

전류제어기의 Feedforward를 이용한 IPMSM의 불일치 인덕턴스 추정 기법

신혜웅¹⁾·신창우¹⁾·정지현¹⁾·이진환¹⁾

HL Mando¹⁾

Inconsistent Inductance Estimation Technique of IPMSM Using the Feedforward of the Current Controller

Hye-Ung Shin¹⁾ · ChangWoo Shin¹⁾ · Jihyun Jung¹⁾ · Jinhwan Lee¹⁾

¹⁾ SW Campus, HL Mando Corporation, 21 Pangyo-ro 255beon-gil, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13486, Korea

Abstract : This paper proposes a method to determine whether the inductance value, which is a motor parameter applied when performing control for driving a 3-phase IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor), matches the actual motor inductance. Torque control or speed control, which is a control for driving a motor, requires accurate motor parameters, and if the motor parameters used for control are inaccurate, various adverse effects may be exerted. In particular, motor parameters are more important in MTPA (Maximum Torque per Ampere) control and the field weakening control sections. If the parameters are inaccurate, torque ripple and noise are accompanied, and the desired maximum performance of the motor cannot be achieved. Therefore, this paper proposes a method of estimating whether the motor inductance used for control is the same as the actual motor inductance according to the change in this value by using the voltage feedforward used for the clamping anti-windup of the current controller in the field weakening control section.

Key words : Inductance(인덕턴스), Feedforward(전향보상), IPMSM(매입형영구자석 동기전동기), Current Control(전류 제어), Anti-windup(안티와인드업)

Nomenclature

U_b : dc-link voltage
 V_d^e, V_q^e : d-axis, q-axis voltage
 R_s : stator resistance
 ω_r : electric angular velocity
 K_e : torque constant
 L_d, L_q : d-axis, q-axis inductance

Subscripts

IPMSM: interior permanent magnet synchronous motor
MTPA: maximum torque per ampere

1. 서 론

영구자석형 동기전동기는 효율이 높고 고출력 성능을 갖는 특성을 가지고 있어, 여러 산업 기기에 많이 사용된다. 특히, 최근에는 전기자동차에서 영구자석형 동기전동기를 많이 적용하고 있다. 전기

자동차에 사용하는 전동기는 보통 속도제어나 토크제어 기법을 적용하여 구동한다. 이때에 전동기의 실제 파라미터와 제어에 사용하는 전동기 파라미터의 오차가 존재할 경우, 전동기의 최대 성능으로 제어가 불가능하다. 따라서, 제어에 사용하는 전동기 파라미터의 정확도가 중요하며, 전동기의 고속영역인 약자속제어 기법을 사용시 더욱 전동기의 파라미터는 중요한 요소가 된다. 영구자석형 동기전동기는 전동기 회전자에 영구자석이 포함되어 있는 형태이다. 특히, IPMSM의 경우는 L_d 와 L_q 의 차이로 인한 릴렉턴스 토크가 존재한다. 인덕턴스 오차는 전동기의 성능 저하 및 소음과 같은 악영향을 가져오며, 인덕턴스 오차를 최소화할수록 최적의 성능을 낼 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 인덕턴스 오차 발생을 최소화하기 위해 인덕턴스 불일치 추정 기법을 제안한다.

2. 제안하는 인덕턴스 추정 기법

그림 1은 제안하는 전동기 인덕턴스 불일치 유무를 검출하기 위한 제어 블록도이다. 그림 1의 기본 제어는 토크 제어이며, 전류제어기부분은 Feedforward를 포함한 Clamping Anti-windup을 적용한다[1]. 전류제어기는 PI전류제어기를 사용하였고, I 이득항에 Clamping Anti-windup이 적용되며, 전압 Feedforward부분은 제안하는 인덕턴스 불일치 유무를 검출하기 위해 사용한다. Clamping Anti-windup 은 식 (1), (2)로 나타낸다.

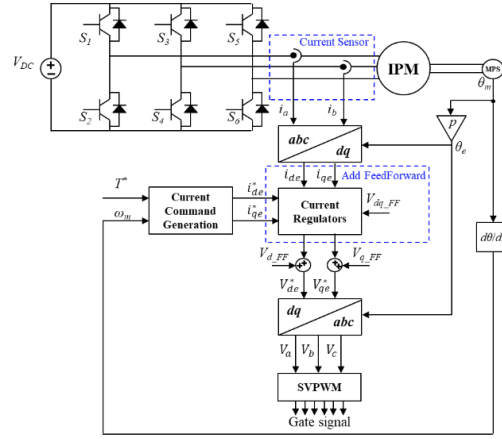


Fig. 1 제안한 Feedforward를 포함한 제어 블록 다이어그램

$$V_{q_Ant} = (U_b - V_d^e) - V_{q_FF} \quad (1)$$

$$V_{d_Ant} = (U_b - V_q^e) - V_{d_FF} \quad (2)$$

$$V_{q_FF} = (R_s i_{qe}^*) + (\omega_r (K_e - L_d i_{de}^*)) \quad (3)$$

$$V_{d_FF} = (R_s i_{de}^*) + (\omega_r L_q i_{qe}^*) \quad (4)$$

여기서 V_{q_FF} 는 q축 전압 Feedforward를 나타내며, V_{d_FF} 는 d축 전압 Feedforward를 나타낸다. 제안하는 인덕턴스 비이상적 인덕턴스 검출방법은 식(5)를 사용하여 확인 가능하다.

