

Simplorer기반 견인용 IPMSM의 모델링 해석

박승훈, 반민호, 조춘호, 정철현, 김태웅, 김성곤*, 최명수**
 경상대학교, 전북자동차기술원*, SEM Inc**

Simplorer Based Modeling Analysis of Traction IPMSM

Seung-Hoon Park, Choon-Ho Cho, Min-Ho Ban, Cheul-Hyun Jeong, Tae-Woong Kim,
 Seong-Gon Kim*, Myeong-Soo Choi**
 Gyeongsang National University, Jeonbuk Institute of Automotive Technology*, SEM Inc**

ABSTRACT

본 논문에서는 견인용 비대칭 배리어기법으로 설계된 토크리플 저감용 돌극형 영구자석전동기를 Simplorer로 전류변화량에 따른 d축 및 q축 인덕턴스를 모델링한 후 이에 적합한 MTPA 기법을 적용하여 효율향상 및 최대토크제어에 대한 시뮬레이션 해석을 통해 유효성을 검증한다.

1. 서론

국내외적으로 무분별한 에너지 사용으로 인해 에너지 자원이 고갈되어 가면서 지구온난화, 블랙아웃과 같은 현상들이 일어나고 있다. 이로 인해 신재생 에너지 및 에너지 절감 그리고 에너지사용의 고효율화에 대한 분야에 많은 연구가 이루어지고 있다. 전동기는 국내 전력사용량의 약 50~60%를 사용하고 있으며, 유도전동기의 효율을 4% 개선한다면, 국가 총 전력을 약 2% 절감할 수 있다. 따라서 에너지위기나 지구환경보존의 입장에서 전동기의 고효율화는 매우 중요한 과제가 되고 있다.

본 논문에 있어서 제시된 견인용 전동기는 토크리플저감 및 고풍력을 발생시킬 수 있는 배리어 비대칭형상을 이용하여 설계된 토크리플저감용 돌극형 영구자석 동기전동기(IPMSM)이며, 이를 Simplorer로 전류변화량에 따른 d축 및 q축 인덕턴스 기반으로 모델링하기 위해 룩업테이블(look-up table)을 도입하고, 견인용 IPMSM이 델타결선으로 구성되어 있어 이를 3상 Δ-Y 임피던스변환으로 파라미터를 환산하고, 이에 적합한 최대토크제어기법(MTPA; Maximum Torque Per Ampere)을 적용하여 시뮬레이션해석을 통해 유효성을 검증한다.

2. 견인용 IPMSM 제어

2.1 IPMSM 수학적 모델링

IPMSM의 동기좌표계 전압 방정식 및 토크 방정식은 식 (1) 및 (2)와 같이 표현된다.^[1] i_d 를 0으로 제어하면, $\lambda_d = \lambda_{af}$ 되고 순수토크만 발생하는 토크방정식으로 식 (3)과 같이 표현되고, 토크방정식에 있어서 쇠교자속이 일정하게 되기 때문에 토크가 q축 전류에 직접적으로 비례한다.

$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_d + p\lambda_d - \omega_s \lambda_q \\ v_q &= R_s i_q + p\lambda_q + \omega_s \lambda_d \end{aligned} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P [\lambda_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_{af} i_q \quad (3)$$

where $p = d/dt$, $\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{af}$, $\lambda_q = L_q i_q$, P is pole pair

2.2 단위전류당 최대토크제어

동기좌표계에서 d축 및 q축 전류 i_d , i_q 는 고정자전류 i_s 와 전류위상각 β 로 표현하면 그림 1과 같이 보여주며, 식 (4)와

같이 표현된다.

$$\begin{aligned} i_d &= i_s \sin \beta \\ i_q &= i_s \cos \beta \end{aligned} \quad (4)$$

where i_s : 고정자전류

IPMSM의 단위전류당 최대토크를 제어하기 위해 고정자전류와 전동기 파라미터인 인덕턴스 및 역기전력상수에 대한 정확한 정보를 파악해야 한다. 인덕턴스 및 역기전력상수는 각각 전류와 온도에 따라 변화하지만 본 논문에서는 온도 변화량에 따른 파라미터를 추정하기 위해서 많은 어려움이 있기 때문에 온도변화에 따른 인덕턴스 및 역기전력상수 변화량을 무시하고, 고정자전류 변화량에 따른 d축 및 q축 인덕턴스 성분을 look-up 테이블로 구현하여 식 (5)에 제시된 전류위상각을 추정하여 마그네틱토크 및 릴럭턴스토크에 의한 전체 토크를 극대화시킬 수 있도록 제어한다.^[2] 그림 2는 MTPA 알고리즘 기반 IPMSM 구동시스템의 전체 블록선도를 보여준다.

