

농형 유도발전기를 이용한 계통 연계형 풍력발전 시스템

김형균, A. Abo-Khalil, 이동춘, 석줄기
 영남대학교 전자정보공학부

Grid-Connected Wind Power Generation System Using Cage-Type Induction Generators

Hyeung-Gyun Kim, A. Abo-Khalil, Dong-Choon Lee, and Jul-Ki Seok
 Yeungnam Univ.

ABSTRACT

This paper proposes a maximum output power control of grid-connected wind power generation system using cage-type induction generators. For generator control, indirect vector control is used, where d-axis current controls the excitation level and q-axis current controls the generator speed. The generated power flows into the utility through the grid-side converter, by which the dc link voltage is controlled to be constant and the ac current is controlled in sinusoid and. The generator speed is adjusted according to wind speed for extracting maximum power generation. Experimental results are shown to verify the validity of the proposed scheme.

본 논문에서는 계통 연계형 농형 유도발전기 시스템에서 블레이드의 전력변환계수 C_p 와 주속비 λ 의 관계로부터 풍속의 변화에 대해 최대 전력을 발생하는 발전기 속도 지령치를 계산하고 유도발전기를 가변속 제어하여 최대전력을 발생하는 추종 제어기법을 제안한다. 발전기측 컨버터는 벡터제어 방식으로 제어되며, q-축 전류에 의해 발전기의 토크를 제어하고 d-축 전류에 의해 자속을 제어한다. 농형 유도발전기는 발전기로 동작하기 위해 초기 여자 전류를 공급받아야 하는데 이는 계통측 컨버터의 동작에 의해 확립된 직류링크 전압으로부터 얻어진다. 계통측 컨버터는 q-축 전류에 의해 직류링크 전압을 제어하고 d-축 전류에 의해 전원측의 역률을 제어한다. 실험실의 M-G세트에 대해 수행한 실험을 통해 제안된 시스템의 타당성을 증명한다.

1. 서 론

최근 국제적인 환경규제에 능동적으로 대처하기 위해 에너지 다변화에 많은 국가들이 투자를 증가하고 있다. 특히 대체에너지 중에서 풍력발전이 매년 급속한 성장을 보인다. 현재 가동 중인 풍력발전 시스템은 대부분이 일정속 운전이며 최근 가변속 시스템을 채택하고 있는 추세이다.

풍력발전 시스템을 용량 별로 구분하면 대용량 발전기의 경우 대부분 권선형 유도발전기를 사용하며 소용량인 경우, 영구자석형 동기 발전기를 주로 사용한다. 대용량인 경우 풍속의 변화에 대해 발전량 증가를 위해 블레이드 피치 제어와 요(yaw) 제어를 수행한다. 하지만 소용량 발전기의 경우 블레이드의 피치각이 고정되어 있기 때문에 발전효율 증가를 위해 풍속의 변화에 대해 가변속 제어를 수행해야 한다^{[1][2][3]}.

2. 풍력터빈의 특성과 최대전력제어

바람으로부터 터빈의 의해 발생하는 전력은

$$P = 0.5\rho AC_p v^3 \quad (1)$$

과 같고 발생전력은 풍속의 3제곱에 비례한다. 여기서 ρ 는 공기밀도[kg/m³], A는 풍력터빈의 회전 단면적[m²], C_p 는 터빈의 전력변환계수로서 풍력 에너지로부터 터빈블레이드에 흡수되는 에너지의 비, v 는 풍속[m/s]이다. 풍력터빈의 특성은 터빈의 C_p 와 λ 의 관계로 주어진다. 주속비는 식(2)와 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{w_m R}{v} \quad (2)$$

주속비 λ 는 풍속에 대한 블레이드 끝점 속도의 비로 정의되고, R은 블레이드 반경[m], w_m 은 터빈 회전속도[rad/s]이다.

