매입형 영구자석 동기 전동기의 감자를 고려한 초기 위치 추정방법

김명호*, 설승기*, 이범석**
*서울대학교, **LG전자

An Initial Rotor Position Estimation Method for an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Demagnetization

Myoungho Kim*, Seung-Ki Sul*, Beomseok Lee**

ABSTRACT

본 논문은 매입형 영구자석 동기 전동기의 감자 상황에서의 초기 위치 추정 방법을 제시한다. 신호 주입 센서리스 제어시, 영구자석의 극성을 추정하기 위해 영구자석의 자속에 의한 자기 포화 현상을 이용한다. 그러나 영구자석에 감자가 발생하였을 때는 극성에 따른 포화의 특성이 정상적인 경우와 달라져 전압을 주입했을 때 영구자석의 극성을 잘못 판단하게 될 수 있다. 본 논문에서는 감자 상황에서도 바른 극성 검출을 위해 d축 전류를 변경시켜가면서 전압을 주입하여 영구자석의 극성을 추정한다. 이를 통해 영구자석의 감자 상태를 파악하고, 감자 상황에서도 초기 위치 추정이 가능하게 된다. 정상적인 매입형 영구자석 동기전동기와 동일한 사양의 감자된 회전자를 가진 전동기에 제안된 초기 위치 추정 방법을 적용되어 그 타당성을 실험적으로 입증하였다.

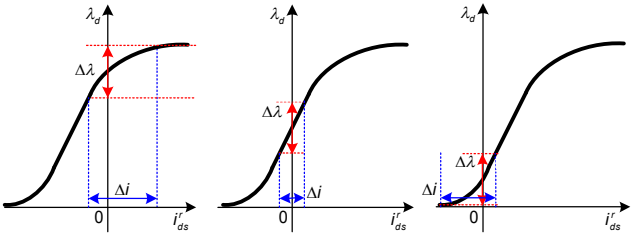
1. 서론

위치 센서 없이 회전자의 위치를 추정하여 영구자석 동기 전동기의 벡터 제어를 가능케 하는 센서리스 (sensorless) 제어 방법은 활발하게 연구되어 왔다. 전동기가 저속 및 정지 상태에 있을 때의 센서리스 운전을 위해서는 고주파 신호를 주입하는 방법이 주로 사용된다 [1]. 신호 주입 방법은 회전자의 d, q 축의 돌극성을 찾아낼 수는 있으나 영구자석의 극성을 구분할 수는 없어, 추가적으로 영구자석의 초기 위치를 찾아낼 필요가 있다. 주로 영구자석에 의한 자기 포화 현상을 이용하여 초기위치를 추정하게 된다. 그러나 영구자석에 감자가 발생했을 경우에는 자기 포화의 양상이 달라져 초기 위치 추정에 오류를 유발할 수 있다.

본 논문은 감자가 초기 위치 추정에 미치는 영향을 설명하고 감자의 양상에 상관없이 초기 위치를 추정할 수 있는 방안을 제안한다. 제안된 방법은 기본적으로 [2] 에서 제안한 고주파 전압 주입 방법을 이용하며, d축 전류를 인가하면서 신호의 변화를 관찰하여 초기위치를 추정한다. 제안된 방법은 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 영구자석의 감자

영구자석 동기 전동기에 사용되는 자석은 운전 조건에 따라 감자가 발생할 수 있다. 감자는 흔히 영구자석의 온도가 증가함에 따라 발생한다. 영구자석의 온도가 퀴리 온도 (Curie temperature) 이상으로 상승하였을 때, 영구자석은 자성을 잃게 된다. 또한 퀴리 온도 미만의 운전 조건에서도 온도가 상승함에 따라 영구자속의 B-H 곡선은 보자력 과 잔류 자속의 크기가 감소하는 방향으로 변화하게



(a) 정상 (b) 경미한 감자 (c) 심각한 감자

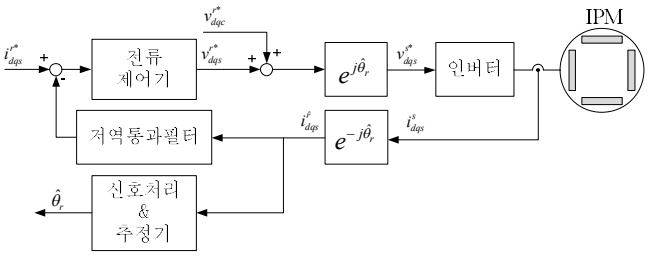
그림 1. 영구자석의 상태에 따른 동기좌표계 d축의 자속과 전류의 관계

되고, 이 때 고정자 권선의 전류로 인해 발생한 역자계가 영구자석의 보자력을 넘어서게 되면 감자가 발생하게 된다 [3].

