

풍력발전용 DFIG의 출력 해석과 정격출력 제어

* 이진호* 이우석* 서영택** 오철수*
*경북대학교 전기공학과 **구미1대학 전기과

Power Analysis & Rated Power Control Method of DFIG for Wind Power Generating

°Jean-Ho Lee* Woo-Suk Lee* Young-Taek Seo** Chul-Soo Oh*
*Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ. **Kumi College

Abstract This paper deals with the rated output power using grid-connected Doubly-Fed Induction Generator(DFIG) in the supersynchronous speed regions. The rated output power is controlled by both magnitude and frequency of the voltage fed to the rotor. And this rotor voltage is controlled by control of inverter switching frequency and fire angle.

A DFIG generating characteristic is analyzed by simulation of steady-state algebraic equation of equivalent circuit using numerical analysis. And it is compared with results of experiment.

Consequently, This paper presented to control method for rated output power of DFIG in variable wind speed.

1. 서 론

환경오염과 화석자원 고갈로 인해 대체에너지 공급원으로써 풍력발전의 연구가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 풍력발전은 풍황조건에 따라 효율적인 운전을 위해 터빈의 형태와 발전기의 선정이 중요하다. 바람의 변화가 심한 국내에는 가변속 정주파수 운전이 효율적이고 회전자 여자전압 제어를 통해 운전 영역을 확장할 수 있는 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)의 연구가 1980년대 후반부터 이루어져 왔다.[1-2] 외국에도 DFIG의 슬립전력 환원과 출력, 역률 제어에 대한 연구가 활발하게 이루어 지고 있다.[3-5] 그러나 계통연계 DFIG의 회전자 여자주파수와 여자전압에 의한 정격 출력 제어에 대한 연구는 아직 부족한 단계에 있다.

본 논문은 계통연계 DFIG 회전자의 슬립을 통하여 여자전압을 공급하고 이 전압의 주파수와 크기를 변화함으로써 가변풍속에 대한 발전기의 정격 출력과 최대 역률을 제어할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 그리고, 등가회로에 의해 유도된 상태방정식을 수치해석 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 이 결과를 토대로 인버터의 스위칭 주파수와 점호각을 제어하여 회전자 여자전압의 주파수와 크기를 변화시킬 수 있고, 따라서 가변풍속에서 정격출력을 제어할 수 있음을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 DFIG의 특성해석

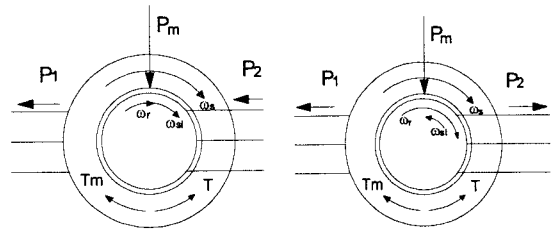
2.1.1 DFIG의 원리

그림 1에서 T_m 은 외부 구동토크이고 T 는 발전기 슬립에 의해 발생하는 토크이다.

(a)는 동기속도 이하이고, $T_m < T$ 이므로 발전을 할 수 없다. 그러나 회전자를 통해 w_{sl} 보다 크고 계통과 동위상의 여자전압을 공급하면 $T_m > T$ 가 되어 발전이 가능하다.

(b)는 동기속도 이상에서 운전하며 강풍속일 때 $T_m \gg T$

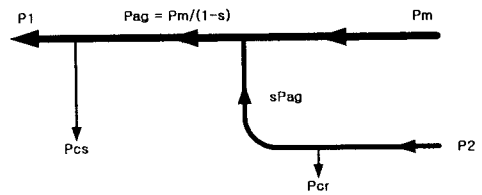
이므로 정격 이상에서 운전하게 된다. 그러나 회전자를 통해 w_{sl} 보다 작고 계통과 역위상의 여자전압을 공급하면 정격 운전이 가능하다.