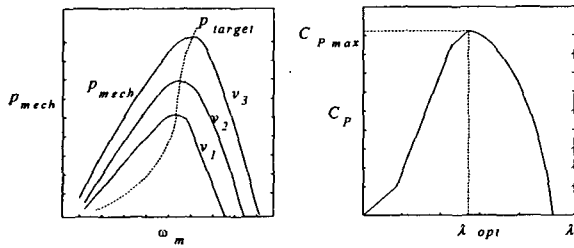


그림 1 풍력터빈의 출력전력 곡선
Fig. 1 Turbine output power characteristic curve

그림 1의 좌측은 터빈의 회전속도에 대한 출력전력의 변화를 나타내고, 우측은 C_p 와 λ 의 관계를 나타낸다. 그림 1의 우측과 같이 풍속의 변화에 관계없이 터빈이 항상 λ_{opt} 점에서 동작한다면 전력계수는 항상 C_{pmax} 점이 되어 최대전력을 발생하게 된다. 식(2)로부터 최대 출력을 발생하는 속도 지령치를 다음과 같이 구할 수 있다^[4].

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} \times V}{R} \quad (3)$$

3. 계통연계형 풍력발전 시스템

그림 2는 back-to-back ac/dc/ac PWM 컨버터를 이용한 계통 연계형 농형 유도발전기 시스템을 나타낸다. 풍력터빈에서 발생된 기계적 에너지는 발전기에 의해 전기적 에너지로 변환되고 발전기측 컨버터를 통하여 직류링크단으로 전력이 넘어온다. 이 전력은 다시 계통측 컨버터를 통하여 계통으로 전달된다.

발전기측 PWM 컨버터는 최대전력점에서 동작하기 위해 발전기 속도제어와 여자를 위한 자속제어를 수행한다. 계통측 PWM 컨버터는 직류링크 전압제어와 계통측 전압, 전류의 역률제어를 수행하고 발전 전력을 계통으로 공급한다^[5].

3.1 발전기측 컨버터 제어

풍속에 관계없이 최대 전력발생을 위해 식(3)로부터 구한 속도 지령치로 속도제어를 수행하며, 토크 제어를 위한 q-축 전류와 발전기 자속제어를 위한 d-축 전류는 간접벡터제어에 의해 독립적으로 제어된다. 발전기 여자를 위한 초기 여자전력은 계통으로부터 공급받는다. 그림 3은 발전기측 PWM 컨버터의 제어 블록도이다.

3.2 계통측 컨버터 제어

계통측 PWM 컨버터는 직류링크 전압을 일정하게 제어함으로써 발전된 전력을 계통으로 넘어가게

하고 또한 출력전류의 역률제어를 수행한다. 계통측 컨버터의 q-축 전류의 제어를 통해 계통으로 공급되는 유효전력을 제어하고, d-축 전류를 제어하여 출력전력의 역률을 제어한다. 그림 4는 계통측 PWM 컨버터의 제어 블록도이다.

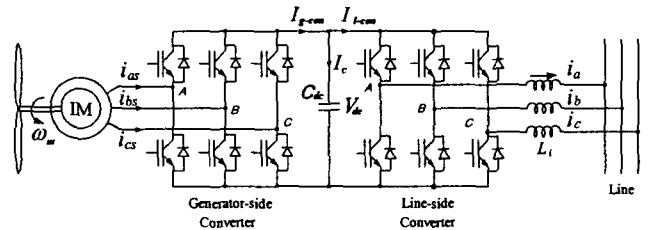


그림 2 Ac/dc/ac 컨버터를 이용한 계통연계형 풍력발전 시스템
Fig. 2 Grid-connected wind power generation system using ac/dc/ac converter

