

풍력발전용 권선형 유도발전기의 회전자 여자주파수를 이용한 속도와 출력제어

論 文
48B-7-1

A Speed and Power Control of DFIG Using the Exciting Frequency for Wind Power Generating

李 禹 錫* · 吳 哲 洙**
(Woo-Suk Lee · Chul-Soo Oh)

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 the speed and power control using the Grid connected DFIG in the super-synchronous 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 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.

Key Words : Grid-connected, Doubly Fed Induction Generator, Wind power generating, Speed and power control

1. 서 론

현대 산업사회의 급속한 발달과 함께 에너지소비의 빠른 증가는 석탄, 석유등의 화석에너지 고갈에 대한 위기감과 더불어, 화석에너지 사용으로 인한 대기환경 오염문제 등이 지구 자체를 위협하므로 인해, 세계 각국의 미래 대체에너지 개발에 대한 관심을 고조시키는 계기가 되었고 20세기 중반 이후 각종 풍력발전 시스템이 개발되기 시작하였다[1].

국내의 연구는 1980년대 후반부터 권선형 유도발전기의 회전자 여자제어에 관한 연구가 이루어져 동기속도 이하의 운전영역과 독립발전에 관한 연구가 주를 이루었다[2,3]. 독립발전의 경우 정전압, 정주파수 발전을 위하여 부하변화에 따른 유효전력과 무효전력을 제어하여야 한다. 그러나, 정전압, 정주파수 발전에만 관심을 두었으며, 출력량을 어떻게 제어할 것인가에 대한 언급은 없었다.

국외의 연구는 1980년대 초반에서 1990년대 초반까지 한방향 제어기를 이용한 발전기 회전자의 슬립전력의 환원에 관한 연구가 이루어져 발전기의 효율 향상을 이루었다[4,5]. 그러나 이는 회전자를 여자하는 방식을 이용한 것은 아니고 속도제어에 의한 운전영역의 확장에 대한 연구는 미약하였다. 싸이리스터를 이용하여 회전자 여자전압의 위상각을 제어하여 출력을 제어하였으나 역률에 관한 언급은 없었다[6].

1990년대에 벡터제어 기법을 풍력발전의 회전자 여자제어에

적용하여 유효전력과 무효전력의 독립적 제어를 하였다[7-9]. 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 주관심을 둔 것이다.

이 연구는 동기속도 이상의 영역에서 회전자 여자주파수와 회전자 여자전압에 의해 풍력발전기의 속도, 출력, 역률의 제어가 이루어질 수 있음을 보이고 이를 실험을 통하여 증명하는데 목적이 있다.

계통연계 DFIG 시스템의 경우, 고정자가 모선에 연결되어 고정자 출력주파수가 계통주파수로 고정되어 있으므로 회전자 속도는 회전자 여자주파수에 의해 결정된다. 지금까지의 연구는 회전자 속도와 동기속도의 차이인 슬립주파수를 회전자 여자주파수로 하여 인가해 주었다[6-9].

본 논문에서는 회전자 권선을 통해 회전자 여자주파수를 인가함으로써 발전기 속도와 출력의 제어가 이루어지고, 발전기 고정자의 역률이 회전자 여자전압을 변화시킴으로써 향상될 수 있음을 실험을 통하여 입증하고자 한다. 또한 동기속도 이상의 운전구간에서 동작점의 이동에 의한 운전영역의 확장을 고찰한다.

2. DFIG의 회전자 여자제어

2.1 DFIG 시스템

권선형 유도발전기는 고정자와 회전자를 통하여 여자를 할 수 있고 이러한 시스템을 갖춘 발전기를 DFIG (Doubly Fed

* 正 會 員 : 慶 北 大 工 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

** 正 會 員 : 慶 北 大 工 大 電 子 電 氣 工 學 部 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1999年 1月 4日

最 終 完 了 : 1999年 6月 3日

Induction Generator)라 한다.

