

전원 전압 불평형시 권선형 유도전동기의 토크리플 저감

박홍극, 이동춘
영남대학교 전기공학과

Torque Ripple Reduction of Wound-Type Induction Motors Under Unbalanced Utility Voltage

Hong-Geuk Park, Dong-Choon Lee
Dept. of Electrical Eng. Yeungnam University

Abstract - 본 논문에서는 전원전압 불평형시 권선형 유도전동기(wound-type induction motor)에 발생하는 토크리플을 저감하는 방법을 제안한다. 전원 전압에 불평형이 발생할 경우, 전류와 전압은 정상분과 역상분으로 표현되고 역상성분에 의해 고정자에 무효 전력리플이 발생하며 이 성분에 의해 유도전동기는 토크 맥동을 발생한다. 무효전력 리플 성분을 0으로 제어함으로써 토크 리플을 저감할 수 있다. 제안된 토크리플 저감 방법은 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션으로 알고리즘의 타당성이 검증된다.

1. 서 론

산업 발달로 인해 전력 사용의 약 50%정도가 펌프나 환기장치에 의해 소비되며, 이와 같은 시스템에는 대용량의 유도기가 사용된다. 특히 1[MW]이상의 시스템에서는 권선형 유도전동기(혹은 DFIM: doubly-fed induction motor)가 많이 사용된다[1]-[3]. 또한, 최근 들어 풍력발전에 대한 수요가 급증하면서 권선형 유도기에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다.

DFIM은 고정자가 전원에 직접 연결되고, 회전자는 Back-to-Back 컨버터를 통해 계통과 연결된다. 회전자측 컨버터는 시스템 운전시 슬립 전력만을 조절하므로 운전범위가 정격속도 부근에서 좁은 범위인 경우 기존의 전전력 컨버터와 비교하여 DFIM에 사용되는 컨버터는 저렴한 구조이다[3]. 또한, DFIM은 회전자의 d-축 전류를 제어하여 고정자 무효 전력을 제어할 수 있어 역률을 제어할 수도 있다.

그림 1은 Back-to-Back PWM 컨버터가 결합된 DFIM 구동시스템을 보인다. 그림 1을 통해 알 수 있듯이 전원 전압에 불평형이 발생하면 전동기의 고정자측에 불평형 전원 전압이 인가된다. NEMA와 IEEE의 표준에 따르면, 시스템은 상전압 변동의 ±10% 이내 또는 전압 불평형이 3% 미만에서 동작하는 것이 요구된다[5][6]. 전원 전압 조건이 앞에 언급된 값을 초과하지 않더라도 DFIM은 전원전압의 불평형 때문에 상당한 토크 맥동을 발생한다. 이 토크 맥동은 기계적 스트레스와 소음을 발생한다[7].

최근에 전원 불평형 아래에서 DFIM의 동작에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 참고 [4]의 방법은 측정된 전류 신호를 이용하여 토크 맥동을 감소시킬 수 있다. 그러나 제어 시스템의 제어 대역폭에 제한이 있어 역상 성분으로 나타나는 120[Hz]의 전류 성분을 신속하게 추정하는데 어려움이 있다. 또 고정자의 무효 전력 맥동을 제거함으로써 DFIM의 토크맥동을 제거하는 방법이 발표된 바 있다[8][9].

본 논문에서는 모터 드라이브의 관점에서 전원 불평형시 토크 맥동을 저감하고자 한다. 토크리플은 무효전력의 리플성분을 제거함으로써 제거될 수 있다. 제안된 제어 방식은 PSCAD / EMTDC에서 2[MW] DFIM을 사용한 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 타당성이 검증된다.

2. Modeling and Control of DFIM

2.1 DFIM modeling

그림 2는 DFIM의 d-q 등가 회로를 나타낸다. DFIM의 자속과 전압 방정식은 식(1)-(4)와같이 표현된다.

