

제정수 추정기를 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 효율적인 속도제어 기법

임 동 찬, 이 동 명
홍익대학교 전자전기공학부

An Efficient Speed Control Method of IPMSMs using Parameter Estimation

Dong Chan Lim and Dong Myung Lee

School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

요 약

본 논문에서는 영구자석 동기전동기 구동 시 제정수 변동에 의한 전압변동 분을 옵저버를 이용하여 추정하고, 이를 이용하여 변동된 제정수를 추정하여 실시간 제어 알고리즘에 적용할 수 있는 기법을 제안한다.

1. 서 론

전동기 구동 알고리즘을 구현할 때, 대부분의 제정수는 주어진 사양서 값을 기준으로 사용하게 된다. 그렇지만 주어진 제정수는 전동기 구동 조건에 따라 값이 변하게 되고 저항의 경우 그 변동이 70%까지 발생하게 된다.^[1] 제정수의 변동은 전동기 구동에 효율을 감소시킬 뿐 아니라 시스템 전체를 불안정하게 만들기도 한다.^[2] 이런 이유로 많은 논문에서 전동기의 제정수 추정 기법을 제안하였다.

대다수의 논문에서는 인덕턴스에 비해 비교적 영향이 작은 저항 변동 분을 무시하고 인덕턴스 값만 추정하였다.^{[3][4]} 이런 경우 동손의 영향을 정확히 파악할 수 없고, 저항의 영향으로 인해 정확한 인덕턴스 추정이 어려울 수 있다. 이런 문제점을 방지하고자 저항과 인덕턴스 모두를 추정하는 기법이 소개되었다.^[5] 그렇지만 이런 기법들은 적응제어이론을 이용하였기 때문에 알고리즘이 복잡하다는 단점이 있다.

IPMSM의 속도제어 시 저항의 영향은 무시할 만 하므로, 본 논문에서는 저항의 변동은 무시하고 인덕턴스의 변동을 추정하여 이를 실시간 제어알고리즘을 수정하는데 사용하도록 한다.

2. 실시간 속도제어

2.1 전압변동 옵저버

전동기 사양서에 따라 전류 제어기를 설계할 경우, 제정수 변동 시 고정자 전압이 변동한다. 이를 옵저버로 추정하여 제정수 추정에 이용한다.^[4]

전동기의 실제 d축 고정자 전압 식(V_d)과 지령전압 식(V_d^*)을 이용하여 변동전압 식($v_{d\text{dist}}$)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_d &= V_d^* + v_{d\text{dist}} \\ &= R_s i_d + sL_d i_d - \omega L_q i_q \\ &= \hat{R}_s i_d + s\hat{L}_d i_d - \omega \hat{L}_q i_q + \Delta R_s i_d + s\Delta L_d i_d - \omega \Delta L_q i_q \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} v_{d\text{dist}} &= \Delta R_s i_d + s\Delta L_d i_d - \omega \Delta L_q i_q \\ &= (R_s - \hat{R}_s) i_d + s(L_d - \hat{L}_d) i_d - \omega(L_q - \hat{L}_q) i_q \\ &\simeq (R_s - \hat{R}_s) i_d - \omega(L_q - \hat{L}_q) i_q \end{aligned} \quad (2)$$

△값은 사양서에서 제공한 제정수, Δ값은 변화량을 의미한다. 위의 근사화한 전압 변동식을 PI제어기를 이용하여 아래와 같이 설계한다.

$$\begin{aligned} \hat{v}_d &= \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_d - \hat{i}_d) \\ &= \left[\frac{sK_p + K_i}{\hat{L}_q s^2 + (K_p + \hat{R}_s)s + K_i} \right] \cdot \\ &\quad \left\{ [s(\hat{L}_d - L_d) + (\hat{R}_s - R_s)] i_d - \omega(\hat{L}_q - L_q) i_q \right\} \\ &= -G_d(s) v_{d\text{dist}} \end{aligned} \quad (3)$$

