

매입형 영구자석 동기기를 이용한 풍력발전 시스템에서의 단위전류 당 최대 토크 운전을 위한 회전자 초기위치 추정 및 동기 인덕턴스 계측

강이규, 윤동근, 정해광, 이교범
아주대학교

Estimation of Initial Rotor Position and Measurement of Inductances for MTPA Operation in a Wind Power System using IPMSM

Yi-Kyu Kang, Dong-Keun Yoon, Hea-Gwang Jung, Kyo-Beum Lee
Ajou University

ABSTRACT

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기기 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)를 이용한 풍력발전 시스템에서의 효과적인 단위 전류 당 최대 토크 (Maximum Torque Per Ampere) 제어를 위해 필요한 파라미터인 영구자석 회전자의 초기위치 및 동기 인덕턴스를 측정하는 방법을 보인다. IPMSM을 이용한 풍력 발전 시스템의 경우 기동 토크를 제대로 발생시키고, 돌극성으로 나타나는 톨릭턴스 토크를 효과적으로 이용하기 위해서는 정확한 회전자의 초기위치 및 인덕턴스 값이 반드시 필요하다. 제안하는 고주파 입력 시험은 역기전력 성분이 발생하지 않아서 이때의 고정자 전류를 해석하여 모터의 회전 없이 현재의 회전자의 위치 및 인덕턴스 값을 측정할 수 있다. 실험 결과를 바탕으로 제안하는 방법의 타당성을 보인다.

1. 서론

최근 환경 문제의 심각성을 대두로 가파르게 발전하고 있는 전기자동차 및 풍력발전 분야에서 효율이 높고 단위 무게, 부피당 토크 및 출력이 높은 영구자석 동기기의 수요가 급증하고 있다. 넓은 운전 영역을 갖고, 한 번 설치 후 장시간 운전해야 하는 풍력 발전 시스템의 특성상 매입형 영구자석 동기기는 영구자석이 회전자 철심 내부에 삽입되어 외형적으로 표면부착형에 비해 월등히 강한 동시에 고정자 권선에서 발생하는 열의 영향을 표면부착형처럼 직접적으로 받지 않아 온도 상승에 의한 영구자석의 감자 가능성이 적어, 보다 열악한 환경에서 운전이 가능하다. 또한 자석과 고정자 권선의 회전자계에 의한 상호작용으로 발생하는 토크 이외에 회전자 구조상으로 발생하는 d-q축 인덕턴스 차이에 의한 톨릭턴스 토크 성분을 이용할 수 있어 단위 전류에서 최대 토크 운전을 하여 효율을 증가시킬 수 있다.

영구자석형 동기기의 경우 초기 기동 및 정확한 벡터제어를 위해서는 영구자석 회전자의 초기위치 및 구동에 따른 회전자의 회전 위치에 대한 정보가 반드시 필요하다. 일반적으로 벡터제어를 위한 회전 위치의 정보는 가격이 싸고 구조가 단순한 상대 위치형 엔코더를 사용한다. 상대 위치형 엔코더는 회전 속도에 비례하는 A, B의 두 펄스와 1회전에 한 번씩 발생하는 Z 펄스에 의해 위치를 알 수 있다. 그러나 상대 위치형 엔코더만을 사용하는 경우 초기 기동을 위한 회전자의 초기 위치를 알 수 있는 정보가 없다. 이에 절대 위치형 엔코더, 레졸버 등

의 추가적인 위치 센서를 이용하여 초기 위치를 검출 할 수 있다. 그러나 초기 위치 검출을 위한 추가적인 위치센서 등의 하드웨어 장치는 시스템의 구성비용을 증가시키는 원인이 되며, 외부 환경과 스위칭에 의한 노이즈 및 구성에 따른 설치 공간에 관한 많은 문제점을 포함한다. 이에 따라 고가의 위치 센서를 사용하지 않고 비교적 저렴한 펄스 엔코더를 사용하여 회전자의 초기 위치를 추정하는 방법이나, 위치 센서를 사용하지 않고 초기 위치를 검출하는 센서리스 제어(Sensorless control)에 관한 연구가 활발히 진행되어왔다.^[1-2]

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기기를 사용하는 풍력 발전 시스템을 초기 구동함에 있어 전동기에 고주파 입력 전압을 인가하여 고정자 전류의 해석을 통해 영구자석 회전자의 초기 위치를 검출하는 방법을 보인다. 인버터를 통해 만들어낸 고주파 입력 신호의 대부분이 고정자에 의한 전압 강하 성분이나 역기전력 성분이 포함되지 않은 d-q축 인덕턴스에 의한 전압 강하 성분으로 나타나 고정자 전류의 궤적을 타원으로 만들게 되는데, 이 타원을 최소자승법을 이용하여 해석함으로써 영구자석 회전자의 초기 위치를 검출할 수 있다. 이와 더불어 고정자 전류 해석 과정에서 매입형 영구자석의 특성으로 나타나는 d-q축 인덕턴스 또한 계측이 가능하다. 실험 결과를 통해 제안한 방법의 성능과 타당성을 검증한다.