그림 1은 계통연계된 DFIG 시스템의 개략도이다. 모선에서 변압기를 통하여 회전자에 여자전류가 인가될 경우 CONV1은 인버터로, CONV2는 정류기로 동작시키며, 회전자에서 모선으로 출력이 반환될 경우 CONV1은 정류기로 CONV2는 인버터로 동작시킨다. CONV1과 CONV2의 제어를 통해 회전자 여자전압의 크기와 주파수를 제어할 수 있다.

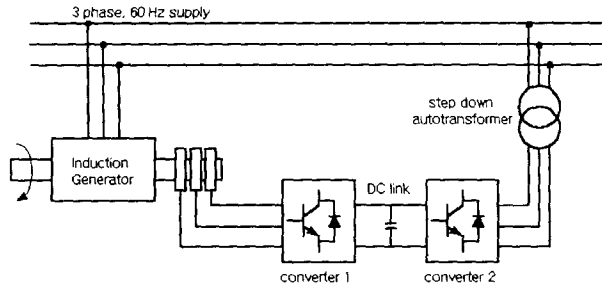


그림 1 DFIG 시스템 개략도
Fig. 1 DFIG system

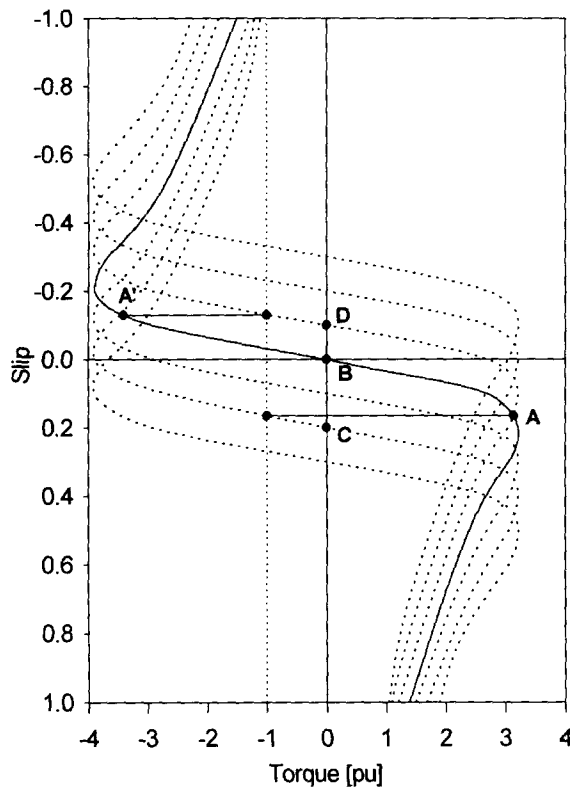


그림 2 회전자 여자에 의한 슬립-토크 특성
Fig. 2 Slip-Torque characteristics by rotor exciting

그림 2는 회전자 여자제어에 의한 슬립-토크 곡선이다. 토크가 '+'로 나타나면 기계가 전동기로, '-'이면 발전기로 작용함을 나타낸다. 회전자 여자를 이용하여 동작점을 이동시켜주면 발전이 가능함을 알 수 있다[2]. A점은 동기속도 이하의 영역이므로 전동기 영역이다. 그러나 회전자 여자를 통해 동작점을 B점에서

C점으로 이동시켜주면 전동기영역인 동기속도 이하의 영역에서도 토크가 -1pu가 발생하여 발전기로 동작할 수 있다. 동기속도 이상의 영역에서 A' 점은 정격토크 -1pu를 넘어서는 영역이므로 발전기가 안정된 동작을 할 수 없다. 그러나 회전자 여자를 이용하여 동작점을 B에서 D로 이동시켜주면 토크가 -1pu가 발생하여 발전기가 안정된 동작을 할 수 있다.

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($P_{ag} > P_m$), 회전자 여자 없이는 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 동상여자로 한다[3].

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

$$P_r = sP_{ag} + P_{cr} \quad (1)$$

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_s 는 공급전력 P_{ag} 에서 고정자내 손실 P_{cs} 를 뺀 전력이 되므로

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

이다.

