

이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 전력 제어

정병창 송승호
전북대학교 전자정보공학부

Power Control of Doubly-fed Induction Generator for Wind Turbine

Byoung-Chang Jeong Seung-Ho Song
Chonbuk National University

Abstract - 이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 권선형 유도기를 사용하며, 고정자 권선은 계통에 직접 연결하고, 전력변환 장치를 사용하여 회전자 권선의 전압을 제어함으로써 발전기의 토오크와 고정자의 무효전력을 제어할 수 있다. 발전기의 토오크는 주어진 풍속에서 최대가 되도록, 고정자의 무효전력은 항상 '0'이 되도록 하였으며, 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

1. 서론

풍력발전 시스템은 서유럽을 중심으로 1970년대 이후 상용제품 개발이 진행되어 수MW급 풍력발전 시스템이 개발되었다. 풍력발전에 의한 전력 생산 원가도 최근에는 화석에너지나 원자력 발전에 의한 원가에 근접한 수준까지 도달하였다. 풍력발전 산업을 선도하고 있는 서유럽의 풍력발전 시스템 메이커들을 살펴보면, 최근 개발되고 있는 MW급 이상 대용량 풍력발전 시스템의 대부분은 권선형 유도기를 사용한 이중여자 유도 발전기(DFIG : Doubly-Fed Induction Generator) 방식을 채택하고 있다.

이중여자 유도형 풍력발전 시스템에서 권선형 유도기의 고정자 권선은 계통에 직접 연결하고, 회전자 권선은 전력변환 장치에 연결하여 회전자 단자 전압을 제어함으로써 발전기의 회전속도, 토오크, 또는 유효전력과 무효전력을 제어하고 있다. 그림 1에서 그 대략적인 구조를 보여주고 있다.

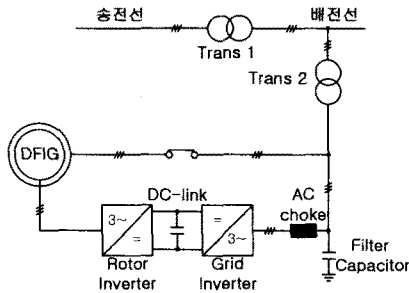


그림 1. 이중여자 유도 발전 시스템

발전이 이뤄지지 않을때, 고정자 권선은 계통에서 분리되며, 발전 개시 조건이 만족되면 고정자 권선을 계통에 연결하고 회전자 권선에서 발전기를 제어한다. 이때, 회전자측에 인가하는 전압의 크기와 주파수는 유도기의 슬립에 비례한다.

본 논문에서는 이중여자 유도형 풍력발전 시스템의 회전자측에 설치된 전력변환 장치를 제어하여 주어진 풍속 조건에서 발전된 유효전력량이 최대가 되도록 제어하였으며, 계통에서 고정자에 유입되는 무효전력은 항상 '0'

으로 제어하였다. MATLAB/SIMULINK를 이용한 시뮬레이션 모델을 통하여 제어 알고리즘을 검증하였다.

2. 이중여자 유도기의 모델링

2.1 정상 상태 등가회로

DFIG는 권선형 유도기를 사용하고, 발전기 등가회로는 그림 2와 같다.

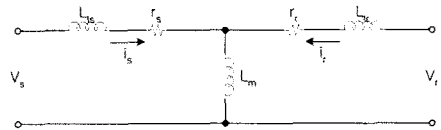


그림 2. 유도기의 등가 회로

그림 2에서 보여주고 있는 등가회로는 1상 등가회로이다. 등가회로에 따라서 전압과 전류, 자속을 정리하고, d-q축으로 변환할 경우 다음과 같다. [1]-[5]

고정자 전압 상태 방정식은

$$V_{ds}^e = r_s i_{ds}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^e - \omega_e \lambda_{qs}^e \quad [V] \quad (2.1)$$

$$V_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^e + \omega_e \lambda_{ds}^e \quad [V] \quad (2.2)$$

회전자 권선의 전압 상태 방정식은

$$V_{dr}^e = r_r i_{dr}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^e \quad [V] \quad (2.3)$$

$$V_{qr}^e = r_r i_{qr}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^e + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e \quad [V] \quad (2.4)$$

그리고, 고정자와 회전자 권선의 자속은

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \quad [Wb] \quad (2.5)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \quad [Wb] \quad (2.6)$$

$$\lambda_{dr}^e = L_m i_{ds}^e + L_r i_{dr}^e \quad [Wb] \quad (2.7)$$

$$\lambda_{qr}^e = L_m i_{qs}^e + L_r i_{qr}^e \quad [Wb] \quad (2.8)$$

이때, r_s 는 고정자 권선 저항, r_r 는 회전자 권선 저항, $L_s (= L_{ls} + L_m)$ 는 고정자 인덕턴스, $L_r (= L_{lr} + L_m)$ 은 회전자 인덕턴스, L_m 은 자화 인덕턴스, ω_e 는 동기속도, ω_r 은 회전자의 전기적 회전속도를 의미한다.

