

회전자 여자제어를 이용한 풍력발전 DFIG의 출력제어

(Power Control of the DFIG Using the Rotor Exciting Control)

이우석* · 오철수**

(Woo-Suk Lee · Chul-Soo Oh)

요 약

풍력발전은 넓은 범위의 속도제어를 요구하며, 권선형 유도발전기를 이용한 DFIG 시스템은 이러한 목적에 잘 부합한다. 본 논문은 동기속도 이상의 영역에서 풍속에 의한 원동기 속도의 증가에도 불구하고 회전자 여자 주파수를 슬립주파수와 다르게 인가하여 DFIG의 속도와 출력 제어를 다루고 있다. 속도제어와 동작점 이동의 해석을 위하여 토크 시뮬레이션을 하였고, 회전자 여자주파수와 전압 제어에 의해 출력이 정격값 이하의 안정된 영역에서 제어될 수 있음을 고찰하였다.

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 investigates speed and output stator power control using a grid connected to a DFIG in super-synchronous speed regions, by control of both magnitude and frequency of the voltage fed to the rotor. For the speed control analysis, torque simulation is performed whereby the different slip between operating motor driving frequency and synchronous frequency of M-G system applied. To keep the output rating of the generator, the exciting frequency and voltage attenuation are applied.

1. 서 론

미래 대체에너지 개발에 대한 관심이 고조되고, 20세기 중반 이후 각종 풍차의 개발이 가속화되면서 풍력발전은 새로운 에너지원으로서 연구되기 시작하였다[1].

현재 가장 현실성 있는 대체에너지로는 풍력과 태

양광이 주목을 이루고 있는데, 현 시점에서 설치단가를 비교해 보면 풍력 대 태양광의 같은 용량 대비 1:3정도가 되어 풍력의 경제성이 매우 높게 나타나고 있다. 이러한 이유 때문에 전체 대체에너지의 약 70[%]정도를 풍력이 분담하여야 할 것으로 생각된다.

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 발전

*정회원 : 경북대 대학원 전기공학과 박사과정

**정회원 : 경북대 전자전기공학부 교수

접수일자 : 1999년 5월 17일

이 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[2,3]. Cadirci 등은 콘버터를 구성하고 있는 사이리스터에 점도각제어를 이용하여, 회전자 여자전압의 크기와 위상각제어에 관한 정상상태 해석을 하였으며 이를 통하여 출력 제어를 하였다[4]. Pena 등은 벡터제어 기법을 풍력발전의 회전자 여자제어에 적용하여 원 동기 속도를 풍속에 대하여 최적의 출력이 나오도록 제어하여 넓은 범위의 속도제어를 가능하게 하였다 [5~7]. 그러나 지금까지의 연구는 콘버터의 성능향상을 위한 가격과 하모닉 문제 등의 해결을 위하여 회전자 속도와 동기속도의 차이인 슬립주파수를 회전자 여자주파수로 하여 인가해 주었고 회전자 여자 주파수를 슬립주파수와 다르게 인가한 경우에 대한 해석은 없었다.

본 연구는 동기속도 이상의 영역에서 풍속에 의한 원동기 속도의 증가에도 불구하고 회전자 여자주파수를 슬립주파수와 다르게 인가하여 계통연계된 풍력발전기의 속도와 출력을 제어할 수 있음을 실험을 통하여 증명하는데 목적이 있다.

2. DFIG의 회전자여자제어

2.1 DFIG 시스템

권선형 유도발전기는 고정자와 회전자를 통하여 여자를 할 수 있고 이러한 시스템을 갖춘 발전기를 DFIG (Doubly Fed Induction Generator)라 한다.

그림1은 모선에 연결된 경우의 DFIG 시스템의 개략도이다. 모선에서 변압기를 통하여 회전자로 여자 전류를 넣어줄 경우, 콘버터1은 인버터로 작용하고 콘버터2는 정류기로 동작하며, 회전자에서 모선으로 출력을 보내줄 경우 콘버터1과 콘버터2는 이와 반대로 동작한다. 콘버터1과 콘버터2의 제어를 통해 여자에 필요한 주파수와 여자전압, 위상각을 회전자로 투입할 수 있다.