2. 매입형 영구자석 동기기를 이용한 풍력발전 시스템의 특징

매입형 영구자석 동기기의 회전자 단면 형태는 그림 1과 같다. 그림에서 좌표축의 위첨자 s는 고정좌표계, r은 회전좌표계를 의미하며, 각 좌표계의 변환 식은 식 (1)과 같다. 영구자석의 투자율은 공극과 거의 같으므로 매입형 회전자는 자석이 표면에 부착되어 자로 구성이 모두 같은 표면부착형에 비해 철심 내부의 영구자석의 위치에 따라 자로 구성이 달라진다. 달라진 자로구성에 의해 매입형 회전자의 d축에 공극이 존재하는 효과가 발생하여, 자석을 통과하지 않는 q축 자로에 비해 d축

$$\begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d^r \\ i_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix}$$

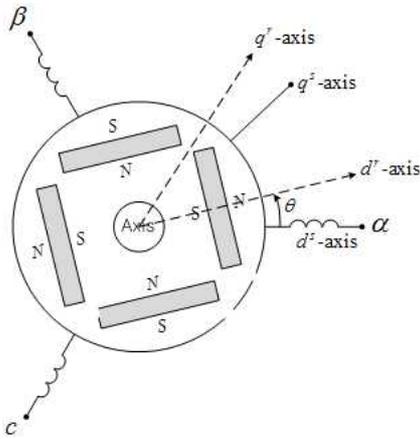


그림 1 매입형 영구자석 동기기의 회전자 구조
Fig. 1 The Structure of rotor in an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine

자로의 자기저항이 크므로 q축 인덕턴스가 d축보다 크다. 이에 따라 매입형 영구자석 동기기의 발생토크는 식 (2)과 같이 고정자가 생성하는 회전자계와 영구자석과의 상호작용에 의한 토크뿐만 아니라 d-q축 자기저항 차이에 의한 토크 성분이 존재한다. 이와 같이 회전자의 영구자석에 의한 토크와 자기저항 토크와의 합이 최대가 되면서 손실을 최소화하는 전류쌍을 구하는 방법을 단위 전류 당 최대 토크 제어라 한다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\Phi_f i_{ds}^r + (L_d - L_q) i_{ds}^r i_{qs}^r) \quad (2)$$

여기서 P 는 전동기 극수, Φ_f 는 고정자 자속을 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)에서 볼 수 있듯이 사용자가 목적으로 하는 최대 토크를 발생시키기 위해서는 회전자 위치를 통한 회전좌표계로의 변환이 정확히 이루어져야 하며, 토크 식에 사용되는 d-q축 인덕턴스 값 또한 정확해야 한다. 식 (2)에서 d축 인덕턴스가 q축 인덕턴스보다 작으므로 두 토크 성분이 더해지는 방향으로 작용하기 위해서 d축 전류 i_{ds}^r 이 음의 값을 갖아야한다. 즉 그림 4와 같은 동기 좌표축 상에서의 범위 내에서 최대 토크를 발생하기 위한 d-q축의 전류 지령치를 결정한다.

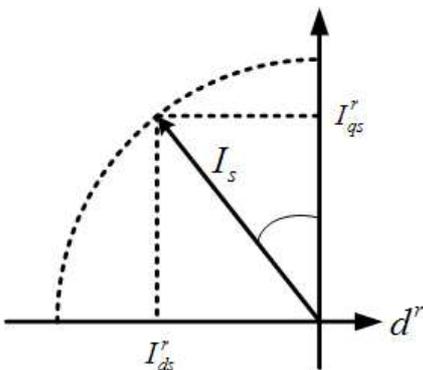


그림 4 동기좌표축상의 d-q축 전류 페이서도
Fig. 4 d,q-axis Current at Synchronous frame

이와 같이 회전자의 영구자석에 의한 토크와 자기저항 토크와의 합이 최대가 되면서 손실을 최소화하는 전류 쌍을 구하는 방법을 단위 전류 당 최대 토크 제어라 한다.