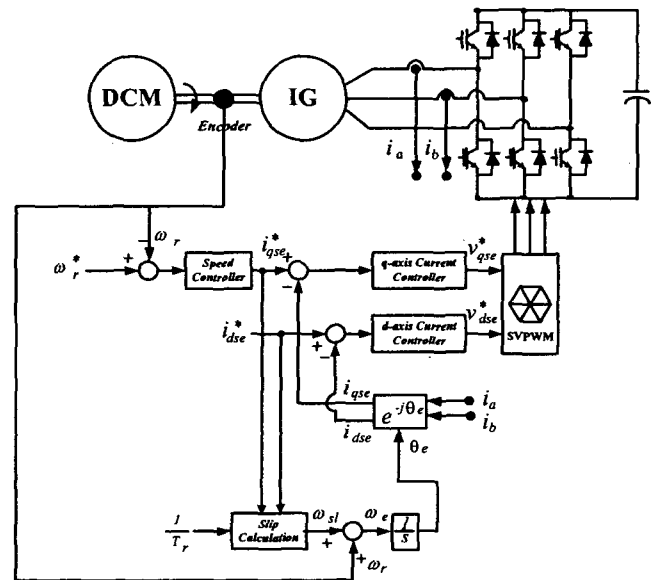


그림 3 발전기측 컨버터의 제어 블록도
Fig. 3 Control block diagram of generator side converter

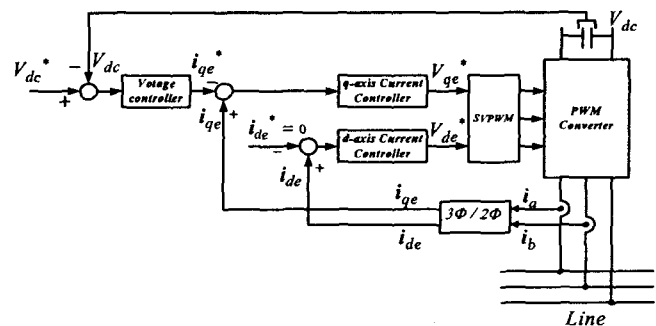


그림 4 계통측 컨버터의 제어 블록도
Fig. 4 Control block diagram of grid-side converter

표 1 직류전동기 정격과 파라미터

Table 1 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_T)	1.4[Nm]

표 2 유도발전기 정격과 파라미터

Table 2 Ratings and parameters of induction generator

정격/파라미터	값
정격 출력	3 [kW]
정격 전압	400 [V]
고정자 저항	2.79 [Ω]
회전자 저항	1.6 [Ω]
고정자 누설 인덕턴스	0.01 [H]
회전자 누설 인덕턴스	0.01 [H]
상호 인덕턴스	0.229 [H]
극 수	4
정격 속도	1435 [rpm]
정격 토크	19.5 [N.m]
관성 능력	0.0071[kgm ²]

4. 실험 결과

터빈 시뮬레이터를 이용하여 농형 유도발전기의 최대 출력제어를 구현하기 위한 실험을 수행하였다.

표 1과 표 2는 각각 시뮬레이터에 사용된 직류전동기와 유도발전기의 정격과 파라미터이다.

그림 5는 풍속이 8[m/s] → 9[m/s] → 8[m/s]로 변화할 때의 여러 가지 응답의 파형을 보인다. (a)는 함수발생기로 모의한 풍속이고 (b)는 풍속에 상응하여 발생하는 직류전동기의 출력전력 즉 블레이드가 발생하는 출력이다. 직류기의 출력전력은 직류기 입력전압과 입력전류의 곱으로 계산되었다. (c)는 계통측으로 넘어가는 출력전력으로 전원측 상전압과 상전류의 순시치를 이용하여 계산하였다. (d)는 풍속에 대응되는 최대출력을 위한 발전기의 지령 회전속도와 실제 속도를 나타낸다. 속도가 잘 제어되고 있음을 알 수 있다. (e)는 발전기의 q-축 전류, (f)는 발전기의 d-축 전류로 그 지령치를 잘 추종하고 있다. (g)는 직류링크 전압으로 과도상태에서도 만

족스럽게 제어되고 있다. (h)는 계통측 컨버터의 q-축 전류, (i)는 d-축 전류인데 역시 그 지령치를 잘 따르고 있다.

그림 6은 풍속이 1[Hz]의 주파수로 8[m/s]~10[m/s] 사이에서 계속적으로 변화할 경우의 파형으로 그림 5와 같은 순서로 배치되었다. 풍속이 연속적으로 변하는 경우에도 각 물리량이 잘 제어되고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 계통측 컨버터의 3상 출력전류와 단위역률제어가 이루어지고 있음을 보인다. 전류를 계통측에서 발전기 측으로 들어가는 방향을 양으로 정했기 때문에 전원측 전압과 전류의 위상이 180도 차이가 난다.

