매입형 영구자석 동기전동기의 인덕턴스 추정

권영수, 박경훈*, 한경식*
LS산전 자동화연구소

Inductance Estimation Method of IPM Machine

Young-Su Kwon, Kyeoug-Hun Park*, Kyung-sik Han*
LS Industrial Systems Automation R&D Center

ABSTRACT

본 논문에서는 신호주입을 이용하여 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 벡터제어에 필요한 d,q축 인덕턴스를 전동기가 정지한 상태에서 추정하는 방법을 제안하였다. IPMSM의 경우 초기 기동토크를 제대로 발생시키고 d,q 축 인덕턴스의 차이에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크를 효과적으로 이용하기 위해서 이 인덕턴스 값은 반드시 필요하다. 제안하는 추정방법은 매우 짧은 시간에 수행되어지며 복잡한 연산이 필요하지 않으므로 산업현장에서 매우 유용하게 적용 될 것이다.

1. 서론

최근 산업분야에서 에너지효율에 대한 관심이 급증함에 따라 기존의 유도전동기에 비해 효율을 대폭 향상시킬 수 있는 IPM(매입형 영구자석 동기전동기)전동기에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 매입형 영구자석 동기전동기의 효율을 극대화시키기 위해서는 릴럭턴스 토크를 적절히 제어해야만 하며 릴럭턴스 토크는 d-q 모델상의 Ld, Lq 의 값에 따라 그 크기가 좌우된다. 그러므로 전 운전 영역에서 최대토크운전을 하기 위해서는 Ld, Lq 의 값을 정확히 알아야 한다.[1]

2. 회전자의 위치에 따른 인덕턴스 변화

IPM 전동기는 영구자석이 회전자 내부에 매입되어 있어 d축과 q축의 인덕턴스가 다르게 나타난다. 또한 원주 매입형의 경우 q축 인덕턴스가 더 크고 방사매입형의 경우 d축 인덕턴스가 더 크다. 원주 매입형 IPM전동기의 회전자 위치를 변화시켰을 때 터미널 단자에서 측정한 인덕턴스 값은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$L = \frac{3}{2}\left(\frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} cos 2\theta_r\right) \quad (1)$$

식(1)을 이용하면 회전자의 위치에 따른 인덕턴스는 그림 1과 같이 표현할 수 있다. 그림 2-(a)와 같이 영구자석의 N극이 d축과 일치하는 지점에서 고정자 d축 쇄교자속은 영구자석을 통과하지 않으므로 인덕턴스 값은 최대가 된다. 즉, $\theta_r = 0^\circ$ 일 때 $L_a = L_q$ 이다. 또한 그림 2-(b) 와 같이 회전자의 위치가 이동하여 고정자 d축 쇄교자속이 영구자석을 통과하면 인덕턴스 값은 최소가 된다. 이 때 $\theta_r = 90^\circ$ 이며 $L_a = L_d$ 이다.

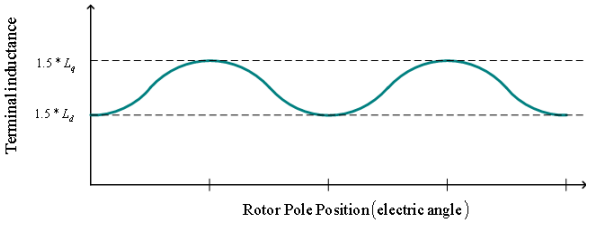

그림 1. IPM전동기 회전자 위치에 따른 인덕턴스 측정값

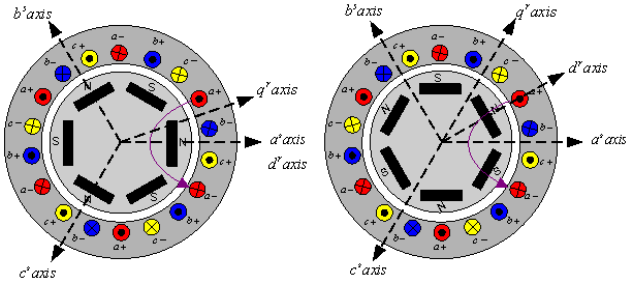

그림 2. 회전자 위치에 따른 자속경로
(a)$\theta_r = 0^\circ$, (b) $\theta_r = 90^\circ$

3. 제안된 인덕턴스 추정 알고리즘

본 논문에서는 회전자가 정지한 상태에서 각 축의 인덕턴스를 추정하는 방법을 제안한다. 우선되는 조건은 회전자의 위치와 고정자 저항 값을 알아야 한다는 것이다. IPM전동기 초기각 추정과 고정자 저항측정은 이미 많은 방법들이 제안되어 있으며 비교적 쉽게 추정 가능하다. 미리 알고 있는 회전자 위치에 맞게 정지좌표계 입력신호를 좌표 변환하여 동기좌표계 d,q축에 주입한다면 마치 회전자를 움직여서 측정하는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다.

