

회전자 여자제어를 이용한 풍력발전 DFIG의 무효전력 해석

이우석, 오철수
경북대학교 전기공학과

Analysis of the DFIG Reactive Power Using the Rotor Exciting Control

Woo suk Lee, Chul Soo Oh
Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University

1. 서론

바람의 변화가 심한 풍력발전에 응용하기 위한 발전기는 동기속도 이상과 이하에서 발전이 가능하여야 한다. DFIG(Doubly Fed Induction Generator) 시스템의 경우 회전자 여자제어를 통하여 운전점을 이동시킬 수 있으며, 이를 통하여 운전영역의 확장이 가능하고 동기속도의 이상과 이하의 범위에서 발전이 가능하다.

1980년대 초반에서 1990년대 초반까지 동기속도 이상의 영역에서 회전자에서 발생한 슬립전력을 콘버터를 통하여 모선으로 회수하는 연구가 이루어졌으나, 이는 회전자를 여자하는 방식을 이용한 것은 아니므로 출력의 큰 증가를 이루지 못하였다^{1,2)}. Cadirci 등은 콘버터를 구성하고 있는 싸이리스터에 점호각제어를 이용하여, 회전자 여자전압의 크기와 위상각제어에 관한 정상상태 해석을 하였으며 이를 통하여 최대출력 제어를 하였으나, 역률에 관한 해석은 없다³⁾. Pena 등은 벡터제어 기법을 풍력발전의 회전자 여자제어에 적용하여 원동기 속도를 풍속에 대하여 최적의 출력이 나오도록 제어하여 넓은 범위의 속도제어를 가능하게 하였다^{4,6)}. 이는 원동기의 속도제어와 출력에 관심을 둔 것으로 역률 향상에 대한 해석은 미약하다. 종래의 연구는 회전자 속도와 동기속도의 차이인 슬립주파수를 회전자 여자주파수로 하여 인가해 주었으므로 회전자 여자주파수를 슬립주파수와 다르게 인가한 경우에 대한 해석은 없었다.

이 연구는 풍속에 의한 원동기 속도의 증가에도 불구하고 회전자 여자주파수와 전압에 의해 계동연계된 풍력발전기의 속도와 무효전력을 제어할 수 있음을 실험을 통하여 증명하는데 목적이 있다.

2. DFIG의 회전자여자제어

2.1 전력조류

권선형 유도발전기는 고정자와 회전자를 통하여 각각 여자를 할 수 있고, 이러한 발전을 DFIG (Doubly Fed Induction Generator)라 한다.

그림 1은 DFIG 시스템의 전력조류를 슬립이 $0 < s < 1$ (subsynchronous speed) 영역과 슬립이 $0 > s > -1$ (supersynchronous speed) 영역의 두 운전영역으로 나누어 고효

한 것이다. 그림 1 (a)의 동기속도 이하의 영역에서 고정자 측에 전달되는 전력 P_{ag} 는 원동기로부터 전달되는 전력 P_m 보다 크므로, $P_{ag} > P_m$ 이 되어 발전기로 동작할 수 없다. 그러나 발전기로 동작하기 위한 부족한 Power를 회전자로부터 공급받아야 한다. 이 경우 회전자의 여자는 고정자의 여자전원에 의한 회전자계와 같은 방향으로 주어져야 한다. 그림 1 (b)의 동기속도 이상의 영역에서는 원동기로부터 전달되는 전력 P_m 은 고정자측에 전달되는 전력 P_{ag} 보다 크므로 $P_m > P_{ag}$ 가 되어 발전기로 동작한다. 그러나 고정자측과 회전자측의 출력과 역률을 제어하기 위하여, 회전자에서 여자제어를 할 경우, 회전자의 여자는 고정자의 여자전원에 의한 회전자계와 반대 방향으로 주어져야 한다.

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

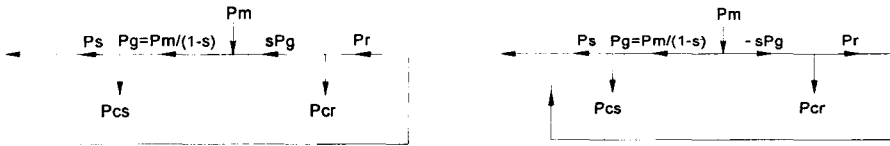
$$P_1 = P_{ag} - P_{cs} \quad (1)$$

$$P_2 = -sP_{ag} - P_{cr} \quad (2)$$

로 주어지고, 전체 발전전력 P_{total} 은

$$\begin{aligned} P_{total} &= P_1 + P_2 \\ &= P_{ag} - sP_{ag} - (P_{cs} + P_{cr}) \\ &= (1 - s) P_{ag} - (P_{cs} + P_{cr}) \\ &= P_m - (P_{cs} + P_{cr}) \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다.



