Inverter-excited induction generator system

부하에 직접 공급되거나 배터리 같은 에너지 저장장치에 저장되었다가 필요시 부하에 알맞은 형태로 변환되어 공급된다.

유도기가 전동기로 동작하든 발전기로 동작하든 여자전류가 공급되어야 한다. 먼저 유도발전기의 여자를 위해 그림 1에서 처럼 커패시터가 출력단에 병렬로 연결될 수 있다. 자기여자방식이라고 불리우는 이 방법은 값싸고 간단하지만 회전 속도에 따라 출력전압이 크게 변하는 단점이 있으며 임계속도 이하에서는 유기전압이 발생되지 않는다. 따라서 풍속이 많이 변하는 풍력발전 용도로는 적합하지 않다[5][6].

다음으로 그림 2와 같은 인버터 여자형이 있다. 이 방식은 발전기에 인버터가 직렬로 연결되고 발전기의 전류를 인버터를 통해 제어함으로써 이루어진다. 즉, 인버터 직류단의 배터리를 통해 초기여자를 공급하면 유기전압이 발생하고 이로써 전류가 흐르게 되면 이 전류를 d-q축으로 분해하여 d-축 전류를 통해 여자공급을 제어하는 방식이다[7]. 여기에 사용되는 배터리는 초기 여자만을 위한 것이므로 용량이 클 필요가 없다. 이 방법은 커패시터의 전압을 일정한 값으로 제어하기 위해 q-축 전류를 사용하므로 최대전력제어를 위한 발전기 속도제어를 수행할 수 없다. 따라서 가변속 풍력발전용으로는 적합하지 않다.

본 연구에서는 인버터 여자방식을 채용하며 인버터 출력측에 발전 전력을 저장하기 위해 대용량의 배터리

를 사용한다. 이 배터리 뱅크의 전압은 커패시터와는 달리 거의 일정한 값으로 유지되므로 직류전압을 제어할 필요가 없으며 이로써 생기는 q-축 전류 제어의 자유도를 최대출력제어를 위한 발전기 속도제어에 사용할 수 있다. 이 방식은 전동기의 에너지가 발전기측에서 직류측으로 넘어가는 회생제동모드에 해당한다. 유기기전력이 큰 고속 영역에서도 전류제어가 원활하게 수행되기 위해서는 직류전압이 충분히 높아야 하는데 이 경우 직결된 배터리의 수가 증가하게 된다. 그렇지 않다면 인버터와 배터리 사이에 강압용 dc-dc 컨버터를 사용해야 한다.

3. 풍력 터빈 시뮬레이터

실제의 풍력터빈 블레이드를 사용하여 실험을 수행하기에는 현실적인 제약이 따르므로 본 연구에서는 풍력터빈의 역할을 하는 터빈 시뮬레이터를 직류전동기의 토크제어를 이용하여 구현한다. 그림 3은 발전기 구동을 위한 터빈 시뮬레이터의 구성을 보인다. 타여자 직류전동기를 사용하며 계자를 정격으로 일정하게 유지하고 전기자전류를 제어하여 풍속에 대응되는 토크를 발생한다. 직류전동기를 제어하기 위한 컨버터는 단

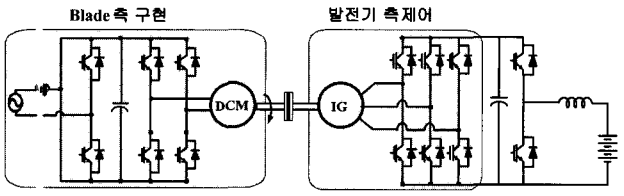


그림 3 터빈시뮬레이터 구성도
Fig. 3 Turbine simulator

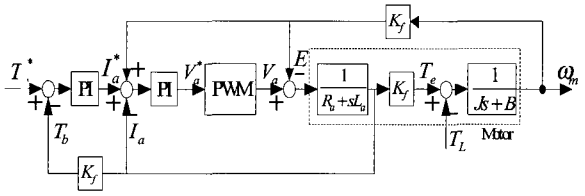


그림 4 직류전동기 제어 블럭도
Fig. 4 Block diagram of dc motor control

상한과 PWM 컨버터와 4상한 초퍼로 동작하는 단상 인터터를 사용한다. 블레이드의 가속과 감속 특성을 잘 모의하기 위해서는 전동기의 가감속 특성이 좋아야 하는데 그림 3에 보인 회로를 사용하면 기존의 3상 인

