

이중여자 유도발전기의 정출력 · 최적역률 운전

(A constant power and optimal power factor drive of doubly fed induction generator)

이 우 석

(Woo-Seok Lee)

요 약

본 논문에서는 동기속도 이상의 풍속 영역에서 계통연계된 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) 시스템을 이용하여 발전기의 속도, 출력, 역률 제어에 대한 연구를 하였다. 이를 위하여 회전자 권선을 통하여 회전자 여자 주파수와 전압을 인가하였고, DFIG의 전력조류와 등가회로의 정상상태 식을 해석하였다. 발전기의 속도와 고정자 일정출력제어는 회전자 여자주파수에 의해 이루어지고, 발전기의 정상적인 동작은 회전자 여자전류가 정격값을 넘어서는 안된다. 따라서 회전자 여자주파수에 의한 일정 출력운전상태에서 회전자 여자전류를 정격값이 되도록 회전자 여자전압을 제어하여, 고정자 역률이 최적이 되도록 DFIG를 운전하였다

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, power, and power factor 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. The wind turbine speed and constant stator power were controlled by the rotor exciting frequency. 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. Consequently, it is possible to determine the optimal drive of a DFIG for wind power generation application.

1. 서 론

환경오염과 화석자원 고갈로 인해, 20세기 중반 이후 대체에너지 공급원으로써 각종 풍력발전 시스템이 개발되기 시작하였다[1].

풍력발전은 풍황조건에 따라 효율적인 운전을 위

해 터빈의 형태와 발전기의 선정이 중요하고, 현재 넓은 풍속에 대하여 발전기 운전이 가능한 권선형 유도발전기를 사용한 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[2,3]. 그러나 이는 회전자를 여자하는 방식을 이용

* 정회원 : 부산정보대학 전기전자계열 전임강사
접수일자 : 2000년 4월 28일

이중여자 유도발전기의 정출력·최적역률 운전

한 것이 아니고 속도제어에 의한 운전영역의 확장에 대한 연구는 미약하였다.

1990년대에 벡터제어 기법을 풍력발전의 회전자 여자제어에 적용하여 유효전력과 무효전력의 독립적 제어를 하였다[4-6]. 이는 양방향 제어기에 필요한 컨버터 2대에 대하여, 한 대의 컨버터가 유효전력을 제어한다면, 나머지 한 대의 컨버터는 무효전력을 제어하도록 하여 독립된 제어가 가능하게 한 것이다. 이는 전력변환장치를 제작하는데 필요한 소자의 가격문제와 하모닉 문제등에 관련된 전력변환장치의 성능향상에 주관심을 둔 것이다.

본 논문은 동기속도 이상의 풍속영역에서 회전자 여자주파수와 회전자 여자전압에 의해 풍력발전기의 속도, 출력, 역률의 제어가 이루어질 수 있음을 보이고 또한 정적출력에 대하여 최적의 역률을 제어할 수 있음을 증명하는데 목적이 있다.

회전자 권선을 통해 회전자 여자주파수를 인가함으로써 발전기 속도와 출력의 제어가 이루어지고, 발전기 고정자의 역률이 회전자 여자전압을 변화시킴으로써 향상될 수 있음을 실험을 통하여 입증하고자 한다.

2. 이중여자 유도발전기

2.1 이중여자 유도발전기의 원리

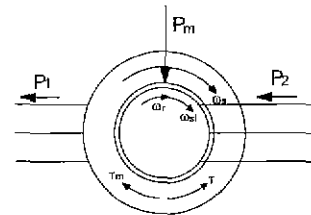
이중여자 유도발전기는 회전자와 고정자를 각각 여자할 수 있고, 이러한 발전기를 DFIG라 한다.

동기속도 이하와 동기속도 이상의 영역에서 이중여자 유도발전기의 운전상태를 그림 1에 나타내었다.