위와 같이 q축 고정자 변동전압 식도 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{v}_q &= \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_q - \hat{i}_q) \\ &= \left[\frac{sK_p + K_i}{\hat{L}_q s^2 + (K_p + \hat{R}_s)s + K_i} \right] \cdot \\ &\quad \left\{ [s(\hat{L}_q - L_q) + (\hat{R}_s - R_s)] i_q + \omega[(\hat{L}_d - L_d) i_d + (\hat{\lambda}_m - \lambda_m)] \right\} \\ &= -G_q(s) v_{q\text{dist}} \end{aligned} \quad (4)$$

위와 같이 제어기의 이득을 적절히 설정하면 제정수 변동에 의한 전압변동을 정확히 추정할 수 있다.

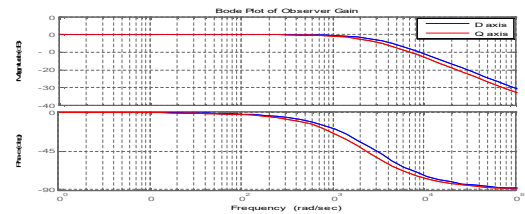


그림 1 옵저버 이득 보데 선도

전압변동 옵저버의 타당성을 Bode plot을 이용하여 검증하였다.

2.2 제정수 추정기

전동기가 고속으로 운전하는 경우 옵저버에서 추정된 전압 변동식을 아래와 같이 근사화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{d\text{dist}} &\simeq -\omega(L_q - \hat{L}_q) i_d \\ v_{q\text{dist}} &\simeq \omega(L_d - \hat{L}_d) i_q \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식을 이용하면 인덕턴스의 근사 값을 추정할 수 있다.

$$L_d = \frac{v_q^{dist}}{\omega \hat{i}_q} + \hat{L}_d \quad (6)$$

$$L_q = -\frac{v_d^{dist}}{\omega \hat{i}_d} + \hat{L}_q$$

식(6)의 근사화 조건은 정상상태 운전 구간이므로, 추정 신뢰도를 높이기 위해 정상상태 구간 값만 이용하여야 한다.

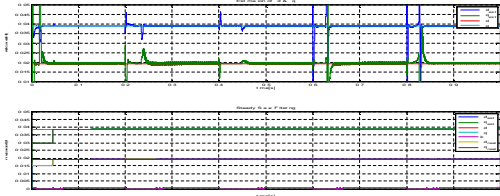


그림 2 추정 인덕턴스의 정상상태 필터링

2.3.1 효율적인 실시간 제어 기법

속도에 따라 가장 효율적인 d, q축 전류 지령을 발생하는 알고리즘은 이미 많은 논문에서 제안하였다.^[6] 일반적으로 전류 알고리즘 제어기에서 전류 지령을 발생하기 위해 필요한 제정수를 사양서를 기준으로 설계하지만, 본 논문에서는 추정기의 출력 제정수를 알고리즘 제어기의 실시간 입력으로 받아 전류 제적을 수정하는 기법을 제안하며, 제정수 추정이 정확히 이루어질 경우 변동된 전동기 제정수에 가장 효율적인 제어방법임을 검증한다.

3. 시뮬레이션 및 결론

제안된 알고리즘은 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 3HP IPMSM 속도제어를 시뮬레이션 한다. 시뮬레이션 시 사양서에 제시된 인덕턴스의 1.3배로 설정하여 시뮬레이션을 검증하며, 시뮬레이션의 전체 개요도는 그림 3과 같다.