표 1 풍력터빈 블레이드 파라미터
Table 1 Parameters of wind turbine blade

파라미터	값
블레이드 반지름 R	0.95 [m]
$C_{p\ \max}$	0.45
λ_{opt}	5
정격풍속	10[m/s]
Cut-in 풍속	4 [m/s]
기어비	1 : 2

버터 회로를 그대로 이용할 수 있는 이점이 있다. 직류전동기의 감속시 발생되는 회생전력에 의해 직류링크 전압이 상승하여 과전압이 발생될 수도 있는데 입력단의 ac/dc PWM 컨버터를 통하여 직류전압을 일정하게 유지시킬 수 있다[8].

그림 4는 직류전동기의 토크제어를 위한 블럭도를 나타낸다. 토크지령치의 발생은 아래에 설명된다.

먼저 주속비(tip-speed ratio) λ는 풍속에 대한 블레이드 끝점 속도의 비로 정의된다[9].

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

여기서 ω_m은 블레이드의 회전속도, v는 풍속을 나타낸다.

C_p는 블레이드의 전력변환계수로서 풍력에너지로부터 블레이드에 흡수되는 에너지의 비를 나타는데 이 계수의 값은 블레이드의 형상과 풍속에 따라 달라진다. 그림 5(a)는 풍속을 매개변수로 하고 블레이드의 회전속도에 대하여 전기적으로 변환된 전력을 나타내는 특성곡선이다. (b)는 주속비에 대한 전력변환계수를 나타낸다. 식 (1)에 의해 주어진 풍속에 대해 블레이드의 주속비는 회전속도의 함수이고 그림 5(b)에서 최대의 C_p를 주는 최적 주속비 λ_{opt}가 유일하게 존재함을 알 수 있다. 즉 풍속이 알려지면 주어진 블레이드의 최대전력은 식(1)에 의해 정해진다.

식 (1)로부터 최대 출력을 발생하는 속도 지령치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega^*_m = \frac{\lambda_{opt} \times v}{R} \tag{2}$$

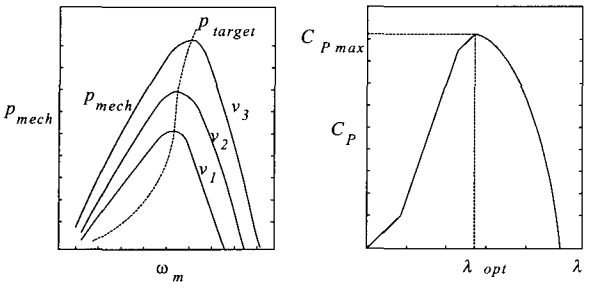


그림 5 풍력터빈의 출력 특성
(a) 회전속도에 대한 출력전력
(b) 주속비에 대한 전력변환계수

Fig. 5 Output characteristics of wind blade
(a) output power versus rotational speed
(b) power conversion coefficient versus blade tip-speed ratio

$$\omega^*_m = \frac{\lambda_{opt} \times v}{R} \tag{2}$$

바람으로부터 블레이드에 전달되는 전력과 블레이드가 발생하는 기계적 토크는 각각 식(3)과 식(4)로 표현된다[9].

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

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

여기서 T_{blade} 는 블레이드가 발생하는 토크이다. 이 값은 블레이드를 모의한 직류전동기에서 발생해야 하는 토크 지령치가 되며 식(5)와 같다.

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

이러한 직류전동기의 출력은 기계방정식 (5)를 통해 농형 유도발전기로 전달된다.

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

T_{load}는 발전기에 의해서 발생하는 역토크이다. T_{blade}와 T_{load}가 같게 되는 속도에서 평형을 이루고 동작하게 된다.

4. 유도발전기의 제어

유도발전기는 유도전동기 제어에 흔히 사용되는 벡터제어방식을 사용하며 여기서는 간접 벡터제어방식을 선택한다.