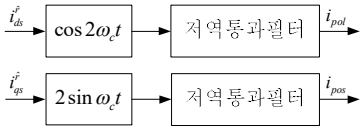
센서리스 제어에 사용되는 초기위치 추정은 영구자석에 의한 자기 포화 현상을 이용하기 때문에 감자는 초기위치 추정에 영향을 준다. 영구자석의 감자 상태에 따른 동기좌표계에서의 자속과 전류의 관계를 그림 1에 나타냈다. 그림 1 에서 λ_d 와 i^r_{ds} 는 각각 동기좌표계 d 축의 자속과 고정자 전류를 나타내고, $\Delta\lambda$ 와 Δi 는 각각 외부에서 인가하는 교류 자속과 유기되는 그에 따라 유기되는 교류 전류를 의미한다. 그림 1 (a)의 정상 영구자석의 경우 고정자 코어가 영구자석의 자속에 의해 포화 수준에 근접하거나 포화되어 있다. 따라서 인가되는 자속의 방향이 양일 때는 포화가 심해지고, 음일 때는 포화도가 저하된다. 그에 따라 유기되는 교류 전류는 양의 방향의 크기가 음의 방향의 크기보다 더 큰 형태를 띠고, 이를 이용하여 극성을 추정한다. 그러나 영구자석의 감자시에는 이 같은 추정 방식이 오류를 일으킬 수 있다. 그림 1 의 (b) 와 (c) 는 영구자석이 감자된 상태에서 같은 크기의 교류 자속을 인가했을 때의 전류 반응을 나타낸다. 영구자석의 감자의 정도에 따라 교류 자속을 인가했을 때 고정자에 유기되는 교류 전류의 크기에 극성에 따른 차이가 없거나, 혹은 오히려 음의 방향의 전류 크기가 더 커지기도 한다. 그림 1에서 표현한 자속과 전류의 비선형적인 관계를 (1) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$i^r_{ds} \approx \frac{1}{L_d}(\lambda_d - \lambda_f) + \frac{1}{2}\frac{d^2 i^r_{ds}}{d\lambda_d^2}(\lambda_f)\left(\lambda_d - \lambda_f\right)^2, \frac{1}{L_d} = \frac{di^r_{ds}}{d\lambda_d}(\lambda_f), \quad (1)$$

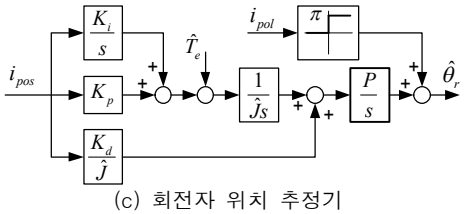
식 (1)은 영구자석이 만들어 내는 자속의 크기에 따른 d축 전류를 테일러 전개를 통해 2차까지 나타낸 식이다. 여기서 λ_f 는 영구자석이 발생시키는 자속을 나타내며, 테일러 전개의 동작점이 된다. 이차항의 계수인



(a) 전체 구조



(b) 신호 처리 블록도



(c) 회전자 위치 추정기

그림 2. 높은 주파수를 인가하는 센서리스 및 초기 위치 추정 방법 [2]

$\frac{d^2 i_{ds}^r}{d\lambda_d^2}$ 는 동작점이 포화지점 근처에 있을 때는 양의 값을 가지며, 감자가 진행될수록 점점 작아지다가 영구자석의 자속의 크기가 매우 작아지면 음이 된다.

3. 초기위치 추정 알고리즘

초기 위치 추정을 위해 자속을 인가하는 방법은 여러가지가 있다 [1]. 본 논문에서는 정현파의 높은 주파수 전압을 주입하는 센서리스의 캐리어 신호를 사용하는 방법을 기반으로 초기 위치 추정 알고리즘을 제안한다 [2]. 이 방법은 센서리스 제어를 위해 사용되는 캐리어 신호를 그대로 초기 위치 추정에 이용할 수 있어 제어 구조가 간단해지는 장점이 있다. 그림 2에 본 논문에서 사용된 센서리스 및 초기위치 추정 방법의 구조를 나타냈다. 동기좌표계 d축에 (2) 와 같은 맥동하는 전압을 주입하였을 때, (3) 의 전류가 유기된다.

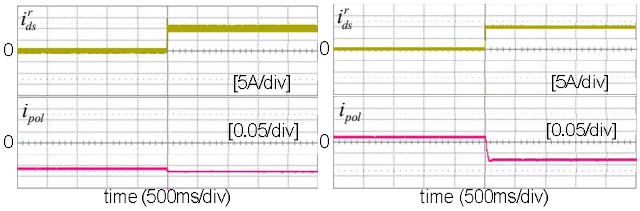
$$v_{dqc}^{\hat{r}} = V_c \cos\omega_c t\,, \tag{2}$$

$$i_{dqc}^{\hat{r}} = \frac{V_c}{2\omega_c}\left\{\left(\frac{1}{L_d}+\frac{1}{L_q}\right)+\left(\frac{1}{L_d}-\frac{1}{L_q}\right)e^{j2(\theta_r-\hat{\theta}_r)}\right\}\sin\omega_c t + \frac{V_c^2}{2\omega_c^2}\frac{d^2 i_{ds}^r}{d\lambda_d^2}(\lambda_f)\sin^2\omega_c t\cos 2(\theta_r-\hat{\theta}_r)e^{j(\theta_r-\hat{\theta}_r)}\,. \tag{3}$$

