

최대 출력 확보를 위한 매입형 영구자석 전동기의 전기자 권선설계

임호경, 이정중, 이태근, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Study on the Armature Winding Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Maximum Power

Ho-Kyoung Lim, Jeong-Jong Lee, Tae-Guen Lee, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - Recently, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) is widely used in the industry applications such as power train for hybrid vehicles and compressor motors of air-conditioner due to its high power density and wide speed range. There are some ways for confirming of maximum power in IPMSM. However, This paper suggests that there is a way about making sure maximum power by reducing turn numbers of armature winding. Setting up the voltage equation through the equivalent circuit and vector diagram of IPMSM first, and then estimating the parameter and power of IPMSM by changing the turn numbers of armature winding and voltage. In order to satisfy output power, the turn numbers of armature winding is changed by using the characteristic analysis, and then checking whether secure maximum power or not.

1. 서 론

매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)는 단위 중량 당 출력비와 효율이 높다. 이는 매입형 영구자석 전동기가 마그네틱 토크만을 이용하는 표면 부착형 영구자석 전동기(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor : SPMSM)와는 달리 d, q 축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크를 사용할 수 있기 때문이다. 이런 이점에 의해서 현재 많은 연구가 진행중에 있으며, 적용분야로는 고속영역에서 높은 정출력 구간을 확보해야하는 차량에서의 하이브리드 구동용 전동기와 인휠 시스템 전동기, 에어컨 컴프레서용 전동기가 있다[1].

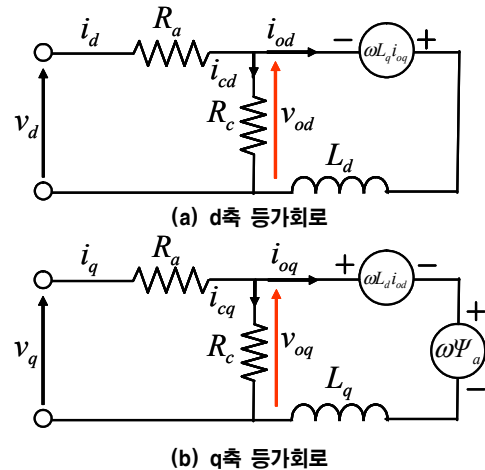
전동기를 설계 시 많은 파라미터들이 서로 연동되어있으므로 많은 부분을 고려해야한다. 전동기에서 전원사양과 점적율을 동일하게 유지하고 전기자 권선의 턴수를 일정 비율만큼 감소시키면 감소한 비율에 반비례한 전류가 입력되어 동일 출력을 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 회전자 및 고정자의 형상은 유지한 상태에서 전기자 권선 턴수와 단자전압을 감소시켰을 때 최대 출력 지점에서 변하는 전동기의 파라미터와 출력을 수식적으로 산정하고 특성해석을 통하여 검증한다.

2. 본 론

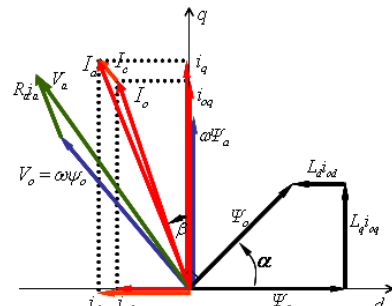
2.1 IPMSM의 파라미터 산정

2.1.1 IPMSM의 등가 회로 및 벡터도

IPMSM에서 철손을 고려할 경우 철손을 등가철손저항 R_c 로 근사적으로 표현이 가능하고 그림 1에서 보듯이 등가회로를 구성 할 수 있다[2]. 등가회로에 나타내었듯이 등가철손저항이 유기전압 v_{od} , v_{oq} 에 병렬 접속되어있고, R_c 에서 발생하는 손실은 쇠교자속과 각속도의 제곱에 비례한다. 또한 이 등가회로에서는 히스테리시스 손을 고려하지 않고 있지만, 전원주파수와 자속 쇠교수에 따라 등가철손저항 R_c 를 가변하게 함으로써, 히스테리시스손도 포함된 철손을 표현하는 것도 가능하다. 등가회로에서 i_d , i_q 는 d, q축 전류를 의미하며, i_{od} , i_{oq} 는 d, q축 철손분 전류이다. v_d , v_q 는 d, q축 단자전압이고, R_a 는 전기자 권선의 저항이다. ψ_a 는 쇠교자속량을 의미하고, L_d , L_q 는 각각 d, q 축 인덕턴스를 가리킨다. 그림 2는 철손을 고려한 IPMSM의 벡터도이다. 철손을 고려함으로써 철손분 전류 i_c 에 의해 전동기에 입력되는 전류 I_a 와 전동기에서 토크를 발생시키는 전류 I_o 의 크기와 위상이 틀려짐을 확인할 수 있다. IPMSM의 등가회로와 벡터도를 이용하여 전압방정식을 세우고 전기자 권선의 턴수의 감소에 의한 각각의 파라미터의 변화를 수식적으로 확인해 본다.