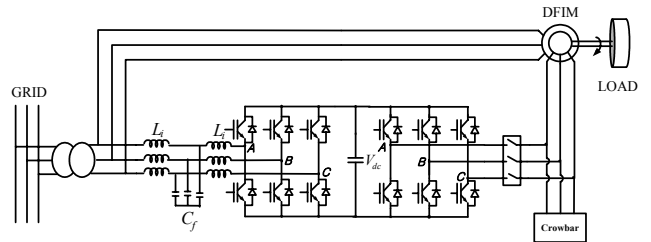
$$\lambda_{dqs} = L_s i_{dqs} + L_m i_{dqr} \tag{1}$$

$$\lambda_{dqr} = L_r i_{dqr} + L_m i_{dqs} \tag{2}$$

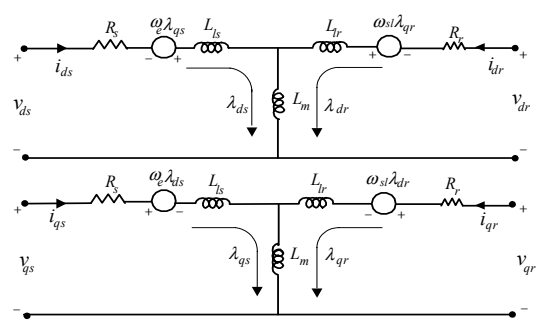
$$v_{dqs} = R_s i_{dqs} + p\lambda_{dqs} + j\omega_e \lambda_{dqs} \tag{3}$$

$$v_{dqr} = R_r i_{dqr} + p\lambda_{dqr} + j\omega_{sl} \lambda_{dqr} \tag{4}$$

여기서, L_m :자화 인덕턴스, L_s :고정자 누설 인덕턴스, L_r :회전자 누설 인덕턴스 λ_{dqs} : 고정자 d-q축 누설 자속, λ_{dqr} : 회전자 d-q축 누설 자속



<그림 1> DFIM 구동 시스템



<그림 2> DFIM의 d-q축 등가회로

i_{dqr} : 고정자 d-q축 전류, i_{dqs} : 회전자 d-q축 전류,
 ω_e, ω_{sl} : 전원과 슬립각 주파수, p : 미분 연산자

DFIM은 고정자 자속 기준벡터 제어기법으로 제어되며 식(5)를 이용하여 고정자의 d-q축 자속을 계산하고 계산된 자속값을 사용하여 식(6)과 같이 고정자 자속각을 산출한다. 또한, 이 자속각을 이용하여 전압, 전류 성분을 동기좌표계로 변환한다.

$$\lambda_{dqs}^* = \int (v_{dqs}^* - R_s i_{dqs}^*) dt \tag{5}$$

$$\theta_e = \tan^{-1} \frac{\lambda_{qs}^*}{\lambda_{ds}^*} \tag{6}$$

또한, 회전자측 변환을 위해 식(7)과 같이 슬립각 θ_{sl} 을 이용하여 동기좌표계로 변환한다.

$$\theta_{sl} = \theta_e - \theta_r \tag{7}$$

여기서 θ_r 은 회전자 위상각이다.

식(1)-(4)의 값들을 이용하여 토크식을 전개하면 식(8)과 같이 나타낸다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{L_s} L_m (\lambda_{ds} i_{qr} - \lambda_{qs} i_{dr}) \tag{8}$$

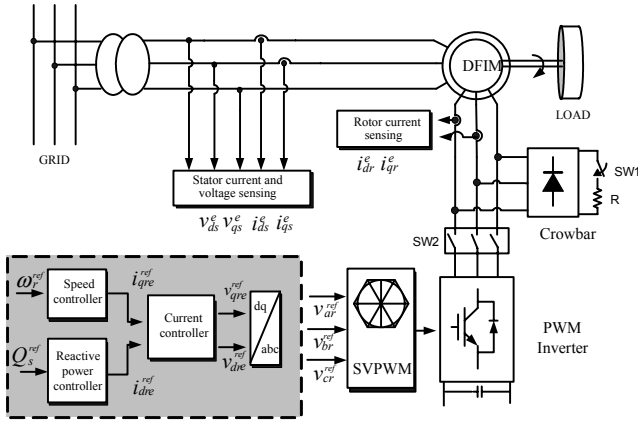
2.2 DFIM 제어

고정자의 무효전력은 식(1)-(4)를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_{qs} (i_{ms} - i_{dr}) \tag{9}$$

여기서 i_{ms} 는 여자전류이다.