위 식에서 ω_c 는 주입 주파수, V_c 는 주입 전압의 크기, θ_r 은 회전자의 위치를 의미하며, 전동기의 q축 인덕턴스는 일정하다고 가정하였다. 전압 주입의 결과로 유기되는 전류 중 주입 주파수 성분은 회전자의 위치에 따라 달라지는 센서리스 제어에 이용되는 성분이며, 주입주파수의 제곱 성분이 d 축 자속의 포화 정도에 따라 달라지는 초기 위치 추정에 이용되는 성분이다. 2장에서 설명했듯이 이 항의 계수인 $\frac{d^2 i_{ds}^r}{d\lambda_d^2}$ 는 영구자석이 발생시키는 자속의 크기, 즉 감자의 정도에 따라 달라지게 된다. 감자를 고려하지 않으면 그림 2 (b) 에서 나타낸 헤테로다인(heterodyne) 신호처리를 통해 i_{pol} 을 구하고, 그 부호에 따라 극성을 판별하여 그림 2 (c) 에 나타난 것과 같이 센서리스로 추정한 각에 더하여 사용한다. 그러나 영구자석의 감자가 발생한 경우 감자의 정도에 따라 i_{pol} 의 부호가 바뀔 수 있다.

본 논문에서는 신호 주입시 d 축 전류를 변동시켜 가면서 i_{pol} 값의 변화를 보고 초기 위치를 추정하는 방식을 제안한다. 영구자석의 감자 여부와 상관없이 추정된 동기좌표계 d 축으로 전류를 양의 방향으로 증가시킬 때, 극성 추정이 맞다면 포화가 심화되어 i_{pol} 값이 작아지고, 극성 추정이 잘못되었다면 포화도가 저하되어 i_{pol} 값이 커진다. 이 i_{pol} 값의 변화를 이용하여 초기 위치를 추정한다.

4. 실험 결과



(a) 정상 전동기 (b) 감자된 전동기

그림 3. 신호를 주입하면서 D 축 전류를 변화시켰을 때의 파형

제안한 초기 위치 추정 방법을 실험을 통해 검증하였다. 정상 매입형 동기 전동기와 동일한 모델의 감자된 전동기에 신호를 주입하여 초기위치를 추정하였다. 그림 3은 실험 결과를 나타낸다. 정상 전동기와 감자된 전동기 모두 정지된 상태에서, 신호 주입후 극성을 판단하는데 사용되는 i_{pol} 값을 관찰하였다. 정상 전동기의 경우에는 포화로 인해 그 값이 음을 나타내며, d 축 전류를 양의 방향으로 더 인가하면 포화도가 커져 i_{pol} 은 더욱 작아진다. 감자된 전동기의 경우에는 감자로 인한 동작점의 이동으로 d 축 전류를 인가하지 않았을 때는 i_{pol} 이 양의 값을 띠다가, d 축 전류를 인가하여 포화시키면 음의 값으로 변한다. 이 때 각 시점의 값이 아니라 d 축 전류의 변화에 따른 i_{pol} 값의 변화 양상을 보고 현재 전동기가 제대로 초기 위치 추정을 하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

고주파 전압을 주입하는 센서리스 방식에서 사용되는 초기 위치 추정 방법은 전동기의 영구자석에 의한 포화 현상을 이용하기 때문에 감자에 의해 추정의 오류가 발생될 수 있다. 본 논문에서는 신호 주입과 함께 d 축 전류를 인가하여 그에 따른 따른 신호의 변화로 초기 위치를 추정하였다. 제안된 방법은 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] Eric S. Hamby and Eric M. Gross, "A Control-Oriented Survey of Xerographics Systems: Basic Concept to New Frontiers," in Proc. of the American Control Conference, pp.2615-2629, June 30-July 2, 2004.

[2] Yu-seok Jeong, Robert D. Lorenz, Thomas M. Jahns, and Seung-Ki Sul, "Initial Rotor Position Estimation of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine Using Carrier-Frequency Injection Methods," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 1, pp. 38-45, Jan./Feb. 2005.

[3] Jongman Hong, Doosoo Hyun, Sang Bin Lee, Ji-Yoon Yoo, and Kwang-Woon Lee, "Automated Monitoring of Magnet Quality for Permanent-Magnet Synchronous Motors at Standstill," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 4, pp. 1397-1405, Jul./Aug., 2010.