(a) Sub-synchronous speed

(b) Super-synchronous speed

Fig. 1 Power flow of DFIG

2.2 상태방정식

계통 연계된 DFIG에서 원동기의 회전주파수는 권선형 유도발전기의 전원 주파수 f_1 과 회전자 여자주파수 f_2 에 의해 결정되고, 풍차로 시뮬레이션한 원동기가 농형 유도기로 구성되어 있을 경우, 원동기의 축토크 T 와 슬립 s_M 은

$$T = \frac{3}{\omega_{sM}} \frac{V_{th}^2}{(r_{th} + r_2'/s_M)^2 + (x_{th} + x_2')^2} \frac{r_2}{s_M} \quad (4)$$

$$s_M = \frac{f_{inv} - (f_1 + f_2)}{f_{inv}} \quad (5)$$

으로 표현되고, 원동기의 동기회전속도 ω_{sM} 은 인버터의 주파수에 의해 결정되므로

$$\omega_{sM} = \frac{4\pi f_{inv}}{p} \quad (6)$$

으로 주어지고, 원동기에서 발전기로의 입력 P 는

$$P = (1 - s_M)\omega_{sM}T \quad (7)$$

로 주어진다.

회전자 여자주파수 제어에 의해 공극전력이 P_{ag} 로 주어질 경우, P_{ag} 는

$$P_{ag} = \frac{P}{1 - s} = \frac{(1 - s_M)\omega_{sM}T}{1 - s} \quad (8)$$

로 주어진다.

즉 발전기의 공극전력은 발전기의 회전자 여자주파수에 의해 제어된다. 그림 2의 DFIG의 여자 등가회로를 이용하면, 식 (9), (10)에서 슬립 s 와 회전자 여자전압 V_2' 를 제어하여 고정자 전류 \bar{I}_1 과 회전자 전류 \bar{I}_2' 를 제어할 수 있으므로 식 (1)과 (2)에서 출력을 제어할 수 있고, 식 (11), (12)에서 역률제어에 의한 무효전력의 제어도 가능하다.

$$\bar{V}_1 = \bar{I}_1(r_1 + jx_1) + jx_m(\bar{I}_1 - \bar{I}_2) \quad (9)$$

$$\frac{\bar{V}_2}{s} = jx_m(\bar{I}_1 - \bar{I}_2) - \bar{I}_2(r_2 + jx_2) \quad (10)$$

$$P_1 = 3V_1I_1 \cos \delta \quad (11)$$

$$P_2 = 3V_2'I_2' \cos(\varphi - \theta) \quad (12)$$

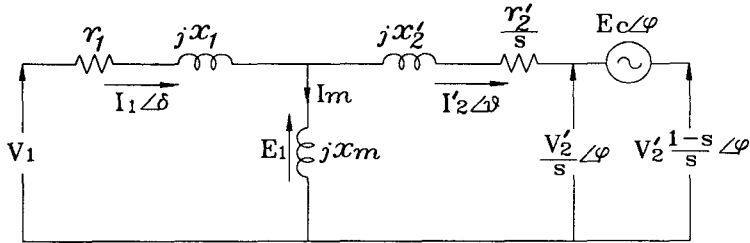


Fig. 2 Equivalent circuit

2.3 토크 시뮬레이션

그림 3은 f_{inv} 가 60, 63, 66, 69, 72Hz로 주어진 경우, 회전자 여자주파수 f_2 를 0.5Hz씩 변화시키면서 식 (13)으로 정의된 ds 의 변화에 대한 원동기 토크의 변화를 나타낸 그림이다.

$$ds = \frac{(f_1 + f_2) - f_{inv}}{f_1} \quad (13)$$

일정한 f_{inv} 에 대해 ds 가 커질수록 토크는 증가하며, 일정 ds 에 대해 f_{inv} 가 커질수록 토크는 작아진다. 또한 f_2 의 변화에 의해 원동기 구동주파수 f_{inv} 와 회전자 속도주파수 $(f_1 + f_2)$ 가 같아지면 ds 는 0가 되고, 이때 원동기는 토크를 발생하지 않는 상태가 된다. 즉, f_2 의 제어에 의해 발전기의 동작점을 이동할 수 있다.

