

## 회전자 여자제어를 이용한 권선형 유도발전기의 최대출력

\* 이우석 \* , 서영택 \* \* , 오철수 \*  
 \* 경북대학교 전기공학과 , \* \* 구미전문대 전기과

### Maximum Output Power using the Doubly Fed Induction Generator

\* Woo-Suk Lee \* , Young-Taek Seo \* \* , Chul\_Soo Oh \*  
 \* Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ. , \* \* Kumi Junior College

**Abstract** - This paper deals with the maximum output power generation using the Dounly Fed Induction Generator(DFIG) in the super-synchronous speed regions, by control of both magnitude and phase of the voltage fed to the rotor.

Steady-state algebraic equations of the euivalent circuit are solved using numerical analysis. For the normal operating region, in which the generator ratings are not exceeded, rotor current is less than or equal to the rated value.

By selecting the permissible rated current at rotor coil, there are the optimal solution existng which covers the magnitude and phase of the injected voltage to the rotor for the given slip. This optimal solution is pointing out how the maximum output power can be carried out.

## 1. 서 론

바람의 변화가 심한 국내에서 풍력발전에 응용하기 위한 발전기는 동기속도 이상과 이하에서 발전이 가능하여야 한다. DFIG 시스템의 경우 회전자 여자제어를 통하여 운전점을 이동시킬 수 있으며, 이를 통하여 운전영역의 확장이 가능하고 동기속도의 이상과 이하의 범위에서 발전이 가능하다.

국내에서도 1980년대 후반부터 지금까지 권선형유도발전기의 회전자 여자제어에 관한 연구가 이루어져 왔다. 그러나, 동기속도 이하의 운전영역과 독립발전에 관한 연구가 주를 이루었으며<sup>1,2)</sup>, 동기속도 이상의 영역과 계통모선 연결에 관한 연구에서는 슬립주파수제어와 여자전압제어를 통한 역률향상과 운전영역 확장에 관한 연구가 있었으나<sup>3)</sup>, 회전자 여자방식의 중요한 변수중의 하나인 여자전원의 위상각에 대한 연구가 거의 없는 실정이다.

외국에서도 권선형유도기의 회전자 여자제어에 관한 연구가 활발히 진행중이며, 운전영역의 확장과 슬립전력의 회수를 통한 발전효율 증가에 중점을 두고 있다<sup>4,5)</sup>.

정전압과 정주파수를 발전하기 위해서는 풍속에 따른 회전자 슬립주파수 투입이 필연적이며, 각 슬립주파수에 따른 최대출력값이 있다.

본 논문에서는 최대출력값을 위한 회전자 여자의 여러 변수들, 즉 여자전류, 여자전압, 위상각사이의 관계를 규명하고, 특히 회전자의 정격전류로 회전자 여자가 될 경우의 최대출력을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

## 2. 회전자 여자제어

### 2.1 출력제어

권선형 유도발전기는 고정자와 회전자를 통하여 여자를 할 수 있고 이러한 시스템을 갖춘 발전기를 DFIG (Doubly Fed Induction Generator)라 한다.

그림1은 모선에 연결된 경우의 DFIG 시스템의 개략도이다. 모선에서 변압기를 통하여 회전자로 여자전류를 넣어줄 경우, CONV1은 인버터로 작용하고 CONV2는 정류기로 동작하며, 회전자에서 모선으로 출력을 보내줄 경우 CONV1과 CONV2는 이와 반대로 동작한다. CONV1과 CONV2의 제어를 통해 여자에 필요한 주파수와 여자전압, 위상각을 회전자로 투입할 수 있다.

