

넓은 풍속에서의 풍력발전용 권선형 유도발전기의 정출력·고역률 운전

* 이우석, 김광태, 정순용, 손재봉, 배종문
부산정보대학 전기전자계열

Constant power · high power factor drive of DFIG
for wind power generation in the wide wind speed

* Woo-Suk Lee, Kwang-Tae Kim, Soon-Yong Chung, Je-Bong Shon, Jong-Moon Bae
PUSAN COLLEGE OF INFORMATION TECHNOLOGY

Abstract - Wide operating range and speed control is needed for wind power generating and a Doubly Fed Induction Generator(DFIG) has good adaptivity for that purpose. This paper deals with power and power factor control using the Grid connected DFIG in the wide speed regions, by controlling frequency and voltage fed to the rotor. Power flow of the DFIG and steady-state algebraic equations of the equivalent circuit are analyzed. For a normal operating region, in which the generator ratings were not exceeded, the rotor current was either less than or equal to the rated value. Accordingly, the optimal power factor can be selected relative to the permissible rated current at the rotor coil which controls the magnitude of the injected rotor voltage to the rotor according to a given rotor frequency.

률이 회전자 여자전압을 변화시킴으로써 향상될 수 있음을 실험을 통하여 입증하고자 한다.

2. DFIG의 정출력·고역률 운전

2.1 DFIG 시스템

DFIG 시스템의 실험 구성도는 그림 1과 같다. 권선형 유도발전기는 6극 5.5kW로 고정자는 계통 3상 380V에 연계되어 있고 고정자와 회전자의 이중여자를 이용하여 정격속도 이상의 속도에서 발전기 정격값을 넘어서는 출력을 정격값 이하의 출력으로 제한할 수 있다. 회전자측은 변압기, 정류기, 인버터로 구성되어 있다. 계통과 연계된 변압기를 통하여 정류기에 전원을 공급하며, 이 정류기는 DC 링크를 통하여 인버터와 연결되어 있다. 이 인버터를 통하여 여자전압을 권선형 유도발전기의 회전자측으로 공급하여 준다. 주파수제어 인버터는 6개의 IGBT로 구성된 120° 도통형으로 구성하였다. 정류기와 인버터사이에 직류 평할 콘덴서를 삽입하였고, 정류기를 통해 계통과 연결하였다.

1. 서 론

환경오염과 화석자원 고갈로 인해 대체에너지 공급원으로 풍력발전의 연구가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 풍력발전은 풍황조건에 따라 효율적인 운전을 위해 터빈의 형태와 발전기의 선정이 중요하다. 현재 넓은 풍속에 대하여 발전기 운전이 가능한 DFIG (Doubly Fed Induction Generator) 시스템의 연구가 세계적인 추세이다.

1980년대 초반에서 1990년대 초반까지 한방향 제어기를 이용한 발전기 회전자의 슬립전력의 환원에 관한 연구가 이루어져 발전기의 효율 향상을 이루었다[1,2]. 그러나 이는 회전자 여자하는 방식을 이용한 것이 아니고 속도제어에 의한 운전영역의 확장에 대한 연구는 미약하였다.

1990년대에 벡터제어 기법을 풍력발전의 회전자 여자제어에 적용하여 유효전력과 무효전력의 독립적 제어를 하였다[3,4]. 이는 양방향 제어기에 필요한 콘버터 2대에 대하여, 한 대의 콘버터가 유효전력을 제어한다면, 나머지 한 대의 콘버터는 무효전력을 제어하도록 하여 독립된 제어가 가능하게 한 것이다. 이는 전력변환장치를 제작하는데 필요한 소자의 가격문제와 하모닉 문제등에 관련된 전력변환장치의 성능향상에 주안심을 둔 것이다.

또한 동기속도 이상의 영역에서 회전자 여자주파수와 회전자 여자전압에 의해 풍력발전기의 속도, 출력, 역률제어를 하였다. 그러나 이는 동기속도 이상의 영역만 해석하였으며, 일 정출력에서 최적 역률에 대한 언급은 없었다[5].

본 논문은 동기속도 이상과 이하의 넓은 풍속영역에서 회전자 여자주파수와 회전자 여자전압에 의해 풍력발전기의 속도, 출력, 역률의 제어가 이루어질 수 있음을 보이고, 또한 정격출력에 대하여 최적의 역률을 제어할 수 있음을 실험을 통하여 증명하는데 목적이 있다.

