

고출력을 위한 이중 3상 SPMSM 모델링 및 제어

서용원, 허준익, 박중근, 조영훈
건국대학교 전력전자연구실

Double three-phase SPMSM modeling and control for high power

Yongwon Seo, Junik Heo, Jonggeun Park, Younghoon Cho
Power Electronics Lab, Konkuk Univ.

ABSTRACT

본 논문은 고출력을 위한 이중 3상 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)의 모델링과 전향 보상 전류 제어 알고리즘을 제안한다. 다중 권선의 경우 권선 간의 상호 간섭 성분이 발생하므로 모터의 고정자 권선 배치는 이를 최소화하는 대칭(Symmetric) 구조로 선정하였으며 상호 간섭을 고려한 전향 보상 전류 제어 알고리즘을 설계했다. PWM방식은 제어 성능 향상을 위해 공간 전압벡터(Space Vector Pulse Width Modulation: SVPWM)변조 방식을 채택하였다. 제안된 이중 3상 SPMSM과 전향 보상 전류 제어 알고리즘은 수학적 수식을 통해 모델링하였고, 모의실험을 통해 검증하였다.

1. 서론

영구자석 동기전동기는 높은 출력과 고 효율 특성으로 인해 자동차, 기차, UAM과 같이 높은 토크를 요구하는 분야에서 널리 사용되고 있다. 영구자석 동기전동기 중 하나인 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)는 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)에 비해 낮은 토크 리플을 갖는 장점이 있지만 그에 비해 출력이 작다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근 이중 3상 SPMSM 모델의 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 이중 3상 SPMSM은 두 권선 간의 상호간섭 성분이 발생하는 단점이 있지만, 전류를 두 권선에 나누어 인가하기 때문에 소자가 받는 스트레스를 줄이면서 출력밀도를 개선할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 동 출력 대비 단일 권선에 인가되는 전류가 작기 때문에 손실을 줄일 수 있다.

이에 본 논문에서는 이중 3상 SPMSM 모델을 설계하고, 이 시스템의 상호간섭 및 역기전력 성분을 전향 보상하는 제어 알고리즘을 제안한다. SPMSM 모델과 제어기는 dq 동기 좌표계에서 구현하였으며, 모의실험을 통해 정합성을 검증하였다.

2. 이중 3상 SPMSM 모델 및 제어

2.1 이중 3상 SPMSM 모델

이중 3상 SPMSM의 전체적인 시스템 구조와 파라미터 값은 그림 1, 표 1과 같다. 두 권선을 대칭 구조로 배치하여 상호 간섭 성분을 최소화하는 형태로 선정하였다.

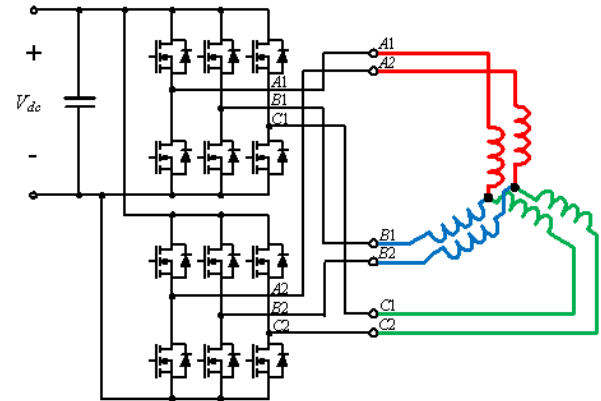


그림1 이중 3상 SPMSM 시스템

Fig1. Double Three-phase SPMSM system

표1 이중 3상 SPMSM의 정격 및 파라미터

Table1. Ratings and parameters of Double Three-phase SPMSM system

Parameter	Value	Unit
Number of Pole(P)	10	
Vemf_per_krpm	34.53	[V]
R_s	24.8	[mΩ]
M_1	91.3	[uH]
M_2	-13.59	[uH]
L_s	348	[uH]
L_l	3.48	[uH]
L_m	34.45	[mH]
$L_{d1}=L_{d2}=L_{q1}=L_{q2}$	24.11	[mH]
$M_{d12}=M_{q12}$	699.25	[mH]
f_{cc}	1000	[Hz]
Rated Torque	151	[Nm]
Rated Speed	2660	[rpm]
Rated Power	42	[kW]

2.2 이중 3상 SPMSM 전류제어 알고리즘

그림 2는 모터의 1차측 제어기 블록도를 나타낸다.

제어기는 두 권선간 및 dq축간의 상호간섭 성분과 역기전력 성분을 고려하여 전향 보상하는 시스템으로 설계하였다. 블록도 $G_{cc}(s)$ 는 PI제어기와 Anti-windup 기법을 적용한 전류제어기 전달함수이다. 전압 방정식 식 (1) (2)와 쇄교자속 방정식 (3) (4)을 연립하여 전류에 관한 전압방정식을 유도할 수 있다.

