

풍력발전용 계통연계 DFIG의 출력 해석

• 이현재*, 서영택**, 오철수*

*경북대학교 대학원 전기공학과, **구미전문대학 전기과

Power Analysis of Grid Connected Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Generating System

• Hyun-Chae Lee*, Young-Taek Seo**, Chul-Soo Oh*

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

Abstract - This paper deals with the generating power analysis of wound rotor induction generator according to the rotor excitation for use of DFIG (Doubly Fed Induction Generator) system in wind power generation as a part of renewable energy development. In this way, the generating power of wound rotor induction generator can be achieved for a wide range wind speed of supersynchronous and subsynchronous speed.

1. 서 론

미래 대체 에너지원으로써 무한한 가능성을 지닌 풍력발전은 미국 및 유럽 등지에서 대단위 풍력단지가 조성되어 상업용 전력 공급원으로의 역할이 점차 증가되고 있다. 그러나, 풍력발전은 풍황조건에 의존성이 크기 때문에, 효율적인 운전을 위해서는 터빈의 형태와 발전기의 선정에 따른 많은 문제점을 극복해야 한다.^[1]

권선형 유도 발전기는 가변속 정주파수 운전이 적용 가능하고, 회전자 회로를 통한 여자제어로 운전영역의 확장이 가능하다. 또한, 계통연계시 동기화에 대한 문제점이 없을 뿐 아니라, 다변 풍황조건에 대한 적응력이 뛰어나다. 따라서 최근에 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히, 국내의 풍황조건상 가변속 운전에 의한 정전압 정주파수 전원의 발생이 필연적이므로 권선형 유도기 적용을 위한 연구가 절실했다.^[2-3]

본 논문에서는 풍력 발전에 권선형 유도 발전기를 적용하기 위해, 5.5kW의 권선형 유도 발전기와 7.5kW의 농형 유도 전동기를 이용하여 계통연계 DFIG (Doubly Fed Induction Generator) 시스템을 구성하여 회전자 여자 제어에 의한 출력을 해석하였다. 실험은 슬립 5%에서 25% 영역에서 수행하여 회전자 여자전압과 고정자 출력의 상관관계, 회전자 여자주파수와 고정자 출력의 상관관계를 해석하고, 이를 통한 운전영역의 확장을 확인하였다.

2. 본 론

권선형 유도 발전기의 등가회로 모델링과 이를 통해 이론적인 출력변화와 DFIG 시스템의 전력 조류를 살펴보고, 이를 토대로 DFIG 시스템을 구성하여 회전자 여자전압 및 주파수제어에 의한 출력특성을 알아보았다.

2.1 권선형 유도 발전기의 특성 해석

2.1.1 등가회로 모델링

권선형 유도 발전기의 회전자에 여자전압이 인가된 경우의 유도 발전기 등가회로는 그림 1과 같으며, 자화리액턴스측에서 고정자 전압쪽으로 향한 테브낭 등가회로는 그림 2와 같다.

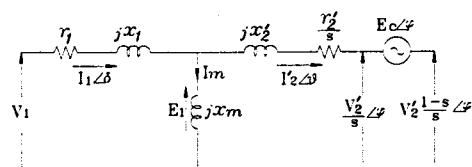


그림 1. DFIG 등가회로

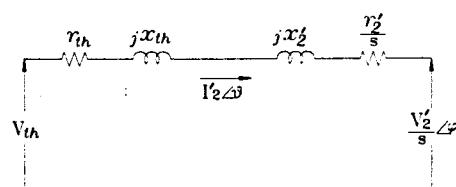
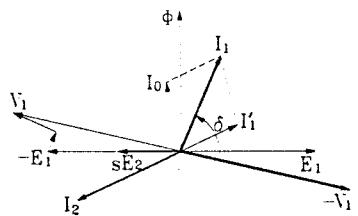


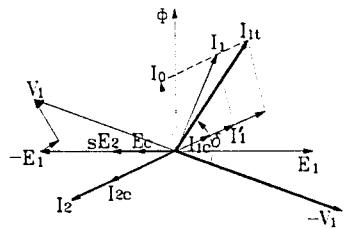
그림 2. 테브낭 등가회로

DFIG의 벡터도는 그림 3에 나타난다. 그림 3 a)는 회전자 여자를 하지 않은 유도 발전기의 경우이고, 그림 3 b)는 회전자 인가 전압 E_2 를 회전자 유기기전력 sE_2 와 동위상으로 인가하였을 경우이다.