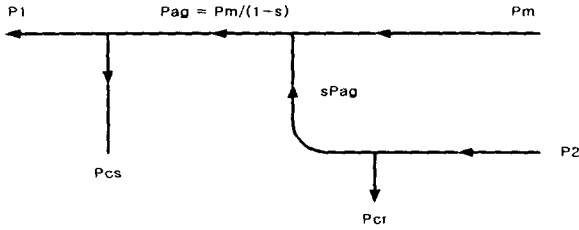
그림 3 (b)의 동기속도 이상의 영역에서는 원동기로부터 전달되는 전력 P_m 은 고정자측에 전달되는 전력 P_{ag} 보다 크므로($P_m > P_{ag}$), 발전기로 동작한다. 그러나 고정자와 회전자측의 출력과 역률을 제어하기 위하여, 회전자에서 여자제어를 할 경우, 회전자의 여자는 고정자의 회전자계와 반대 방향으로 주어져야 하고, 이 때를 역상여자로 한다[3].

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

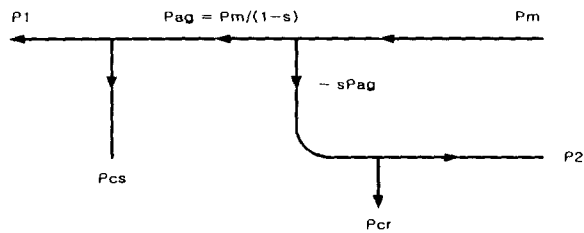
$$P_s = P_{ag} - P_{cs} \quad (4)$$

$$P_r = -sP_{ag} - P_{cr} \quad (5) \quad f_r = f_1 + f_2 \quad (10)$$

이다.



(a) Sub-synchronous speed



(b) Super-synchronous speed

그림 3 DFIG의 전력조류
Fig. 3 Power flow of DFIG

2.3 등가회로와 특성방정식

계통 연계된 DFIG에서 원동기의 회전주파수는 권선형 유도발전기의 전원 주파수 f_1 과 회전자 여자주파수 f_2 에 의해 결정되고, 풍차로 시뮬레이션된 원동기가 농형 유도기로 구성되어 있을 경우, 원동기의 축토크 T 는

$$T = \frac{3}{\omega_{sM}} \frac{V_{th}^2}{(r_{th} + r_2'/s_M)^2 + (x_{th} + x_2')^2} \frac{r_2'}{s_M} \quad (6)$$

이고, 이 식에서의 값들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{V}_{th} &= \frac{x_m}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2}} \overline{V}_1 \\ r_{th} &= \frac{x_m^2 r_1}{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2} \\ x_{th} &= \frac{r_1^2 x_m + x_1^2 x_m + x_1 x_m^2}{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

발전기 기계 주파수 f_r 은 계통주파수 f_1 과 회전자 여자 주파수 f_2 에 의해 결정되므로 f_r 은

이다. 따라서 원동기의 슬립 s_M 은

$$\begin{aligned} s_M &= \frac{f_{inv} - (f_1 + f_2)}{f_{inv}} \\ &= 1 - \frac{f_r}{f_{inv}} \end{aligned} \quad (11)$$

로 되고, 원동기의 동기회전속도 ω_{sM} 은 인버터의 주파수에 의해 결정되므로

$$\omega_{sM} = \frac{4\pi f_{inv}}{p} \quad (12)$$

이 되고, 원동기에서 발전기로의 입력 P_m 은

$$P_m = (1 - s_M)\omega_{sM}T \quad (13)$$

이다.

회전자 여자주파수 제어에 의해 공극전력 P_{ag} 는

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

이다.

s 는 발전기의 슬립으로

$$s = \frac{f_1 - f_r}{f_1} \quad (15)$$

이다.