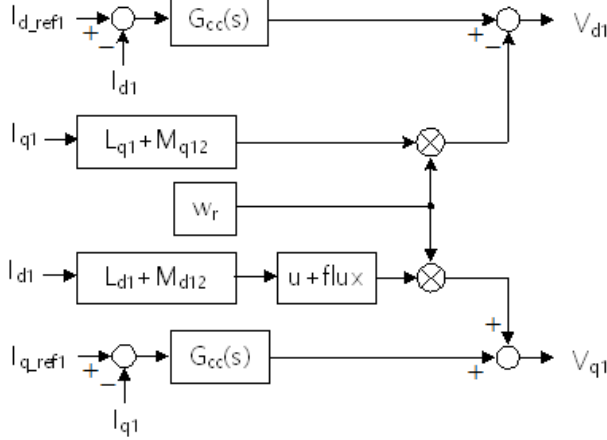


그림 2 이중 권선 1차측 제어기 블록도
Fig.2 Double winding primary controller block diagram

$$v_{dq1} = R_{dq1}i_{dq1} + \frac{d\lambda_{dq1}}{dt} \quad (1)$$

$$v_{dq2} = R_{dq2}i_{dq2} + \frac{d\lambda_{dq2}}{dt} \quad (2)$$

$$\lambda_{dqf1} = L_{dq1}i_{dq1} + M_{dq21}i_{dq2} \quad (3)$$

$$\lambda_{dqf2} = L_{dq2}i_{dq2} + M_{dq12}i_{dq1} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot pp \cdot \phi_f (i_{q1} + i_{q2}) + (L_{d1} - L_{q1})(i_{d1}i_{q1} + i_{d1}i_{q2}) + (L_{d2} - L_{q2})(i_{d1}i_{q2} + i_{d2}i_{q2}) \quad (5)$$

3. 모의실험

설계한 모터와 제어기의 성능을 검증하고자 Matlab/Simulink를 이용하여 모의실험을 진행하였다. 모터는 정격속도 2660rpm으로 동작하고 있다. 초기 부하조건은 정격 토크인 151Nm로 지정하였고 0.5s에 -50Nm를 스텝으로 인가하였다. 권선 1과 권선 2에 인가한 전류는 모두 동일하다.

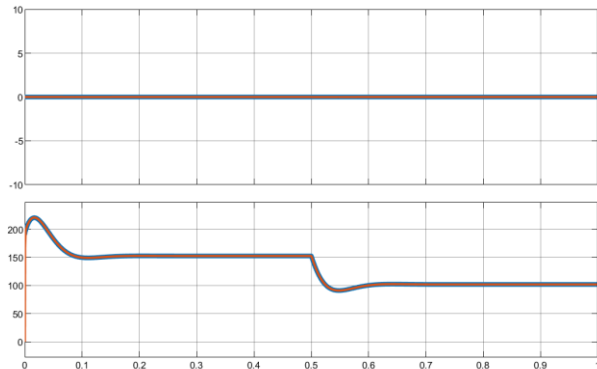


그림 3 전류 제어기의 reference 및 feedback 전류 파형
Fig.3 reference and feedback current of the current controller

그림 3은 제어기의 입력전류로 상단은 I_{d_ref} 와 I_d , 하단은 I_{q_ref} 와 I_q 를 나타낸다.

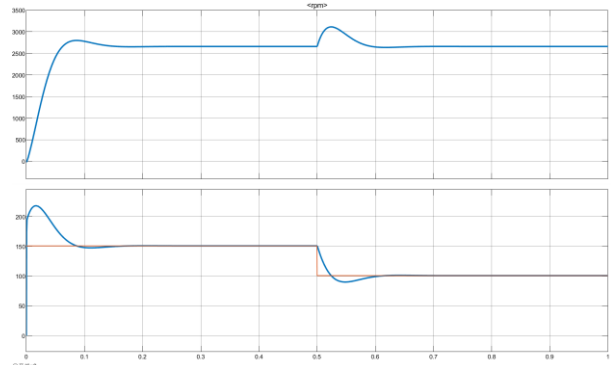


그림 4 이중 3상 SPMSM 부하 상태 기계 시스템 출력 파형
Fig. 4 Double Three-phase SPMSM load state Mechanical System Output Waveform

그림 4은 모터의 기계시스템 출력 파형으로 상단은 속도(rpm), 하단은 부하 토크와 토크 응답을 나타낸다.

그림 4를 통해 설계한 이중 3상 SPMSM의 부하조건에 따른 토크 제어가 정상적으로 기능함을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 이중 3상 SPMSM과 제어기의 설계 방법을 제안하였다. 설계된 모터와 제어기는 모의실험을 통해 검증하였다. 향후 단일 권선 SPMSM과 같은 조건하에 실험을 진행하여 모터의 토크 및 속도 값을 비교, 분석할 예정이다.

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 대학혁신지원사업에서 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] Akira Satake, Yuriko Okamoto, Satoru Kato, "Design of Coupling Cancellation Control for a Double-winding PMSM", J-STAGE home/IEEJ Journal of Industry Applications /Volume 6 Issue 1/ Pages 29-35
- [2] Dae-Yeon Hwang, Bon-Gwan Gu : "High Efficiency Drive Strategy of Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, KIEE Vol. 69, No. 6, p.881-886
- [3] Y. Demir, M. Aydin, "A Novel Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor With Asymmetric Stator Winding, IEEE Transactions on Magnetics" (Volume: 52, Issue: 7, July 2016)