

풍력발전용 DFIG의 역률 해석

°이우석* 서영택** 오철수*

*경북대학교 전기공학과, **구미전문대학 전기과

A Analysis of Power Factor in DFIG for Wind Power Generating System

°Woo-Suk Lee* Young-Taek Seo** Chul-Soo Oh*

*Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ., **Kumi Junior College

Abstract - Concerns for wind energy as alternative energy have been highly increased. In this paper, the mechanism between mechanical wind turbine and power generating system is presented to specify the relationship of the energy transfer.

Grid-connected DFIG could achieve unity leading power factor, in addition to variable speed operation at the wide sub-synchronous and super-synchronous shaft speed range and also its independent control of torque and reactive power is possible.

1. 서 론

대체에너지 공급원으로서 풍력발전의 응용이 시급하게 요구되고 있다.

권선형 유도발전기는 가변속 정주파수 운전과 회전자 회로를 통한 여자제어로 운전영역의 확장이 가능하므로, 최근에 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 국내의 풍황조건상 가변속 운전에 의한 정전압 정주파수 전원의 발생이 필연적이므로 권선형 유도기 적용을 위한 연구가 절실히다.

국내에서도 권선형 유도발전기의 회전자 여자에 대한 연구가 1980년대 후반부터 시작되어 1990년대 전반까지 연구가 진행된 적은 있으나, 이는 주 연구 대상을 동기속도 이하의 운전 영역과 독립 운전에 의한 발전에 한정된 연구로 실제 풍력발전에 적용된 예는 찾아볼 수 없다.^[1-2]

외국의 경우 1990년대에 접어들면서 회전자 여자방식에 의한 권선형 유도기 즉, DFIG (doubly-fed induction generator)에 대한 연구가 활발히 진행되기 시작하여, 슬립전력의 환원과 동시에 발전기 1차 출력 및 역률제어에 대한 연구가 체계적으로 시작되었다.^[3-4]

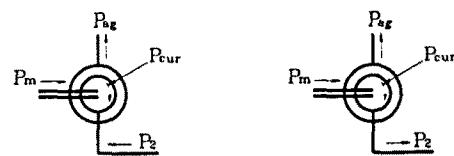
본 논문은 계통연계를 위하여 DFIG의 특성을

살펴보고 특히 부하와 속도변화에 따른 역률변화를 연구실의 실험장치를 통해 실험한 후 해석하였다.

2. DFIG의 특성해석

2.1 DFIG의 전력조류

DFIG 시스템은 유도기의 슬립이 $0 < s < 1$ 영역인 동기속도이상 영역과 슬립이 $0 > s > -1$ 영역인 동기속도이하 영역의 두 운전영역으로 나눌 수 있으며 발전기 운전에서 전력 흐름도는 그림 1과 같다.



(동기속도이상) (동기속도이하)

그림 1. 권선형 유도발전기의 전력 흐름도

2.2 고정자 출력의 역률제어

권선형 유도발전기의 회전자에 여자전압이 주어진 경우, 회전자측만 나타낸 유도발전기의 등가회로는 그림 2와 같고 고정자와 회전자를 합한 전체 등가회로는 그림 3과 같다.

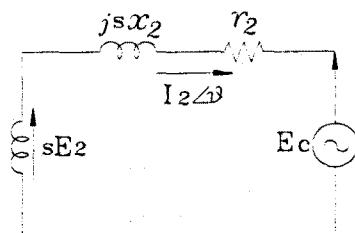


그림 2. 회전자 등가 회로

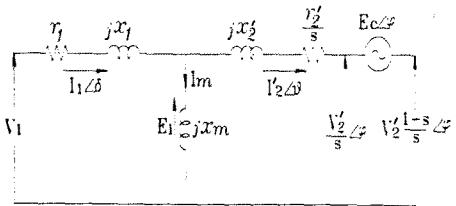


그림 3. DFIG 등가회로

그림 2의 등가회로에서, 회전자가 슬립 s 로 운전 중일 때 회전자 회로에 외부로부터 슬립 주파수의 전압 E_c 를 2차 유기기전력 sE_2 보다 90° 뒤진 위상으로 가하고 E_c 의 전원화로 임피던스를 무시하면, 이 경우에 흐르는 회전자 전류 I_{2t} 는 다음과 같다.

$$I_{2t} = \frac{\sqrt{(sE_2)^2 + E_c^2}}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} = \sqrt{\frac{s^2E_2^2}{r_2^2 + (sx_2)^2} + \frac{E_c^2}{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (1)$$

여기서 I_2 는 회전자 권선에 유기된 부하전류이고, I_{2c} 는 외부에서 회전자로 인가된 여자전류이다.