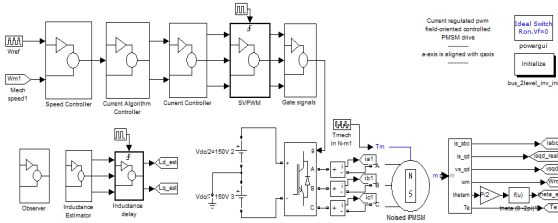


그림 3 제정수 추정기를 이용한 IPMSM 속도제어 시스템

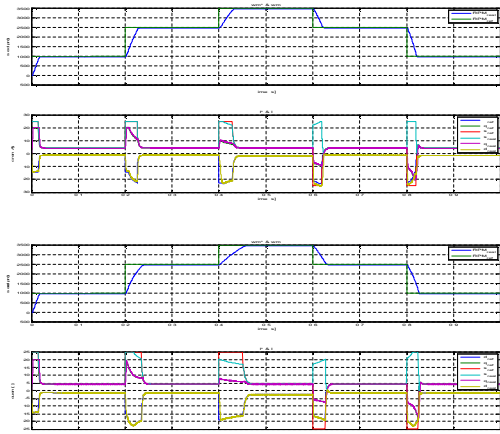


그림 4 추정알고리즘 비교 그래프(상 : 적용 전, 하 : 적용 후)

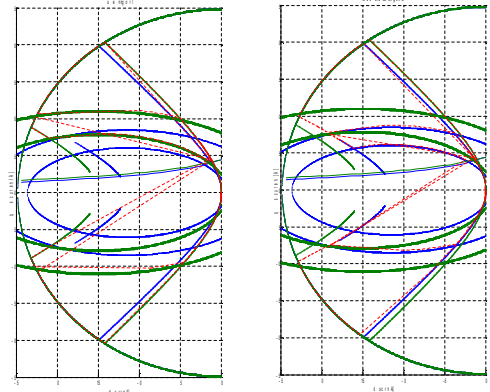


그림 5 전류평면상 전류궤적(좌 : 적용 전, 우 : 적용 후)
(녹색은 사양서 기준, 청색은 변동된 제정수 기준 궤적)

그림 4와 5를 살펴보면, 알고리즘을 적용한 경우 변동된 제정수 기준의 전류궤적을 따라 제어되는 것을 확인할 수 있다. 이는 IPMSM 속도제어 시 가장 타당한 전류궤적임을 확인할 수 있다.

각각의 비교 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 알고리즘이 효율적인 전류궤적을 발생시킴을 확인하였다. 그러나 저항의 변동을 추정하지 못하기 때문에 동손은 정확히 파악할 수 없었다. 저항 추정기를 이용할 경우 동손의 정확한 모델링이 가능하므로 좀 더 효율적인 전류궤적을 발생시킬 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.
(No. 2010T100200468)

참고 문헌

- [1] M. E. Haque and M. F. Rahman, "Influence of Stator Resistance Variation on Direct Torque Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Performance and Its Compensation", IEEE Conference. Ind. Applications, vol. 4, pp. 2563 2569, Sep. 2001.
- [2] 박용순, 설승기, 지준근, 박영재, 이동환, "영구자석 동기 전동기의 제정수 오차가 센서리스 운전 에 미치는 영향", 전력전자학회 논문지, 16권, 1호, pp. 71 78, 2010.2.
- [3] Hyunbae Kim and R.D.Lorenz, "Improved Current Regulators for IPM Machine Drives Using On Line Parameter Estimation", IEEE Conference. Ind. Applications, vol. 1, pp. 86 91, Oct. 2002.
- [4] Rajendra L. Shrestha and Jul Ki Seok, "Online Compensation of Parameter Variation Effects for Robust Interior PM Synchronous Motor Drives", 전력전자학회 논문지, 11권 5호 pp. 713 718, 2011.9.
- [5] Samuel J. Underwood and Iqbal Husain, "Online Parameter Estimation and Adaptive Control of Permanent Magnet Synchronous Machines", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 7, JULY. 2010
- [6] S. Morimoto, "Wide speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high performance current regulator", IEEE Tran. on Ind Allp., vol.30, pp.920 926, Jul/Aug 1994