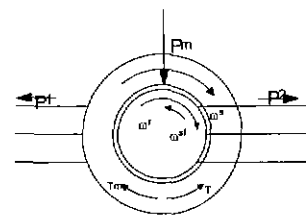
그림 1 (a)는 회전자속도 ω_r 이 계통주파수의 각속도 ω_s 보다 작은 경우인 동기속도 이하영역에서의 운전상태를 나타내고 있다. 고정자 여자를 사용하는 일반적인 유도기의 경우 동기속도 이하영역에서는 발전기로 동작할 수 없다. 이는 그림 1 (a)에서처럼 회전자는 회전자제의 방향과 같은 방향인 시계방향의 토크를 발생하고 회전자 속도주파수 f_r 이 전원주파수 f_1 보다 뒤지므로 이 유도기는 모터링으로 동작하게 된다. 그러나 이중여자 유도기를 이용하여 회전자를 통해 ω_{sl} (시계방향)의 속도를 갖는 회전

자계가 발생토록 하면, 이 회전자제는 회전자에 반시계방향의 토크로 작용하여 외부 기동토크 T_m 에 대한 역토크 T 를 발생하고 f_r 이 f_1 보다 앞서게 되므로 이 유도기는 동기속도 이하에서도 발전기로 동작하게 된다

그림 1 (b)는 ω_r 이 ω_s 보다 큰 경우인 동기속도 이상영역에서의 운전상태를 나타내고 있으며 ω_{sl} 은 음수가 되어 반시계방향으로 회전한다. 외부토크 T_m 에 의해 ω_r 이 ω_{sl} 보다 크게 회전된다면 회전자에 ω_s 에 대해 반대방향의 내부 토크가 발생하고 f_r 이 f_1 보다 앞서게 되므로 발전기로 동작하게 된다. 그리고 회전속도는 고정자 여자주파수 ω_s 와 회전자 여자주파수 ω_{sl} 에 의해 결정된다.



(a) 동기속도 이하



(b) 동기속도 이상

그림 1 이중여자 유도발전기의 운전상태
Fig. 1. The operating modes of DFIG

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 동기속

도 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 전력을 회전자로부터 공급받는다면 동기속도이하에서도 발전기로 동작할 수 있다. 이 경우 회전자의 여자는 고정자의 여자전원에 의한 회전자계와 같은 방향으로 주어져야 하고, 이때를 동상여자라 한다.

회전자측 공급전력 P_2 는 sP_{ag} 와 회전자내 손실 P_{cr} 을 공급하여야 하므로

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

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_1 은 공극전력 P_{ag} 에서 회전자내 손실 P_{cs} 를 뺀 전력이 되므로

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

이다.

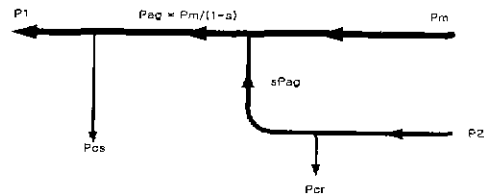
그림 2 (b)의 동기속도 이상의 영역에서 원동기로부터 전달되는 전력 P_m 은 고정자측에 전달되는 전력 P_{ag} 보다 크므로 ($P_m > P_{ag}$), 발전기로 동작한다. 그러나 고정자와 회전자측의 출력과 역률을 제어하기 위하여, 회전자에서 여자제어를 할 경우, 회전자의 여자는 고정자의 회전자계와 반대 방향으로 주어져야 하고, 이때를 역상여자라 한다.

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

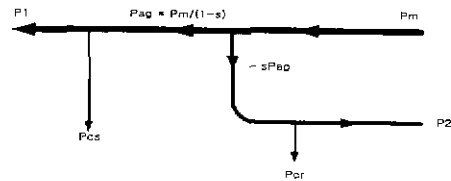
$$P_1 = P_{ag} - P_{cs} \quad (4)$$

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

이다.