$$\beta = \sin^{-1} \left[\frac{-\lambda_{af} + \sqrt{\lambda_{af}^2 + 8(L_q - L_d)^2 i_s^2}}{4(L_q - L_d) i_s} \right] \quad (5)$$

where λ_{af} : 역기전력상수, L_d : d축 인덕턴스, L_q : q축 인덕턴스

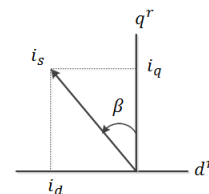


그림 1. 위상각에 따른 전류페이저도

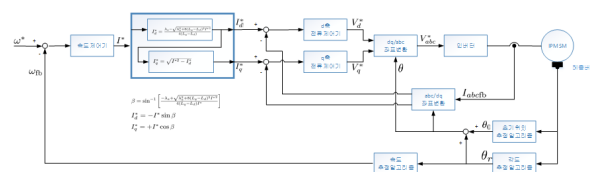


그림 2. MTPA 알고리즘기반 IPMSM 구동시스템의 전체 블록선도

2.3 Simplorer기반 전동기 모델링

비대칭 배리어기법^[3]으로 설계된 견인용 매입형 영구자석동기전동기는 3상 결선이 그림 3(a)에 보여주듯이 Δ결선으로 되어 있으며 Simplorer기반 시뮬레이션해석을 수행하기 위해 전동기 모델링이 우선적으로 구현되어야 한다. 그러나 Simplorer 시뮬레이터에서 제공된 기본 전동기모델은 그림 3(b)와 같이 Y결선으로 되어 있기 때문에 설계된 전동기 파라미터를 Y결선으로 3상 Δ-Y 임피던스변환을 통해 모델링해야 한다.

Maxwell FEM 해석에 의해 설계하여 제작된 IPMSM의 파라미터를 토대로 전류 및 전류위상각에 따른 d축 인덕턴스 및 q축 인덕턴스를 구할 수 있다. 따라서 설계된 IPMSM의 파라미터를 $\Delta-Y$ 임피던스로 변환한 후 고정자전류 변화량에 따른 d축 및 q축 인덕턴스를 look-up 테이블로 구현하여 견인용 IPMSM을 모델링하였다. 고정자전류 변화량에 따른 d축 및 q축 인덕턴스를 look-up 테이블 구현 회로를 그림 4와 같이 구성하였고, 그림 5에서 보여준 look-up 테이블의 X축은 고정자전류를, Y축은 d축 및 q축 인덕턴스를 나타낸다.



그림 3. 결선에 따른 3상 전동기회로 결선: (a) Δ 결선, (b) Y결선

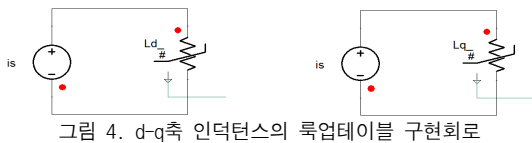


그림 4. d-q축 인덕턴스의 룩업테이블 구현회로

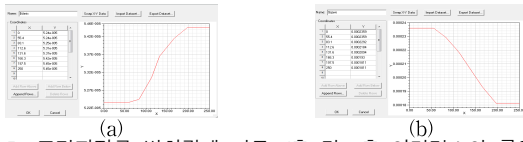


그림 5. 고정자전류 변화량에 따른 d축 및 q축 인덕턴스의 룩업테이블 구현; (a) d축 인덕턴스, (b) q축 인덕턴스

3. 시뮬레이션 해석

본 논문에서는 Simplerer 기반 견인용 IPMSM 모델링해석의 유효성을 검증하기 위해서 시뮬레이션해석을 수행하였다. 고정자전류 변화량에 따른 인덕턴스를 추정하기 위해서 식 (5)에 의해 추정된 전류위상각을 시뮬레이션에 적용하였고, 시뮬레이션 회로구성도는 그림 6에 보여준다. 비대칭배리어 IPMSM 사양은 정격용량 4.5kW, 정격전압 48V, 정격전류 75Arms, 정격토크 14.82Nm, 정격속도 2900rpm이다.

그림 7은 MTPA 제어의 적용여부에 따른 시뮬레이션 결과로써 좌측파형은 전류위상각=0으로, 우측파형은 MTPA 제어기반 전류위상각으로 제어한 경우를 각각 보여주고, 적용하였을 경우가 부하 14.82Nm에 대한 전류가 131.5A에서 125A로 최소화 되었음을 확인할 수 있다.