일정 운전속도의 경우 여자전류의 인가로 인해 고정자 전류 I_{11} 는 증가하고, 이 경우 V_1 은 일정하기 때문에 고정자 전류의 증가는 출력의 증가를 의미한다. 그림 3 c)는 E_c 를 회전자 유기기전력 sE_2 와 역위상으로 인가하였을 경우로 고정자축 전류의 감소로 출력이 감소함을 알 수 있다.



a) 회전자 무여자자 ($E_c = 0$)



b) sE_2 와 동위상의 E_c 인가시

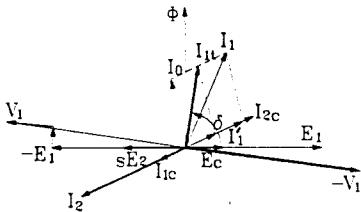


그림 3. 권선형 유도 발전기 벡터도

2.1.2 슬립과 출력 관계

권선형 유도기의 운전영역에서 회전자 여자를 한 경우 그림 1의 등가회로를 ³⁾용한 공극 전력 P_{ag} 와 토크 T_e 는 식 1과 식 2로 주어진다.

$$P_{ag} = \frac{3 I'_2^2 r'_2}{s} + \frac{(3 V'_2 I'_2 \cos(\delta - \theta))}{s} \\ = 3 I'_2^2 r'_2 + (3 V'_2 I'_2 \cos(\delta - \theta)) + P_m \quad (1)$$

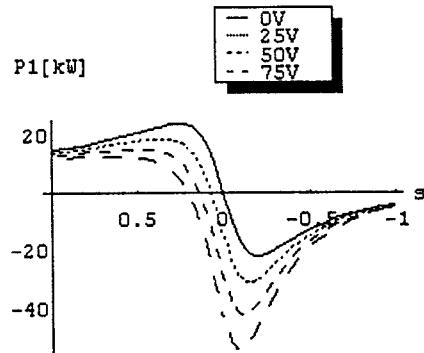
$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (2)$$

$$E_c = V'_2 \quad (3)$$

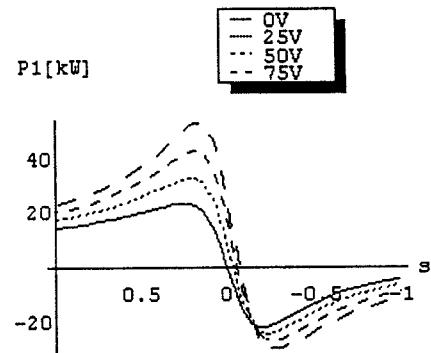
그림 4는 회전자에 인가한 여자전압 E_c 의 변화에 따른 슬립과 출력의 관계를 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 그림 4 a)는 발전전압과 동위상의 회전자 여자 전압을 인가한 경우로 일정 출력 발생 운전시 운전점이 '+'슬립쪽으로 이동함을 알 수 있으며, 이는 동기속도 이하에서 발전기로 운전이 가능함을 의미한다.

그림 4 b)는 발전전압과 역위상의 여자전압을 인가한 경우로 일정 출력 발생 운전시 운전점이 '-'슬립쪽으로 이동함을 알 수 있다.

이러한 결과는 회전자 여자전압 제어에 따라 출력이 변하며 이는 일정 출력 발생시 운전점의 이동이 가능함을 의미한다.



a) 발전전압과 동위상 인가시



b) 발전전압과 역위상 인가시

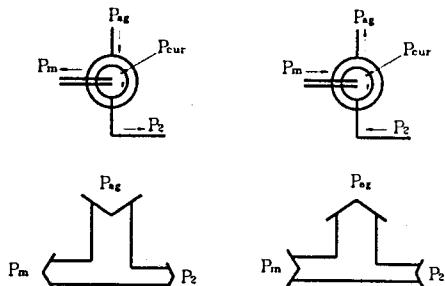
그림 4. 회전자 여자에 따른 슬립과 출력

2.2 DFIG 시스템 구성 및 실험

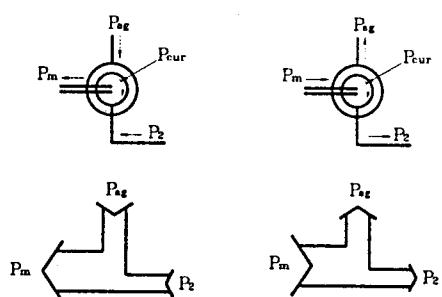
2.2.1 DFIG 시스템의 전력 조류

권선형 유도 발전기의 경우 외부 전원에 의한 회전자 여자 제어가 가능하므로 고정자축의 부축 여자량을 보상하여 출력을 증가시킬 수도 있고, 정격 속도 이상에서는 회전자축의 과여자량을 인출하여 정격내에서 운전이 가능하도록 할 수 있다.