식 (6)에서 원동기 토크 T 는 회전자 여자주파수에 의해 제어되므로 식 (14)에서 발전기의 공극전력 P_{ag} 도 발전기의 회전자 여자주파수에 의해 제어된다. 그림 4의 DFIG의 등가 회로를 이용하면, 식 (16), (17)에서 슬립 s 와 회전자 여자 전압 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)와 (5)에서 출력을 제어할 수 있다. 또한 식 (20), (21)에서 역률 제어도 가능하다.

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

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

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

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

$$P_s = 3V_1 I_1 \cos \delta \quad (20)$$

$$P_r = 3V_2' I_2' \cos(\varphi - \theta) \quad (21)$$

위 특성방정식에서 s , V_2' 를 제어한다면 P_m , I_1 , I_2' 가 제어되므로 고정자측과 회전자측의 출력과 역률을 제어할 수 있다.

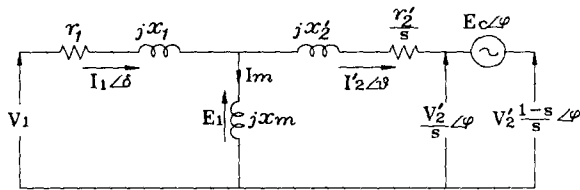


그림 4 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit

3. 실험과 고찰

3.1 시스템 구성

DFIG 시스템의 실험 구성도는 그림 5와 같다.

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

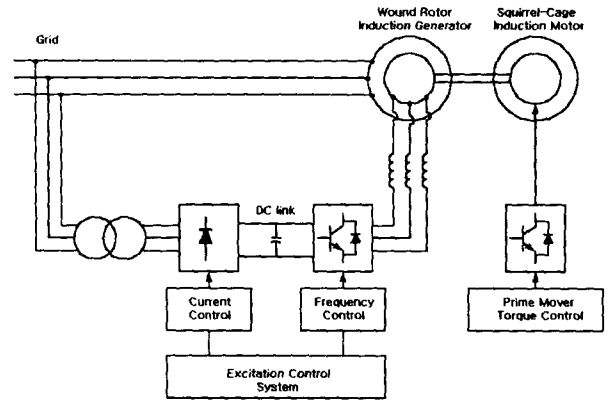


그림 5 DFIG의 구성도
Fig. 5 Configuration of DFIG system

3.2 토크 시뮬레이션

전동기의 슬립은 현재 운전되는 회전수와 동기회전수와 차이로 나타내는데, 발전기-전동기 시스템의 회전수 ω 는 회전자 여자주파수 f_2 에 따라 고정되어진다. 즉 회전자 여자주파수 f_2 를 3Hz로 인가한 경우 발전기속도는 $f_1 + f_2$ 에 의해 1260rpm의 일정속도로 제어된다. 이의 의미는 풍속의 증가에 의하여 원동기 속도가 증가하려고 하더라도, 발전기의 회전자 여자주파수에 의해 원동기가 일정속도로 고정되고, 이 주파수를 제어하여 풍차발전기를 가변속으로 운전함으로써 시스템의 운전영역을 확장할 수 있음을 뜻한다.

회전자 여자주파수 f_2 를 변화시켜, 발전기 측에 토크 T 를 공급하도록 한다. 이 토크는 풍력발전기의 풍차가 발전기에 토크를 공급하는 것을 시뮬레이션 한 것으로, 본 실험에서는 농형유도전동기 7.5kW, 6극을 이용하여 토크를 발생토록 하였다.

표 1은 f_{inv} 가 60, 63, 66, 69, 72Hz로 주어진 경우, 회전자 여자주파수 f_2 를 0.5Hz씩 변화시키면서 식 (22)로 정의된 ds 를 계산한 값으로 나타내었다.

$$ds = \frac{(f_1 + f_2) - f_{inv}}{f_1} = 1 - \frac{f_{inv} - f_2}{f_1} \quad (22)$$

그림 6은 f_{inv} 를 변수로 하여 식 (6)에서 계산한 토크를 나타낸 그림이다. 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. 그림 6을 원동기의 속도축 ω 로 나타내면 그림 7과 같고, 그림 7은 f_2 의 제어에 의해 발전기의 동작점을 이동할 수 있음을 보여준다.