4.1 간접벡터 제어

먼저 간접벡터제어 방식을 간략히 기술한다. 농형 유도발전기의 d-q축 전압방정식은 다음과 같다[10].

$$v^e_{ds} = R_s\, i^e_{ds} + \frac{d\lambda^e_{ds}}{dt} - \omega_e\, \lambda^e_{qs} \tag{7}$$

$$v^e_{qs} = R_s i^e_{qs} + \frac{d\,\lambda^e_{qs}}{dt} + \omega_e\, \lambda^e_{ds} \tag{8}$$

$$0 = R_r\, i^e_{dr} + \frac{d\,\lambda^e_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r)\, \lambda^e_{qr} \tag{9}$$

$$0 = R_r\, i^e_{qr} + \frac{d\,\lambda^e_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r)\, \lambda^e_{dr} \tag{10}$$

여기서, v^e_{ds}, v^e_{qs} 는 dq-동기좌표계에서 표시한 고정자 전압, i^e_{ds}, i^e_{qs} 는 고정자 전류, i^e_{dr}, i^e_{qr} 는 회전자 전류, λ^e_{ds}, λ^e_{qs}는 고정자 쇄교자속, λ^e_{dr}, λ^e_{qr}는 회전자 쇄교자속, R_s는 고정자 저항, R_r은 회전자 저항, ω_e는 고정자 자속의 각주파수, ω_r은 회전자의 각주파수이다.

또한, 고정자와 회전자의 자속은 다음과 같이 표시된다.

$$\lambda^e_{ds} = L_s i^e_{ds} + L_m i^e_{dr} \tag{11}$$

$$\lambda^e_{qs} = L_s i^e_{qs} + L_m i^e_{qr} \tag{12}$$

$$\lambda^e_{dr} = L_m i^e_{ds} + L_r i^e_{dr} \tag{13}$$

$$\lambda^e_{qr} = L_m i^e_{qs} + L_r i^e_{qr} \tag{14}$$

여기서 L_s, L_R, L_m 각각 고정자, 회전자, 상호인덕턴스이다.

회전자자속과 고정자전류로 나타낸 출력토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\frac{L_m}{L_r}(\lambda^e_{dr}\, i^e_{qs} - \lambda^e_{qr}\, i^e_{ds}) \tag{15}$$

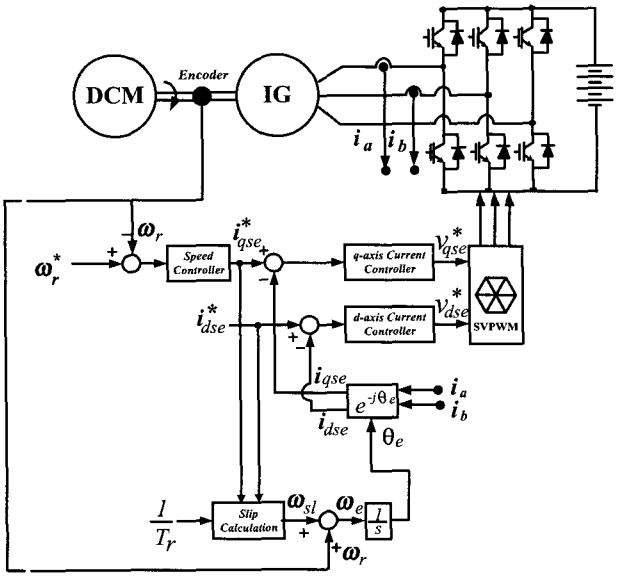


그림 6 유도발전기 제어블럭도
Fig. 6 Block diagram of induction generator control

회전자 자속이 d축에만 존재하도록 제어를 하면 $\lambda^e_{qr}=0$가 된다. 따라서 식(15)를 다시 정리하면,

$$T_e=\frac{3}{2}\frac{P}{2}\frac{L_m}{L_r}\lambda^e_{dr}\,i^e_{qs} \tag{16}$$

이 된다. 여기서 회전자자속을 일정하게 제어하면 토크는 i^e_{qs} 의 제어에 의해 독립적으로 제어 가능하다.

