

# 불평형 계통전압시 풍력발전용 이중여자 유도발전기의 전력제어

장정익, 이동춘  
영남대학교 전기공학과

## Power Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Power Generation under Unbalanced Grid Voltage

Jeong-Ik, Dong-Choon Lee  
Dept. of Electrical Eng., Yeungnam Univ.

### ABSTRACT

본 논문은 계통전압 불평형시 풍력발전용 DFIG (Doubly-Fed Induction Generator)의 유효전력과 무효전력 맥동을 제어하는 새로운 기법을 제시한다. 발전기 토크식을 대칭좌표법을 이용하여 정상분과 역상분의 전류로 표현하고 토크 맥동을 제거하기 위한 회전자 역상분의 지령전류를 유도한다. PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

풍력발전용 DFIG 시스템에서 고정자단은 전력계통과 직접 연결되고 회전자단은 역병렬형 PWM 컨버터를 통해서 계통과 연결된다. 고정자가 계통에 직접 연결되어 있으므로 계통전압에 불평형이 발생하면 발전기의 토크가 맥동을 하는 문제점이 있다. 토크의 맥동은 소음을 발생시키고 회전자 축, 기어박스 와 블레이드 등에 기계적 스트레스를 준다.<sup>[1]-[3]</sup>

계통전압 불평형시 DFIG 시스템의 토크 맥동을 제거하는 방법을 제안한 연구결과가 있다.<sup>[4]</sup> 그러나 제어 지령이 동기주파수의 2배 주파수를 가지는 교류이기 때문에 제어루프의 대역폭을 높이는데 한계( $2\omega_e$ )가 있다. 그리고 계통전압 불평형시 PWM 컨버터의 직류링크전압의 맥동을 제거하는 기법이 제안되었다.<sup>[5]</sup> 이 방법은 계통전압 불평형시 발생하는 유효전력의 맥동을 제거하기 위해 전류의 정상분과 역상분을 분리하여 각각 제어하는 이중 전류제어루프를 사용하였다. DFIG 시스템에서는 회전자의 주파수가 변동하므로 위에서 언급된 대칭좌표법에 의해 직접 회전자전류의 역상분을 추출하기는 어렵다.

본 논문에서는 계통전압 불평형시 DFIG 시스템의 회전자 전류에서 정상분과 역상분을 추출하기 위한 방법을 제시하고, 또한 이를 이용하여 고정자 유효전력 맥동 혹은 무효전력 맥동을 제거하는 새로운 전력제어 알고리즘을 제안한다. 그리고 무효전력 맥동과 토크 맥동과 직접 관계가 있음을 보인다. PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 통해 제시된 알고리즘의 타당성을 검증한다.

### 2. DFIG 모델링과 제어

일반적으로 DFIG에서는 유도전동기와는 달리 고정자 자속

기준 벡터제어를 사용한다. 고정자의 유효전력과 무효전력의 안정된 제어를 위해서는 각각의 전력을 독립적으로 제어할 필요가 있다. DFIG에서는 회전자 권선의 전압과 전류를 제어함으로써 고정자 전력을 제어할 수 있다.

#### 2.1 DFIG 모델링

DFIG의 고정자 자속기준 벡터제어에서 자속과 전류 및 전압 방정식은 아래와 같다.<sup>[6]</sup>

$$\lambda_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (1)$$

$$\lambda_{dq} = L_r I_{dq} + L_m I_{ds} \quad (2)$$

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} + j\omega_e \lambda_{dq} \quad (3)$$

$$V_{dq} = R_r I_{dq} + \frac{d}{dt} \lambda_{dq} + j(\omega_e - \omega_r) \lambda_{dq} \quad (4)$$

여기서  $L_m$ 은 자화인덕턴스,  $L_s$ 와  $L_r$ 은 고정자와 회전자의 자기인덕턴스이다. 또한  $\lambda_{ds}$ 와  $\lambda_{dq}$ 은 고정자와 회전자의 d, q-축 쇄교자속이고,  $I_{ds}$ 와  $I_{dq}$ 은 고정자와 회전자의 d, q-축 전류이다.