식(8)과 식(9)에서 알 수 있듯이 DFIM의 토크는 회전자의 q-축 전류 성분을 이용하여 제어하고 회전자의 d-축 전류 성분을 제어하여 고정자



〈그림 3〉 DFIM의 제어블록도

의 무효전력 성분을 제어한다. 또한 무효전력을 제어하므로 단위 역률 제어가 가능하다. 그림 3은 DFIM의 제어 블록도를 나타낸다.

3. 전원 전압 불평형시 DFIM 제어

불평형 전원 전압에서 DFIM의 제어와 마찬가지로 전동기로 동작할 경우에도 마찬가지로 적용된다[8].

3.1 DFIM 토크

전원전압의 불평형시 DFIM의 특성방정식은 식(1)-(4)에서 정상분으로 윗첨자 “p”로 표현되고 역상분은 전원 각주파수에 반대방향으로 회전하며 $-\omega_e$ 로 나타나며 윗첨자 “n”을 첨가하여 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{dq_s}^n = L_s I_{dq_s}^n + L_m I_{dqr}^n \quad (10)$$

$$\lambda_{dqr}^n = L_r I_{dqr}^n + L_m I_{dq_s}^n \quad (11)$$

$$v_{dq_s}^n = R_s I_{dq_s}^n + \frac{d}{dt} \lambda_{dq_s}^n + j(-\omega_e) \lambda_{dq_s}^n \quad (12)$$

$$v_{dqr}^n = R_r I_{dqr}^n + \frac{d}{dt} \lambda_{dqr}^n + j(-\omega_e - \omega_r) \lambda_{dqr}^n \quad (13)$$

DFIM의 고정자와 회전자 피상전력은 다음과 같이 표현된다.

$$S_T = 1.5(V_{dq_s}^* I_{dq_s}^{*p} + V_{dqr}^* I_{dqr}^{*n}) \quad (14)$$

여기서

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

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

여기서 ω_r 은 회전자 속도이다.

식(14)로 계산된 실수 부분을 기계 속도로 나누면 토크가 되며 이는 다음과 같이 표현된다[8].

$$T_e(t) = T_{e0} + T_{es2} \cos(2\omega_e t) + T_{es2} \sin(2\omega_e t) \quad (15)$$

여기서

$$T_{e0} = 1.5 L_m (i_{qs}^p i_{dr}^p + i_{qs}^n i_{dr}^n) \quad (16)$$

$$T_{es2} = 1.5 L_m (i_{qs}^p i_{dr}^n + i_{qs}^n i_{dr}^p) \quad (17)$$

$$T_{es2} = 1.5 L_m (i_{qs}^p i_{dr}^n - i_{qs}^n i_{dr}^p) \quad (18)$$

여기서 T_{e0} 는 평균토크, T_{es2} 와 T_{es2} 는 토크리플의 크기이다.

토크리플 성분은 회전자 전류의 d-q축의 역상분을 제어하여 감소시킬 수 있으며, 이는 3.2절에 기술할 무효전력 리플 성분을 줄임으로써 가능하다.

3.2 DFIM 출력

불평형 전원전압 아래에서 DFIM의 피상전력은 역상분과 정상분으로 표현된다.

$$S_s = 1.5(V_{dq_s}^* I_{dq_s}^{*p}) \quad (19)$$

여기서,

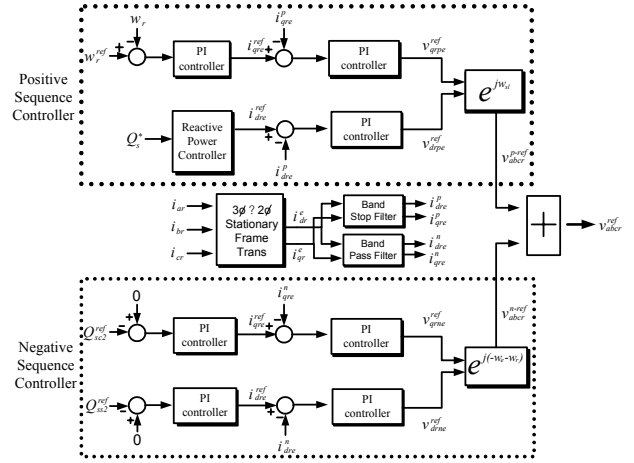
$$v_{dq_s}^* = e^{j\omega_e t} v_{dq_s}^{*p} + e^{j(-\omega_e)t} v_{dq_s}^{*n}$$

$$i_{dq_s}^* = e^{j\omega_e t} i_{dq_s}^{*p} + e^{j(-\omega_e)t} i_{dq_s}^{*n}$$

식(19)를 이용하여 DFIM의 순시유효전력과 무효전력은 다음과 같이 표현된다.

