

DFIG의 역률특성

김철호* 이우석** 공정식*** 서영택**** 오철수*
 *경북대학교 전기공학과 **부산정보대학, ***서라벌대학, ****구미1대학

Power Factor Characteristic of DFIG

Chul-Ho Kim* Woo-Suk Lee** Jeong-Sik Kong*** Young-Taek Seo**** Chul-Soo Oh*
 *Kyungpook Nat. Univ. **Busan College of Info. Tech ***Sorabol College ****Kumi College

Abstract - This paper deals with power factor of doubly fed induction generator for wind power generation in range of sub- and super-synchronous speed. To supply active and reactive power to grid, stator is connected to grid directly and rotor is connected to back-to-back PWM inverter for excitation. According to excitation level, DFIG could operate at the different mode, i.e., unity, leading, and lagging power factor.

슬립, 회전자 인가주파수, 회전속도, 각속도의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_s} \quad (2)$$

$$\omega_m = \frac{2\pi}{p} (f_1 - f_2) \quad (3)$$

여기서 s 는 슬립, ω_s 는 동기속도, ω_m 은 실제속도, f_1 은 고정자 주파수, f_2 는 회전자 여자주파수, p 는 쌍극수이다.

1. 서 론

풍력 발전기 중에서 고정자 권선을 계통에 직결시키고, 회전자 권선을 인버터를 거쳐 계통에 연결하는 구조인 이중여자 유도발전기(Doubly Fed Induction Generator)에 대해 동기속도 이상과 이하의 넓은 속도 범위에서 고정자와 회전자의 역률특성을 해석하였다. 고정자가 계통에 전원공급을 하고 있을 때 계통에서 요구하는 역률을 만들어 주기 위해 속도의 변수와 회전자의 여자상태가 미치는 영향을 연구하였다. DFIG는 동기속도를 기준으로 그 이상과 이하에서 회전자 여자방식이 반대이고, 손실이 없는 이상적인 상태에서 회전자 출력 또한 그 방향이 반대가 된다. 속도변수와 회전자 여자의 상태에 따라 계통에 무효전력을 공급하는 과정에서 기계 입력에 대한 고정자와 회전자로의 출력관계를 해석하였다.

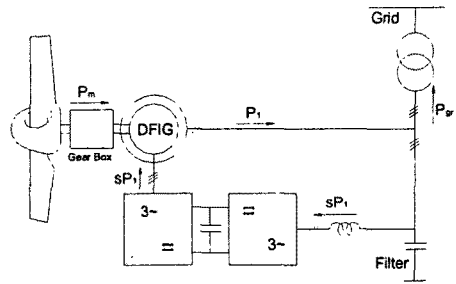


그림 1. DFIG 풍력발전기의 구조

2. 본 론

2.1 DFIG의 원리와 구조

DFIG는 풍력 등 원동기의 속도가 일정치 않은 대체 에너지 발전에 널리 이용될 수 있다. 그림 1에 DFIG를 이용한 풍력발전시스템을 나타내었는데, 고정자는 계통에 바로 연결되고 회전자는 두 대의 PWM 인버터를 거쳐 계통에 연결된다. [1] 유도기에는 슬립이 존재하고 슬립이 영이되는 동기속도를 기준으로 그 이상에서 발전기로 동작하는 것으로 알려져 있다. DFIG는 여자가 고정자와 회전자 모두에서 가능하고 동기속도 이하에서는 회전자 여자를 통해 고정자에서 출력이 나오고 회전자에 슬립전력이 공급된다. 반면, 동기속도 이상에서는 고정자와 회전자에서 출력이 나오게 되어 계통측에 가까운 인버터가 계통과 동기화가 이루어 져야 DFIG 시스템이 구성된다. [2][3] 회전자에서의 출력은 슬립전력이므로 속도변화범위에 따라 달라지는데, 고정자 출력의 30% 정도이다. DFIG에서 손실이 없는 이상적인 입력력 관계식은 다음과 같고, 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_m = (1 - s)P_1 \quad (1)$$

여기서, P_m 는 기계입력, s 는 슬립, P_1 은 고정자 출력이다.

