

최소자승법을 이용한 IPMSM 비선형 모델의 상호인덕턴스 추정 연구

심재훈*, 양두영**, 목형수*

건국대학교* 서울대학교 제어계측신기술연구소

Mutual Inductance Estimation of IPMSM nonlinear model using the least squares method

Jae-Hun Sim*, Doo-young Yang**, Hyung-soo Mok*

Korean University*, Research Center for Advanced Control and Instrumentation**

Abstract - 일반적으로 IPMSM의 전압방정식은 d축과 q축이 90도의 위상차를 가지고 있기 때문에 d-q축 간의 상호 인덕턴스를 고려하지 않는다. 하지만 실제로는 d축의 인덕턴스는 q축 전류에 영향을 받으며, 반대로 q축의 인덕턴스도 d축 전류에 영향을 받는다. 따라서 비선형 모델링을 통해 실제 전동기의 형태에 더 가깝게 묘사 하였다. 또한 일반적인 수학적식으로 계산하여 Ldq, Lqd를 구해 LPF 필터를 사용하였고 이산적인 최소자승법을 이용한 Gain값을 통해 과도상태에서 더 적합한 LPF와 최소자승법을 비교하는 논문이다.

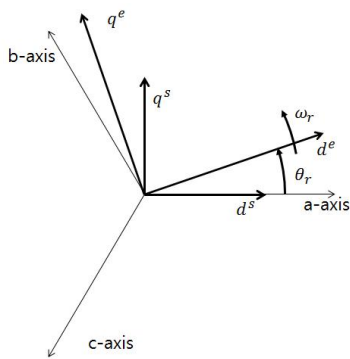
1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경 규제가 강화되고 친환경 차량의 연구 및 기술력이 빠르게 발전하고 있다. 일본에서는 이산화탄소 배출량에 따른 과세를 검토등 친환경차 개발이 자동차 업계의 큰 이슈로 부각되었다. 이러한 전기자동차를 구동하기 위한 시스템으로 견인용 전동기로 주목을 받고 있는 매입형 영구자석 동기전동기는 단위체적당 출력 가능한 토크가 크고, 고효율이라는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 친환경 자동차용 매입형 영구자석 동기전동기의 최소자승법을 이용하여 상호 인덕턴스 추정하는 알고리즘을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 매입형 영구자석 동기전동기의 모델링

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)를 기준으로 한다. 영구자석 동기전동기의 모델링은 2극 전동기를 기준으로 모델링 한다. 그림 2-1은 2극 IPMSM의 구조 및 abc상 및 d-q 기준 축을 나타낸다.



<그림 1> d-q축 변환

d-q변환식을 통해d-q축으로 변환하면 d-q축의 전압 방정식은 다음과같다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^r &= r_s i_{ds}^r + L_{ds} \frac{d}{dt} i_{ds}^r - \omega_r L_{qs} i_{qs}^r \\ v_{qs}^r &= r_s i_{qs}^r + L_{qs} \frac{d}{dt} i_{qs}^r + \omega_r L_{ds} i_{ds}^r + \phi_f \omega_r \end{aligned} \quad (1.1)$$

식 (1.1)에서 v_{ds}^r, v_{qs}^r 은 각각 d축 전압 및 q축 전압, L_{ds}, L_{qs}

는 각각 d축 및 q축 인덕턴스, i_{ds}^r, i_{qs}^r 은 각각 d축 및 q축 전류를 나타낸다.

d축 자속 및 q축 자속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds}^r &= L_{ds} i_{ds}^r + \phi_f \\ \lambda_{qs}^r &= L_{qs} i_{qs}^r \end{aligned} \quad (1.2)$$

2.1.1 상호인덕턴스를 고려한 매입형 영구자석 동기전동기 모델링

일반적으로 사용되는 일반적인 전동기 모델을 사용할 경우, 운전조건에 따라 변하는 상호 인덕턴스를 고려하지 못하기 때문에 실제 전동기와는 차이를 보이게 된다. d축 전류가 인가되거나 온도가 변할 경우 자속 포화나 인덕턴스의 변동이 발생하는데 일반적인 전동기 모델은 이를 고려하지 못한다. 이 때문에 참조표 방식을 사용하지만, 이 또한 온도 변화에 따른 제정수 변화를 고려하기 힘들고 참조표를 만들기 위해 수많은 실험을 해야하기 때문에 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 또한 참조표는 수학적으로 분석하기가 어렵기 때문에 전동기의 자속포화에 대한 특성을 분석하기 위한 수식을 유도할 필요가 있다. 자속식을 다시 쓰면 식 1.3과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_d = L_d i_d + L_{dq} i_q + \Phi_m \quad (1.3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q + L_{qd} i_d$$

여기서 L_{dq} 는 d축에 대한 q축의 인덕턴스 값이며, L_{qd} 는 q축에 대한 d축의 인덕턴스 값이다.