$$p_s(t) = P_{s0} + P_{s2} \cos(2\omega_e t) + P_{s2} \sin(2\omega_e t) \quad (20)$$

$$q_s(t) = Q_{s0} + Q_{s2} \cos(2\omega_e t) + Q_{s2} \sin(2\omega_e t) \quad (21)$$



〈그림 4〉 불평형시 DFIM의 제어블록도

여기서,

$$P_{s0} = 1.5(v_{ds}^p i_{ds}^p + v_{qs}^p i_{qs}^p + v_{ds}^n i_{ds}^n + v_{qs}^n i_{qs}^n)$$

$$P_{se2} = 1.5(v_{ds}^p i_{ds}^n + v_{qs}^p i_{qs}^n + v_{ds}^n i_{ds}^p + v_{qs}^n i_{qs}^p)$$

$$P_{ss2} = 1.5(v_{qs}^p i_{ds}^p - v_{ds}^p i_{qs}^p - v_{qs}^n i_{ds}^n + v_{ds}^n i_{qs}^n)$$

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

$$Q_{se2} = 1.5(v_{qs}^p i_{ds}^n - v_{ds}^p i_{qs}^n + v_{qs}^n i_{ds}^p - v_{ds}^n i_{qs}^p)$$

$$Q_{ss2} = 1.5(v_{ds}^p i_{ds}^p + v_{qs}^p i_{qs}^p - v_{ds}^n i_{ds}^n - v_{qs}^n i_{qs}^n)$$

고정자 자속기준 벡터제어로 제어할 경우 고정자의 d-축 전압의 정상분과 역상분은 0이다. 따라서 유효전력과 무효전력의 리플성분은 식(22)-(24)와 같이 나타난다.

$$P_{se2} = 1.5(v_{qs}^p i_{qs}^n + v_{qs}^n i_{qs}^p) \quad (22)$$

$$P_{ss2} = 1.5(v_{qs}^p i_{ds}^p - v_{ds}^p i_{qs}^p) \quad (23)$$

$$Q_{se2} = 1.5(v_{qs}^p i_{ds}^n + v_{qs}^n i_{ds}^p) \quad (24)$$

$$Q_{ss2} = 1.5(v_{qs}^p i_{qs}^n - v_{qs}^n i_{qs}^p) \quad (25)$$

식(1)-(4)과 (10)-(13)을 식(22)-(25) 대입하고 제어가 잘 추종한다고 가정하고 미분항을 제거하면 유효전력과 무효전력은 식(26)-(29)와 같이 나타난다.

$$P_{se2} = 1.5 \left\{ 2 \left(R_s + \frac{dL_s}{dt} \right) i_{qs}^p i_{qs}^n - \omega_e L_m (i_{qs}^p i_{dr}^n - i_{qs}^n i_{dr}^p) \right\} \quad (26)$$

$$P_{ss2} = -1.5 \left\{ 2\omega_e L_s i_{qs}^p i_{qs}^n + \omega_e L_m (i_{qs}^p i_{qr}^n + i_{qs}^n i_{qr}^p) \right\} \quad (27)$$

$$Q_{se2} = -1.5\omega_e L_m (i_{qs}^p i_{qr}^n - i_{qs}^n i_{qr}^p) \quad (28)$$

