

이중여자 유도형 풍력발전기의 고정자 전류 맥동 저감에 관한 연구

김성진*, 황선환*, 김장목*, 이재경**
 부산대학교*, 한국전력연구원**

Reduction of Stator Current Ripples in Doubly Fed Induction Generator

Sung-Jin Kim, Seon-Hwan Hwang, Jang-Mok Kim, Jae-Kyung Lee
 Pusan National University, Korea Electric Power Research Institute

ABSTRACT

DFIG(Doubly Fed Induction Generator)를 이용한 풍력 발전 시스템의 경우 고정자 측에 발전된 유효전력 및 무효전력 제어를 위해 회전자 전류제어가 필요하다. 본 논문에서는 제안된 알고리즘을 통해 DFIG의 고정자 전류에 발생한 전류 리플을 분석하고 보상 성분을 회전자 전류 제어에 반영함으로써 고정자 전류 리플을 저감시켰다. 제안된 알고리즘은 실험을 통해 검증하였다.

1. 서론

DFIG는 유효전력 및 무효전력 제어를 위해 회전자의 전류를 제어한다.^[1]회전자 전류의 원활한 제어를 위해 정밀한 전류 측정이 필수인데 실제 시스템에서는 전류 측정 시 오차가 발생한다^[2]. 발생 가능한 오차는 2가지로 나누어 질 수 있다. 하나는 옵셋 오차이며 다른 하나는 스케일 오차이다. 발생한 전류 측정 오차는 벡터 제어 시 동기 좌표계 회전자 및 고정자 전류에 슬립 주파수의 각각 1배와 2배의 전류 맥동을 발생시킨다.

본 논문에서는 회전자 측 전류 맥동 성분을 고정자 측에서 검출하고 검출된 오차 성분을 회전자 전류제어에 반영함으로써 고정자 측 전류 맥동을 저감시키는 알고리즘을 제안하였다. 검출 알고리즘의 경우 동기 좌표계상의 고정자 d축 전류를 슬립 각의 일정 구간 적분을 통하여 검출함으로써 쉽게 구현 가능하며 이를 실험을 통해 증명하였다.

2. DFIG 모델링 및 제어

그림 1은 DFIG를 이용한 풍력발전 시스템으로 그림 1에서 알 수 있듯이 이중여자 유도형 풍력발전기의 고정자는 계통에 연결되어 있기 때문에 고정자 측에서는 항상 일정한 전압과 주파수를 갖는다. 이것은 이중여자 유도형 풍력발전기가 일정한 크기의 고정자 자속을 갖는다고 볼 수 있다. 고정자 측 3상 전압을 정지좌표계로 변환하여 고정자 자속을 나타내면 식(1)과 식(2)로 표현할 수 있다^[3].

$$\lambda_{ds}^s = \int (v_{ds}^s - R_s i_{ds}^s) dt \quad (1)$$

$$\lambda_{qs}^s = \int (v_{qs}^s - R_s i_{qs}^s) dt \quad (2)$$

단, R_s : 고정자 저항, d^s, q^s : 정지 좌표계의 고정자 전

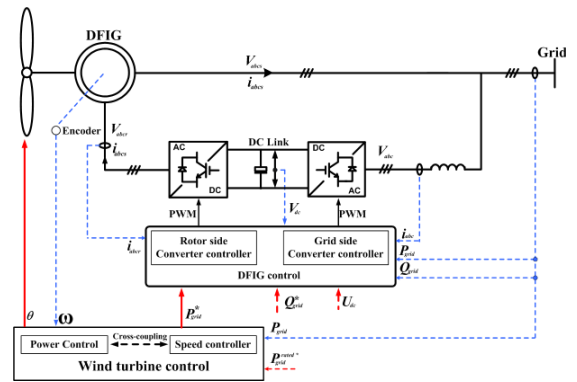


그림 1. DFIG 풍력발전 시스템의 구성도

Fig. 1 Block diagram of DFIG system

전압, d^s, q^s : 정지 좌표계의 고정자 전류

고정자 자속 및 동기각도는 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$|\lambda_s| = \sqrt{(\lambda_{ds}^s)^2 + (\lambda_{qs}^s)^2} \quad (3)$$

$$\theta_e = \tan^{-1} \frac{\lambda_{qs}^s}{\lambda_{ds}^s} \quad (4)$$

동기 좌표계에서는 d축의 자속값은 상수이고 q축은 0에 가깝기 때문에 $\lambda_{ds}^s \approx \lambda_s$, $\lambda_{qs}^s \approx 0$ 와 같다. 동기 좌표계에서 권선형 유도발전기의 전압 및 자속 방정식은 아래 수식과 같다.