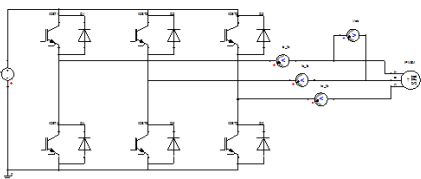


그림 6. Simplerer 기반 시뮬레이션시스템의 구성도

4. 결론

본 논문에서는 IPMSM의 단위전류당 최대토크출력을 제어하기 위해 필요한 고정자전류의 정확한 정보를 파악하기 위하여 고정자전류 변화량에 따른 d축 및 q축 인덕턴스를 look-up 테이블로 구현하였고 Simplerer 기반 견인용 IPMSM 모델링해석을 시뮬레이션을 통하여 유효성을 확인하였다.

이 논문은 2014년 특구기술사업화사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] Pragasen P. and Ramu K., "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part I: The

Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive", Proc. of IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, No. 2, pp. 265-273, 1989
 [2] 이광운, "영구자석 동기전동기의 단위 전류 당 최대 토크 운영 점 추적제어", 전력전자학회논문지, pp. 291-299, 2007
 [3] 김홍현, 박성인, 김재호, 김기찬 "Barrier 비대칭 형상을 이용한 IPMSM 토크 리플 저감 설계", 대한전기학회 학술대회논문집, pp. 859-860, 2013
 [4] 반민호, 이상하, 박승훈, 정철현, 조춘호, 김태웅, 최명현, 김성곤, 김기찬 "견인용 IPMSM의 최대토크 제어기법에 관한 고찰", 전력전자학회논문지, pp. 219-220, 2015

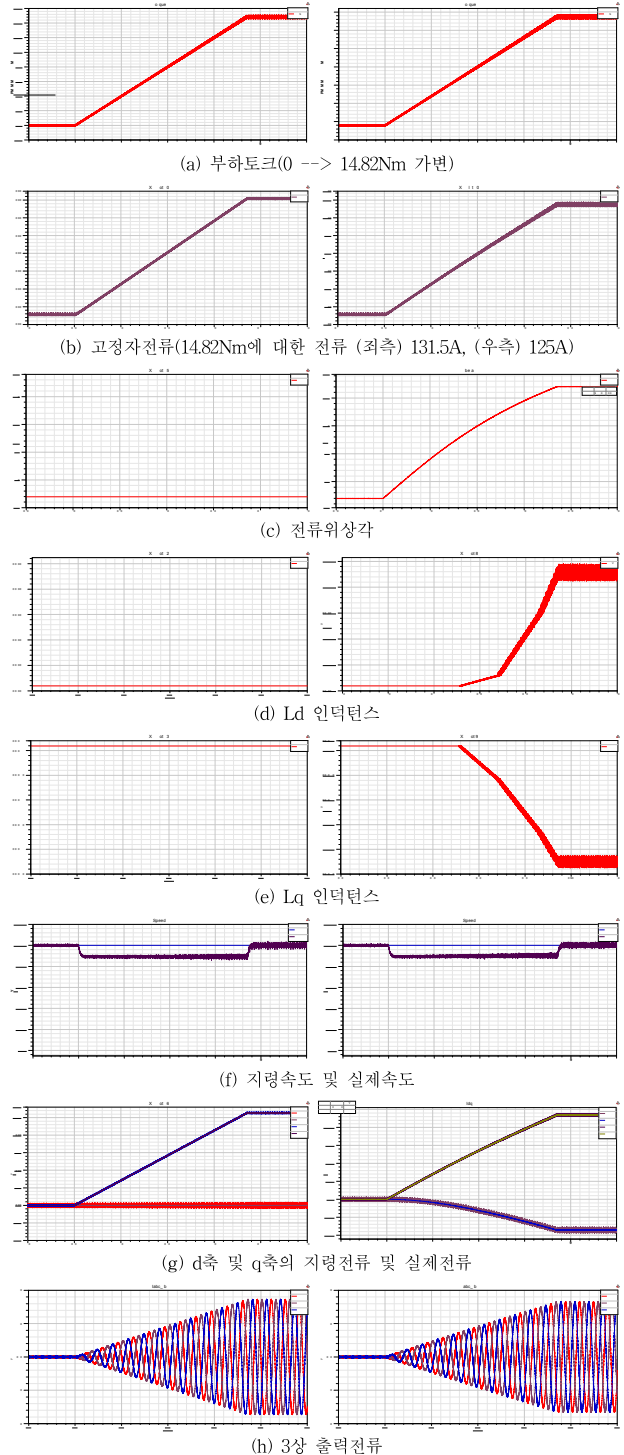


그림 7. MTPA 제어 적용여부에 따른 시뮬레이션 파형; (좌측파형) 전류위상각 β 를 0으로 고정하여 제어한 경우, (우측파형) MTPA 제어에 따른 전류위상각 β 로 제어한 경우