DFIG 시스템은 크게 2개의 운전영역, 즉 Subsynchronous speed 영역과 Supersynchronous speed 영역으로 나눌 수 있다. 그림 5는 이 두 가지 운전영역에서의 기본적인 전력 흐름도를 나타낸다.



전동기 운전영역 발전기 운전영역
a) Subsynchronous speed



전동기 운전영역 발전기 운전영역
b) Supersynchronous speed

그림 5. 권선형 유도기의 전력 흐름도

유도기의 경우 동기 속도 이하의 운전 영역에서는 회전자 출력분 sP_{ag} 는 외부의 전원 인가 없이는 항상 양의 방향으로 발전기로 동작이 불가능하다. 그러나, 회전자축에 슬립주파수를 가지는 전원 P_2 를 인가하면 sP_{ag} 의 방향을 반전시켜 발전기로 동작이 가능하게 된다. 이 경우가 그림 5 a)의 발전기 운전영역에서 보여진다.

그림 5 b)는 동기 속도 이상의 운전영역에서의 전력 흐름도를 나타낸다. 이 경우에는 외부의 회전자 여자 없이도 발전기로 동작이 가능하며, 속도의 증가와 함께 회전자를 통해 슬립주파수를 제어함으로 운전영역 확장이 가능하며, 그리고 회전자를 통해 슬립전력의 인출이 가능하므로 고정자와 회전자 양축을 통한 전력 발생으로 보다 효율적인 운전이 가능하다. 또한, 정격 속도 이하의 운전영역에서는 유도기 특성상 속도 감소와 함께 출력이 급격하게 저하되나 회전자 여자를 통해 출력의 감소분을 보상할 수 있다.

2.2.2 DFIG 시스템의 구성

시스템의 구성은 그림 6과 같이 구성하였다. 발전기로 5.5kW, 3상 6극의 권선형 유도 발전기를 사용하였고, 풍차를 대신하여 발전기 구동용 원동기로 7.5kW, 3상 6극 농형 유도기를 사용하였다. 구동용 원동기의 속도 제어는 22kVVA의 인버터를 사용하여 0.1Hz 단위의 변속에 의해 발전기 출력을 제어하였다. 회전자 여자 제어용 전원으로 120° 도통형 인버터를 사용하여 구성을 간단히 하였다. 회전자 여자 제어용 인버터는 주파수 제어와 여자전류 제어를 독립적으로 수행하도록 하였으며 편의상 계통 쪽 컨버터를 3상 전파 정류회로만으로 동작시켰다.

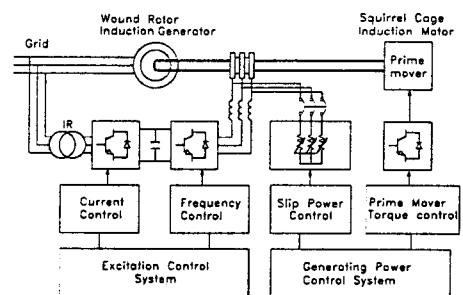


그림 6. DFIG 시스템 구성도

2.2.3 회전자 여자시 고정자 출력 특성 실험

발전기를 주어진 속도로 운전하면서 슬립주파수의 회전자 인가 전압을 변화시키면서 고찰한 고정자 출력 특성이 그림 7이다.

그림 7 a)는 회전자 여자전압을 인가하지 않은 상태에서 회전자에 슬립주파수를 인가한 경우로, 슬립 10% 이하에서는 원동기 속도가 감소할수록 고정자축 발생 출력의 감소가 현저하게 나타났으며, 슬립 5%에서 최고 2.8kW 정도의 출력을 발생하였다. 그러나, 그 이상으로 출력증가시는 난조가 발생하여 시스템이 불안정해졌다. 슬립 10% 이상에서는 속도가 증가할수록 원동기의 일정 출력에 대해 발전기의 고정자축 발생 출력은 상대적으로 감소하였으며, 속도의 증가와 함께 시스템이 불안정해졌다.

이는 발전기의 속도 증가와 함께 회전자축 유기기전력의 증가로 회전자 동순이 증가함과 동시에 고정자축 출력은 감소하기 때문이다.

