

풍력발전을 위한 회전변환기가 없는 이중 여자 유도기의 전력제어

김 용 현* · 김 일 환**

Power Control of a Doubly Fed Induction Machine for Wind Energy Generation without Rotational Transducers

Yong-Hyun Kim* and Eel-Hwan Kim**

ABSTRACT

This paper describes power control of a doubly fed induction machine(DFIM) for wind energy generation without rotational transducers. A stator flux orientation scheme and rotor speed estimator are employed to achieve control of generating power in stator side. To verify the theoretical analysis, a 5-hp DFIM prototype system and PWM power converter are built. Results of computer simulation and experiment are presented to support the discussion.

Key words : Power control, DFIM, wind energy, PWM power converter

1. 서 론

풍력발전에 있어서 가장 중요한 문제는 풍속 에너지를 최대도로 전기에너지로 변환하는 것이다. 그래서 최근에는 풍력발전을 위한 발전기의 적용 방법에 대해서 여러 가지의 형태로 연구가 되고 있다^{1),2)}. 그 중에서도 크게 두 가지 발전기를 채용한 시스템에 대해서 연구가 활발하게 되고 있다. 하나는 농형 유도기이고 다른 것은 슬립 링을 갖는 이중여자 유도기이다. 농형유도기는 구조가 간단하고 견고하며 제어

가 쉬어 널리 사용되고 있으나, 풍속 특성이 풍차의 회전속도를 동기 속도이상으로 운전 할 수 있게끔 항상 감해야 우수한 출력특성을 얻을 수 있다는 특징을 가진다^{3),4)}. 그러므로 제주지역과 같이 풍속의 변화가 심한 지역에서는 이 발전기가 풍력 발전용으로는 불리하다. 반면에 을 갖는 이중여자 유도기는 회전자에 인버터를 채용하여 풍속의 변화에 따라 슬립 파워를 조절해 줌으로써 동기 속도이상과 이하에서 발전을 할 수 있어 유리하다^{5),6)}. 뿐만 아니라 회전자에 채용되는 인버터 시스템은 단지 슬립 전력만을 제어하기 때문에 발전기 용량에 비해서 아주 작은 용량만을 필요로 한다. 여기서 고정자는 계통선에 연결되어 있기 때문에 고정자에 인가되는 전압은 항상 일정하다. 이것은 결국 고정자 자속이 거의 일정함을 의미

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 전기공학과, 산업기술연구소

Dept of Electrical Eng., Res. Inst. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

한다. 이러한 특징을 이용하여 고정자에 출력되는 발전 전력을 제어하기 위해서는 벡터제어 이론을 도입하여 회전자에 채용된 인버터를 제어하여야 한다. 이때 꼭 필요한 정보가 회전자 위치 정보이다. 회전자 위치 정보를 얻기 위해서는 회전자측에 위치 정보 센서를 부착하여 제어하는 것이 간단하지만 대용량 풍력발전 시스템에서는 회전자 측에 센서를 부착하는 문제, 기어에 의한 백래쉬 문제, 운전환경이 열악한 조건 때문에 생기는 노이즈에 의한 오정보 등 여러가지 문제점을 야기할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해 고정자 자속이 거의 일정하다는 점을 이용하여 회전자 위치 정보를 얻어내고, 이를 이용하여 가변 풍속하에서 계통선에 출력되는 유효전력을 회전자에 채용된 인버터를 통해서 제어하도록 한다. 제안된 이론의 타당성을 검증하기 위해 컴퓨터 해석과 프로토타입의 실험장치를 이용하여 두 결과를 비교 분석하고자 한다.

II. 전력제어

이중여자 유도기의 고정자는 계통선에 연결되어 있기 때문에 고정자측에서는 항상 일정한 전압과 주파수를 갖는다. 이것은 이중여자 유도기가 거의 일정한 고정자 자속을 갖는다고 볼 수 있다.

고정자측 3상 전압을 정지좌표계로 변환하여 고정자 자속 λ_{ds} , λ_{qs} 를 구하면 식(1)과 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{ds} = \int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt \quad (1)$$

$$\lambda_{qs} = \int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (2)$$

단, R_s : 고정자 저항

v_{ds} , v_{qs} : 정지좌표계의 고정자 전압

i_{ds} , i_{qs} : 정지좌표계의 고정자 전류

고정자 자속과 동기각도는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_{ds}^2 + \lambda_{qs}^2} \quad (3)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \quad (4)$$