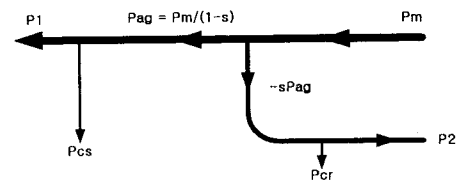
(a) 동기속도 이하 (b) 동기속도 이상

그림 1 DFIG의 운전상태
Fig. 1 The operating modes of DFIG

2.1.2 DFIG의 전력조류



(a) 정상여자 (0 < s < 1)



(b) 역상여자 (-1 < s < 0)

그림 2 DFIG의 전력 흐름도
Fig. 2 Power flow of DFIG

- P_{ag} 공극전력[W]
- P_{cr} 회전자 동손[W]
- P_{cs} 고정자 동손[W]
- P_m 발전기의 축 출력[W]
- P_1 발전기 출력[W]
- P_2 회전자 입력, 출력[W]

$$P_1 = P_{ag} - P_{cr} \quad (1)$$

$$P_{ag} = P_m + sP_{ag} \quad (2)$$

그림 2 (a)의 동기속도 이하에서 $P_m < P_{ag}$ 이므로 발전기로 동작할 수 없으나 회전자에 P_2 를 공급하면 고정자측으로 P_1 이 발전된다.

$$P_2 = sP_{ag} + P_{cr} \quad (3)$$

(b)의 동기속도 이상에서 $P_m > P_{ag}$ 가 되어 고정자측으로 P_1 이 발전되고 회전자측으로 P_2 가 발전된다.

$$P_2 = -sP_{ag} - P_{cr} \quad (4)$$

2.1.3 등가회로를 이용한 DFIG의 상태방정식

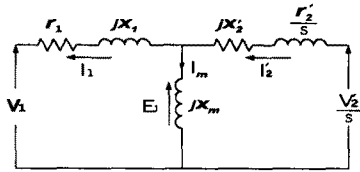


그림 3 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit

그림 3에서 \overline{V}_2/s 는 회전자에 주입한 상전압으로 고정자에 환산한 값이고 동기속도 이상에서 V_1 과 역위상으로 공급하였다. 이때 철손, 마찰손, 풍손은 무시하였다.

$$\overline{V}_{th} = \frac{x_m}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2}} \overline{V}_1 \quad (5)$$

$$r_{th} = \frac{x_m^2 r_1}{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2} \quad (6)$$

$$x_{th} = \frac{r_1^2 x_m + x_1^2 x_m + x_1 x_m^2}{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2} \quad (7)$$

계통 연계된 DFIG에 회전자 여자를 할 경우 바람을 대신한 원동기의 회전자 주파수 f_r 은 전원주파수 f_1 과 회전자 여자주파수 f_2 의 합과 같은 속도로 회전한다.

$$f_r = f_1 + f_2 \quad (8)$$

$$s = \frac{f_r - finv}{f_r} \quad (9)$$

식 (9)에서 s 는 회전자 여자를 할 때 슬립이고 $finv$ 는 원동기 구동주파수이다.

$$P_{ag} = \frac{P_m}{1-s} \quad (10)$$

식 (10)에서 P_m 은 풍차의 축에서 발전기로 공급되는 기계적 출력이고 풍속에 따라 풍차의 회전속도가 $finv$ 의 속도로 회전한다고 가정하면 f_2 를 제어함으로써 P_m 을 일정하게 유지할 수 있다.

$$\overline{I}_2 = \frac{\overline{V}_{th} - \frac{\overline{V}_2}{s}}{r_{th} + \frac{r_2'}{s} + j(x_{th} + x_2')} \quad (11)$$

$$\overline{E}_1 = \frac{\overline{V}_2}{s} + \overline{I}_2' \left(\frac{r_2'}{s} + jx_2' \right) = jx_m \overline{I}_m \quad (12)$$

$$\overline{I}_1 = \overline{I}_2 + \overline{I}_m \quad (13)$$

$$P_{cst1} = 3\overline{I}_1^2 r_1 \quad (14)$$

$$P_{cst2} = 3\overline{I}_2^2 r_2' \quad (15)$$

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos \theta \quad (16)$$

식 (16)에서 θ 는 고정자 전압과 전류의 위상차이다.