2.2 동기위상각 계산

2.2.1 고정자 자속 추정

이중여자 유도기의 제어를 벡터제어를 위한 동기 위상각은 고정자 자속을 사용하여 계산하고 있다. 단, 고정자 자속을 직접 측정하는 데에는 많은 문제점이 있기 때문에, 자속을 직접 측정하지 않고, 고정자 전압과 전류를 사용하여 추정한다.[2]

$$\lambda_{ds}^s = \int (V_{ds}^s - r_s i_{ds}^s) dt \quad [\text{Wb}] \quad (2.9)$$

$$\lambda_{qs}^s = \int (V_{qs}^s - r_s i_{qs}^s) dt \quad [\text{Wb}] \quad (2.10)$$

자속을 추정할 때 주의할 점이 자속을 추정하기 시작하는 초기값과 자속을 추정하기 위해서 사용하는 측정값에 포함된 offset이다. 전압과 전류에 포함된 offset의 영향을 제거하고, 추정된 자속값에 포함된 offset의 영향을 제거하기 위해서는 고역통과 필터를 사용하며, 적분과 결합하여 대역통과 필터의 형태를 갖는다.

$$H(s) = \frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.11)$$

2.2.2 동기 위상각 계산

이중여자 유도기의 동기 위상각 θ_e 는 식(2.9)~(2.11)을 사용하여 추정된 고정자 자속을 사용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\theta_e = \tan^{-1} \frac{\lambda_{qs}^s}{\lambda_{ds}^s} \quad [\text{rad}] \quad (2.12)$$

식(2.12)와 같이 계산할 경우, $\lambda_{ds}^s = \lambda_{\max}$, $\lambda_{qs}^s = 0$ 이 되는 점에서 동기 위상각 $\theta_e = 0$ 이 된다. 즉, 동기좌표계 고정자 자속은 항상 다음과 같다.

$$\lambda_{ds}^e = \text{constant} \quad (2.13)$$

$$\lambda_{qs}^e = 0$$

식(2.6)에 식(2.13)를 대입할 경우 다음과 같다.

$$i_{qr}^e = -\frac{L_m}{L_s} i_{qr}^e \quad [\text{A}] \quad (2.14)$$

식(2.3)과 식(2.4)를 전압과 전류의 관계로 정리하면

$$V_{dr}^e = r_r i_{dr}^e + \sigma L_r i_{dr}^e - \omega_{sl} \sigma L_r i_{qr}^e \quad [\text{V}] \quad (2.15)$$

$$V_{qr}^e = r_r i_{qr}^e + \sigma L_r i_{qr}^e + \omega_{sl} (L_m i_{ds}^e + L_r i_{dr}^e) \quad [\text{V}] \quad (2.16)$$

2.3 토오크와 고정자 무효전력

유도기의 토오크는

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{dr}^e i_{qs}^e - i_{qr}^e i_{ds}^e) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e) \end{aligned} \quad [\text{Nm}] \quad (2.17)$$

이중여자 유도기를 $\lambda_{qs}^e = 0$ 이 되도록 제어하므로

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m \lambda_{ds}^e i_{qs}^e \\ &= -\frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m \lambda_{ds}^e i_{qr}^e \end{aligned} \quad [\text{Nm}] \quad (2.18)$$

유도기의 고정자 무효전력은

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs}^e i_{ds}^e - V_{ds}^e i_{qs}^e) \quad [\text{VAR}] \quad (2.19)$$

식(2.19)를 다시 정리하면

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{1}{L_s} (V_{qs}^e \lambda_{ds}^e - V_{qs}^e L_m i_{dr}^e + L_m V_{ds}^e i_{qr}^e) \quad [\text{VAR}] \quad (2.20)$$