그림2는 회전자 여자제어에 의한 슬립-토크 곡선이다. 동기속도 이하의 영역에서도 원하는 출력값에 해당하는 여자전원과 주파수를 투입한다면 발전이

가능함을 알 수 있다. 즉, A'점은 동기속도 이하의 영역이므로 전동기 영역이다. 그러나 회전자 여자를 통해 -T값의 토크를 인가한다면 동작점이 A점으로 이동하여 전동기영역인 동기속도 이하의 영역에서도 발전기로 동작할 수 있다.

동기속도 이상의 영역도 동작점을 이동시키는데 필요한 전력을 공급하여 주면 출력값을 원하는대로 제어가 가능하다. 동기속도 이상인 영역은 두영역으로 세분할 수 있다.

첫째, 동기속도와 정격속도 사이의 영역이다. 이 영역에서는 발전기는 동기속도와 정격속도 사이의 좁은 영역에서만 발전기로의 사용이 가능하다.

둘째, 정격속도 이상의 영역이다. 이 영역에서는 발전기가 정격출력을 넘어서므로 이 출력값을 제한하여야 한다. 따라서 회전자에 여자전원을 투입하여 출력과 역률을 제어한다.

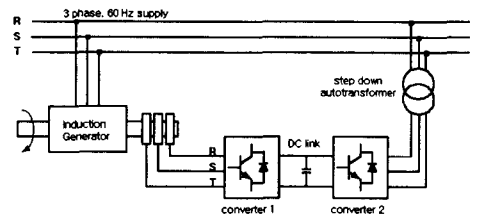


그림 1. DFIG 시스템 개략도
Fig. 1 DFIG system

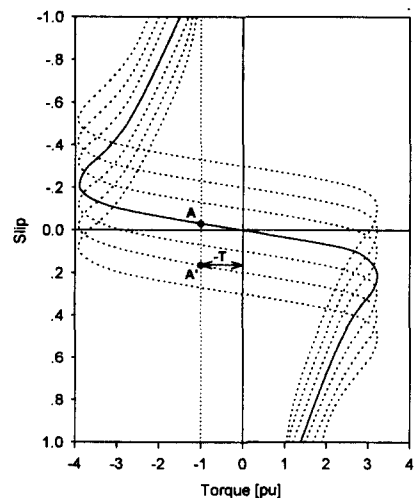


그림 2. 회전자 여자에 의한 슬립-토크 특성
Fig. 2. Slip-Torque characteristics by rotor exciting

2.2 전력조류

그림 3은 DFIG 시스템의 전력조류를 슬립이 $0 < s < 1$ (subsynchronous speed) 영역과 슬립이 $0 > s > -1$ (supersynchronous speed) 영역의 두 운전영역으로 나누어 고찰한 것이다. 그림 3 (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 전력을 회전자로부터 공급받는다면 동기속도이하에서도 발전기로 동작할 수 있다. 이 경우 회전자의 여자는 고정자의 여자전원에 의한 회전자계와 같은 방향으로 주어 져야 한다.

회전자측 공급전력 P_r 은 sP_{ag} 와 회전자내 손실 P_{cr} 을 공급하여야 하므로 다음과 같다.

$$P_r = sP_{ag} + P_{cr} \tag{1}$$

회전자측에서 회전자손실을 제외한 sP_{ag} 가 공급되므로 식 (2)로 되고, 발전기로 동작이 가능하게 되는 것이다.

$$P_{ag} = P_m + sP_{ag} \tag{2}$$

고정자측 발전전력 P_s 는 공급전력 P_{ag} 에서 고정자내 손실 P_{cs} 를 뺀 전력이 된다.

$$P_s = P_{ag} - P_{cs} \tag{3}$$

그림 3 (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 고정자와 회전자측의 출력과 역률을 제어하기 위하여, 회전자에서 여자제어를 할 경우, 회전자의 여자는 고정자의 여자전원에 의한 회전자계와 반대 방향으로 주어 져야 한다.