3. 영구자석 회전자의 초기위치, 인덕턴스 측정

3.1 매입형 영구자석 동기기의 모델링

정지좌표계 상에서의 전압방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d^s \\ v_q^s \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} a + b \cos 2\theta & -b \sin 2\theta \\ -b \sin 2\theta & a - b \cos 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^s \\ i_q^s \end{bmatrix} + p \Phi_f \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $a = (L_q + L_d)/2$, $b = (L_q - L_d)/2$, R_s 는 고정자 저항, p 는 미분연산자, θ 는 회전자 위치를 나타낸다. 전동기에 고주파 입력 신호가 인가되면, 고주파 전압의 대부분이 인덕턴스에 의한 전압강하로 나타나 고정자 저항에 의한 전압강하가 없고, 회전자 관성에 의해 회전자는 정지해 있기 때문에 R_s 및 역기전력을 무시할 수 있다. 즉, 회전자는 회전하지 않고 정지해있기 때문에 정지좌표계 상에서 해석하면 된다.^[3] 식 (4)과 같은 고주파 전압을 주입 후 초기 회전자 위치가 0이라는 가정 하에 고정자 전류에 관해 전압방정식을 정리하면 식 (5)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_{di}^s \\ v_{qi}^s \end{bmatrix} = V_{mag} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \sin(\omega_i t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$i_{di}^s = \frac{V_{mag}}{\omega_i} \frac{1}{a+b} \sin(\omega_i t) \quad (5)$$

$$i_{qi}^s = -\frac{V_{mag}}{\omega_i} \frac{1}{a-b} \cos(\omega_i t)$$

여기서 V_{mag} 는 입력 고주파 전압의 크기, ω_i 는 입력 주파수를 나타낸다. 식 (5)로부터 d-q축 전류 사이의 관계가 타원임을 알 수 있으며, 정리하면 식 (6)과 같은 타원방정식으로 정리된다.^[4]

$$\left[\frac{i_d^s}{\left(\frac{V_{mag}}{\omega_i L_q} \right)} \right]^2 + \left[\frac{i_q^s}{\left(\frac{V_{mag}}{\omega_i L_d} \right)} \right]^2 = 1 \quad (6)$$

3.2 최소자승법을 이용한 초기위치, 인덕턴스 측정

원점을 중심으로 하는 타원이 원점을 중심으로 회전했을 때, 변환 전의 좌표 x, y 와 θ 만큼 회전변환 된 새로운 좌표 x', y' 와의 관계는 식 (7)와 같다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)을 원점이 중심인 일반 타원 방정식에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같은 회전변환 된 타원방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right) x'^2 + \left(\frac{2 \cos \theta \sin \theta}{b^2} - \frac{2 \cos \theta \sin \theta}{a^2} \right) x' y' \\ & + \left(\frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{b^2} \right) y'^2 = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 a 는 타원의 장축, b 는 단축을 의미한다. 이것을 회전된 타원 방정식의 기본 형태인 식 (9)과 비교해보았을 때, 최소자승법을 이용하여 식 (9)의 A, B, C 를 구하면 식 (8)로부터 회전각 θ , 장-단축 정보로부터 d-q축 인덕턴스를 구할 수 있다.

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 = 1 \quad (9)$$

계측된 정보로부터 함수의 계수를 추출해 낼 수 있는 최소자승법을 이용하기 위해 $x = i_d^s$, $xy = i_d^s i_q^s$, $y = i_q^s$ 로 계측된 값을 치환 후 A, B, C 를 구하기 위해 식 (9)를 식 (10)과 같이 변형한다.

$$xy = \frac{1}{B} - \left(\frac{A}{B} \right) x^2 - \left(\frac{C}{B} \right) y^2 \quad (10)$$

여기에 최소자승법 적용을 위한 식 (10)을 간단히 하기 위해 식 (11)과 같이 계수들을 적절히 치환하여 식 (12)를 만들 수 있다.

$$R_1 = \frac{1}{B}, R_2 = -\frac{A}{B}, R_3 = -\frac{C}{B} \quad (11)$$

$$M_1 = 1, M_2 = x^2, M_3 = y^2, M_4 = xy$$

$$\begin{aligned} \sum M_4 M_1 &= R_1 \sum M_1^2 + R_2 \sum M_1 M_2 + R_3 \sum M_1 M_3 \\ \sum M_4 M_2 &= R_1 \sum M_1 M_2 + R_2 \sum M_2^2 + R_3 \sum M_2 M_3 \\ \sum M_4 M_3 &= R_1 \sum M_1 M_3 + R_2 \sum M_2 M_3 + R_3 \sum M_3^2 \end{aligned} \quad (12)$$