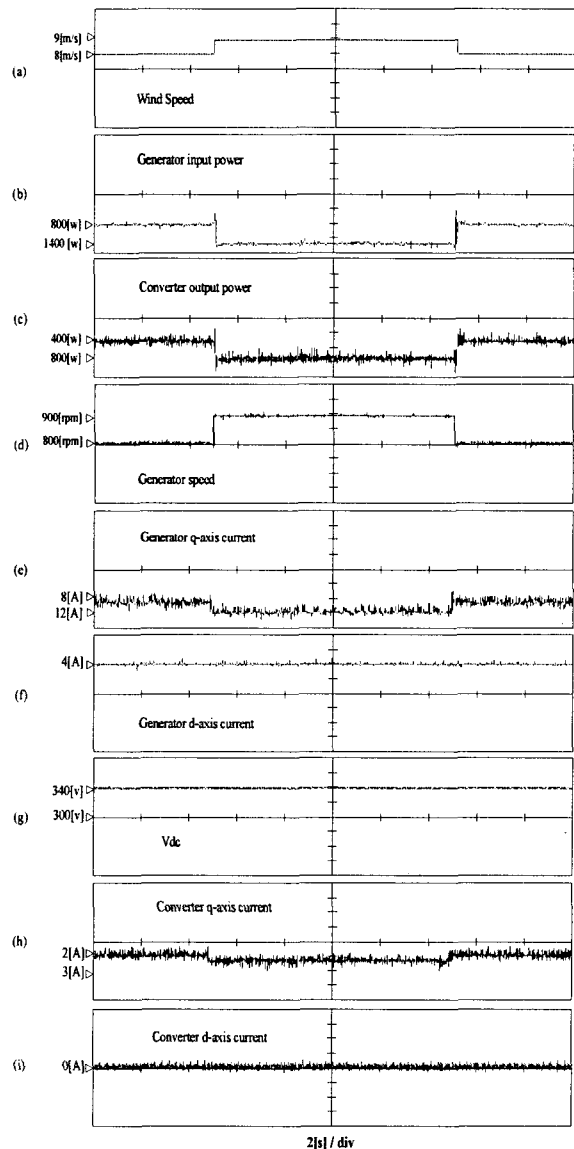


그림 5 유도발전기의 제어특성 (풍속이 8[m/s] → 9[m/s] → 8[m/s]로 변하는 경우)

Fig. 5 Transient responses of induction generator (for wind speed variation of 8[m/s] → 9[m/s] → 8[m/s])