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (2)$$

$$I_{2c} = \frac{E_c}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (3)$$

이 두 전류의 합성전류가 전체 회전자 전류가 되며 다음과 같다.

$$I_{2t} = \sqrt{I_2^2 + I_{2c}^2} \quad (4)$$

한편, I_2 가 sE_2 보다 앞선 각도를 θ_2 라 하면

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{sx_2}{r_2} \quad (5)$$

이며, 회전자 내부의 임피던스가 변하지 않으므로 I_{2c} 의 위상 또한 I_2 와 같다.

그림 4는 회전자 발생전압보다 90° 뒤진 여자전압의 인가에 대한 역률의 변화를 벡터도로 나타낸 것이다. 회전자에 인가된 여자전류 I_{2c} 의 위상은 회전자 여자를 하지 않은 경우의 회전자 전류 I_2 보다 위상이 90° 뒤지며, 이 상태에서 회전자의 여자전압을 증가시키면 여자전류는 더욱 크지게 되고, 이 여자전류와 회전자 전류의 합성으로 유기되는 고정자 전류의 위상은 더욱 뒤지게 되어 결국 고정자 전압과의 위상차가 적어지며 역률이 개선된다.

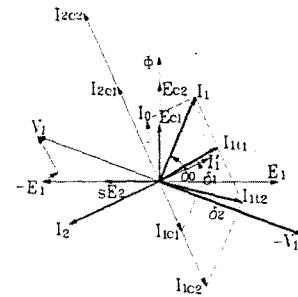


그림 4. 역률 변화 벡터도

철손, 마찰손, 풍손을 무시하고 DFIG 등가회로에서 나타낸 회전자 측에 흐르는 전류는 식 6으로 주어진다.

$$\bar{I}_2 = I_2 \angle \theta = \frac{\bar{V}_2}{r_m + \frac{r'_2}{s} + j(x_m + x'_2)} \quad (6)$$

V_m , r_m , x_m 는 자화리액턴스측에서 고정자 전압쪽으로 향한 테브닝 전압과 저항, 리액턴스값이다.

자화 리액턴스의 유기기전력 E'_2 와 자화전류 I_m 은 식 7, 식 8로 된다.

$$\bar{E}'_2 = \frac{\bar{V}_2}{s} + \bar{I}_2 \left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \quad (7)$$

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{E}'_2}{jx_m} \quad (8)$$

고정자측에 흐르는 전류는

$$\bar{I}_1 = I_1 \angle \delta = \bar{I}_2 + \bar{I}_m \quad (9)$$

으로 주어지고, 고정자측 유효전력은 식 10으로 주어진다.

$$P_1 = 3V_1I_1 \cos \delta \quad (10)$$

여기서 역률은 $\cos \delta$ 이다.

그림 3의 등가회로를 이용하여, 회전자 여자전압이 변할 경우 슬립과 역률과의 관계는 그림 5로 나타난다. 그림 5a)는 회전자 여자전압을 0, 25, 50, 75V로 증가시키고 위상은 계통전압보다 90° 진상으로 주었을 경우 슬립변화에 따른 역률곡선이다. 그림 5b)는 위상을 계통전압보다 90° 지상으로 주었을 경우 슬립변화에 따른 역률곡선이다.

그림 5a)에서 90° 지상의 회전자 여자전압이 주어지면 여자전압이 증가할수록 역률은 감소함을 알 수 있다. 그러나 90° 진상의 회전자 여자전압이 주어지면 여자전압이 증가할수록 역률은 증가하고 역률을 1까지 개선시킬 수 있음을 그림 5b)에서 알 수 있다.