동기 좌표계에서는 d축값은 상수이고 q축은 0이기 때문에 $\lambda_{dse} \approx constant$, $\lambda_{qse} \approx 0$ 와 같다. 동기 좌표계에서 식(5)와 같이 이중여자 유도기의 회전자에 대한 상태방정식을 이용하면 식(6)과 같이 회전자 슬립각속도를 추정할 수 있다. 이것은 회전자에 채용된 인버터를 제어할 때 이용된다.

$$v_{qre} = R_r i_{qre} + (w_e - w_r) \lambda_{dre} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \hat{w}_{sl} &= \frac{v_{qre} - R_r i_{qre}}{\lambda_{dre}} \\ &= \frac{v_{qre} - R_r i_{qre}}{\frac{L_r}{L_m} \left[\lambda_{dse} - i_{dse} \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \right]} \end{aligned} \quad (6)$$

고정자측이 계통선에 연결되어 있기 때문에 동기각속도는 항상 일정한 값을 갖는다. 따라서 식(6)을 이용하면 식(7)과 같이 회전자 속도를 추정할 수 있다.

$$\hat{w}_r = w_e - \hat{w}_{sl} \quad (7)$$

고정자측에 출력되는 유효전력과 무효전력은 식(8)과 식(9)으로 나타낼 수 있다.

$$P_s = \frac{3}{2} v_{qse} i_{qse} \quad (8)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} v_{dse} i_{dse} \quad (9)$$

고정자측이 계통선에 연결되어 있기 때문에 동기좌표계상의 q축 자속 λ_{qse} 는 거의 0이다. 따라서

$$\lambda_{qse} = L_s i_{qse} + L_m i_{qre} \quad (10)$$

$$i_{qse} = -\frac{L_m}{L_s} i_{qre} \quad (11)$$

식(11)를 식(8)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_{ose} i_{dre} \quad (12)$$

또한 고정자 축의 동기좌표계 상의 d축 자속은 거의 일정하기 때문에 식(14)에서 i_{dse} 는 i_{dre} 로 제어된다.

$$\lambda_{dse} = L_s i_{dse} + L_m i_{dre} \quad (13)$$

$$i_{dse} = \frac{\lambda_{dse} - L_m i_{dre}}{L_s} \quad (14)$$

식(14)를 식(9)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$Q_s = \frac{3}{2} v_{ose} \left(\frac{\lambda_{dse} - L_m i_{dre}}{L_s} \right) \quad (15)$$

결국 고정자축의 유효전력은 식(12)와 같이 회전자축의 전류 i_{dre} 로 제어가 가능하고, 무효전력은 식(15)와 같이 회전자 축의 i_{dre} 로 제어가 가능함을 알 수 있다. 이를 이용하면 회전자 축의 동기 좌표계상의 d축과 q축 전류제어로 고정자축의 유효전력과 무효전력을 제어할 수가 있다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션

그림 1은 제안된 제어 시스템의 구조도이다. Table 1과 같은 정격을 갖는 모델기를 사용하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행한다. 우선 식(6)과 식(7)로부터 슬립각과 속도를 추정한다.

Table 1 Parameters of model machine

Pw	5 hp	
Pole	4	
Jm[kg·m ²]	0.036	
	Stator	Rotor
V [V]	220	220
A [A]	16	11
R [Ω]	0.3085	0.536
Llsr [mH]	0.0022	0.0022
Lm [mH]	0.0441	