회전자 권선을 통해 회전자 여자주파수를 인가함으로써 발전기 속도와 출력의 제어가 이루어지고, 발전기 고정자의 역

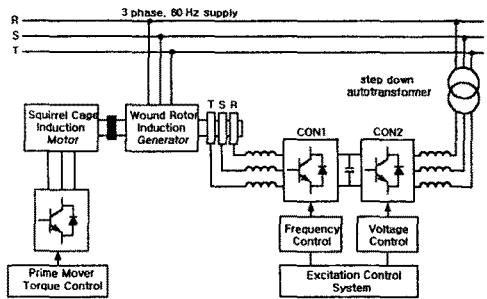


그림 1. DFIG 시스템 구성도

그림 2는 DFIG 시스템의 전력조류를 슬립이 $0 < s < 1$ (subsynchronous speed) 영역과 슬립이 $0 > s > -1$ (supersynchronous speed) 영역의 두 운전영역으로 나누어 고찰한 것이다. 그림 2 (a)의 동기속도 이하의 영역에서 고정자 측에 전달되는 전력 P_{ax} 는 원동기로부터 전달되는 전력 P_m 보다 크므로($P_{ax} > P_m$), 회전자 여자 없는 발전기로 동작할 수 없다. 그러나 일부 Power를 회전자로부터 공급받는다면 동기속도이하에서도 발전기로 동작할 수 있다. 이 경우 회전자의 여자는 고정자의 여자전원에 의한 회전자계와 같은 방향으로 주어져야 하고, 이 때를 동상여자라 한다.

회전자측 공급전력 P_2 는 sP_{ax} 와 회전자내 손실 P_{cr} 를 공급하여야 하므로

$$P_2 = sP_{ax} + P_{cr} \quad (1)$$

이다.

회전자측에서 회전자손실을 제외한 sP_{ag} 가 공급되므로

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

가 되어, 발전기로 동작이 가능하게 되는 것이다.

고정자측 발전전력 P_1 은 공극전력 P_{ag} 에서 고정자내 손실 P_{cs} 를 뺀 전력이 되므로

$$P_1 = P_{ag} - P_{cs} \quad (3)$$

이다.

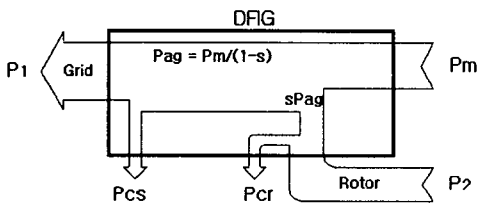
그림 2 (b)의 동기속도 이상의 영역에서 원동기로부터 전달되는 전력 P_m 은 고정자측에 전달되는 전력 P_{ag} 보다 크므로 ($P_m > P_{ag}$), 발전기로 동작한다. 그러나 고정자와 회전자측의 출력과 역률을 제어하기 위하여, 회전자에서 여자제어를 할 경우, 회전자의 여자는 고정자의 회전자계와 반대 방향으로 주어져야 하고, 이 때를 역상여자라 한다.

고정자측 발전전력 P_1 과 회전자측 발전전력 P_2 는 고정자동손을 P_{cs} , 회전자동손을 P_{cr} 이라 하면

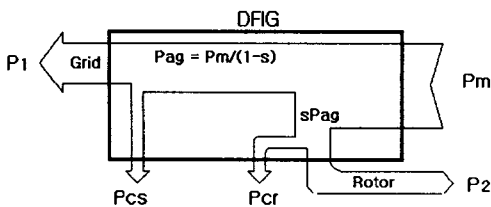
$$P_1 = P_{ag} - P_{cs} \quad (4)$$

$$P_2 = -sP_{ag} - P_{cr} \quad (5)$$

이다



(a) 동기속도 이하



(b) 동기속도 이상

그림 2. 권선형 유도발전기의 전력흐름도

2.2 정출력 · 고역률 운전

DFIG의 정출력 · 고역률 운전이란 일정출력에서 역률이 가장 높은 운전점으로 정의 할 수 있고, 이때의 고역률 운전점에서는 고정자 전류가 감소하여 기계의 손실이 줄어들며 아울러 효율을 높일 수 있다.