3.2. 역률 특성

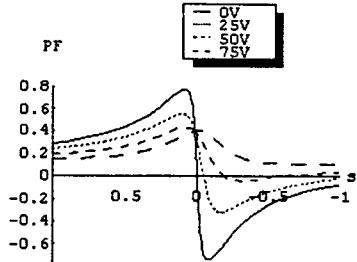
3.2.1. 여자전압 변화

그림 7은 주어진 회전수로 운전시 슬립전력을 소비하지 않은 상태로 각 슬립주파수에서 여자전압 변화에 대한 역률을 나타낸 것이다.

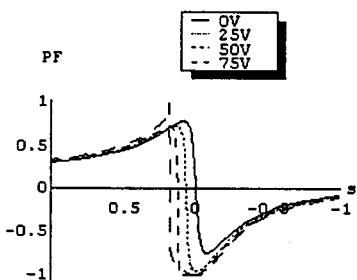
유도발전기의 특성상 슬립 및 출력이 증가할수록 역률이 증가함을 그림 a), b)에 나타내었으며 동일 슬립 운전시 회전자 여자전압의 증가와 함께 역률의 증가 현상이 나타났다. 이 현상은 낮은 슬립 운전시에 더욱 크게 나타남을 알 수 있었다.

여자전류의 증가와 함께 역률의 증가는 계속되나, 일정 여자전류 이상 증가시 시스템 운전이 불안정하게 되는 현상이 나타났으며 슬립이 12Hz 이상의 속도로 운전시에 회전자 여자가 역률 상승에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

그림 7c)는 원동기 속도가 슬립 3% 이하에서 운전시 DC링크 전압 변화에 따른 역률변화를 나타낸 것이다. 슬립 3% 이하의 저속 운전시에서는 낮은 슬립일수록 역률의 저하가 심했으며, 이 경우 회전자 여자전압의 상승과 함께 역률의 상승도 크게 나타났다.



a) 계통전압보다 90° 진상



b) 계통전압보다 90° 지상

그림 5. 회전자 여자전압 변화에 따른 슬립과 역률

3. 실험과 고찰

3.1. 전력 시스템 구성

권선형 유도발전기의 2차여자 제어에 의한 풍력 발전 시스템의 각종 특성을 찾아내기 위한 DFIG 시스템의 구성도는 그림 6과 같다. 풍차를 대체할 속도-토크 특성 시뮬레이션 용으로 사용된 발전기 구동 원동기(prime mover)로는 정격용량 7.5 kW의 3상 6극 농형 유도전동기를 사용하였으며, 원동기의 속도제어는 22kVA PWM 인버터를 이용하여 발전기의 동기속도에서 0.1 Hz 단위로 변속이 가능하도록 하였다.

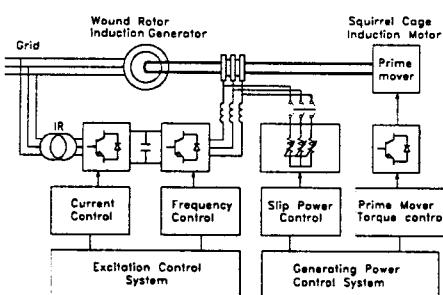
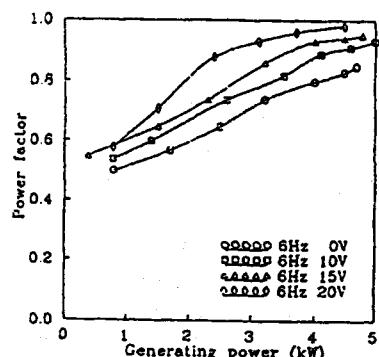
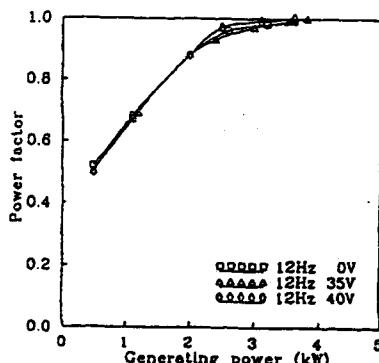