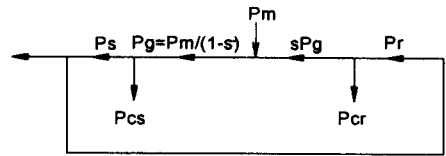
고정자측 발전전력 P_s 와 회전자측 발전전력 P_r 은 고정자동손을 P_{cs} 회전자동손을 P_{cr} 이라 하면

$$P_s = P_{ag} - P_{cs} \tag{4}$$

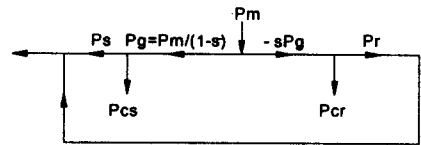
$$P_r = -sP_{ag} - P_{cr} \tag{5}$$

로 주어지고, 전체 발전전력 P_{total} 은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{total} &= P_s + P_r \\ &= P_{ag} - sP_{ag} - (P_{cs} + P_{cr}) \\ &= (1 - s)P_{ag} - (P_{cs} + P_{cr}) \\ &= P_m - (P_{cs} + P_{cr}) \end{aligned} \tag{6}$$



(a) Sub-synchronous speed



(b) Super-synchronous speed

그림 3. DFIG의 전력조류
Fig. 3. Power flow of DFIG

2.3 상태방정식

전력계통과 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 는 식 (7)과 같다

$$T = \frac{3}{\omega_{sM}} \frac{V_{th}^2}{(r_{th} + r_2'/s_M)^2 + (x_{th} + x_2')^2} \frac{r_2'}{s_M} \tag{7}$$

회전자 여자제어를 이용한 풍력발전 DFIG의 출력제어

이식에의 값들을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{V}_{th} = \frac{x_m}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2}} \overline{V}_1 \quad (8)$$

$$r_{th} = \frac{x_m^2 r_1}{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2} \quad (9)$$

$$x_{th} = \frac{r_1^2 x_m + x_1^2 x_m + x_1 x_m^2}{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2} \quad (10)$$

원동기의 속도 주파수 f_r 은 계통주파수 f_1 과 회전자 여자주파수 f_2 에 의해 결정되므로 f_r 은

$$f_r = f_1 + f_2 \quad (11)$$

로 된다. 따라서 원동기의 슬립 s_M 은

$$\begin{aligned} s_M &= \frac{f_{inv} - (f_1 + f_2)}{f_{inv}} \\ &= \frac{f_{inv} - f_r}{f_{inv}} \end{aligned} \quad (12)$$

로 표현되고, 원동기의 동기회전속도 ω_{sM} 은 인버터의 주파수에 의해 결정되므로 식 (13)과 같다.

$$\omega_{sM} = \frac{4\pi f_{inv}}{p} \quad (13)$$

원동기에서 발전기로의 입력 P_m 은

$$P_m = (1 - s_M)\omega_{sM}T \quad (14)$$

로 주어진다.

회전자 여자주파수 제어에 의해 공극전력이 P_{ag} 로 주어질 경우, P_{ag} 는 식 (15)와 같다.

$$P_{ag} = \frac{P_m}{1 - s} = \frac{(1 - s_M)\omega_{sM}T}{1 - s} \quad (15)$$

즉 발전기의 공극전력은 발전기의 회전자 여자주파수에 의해 제어된다. 그림 4의 DFIG의 등가회로를 이용하면, 식 (16), (17)에서 슬립 s 와 회전자 여자전압 V_2' 를 제어하여 고정자 전류 \overline{I}_1 과 회전자 전류 \overline{I}_2' 를 제어할 수 있고, 식 (18), (19)에서 고정자 동손 P_{cs} 과 회전자 동손 P_{cr} 를 구할 수 있다. 따라서 식 (4)과 (5)에서 출력을 제어할 수 있다.

$$\overline{V}_1 = \overline{I}_1(r_1 + jx_1) + jx_m(\overline{I}_1 - \overline{I}_2') \quad (16)$$

$$\frac{\overline{V}_2'}{s} = jx_m(\overline{I}_1 - \overline{I}_2') - \overline{I}_2'(r_2 + jx_2) \quad (17)$$

$$P_{cs} = 3I_1^2 r_1 \quad (18)$$

$$P_{cr} = 3I_2'^2 r_2' \quad (19)$$

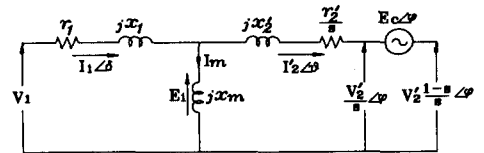


그림 4. 등가회로

Fig. 4. Equivalent circuit

2.4 시뮬레이션

그림 5는 f_{inv} 가 60, 63, 66, 69, 72Hz로 주어진 경우, 회전자 여자주파수 f_2 를 0.5Hz씩 변화시키면서 식 (20)으로 정의된 ds 의 변화에 대한 원동기 토크의 변화를 시뮬레이션한 그림이다.

$$ds = \frac{(f_1 + f_2) - f_{inv}}{f_1} \quad (20)$$

일정한 f_{inv} 에 대해 ds 가 커질수록 토크는 증

가하며, 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. 이러한 동작점의 이동을 그림 6에 나타내었고, 이는 x축을 각 속도 ω 의 값으로 나열한 것이다. 또한 회전자 여자주파수 f_2 에 의한 ds 의 변화에 따라 원동기 속도가 제어될 수 있음을 그림에서 보여준다.