회전자 여자주파수에 의해 일정출력으로 운전할 경우, 회전자 여자전압을 변화시키면서 역률을 제어할 수 있다[5]. 발전기의 안정된 동작을 위하여 회전자 여자전압은 유도발전기의 회전자 전류 정격값인 24A일 때의 여자전압값으로 제한되어야 한다. 따라서 회전자 전류가 24A가 되도록 회전자 여자전

압을 증가시키고, 이 때의 역률이 일정출력에 대한 최적의 역률이 된다.

2.2.1 동기속도 이하

회전자 여자주파수를 변화하여 고정자 출력에 5.5kW로 제어한 후, 회전자 전류가 24A로 제한되는 회전자 여자전압을 인가하여 정격출력에 대한 최적의 역률이 되도록 제어하고 이 때의 고정자 역률, 회전자 여자전압, 회전자 입력, 고정자 전류를 측정하였다. 또한 상태방정식[1]을 이용하여 실험과 같은 조건으로 시뮬레이션 하였고, 이를 같은 그래프로 나타내어 비교하였다.

그림 3은 고정자 출력에 정격출력으로 제어하고 회전자 전류는 정격전류가 된 경우 원동기 구동주파수 f_{inv} 변화에 대한 최적의 고정자 역률을 나타낸 것이다. 원동기 구동주파수가 감소할수록 정격전류 이하에서의 최대역률이 감소한다. 이는 원동기 구동주파수가 감소할수록 발전기의 무효전력이 커짐을 의미한다.

그림 4는 고정자 출력에 정격출력으로 제어하고 회전자 전류는 정격전류가 된 경우 원동기 구동주파수 f_{inv} 변화에 대한 회전자 여자전압 V_r 를 나타낸 것이다. f_{inv} 가 감소하면 회전자 여자전압이 증가한다. 이것은 f_{inv} 가 감소할수록 고정자 전류에 의해 유도되는 회전자 전압이 커지므로 외부로부터 회전자 슬립링으로 전력을 공급하기 위해서는 더 큰 전압을 공급하여야 안정된 운전을 할 수 있기 때문이다.

그림 5는 고정자 출력에 정격출력으로 제어하고 회전자 전류가 정격전류가 된 경우 원동기 구동주파수 f_{inv} 변화에 대한 고정자 전류를 나타낸 것이다. f_{inv} 가 감소하면 고정자 전류는 증가한다. 일정 슬립 s 에 대하여 f_{inv} 가 감소하면 고정자 출력은 일정하나 고정자 역률이 작아지므로 고정자 전류는 증가하게 된다. 이때 회전자 역률은 f_{inv} 의 변화에 대해 80%정도의 일정한 역률을 유지한다.

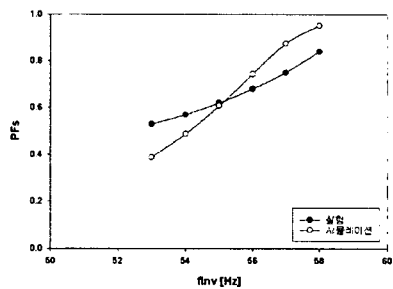


그림 3. 동기속도 이하에서 고정자 역률

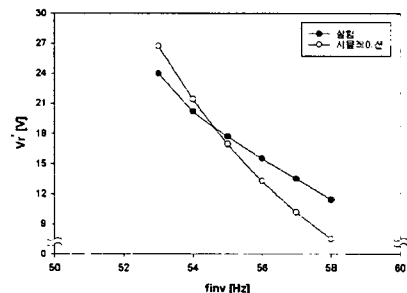


그림 4. 동기속도 이하에서 회전자 여자전압

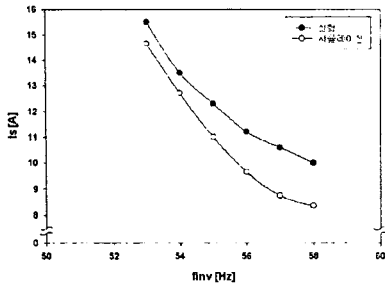


그림 5. 동기속도 이하에서 고정자 전류

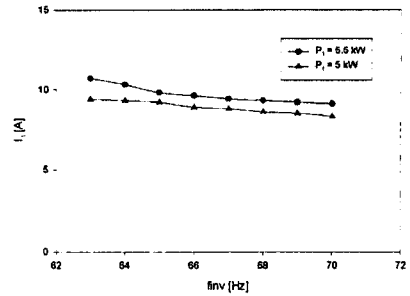


그림 8. 동기속도 이상에서 고정자 전류

2.2.2 동기속도 이상

일정출력의 고역률 운전에서 회전자 여자전압, 회전자 출력, 회전자 역률, 고정자 전류를 측정하였고 출력은 5.5kW, 5.0kW로 하였다.