표 1 f_{inv} 및 f_2 값의 변화에 따른 ds

Table 1 f_{inv} and ds in variation of f_2

f_{inv}	$ds =$	0	-0.8	-1.6	-2.5	-3.3	-4.1	-5.0
60	$f_2 =$	0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0
63		3	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0
66		6	5.5	5.0	4.5	4.0	3.5	3
69		9	8.5	8.0	7.5	7.0	6.5	6
72		12	11.5	11.0	10.5	10.0	9.5	9

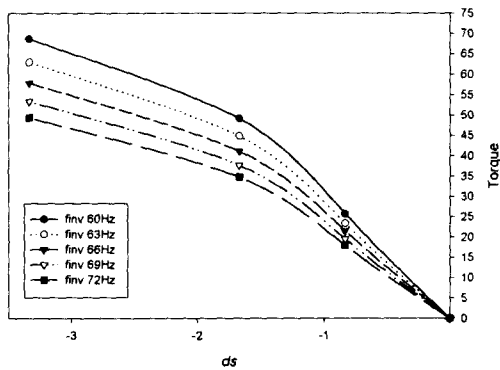


그림 6 원동기 토크 대 슬립 ds

Fig. 6 Torque vs slip ds

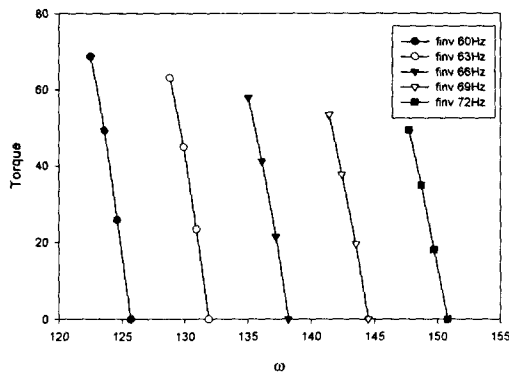


그림 7 원동기 토크 대 기계속도

Fig. 7 Torque vs. machine speed

3.3 발전기 시뮬레이션

2.3절의 특성 방정식을 이용하여 발전기의 고정자 출력과 고정자 역률을 시뮬레이션 한 것이 그림 8과 그림 9이다. 그림 8과 그림 9는 원동기 구동주파수 f_{inv} 를 63Hz로 인가한 후, f_2 를 2.75Hz, 2.5Hz, 2.25Hz, 2Hz로 인가하여 얻은 ds 에 대하여 회전자 여자전압 V_2' 를 변화시키면서 시뮬레이션 하였다.

그림 8에서 고정자 출력은 회전자 여자전압의 변화에는 거의 영향을 받지 않고 ds 의 증가에 의해 증가한다. 즉 고정자 출력은 회전자 여자주파수에 의해 제어가 된다.

그림 9에서 일정한 ds 에 대하여 회전자 여자전압이 증가하면 고정자 역률이 증가한다. 또한 일정한 회전자 여자전압에 대해 ds 가 증가하면 고정자 역률은 증가한다. 즉 그림 8의 ds 에 의해 고정자 출력이 주어지면 회전자 여자주파수를 증가함으로써 역률을 향상시킬 수 있다.