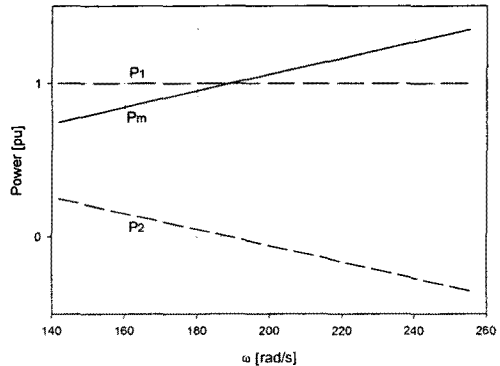


그림 2. 이상적인 속도 출력

2.2 DFIG의 특성방정식

DFIG의 등가회로를 기준으로 한 고정자와 회전자 전압 전류방정식은 다음과 같다.

$$\overline{V}_1 = \overline{I}_1(R_1 + jX_1) + jX_m(\overline{I}_1 - \overline{I}_2) \quad (4)$$

$$\frac{\overline{V}_2}{s} = \overline{V}_m - \overline{I}_2(R_2 + jX_2) \quad (5)$$

$$\overline{V}_m = jX_m \overline{I}_m \quad (6)$$

$$\overline{I_m} = \overline{I_1} - \overline{I_2} \quad (7)$$

여기서 $\overline{V_1}$ 은 고정자 전압, $\overline{I_1}$ 은 고정자 전류, $\overline{V_2}$ 는 회전자 여자전압, $\overline{I_2}$ 는 회전자 전류, $\overline{V_m}$ 은 자화리액턴스 유기기전력, $\overline{I_m}$ 은 자화전류, R_1 는 고정자 저항, R_2 는 회전자 저항, X_1 은 고정자 누설리액턴스, X_2 는 회전자 누설리액턴스, X_m 은 자화리액턴스이다.
위 식에서 슬립과 관계되는 속도와 회전자 여자변수를 적절히 가변하여 고정자측의 역할을 제어하게된다.

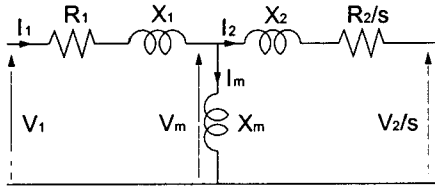


그림 3. DFIG의 등가회로

2.3 DFIG 실험

실험장치의 구현은 풍차를 모사하기 위해 0.7kW정격의 직류전동기를 DFIG의 동축에 연결하여 일정토크제어를 하였다. 출력의 측정을 위해 고정자 출력단과 회전자 출력단에 Voltech사의 PM3000A Power Analyzer를 각각 설치하였다. DFIG의 정격과 파라미터는 표 1에 제시하였다.

표 1. DFIG의 정격과 파라미터
Table 1 Rating and parameter of DFIG

출력	1 kW	R_1	3.0 Ω
전압	220 V, 3상	R_2	6.3 Ω
전류	3.2 A	X_1	5.1 Ω
극수	4	X_2	5.1 Ω
권선비	1.27	X_m	69.2 Ω

2.3.1 계통측 인버터의 위상동기화

계통측 인버터는 동기속도 이하에서 정유기로 동작하지만 동기속도 이상에서는 회전자에서 출력이 빠져 나오므로 인버터동작을 해야한다. 따라서 계통과 동기화가 이루어져야 하는데, 이를 위해 PWM 게이트신호를 만들기 위한 정현파를 계통전압에서 받아와서 삼각파와 비교하였다. 이때 인버터 PWM전압과 계통전압을 그림 4에 나타내었고, PWM 전압과 전류를 그림 5에 나타내었다.

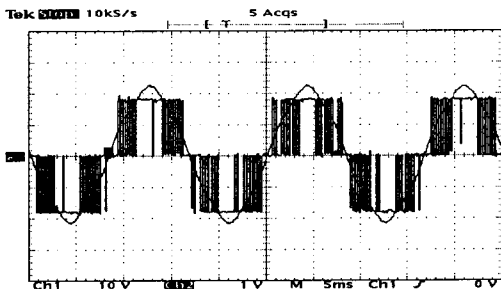


그림 4. 계통전압과 계통측 인버터전압(10V/div)

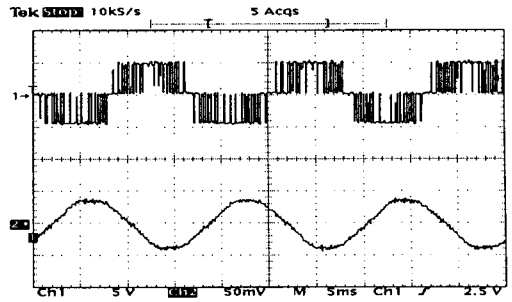


그림 5. 계통측 인버터전압과 전류(50V/div, 5A/div)