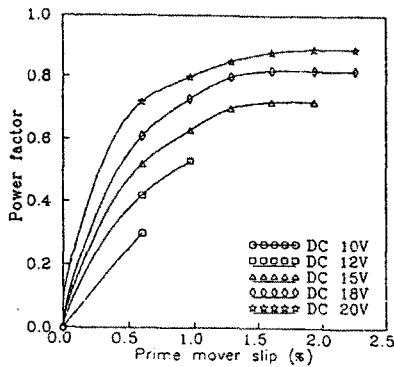
그림 6. DFIG 시스템 구성도



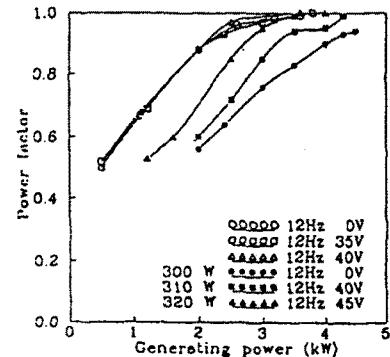
a) 슬립주파수 6Hz 인가



b) 슬립 주파수 12Hz 인가



c) 정격속도이하 인가
그림 7. 역률특성

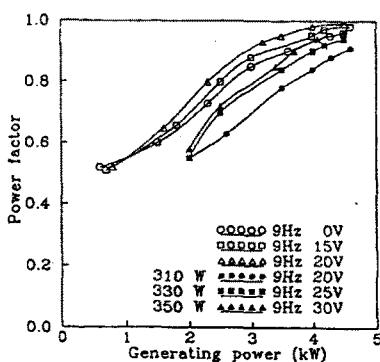


b) 슬립 주파수 12Hz 인가
그림 8. 슬립 전력 회수시 역률특성

3.2.2. 슬립전력 회수시

그림 8은 회전자를 통해 여자전류만 주입한 경우와 여자전류 주입과 동시에 회전자에서 발생한 슬립전력을 외부로 인출한 경우의 역률변화 현상을 고찰한 그림이다.

일반적으로 회전자를 통해 전력을 인출할 경우 인출하지 않은 경우보다 역률은 저하되었으나, 운전영역의 확대는 물론 인출된 전력의 사용으로 인한 출력이 증가되었다. 회전자의 슬립전력 인출의 경우 슬립 9Hz까지의 운전속도에서는 전체 출력 및 시스템의 운전상태에 큰 영향을 미치지 않았으나 슬립이 12Hz를 넘을 경우 인출하지 않으면 고정자 축의 발생 출력 감소와 더불어 시스템의 운전상태가 불안전하게 되어 발생 출력 및 전압, 전류 등의 진동이 심하게 나타나기 시작하였다. 그러나 회전자를 통해 슬립전력의 인출시 시스템이 보다 안정되게 운전되었으며, 회전자 전류의 감소와 함께 고정자 축의 발생전력 증가와 더불어 슬립전력의 회수로 매우 효율적인 운전상태가 되었다.



a) 슬립주파수 9Hz 인가

4. 결 론

회전자 여자주파수를 투입시켜줌으로써 여자주파수에 대응하는 운전속도로 일정하게 유지됨을 알 수 있었다.

회전자 인가 여자전압을 증가 시키면 출력측 역률을 개선할 수 있었다. 그 현상은 6Hz 이하의 낮은 속도에서 크게 나타나고, 특히 정격속도 이하의 속도에서는 출력증가가 역률개선에 의한 것으로 나타났다. 그러나 슬립 12Hz 이상의 운전시 여자전압의 증가가 역률에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 또한 슬립전력을 회수할 경우, 슬립전력회수에 의한 역률은 슬립전력을 회수하지 않았을 경우에 비해 더 낮게 나타났으나 시스템의 안정도 및 출력의 증가는 매우 크게 나타났다.

(참 고 문 헌)

- [1] 박민호, 정승기, 이진우, “회전자 교류여자방식의 자립형 유도발전기의 정상 상태 해석”, 대한전기학회 논문집 제37권 제1호, pp.33~39, 1988.
- [2] 안진우, 황영문, “권선형 유도발전기의 CVCF 발전을 위한 2차여자제어법에 관한 연구”, 대한전기학회 논문집 제40권 제7호, pp.656~663, 1991.
- [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.429~422, 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 Variable Speed Wind Turbine”, IEE Proc-Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 5, pp.380~387, September 1996.