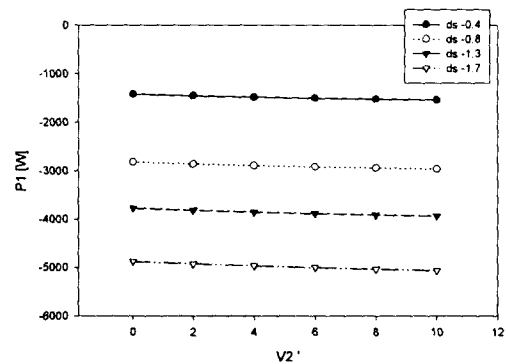


그림 8. 고정자 출력 대 회전자 여자전압

Fig. 8. Stator power vs. rotor exciting voltage

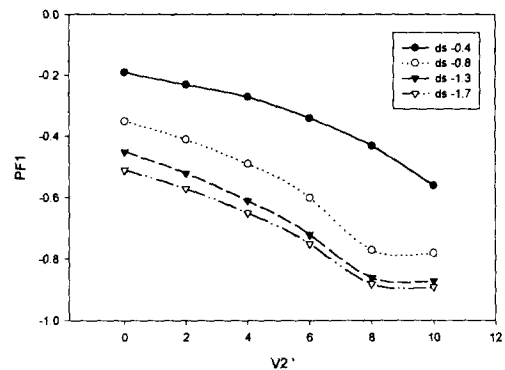


그림 9 고정자 역률 대 회전자 여자전압

Fig. 9 Stator power factor vs. rotor exciting voltage

3.4 발전기의 출력과 역률

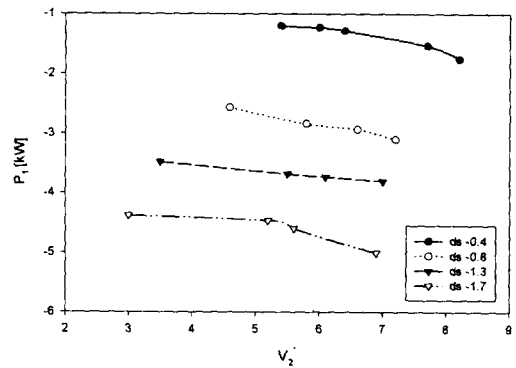
각 실험은 표 1과 같이 f_{inv} 를 원동기에 인가한 후, 발전기의 동작점을 무부하운전점으로 이동시키기 위하여 회전자 여자주파수 f_2 를 인가한 후, f_2 를 0.25Hz 씩 감소시키면서 회전자 여자전압의 변화에 대한 고정자 출력, 고정자 역률, 고정자 전류의 변화를 알아보았다.

그림 10은 회전자 여자전압 V_2' 의 변화에 대한 고정자 출력을 나타낸 것이다. 그림 10 (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 0.25Hz 씩 감소시켜서 얻은 ds 에 따라 얻어진 발전기 출력이다. 그림 10 (b)는 원동기 구동주파수 f_{inv} 를 66Hz로 인가한 경우이다. ds 가 증가함에 따라 고정자 출력은 증가한다. 같은 ds 에 대해서는 회전자 여자전압이 증가하더라도 고정자 출력의 변화는 거의 없고, 고정자 출력은 회전자 여자주파수 f_2 에 결정된다. 이는 그림 8의 고정자 출력 시뮬레이션에서 예측한 바와 같다. 시뮬레이션의 출력과 비교하여 실험의 출력이 작게 나타나는 이유는 풍손, 마찰손, 철손 등의 영향이라 생각된다.

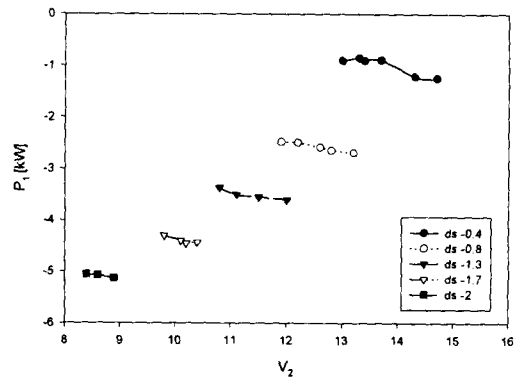
그림 11은 V_2' 의 변화에 대한 고정자 역률을 나타낸 것이다. 같은 ds 에 대해 회전자 여자전압이 증가할수록 역률이 -1 쪽으로 향상된다. 전류의 방향을 계통에서 발전기 인입으로 선정하고, 역률이 -1 이라는 것은 전류와 전압의 위상차가 180° 인 경우이다. 이는 그림 9의 고정자 역률 시뮬레이션에서 예측한 바와 같다. 손실의 영향에 의해 실험치와 시뮬레이션치가 약간의 차이가 있으나, 회전자 여자전압의 변화에 의한 고정자 역률의 경향은 비슷하다.