2.3.2 유효전력

원동기가 일정토크제어를 할 때 속도에 따른 출력특성을 그림 6과 7에 나타내었다. 우선 그림 2의 고정자 출력이 일정하고 이상적인 경우와 비교해 볼 때, 동기속도에서 P1과 만나고 Pm과 나란한 선을 그으면 Pm과의 차이가 고정자에 관련된 손실로 볼 수 있고, 동기속도에서 0을 지나고 P2와 나란한 선을 그으면 P2와의 차이가 회전자에 관계된 손실로 볼 수 있다. 그리고 같은 기계입력 Pm에 대해 고정자 역할이 단위역률일 때와 진상역률(0.8)일 때를 비교해 보면 단위역률에서의 출력이 높고, 회전자 손실도 훨씬 적은 것을 알 수 있다. 고정자 진상역률에서 회전자 전류와 고정자 전류가 모두 증가하기 때문이다.

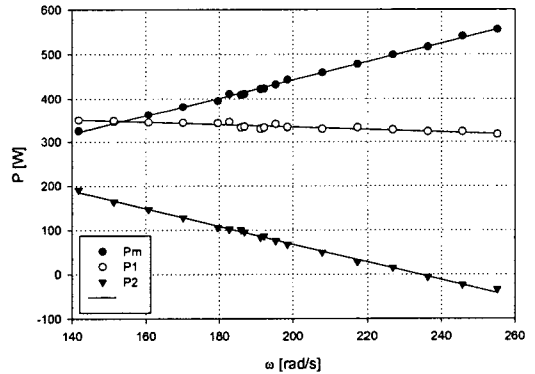


그림 6. 고정자 단위역률(PF=1)에서 속도 출력특성

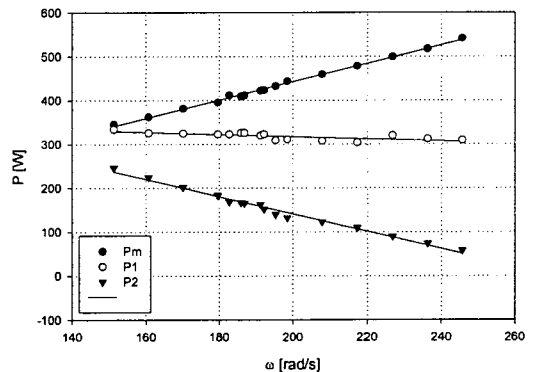


그림 7. 고정자 진상역률(PF=0.8)에서 속도 출력특성

2.3.3 역률제어

고정자 역률제어를 위해 회전자 여자전압을 변화시켰고, 이차 여자 주파수에 따라 고정자와 회전자 역률의 추이를 그림 8과 9에 나타내었다. 이차여자 전압의 크기에 따라 고정자 역률이 각각 지상역률에서 단위역률을 거쳐 진상역률로 옮겨가는 것을 알 수 있다. 이차여자 주파수의 크기에 따라 더 큰 전압이 필요하다.

회전자 주파수와 전압의 변화에 따른 회전자 역률은 모두 지상역률로 회전자 인가 주파수가 증가함에 따라 역률이 감소 하는 경향은 보인다. 이는 주파수가 증가하면 회전자 리액턴스 성분이 증가하기 때문이다. 이 때의 회전자 전류를 그림 10에 나타내었고, 그 특성은 회전자 인가 전압에 선형적으로 비례한다.

