

순시 토크 제어를 위한 IPMSM 벡터 제어

이나영, 박지현, 이재연, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구소

PMSM Vector Control for Instantaneous Torque Control

Nayoung Lee, Jeehyun Park, Jaeyeon Lee, Younghoon Cho
 Konkuk Univ. KOPEL

ABSTRACT

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 효율이 높고 출력밀도가 크며 고속에서의 동특성이 뛰어나 순시 토크 제어가 요구되는 고성능 제어분야에 유리하다. 최근 IPMSM은 전기자동차 등의 다양한 산업분야에 응용되어 많은 연구와 관심이 집중되고 있다. 하지만 IPMSM은 구조적인 특징 때문에 리액션 토크(Reaction Torque)와 별도로 릴럭턴스 토크(Reluctance Torque)가 추가적으로 형성되어 제어 시 별도의 계산이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 IPMSM 순시 토크 제어를 위해 릴럭턴스 토크와 리액션 토크를 제어하였고, 그 결과를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

IPMSM은 SPMSM보다 릴럭턴스 토크로 인한 고출력과 더불어 고속운전에 유리하다. 특히 IPMSM의 높은 토크 밀도와 효율, 넓은 운전 영역으로 인하여 전기자동차의 추진 전동기로 사용되는 등 다양한 산업분야에서 많은 사용이 이루어지고 있다.^[1] IPMSM을 제어하기 위해서는 전류제어와 토크제어를 필요로 한다. 본 논문에서는 전류제어기와 속도제어기를 사용하여 IPMSM의 토크제어를 진행하고 시뮬레이션을 통해 검증하려고 한다.

2. IPMSM의 벡터제어

2.1절 IPMSM의 모델링

IPMSM을 제어 하기 위해서 abc 좌표계의 3상 변수를 정지된 직교 좌표계 d-q 축으로 변환이 필요하다. 따라서 3상의 전류지령을 d-q 회전좌표계로 변환하여, d-q 전류지령을 이용하여 토크를 순시적으로 제어하였다. d-q축 고정자 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} - \omega \lambda_{ds} \quad (2)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} + \phi_f \quad (3)$$

$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} \quad (4)$$

이때 영구자석에 의한 토크 릴럭턴스 토크의 식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} [\phi_f i_{qs} + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs}] \quad (5)$$

P : 극수(pole), ω_e : 전기각

2.2절 전류 제어기의 구성

IPMSM의 전류제어기의 구성은 그림 1,2와 같다.

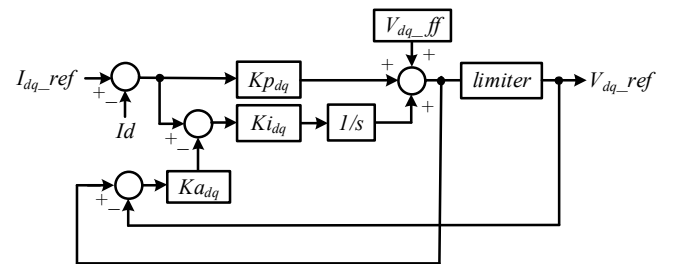


그림 1 d-q축의 전류 제어기
 Fig. 1 Current controller of dq-axis

인버터로 인해 흐르는 전류와 id 전류지령 값의 오차가 0이 되도록 하기 위하여 PI 제어기를 통해 제어를 해준다. 이때 속도 기전력에 의한 상호 간섭 성분이 전류 제어기에 외란으로 작용하여 성능에 악영향을 끼치므로 전향제어 (Feedforward Control) 를 하여 전류제어기의 성능을 향상시켰다. 전향 보상은 회로에서 V_{dq_ff} 와 V_{q_ff} 표시되며 식은 다음과 같다.

$$V_{d_ff} = -\omega_e L i_{qs} \quad (6)$$

$$V_{q_ff} = \omega_e L i_{ds} \quad (7)$$

또한 적분기의 누적(Wind-up)현상을 방지하기 위해 Anti-windup 제어기를 추가하여 적분기의 누적을 억제하였다. 제어를 통해 나온 V_{d_ref} , V_{q_ref} 의 값을 다시 d-q축에서 abc 3상으로 역변환하여 PWM 인버터를 통해 전동기에 인가하였다. 그림 3은 3상 인버터에 연결된 IPMSM의 회로도이며, 스위치의 스위칭 주파수는 10kHz로 설정하였다.

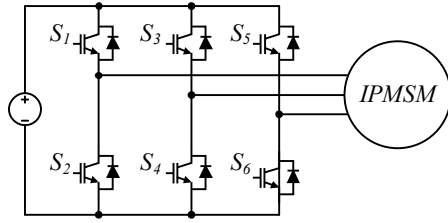


그림 2 PWM 3상 인버터에 연결된 IPMSM의 회로도
Fig. 2 Circuit of IPMSM connected with PWM Inverter

PI 제어기의 Gain은 값은 IPMSM을 구성하는 소자의 값으로 결정된다. 소자의 값과 제어기의 Gain값은 다음과 같이 설정하였다.