<그림 1> 철손을 고려한 IPMSM의 d, q축 등가회로



<그림 2> 철손을 고려한 IPMSM의 벡터도

2.1.2 IPMSM의 파라미터 변화

그림 1에서 제시한 IPMSM의 d, q축 등가회로를 통해 전압방정식을 세워보면 다음식과 같다[3].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (\because p = \frac{d}{dt}) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

IPMSM에서 전원사양(V·I)과 기자력(N·I), 슬롯의 점적율을 동일하게 가져간다는 가정 하에 전기자 권선의 턴수와 입력 전압을 변화시키면 파라미터들은 규칙적인 양상을 갖고 변한다. 역기전력(E)은 다음과 같은 식을 만족하므로 턴수에 비례한다.

$$E = N \frac{d\psi}{dt} \quad (3)$$

여기서 N은 전기자 권선의 턴수를 의미하고, ψ 는 쇠교자속을 의미한다. 상저항은 점적율을 동일하게 가져갈 때 턴수 제곱에 비례한다. 릴럭턴스토크를 발생시키는 d, q 축 인덕턴스도 자기저항이 동일할 때 전기자 권선의 턴수 제곱에 비례한다.

$$L_{d,q} = \frac{N^2}{R} \quad (4)$$

여기서 R 은 자기저항을 의미한다.

IPMSM의 형상에 변화가 없다면 철손이 동일하여 철손저항(R_c)도 턴수 제곱에 비례하여 변하게 된다.

$$R_c = \frac{E_{II}^2}{W_i} \quad (5)$$

여기서 E_{II} 은 선간 역기전력을 의미하고, W_i 는 철손을 의미한다.

동일 기자력을 가정하였으므로 전류는 턴수에 반비례하게 입력된다. 그 결과 IPMSM의 마그네틱 토크 T_m 와 킬턴스 토크 T_r 가 동일한 값을 가지게 되고 출력 또한 동일하게 됨을 알 수 있다.

$$T = T_m + T_r = P_n \Psi_a i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \quad (6)$$

여기서, P_n 은 극쌍수를 의미한다.

동일 점적율을 유지한 상태에서 전기자 권선의 턴수를 변화시켰을 때 변화하는 파라미터와 출력을 전압방정식을 통하여 예상한 결과를 특성 해석을 통하여 확인해 보았다.

2.2 특성해석으로의 검증

특성해석으로 수식적으로 예상한 값을 검증하였다. 특성해석을 수행하는 과정은 그림 3과 같으며 무부하 쇄교자속 산정에 있어서 전류의 크기에 따른 비선형성을 고려하였다. 자기적 비선형성을 등가회로해석에 고려해 주기 위하여 전류 및 전류 위상각 별 인덕턴스 프로파일을 산정한다. 이 때 인덕턴스는 무부하 시와 부하 시 쇄교자속의 크기와 위상의 관계로부터 유도된 식 (7)을 통하여 산정한다[4].

$$L_d = \frac{\Psi_a - \Psi_o \cos \alpha}{i_d}, \quad L_q = \frac{\Psi_o \sin \alpha}{i_q} \quad (7)$$

2.2.1 해석 모델

해석모델의 조건은 표 1에 나타나있다. model1은 기준 모델이고, model2, model3은 IPMSM의 형상을 그림 4와 같이 유지하고 model1에 비해 전기자 권선의 턴수와 단자전압을 각각 1/1.5, 1/2 감소시켜 특성 해석을 실시하였다. 파라미터들의 변화를 확인하고 예상했던 대로 동일출력이 나오는지 확인해보았다.