그림 6은 원동기 구동주파수 f_{mv} 변화에 대한 고정자 역률을 나타낸 것이다. 고정자 역률이 0.9 이상으로 향상되었고 원동기 구동주파수가 작을수록 역률의 증가폭이 컸다.

그림 7은 원동기 구동주파수 f_{mv} 변화에 대한 회전자 여자전압 V_r 를 나타낸 것이다. f_{mv} 가 증가하면 정격전류를 위한 회전자 여자전압이 증가한다.

그림 8은 원동기 구동주파수 f_{mv} 변화에 대한 고정자 전류를 나타낸 것이다. f_{mv} 가 증가하면 고정자 전류는 줄어든다.

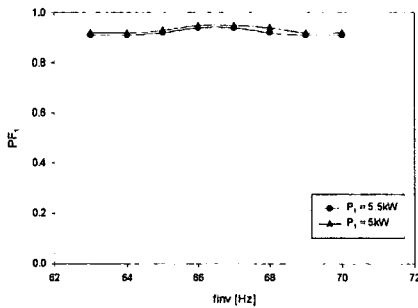


그림 6. 동기속도 이상에서 고정자 역률

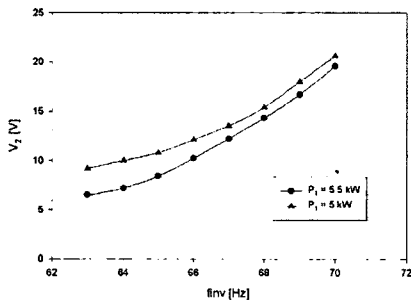


그림 7. 동기속도 이상에서 회전자 여자전압

3. 결 론

본 연구에서는 계통연계 DFIG 시스템에서 회전자 여자주파수와 회전자 여자전압의 변화가 발전기의 출력에 미치는 영향을 해석하고, 동기속도 이하와 이상의 영역에서 DFIG의 정출력·고역률 운전조건을 알아보았으며, 이러한 운전조건을 만족하는 회전자 여자전압 V_r 와 회전자 여자주파수 f_2 의 관계를 규명하였다.

회전자 여자주파수 f_2 의 제어에 의한 일정출력 운전 상태에서 V_r 를 변화시켜 회전자 전류를 정격값으로 제어함으로써 최적의 역률로 발전기를 운전할 수 있었다. 따라서 풍속에 의한 임의의 원동기 속도에 대하여 발전기를 최적운전상태로 운전할 수 있다. 이러한 역률 향상에 의해 발전기가 소요하는 무효전력이 줄어들고, 이로써 무효전력 보상콘덴서의 용량을 줄일 수 있다.

동기속도 이하와 이상의 풍속구간에서 회전자 여자시스템을 사용하여 회전자 권선을 통해 여자주파수와 여자전압을 제어함으로써 역률 및 출력제어가 가능함을 입증함으로써 유도발전기의 운전영역을 동기속도 이하와 이상의 넓은 영역으로 확장할 수 있음을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] E. Akpinar, P. Pillay, A. Ersak, "Calculation of the Overlap Angle in Slip Energy Recovery Drives Using a d, q / abc Model," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 8, no. 2, pp.229~235, June, 1993.
- [2] H. L. Nakra, Benoit Dube, "Slip Power Recovery Induction Generators for Large Vertical Axis Wind Turbines," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 3, no. 4, pp.733~737, December, 1988.
- [3] 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-Electronics Power Appl., vol. 143, no. 5, pp.380~387, September, 1996.
- [4] Mitsutoshi, Yamamoto, Osamu Motoyoshi, "Active and Reactive Power Control for Doubly-fed Wound Rotor Induction Generator," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 6, no. 4, pp.624~629, October, 1991.
- [5] 이우석, 오철수, "풍력발전용 권선형 유도발전기의 회전자 여자주파수를 이용한 속도와 출력제어", 대한전기학회 논문지, 권호, 페이지, 1999