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 발 전 시스템의 경우 고정자 측에 발전된 유효전력 및 무효전력 제어를 위해 회전자 전류제어가 필요하다. 본 논문에서는 제 안된 알고리즘을 통해 DFIG의 고정자 전류에 발생한 전류 리 플을 분석하고 보상 성분을 회전자 전류 제어에 반영함으로써 고정자 전류 리플을 저감시켰다. 제안된 알고리즘은 실험을 통 해 검증하였다.

1. 서 론

DFIG 는 유효전력 및 무효전력 제어를 위해 회전자의 전류 를 제어 한다.^{[1],}회전자 전류의 원활한 제어를 위해 정밀한 전 류 측정이 필수 인데 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 발생시킨 다.

본 논문에서는 회전자 측 전류 맥동 성분을 고정자 측에서 검출 하고 검출 된 오차 성분을 회전자 전류제어에 반영함으로 써 고정자 측 전류 맥동을 저감 시키는 알고리즘을 제안하였 다. 검출 알고리즘의 경우 동기 좌표계상의 고정자 d축 전류를 슬 립 각의 일정 구간 적분을 통하여 검출함으로써 쉽게 구현 가 능하며 이를 실험을 통해 증명하였다.

2. DFIG 모델링 및 제어

그림 1은 DFIG를 이용한 풍력발전 시스템으로 그림 1에서 알 수 있듯이 이중여자 유도형 풍력 발전기의 고정자는 계통에 연결되어 있기 때문에 고정자 측에서는 항상 일정한 전압과 주 파수를 갖는다. 이것은 이중여자 유도형 풍력 발전기가 일정한 크기의 고정자 자속을 갖는다고 볼 수 있다. 고정자 측 3상 전 압을 정지좌표계로 변환하여 고정자 자속을 나타내면 식(1)과 식 (2)로 표현할 수 있다^{[3],}

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

$$\lambda_{qs}^{s} = \int \left(v_{qs}^{s} - R_{s} i_{qs}^{s} \right) dt \tag{2}$$

단, R_s: 고정자 저항, ^{d s}, ^{g s}:정지 좌표계의 고정자 전





전압, 🐱 🧯 : 정지 좌표계의 고정자 전류

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

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

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

동기 좌표계에서는 d축의 자속값은 상수이고 q축은 0에 가 깝기 때문에 $^{\lambda s}$ ²일정, $\lambda_{qs}^{e} \cong 0$ 와 같다. 동기 좌표계에서 권선형 유도발전기의 전압 및 자속 방정식은 아래 수식과같다.

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

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

$$\lambda_{ds}^{e} = L_{s} i_{ds}^{e} + L_{m} i_{dr}^{e} \tag{7}$$

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

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

$$i_{ds}^{e} = \frac{\lambda_{ds}^{e} - L_{m}}{L_{s}} i_{dr}^{e} \tag{9}$$

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

회전자 전류 측정 오차가 고정자 전류에 미치는 영향

2.1 옵셋 오차의 영향

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

$$\begin{split} I_{ar_sens} &= i_{ar} + \Delta I_{ar} \qquad (11) \\ I_{br_sens} &= i_{br} + \Delta I_{br} \\ I_{cr_sens} &= -(I_{ar_sens} + I_{br_sens}) \end{split}$$

단, $\Delta I_{ur}, \Delta I_{ur}$: 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.

$$\Delta I_{dr}^{e} = \Delta I_{ar} \cos(s\omega_{e}t) + \frac{1}{\sqrt{3}} (\Delta I_{ar} + 2\Delta I_{br}) \sin(s\omega_{e}t)$$
(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(*sw_et*)에 해당하는 맥동성분을 가지고 있다. 이러한 맥동 성분을 동기 좌표계 고정자 전류로 표현하면 식 (13)와 (14)로 나타낼 수 있다.

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

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

$$\Delta I_{qs}^{e} = \frac{\lambda_{qs}^{e} - L_{m}}{L_{s}} \Delta I_{qr}^{e} \tag{14}$$

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

식 (13)와 (14)를 통해서 알 수 있듯이 동기 좌표계 고정자 전류에서 슬립 주파수의 1배($s\omega_e t$)에 해당하는 맥동성분을 가 지고 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 비 선형성에 의해서도 발생할 수 있다. 이때 회전자 상전류의 정 보를 측정하는 경로에서 포함되는 스케일 오차의 이득을 K_u, K_b라 할 때 식 (15)로 표현할 수 있다.

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

$$I_{br_{-}sens} = -K_b I \sin\left(s\omega_e t - \frac{\pi}{3}\pi\right)$$

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

$$\Delta I^{e}_{dr_sca} = \frac{(K_{b} - K_{a})}{\sqrt{3}} Isin(2s\omega_{e}t + \frac{\pi}{6}) + \frac{(K_{b} - K_{a})I}{2\sqrt{3}}$$
(16)
$$\Delta I^{e}_{qr_sca} = \frac{(K_{b} - K_{a})}{\sqrt{3}} Isin(2s\omega_{e}t - \frac{\pi}{3}) + \frac{(K_{b} + K_{a})I}{2}$$
(17)

식 (16), (17) 에서 알 수 있듯이 스케일 오차에 의한 영향은

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

$$\Delta I^{e}_{ds_sca} = \frac{\lambda^{e}_{ds} - L_{m}}{L_{s}} \left[\frac{(K_{b} - K_{a})}{\sqrt{3}} Isin(2s\omega_{e}t + \frac{\pi}{6}) \right]$$

$$\Delta I^{e}_{qs_sca} = \frac{\lambda^{e}_{ds} - L_{m}}{L_{s}} \left[\frac{(K_{b} - K_{a})}{\sqrt{3}} Isin(2s\omega_{e}t - \frac{\pi}{3}) \right]$$

$$(18)$$

(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 위 해 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 1/2π~3/2π 구간 적분을 식 (20)과 같이 수행한다.