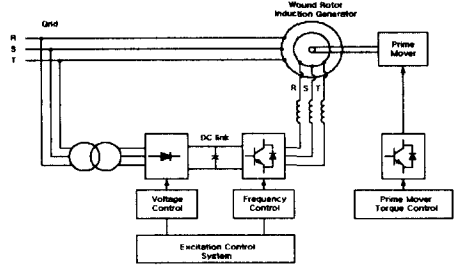


그림 7. DFIG의 구성도
Fig. 7 Configuration of DFIG system

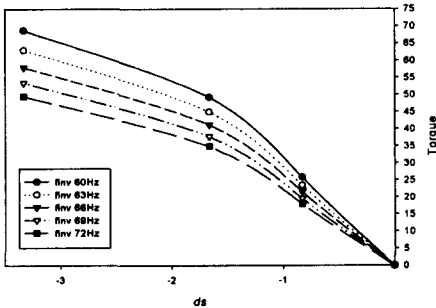


그림 5. 원동기 토크 대 슬립 ds
Fig. 5. Torque vs slip ds

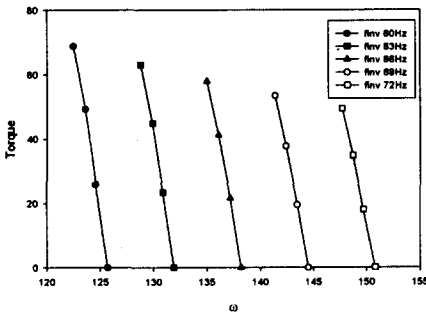


그림 6. 원동기 토크 대 기계속도
Fig. 6. Torque vs. machine speed

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시스템 구성

DFIG 시스템의 실험 구성도는 그림 7과 같다.

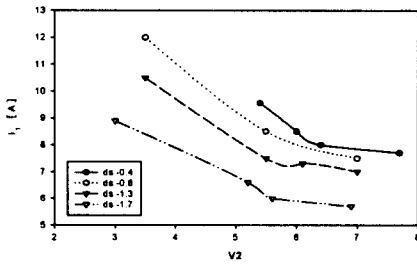
DFIG 발전기측에 연결된 토크 공급장치로는 3상 6극 7.5 kW의 농형유도전동기를 사용하였고, DFIG 발전기는 6극 5.5kW 권선형 유도발전기로 고정자와 회전자 양측 여자방식이고 고정자는 계통 3선 380V에 연계되어 있다. 회전자측은 변압기, 정류기, 인버터로 구성되어 있다. 계통과 연계된 변압기를 통하여 정류기에 전원을 공급하며, 이 정류기는 DC Link를 통하여 인버터와 연결되어 있다. 이 인버터를 통하여 여자전원을 권선형 유도발전기의 회전자측으로 공급하여 준다. 주파수제어 인버터는 6개의 IGBT로 구성된 120° 도통형으로 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 게이팅 신호를 만들고, 이는 다시 포토커플러를 거쳐 IGBT를 게이팅하도록 하였다.

3.2 출력특성

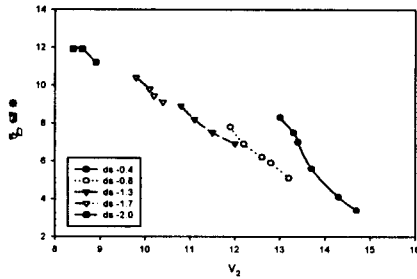
각 실험은 f_{inv} 를 원동기에 인가한 후, 발전기의 동작점을 무부하운전점으로 이동시키기 위하여 회전자 여자주파수 f_2 를 인가한 후에 0.25Hz 씩 감소하면서, 각 회전자 여자주파수에 대하여 회전자 여자전압을 변화시키면서 행하였다.