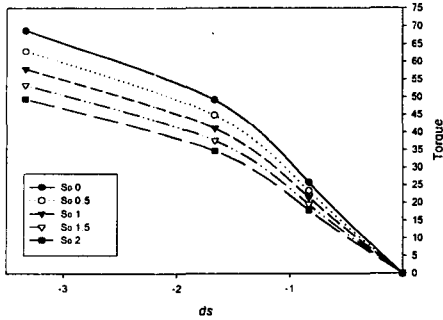


Fig. 3 Torque vs. system slip ds

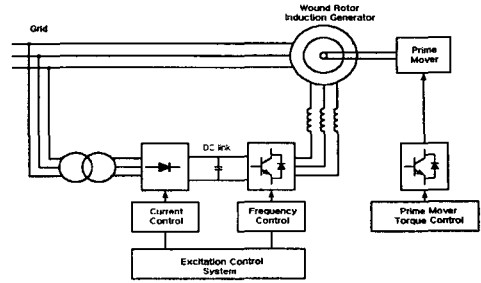


Fig. 4 Configuration of DFIG system

3. 실험

DFIG 시스템의 실험 구성도는 그림 4와 같다.

DFIG 발전기측에 연결된 토크 공급장치로는 3상 6극 7.5 kW의 농형유도전동기를 사용하였고, DFIG 발전기는 6극 5.5kW 권선형 유도발전기로 고정자와 회전자 양측 여자방식이고 고정자는 계통 3선 380V에 연계되어 있다. 회전자측은 변압기, 정류기, 인버터로 구성되어 있다. 계통과 연계된 변압기를 통하여 정류기에 전원을 공급하며, 이 정류기는 DC link를 통하여 인버터와 연결되어 있다. 이 인버터를 통하여 여자전원을 권선형 유도발전기의 회전자측으로 공급하여 준다. 주파수제어 인버터는 6개의 IGBT로 구성된 120° 도통형으로 제작하였고, 스위칭 전원은 DC 12V를 사용하였다. 주파수제어기의 게이팅회로는 UNITRODE사의 UC3875 칩(chip)의 주파수 조정핀에서 가변저항과 커패시터의 조절에 의해 공급 주파수를 결정하며, 조정범위는 0Hz~60Hz까지로 하였다. UC3875에서 발생된 펄스는 십진카운터와 OR 게이트의 조합을 이용, 120° 도통형으로 인버터의 게이트 신호를 만들고, 이는 다시 포토커플러를 거쳐 IGBT를 게이팅하도록 하였다.

그림 5는 ds 의 변화에 대한 고정자 역률의 변화를 나타내고 있다. 그림 5 (a)는 원동기 구동주파수 f_{inv} 를 66Hz로 인가한 후, 발전기의 회전자 여자주파수 f_2 를 0.5Hz 변화시켜 ds 를 변화시킨 경우이고 그림 5 (b)는 원동기 구동주파수 f_{inv} 를 69Hz로 인가한 경우이다. ds 의 증가에 의해 역률은 증가하나, ds 에 의한 역률의 향상은 한계가 있고, 따라서 역률을 더욱 증가시키기 위해서는 회전자 여자전압을 이용하여야 한다는 것을 알 수 있다. 일정한 ds 에 대해 회전자 여자전압이 증가할수록 역률이 향상된다. 역률의 향상 범위는 ds 가 클수록 증가하며, 회전자 전류의 정격값 제한에 의한 회전자 여자전압의 제한에 의해 역률의 증가는 제한된다. 만약 여자전류를 제한하지 않는다면 역률은 1까지 증가할 것이고, 지상역률에서 진상역률로 변환하게 될 것이다.

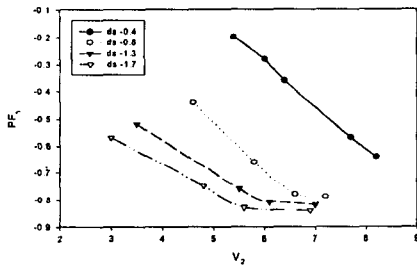
그림 6은 ds 의 변화에 대한 회전자 역률의 변화를 나타내고 있다. ds 의 증가에 의해 역률은 감소하다가 증가한다. ds 가 증가할수록 역률은 크게 나타나며, 항상 발전기의 상태에 놓여 있다. 그러나 ds 가 적을 경우에는 회전자측은 회전자 여자전압이 증가함에 따라 발전기모드에서 전동기모드로 변화함을 알 수 있다.