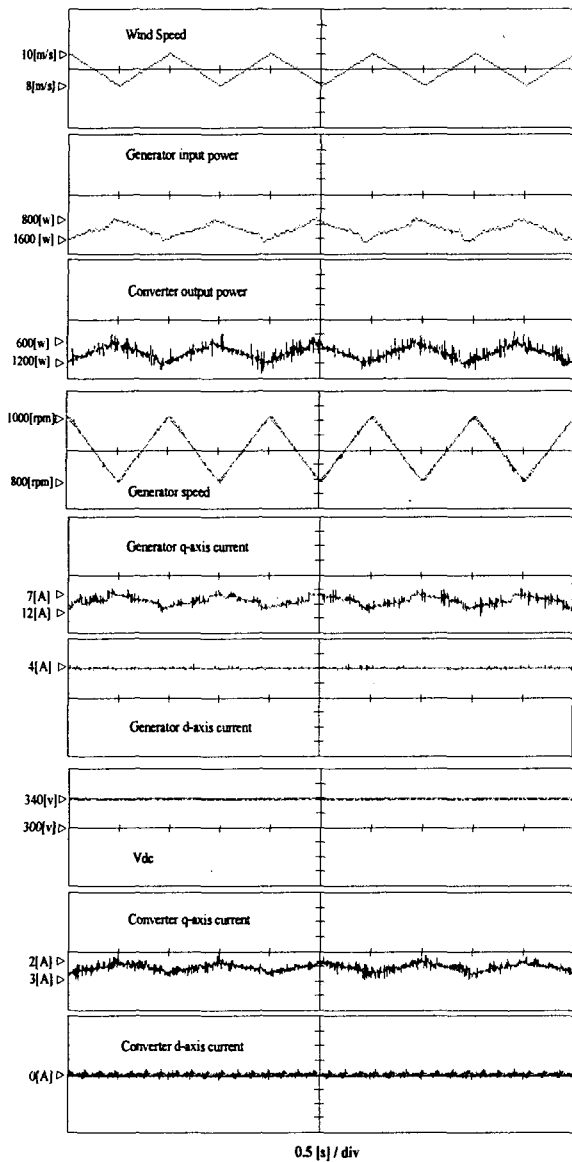


그림 9 유도발전기의 제어특성(풍속이 8[m/s]와 10[m/s] 사이에서 1[Hz]의 주파수로 계속적으로 변화할 경우)
 Fig. 6 Transient responses of induction generator (in case of wind speed variation between 8[m/s] and 10[m/s] at 1[Hz])

5. 결론

본 논문에서는 농형 유도발전기를 이용한 계통 연계형 풍력발전시스템을 연구 대상으로 하고 풍속의 변화에도 불구하고 항상 최대의 전력점으로 동작할 수 있는 가변속 제어 시스템을 제안하고 실험으로 그 타당성을 입증하였다.

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 제어하였다. 계통과의 인터페이스를 위

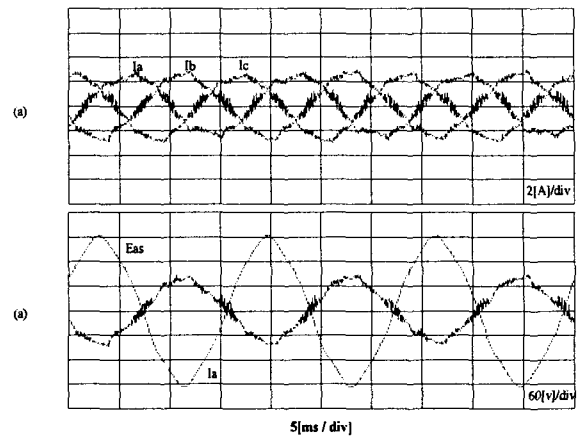


그림 11 계통측 컨버터의 출력전류(a)와 단위 역률제어(b)
 Fig. 7 Ac output current of grid-side converter(a) and unity power factor control(b)

해 PWM 컨버터를 사용하였으며 q-축 전류로 직류링크 전압을 일정하게 제어하고 d-축 전류로 계통측 역률을 1로 제어하였다.

향후 기기 자체의 손실을 최소화하여 출력을 증가시키는 제어기법에 대해 연구를 수행할 예정이다.

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

참고 문헌

- [1] M. Rodrigo, F. R. Gonzalez, J. M. D. Vazquez, and J. A. Herrero de Lucas, L.C. "Sensorless control of a squirrel cage induction generator to track the peak power in a wind turbine," IECON 02 vol. 1, pp. 169-174, 2002, Nov.
- [2] A. Miller, E. Muljadi, D.S. Zinger. "A variable speed wind turbine power control." IEEE Trans. Energy Conv., vol. 12, no. 2, pp.181-186, 1997, June
- [3] T. Thiringer and J. Lindres, "Control by variable rotor speed of a fixed-pitch wind turbine operating in a wide speed range." IEEE Trans. Energy Conv., vol. 8 no. 3, pp. 520-526, 1993, September
- [4] Mukund R. Patel *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press, 1999
- [5] 구성영, 이동춘, "풍력발전용 농형유도발전기의 최대 출력제어", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 288-292, 2001
- [6] 김형균, A. Abo-Khalil, 이동춘, 석줄기, "독립형 풍력발전 시스템의 최대전력제어", 춘계전기학회 학술대회 논문집, pp. 100-200, 2003, 3.