그림 2. 보상을 위한 오차 성분 검출 Fig. 2 Extraction of current measurement error for compensation

 $Sector 1 = \int_{\frac{1}{2}\pi}^{\frac{3}{2}\pi} \Delta i_{ds}^{e} d\theta_{sl}$ $= \int_{\frac{1}{2}\pi}^{\frac{3}{2}\pi} \Delta I_{ar} \cos\theta_{sl} d\theta_{sl} + \int_{\frac{1}{2}\pi}^{\frac{3}{2}\pi} \frac{1}{\sqrt{3}} (\Delta I_{ar} + \Delta 2I_{br}) \sin\theta_{sl} d\theta_{sl}$ $= -2\Delta I$ (20)

식 (20)의 수행 된 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}는 식 (21)와 같게 되며 식 (22)과 같이 슬 립각 θ_{sl}주기의 0~1/2π 구간을 적분하면 B상 전류 옵셋 오차를 검출할 수 있고 이는 보상을 위해 사용된다.

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

$$Sector 2 = \int_{0}^{\pi} \Delta i_{ds}^{e} d\theta_{sl} = \int_{0}^{\pi} \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta I_{br} \sin \theta_{sl} d\theta_{sl}$$

$$= \frac{4}{\sqrt{3}} \Delta I_{br}$$

$$(21)$$

(22)

스케일 오차 성분을 검출하기 위해 먼저 옵셋의 오차 성분 보상이 끝난 뒤라는 전제하에 수행 되면 동기 좌표계 고정자 전류는 식 (18)과 같다. △ $I^{e}_{ds,sca}$ 를 슬립각 θ_{sl} 주기의 0~1/3π 구간 적분을 식 (23)과 같이 수행하여 스케일 오차를 검출할 수 있다.



그림 3. 제안한 보상법 블록도 Fig. 3 Block diagram of proposed compensation scheme



3.2 보상방법

제안한 오차 보상법 제어 블록도는 그림 3.과 같다. 오차 성 분을 보상하기 위해 먼저 옵셋에 대한 오차 성분을 보상해주어 야 한다. 옵셋 성분이 보상이 이루어지지 않은 상태로 스케일 오차 성분을 검출하면 스케일 오차 성분에 옵셋 오차 성분이 더해져서 오차 검출이 이루어지지 않는다. 먼저 식 (20) 과 (22)으로 구한 옵셋 성분은 식(11)에 의해 회전자 상 전류 입력 부분에서 보상을 실시한다. 옵셋에 의한 오차 성분의 보상이 끝난 뒤 스케일의 오차 성분 보상이 이루어진다. 식 (23)으로 구한 스케일 오차에 해당하는 스케일 이득의 크기는 거의 1의 값을 가지며 스케일 오차가 존재할 경우 두 상이 동시에 영향 을 주고 있다고 가정을 하여 식(15)에 의해 회전자 상전류 입 력 부분에 두 상 모두 보상을 실시한다.

4. 실험 결과

제안한 보상 알고리즘을 구현하였으며 각 오차는 $a_{ar} = 0.05$, $a_{r} = 0.2$, $a_{ar} = 1.15$, b = 1.05,로 설정된 상태에서의 실험결과이다. 그림 4. 회전자 전류 오차 보상 전 고정자의 전류 파형이며 슬립 주파수의 1배 및 2배의 맥동을 가짐을 볼 수 있다. 그림 5. 는 오차 보상후의 고정자 전류 파 형이며 슬립 주파수 1배 및 2배의 맥동성분이 저감된 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 DFIG의 발전 전력 제어에 있어 회전자 전류 측정 오차가 고정자 전류에 미치는 영향을 분석하였으며 이를 보상하는 방법을 제안하였다. 회전자 전류 측정 시 나타나는 옵셋 및 스케일 오차는 고정자 전류에 각각 슬립 주파수의1배, 2배의 맥동을 발생시켰다. 이를 보상하기 위해 고정자 전류를 슬립 각 대해 일정 구간 적분을 통해 옵셋과 스케일 오차를 검출하여 이를 보상하였다. 제안한 알고리즘의 유용성은 실 험을 통해 증명하였다.



그림 4. 오차 보상 전 고정자 전류 Fig. 4 D-axis current before compensating operation



그림 5. 오차 보상 후 회전자 전류 Fig. 5 D-axis current after compensating operation



- M. Yamamoto and O.Motoyoshi " Active and Reactive PowerControl for Doubly-Fed Wound Rotor Induction Generator", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol 6, No 4, pp 624-629 Oct 1991
- [2] Han-Su Jung, Jang-Mok Kim, Cheul-U Kim and Cheol Choi "A Diminution of Offset and Scaling erro for the Motor Vector Control" Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on15-18 May 2005 Page(s):551 - 557
- [3] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generatorsing 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.