치환된 M_1, M_2, M_3, M_4 는 열벡터로써 임의로 정하는 샘플링 수만큼 계측 후 축적되어 최소자승법에 이용된다. 식 (12)를 통해 R_1, R_2, R_3 를 구한 후 역치환을 통해 회전 변환된 타원 방정식의 계수 A, B, C 를 구할 수 있다. 구한 A, B, C 로부터 식 (8)과 비교하면 식 (13)과 같이 타원의 회전각 및 타원의 장-단축의 크기를 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{BX}{X^2 - AX + CX} \right) \quad (13)$$

$$a = \sqrt{2} \sqrt{\frac{A+C+X}{4CA-B^2}}$$

$$b = \sqrt{2} \sqrt{\frac{A+C-X}{4CA-B^2}}$$

여기서, $X = \sqrt{-2CA + B^2 + A^2 + C^2}$

이상으로부터 회전자의 초기위치(타원의 회전각) 및 식 (6)의 관계를 통하여 식 (14)와 같이 d-q축 인덕턴스를 구할 수 있다.

$$L_d = \frac{V_{mag}}{\omega_i \cdot a}, \quad L_q = \frac{V_{mag}}{\omega_i \cdot b} \quad (14)$$

4. 실험

제안된 기법의 검증은 10kW급 풍력 발전 시뮬레이터를 통해 확인하였다.

그림 2은 임의의 위치에서 고주파 입력 시험을 통해 얻은 실제 d-q축 전류 데이터를 이용해 그린 타원이며, 그림 3은 최소자승법을 이용하여 측정된 고정자 전류 데이터로부터 피팅한 타원을 나타낸다. 제안된 기법을 통해 타원 피팅 과정에서 표 1의 측정된 제정수 값에서 볼 수 있듯이 회전자 초기위치와 d-q축 인덕턴스를 계측할 수 있다. 이 때 계산되는 회전자 초기위치 값은 rad 단위로, d축 전류를 기준으로 시계방향으로 측정되므로 원하는 초기위치 값을 계산해내기 위해 q축 전류를 기준으로 계산한다.

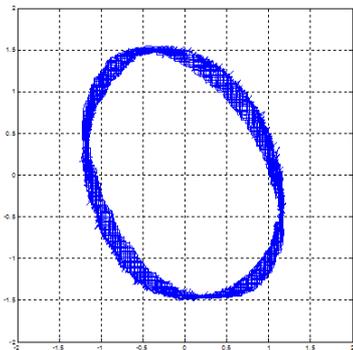


그림 2 실제 데이터를 이용해 그린 타원
Fig. 2 The ellipse obtained by factual data

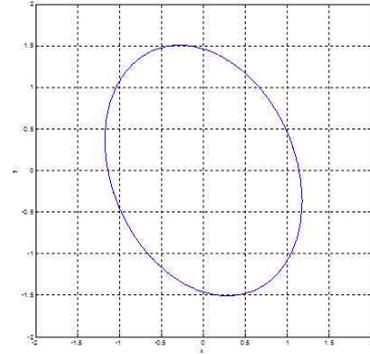


그림 3 최소자승법을 통해 그린 타원
Fig. 3 The ellipse obtained by Least Square Method

표 1 실험 파라미터
Table 1 Experimental parameter

제정수	값
발전기 정격 출력	11[kW]
발전기 극수	8
계통전압(line-to-line)	380V _{line} (rms)
스위칭 주파수	2kHz
고정자저항	0.025[Ω]
측정된 제정수	값
회전자 초기위치	0.3829[rad]
d축 인덕턴스	0.550[mH]
q축 인덕턴스	0.784[mH]

5. 결론

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기기를 사용한 풍력발전 시스템에서의 단위 전류 당 최대 토크 운전 특성을 살펴보고, 초기 기동 및 백터제어를 위한 영구자석 회전자의 초기위치 및 인덕턴스를 계측하는 방법을 제안하였다. 제안한 고주파 전압 인가 시험을 통해 영구자석 회전자의 초기위치 및 인덕턴스 값을 효과적으로 검출할 수 있음을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Hyunbae Kim, Kum-Kang Huh, "A novel method for initial rotor position estimation for IPM synchronous machine drives", IEEE Transaction on, vol. 40, no. 5, pp.1369-1378, 2004.
- [2] 장진수, 박병건, 김태성, 이동명, 현동석, "병렬형 칼만 필터를 사용한 영구 자석 동기 전동기의 센서리스 제어", 전력전자학회논문지, 13권 5호, pp. 336-343, 2008년 10월.
- [3] 김장목, 김수열, 유호선, 임익현, "매입형 영구자석 동기전동기의 일정 토크 영역에서 최대 토포크 운전에 관한 연구", 전기학회논문지, 49B권 6호, pp. 195-203, 2000년 3월.
- [4] Kondo. S, Takahashi. A, Nishida. T, "Armature current locus based estimation method of rotor position of permanent magnet synchronous motor without mechanical sensor", Industry Applications Conference, vol. 1, pp.55-60, Oct 1995.