그리고 농형 유도기의 슬립주파수와 동기각속도는 식(17)과 식(18)로 표현된다.

$$\upsilon_{sl}=\frac{R_r}{L_r}\frac{i^e_{qs}}{i^e_{ds}} \tag{17}$$

$$\upsilon_e=\omega_{sl}+\omega_r \tag{18}$$

그림 6은 속도제어를 수행하는 발전기측 PWM 컨버터의 제어 블럭도이다. 컨버터 입력의 d-축 전류를 통해 발전기의 여자를 제어하며 q-축 전류를 통해 발전기의 토크를 제어하여 속도를 제어한다. 이 컨버터의 입력전압은 발전기의 출력전압이며 풍속이 변하면 주파수와 전압의 크기가 변하게 된다. PWM 컨버터를 통해 ac/dc 변환을 하며 컨버터 출력전압은 배터리의 전압으로 클램핑 된다.

4.2 풍력터빈의 최대전력제어

풍력발전 시스템에서 발전기의 최대출력제어를 위해 기본적으로 C_p와 λ_{opt}를 이용한 방법[11]과 Hill-Climbing 법[12], 퍼지 제어를 이용하는 방법[13] 등이 있다. Hill-Climbing 법과 퍼지제어 법은 풍속의 정보를 필요로 하지 않는다는 장점이 있으나 추종속도가 느린 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 풍속의 정보가 필요하지만 추종특성이 빠른 C_p 와 λ_{opt} 를 이용한 방법을 이용한다. 실제 시스템에서는 풍속계가 부착되어 있으므로 이 방법을 사용해도 부가적인 비용은 들지 않는다.

가변속 발전시스템에서는 풍속의 변화에 무관하게 $C_{p\max}$인 점에서 λ_{opt} 를 유지하며 운전할 때 최대 전력을 발전할 수 있다. 이는 유도발전기의 속도제어를 통해서 얻을 수 있으며 최대 전력발생을 위한 유도발전기의 속도 지령치는 식(2)에 의해서 결정된다.

5. 실험 결과 및 검토

터빈 시뮬레이터를 이용하여 농형 유도발전기의 최대출력제어를 구현하기 위한 실험을 수행하였다.

표 2와 표 3은 각각 시뮬레이터에 사용된 직류전동기와 유도발전기의 정격과 파라미터이다. 실험에 사용된 배터리는 12[V], 65[AH]의 유닛으로 12개의 직렬뱅크로 구성하였다. 컨버터 스위칭소자는 IGBT이며 스위칭 주파수는 3.5 [KHz]이다.

풍속의 변화는 함수발생기를 이용하여 모의하였는데 직류 옵셋을 갖는 1[Hz]의 삼각파를 사용하였다. 제어보드는 직류전동기의 토크 제어와 유도발전기의 속도제어를 위해 두 대를 사용하였으며 두 DSP 보드에서 함수발생기의 출력을 A/D 컨버터를 통해 동시에 읽어들여 풍속으로 인식하게 하였다.

그림 7은 풍속이 8[m/s] → 9[m/s] → 8[m/s]로 변화할 때의 여러 가지 응답의 파형을 보인다. (a)는 풍속의 변화, (b)는 풍속에 상응하여 발생되는 직류전동기의 출력전력 즉 블레이드가 발생하는 출력이다. 직류기의 출력전력은 직류기 입력전압과 입력전류의 곱으로 계산되었다. (c)는 유도발전기의 발전전력이다. 이는 상전압과 상전류의 순시치를 이용하여 계산하였다. 풍속이 8[m/s]일때 530[W], 9[m/s]에서는 800[W]의 발전전력을 보이는데 직류기의 입력전력에 비해 출력전력이 작게 나온 이유는 직류전동기와 유도발전기의 철손, 동손의 전기적 손실과 마찰등 기계적 손실이

표 2 직류전동기 정격과 파라미터
Table 2 Ratings and parameters of dc motor

정격/파라미터	값
정격 출력	3 [kW]
정격 토크	22 [Nm]
전기자 저항 (R_a)	2.85[Ω]
전기자 누설인덕턴스 (L_a)	0.0986[H]
극 수 (P)	4
토크 상수 (K_f)	1.4[Nm]