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + \frac{d\lambda_{ds}^e}{dt} \cong 0 \quad (5)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \omega_e \lambda_{ds}^e \quad (6)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \quad (7)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \cong 0 \quad (8)$$

동기 좌표계에서 d, q축의 자속을 나타낸 식 (7),(8)에 의해 동기 좌표계의 고정자 d, q축 전류는 다음 식 (9),(10) 같다.

$$i_{ds}^e = \frac{\lambda_{ds}^e - L_m i_{dr}^e}{L_s} \quad (9)$$

$$i_{qs}^e = \frac{\lambda_{qs}^e - L_m i_{qr}^e}{L_s} \quad (10)$$

2. 회전자 전류 측정 오차가 고정자 전류에 미치는 영향

2.1 옵셋 오차의 영향

옵셋 오차는 센서와 측정 경로에 위치한 소자의 전압 불균형으로 발생될 수 있으며 이러한 회전자 상전류 센서의 옵셋 오차에 의한 영향은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{ar_sens} = i_{ar} + \Delta I_{ar} \quad (11)$$

$$I_{br_sens} = i_{br} + \Delta I_{br}$$

$$I_{cr_sens} = -(I_{ar_sens} + I_{br_sens})$$

단, $\Delta I_{ar}, \Delta I_{br}$: 회전자 상전류 전류 센서 옵셋 영향에 의한 오차 성분

3상 회전자 전류를 동기 좌표계 d-q축으로 변환하게 되면 회전자 전류의 맥동 성분은 식 (12)와 같다.

$$\Delta I_{dr}^e = \Delta I_{ar} \cos(s\omega_e t) + \frac{1}{\sqrt{3}}(\Delta I_{ar} + 2\Delta I_{br}) \sin(s\omega_e t) \quad (12)$$

$$\Delta I_{qr}^e = -\Delta I_{ar} \sin(s\omega_e t) + \frac{1}{\sqrt{3}}(\Delta I_{ar} + 2\Delta I_{br}) \cos(s\omega_e t)$$

회전자 전류의 옵셋 오차에 의한 영향으로 회전자 전류는 슬립 주파수의 1배($s\omega_e t$)에 해당하는 맥동성분을 가지고 있다. 이러한 맥동 성분을 동기 좌표계 고정자 전류로 표현하면 식 (13)와 (14)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta I_{ds}^e = \frac{\lambda_{ds}^e - L_m}{L_s} \Delta I_{dr}^e \quad (13)$$

$$= \frac{\lambda_{ds}^e - L_m}{L_s} [\Delta I_{ar} \cos(s\omega_e t) + \frac{1}{\sqrt{3}}(\Delta I_{ar} + 2\Delta I_{br}) \sin(s\omega_e t)]$$

$$\Delta I_{qs}^e = \frac{\lambda_{qs}^e - L_m}{L_s} \Delta I_{qr}^e \quad (14)$$

$$= \frac{\lambda_{qs}^e - L_m}{L_s} [-\Delta I_{ar} \sin(s\omega_e t) + \frac{1}{\sqrt{3}}(\Delta I_{ar} + 2\Delta I_{br}) \cos(s\omega_e t)]$$

식 (13)와 (14)를 통해서 알 수 있듯이 동기 좌표계 고정자 전류에서 슬립 주파수의 1배($s\omega_e t$)에 해당하는 맥동성분을 가지고 있음을 알 수 있다.

2.2 스케일 오차의 영향

스케일 오차의 경우, 아날로그 입력 신호 처리 회로 및 전류 센서 자체의 비선형성, A/D 컨버터의 quantization error 및 비선형성에 의해서도 발생할 수 있다. 이때 회전자 상전류의 정보를 측정하는 경로에서 포함되는 스케일 오차의 이득을 K_a, K_b 라 할 때 식 (15)로 표현할 수 있다.

$$I_{ar_sens} = -K_a I \sin(s\omega_e t) \quad (15)$$

$$I_{br_sens} = -K_b I \sin(s\omega_e t - \frac{2}{3}\pi)$$

이를 동기 좌표계 d-q축으로 좌표 변환을 한 회전자 전류의 맥동 성분은 식 (16), (17)와 같다.