(a) 동기속도 이하



(b) 동기속도 이상

그림 2. 이중여자 유도발전기의 전력흐름도
Fig. 2. Power flow of DFIG

2.2 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

$$T = \frac{3}{\omega_M} \frac{\overline{V}_{th}^2}{(r_{th} + r_2'/s_M)^2 + (x_{th} + x_2')^2} \frac{r_2'}{s_M} \quad (6)$$

이고, 이 식에서의 값들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{V}_{th} = \frac{x_m}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2}} \overline{V}_1 \quad (7)$$

$$r_{th} = \frac{x_m^2 r_1}{r_1^2 + (x_1 + x_m)^2} \quad (8)$$

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

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

이중여자 유도발전기의 정출력·최적역률 운전

$$f_r = f_1 + f_2 \quad (10)$$

이다. 따라서 원동기의 슬립 s_M 은

$$s_M = \frac{f_{inv} - (f_1 + f_2)}{f_{inv}} \quad (11)$$

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

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

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 3은 이중여자 유도발전기의 DFIG 모드에서 한 상에 대한 등가회로이다. V_1 은 모선에서 고정자에 인가된 상전압이고, V_2'/s 는 고정자측으로 환산한 회전자 여자전압이다. V_1 의 위상각을 기준으로 하였고, 철손, 마찰손, 풍손을 무시하였다. 등가회로를 이용하면, 식 (16), (17)에서 슬립 s 와 회전자 여자전압 V_2' 를 제어하여 고정자 전류 $\overline{I_1}$ 과 회

전자 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 역률제어도 가능하다. 즉 본질의 특성방정식에서 s , V_2' 를 제어한다면 P_m , I_1 , I_2' 가 제어되므로 고정자측과 회전자측의 출력과 역률을 제어할 수 있다.

$$\overline{V_1} = \overline{I_1}(r_1 + jx_1) + jx_m(\overline{I_1} - \overline{I_2}') \quad (16)$$

$$\frac{\overline{V_2}'}{s} = jx_m(\overline{I_1} - \overline{I_2}') - \overline{I_2}'\left(-\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) \quad (17)$$

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

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

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos \delta \quad (20)$$

$$P_2 = 3V_2' I_2' \cos(\varphi - \theta) \quad (21)$$

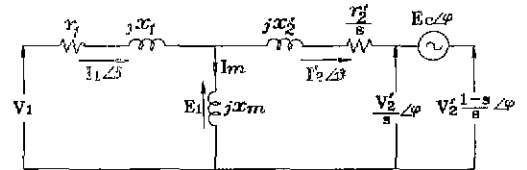


그림 3. 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit

3. 실험과 고찰

3.1 시스템 구성

DFIG 시스템의 실험 구성도는 그림 4와 같다.

이중여자 유도발전기는 6극 5.5[kW]로 고정자는 계통 3상 380[V]에 연계되어 있고 고정자와 회전자의 이중여자를 이용하여 정격속도 이상의 속도에서

발전기 정격값을 넘어서는 출력을 정격값 이하의 출력으로 제한할 수 있다. 회전자측은 변압기, 제어정류기, 인버터로 구성되어 있다. 계통과 연계된 변압기를 통하여 제어정류기에 전원을 공급하며, 이 제어정류기는 DC 링크를 통하여 인버터와 연결되어 있다. 이 인버터를 통하여 여자전원을 권선형 유도발전기의 회전자측으로 공급하여 준다.

주파수제어 인버터는 120[V], 60[A] 정격인 IGBT 6개로 구성된 120° 도통형으로 구성하였다. 정류기와 인버터사이에 직류 평활 콘덴서를 삽입하였고, 정류기를 통해 계통과 연결하였다. 주파수제어 인버터는 이중여자 유도발전기의 회전자측에 주파수를 공급하는 인버터이다. 주파수제어 인버터의 게이팅회로는 UNITRODE사의 UC3875 칩(chip)의 주파수 조정핀에서 가변저항과 커패시터의 조정에 의해 공급 주파수를 결정하며, 조정범위는 0[Hz] ~ 60[Hz]까지로 하였다. UC3875에서 발생된 펄스는 십진카운터와 OR 게이트의 조합을 이용, 120° 도통형으로 인버터의 게이트 신호를 만들고, 이는 다시 포토커플러를 거쳐 IGBT를 게이팅하도록 하였다.