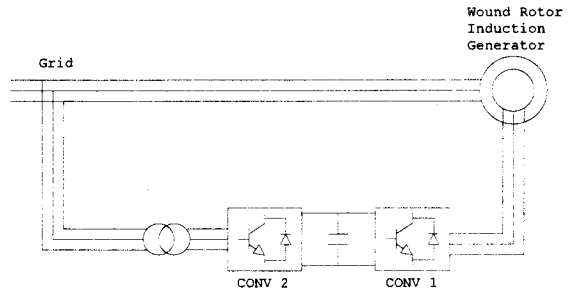


그림 1. DFIG 시스템 개략도

그림2는 회전자 여자제어에 의한 슬립-토크 곡선이다. 동기속도 이하의 영역에서도 원하는 출력값에 해당하는 여자전원과 주파수를 투입한다면 발전이 가능함을 알 수 있다. 즉, A'점은 동기속도 이하의 영역이므로 전동기 영역이다. 그러나 회전자 여자를 통해 -T값의 토크를 인가한다면 동작점이 A점으로 이동하여 전동기영역인 동기속도 이하의 영역에서도 발전기로 동작할 수 있다.

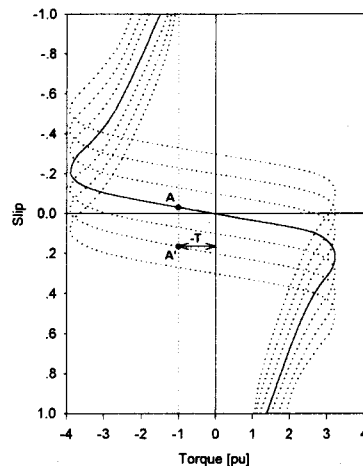


그림 2. 회전자 여자에 의한 슬립-토크 특성

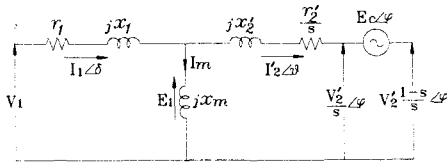
동기속도 이상의 영역도 동작점을 이동시키는데 필요한 전력을 공급하여 주면 출력값을 원하는대로 제어가 가능하다. 동기속도 이상인 영역은 두영역으로 세분할 수 있다.

첫째, 동기속도와 정격속도 사이의 영역이다. 이영역에서는 발전기는 동기속도와 정격속도 사이의 좁은 영역에서만 발전기로의 사용이 가능하다.

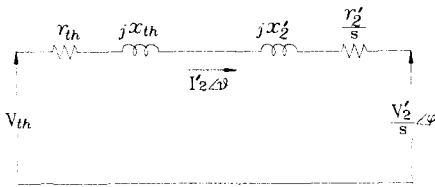
둘째, 정격속도 이상의 영역이다. 이 영역에서는 발전기가 정격출력을 넘어서므로 이 출력값을 제한하여야 한다. 이를 위해서는 출력을 회전자로 빼내는 방법과 회전자로 여자전원을 투입하는 두가지 방법이 있다. 일반적으로 회전자에 여자전원을 투입하는 방법으로 출력값을 제한하는 방법이 더 효과적이다.

## 2.2 등가회로와 상태방정식

권선형유도발전기의 회전자 여자시스템의 등가회로는 그림3과 같다.



(a) DFIG 등가회로



(b) 테브낭 등가회로

그림 3. 등가회로

테브낭 등가회로를 이용하여 상태방정식을 세우면 아래와 같다. 여기서 각 변수들에 대한 위상각은 계통모선에 연결된 고정자 전압을 기준으로 하여 그 차이를 나타낸 것이다.

$$\bar{I}_2 = I_2 \angle \theta = \frac{\frac{\bar{V}_{th}}{s} - \frac{\bar{V}'_2}{s}}{r_{th} + \frac{r'_2}{s} + j(x_{th} + x'_2)} \quad (1)$$

$$\bar{E}_1 = \frac{\bar{V}'_2}{s} + \bar{I}_2 \left( \frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \quad (2)$$

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{E}_1}{jx_m} \quad (3)$$

$$\bar{I}_1 = I_1 \angle \delta = \bar{I}_2 + \bar{I}_m \quad (4)$$

$$P_1 = 3V_1 I_1 \cos \delta \quad (5)$$

$$P_2 = 3V'_2 I'_2 \cos(\varphi - \theta) \quad (6)$$

고정자측 전력  $P_1$ 과 회전자측 전력  $P_2$ 에 의해 전체 출력은 식(7)로 주어진다.