그림 8은 ds 의 변화에 대한 고정자 전류의 변화를 나타낸 것이다. 그림 8 (a)는 원동기 구동주파수

f_{inv} 를 63Hz로 인가한 후, 발전기의 회전자 여자주파수 f_2 를 3Hz로 인가하여 발전기의 동작점을 무부하점으로 이동시킨 후에 f_2 를 변화시켜 ds 를 변화시킨 경우이고 그림 8 (b)는 원동기 구동주파수 f_{inv} 를 66Hz로 인가한 경우이다. ds 의 증가에 의해 고정자 전류는 증가하나, 일정한 ds 에 대하여 회전자 여자전압이 증가하면 고정자 전류는 감소한다.



(a) $f_{inv} = 63\text{Hz}$



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

그림 8. 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 고정자 전류

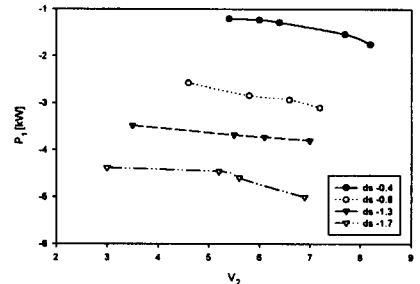
Fig. 8. I_1 versus V_2 in variation of ds

그림 9는 ds 의 변화에 대한 고정자 출력의 변화를 나타낸 것이다. 그림 9 (a)는 f_{inv} 를 63Hz로, 그림 9 (b)는 f_{inv} 를 66Hz로 인가한 경우이다. ds 가 증가함에 따라 고정자 출력값

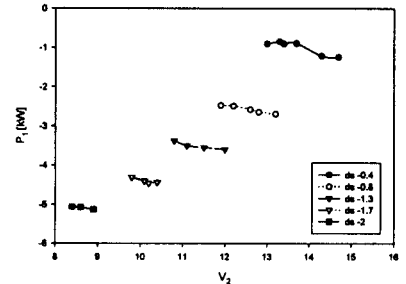
은 증가한다. 같은 ds 에 대해서는 회전자 여자전압이 증가하더라도 고정자 출력의 변화는 거의 없으나, 고정자 전류는 감소하였고, 이는 고정자측의 역률이 향상되고 있음을 의미한다.

그림 10은 ds 의 변화에 대한 회전자 전류의 변화를 나타낸 것이다. 회전자 전류는 ds 가 증가함에 따라 증가하며, 회전자 여자전압의 증가에 의해서도 회전자 전류는 증가한다. 그러나 회전자 전류는 실험에 사용한 발전기의 정격값인 24A로 제한 되어야 함으로 ds 와 V_2' 의 증가에는 한계가 있다.

그림 11은 ds 의 변화에 대한 회전자 출력의 변화를 나타낸 것이다. ds 의 증가에 의해 회전자 출력은 증가하고 회전자 여자전압이 증가하면 회전자 출력이 '-' 에서 감소하다가 '+'로 변하여 증가한다. '-' 는 회전자측이 발전기로 동작하여 출력이 회전자