2.2 시뮬레이션

그림 4, 5는 상태방정식을 이용하여 동기속도 이상 정격 운전 영역에서 DFIG의 제어변수인 f_2 , V_2 의 변화에 따른 회전자전류와 발전기의 출력을 시뮬레이션 하였다. 원동기 구동주파수는 65Hz이고 슬립을 -0.42%, -0.83%, -1.25%, -1.67%로 제어했을 때 V_2 를 증가하면서 특성을 얻었다.

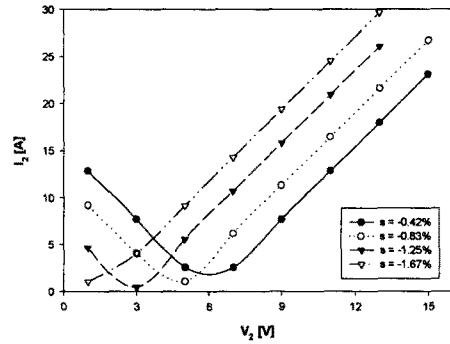


그림 4 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 회전자전류
Fig. 4 I_2 vs V_2 in variation s

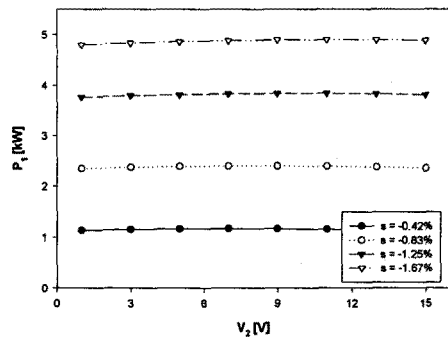


그림 5 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 고정자출력
Fig. 5 P_1 vs V_2 in variation s

그림 6은 정격출력을 발전하기 위해 s 를 -1.67%로 제어하였고 회전자 전류를 정격 이하로 유지하기 위한 회전자 여자전압을 공급하였을 때 원동기 구동주파수에 대한 고정자출력, 역률을 시뮬레이션 하였다.

그림 7은 f_{inv} 가 변화할 때 정격 회전자전류를 유지하기 위해 공급한 회전자 여자전압이다.