$$L_{dq_err} = V_{q_Ant} - V_{d_Ant} \quad (5)$$

식(1), (2)는 제어에 사용되는 파라미터가 정확할 경우 0에 가까운 값으로 수렴한다. 그러나 제어

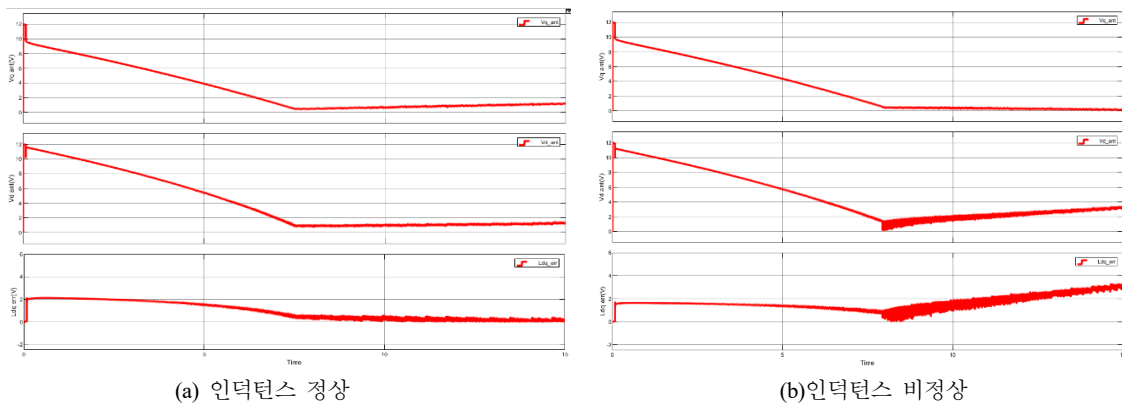


Fig. 2 인덕턴스 값에 따른 시뮬레이션 결과

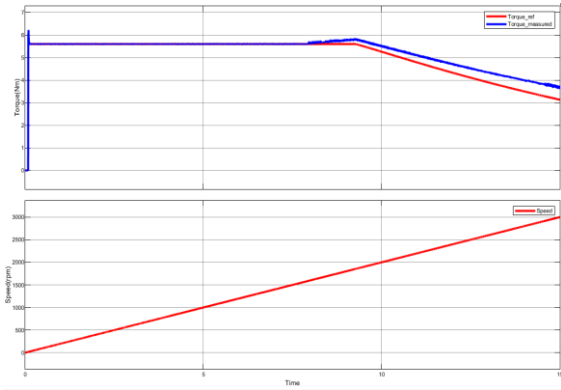


Fig.3 인덕턴스 비정상-TN커브 시뮬레이션 결과

에 사용되는 파라미터가 실제 전동기 파라미터와 불일치하면 식(3)의 V_{q_FF} 전압과 $U_b - V_d^e$ 값의 차이가 발생하고 식(5)를 적용하면 V_{q_Ant} 와 V_{d_Ant} 의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 2는 위에서 설명한 수식을 적용하여 토크 제어 시 인덕턴스 불일치 유무에 따른 식(5)의 Matlab Simulink 시뮬레이션 결과이다. 5.5Nm 토크제어 수행 중 약자속구간이 포함된 3000rpm까지 선형증가하였다. 그림 2(a)는 제어에 사용되는 전동기 인덕턴스가 실제 인덕턴스와 일치할 때의 결과이고 그림 2(b)는 불일치할 때의 결과이다. 그림 2 (a)의 첫번째 그래프결과는 V_{q_Ant} 이고, 두번째 그래프 결과는 V_{d_Ant} 이다. 세번째 그래프 결과는 식(5)의 L_{dq_err} 를 나타내며 제어 인덕턴스가 실제 인덕턴스와 일치할 경우 거의 0에 수렴하였다. 제어 인덕턴스가 실제 인덕턴스와 불일치할 경우는 그림 2 (b)의 세번째 그래프 결과와 같이 L_{dq_err} 가 0이 아닌 값을 갖게 되어 제어 인덕턴스가 실제 인덕턴스와 동일하지 않다는 것을 알 수 있다.

그림 3은 그림 2(b)의 조건으로 인덕턴스가 불일치 할 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 3의 첫번째 시뮬레이션 결과는 빨간색이 지령 토크를 나타내고 파란색이 측정토크를 나타내며, 두번째 시뮬레이션 결과는 3000rpm까지 선형 증가한 결과이다. 시뮬레이션 결과로 알 수 있듯이 실제 토크가 지령토크에 수렴하지 않는 결과를 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 실제 전동기 인덕턴스와 제어에 사용되는 인덕턴스의 불일치하는 부분을 추정하는 기법을 제안한다. IPMSM의 L_d 가 불일치할 때와 L_q 가 불일치할 때 시뮬레이션 결과는 L_{dq_err} 가 0보다 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있었고, 전동기의 파라미터인 인덕턴스의 불일치로 볼 수 있었다. 향후 전동기의 저항과 K_e 의 불일치함에 따른 영향성을 파악하여 전반적인 전동기의 파라미터 불일치 추종 기법을 연구할 계획이다.

References

- 1) M. H. A. Jalil, R. Hamdan, R. Ngadengon, H.M. Shariff, S. A. Jumaat, S. Z. Islam, "PID with Clamping Anti-windup Performance on Temperature Regulation of Glycerin Bleaching Process," ICSGRC 2021, 2021.