원동기와 DFIG 시스템(M-G system)에서 실험을 위한 원동기 구동주파수 f_{inv} 와 회전자 여자주파수 f_2 의 관계를 운전점 슬립 ds 로 정의하면 다음과 같다.

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

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

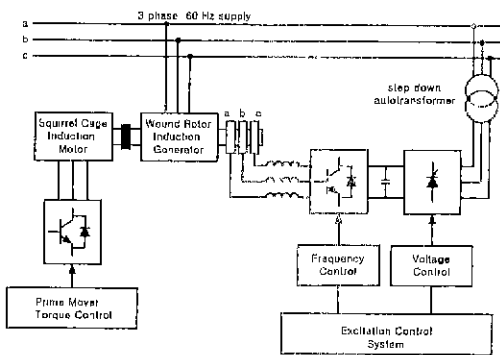


그림 4. DFIG 시스템 구성도
Fig. 4. Configuration of DFIG

3.2 일정출력 특성

주어진 원동기 구동주파수에 대하여 회전자 여자주파수를 변화시켜 일정출력 특성을 실험하였다. 각 원동기 구동주파수 f_{inv} 에 대하여 일정출력을 내도록 하였을 때, 회전자 여자주파수에 대한 ds 를 선택하여 고정자 전류, 고정자 역률, 회전자 전류를 측정하였다.

그림 5는 고정자 출력이 5[kW]와 5.5[kW]의 일정출력일 경우, 원동기 구동주파수 f_{inv} 에 대한 ds 를 나타낸 것이다. f_{inv} 가 커지면 ds 의 값을 크게 하여 일정출력을 발생할 수 있고 같은 f_{inv} 에 대하여 고정자 출력이 커지기 위해서는 ds 의 값이 커져야 한다. 5.5[kW]의 출력을 발생할 경우가 5[kW]의 정출력을 발생할 경우보다 ds 의 변화폭이 크다. 실험에 사용한 발전기의 정격출력이 5.5[kW]이므로 ds 를 조절하여 정격출력을 발생할 수 있고, 이는 ds 에 의해 최적의 출력이 제어 가능함을 보여준다.

그림 6은 일정출력으로 운전될 경우, 원동기 구동주파수 f_{inv} 에 대한 회전자 여자전압 V_2 를 나타낸 것이다. 같은 f_{inv} 에 대하여 5[kW]와 5.5[kW]의 두 경우, V_2 는 거의 같다. 이는 원동기 속도가 주어질 경우, 회전자 여자전압은 출력의 제어에 영향을 미치지 않고 회전자 여자주파수가 출력에 영향을 미치기 때문이다.

그림 7은 일정출력으로 운전될 경우, 원동기 구동주파수 f_{inv} 에 대한 고정자 전류를 나타낸 것이다. f_{inv} 가 증가하면 고정자 전류는 감소한다.

그림 8은 일정출력으로 제어될 경우, 원동기 구동주파수 f_{inv} 변화에 대한 고정자 역률 PF_1 을 나타낸 것이다. 원동기 구동주파수가 증가할수록 역률이 향상되고, 이는 정출력을 발생하기 위한 회전자 여자전압의 크기가 증가하기 때문이다.

그림 9는 일정출력으로 운전될 경우, 원동기 구동주파수 f_{inv} 에 대한 회전자 전류를 나타낸 것이다. 원동기 구동주파수가 증가하면 회전자 여자전류도 증가하고, 이는 회전자 여자전압이 증가하기 때문이

다. 고정자출력 5[kW]와 5.5[kW]를 비교하면, f_{inv} 가 63[Hz]에서 67[Hz]까지의 영역에서는 회전자 여자전류의 차이가 크지만 67[Hz] 이상의 영역에서는 회전자 여자전류의 차이가 적어진다.