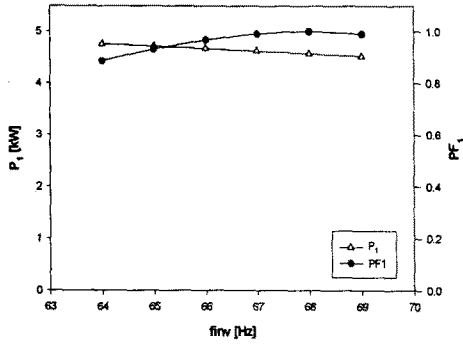


그림 6 원동기 구동주파수에 대한 고정자 출력과 역률
Fig. 6 P_1 & PF_1 vs f_{inv} in rated s

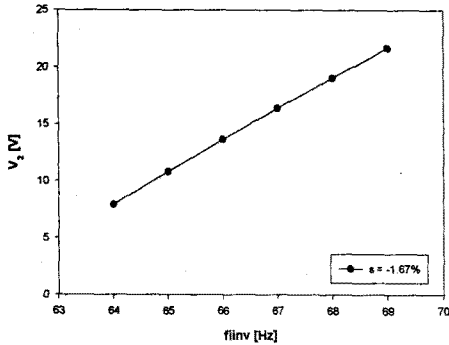


그림 7 원동기 구동주파수에 대한 회전자전압
Fig. 7 V_2 vs f_{inv} in rated s

2.3 실험과 고찰

2.3.1 DFIG 시스템 구성

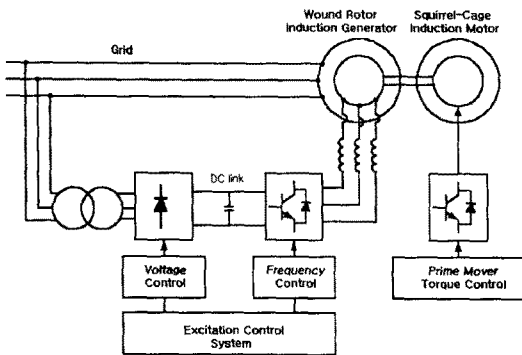


그림 8 DFIG 시스템 구성도
Fig. 8 Configuration of DFIG system

그림 8에서 DFIG는 6극 5kW이고 정격 회전자전류는 20A이다. 고정자는 계통 3상3선 380V에 연결되어 있고 계통으로부터 변압기, 정류기, 인버터, 리액터를 통해 회전자에 여자전압을 공급한다. 인버터는 IGBT소자를 이용한 120° 도통형이고 0~60Hz까지 주파수 변

환이 가능하다. 또한 DC link 전압 평활용 콘덴서를 삽입하였다.

원동기로는 7.5kW의 농형 유도전동기를 사용하였고 22KVA 상용 PWM 인버터를 이용해서 전동기 속도와 토크를 제어하여 풍력발전기의 풍차를 모사하였다.

2.3.2 실험

그림 9,10,11는 원동기의 구동주파수가 65Hz일때 회전자 여자전압의 주파수를 제어하여 슬립 s 를 각각 -0.42% , -0.83% , -1.25% , -1.67% 로 맞추고 회전자 여자전압 V_2 를 증가시키면서 고정자출력, 고정자역률, 회전자전류를 측정하였다.

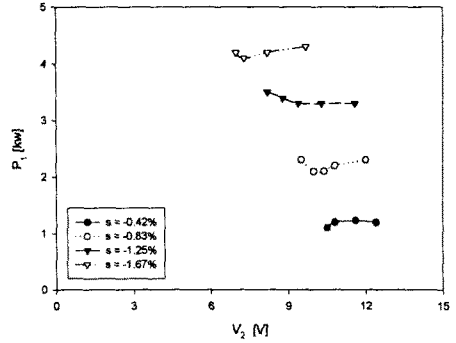


그림 9 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 고정자출력
Fig. 9 P_1 vs V_2 in variation s

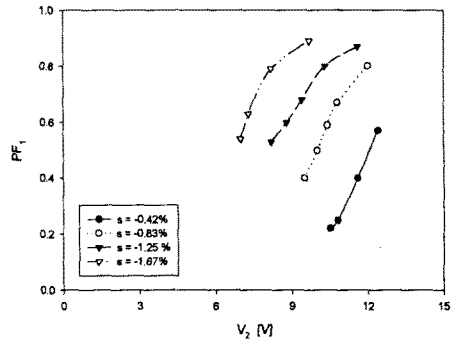


그림 10 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 고정자역률
Fig. 10 PF_1 vs V_2 in variation s

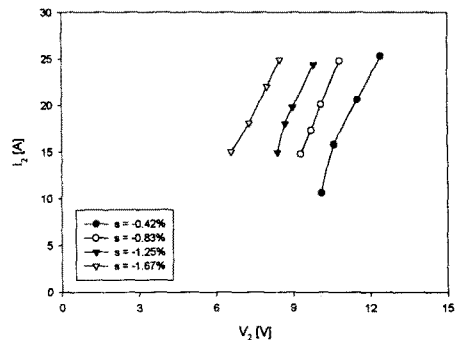


그림 11 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 회전자전류
Fig. 11 I_2 vs V_2 in variation s

그림 12.13은 동기속도 이상에서 DFIG가 정격 출력을 발전할 수 있도록 인버터의 주파수를 제어하여 s 를 -1.67%로 일정하게 유지하고 회전자 전류를 정격 이하로 만들기 위해 변압기를 이용하여 회전자 여자전압을 제어하였을 때 원동기 구동주파수에 대한 출력, 역률과 회전자 여자전압이다.