#### 2.2 평형 계통전압에서 DFIG의 전력제어

고정자의 자속벡터를 d-축에 고정시키면 회전자 전류의 q-축 성분을 통하여 DFIG의 토크 또는 고정자 유효전력을 제어할 수 있다. 반면에 회전자 d-축 전류로 고정자 무효전력을 제어할 수 있다. 식(1)-(4)를 이용하여 고정자의 유효전력과 무효전력을 표현하면 아래와 같다.

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} V_\phi I_q \quad (5)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} V_\phi (I_{ms} - I_d) \quad (6)$$

여기서  $I_{ms}$ 는 자화전류이다. 식(5)과 (6)에서 알 수 있듯이 고정자의 유효전력은  $I_q$ 에 의해서 제어되고 무효전력은  $I_d$ 에 의해 제어될 수 있다.

### 3. 계통전압 불평형시 DFIG의 전력제어

#### 3.1 유효전력과 무효전력의 맥동 제거

계통전압에 불평형이 발생하면 고정자의 피상전력은 역상분을 포함하게 된다.<sup>[5]</sup>

$$S_s = 1.5V_{dqs} I_{dqs}^* \quad (7)$$

여기서

$$V_{dqs} = e^{j\omega_e t} V_{dqs}^p + e^{j(-\omega_e)t} V_{dqs}^n$$

$$I_{dqs} = e^{j\omega_e t} I_{dqs}^p + e^{j(-\omega_e)t} I_{dqs}^n$$

이고, 위 첨자 p와 n은 각각 정상분과 역상분을 나타낸다. 식(7)을 전개하여 순시 무효전력과 유효전력으로 나누어 표현하면 아래와 같다.

$$p_s(t) = P_{s0} + P_{s2} \cos(2\omega_e t) + P_{s2} \sin(2\omega_e t) \quad (8)$$

$$q_s(t) = Q_{s0} + Q_{s2} \cos(2\omega_e t) + Q_{s2} \sin(2\omega_e t) \quad (9)$$

여기서

$$P_{s0} = 1.5(V_{ds}^p I_{ds}^p + V_{qs}^p I_{qs}^p + V_{ds}^n I_{ds}^n + V_{qs}^n I_{qs}^n)$$

$$P_{s2} = 1.5(V_{ds}^p I_{ds}^n + V_{qs}^p I_{qs}^n + V_{ds}^n I_{ds}^p + V_{qs}^n I_{qs}^p)$$

$$P_{s2} = 1.5(V_{qs}^p I_{ds}^n - V_{ds}^n I_{qs}^p - V_{qs}^n I_{ds}^p + V_{ds}^p I_{qs}^n)$$

$$Q_{s0} = 1.5(V_{qs}^p I_{ds}^p - V_{ds}^p I_{qs}^p + V_{qs}^n I_{ds}^n - V_{ds}^n I_{qs}^n)$$

$$Q_{s2} = 1.5(V_{qs}^p I_{ds}^n - V_{ds}^p I_{qs}^n + V_{qs}^n I_{ds}^p - V_{ds}^n I_{qs}^p)$$

$$Q_{s2} = 1.5(V_{ds}^p I_{ds}^n + V_{qs}^p I_{qs}^n - V_{ds}^n I_{ds}^p - V_{qs}^n I_{qs}^p)$$

계통전압 불평형 시에는 식(5), (6)과는 달리 고정자의 전력에 2배의 동기주파수로 맥동하는 전력이 나타남을 식(8), (9)를 통해 알 수 있다. 맥동 전력 성분의 진폭이 0이 되면 맥동성분이 나타나지 않게 된다. 그리고 고정자 유효전력과 무효전력의 맥동성분에서 고정자 d-축 전압의 정상분과 역상분은 0이다. 맥동하는 전력들의 크기를 고정자와 회전자 전류만으로 표현하면 아래와 같다.