상호인덕턴스를 고려한 모터를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

여기서 역기전력 성분 E_d 와 E_q 는 다음 식 (1.5)와 같다.

$$E_d = -\omega_r L_q i_d + L_{dq} \pi_q \quad (1.5)$$

$$E_q = \omega_r \lambda_m + \omega_r L_{dq} i_q + L_{qd} \pi_d$$

식 (1.5)에서 역기전력 성분을 추정하면 상호 인덕턴스 성분 L_{dq} 와 L_{qd} 를 추정할 수 있다. 위의 식을 L_{dq} 와 L_{qd} 로 정리하면 다음과 같다.

$$L_{dq} = \frac{E_d \pi_d + \omega_r i_d E_q - \omega_r^2 i_d \lambda_m}{\omega_r^2 i_d i_q + \pi_d \pi_q} \quad (1.6)$$

$$L_{qd} = -\frac{\omega_r i_q E_q - E_q \pi_q + \omega_r \lambda_m \pi_q}{\omega_r^2 i_d i_q + \pi_d \pi_q} \quad (1.7)$$

2.1.2 최소자승법을 이용한 상호인덕턴스 추정 알고리즘

최소자승법은 이산적인 방법으로 (측정값-함수값)제곱의 총합(오차의 총합)이 최소가 목적이다.

최소자승법 식은 식(1.5)을 사용하여 모델링을 하였다.

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q - \omega_r \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_r i_d \pi_q \\ \pi_d \omega_r i_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{qd} \\ L_{dq} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\begin{matrix} \downarrow & & \downarrow \\ Z(k+1) & & h^T(k+1) \theta(k+1) \end{matrix}$$

$$\theta(k+1) = \theta(k) + k(k+1)[Z(k+1) - h^T(k+1)\theta(k)] \quad (1.9)$$

식 1.9에서 $\theta(0)$ 의 초기값은 $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 이다.

$$K(k+1) = P(k+1)h(k+1) \quad (1.10)$$

$$P^{-1}(K+1) = Gain * P^{-1}(k) + h(k+1)h^T(k+1) \quad (1.11)$$

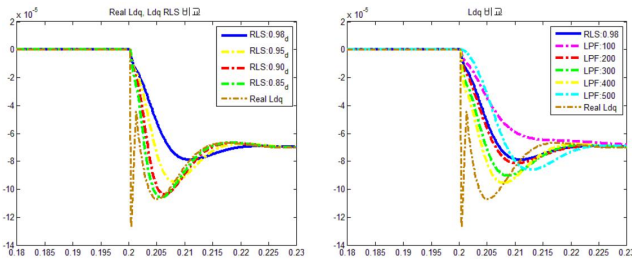
식 1.11에서 $P^{-1}(0)$ 의 초기값은 $\begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.01 \end{bmatrix}$ 이다.

Gain은 1이면 과거의 데이터를 계속 사용하게 되고 0으로 갈수록 현재 값의 위치선이 높아진다.

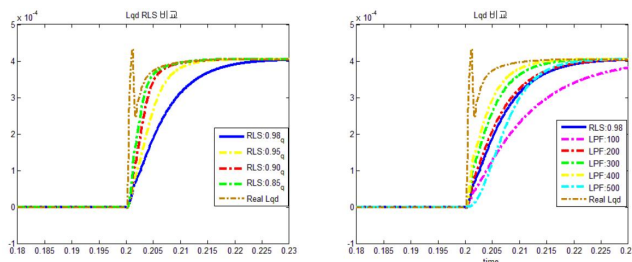
2.2.2 모의 해석 및 실험결과

<표 1> 모의해석, 실험 전동기 파라미터

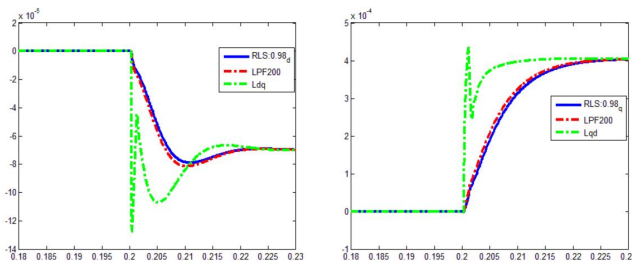
직류전압	135[V]	Rs	12.8[mΩ]
최대전류	200[A]	Ld	0.220[mH]
최대 속도	4500[r/min]	Lq	0.280[mH]
극수	16극	Ke	0.0442[Vsec/rad]