표 3 유도발전기 정격과 파라미터
Table 3 Ratings and parameters of induction generator

정격/파라미터	값
정격 출력	3 [kW]
정격 전압	230 [V]
고정자 저항	0.93 [Ω]
회전자 저항	0.533 [Ω]
고정자 누설 인덕턴스	0.003 [H]
회전자 누설 인덕턴스	0.003 [H]
상호 인덕턴스	0.076 [H]
극 수	4
정격 속도	1435 [rpm]
정격 토크	19.5 [N.m]
관성 능률	0.0071[kgm²]

존재하기 때문이다. (d)는 유도발전기로부터 발전되어 배터리에 충전되는 충전전력으로 배터리 전압과 직류 전류의 순시값으로 계산하였다. (e)는 풍속의 변화에 대한 직류전동기와 유도발전기의 발생 토크를 보인다. 직류전동기의 토크 방향에 대해 유도발전기의 토크는 반대 방향으로 나타난다. (f)는 풍속의 변화에 따라 최적의 주속비를 유지하는 발전기의 속도 지령치와 실제 속도의 파형이다. 풍속의 변화에 따라 최대 전력점에서의 발전을 위해 지령된 속도를 잘 추종하고 있음을 보인다. 여기서 속도지령치는 식(2)에 의해 결정되었다. (g)는 유도발전기의 d,q-축 전류제어 특성을 보인다. 발전기 여자를 일정하게 유지하기 위해 d-축 전류를 일정하게 유지해야 하는데 파형으로부터 일정하게 잘 제어됨을 알 수 있다. 풍속의 변화에 무관하게 최대 전력점으로 동작하기 위하여 발전기는 가변속 제어가 가

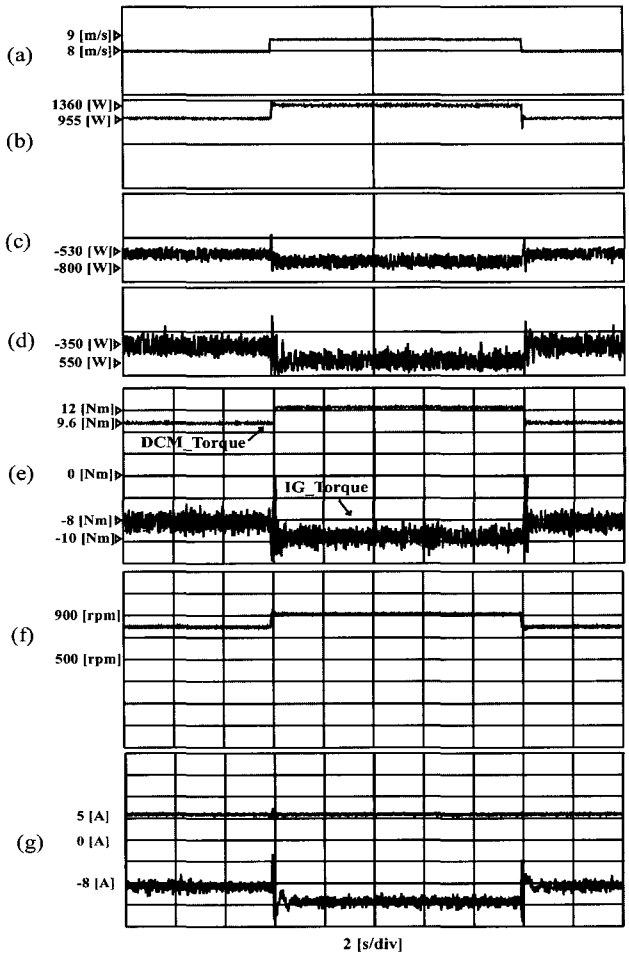


그림 7 유도발전기의 제어특성(풍속이 8[m/s] → 9[m/s] → 8[m/s]로 변하는 경우)
Fig. 7 Transient responses of induction generator (for wind speed variation of 8[m/s] → 9[m/s] → 8[m/s])