$$P_{s2} = 1.5[2(R_s + \frac{d}{dt} L) I_{qs}^p I_{qs}^n + \frac{d}{dt} L_m (I_{qs}^p I_{qr}^n + I_{qs}^n I_{qr}^p) - \omega_e L_m (I_{qs}^p I_{dr}^n - I_{qs}^n I_{dr}^p)] \quad (10)$$

$$P_{s2} = 1.5[-\frac{d}{dt} L_m (I_{qs}^p I_{dr}^n - I_{qs}^n I_{dr}^p) - 2\omega_e L_s I_{qs}^p I_{qs}^n - \omega_e L_m (I_{qs}^p I_{qr}^n + I_{qs}^n I_{qr}^p)] \quad (11)$$

$$Q_{s2} = -1.5[\frac{d}{dt} L_m (I_{qs}^p I_{dr}^n + I_{qs}^n I_{dr}^p) + \omega_e L_m (I_{qs}^p I_{qr}^n - I_{qs}^n I_{qr}^p)] \quad (12)$$

$$Q_{s2} = -1.5[\frac{d}{dt} L_m (I_{qs}^p I_{qr}^n - I_{qs}^n I_{qr}^p) - \omega_e L_m (I_{qs}^p I_{dr}^n + I_{qs}^n I_{dr}^p)] \quad (13)$$

회전자 정상분 전류는 고정자의 유효전력과 무효전력의 평균값을 제어하는데 사용되므로 전력의 맥동성분 제어에는 역상분 전류를 이용한다. 그러나 식(10)-(13)에서 유효전력과 무효전력의 맥동을 동시에 제거할 수 없음을 알 수 있다. 식(10), (11)에서 유효전력 맥동은 식(12), (13)의 무효전력 맥동과는 달리

$2(R_s + \frac{d}{dt} L) I_{qs}^p I_{qs}^n$ 와  $2\omega_e L_s I_{qs}^p I_{qs}^n$ 의 존재로 완벽히 0으로 될 수 없음을 알 수 있다. 각각의 맥동전력을 제거하기 위해서 식(10), (13)에서  $I_{dr}^{n*}$ 이 지령으로, 식(11), (12)에서  $I_{qr}^{n*}$ 이 지령으로 만들어진다.

### 3.2 맥동토크 제어

불평형 계통전압시 토크를 유도하기 위해 식(1)-(4)에 아래

의 역상분 식을 추가한다.

$$\lambda_{dqs}^n = L_s i_{dqs}^n + L_m i_{dqr}^n \quad (14)$$

$$\lambda_{dqr}^n = L_r i_{dqr}^n + L_m i_{dqs}^n \quad (15)$$

$$V_{dqs}^n = R_s i_{dqs}^n + \frac{d}{dt} \lambda_{dqs}^n + j(-\omega_e) \lambda_{dqs}^n \quad (16)$$

$$V_{dqr}^n = R_r i_{dqr}^n + \frac{d}{dt} \lambda_{dqr}^n + j(-\omega_e - \omega_r) \lambda_{dqr}^n \quad (17)$$

발전기의 전체 피상전력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S = V_s I_s^* + V_r I_r^* \quad (18)$$

여기서

$$V_r = e^{j(\omega_e - \omega_r)t} V_{dqr}^p + e^{j(-\omega_e - \omega_r)t} V_{dqr}^n$$

$$I_r = e^{j(\omega_e - \omega_r)t} I_{dqr}^p + e^{j(-\omega_e - \omega_r)t} I_{dqr}^n$$

식(18)에 식(1)-(4)와 식(14)-(17)로부터 계통전압 불평형시 DFIG의 순시 토크는 다음과 같이 주어진다.

$$T_e(t) = T_{e0} + T_{e2} \cos(2\omega_e t) + T_{e2} \sin(2\omega_e t) \quad (19)$$

여기서

$$T_{e0} = 1.5 \omega_r L_m (I_{qs}^p I_{dr}^p + I_{qs}^n I_{dr}^n)$$

$$T_{e2} = 1.5 \omega_r L_m (I_{qs}^p I_{dr}^n + I_{qs}^n I_{dr}^p)$$

$$T_{e2} = 1.5 \omega_r L_m (I_{qs}^p I_{qr}^n - I_{qs}^n I_{qr}^p)$$

식(12), (13)과 (19)로부터 토크의 맥동성분이 무효전력의 맥동성분과 매우 밀접한 관계임을 알 수 있다. 이는 토크맥동을 제거하기 위한 회전자 전류의 역상분 지령이 무효전력 맥동을 제거하기 위한 지령과 같음을 의미한다.