표 1 IPMSM의 소자값
Table 1. Parameter of IPMSM

R_s	4.3
L_d	0.027
L_q	0.067
P	4
Moment of Inertia	0.00179

표 2 제어기의 Gain 값
Table 2. Gain value of controller

	d	q
K_p	169	420.979
K_i	27000	27000
K_a	1/169	1/420.979

여기서 K_p 는 PI 제어기의 비례 이득이고, K_i 는 적분 이득이다. K_a 는 누적 방지 제어기의 이득으로 K_p 의 역수로 설정하였다.

$$K_{pd} = L_d \times \omega_c \quad (8)$$

$$K_{pq} = L_q \times \omega_c \quad (9)$$

2.3절 속도제어기의 구성

그림 4는 PI제어기와 Anti-windup 제어기로 구성된 속도제어기의 구성을 보여준다.

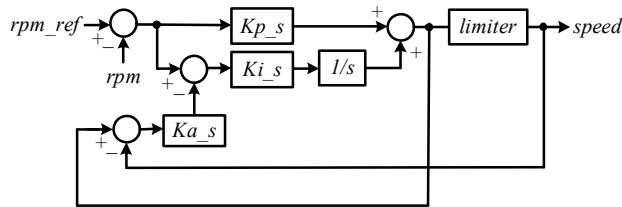


그림 3 속도 제어기
Fig. 3 speed controller

IPMSM를 제어 할 때 단위 전류당 최대 토크 제어를 출력하기 위해서 요구되는 지령 토크 발생을 위해 필요한 고정자 전류가 최소가 되는 조합을 구해 이에 따라 운전하는 MTPA(Maximum Torque Per Ampere)제어를 수행한다. 이때 지령 토크에 대한 최적의 d와 q축의 지령 토크를 구하는 식은 4차 방정식이다. 이 방정식을 이용하여 고정자 전류를 구하는 방식은 연산속도의 한계와 전동기 구동 시 파라미터가 가변 되어 신뢰성이 낮다는 한계를 가지고 있기 때문에 이러한 한계를 극복하기 위해 미리 룩-업 테이블(Look-Up Table)을 작성하여 시뮬레이션에 설정해 두었다.^[2] 시뮬레이션에 적용된 룩-업 테이블은 다음과 같다.

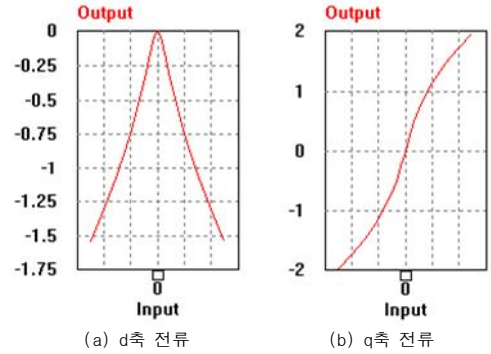


그림 4 참조표
Fig. 4 Look-Up Table

2.4절 Simulation 결과

PSIM 시뮬레이션 툴을 이용하여 IPMSM의 시뮬레이션을 진행하였다. 소자의 값은 표 1로 지정하였다. 시뮬레이션의 결과는 그림 4와 같다. d와 q축의 전류지령에 대한 출력 전류의 추종 특성이 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한 토크지령에 대한 출력토크의 추종도 양호하게 수행되고 있는 것을 확인할 수 있다.

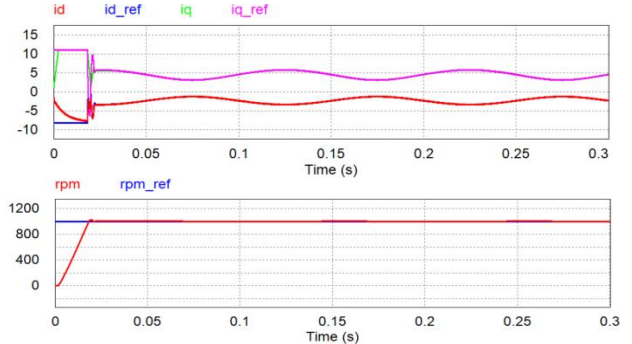


그림 5 d-q축 전류 및 토크 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation Results of d-q axis current and torque

3. 결론

본 논문에서는 IPMSM의 순시 토크 제어를 위한 제어 방법을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 제시된 전류 및 속도 제어기와 MTPA 제어를 통해 IPMSM 구동할 경우, 출력토크가 빠르게 지령토크를 추종하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 산업연계 교육활성화 선도대학(PRIME) 사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] Gui-Yeo Park, Jung-Woo Park, Won-Il Ahn, Duck-Woong Shin, Moon-Seon Jeong and Chae-Joo Moon, 2013, "A Study on Feedforward Compensation Method of IPMSM for EV with Non-sinusoidal BEMF," THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, Vol. 18, No. 6, pp. 573~578.
- [2] Il-Kwon Won, Do-Yun Kim, An-Yeol Ko, Jung-Hyo Lee, Young-Real Kim and Chung-Yuen Won, 2013, "A Design Method of 2D Look-up Table of IPMSM for Electric Vehicle," Power Electronics Annual Conference, pp. 104~105.