능해야 한다. 이는 q-축의 토크성분 전류의 제어에 의해 이루어지는데 파형으로부터 q-축 전류가 잘 제어되고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 그림 7과는 달리 풍속이 1[Hz]의 주파수로 7 [m/s]~9 [m/s] 사이에서 계속적으로 변화할 경우의 그림 7에 대응되는 파형을 보인다. 풍속이 연속적으로 변하는 경우에도 각 물리량이 잘 제어되고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 회전속도에 대한 유도발전기의 출력전력 곡선이다. 주어진 풍속에 대해서 회전속도를 바꿔가며 출력전력을 측정하였는데 식(2)에 주어진 속도로 동작시킬 경우 최대 전력을 발생한다는 것을 알 수 있다. 즉 설계된 터빈 블레이드 ($C_{p\,\max} = 0.43$)에서 풍속이 9[m/s], 7[m/s], 4[m/s]일 때 최대전력을 발생하

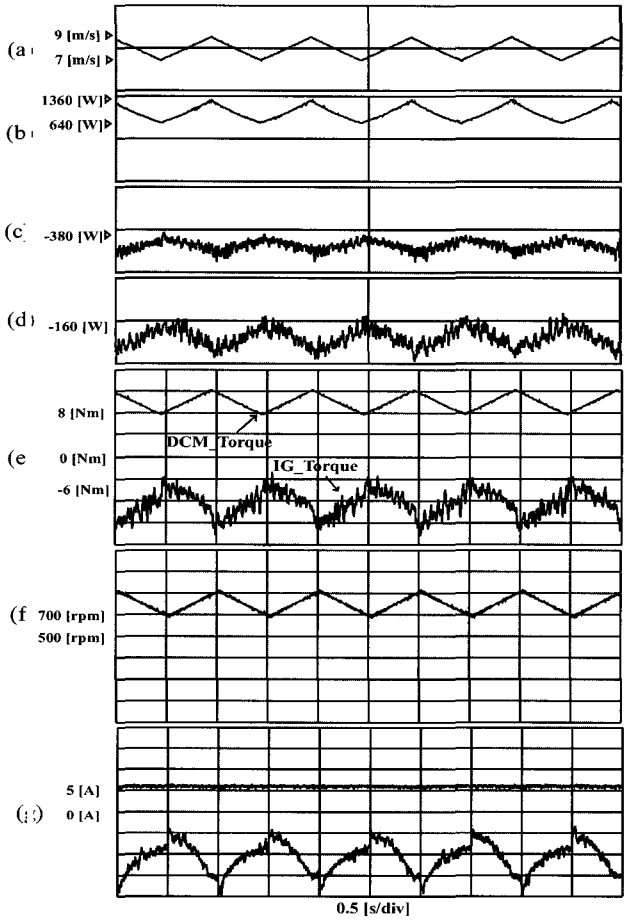


그림 8 유도발전기의 제어특성(풍속이 7[m/s]와 9[m/s] 사이에서 1[Hz]의 주파수로 계속적으로 변화할 경우)

Fig. 8 Transient responses of induction generator(in case of wind speed variation between 7[m/s] and 9[m/s] at 1[Hz])

는 회전속도는 각각 900[rpm], 700[rpm], 400[rpm]인데 실측한 결과 이에 일치하는 것을 확인하였다. 발전전력은 (3)식에 주어진 것처럼 회전속도의 세제곱에 비례한다 실제 측정된 데이터는 이에 근사하며 약간의 오차는 기기의 손실에 기인한 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 유도발전기의 주류를 이루고 있는 권선형에 비해 저가이며 견고하고 유지보수가 필요 없는 농형유도발전기를 풍력발전에 사용하여 풍속의 변화에 관계없이 항상 최대출력으로 운전되는 가변속 발전시스템을 제안하고 터빈 시뮬레이터를 구성하여 실험을 실시하였다. 본 시스템에서는 발전기의 발생전력이 중간에