슬립주파수의 변동 때문에 회전자 역상분 전류는 대칭좌표법으로 추출할 수 없다. 그림 1은 회전자 역상분 전류를 추출하는 방법을 나타내고 있다. 그림 2는 불평형 계통전압에서의 DFIG의 전력제어를 위한 전체 제어 블록도를 나타낸다.

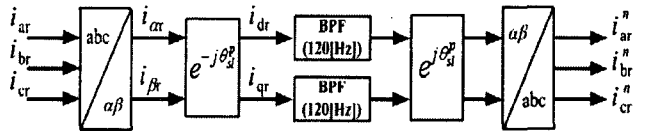


그림 1 회전자 역상분 전류 추출 진행도

Fig. 1 Extraction process of rotor negative sequence current

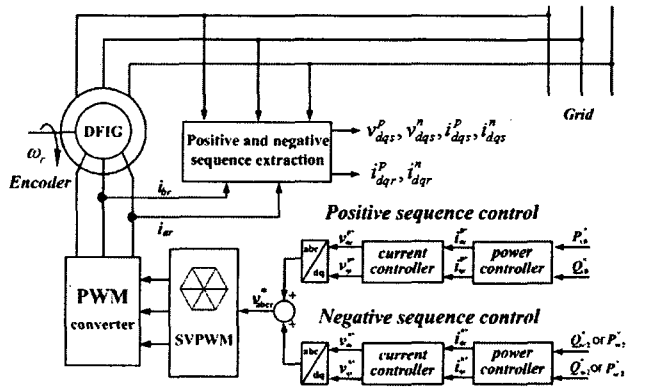


그림 2 불평형 계통전압에서의 DFIG 시스템의 회전자측 컨버터의 전력제어도

Fig. 2 Power control diagram of rotor-side converter of DFIG system under unbalance grid voltage

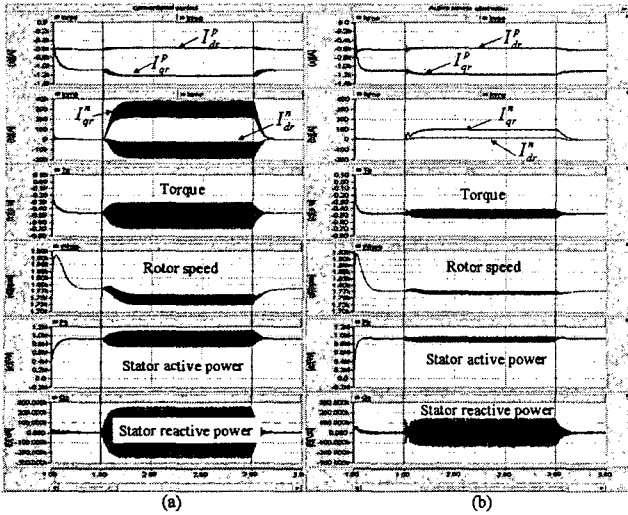


그림 3 전력제어 (a) 불평형 고려없음 (b) 고정자 유효전력 맥동제거  
 Fig. 3 Power control (a) without considering the grid unbalanced voltage (b) to eliminate the stator active power ripple

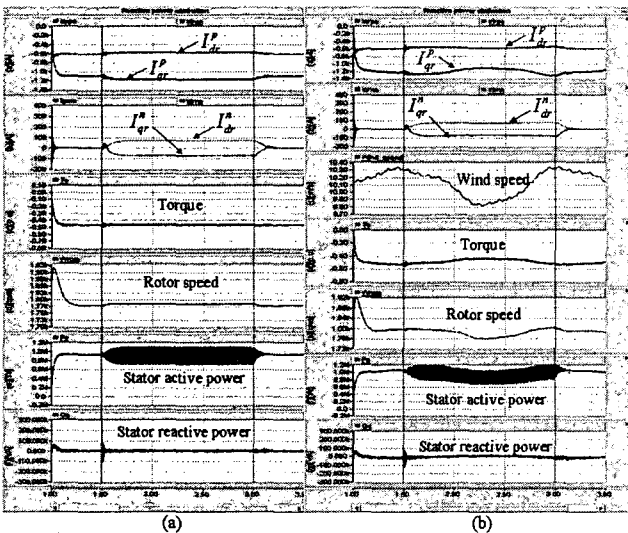


그림 4 고정자 무효전력 맥동을 제거하기 위한 전력제어 (a) 일정 풍속 (b) 가변 풍속  
 Fig. 4 Power control to eliminate the stator reactive power ripple (a) constant wind speed (b) variation wind speed