그림 12는 고정자 전류의 궤적을 복소평면상에 나타내어 크기와 위상을 동시에 볼 수 있게 한 것이다. 여기서 V_1 을 실축에 놓는 전기기계의 보편적 방식을 택하였다. 동심원은 고정자 전류의 크기를 나타내며, 전류의 궤적이 3상한에 놓이면, 이 구간의 횡축은 발전(유효)전력이며, 종축은 유도성 무효전력의 소모(Accepting inductive power)이다. V_1 을 x축의 실축으로 택하였으므로 피상전력 S 의 방향은 고정자 전류의 궤적과 방향이 같다. 그림 12에서 유효전력은 ds 에 비례하여 자리잡고, 무효전력은 V_2' 에 비례하여 자리잡음을 알 수 있다. 회전자 여자전압을 제어함에 따라 무효전력을 제어할 수 있고, 이는 계통연계에서 무효전력을 줄이기 위한 콘덴서의 용량을 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

유도발전기가 풍력발전기에 적용되어 계통연계로 운전될 경우, 유도발전기의 여자전류를 계통으로부터 공급받아야 하고, 이의 보상용으로 발전기의 정격용량의 1/2에 해당하는 용량의 콘덴서를 설치한다. 예를 들어 Vestas 사의 225kW급 풍력발전기 V27의 경우, 역률보상을 위해 119kVAr의 콘덴서를 설치한다. DFIG의 경우 회전자 여자전압 V_2' 를 적절히 선정함으로써 발전기가 필요로하는 무효전력을 현저히 줄일 수 있음을 알 수 있고, 이로 인해 전력보상용 콘덴서의 용량을 줄일 수 있는 장점이 있다.



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

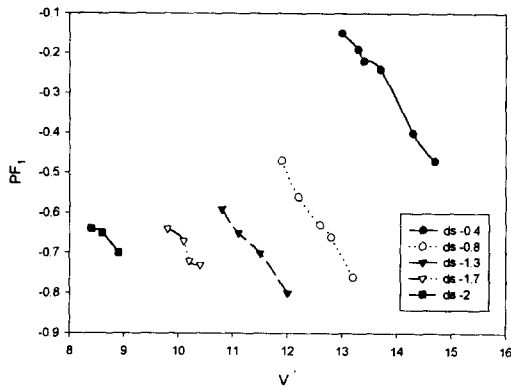


(b) $f_{inv} = 66\text{Hz}$

그림 10 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 고정자 출력
Fig. 10 P_1 versa V_2' in variation of ds

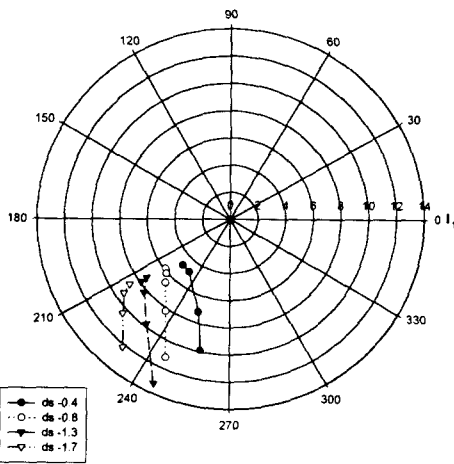


(a) $f_{inv} = 63\text{Hz}$

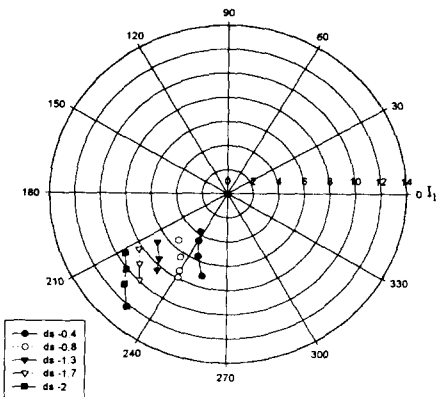


(b) $f_{inr} = 66\text{Hz}$

그림 11 슬립변화에 대한 회전자 여자전압과 고정자 역률
Fig. 11 Stator power factor versus V_2' in variation of ds