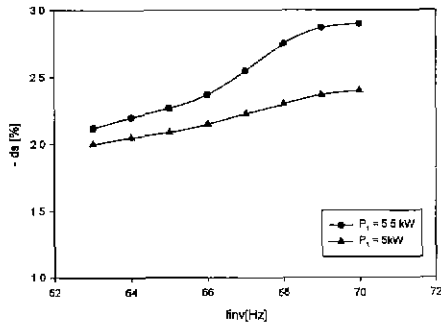


그림 5. 일정출력에서 ds와 원동기 구동주파수
Fig. 5. ds vs. f_{inv} at constant power

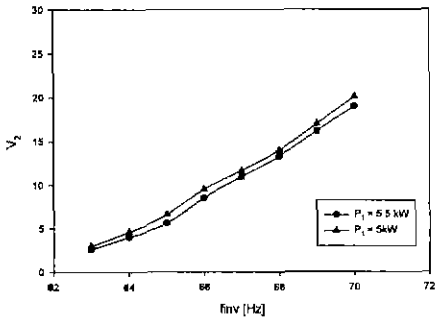


그림 6. 일정출력에서 회전자 여자전압과 원동기 구동 주파수
Fig. 6. V_2 vs. f_{inv} at constant power

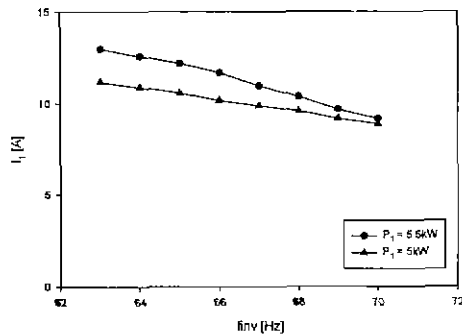


그림 7. 일정출력에서 고정자 전류와 원동기구동주파수
Fig. 7. I_1 vs. f_{inv} at constant power

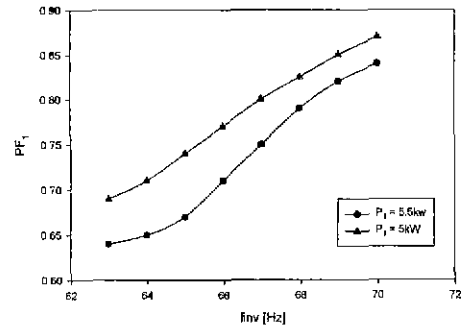


그림 8. 일정출력에서 고정자 역률과 원동기구동주파수
Fig. 8. PF_1 vs. f_{inv} at constant power

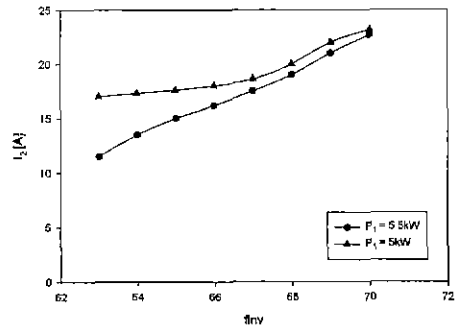


그림 9. 일정출력에서 회전자 전류와 원동기 구동주파수
Fig. 9. I_2 vs. f_{inv} at constant power

3.3 최적운전

DFIG의 최적운전이란 일정출력에서 역률이 가장 높은 운전점으로 정의 할 수 있고, 이때의 고정역률 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. 발전기의 안정된 동작을 위하여 회전자 여자전압은 유도발전기의 회전자 전류 정격값인 24[A]일 때의 여자전압값으로 제한되어야 한다. 따라서 회전자 전류가 24[A]가 되도록 회전자 여자전압을 증가시키고, 이 때의 역률이 일정출력에 대한 최적의 역률이 된다.

일정출력의 최적운전에서 고정자 역률, 고정자 전류, 회전자 여자전압을 측정하였고 출력은 5.5[kW], 5.0[kW]로 하였다.