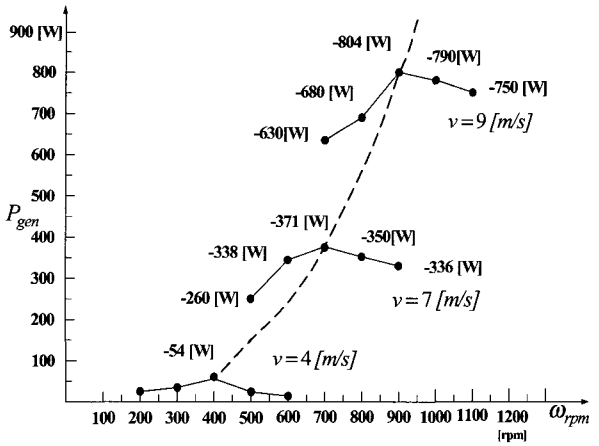


그림 9 회전속도에 대한 유도 발전기 출력전력

Fig. 9 Output power of induction generator versus rotating speed

별도의 충전장치 없이 발전기측 컨버터가 직접 배터리를 충전할 수 있으며 이 배터리는 독립전원용으로 사용될 수 있다. 발전기는 벡터제어에 의해 운전되며 d-축 전류로 여자를 하고 q-축 전류로 주어진 풍속에서 최대 전력을 발생하는 점으로 발전기의 속도를 제어하도록 하였다. 직류전동기의 토크제어로 농형 유도발전기를 구동하는 터빈시뮬레이터를 구성하였으며 두 대의 DSP보드를 사용하여 제어하였다. 향후 발전기의 손실을 고려한 최대전력제어, 그리고 계통연계형 풍력발전 시스템 등을 계속 연구할 예정이다.

이 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-00936-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] "Global Wind Energy Market Report", AWEA Report, 1999.

[2] L. H. Hansen, et al., "Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines", Technical Report, Riso Nat. Lab., Denmark, 2001.

[3] D. Seyoum, C. Grantham, and F. Rahman "The Dynamic Characteristics of an Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by A Wind Turbine", *IEEE* Trans. Vol. 39, No. 4, pp. 936~944. 2003.

[4] R. Leidhold and G. Garcia, "Variable Speed Fiel d-Oriented Controlled Induction Generator" *IEEE* IAS Annual Meeting Conference, Vol. 1, pp. 540~546, 1998.

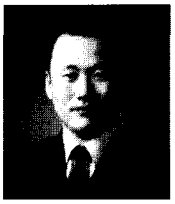
[5] T. F. Chan, "Capacitance Requirements of Self-Ex

cited Induction Generators", *IEEE* Trans. on Energy Conv ert sion, Vol. 8, No. 2, June. 1993.
[6] G. Raina and O. P. Malik, "Wind Energy Conversion Using a Self-Excited Induction Generator", *IEEE* Trans. on Power Appl. & Sys., Vol. 102, No. 2, pp. 3922~3936, 1983.
[7] 기태훈, "벡터제어 방식에 의한 자립형 유도발전기의 제어", *서울대학교 석사학위논문*, 1991.
[8] 김태윤, 이지명, 석줄기, 이동춘 "유도전동기 구동을 위한 저가형 단상-3상 AC/DC/AC PWM 컨버터", *전력전자학회 논문지*, pp. 244~252, 제7권, 제4호, 2002, 8.
[9] Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press, 1999.
[10] D. W. Novotny and T. A. Lipo, *Vector Control and Dynamics of AC Drives*, Clarendon Press, 1996.
[11] E. Muljadi, C. P. Butterfield, and P. Migliore, "Var iable Speed Operation of Generators with Rotor -Speed Feedback in Wind Power Applications" Trans. of the ASME, Vol. 118, pp. 361~368, 1996.
[12] Q. Wang, L. Chang "An Independent Maximum Power Ex traction Strategy for Wind Energy Conversion Sys tems" *IEEE* Canadian Conference Vol. 2, pp. 1142~1147, 1999.
[13] M.G Simoes, B. K. Bose, and R. J. Spiegel "Design and Performance Evaluation of a Fuzzy-Logic-Based Variable-Speed Wind Generation System" *IEEE* Tr ans. on Ind. Appl., Vol. 34. No. 4, pp. 956~965, 1997.

저 자 소 개

김형균(金炯均)
2001년 영남대 전기공학과 졸업(학사). 2003년 현재 영남대 전기공학과 대학원 석사과정.

이동춘(李東椿)
1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1989년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1998년 미국 Texas A&M Univ. 방문연구 교수. 현재 영남대 전자정보공학부 부교수, 당 학회 편집위원.



석줄기(石줄기)
1992년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(공박). 1998년~2001년 삼성전자 생산기술센터 자동화연구소 책임연구원. 현재 영남대 전자정보공학부 조교수.