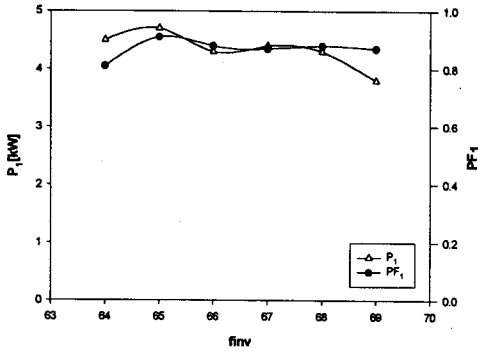


그림 12 원동기 구동주파수에 대한 고정자 출력과 역률
Fig. 12 P_1 & PF_1 vs f_{inv} in rated s

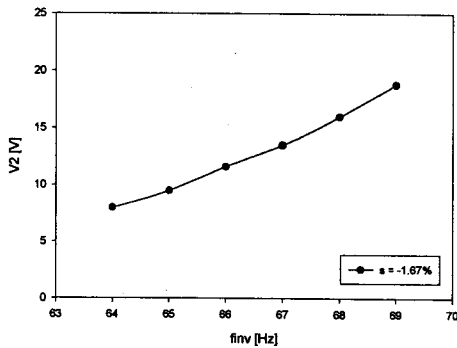


그림 13 원동기 구동주파수에 대한 회전자 여자전압
Fig. 13 V_2 vs f_{inv} in rated s

3. 결 론

원동기 구동주파수가 계통주파수 보다 훨씬 큰 영역에서 운전하여 정격이상의 출력을 발생할 때에 회전자 여자주파수를 변화함으로써 발전기의 출력을 정격이하로 제어할 수 있었다. 이때 풍차를 모사한 원동기의 구동주파수 변화에 따라 정격 회전자전류를 발생하는 회전자 여자전압의 크기가 다름을 실험을 통해 알 수 있었고 회전자 여자전압의 크기를 제어함으로써 정격 회전자전류 이하에서 운전할 수 있음을 알았다.

회전자전류가 정격이하로 운전할 때는 고정자전류도 항상 정격 이하로 운전됨을 실험결과로 알 수 있었다. 또 발전기 역률특성은 회전자 여자전압이 증가함에 따라 개선됨을 알았다. 실험에서 DFIG의 정격출력을 발전하기 위해 특정 슬립 s 를 유지하고 회전자전류를 정격이하로 유지하는 회전자 여자전압을 공급했을 때 높은 역률을 유지하였다. 따라서 정격출력 제어시 역률은 고려하지 않아도 된다.

이상의 결과를 토대로 DFIG의 정격출력을 제어하기 위해 먼저 회전자 여자주파수를 제어하고 회전자 여자전압을 제어하면 가변풍속에서 정격운전을 수행할 수 있을

것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 서영택, 이우석, 오철수 "풍력발전용 회전자 여자 시스템 권선형 유도발전기의 역률 해석," 대한전기학회 논문집 제46권 제9호, pp.1340~1346, 1997.
- [2] 박민호, 정승기, 이진우, "회전자 교류여자방식의 자립형 유도발전기의 정상 상태 해석," 대한전기학회 논문집 제37권 제1호, pp.33~39, 1988.
- [3] I.Cadirci, M. Ermis, "Double-output Induction Generator Operating at Subsynchronous and Supersynchronous Speed : Steady state Performance Optimization and Wind-energy Recovery," IEE Proc., Vol. 139, No. 5, pp.429~442, September 1992.
- [4] M. Y. Uctug, I. Eskandarzadeh, H. Ince, "Modeling and Output Driven Double output Induction Generator," IEE Proc.-electr. Power Appl., Vol. 141, No. 2, pp.33~38, March 1994.
- [5] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "A Doubly fed Induction Generator using Back-to-back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine," IEE Proc-Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 5, pp.380~387, September 1996.