3.1 q축 인덕턴스 추정

dq 동기좌표계상에 식(2)와 같은 교류전압이 인가되었을 때 V_h가 전동기를 움직일 수 없을 만큼 작고 ω_h가 충분히 크다면 회전자는 정지 상태를 유지하게 되며 이때 동기좌표계 전압방정식은 식(3)과 같다.[3]

$$v_{dqs}^e = \begin{bmatrix} V_h \cos\omega_h t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$v_{dqs}^{e} = R_s i_{dqs}^{e} + pLi_{dqs}^{e} \quad (p: \text{미분연산자})$$

(3)

d축에 대한 전압방정식은 식(4)와 같으며 이 식을 페이저로 표시하면 식(5)와 같다.

$$V_h \cos(\omega_h t - \phi) = (R_s + j\omega_h L_1) I_{h1} \cos\omega_h t$$
$$\frac{V_h \cos(\omega_h t - \phi)}{I_{h1} \cos\omega_h t} = R_s + j\omega_h L_1$$

(4)

$$\frac{V_h}{I_{h1}} \angle \phi = \sqrt{R_s^2 + (\omega_h L_1)^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{\omega_h L_1}{R_s}\right)$$

(5)

식(5)로부터 q축 인덕턴스를 구하면 식(6)과 같다.

$$L_q = L_1 = \frac{\sqrt{\left(\left(\frac{V_h}{I_{h1}}\right)^2 - R_s^2\right)}}{\omega_h} \quad (6)$$

3.2 d축 인덕턴스 추정

q축 인덕턴스 추정방법과 동일하게 dq동기좌표계상에 식(7)과 같은 교류전압이 인가되었을 때 dq축 전압방정식은 식(3)과 동일하며 q축 전압방정식은 식(8)과 같고 페이저로 표시하면 식(9)와 같다.

$$v_{dqs}^{e} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_h \cos\omega_h t \end{bmatrix}$$

(7)

$$V_h \cos(\omega_h t - \phi) = (R_s + j\omega_h L_2) I_{h2} \cos\omega_h t$$
$$\frac{V_h \cos(\omega_h t - \phi)}{I_{h2} \cos\omega_h t} = R_s + j\omega_h L_2$$

(8)

$$\frac{V_h}{I_{h2}} \angle \phi = \sqrt{R_s^2 + (\omega_h L_2)^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{\omega_h L_2}{R_s}\right)$$

(9)

식(9)로부터 q축 인덕턴스를 구하면 식(10)과 같다.

$$L_d = L_2 = \frac{\sqrt{\left(\left(\frac{V_h}{I_{h2}}\right)^2 - R_s^2\right)}}{\omega_h}$$

(10)

4. 실험결과

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 Yaskawa전기의 400[V] 3.7[kW] IPM전동기를 사용하였다. 초기 각을 안다는 가정 하에서 동기좌표계 d축에 0.5초 동안 교류전류를 인가한 후 0.5초 동안 동기좌표계 q축에 교류전류를 인가하였다. 그림 3, 4와 같이 1초 내에 Lq, Ld 를 추정하는 것을 볼 수 있다. 그림 3은 $\theta_r = 0^\circ$ 일 때 추정 결과이며 그림 4는 $\theta_r = 45^\circ$ 일 때 추정 결과이다. 전동기의 주요 규격과 인덕턴스 추정 결과 및 오차는 표 1과 같다.

표 1 인덕턴스 추정 결과와 오차

전동기	IPM
Power[kW], $V_{LL}[V]$	3.7, 368
$R_s[\Omega]$	0.972
$L_d/\hat{L}_d[mH], \Delta L_d[\%]$	20.03/18.5, -7.6%
$L_q/\hat{L}_q[mH], \Delta L_q[\%]$	24.97/24.5, -1.8%

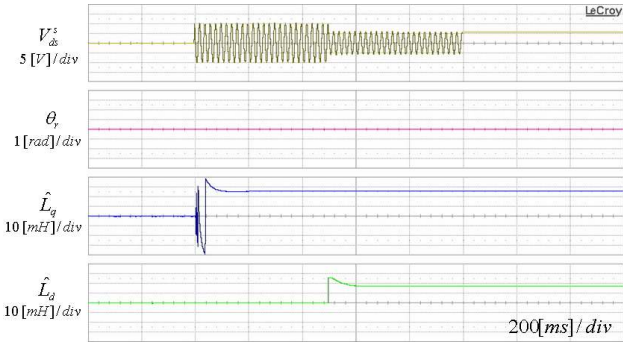

그림 3. $\theta_r = 0^\circ$ 일때 인덕턴스 추정 결과

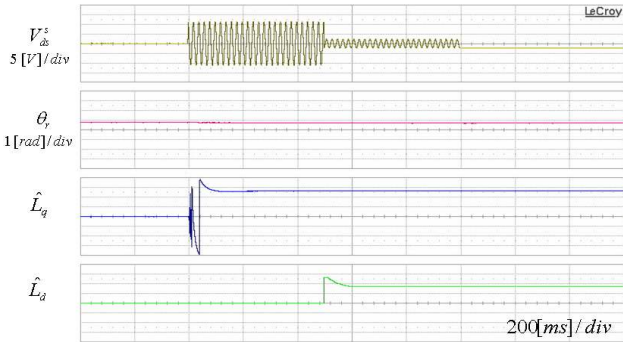

그림 4. $\theta_r = 90^\circ$ 일때 인덕턴스 추정 결과

5. 결 론

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 d,q축 인덕턴스를 전동기가 정지한 상태에서 추정하는 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 검증하였다. 이 추정 값이 벡터제어에 필요한 완벽한 값은 아니지만 초기 기동 시 충분한 토크를 낼 수 있으므로 기동 후 온라인 상수 보정을 통해 정확한 값을 찾는다면 원활한 벡터제어를 수행 할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 설승기, *"전기기기 제어론"*,브레인코리아, 2002.

[2] Jun Kang, *"Sensorless Control of Permanent Magnet Motors"* Control Engineering, Vol. 57, No. 4. April, 2010

[3] 장지훈, *"영구자석 동기전동기 센서리스제어의 운전영역확장에 관한 연구,"* 서울대학교 공과대학 전기공학과 박사학위 논문, 2006.