#### 4. 시뮬레이션 결과

제안한 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 그래픽모 델을 기반으로 한 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 발전기는 2[MW]이며 인버터 스위칭 주파수는 5[kHz]이다. 계통전압이 평형인 상태에서 기동하고 t=1.5[sec]에서 t=3.0[sec]까지 a상 전압의 크기를 20% 감소시키고, 그 후 다시 평형상태로 회복시킨다.

그림 3(a)는 불평형이 존재함에도 불구하고 이를 고려하지 않고 전력제어를 한 경우의 파형이다. 불평형시 회전자 전류에

역상 성분이 나타나고 이에 대한 제어를 하지 않았기 때문에 맥동성분이 나타남을 볼 수 있다. 또 불평형 구간에서 토크와 회전자 속도 그리고 유효 및 무효전력에서 맥동이 나타남을 볼 수 있다. 그림 3(b)는 유효전력의 맥동을 제거하기 위한 전력 제어(식 (12), (13)의 회전자 역상분 전류지령을 이용)를 한 경우의 파형이다. 회전자전류의 역상성분을 제어하여 유효전력의 맥동을 감소시킨다. 그러나 식(10), (11)에 나타나는 것처럼 유효전력의 맥동성분이 완벽히 제거되지 않는다. 그림 4(a)는 무효전력의 맥동을 제거하기 위한 전력제어(식(14), (15)의 회전자 역상분 전류지령을 이용)를 한 경우의 파형이다. 회전자 역상분 전류의 제어에 의해서 무효전력의 맥동이 제거됨을 볼 수 있다. 3절에서 언급한 대로 무효전력의 맥동을 제어함으로써 토크 맥동이 제거됨을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 풍속이 변하는 경우에 그림 4(a)에 대응되는 파형이다. 무효전력 리플이 제거 되고 토크 리플도 제거됨을 볼 수 있다..

#### 5. 결론

본 논문에서는 계통전압에 불평형이 발생할 경우 풍력발전용 DFIG의 새로운 전력제어기법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 제안한 알고리즘으로 DFIG 고정자의 유효전력 맥동을 감소시키거나 무효전력 맥동을 제거할 수 있다. PSCAD를 이용한 시뮬레이션 결과로부터 무효전력의 맥동을 제거하는 것이 회전자전류의 역상성분과 속도 및 토크의 맥동을 제거하는데 매우 효과적임을 보였다.

#### 참고 문헌

- [1] L.M. Craig, M. Davidson, N. Jenkins, A. Vaudin, "Integration of Wind Turbines on Weak Rural Networks," *Opportunities and Advances in International Power Generation*, 1996, Conference Publication No. 419, pp 164-167.
- [2] Allan E. A., "Large Wind Turbines and Weak Rural Electricity Systems", *Proceedings of the BWEA Conference*, Stirling, June 1994.
- [3] E. Muljadi, T. Batan, D. Yildirim, and C. P. Butterfield, "Understanding the unbalanced-voltage problem in wind turbine generation," *IEEE IAS Conf. Proc.*, pp. 1359-1365, 1999.
- [4] T. Brekken and N. Mohan, "A novel doubly-fed induction wind generator control scheme for reactive power control and torque pulsation compensation under unbalanced grid voltage conditions", *IEEE PESC Conf. Proc. Vol. 2*, pp. 760 - 764, 2003.
- [5] H. S. Song and K. Nam, "Dual current control for PWM converter under unbalanced input voltage conditions", *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, Vol. 46, No. 5, pp. 953-959, 1999.
- [6] W. Hofman, F. Okafor, "Optimal control doubly fed full controlled induction wind generator with high efficiency", *IEEE IECON Conf. Proc. Vol. 2*, pp. 1213-1218, 2001.