그림 10은 최적운전 시, 원동기 구동주파수 f_{inv} 변화에 대한 고정자 역률을 나타낸 것이다. 고정자 역률이 0.9 이상으로 향상되었고 그림 8의 고정자 역률과 비교하면 역률이 크게 증가하였고, 원동기 구동주파수가 작을수록 역률의 증가폭이 커졌다. 이는 원동기 구동주파수가 작을수록 일정출력을 내기위한 ds 가 작아지기 때문이다.

그림 11은 최적운전 시, 원동기 구동주파수 f_{inv} 변화에 대한 고정자 전류를 나타낸 것이다. f_{inv} 가 증가하면 고정자 전류는 줄어든다. 그림 7과 비교하면 같은 f_{inv} 에 대하여 고정자 전류는 감소하고, 이는 회전자 여자전압이 증가하였기 때문이다.

그림 12는 최적운전 시, 원동기 구동주파수 f_{inv} 변화에 대한 회전자 여자전압 V_2 를 나타낸 것이다. f_{inv} 가 증가하면 회전자 정격전류 24[A]로 고정하기 위한 회전자 여자전압이 증가한다

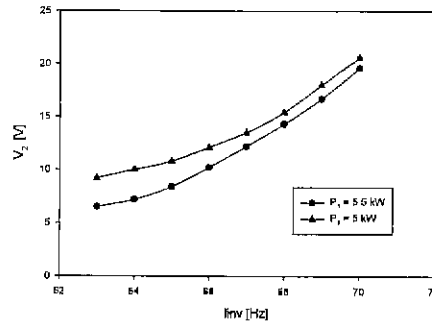


그림 12. 최적운전 시, 회전자 여자전압과 원동기 구동주파수

Fig. 12. V_2 vs. f_{inv} at optimal drive

4. 결론

본 연구에서는 계통연계 DFIG 시스템에서 회전자 여자주파수와 회전자 여자전압의 변화가 발전기의 출력에 미치는 영향을 해석하고, 동기속도 이상의 영역에서 DFIG의 최적운전조건을 알아보았으며, 이러한 최적운전조건을 만족하는 회전자 여자전압 V_2 와 회전자 여자주파수 f_2 의 관계를 규명하였다.

기존의 DFIG 계통연계 시스템의 연구는 회전자 여자주파수를 슬립주파수로 인가한 후, 회전자 여자전압제어에 의한 출력향상과 전력변환장치의 성능향상에 주 목적을 두었으나, 이 연구에서는 회전자 여자주파수를 이용하여 슬립주파수를 변화시켜 발전기 속도와 출력을 제어하였고, 회전자 여자전압을 변화시켜 역률을 제어하였다.

이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 회전자 여자주파수 f_2 의 변화를 통해, 각 운전점에서 발전기의 출력을 제어할 수 있었고, 일정출력 운전을 하였다. 즉 발전기의 출력은 회전자 여자주파수의 함수로 주어지는 ds 에 의해 영향을 받으며 ds 가 증가할수록 출력은 증가한다. 그러나 회전자 여자전압에 의해서는 출력은 거의 영향을 받지 않는다. 이는 출력이 원동기의 속도에 의한 슬립에 주 영향을 받는다는 것을 의미한다. 회전자 여자주파수 f_2 의 제어범위는 각 원동기속도에 대해 발전기의 정격값까지 발생할 수 있는 출력값으로 제한되어야