$$P_o = P_1 - P_2 \quad (7)$$

공극의 전력과 토크식은 식 (8)과 식 (9)로 주어진다.

$$P_{ag} = \frac{3I_2'^2 r'_2}{s} + \frac{[3V_2' I_2' \cos(\varphi - \theta)]}{s} \\ = 3I_2'^2 r'_2 + [3V_2' I_2' \cos(\varphi - \theta)] + P_m \quad (8)$$

$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (9)$$

회전자 동손  $P_{cur}$ 은 식 (10)과 같다.

$$P_{cur} = 3I_2'^2 r'_2 \quad (10)$$

## 3. 최대출력

회전자 여자시 최대출력값은 회전자에 인가하는 전압과 위상각의 함수임을 2.2절의 상태방정식을 통해 알 수 있다.

그림4는 슬립이 -0.3(정격속도 이상의 영역)일 때, 출력값을 각각의 여자전원값과 여자전원의 위상각 변화에 따라 시뮬레이션한 것이다. 위상각 변화에 따라 출력값의 변화가 심하며, 일정슬립에 대하여 위상각변화에 따라 발전기와 전동기의 어느 영역으로든 이용이 가능함을 알 수 있다.

또한 여자전압의 값이 증가할수록 출력값이 커지며, 각각의 여자전압에 대한 최적의 위상각이 존재함을 알 수 있다.

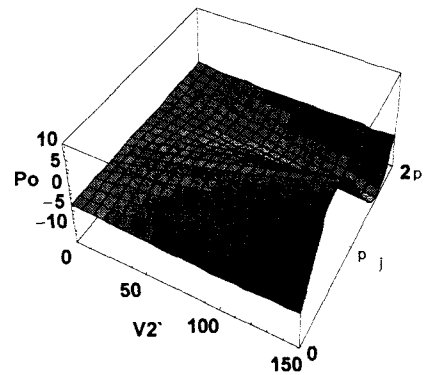


그림 4. 여자전압과 위상각변화에 따른 출력

### 3.1 여자전류제한에 의한 출력

그림5와 같이 여자전류값은 위상각에 따라 변화가 있다. 그러나 회전자에 인가되는 여자전류는 회전자 정격값으로 제한되어야 하고, 이 값은 그림5에서  $I_2'$ 가 1pu가 되는 점선 이하의 영역이다. 따라서 위상각도 각 여자전압에 대해 여자전류가 정격이하로 제한되는 영역사에서 주어져야 하며, 그 위상각들이 각 여자전압에 대해 다르다는 것을 알 수 있다.

그림6은 슬립을 -0.3으로 고정하고, 회전자전류가 정격값으로 제한된 상태에서 위상각을 변화시킬 때의 출력값을 나타낸다. 여자전류가 제한된다면 여자전원값이 증가할수록 출력값이 커지는 것이 아니라, 어느 값에서 최대출력값이 나옴을 알 수 있다. 즉 각 슬립에 대하여 최적의 여자전압과 위상각이 존재함을 알 수 있다.

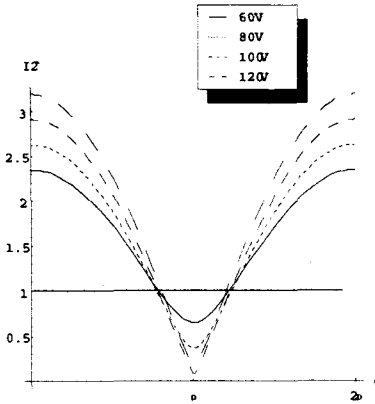


그림 5. 여자전압과 위상각변화에 따른 여자전류

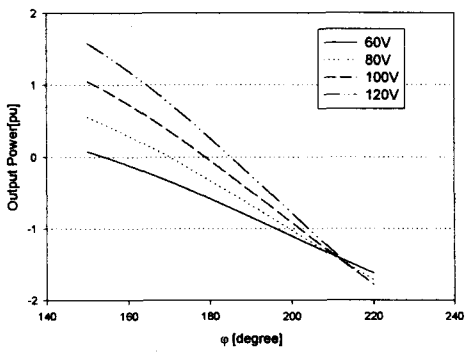


그림 6. 여자전류 제한된 경우 위상각변화에 따른 출력

### 3.2 슬립에 따른 최대출력

각 슬립에 대하여 여자전류가 제한되는 여자전압과 위상각의 쌍은 무수히 많다. 그러나 최대출력을 얻기 위하여 각 슬립에 대한 최적의 여자전압과 위상각 쌍을 찾아야 한다.