그림 7 b), c)는 외부에서 슬립주파수의 여자전압을 인가한 경우의 고정자 출력 특성으로 슬립 5%에서의 출력 특성을 비교하면 인가 전압이 8V인 경우 최대 출력은 4.2kW로 증가하고, 12V 인가시는 4.9kW로 더욱 증가함을 알 수 있다. 즉 슬립 10% 이하의 영역에서는 회전자 여자전압이 고정자 발생 출력에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그러나, 슬립 10% 이상의 속도에서는 회전자 여자전압의 증가가 출력의 증가에 큰 영향을 미치지 않음

을 알 수 있다. 그렇지만, 역률과 시스템의 안정도 개선에는 영향을 끼쳤다.

3. 결 론

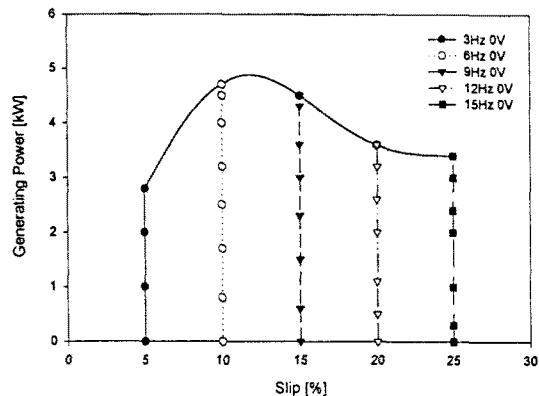
본 논문에서는 권선형 유도 발전기의 회전자 여자 제어를 통해 유도기의 좁은 운전영역을 확장시킬 수 있었으며, 정격 속도 이하의 저속 운전시 회전자 여자 전류를 제어함으로 출력 특성을 개선 시킬 수 있었다.

또한 회전자 여자 제어에 의해 동기 속도 이하의 운전영역에서도 발전기로 운전이 가능하며, 정격 속도 이상의 고속 운전시 회전자를 통해 슬립주파수를 제어하여 운전영역을 확장시킬 수 있으므로 광범위한 운전영역에서 발전이 가능하였다.

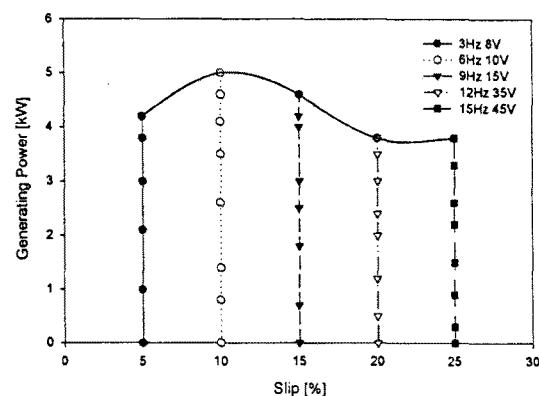
이상의 결과를 토대로 풍력발전 시스템에 권선형 유도 발전기의 회전자 여자 제어 기법이 적용된다면 풍황조건 및 터빈의 형태에 무관하게 보다 효율적인 발전을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

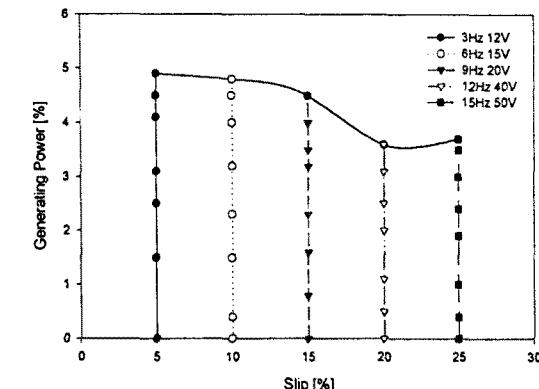
- [1] 오철수, 서영택, “다변풍속 적응형 Darrieus-Savonius 조합 수직축 풍력 발전 시스템의 설계”, 대한전기학회 논문집, 제45권 제2호, PP.185~192, 1996.
- [2] H. L. Nakra, Benoit Dube, “Slip Power Recovery Induction Generators for Large Vertical Axis Wind Turbines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, PP.733~737, December 1988.
- [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] 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.
- [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 Variable Speed Wind Turbine”, IEE Proc-Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 5, PP.380~387, September 1996.



a) 무인가



b) 8V/3Hz ~ 45V/15Hz



c) 12V/3Hz ~ 50V/15Hz

그림 7 회전자 여자시 발전기 출력 특성