3. 유도기의 토오크와 무효전력 제어

3.1 토오크 제어

풍력발전 시스템에서 블레이드의 회전속도가 주속비 λ_{opt} 를 만족하도록 제어된다면 블레이드의 기계적 출력은

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho C_{p-max} \left(\frac{R_{blade}}{\lambda_{opt}} \right)^3 \omega_{blade}^3 \quad [\text{W}] \quad (3.1)$$

여기서 A 는 블레이드의 회전 단면적 [m^2], ρ 는 공기의 밀도로 약 $1.225[\text{kg}/\text{m}^3]$, C_{p-max} 는 블레이드의 최대 출력계수, R_{blade} 는 블레이드의 회전반경[m], ω_{blade} 는 블레이드의 회전속도 [rad/sec]를 의미한다. 식(3.1)은 다시 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{blade} = K_{blade} \omega_{blade}^3 \quad [\text{W}] \quad (3.2)$$

K_{blade} 는 블레이드 출력에 대한 회전속도의 계수. 블레이드의 출력은 회전속도의 3승에 비례한다. 블레이드에서 축에 공급하는 토오크는

$$T_{blade} = K_{blade} \omega_{blade}^2 \quad [\text{Nm}] \quad (3.3)$$

블레이드의 토오크는 회전속도의 제곱에 비례한다. 발전기의 토오크 기준값은

$$T_e^* = T_{blade} - B \omega_{blade} \quad [\text{Nm}] \quad (3.4)$$

B 는 블레이드, 축, 그리고 발전기 등의 모든 마찰 계수를 의미한다. 발전기의 토오크분 전류 기준값은

$$i_{qr}^{e*} = \frac{1}{K_t} T_e^* \quad [\text{A}] \quad (3.5)$$

K_t 는 권선형 유도기의 회전자 전류에 대한 토오크 상수를 의미한다. 그림 3에서 전류 기준값을 계산하는 블록도를 보여주고 있다.

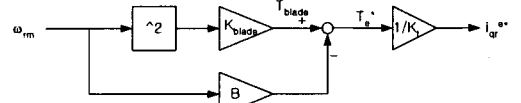


그림 3. 전류 기준값 계산 블록

3.2 무효전력 제어

식(2.20)을 회전자 d축 전류에 대하여 다시 정리하면

$$i_{dr}^e = -\frac{2}{3} \frac{L_s}{L_m} \frac{1}{V_{qs}^e} Q_s + \frac{1}{L_m} \lambda_{ds}^e + \frac{V_{ds}^e}{V_{qs}^e} i_{qr}^e \quad [\text{A}] \quad (3.6)$$

고정자 무효전력을 '0'으로 제어한다면

$$i_{dr}^e = \frac{1}{L_m} \lambda_{ds}^e + \frac{V_{ds}^e}{V_{qs}^e} i_{qr}^e \quad [\text{A}] \quad (3.7)$$

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 모델

시뮬레이션 모델은 그림 4와 같다.

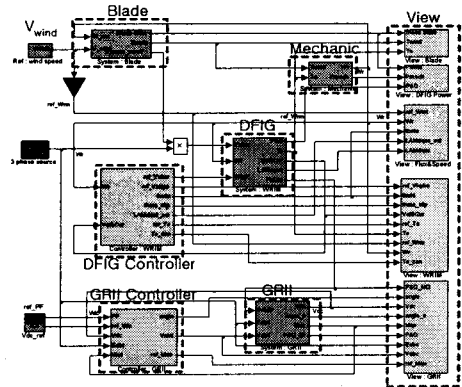


그림 4. DFIG 시뮬레이션 모델

시뮬레이션 모델은 크게 3부분으로 구성되어 있다. 블레이드의 동특성을 모의하는 블록, 권선형 유도기와 회전자측 컨버터 블록, 그리고 계통연계 인버터 블록으로 구성되어 있다.

4.2 시뮬레이션 결과

그림 5는 풍속(V_{wind})과 발전기의 회전속도(ω_{rpm}), 블레이드의 기계적 출력(P_{blade})과 계통에 공급하는 유효전력($-P_{WRIM}$)을 보여주고 있다. 풍속과 회전속도는 per unit으로 표현하였다. 블레이드의 기계적 출력에는 블레이드의 타워효과가 포함되어 있다. 계통에 공급하는 유효전력은 고정자와 계통연계 인버터의 유효전력을 더한 값이다.