추정이 제대로 되고 있는지 확인하기 위해 속도제어를 행한다. 이때 정지상태에서는 이중역자 유도기는

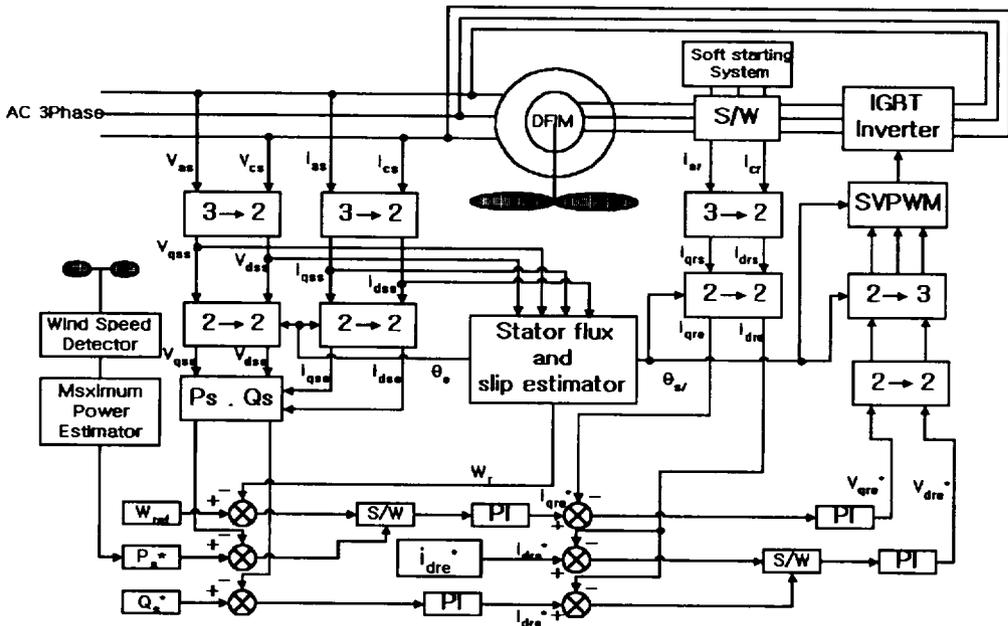


Fig. 1 Schematic diagram of proposed control system

슬립이 1 이기 때문에 변압기와 같다. 따라서 기동시 회전자측에 과전류가 흐를 수 있어 제어하기가 어렵다.

그래서 회전자측에 기동저항을 연결하여 기동시 과전류를 방지하면서 동기속도까지 기동한 후 회전자측을 개방시키면서 인버터로 제어를 시작한다. 이때 회전자의 동기 좌표계축상의 d축과 q축 전류는 고정자측의 d축과 q축 전류의 위상과 180° 차이가 나므로 속도제어시 회전자의 d축 전류는 0 이 되도록 하고, q축 전류는 속도에 따라 제어하면 된다. 그림 2와 그림 3은 속도명령을 1750 rpm에서 1500 rpm으로 변동시켰을때 슬립각과 속도에 대한 추정결과와 실제값을 나타내고 있다. 그림 2에서 결과를 보면 속도변화에 대한 슬립각 추정이 제대로 되고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 3에서 고정자 전류와 회전자 동기 좌표계

축상의 q축 전류의 변화를 나타내고 있다. 그림 4는 가변 풍속하에서 풍속 에너지가 갖는 최대 출력점에 따라 유효전력과 무효전력의 변화를 나타내고 있다. 이 결과는 시동풍속이 4.5 m/sec이고, 최대출력 풍속이 13.5 m/sec을 갖는 시스템으로 가정하여 해석한 결과이다. 그리고 이 시스템은 풍속이 25 m/sec이상이면 시스템 가동시 기계적인 위험이 가중되므로 시스템을 정지하도록 한 것이다. 이파형을 분석해 보면 베츠의 법칙에 따라 풍속이 갖는 에너지는 풍속의 3 제곱에 비례하기 때문에 풍속변화에 따라 발전을 하기 위한 출력 유효전력값이 변하는 것을 나타내고 있다. 무효전력은 여자전류에 의해 발생되기 때문에 본