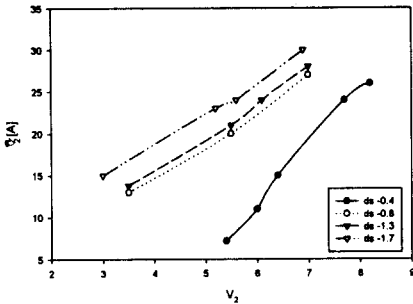
(a) $f_{inv} = 63\text{Hz}$



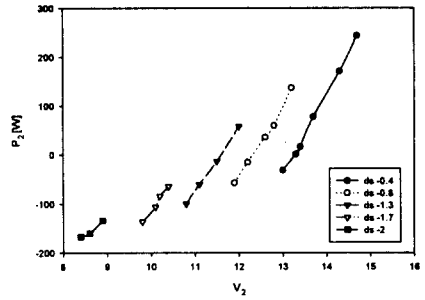
(b) $f_{inv} = 66\text{Hz}$

그림 9. 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 고정자 출력

Fig. 9. P_1 versus V_2 in variation of ds



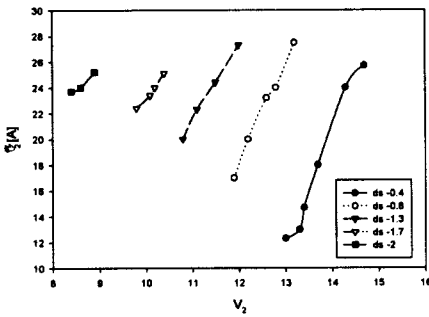
(a) $f_{inv} = 63\text{Hz}$



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

그림 11. 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 회전자 출력

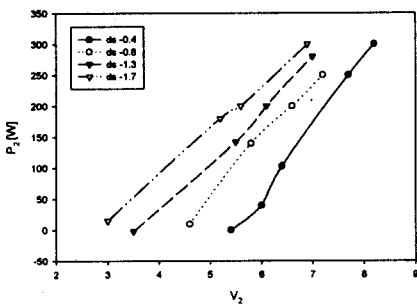
Fig. 11. P_2 versa V_2 in variation of ds



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

그림 10. 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 회전자 전류

Fig. 10. I_2 versa V_2 in variation of ds



(a) $f_{inv} = 63\text{Hz}$

측에서 계통모선쪽으로 보내고 있다는 것을 의미하며, 전압의 증가에 의해 '+'로 표시되는 영역은 회전자 측이 전동기로 동작하여 출력이 계통모선쪽에서 회전자측으로 들어오고 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 논문은 DFIG 시스템에서 회전자 여자전압과 여자주파수를 제어변수로 이용하여, 정격속도 이상의 영역에서 발전기가 안정된 운전을 하기 위한 기법을 제안하였고 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.

기존의 DFIG 계통연계 시스템의 연구는 회전자 여자주파수를 슬립주파수로 인가한 후, 회전자 여자전압 제어에 의해 의한 출력향상과 전력변환장치의 성능향상에 주 목적을 두었으나, 본 연구에서는 회전자 여자주파수를 이용하여 슬립주파수를 변화시켜 발전기 속도와 출력을 제어하였다.

제안한 방식으로 DFIG 시스템을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 회전자 여자주파수제어에 의해 발전기의 속도가 제어되고, 이에 의해 동작점이 이동하였다. 이러한 동작점의 이동은 발전기의 운전영역 확장을 가져올 수 있었다.

2) 고정자 출력이 회전자 여자주파수에 의해 결정

되고, ds 의 증가에 의해 고정자 출력이 증가하였다.

3) 회전자 여자전압에 의한 고정자 출력의 변화는 거의 없으나, 고정자 전류는 감소하였으며, 이는 고정자측의 역률이 향상된다는 의미한다.

4) ds 의 증가에 의해 회전자 출력은 증가하나, 300W미만으로 고정자 출력과 비교하여 작은 값으로 주어지고, 회전자 여자전압이 증가함에 따라 발전기 영역인 '-' 영역에서 감소하다가 전동기 영역인 '+'에서 증가하였다.

5) DFIG의 동작상태를 결정할 수 있는 제어변수는 f_2 , ds , V_2' 이고, 이를 적절히 조합하여 인가함으로써 DFIG 운전의 모드, 운전점, 출력을 제어할 수 있었다.

6) ds 와 회전자 여자전압의 증가에 의해 회전자 전류는 증가하였고, 이 회전자 전류는 발전기의 정격값까지로 제한되어야 함으로, 회전자 여자주파수와 회전자 여자전압의 범위는 발전기의 정격값까지 발생할 수 있는 값으로 제한되어야 한다.

본 연구에서 얻어진 결과들을 이용하여, 회전자 여자주파수제어를 통해 풍차의 운전속도 영역을 확장하는 가변속 운전 풍력발전기를 만들어 줌으로써, 풍력발전 시스템의 효율이 개선될 수 있을 것으로 생각한다.

참고문헌

- [1] R. David Richardson, Gerald M. Mcnemeey, "Wind Energy Systems", Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 3, pp.378~388, March 1993.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] I. Cadirci, M. Ernis, "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.
- [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.
- [6] 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.

- [7] 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.

◇ 저자소개 ◇

이 우 석 (李禹錫)

1968년 12월 12일 생. 1994년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

오 철 수 (吳哲洙)

1938년 8월 26일생. 1963년 독일 Stuttgart 공대 전기공학과 졸업. 1966년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1966년~1972년 독일 Siemens사 근무. 1984년~현재 경북대 공대 전자전기공학부 교수