$$Q_{ss2} = 1.5\omega_e L_m (i_{qs}^p i_{dr}^n + i_{qs}^n i_{dr}^p) \quad (29)$$

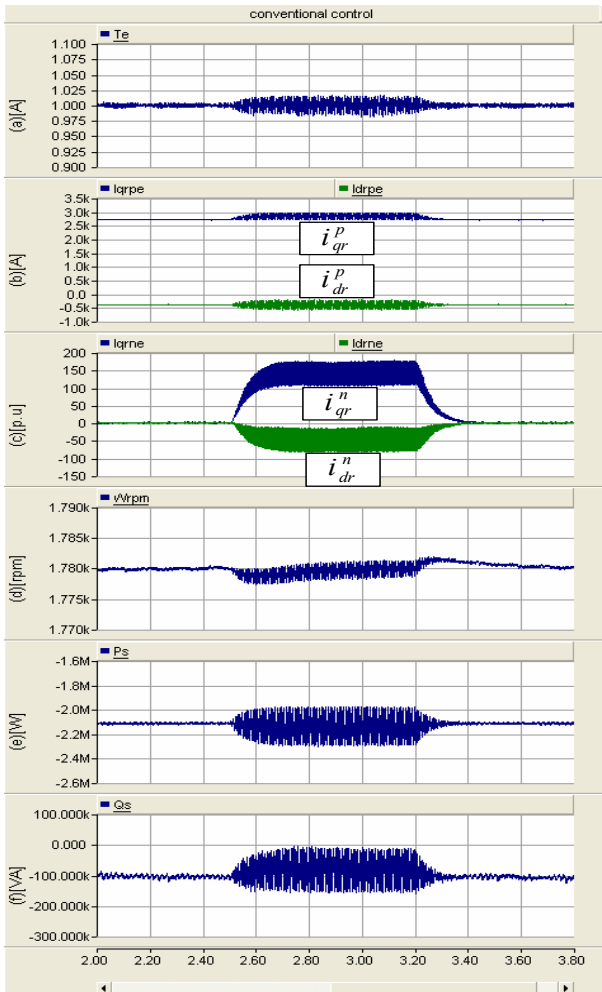
식(28)과 (29)에서 알 수 있듯이 무효전력의 리플성분은 식(17)과 (18)의 토크 리플성분과 같은 성분임을 확인할 수 있다. 따라서, 무효전력 리플 성분을 0으로 제어하여 기계적인 토크리플의 제어가 가능함을 알 수 있다.

그림 4는 전원 전압 불평형시 DFIM의 제어 블록도를 나타낸다. 무효전력 리플을 제거하기 위해 내부 전류 제어 루프에 Q_{es2} 와 Q_{ss2} 를 제어를 위한 제어 루프가 더해진다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 제안된 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 2[MW], 690[V], 60[Hz]의 정격의 전동기를 사용하였으며, 스위칭 주파수는 2[kHz], 직류 링크전압은 1,200[V]이고, 한 상의 상전압을 정격전압의 10%만큼 순시강하시켜 과도 상태를 발생시킨다.

그림 5는 전원전압 불평형시 DFIM의 제어특성을 보여준다. 그림 5(a)는 2.5초~3.2초 사이에 전원전압에 불평형이 발생할 경우, 전동기에 나타나는 토크는 기준치 1[p.u.]에서 0.03[p.u.]의 범위에서 맥동하는 것을 보여준다. 그림 5(b)와 (c)는 회전자의 정상분과 역상분 전류를 나타내고 그림 5(d)는 전동기의 회전속도를 나타내며, 불평형 구간에서 리플이 발생함을 알 수 있다. 그림 5(e), (f)는 각각 고정자 유효 무효전력을 나타낸다. 이 구간에서 역상성분이 포함되어 정격 주파수의 2배의 성분으로 맥동하는 성분이 포함되어 불평형 구간에 나타남을 알 수 있다.



〈그림 5〉 불평형시 DFIM의 성능

- (a) 전동기 토크 (b) d-q축 회전자 정상분 전류
 (c) d-q축 회전자 역상분 전류 (d) 회전속도
 (e) 고정자 유효 전력 (f) 고정자 무효 전력