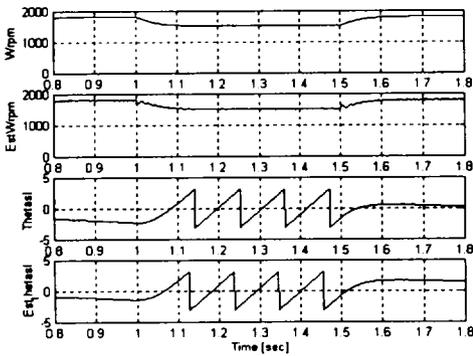


Fig. 2 Estimation of slip angle and speed

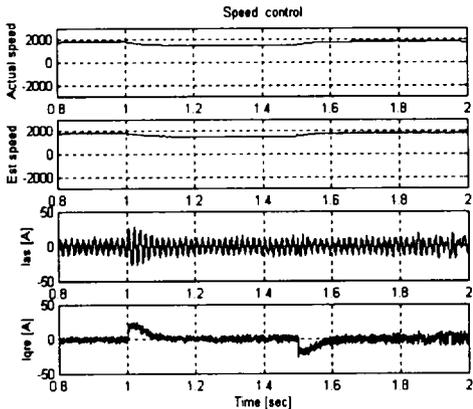


Fig. 3 Speed control

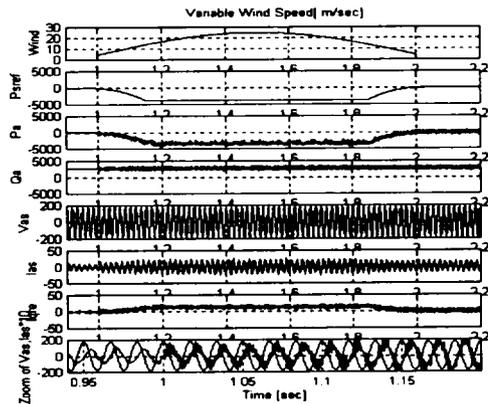


Fig. 4 Generation control of variable wind speed

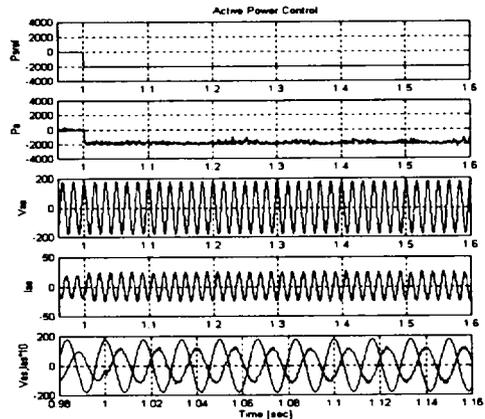


Fig. 5 Active power control

연구에서는 무효전력 변화에 대한 제어를 행하지 않고 무부하운전시 필요한 2700 var로 고정시켰다. 실제 고정자측의 상전압과 출력전류의 위상관계를 보면 1sec 이후 전동기 모드에서 발전기 모드로 변환되고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 풍속이 강하여 발전기에 충분하다고 가정하여, 유효전력 명령값으로 2000w를 인가하였을 때 고정자측의 상전압과 상전류의 파형변화를 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 상전압과 상전류가 서로 위상이 바뀌어 있어 발전기로 동작되고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 결과들을 종합해 보면 제안한 알고리즘으로 원하는 제어특성을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

IV. 실험결과 및 고찰

그림 1은 제안한 알고리즘의 타당성을 구현하기 위해 Table 1과 같은 정격을 갖는 모델기와 풍차의 역할을 할 5 hp의 농형 유도전동기로 제어 시스템을 구성하였다. 모델기의 회전자에는 IGBT PWM 인버터를 채용하고 전압과 전류센서로 필요한 정보를 얻어 DSP로 원하는 제어를 행한다. 먼저 식(6)과 식(7)를 이용하여 슬립 각속도 및 속도를 추정하고, 원하는 제어를 행하기 위해 전류제어 루프는 샘플링 시간을 250 us, 속도제어 루프는 1.25 ms로 하여 제어를 행한다.

이 때 모델기의 2 차측을 저항 기동하여 동기속도까지 기동한 후 절환 스위치로 저항을 개방한 후 인버터로 제어를 행한다. 그림 6은 속도명령을 1750 rpm에서 1500 rpm까지의 변화를 주었을 때 속도 추정과 실제속도 그리고 슬립각 속도와 추정 슬립 각속도를 나타내고 있다. 그림 7은 속도변화에 대한 고정자 전류와 회전자 q축 전류의 파형을 나타내고 있다. 이 두 그림에서 보면 속도가 1500 rpm에서 1750 rpm까지는 슬립추정이 제대로 되고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 그림 6과 그림 7에서 슬립 추정이 제대로 되고 있기 때문에 이를 이용하여 전력제어를 행한 결과이다. 전력제어시 우선 모델기의 축에 연결되어 있는 5 hp의 농형유도기를 인버터로 속도를 동기