$$\Delta I_{dr_sca}^e = \frac{(K_b - K_a)}{\sqrt{3}} I \sin(2s\omega_e t + \frac{\pi}{6}) + \frac{(K_b - K_a)I}{2\sqrt{3}} \quad (16)$$

$$\Delta I_{qr_sca}^e = \frac{(K_b - K_a)}{\sqrt{3}} I \sin(2s\omega_e t - \frac{\pi}{3}) + \frac{(K_b + K_a)I}{2} \quad (17)$$

식 (16), (17)에서 알 수 있듯이 스케일 오차에 의한 영향은

일정한 위상각을 가지면서 슬립 주파수의 2배($2s\omega_e t$)에 해당하는 전류 맥동을 가지고 이러한 맥동 성분에 의한 동기 좌표계 상의 고정자 전류는 식 (18)과 (19)로 표현 할 수 있다.

$$\Delta I_{ds_sca}^e = \frac{\lambda_{ds}^e - L_m}{L_s} [\frac{(K_b - K_a)}{\sqrt{3}} I \sin(2s\omega_e t + \frac{\pi}{6})] \quad (18)$$

$$\Delta I_{qs_sca}^e = \frac{\lambda_{qs}^e - L_m}{L_s} [\frac{(K_b - K_a)}{\sqrt{3}} I \sin(2s\omega_e t - \frac{\pi}{3})]$$

(19)

동기 좌표계 고정자 전류는 슬립주파수의 2배에 해당하는 맥동성분을 가지고 있음을 알 수 있다.

3. 전류 맥동 검출 및 보상

3.1 보상을 위한 제어요소의 검출

회전자 상 전류 측정 오차로 인한 맥동 검출 및 보상을 위해 식(13),(14),(18),(19)에서 알 수 있듯이 동기좌표계 고정자 d 축 전류를 관찰 하면 회전자 전류 측정 오차로 인한 스케일 및 옵셋의 오차 성분을 검출할 수 있다. 제안한 검출 방법은 그림 2와 같다.

먼저 옵셋의 오차를 검출을 위해 동기 좌표계 고정자 d축 전류 식(13)을 슬립 각 θ_{sl} 주기의 $1/2\pi \sim 3/2\pi$ 구간 적분을 식 (20)과 같이 수행한다.

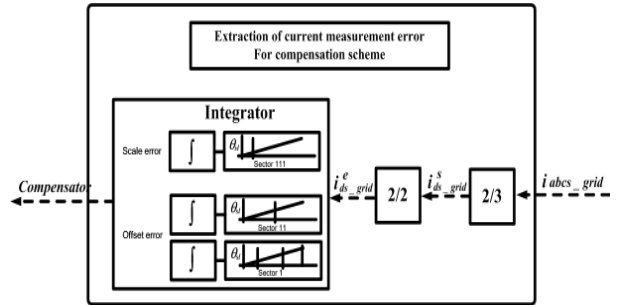


그림 2. 보상을 위한 오차 성분 검출

Fig. 2 Extraction of current measurement error for compensation

$$Sector1 = \int_{\frac{1}{2}\pi}^{\frac{3}{2}\pi} \Delta i_{ds}^e d\theta_{sl} \quad (20)$$

$$= \int_{\frac{1}{2}\pi}^{\frac{3}{2}\pi} \Delta I_{ar} \cos\theta_{sl} d\theta_{sl} + \int_{\frac{1}{2}\pi}^{\frac{3}{2}\pi} \frac{1}{\sqrt{3}}(\Delta I_{ar} + 2\Delta I_{br}) \sin\theta_{sl} d\theta_{sl} = -2\Delta I_{ar}$$

식 (20)의 수행된 적분 값은 회전자 A상 전류의 옵셋 크기에 해당 하며 보상을 위해 사용 된다. 검출된 A상 전류의 옵셋 오차를 보상한 후의 동기 좌표계 고정자 d 축 전류 i_{ds}^e 는 식 (21)와 같게 되며 식 (22)과 같이 슬립각 θ_{sl} 주기의 $0 \sim 1/2\pi$ 구간을 적분하면 B상 전류 옵셋 오차를 검출할 수 있고 이는 보상을 위해 사용된다.

$$\Delta i_{ds}^e = \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta I_{br} \sin\theta_{sl} \quad (21)$$

$$Sector2 = \int_0^{\pi} \Delta i_{ds}^e d\theta_{sl} = \int_0^{\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta I_{br} \sin\theta_{sl} d\theta_{sl} = \frac{4}{\sqrt{3}} \Delta I_{br}$$

(22)