그림7은 회전자 전류가 정격전류로 제한된 경우, 슬립의 변화에 대하여 최대출력값을 얻을 수 있는 여자전압과 위상각을 나타내었다.

그림8는 최적의 위상각과 여자전압을 인가한 경우 슬립변화에 대한 최대출력값을 나타내었다.

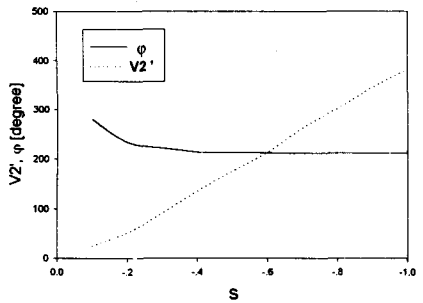


그림 7. 슬립에 대한 최적의 여자전압과 위상각

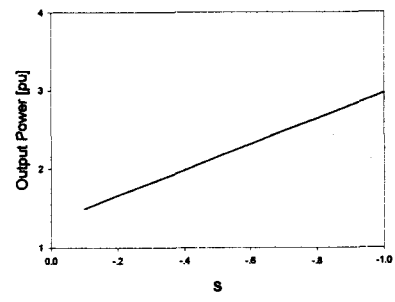


그림 8. 슬립에 대한 최대출력

## 4. 결 론

이 논문에서는 최대출력값을 위한 회전자 여자의 여러 변수들, 즉 여자전류, 여자전압, 위상각사이의 관계를 정상상태 수식을 통하여 살펴보았다. 최대출력을 얻기 위한 최적의 여자전압과 위상각을 수치해석을 통해 구하였으며, 이 값들을 적용하여 최대출력값을 얻었다. 여자전압이 증가할수록 출력이 증가하는 것이 아니라, 정격 여자전류로 제한되는 값에의해 출력값도 제한된다는 것을 알 수 있다.

## 부 록

시뮬레이션에 사용한 권선형 유도발전기 제원

출력	: 5.5kW
전압	: 380V, 3상, 60Hz
전류	: 16.6A
극수	: 6극
정격회전수	: 1154rpm
정격슬립	: 3.83%
고정자권선 상당 저항	: 0.95Ω
고정자 누설리액턴스	: 4.27Ω
자화리액턴스	: 56Ω
회전자 정격전류	: 24A
회전자 개방전압	: 140V
고정자측으로 환산된 회전자권선 상당 저항	: 1.84Ω
고정자측으로 환산된 회전자 누설리액턴스	: 4.27Ω

## (참 고 문 헌)

- (1) 박민호, 정승기, 이진우, "회전자 교류여자방식의 자립형 유도발전기의 정상상태 해석", 대한전기학회논문지, 37권 1호, pp.33~39, 1988
- (2) 안진우, 황영문, "권선형 유도발전기의 CVCF 발전을 위한 2차여자제어법에 관한 연구", 대한전기학회 논문집, 40권 7호, pp.656~663, 1991
- (3) 서영택, 이우석, 오철수, "풍력발전용 회전자 여자시스템 권선형 유도발전기의 역률해석", 대한전기학회논문지, 46권 9호, pp.1340~1346, 1997
- (4) M. Y. Uctug, I. Eskandarzadeh, H. Ince, "Modelling and output power optimisation of a wind turbine driven double output induction generator", IEE Proc.-electr. Power Appl., Vol. 141, No. 2, pp.33~38, 1994
- (5) 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