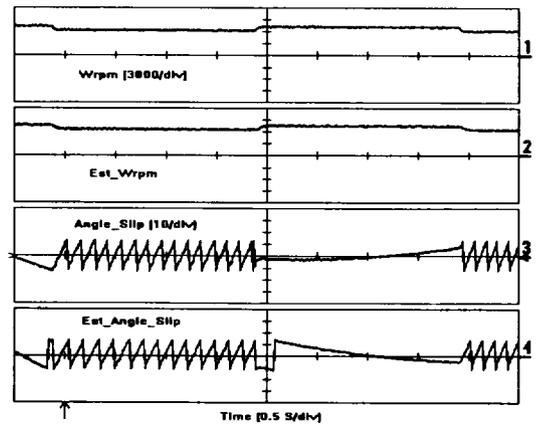


Fig. 6 Estimation of speed and slip

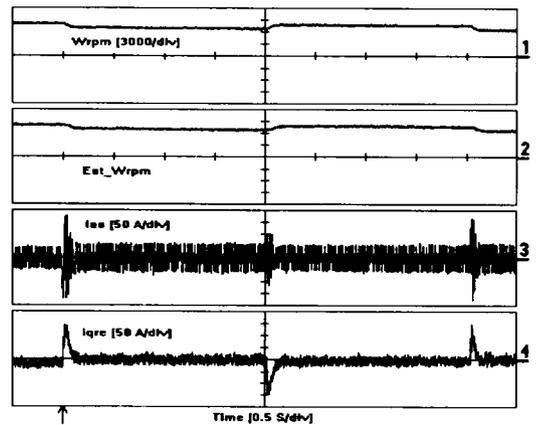


Fig. 7 Speed control

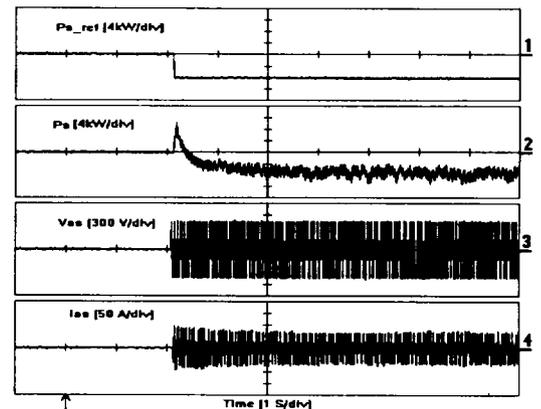


Fig. 8 Active power control

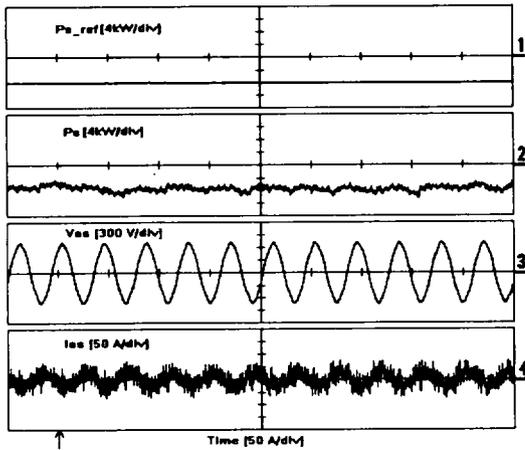


Fig. 9 Zoom of Fig. 8

속도까지 기동한 후 모델기의 회전자축에 연결되어 있는 인버터로 발전출력 명령값으로 2000 w를 인가했을 때의 파형을 나타내고 있다. 상세한 파형을 확인하기 위해 그림 9는 그림 8의 한 부분의 파형을 시간에 대해 확대해서 나타내고 있다. 이 파형을 분석해 보면 상전압과 상전류의 위상차이가 90° 이상 나고 있어 발전 출력제어가 제대로 되고 있음을 알 수 있다. 이상과 같은 결과들을 분석해 보면 제안한 알고리즘의 타당성을 검증할 수가 있다.

V. 결론

고정자 자속을 기준으로 하여 슬립각속도를 추정하고 이를 이용하여 회전자 위치 검출기를 갖지 않는 이중여자 유도기의 속도 제어와 가변 풍속에 대한 제어 응답 특성을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 나타내었다. 회전자에 채용된 인버터를 통하여 회전자 전류를 제어함으로써 원하는 속도 제어 특성과 고정자축의 발전전력이 제어됨을 알 수 있었다. 이상

의 결과로부터 제안한 알고리즘과 실험결과가 일치하고 있어 현장 적용에 응용되리라 사료된다.

참고문헌

- 1) Morel, L., Godfroid, H., Mirzaian, A., Kauffmann, J. M., 1998, Double-fed induction machine : Converter optimisation and field oriented control without position sensor, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol.145, No.4, pp.360~368
- 2) Uctug, M. Y., I.Eskamdarzadeh, H.Ince, 1994, Modelling and output power optimisation of a wind turbine driven double output induction generator, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 141, No.2, pp.33-38
- 3) Pena, R., J.C.Clare, G.M.Asher, 1996, 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, pp.231-241
- 4) Mitsutoshi, Y. and Motoyoshi, O., 1994, Active and reactive power control for doubly-fed wound rotor induction generator, *IEE Trans. Power Electron.*, No.6, pp.624-629
- 5) Brune, C., R. Spee and A. K. Wallace, 1993, Experimental Evaluation of a Variable Speed, Doubly-Fed Wind-Power Generating System, *IEEE Ind. App. Society Annual Meeting*, Toronto, Canada, pp.480-487.
- 6) Yamamoto, M. and Motoyoshi, O., 1991, Active and Reactive Power Control for Doubly Fed Wound Rotor Induction Generator, *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.6, No.4, pp.624-629