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



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

그림 12 고정자 전류특성
Fig. 12 Map of stator current

4. 결 론

이 논문은 풍력발전용 DFIG 시스템에서 회전자 여자전압과 여자주파수를 제어변수로 이용하여, 정격속도 이상의 영역에서 발전기의 출력과 토크를 제어하기 위한 기법을 제안하였고, 제안한 방식으로 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 회전자 여자주파수제어에 의해 발전기의 속도를 가변시킬 수 있고, 이로서 발전기의 운전영역 확장을 가져올 수 있었다.
 - 2) 실험 셋으로 시뮬레이션한 토크는 주어진 속도범위 안에서 어느 속도에서든 필요토크를 얻을 수 있었다.
 - 3) 축토크가 각 속도에 대해 ds 로 나타낼 수 있음을 확인하였고, 이 축토크에 따라 고정자 출력이 비례하여 나타났었다. 즉 ds 의 증가에 의해 고정자 출력이 증가함을 확인하였다.
 - 4) 회전자 여자전압에 의한 고정자 출력의 변화는 거의 없으나, 고정자 전류는 감소하는 것을 확인하였으며, 이는 고정자측의 역률이 향상됨을 뜻한다.
 - 5) 고정자 역률의 향상은 회전자 여자전압제어를 통하여 이룰 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.
 - 6) DFIG의 동작상태를 결정할 수 있는 제어변수는 f_2 , ds , V_2' 이고, 이를 적절히 조합하여 인가함으로써 DFIG 운전의 모드, 운전점, 출력을 제어할 수 있음을 확인하였다.
- 이 연구에서 얻어진 결과들은 회전자 여자주파수제어를 효과적으로 활용할 수 있는 응용분야인 풍력발전에 적용할 수 있으며, 이를 통하여 풍차의 운전속도 영역을 확장하는 가변속 운전 풍력발전기를 만들어 줌으로써, 풍력발전 시스템의 효율개선에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] R. David Richardson, Gerald M. Mcnerney, "Wind Energy Systems," Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 3, pp.378~388, March 1993.
- [2] 박민호, 정승기, 이진우, "회전자 교류여자방식의 자립형 유도발전기의 정상 상태 해석," 대한전기학회 논문지 제37권 제1호, pp.33~39, 1988.
- [3] 안진우, 황영문, "권선형 유도발전기의 CVCF 발전을 위한 2차여자제어법에 관한 연구," 대한전기학회 논문지 제40권 제7호, pp.656~663, 1991.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

부 록

1. 권선형 유도 발전기 제원

출력	5.5 kW
전압	380V, 3상, 60Hz
전류	16.6A
극수	6극
정격회전수	1,154rpm
정격슬립	3.81%
고정자 권선 상당 저항	0.95Ω
회전자 권선 상당 저항	0.07Ω
자화리액턴스	56Ω
고정자 누설리액턴스	4.27Ω
회전자 누설리액턴스	4.27Ω
회전자 정격전류	24A
권선비 $N_1 : N_2$	4.75

2. 농형 유도 전동기 제원

출력	7.5 kW
전압	380/220V, 3상, 60Hz
전류	17.8/30.8A
극수	6극
정격회전수	1,175rpm
정격슬립	2.1%
고정자 권선 상당 저항	0.45Ω
회전자 권선 상당 저항	0.36Ω
자화리액턴스	56Ω
고정자 누설리액턴스	1.76Ω
회전자 누설리액턴스	2.89Ω

저 자 소 개



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.

Tel : 053-950-5603

E-mail : wslee@palogong.kyungpook.ac.kr



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(공학박). 1966년~1972년 독일 Siemens사 근무. 1984년 ~현재 경북대 공대 전자전기공학부 교수

Tel : 053-950-5603

E-mail : csob@bh.kyungpook.ac.kr