2.2.2 해석결과

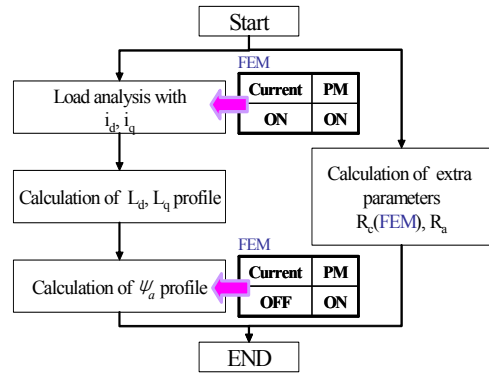
특성 해석을 실시한 후 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 파라미터들이 전압방정식을 통해 예상한 결과대로 전기자 권선의 턴수에 변화에 의해 일정하게 변화함을 확인 할 수 있었다. 표 2는 변하는 파라미터의 일반식을 정리한 것이다. 3개 모델 전부 각각의 파라미터는 톨리지만 토크와 출력은 동일함을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

전동기에서 최대 출력 확보를 위한 방법은 여러 가지의 방법이 있다. 그 중에서 본 논문에서는 점적율을 동일하게 유지하고 전기자 권선의 턴수와 단자전압을 비례적으로 감소시키도 동일 출력을 확보할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 입력 전류가 증가한다는 단점은 있지만 점적율을 동일하게 가져가면서 권선의 직경을 늘려 전기자 권선의 턴수를 줄일 수 있는 장점이 있다고 볼 수 있다. IPMSM을 설계시 입력되는 전류에 여유가 많다면 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 전기자 권선의 턴수를 줄여 출력을 확보하는 것이 가능하다고 판단된다.

[참 고 문 헌]

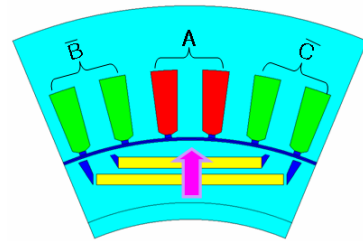
- [1] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda "Machine Parameters and Performance Of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Different Permanent Magnet Volume", Electrical Engineering in Japan, Vol.131, No.4, 2000
- [2] T. Sebastian, G. R. Slemon, and M. A. Rahman, "Modeling Of Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Trans. Magn. Vol.22, No.5, pp.1069-1071, Sep. 1986
- [3] J. Y. Lee, S. H. Lee, G. H. Lee, and J. P. Hong, "Determination of parameters considering magnetic nonlinearity in an interior permanent magnet Synchronous Motor", IEEE Trans. Magn. Vol.42, No.4, pp.1303-1306, Apr. 2006
- [4] 정계우, 이정중, 권순오, 홍정표, 김기남, "전기자 반작용을 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 등가회로 해석", 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, 2008. 07



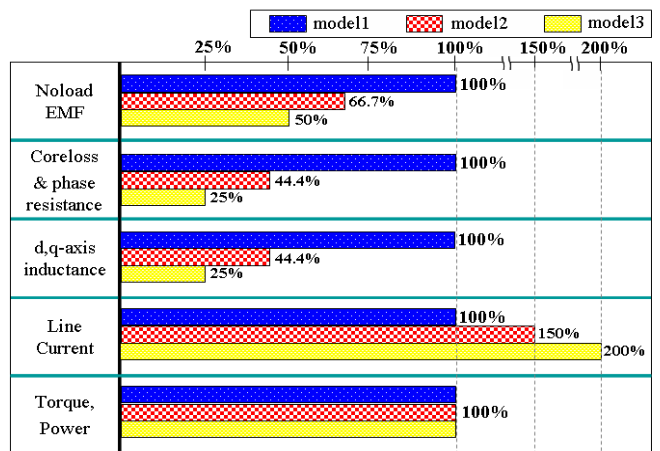
<그림 3> 특성해석 과정

<표 1> 해석모델의 조건

	권선 턴수	단자전압 (V_{dc})	비고
model1	N_o	V_o	-
model2	$N_o/1.5$	$V_o/1.5$	비례적 감소
model3	$N_o/2$	$V_o/2$	비례적 감소



<그림 4> 해석 모델



<그림 5> 해석 결과

<표 2> IPMSM의 파라미터 변화

항목	변경 전	변경 후	비고
Amature winding turn number	N_o	N_o/n	n : 턴수 비율
Input voltage	V_o	V_o/n	-
Line current	I_o	$I_o \cdot n$	동일 기자력, 입력
Back EMF	E_o	E_o/n	턴수에 비례
Phase resistance	R_{a_o}	R_{a_o}/n^2	턴수 제곱에 비례
d, q-axis inductance	L_o	L_o/n^2	