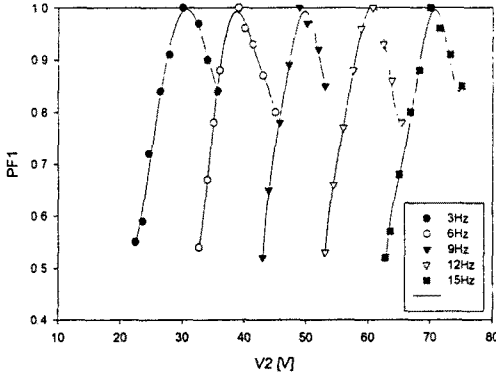


그림 8. 동기속도 이하에서 고정자 역률

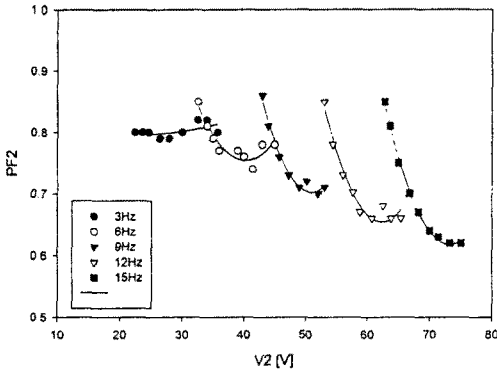


그림 9. 동기속도 이하에서 회전자 역률

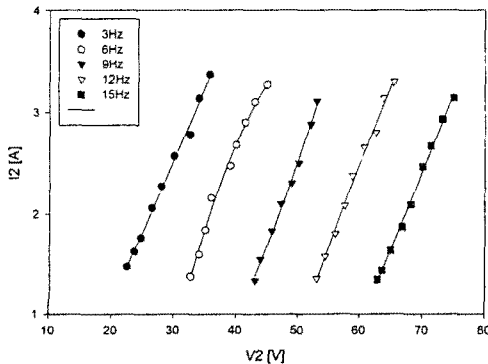


그림 10. 동기속도 이하에서 회전자 전류

위 실험결과 이차 여자전압과 전류를 이용해 고정자 역률제어를 할 수 있음을 보였는데, 속도에 관계없이 일정한 역률을 유지하기 위한 전압과 전류값의 그래프를 나타내면 그림 11, 12와 같다. 각각의 역률에 대해 최적 전압은 동기속도보다 약간 빠른 속도에서 나타나고, 전류는 각각의 역률에 대해 일정한 값을 가진다.

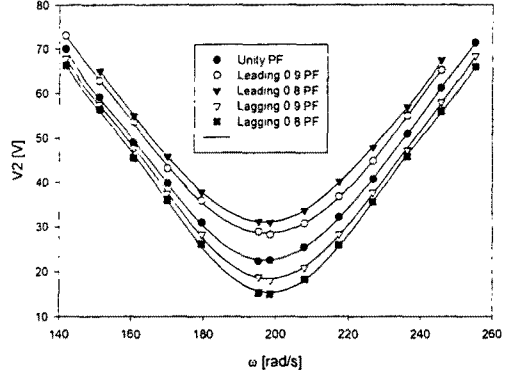


그림 11. 일정역률을 유지하기 위한 속도에 따른 전압

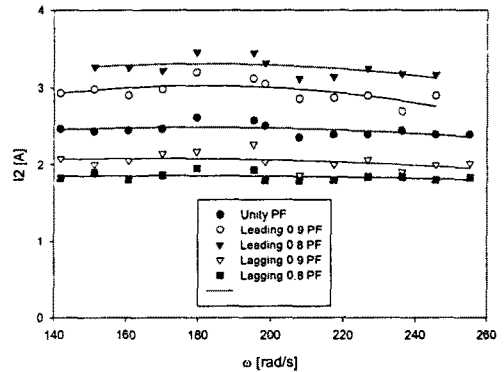


그림 12. 일정역률을 유지하기 위한 속도에 따른 전류

3. 결 론

본 논문에서는 DFIG 시스템을 구성하여 원동기가 일정토크제어를 할 때 동기속도 이상과 이하에서의 이차여자에 따른 고정자와 회전자 역률특성을 연구하였다. 각각의 여자주파수에 따라 고정자역률이 일정하게 되는 전압과 전류가 존재하는 것을 알 수 있었고, 동일한 기계 입력에 대해 역률제어를 수행함에 따른 유효전력의 변화와 원인을 파악할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] S. Muller, M. Diecke, Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generator for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machine and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor", Industry Applications Conference 2000, IEEE, Vol.4, pp.2,249~2,254, 2000.
- [2] M.Y Uctug, I. Eskandarzadeh, H. Ince, "Modelling and Output Power Optimisation of a Wind Turbine Driven Doubly Output Induction Generator", IEE Proceeding B, Vol. 141, No. 2, pp.33~38, 1994.
- [3] 이우석, 오철수, "풍력발전용 권선형 유도발전기의 회전자 여자주파수를 이용한 속도와 출력제어", 대한전기학회 논문지 48B권 7호, pp.349~356, 1999.