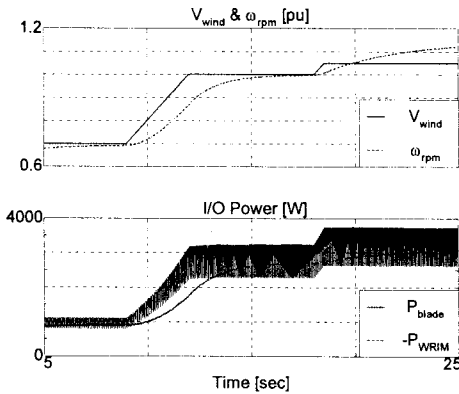


그림 5. 풍력발전 시스템 풍속과 출력

그림 6은 풍속(V_{wind})과 발전기의 회전속도(ω_{rpm}), 발전기의 토오크(T_{WRIM}), 고정자의 q축 전류(i_{qs}^e)와 회전자의 q축 전류(i_{qr}^e)를 보여주고 있다. 발전기의 토오크가 정격에 도달하기 이전에는 회전속도의 제곱에 비례해서 증가하고, 정격 토오크보다 큰 토오크를 발생해야 할 때는 제어기에 의해서 정격 토오크로 제한된다. 회전자의 q축 전류는 토오크에 (-)로 비례하며, 고정자의 q축 전류는 토오크에 (+)로 비례한다.

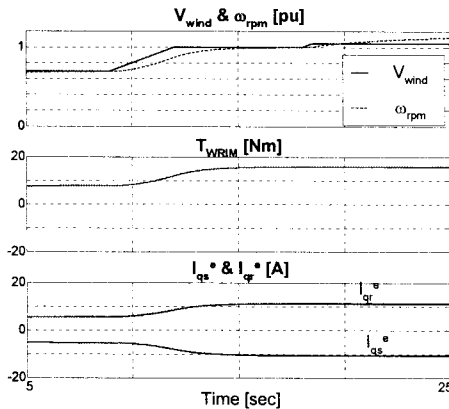


그림 6. 발전기의 회전속도와 토오크 제어

그림 7은 발전기의 슬립($slip$)과 고정자 무효전력(Q_s), 그리고 회전자 무효전력(Q_r)을 보여준다. 고정자에서 발전기의 여자전력을 공급할 경우, 약 2100[VAR]의 무효전력이 고정자에서 공급된다. 그러나, 발전기 여자에 필요한 무효전력을 회전자에서 공급하기 때문에, 고정자 무효전력은 '0'을 유지한다.

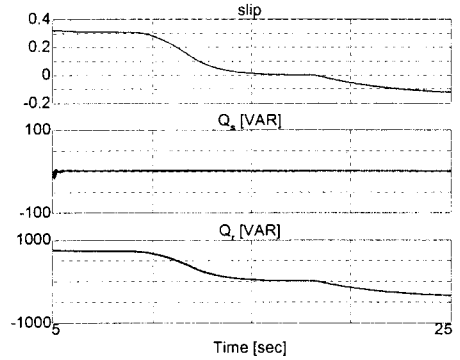


그림 7. 고정자 무효전력 제어

5. 결 론

이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 제어가 복잡하지만, 시스템 효율이 높고, 전력변환 장치의 크기를 줄일 수 있는 등 다양한 특징이 있다. 또한 제어 알고리즘에 따라서 시스템의 에너지 변환 효율과 시스템의 무효전력이 달라지기 때문에, 정밀한 제어 알고리즘이 요구된다. 본 논문에서는 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 모델링하여, MATLAB/SIMULINK를 이용한 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 발전기의 토오크와 고정자 무효전력을 제어하는 알고리즘을 적용하였다. 앞으로는 알고리즘을 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 축소한 시뮬레이터를 개발할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정병창, 권태화, 송승호, 김일환, "회전자측 PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중여자 유도형 풍력 발전기의 계통 투입 알고리즘", 전기학회논문지 Vol. 52, No. 10, pp. 528-534, 2002.
- [2] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol 143, No. 3, pp.231-241, May, 1996.
- [3] L. Morel, H. Godfroid, A. Mirzaian, J. M. Kauffmann, "Doubly-fed induction machine: converter optimization and field oriented control without position sensor", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol 145, No. 4, pp.360-368, July, 1998.
- [4] S. Muller, M. Deicke, Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor", 1999 IEEE, 1999.
- [5] Eel-Hwan Kim, Sung-Bo Oh, Yong-Hyun Kim, Chang-Su Kim, "Power Control of a Doubly Fed Induction Machine Without Rotational Transducers"