고정자 전류를 복소평면상에 나타내는 map은 V_1 을 실축에 놓는 전기기계의 보편적 방식을 택하였고, 원동기 구동주파수 f_{inv} 가 66Hz인 경우를 그림 7에 나타내었다. 무효전력이 3상한에 놓인다면 유도성 무효전력을 발전기가 받아들인다. 즉 기계의 코일이 소

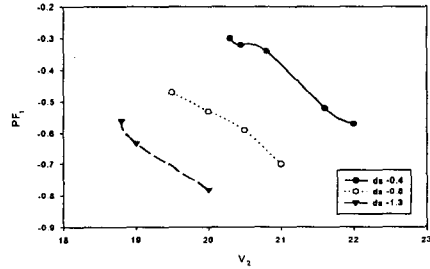
요하는 무효전력을 외부로부터 받아들임을 뜻한다. 일정한 ds 에 대하여 회전자 여자전압이 증가하더라도 유효전력은 변화가 없고 무효전력이 줄어듦을 알 수 있다. 즉, 회전자 여자전압을 제어함에 따라 무효전력을 제어할 수 있고, 이는 계통연계에서 무효전력을 줄이기 위한 콘덴서의 용량을 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

계통연계 유도발전기에서 무효전력의 보상이 큰 문제이므로, Vestas 사의 225kW급 풍력발전기인 V27의 경우, 역률보상을 위해 119kVAr의 콘덴서 용량이 필요하고, 이를 이용하여 역률을 0.99가 되도록 조정한다.

회전자 전류를 복소평면상에 나타내는 map은 그림 8과 같다. V_2 가 증가함에 따라 회전자측 공급무효전력이 커지고, 유효전력의 조류도 그 양상이 달라짐을 알 수 있다. V_2 가 적은 값일 때는 회전자측 전류조류가 밖으로 향해 있는 발전기 영역이었으나, V_2 가 커짐에 따라 전류조류가 안으로 향하는 전동기 영역으로 변함을 알 수 있다. 그러나 회전자측 전력크기는 고정자측 출력에 영향을 줄 수 있는 양이 되지 못하는 300W 미만으로 나타났다.

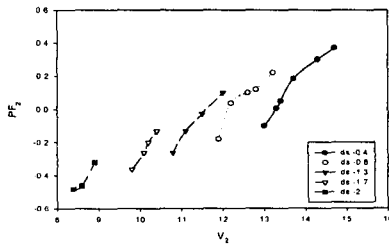


(a) $f_{inv} = 66\text{Hz}$

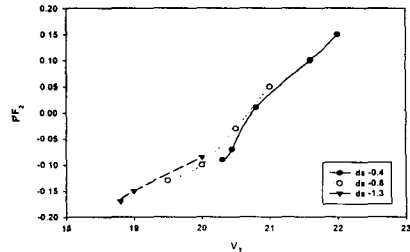


(b) $f_{inv} = 69\text{Hz}$

Fig. 5 Stator power factor versa V_2 in variation of ds



(a) $f_{inv} = 66\text{Hz}$



(b) $f_{inv} = 69\text{Hz}$

Fig. 6 Rotor power factor versa V_2 in variation of ds

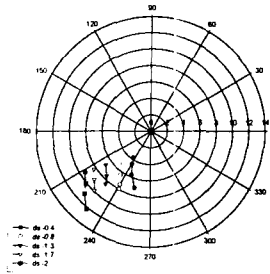


Fig. 7 Map of stator current

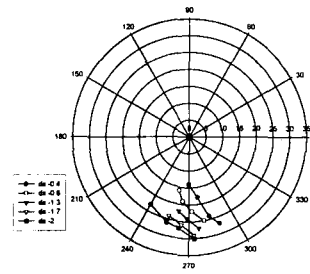


Fig. 8 Map of rotor current

4. 결론

이 논문에서는 무효전력의 제어를 위하여 회전자 여자전압과 여자주파수를 제어변수로 하였으며, 회전자 여자주파수를 제어함으로써 원동기의 속도와 역률 향상을 제어할 수 있음을 보였다. 그러나 회전자 여자주파수제어에 의한 역률의 향상은 한계가 있고, 이의 해결은 회전자 여자전압제어를 통하여 해결할 수 있다는 것을 실험을 통하여 확인하였다. Vestas사의 풍력발전기 예에서 보았듯이, 무효전력을 줄이기 위하여 큰 용량의 콘덴서가 필요하나, 이 논문에서 제안한 회전자 여자주파수와 여자전압의 제어에 의해 무효전력이 줄어들므로 콘덴서의 용량을 줄일 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. E. Akpınar, 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. 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. 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).
5. Longya Xu, Wei Cheng, "Torque and Reactive Power Control of a Doubly-fed Induction Machine by Position Sensorless Scheme," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 3, pp.636~642, May/June (1995).
6. 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).