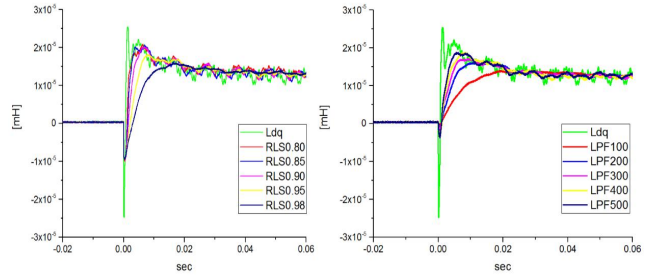
<그림 2> 모의해석 Ldq RLS와 LPF 비교



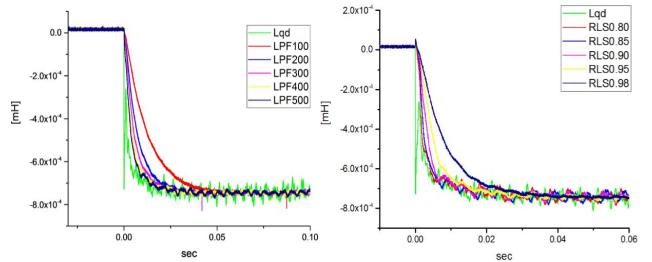
<그림 3> 모의해석 Lqd RLS와 LPF 비교



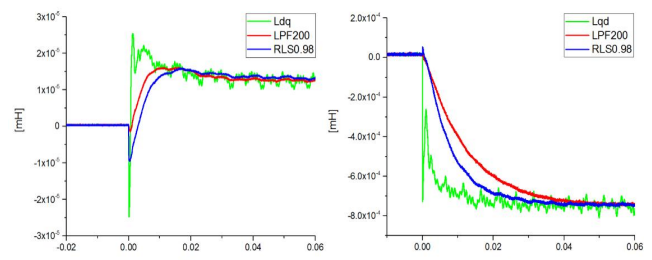
<그림 4> 모의해석 Ldq, Lqd LPF와 RLS 비교



<그림 5> 실험 Ldq LPF와 RLS 비교



<그림 6> 실험 Ldq LPF와 RLS 비교



<그림 7> 실험 Ldq, Lqd LPF와 RLS 비교

일반적으로 IPMSM의 전압방정식은 d축과 q축이 90도의 위상차를 가지고 있기 때문에 d-q축 간의 상호 인덕턴스를 고려하지 않는다. 하지만 실제로는 d축의 인덕턴스는 q축 전류에 영향을 받으며, 반대로 q축의 인덕턴스도 d축 전류에 영향을 받는다. 따라서 비선형 모델링을 통해 실제 전동기의 형태에 더 가깝게 묘사 하였다.

과도상태를 고려하는 상호인덕턴스의 모의 해석을 통해 미분항이 존재하는 Ldq, Lqd를 사용하기에는 취약함을 나타냈다. LPF를 대역폭 100, 200, 300, 400, 500rad/sec를 주어 실험을 하였다. 그 결과 LPF 200rad/sec 가장 좋은 성능을 발휘함을 볼 수 있었다. 하지만 이식은 일반적인 계산에 의한 불안정한 식으로 이산을 고려하지 않는 식이다. 그에 따라 이산적인 최소자승법을 사용하여 Ldq, Lqd를 추정하였다. 최소자승법의 계인값에 따라 모의 해석과 실험을 하였다. 그 결과 Gain 0.98 값이 좋은 성능을 발휘를 하였다.

3. 결 론

기존에 연구 되었던 부분은 정상상태만 고려하여 미분항을 제거하여 상호인덕턴스를 추정을 하였다. 하지만 본 연구는 과도상태 까지 고려한 상호인덕턴스 추정이다. 일반적인 수식에 의한 계산으로 Ldq, Lqd에 미분항이 존재하여 LPF필터를 사용하였다. 또한 동특성이 요구되는 시스템에서 일반적인 수식은 불안정한 식이기 때문에 이산적으로 더 타당한 최소자승법식에 대입하여 모의해석과 실험을 진행 하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Rajendra L. Shrestha and Jul-Ki Seok, "Online Compensation of Parameter Variation Effects for Robust Interior PM Synchronous Motor Drives" Journal of Power Electronics, Vol. 11, No. 5, September 2011,
 [2] 양두영, "자속변동을 고려한 IPMSM의 모델링" 전력전자학회 2014년도 하계학술대회 논문집, 269-270 (2 pages) 2014.07