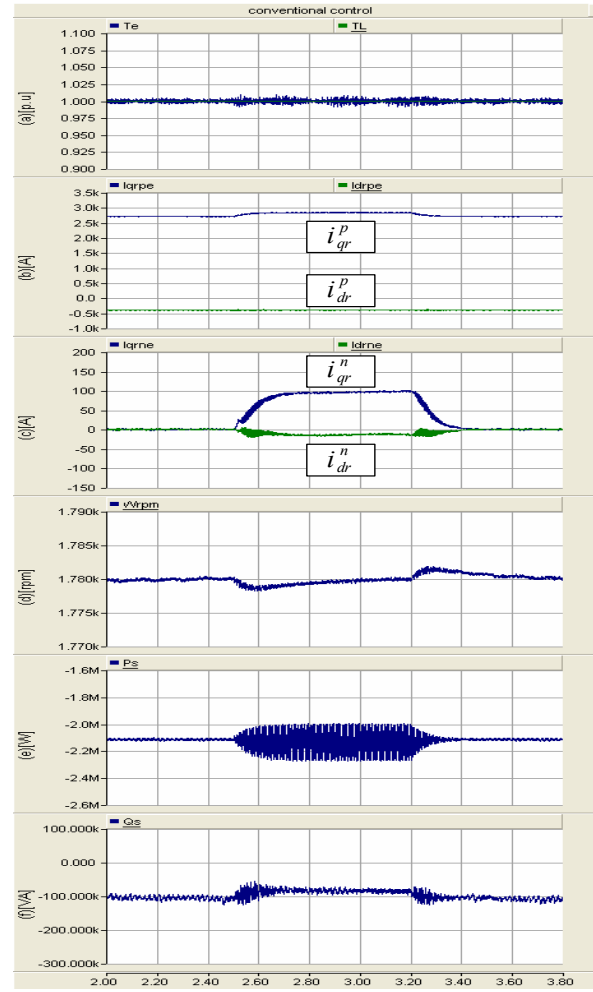
그림 6은 고정자 무효전력 리플을 제어하여 전동기에 발생한 토크 리플을 저감한 특성을 보여준다. 그림 6(a)는 전동기의 토크리플을 보인다. 그림 5(a)와 비교하여 토크리플이 저감되어 기준치 1[p.u.]와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 토크 저감은 그림 5(f)에서 발생하는 고정자 축의 무효전력리플 성분을 그림 6(c)와 같이 회전자축 역상분 전류 성분을 제어하여 그림 6(f)와 같이 무효전력 리플성분을 제거한 것임을 알 수 있다. 또한, 무효전력 리플 성분을 제거함으로써 발전기에서 발생하는 속도 리플도 저감된 것을 그림 6(d)에서 확인할 수 있다. 그러나 무효전력 리플만을 제거하였으므로 유효전력 리플은 여전히 남아 있음을 그림 6(e)에서 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전원전압 불평형시 DFIM의 고정자 무효전력 맥동을 제어하므로 전동기 토크 맥동을 저감하는 제어기법을 제안하였다. 고정자 무효전력 리플은 회전자축의 역상분 전류 제어에 의해 제어되고 제안된 제어 알고리즘은 PSCAD/EMTDC를 이용한 2[MW] DFIM 시스템의 시뮬레이션을 통해 제어 알고리즘의 타당성이 검증되었다.

〔참 고 문 헌〕

[1] W. Leonhard, *Control Electrical Drives*, Springer Verlag, 1997
 [2] A. Bocquel and J. Janning, "Analysis of a 300MW variable speed drive for pump-storage plant applications," *Power*



〈그림 6〉 불평형시 DFIM의 성능

- (a) 전동기 토크 (b) d-q축 회전자 정상분 전류
 (c) d-q축 회전자 역상분 전류 (d) 회전속도
 (e) 고정자 유효 전력 (f) 고정자 무효 전력

Electronics and Applications, 2005 European Conf. on, pp. 11-14, Sept. 2005.
 [3] S. Drid, M. S. Nait-Said, and M. Tadjine, "Double flux oriented control for the doubly fed induction motor," *Electric Power Components and Systems*, vol. 33, no. 10, pp. 1081-1095, Oct. 2005.
 [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 Proc.*, vol. 2, pp. 760 - 764, 2003.
 [5] NEMA Standards, "Application guide for AC adjustable speed drive systems".
 [6] IEEE Standard, IEEE Standard C 37.96-2000, "IEEE guide for AC motor protection".
 [7] 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.
 [8] J.-I. Jang, Y.-S. Kim, and D.-C. Lee, "Active and reactive power control of DFIM for wind energy conversion under unbalanced grid voltage," *IPEMC 2006proc.*, Shanghai, vol. 3, pp. 1487-1491, Aug. 2006.
 [9] Lie Xu and Yi Wang, "Dynamic modeling and control of DFIM based wind turbines under unbalanced network conditions," *IEEE Trans on Power Systems*, vol. 22, no. 1, Feb. 2007.