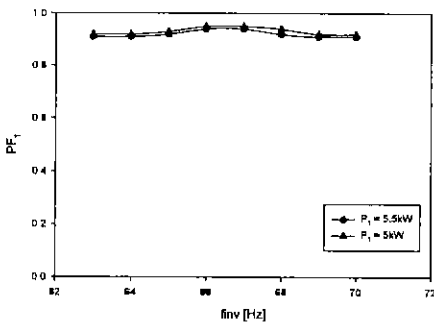


그림 10. 최적운전시, 고정자역률과 원동기구동주파수
Fig. 10. PF_1 vs. f_{inv} at optimal drive

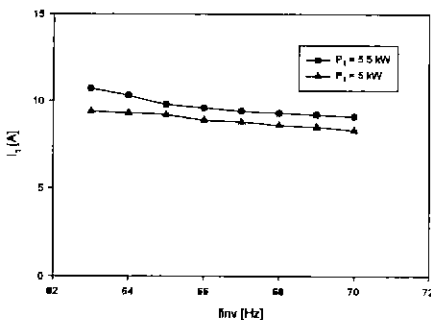


그림 11. 최적운전시, 고정자전류와 원동기구동주파수
Fig. 11. I_1 vs. f_{inv} at optimal drive

이중여자 유도발전기의 정출력·최적역률 운전

한다는 것을 실험을 통하여 확인하였다. 이는 원동기의 발생출력이 회전자 여자주파수에 의해 발전기의 정격값을 초과하는 값으로 주어진다면 발전기가 원동기의 속도를 제어할 수 없는 상태가 되어 원동기-발전기 셋트가 떨어지는 현상이 발생하고 안정된 운전을 할 수 없기 때문이다.

(2) 회전자 여자주파수 f_2 의 제어에 의한 일정출력 운전 상태에서 V_2 를 변화시켜 회전자 전류를 정격값으로 제어함으로써 최적의 역률로 발전기를 운전할 수 있었다. 따라서 풍속에 의한 임의의 원동기 속도에 대하여 발전기를 최적운전상태로 운전할 수 있다. 발전기를 정격출력 5.5[kW]의 일정출력으로 운전 시, 회전자 여자전압을 허용구간의 하한값에서 회전자 전류의 정격값까지 증가시키면, 원동기 구동주파수 f_{inv} 가 63[Hz]에서 역률이 0.66으로부터 0.93까지, 65[Hz]에서 역률이 0.72로부터 0.94까지 개선된다. 이러한 역률 향상에 의해 발전기가 소요하는 무효전력이 줄어들고, 이로서 무효전력 보상콘덴서의 용량을 줄일 수 있다.

(3) 제안한 이중여자 유도발전기의 최적운전은 원동기 속도의 변화가 심한 풍력발전에 응용할 수 있으며, 출력과 역률을 동시에 제어함으로써 발전기의 효율을 향상시킬 수 있다.

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] 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.
- [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.

이중여자 유도발전기 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 N1 : N2	4/5

기호표

E_1 고정자 유기기전력	f_2 회전자 여자주파수
I_1 고정자 전류	f_r 회전자 속도주파수
I_2 회전자 전류	f_{inv} 원동기 구동주파수
I_2' 고정자로 환산한 회전자 전류	r_1 고정자 권선 저항
I_m 자화전류	r_2 회전자 권선 저항
P_{ag} 공극전력[W]	s 슬립[%]
P_{cr} 회전자 동손[W]	s_M 원동기 슬립
P_{cs} 고정자 동손[W]	x_m 자화 리액턴스
P_m 발전기축 출력[W]	x_1 고정자 권선의 누설 리액턴스
P_f 발전기 출력[W]	x_2 회전자 권선의 누설 리액턴스
P_2 회전자입력, 출력	ω_r 발전기 기계속도
T 토크	ω_{sl} 슬립주파수
T_m 외부누동토크	ω_s 전원주파수의 속도
V_{th} 테브난의 등가전압	ω_{sf} 동기회전속도
V_1 고정자 단자전압	β 회전자 전류 위상각
V_2 회전자 여자전압	δ 고정자 전류 위상각
V_2' 고정자로 환산한 회전자 여자전압	φ 회전자 여자전압 위상각
ds 운전점의 슬립	
f_1 전원주파수	

◇ 저자소개 ◇

이 우 석(李煥錫)
1968년 12월 12일 생 1994년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년~1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 현재 부산정보대학 전기전자계열 전임강사.