

전자 반작용을 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 등가회로 해석

정재우\*, 이정종\*, 권순오\*, 홍정표\*, 김기남\*\*

한양대학교 기계공학부\*, 현대·기아 자동차 하이브리드 설계팀\*\*

Equivalent Circuit Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Armature Reaction

Jae-Woo Jung\*, Jung-Jong Lee\*, Soon-O Kwon\*, Jung-Pyo Hong\*, and Ki-Nam Kim\*\*

School of Mechanical Engineering, Hanyang University\*

HEV System Engineering Team, Hyundai-Kia motors\*\*

**Abstract** - Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) which has high power density is usually applied to traction motor for hybrid electric vehicle. In order to analyze characteristics of IPMSM, d- and q-axis equivalent circuit analysis is generally used. However, the line current of IPMSM calculated by d- and q-axis equivalent circuit analysis differ from measured value. This error is mainly appeared under the flux weakening control. In order to reduce the error between calculated and measured line current, no-load linkage flux which is calculated with considering saturation of magnetic core and armature reaction is applied to characteristic analysis. The result of line current calculated by the method dealt with in this paper is verified by comparison with experimental results.

1. 서 론

하이브리드 자동차에 대한 연구에 있어 제한된 공간 내에 구동모터, 인버터, 배터리등 부가적인 장치들이 추가되어야 하므로 부품들의 소형화가 요구된다. 이 때 마그네틱 토크뿐만 아니라 릴럭턴스 토크를 동시에 사용할 수 있어 출력밀도가 높은 매입형 영구자석 동기전동기가 하이브리드 자동차의 구동모터로써 많은 연구가 되고 있다.

영구자석 동기 전동기의 파라미터 변화에 따른 특성변화를 분석하기 위해서 d, q축 등가회로 해석이 주로 사용되는데, 이러한 등가회로 해석의 오차를 보완하고자 여러 연구들이 진행되어 왔다. 예를 들어 d, q축 등가회로의 구성에 있어 철손저항을 고려하는 방법, 전류와 전류 위상각에 따른 d, q축 인덕턴스 프로파일을 고려하는 방법 등이 연구되어 왔다 [1]-[4]. 하지만 이러한 방법들은 등가회로 해석에 있어 쇄교자속량은 전기자 전류 및 전류 위상각에 관계없이 일정하게 입력된다. 이 경우 약 계자 제어 구간에는 등가회로 해석으로부터 산정된 전류와 실험결과에 큰 오차를 보인다. 본 논문에서는 이러한 오차를 보완하기 위해서 등가회로 해석 수행 시 입력되는 파라미터 중의 하나인 쇄교자속량을 자기적 포화현상과 전기자 반작용을 고려하여 d-q축 등가회로 해석에 적용하는 것에 대해 다루었다. 등가회로 해석을 통하여 산정된 입력전류와 실험결과를 비교하여 본 논문에서 제시하는 해석방법에 대한 신뢰성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 등가회로 해석이론

매입형 영구자석 동기전동기의 등가회로는 철손저항이 포함된 d, q축 동기좌표계로 구성된 등가회로는 그림 1과 같이 표현된다[4]. 철손저항  $R_c$ 가 포함된 d, q축 등가회로의 수학적 모델은 식 (1)-(3)과 같다[3]. 여기서  $i_d, i_q$ 는 d, q축 전류를 의미하며,  $i_{cd}, i_{cq}$ 는 d, q축 철손전류이다.  $v_d, v_q$ 는 d, q축 단자전압이고,  $R_d, R_q$ 는 전기자 권선의 상저항이다.  $\psi_a$  극당 쇄교자속량을 의미하고  $L_d, L_q$ 는 각각 d, q축 인덕턴스를 가리킨다. 마지막으로  $P_n$ 은 극 쌍수를 의미한다.

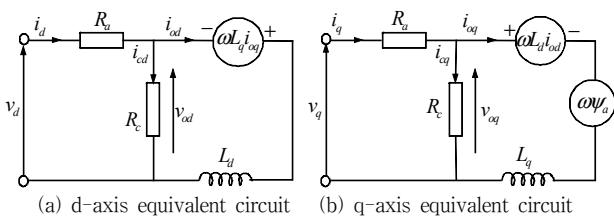


그림 1 > Equivalent circuits of IPMSM

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_a}{R_c} \\ \frac{R_a}{R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

$$T = P_n \{ \psi_a i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \} \quad (3)$$

2.2 전자 반작용

IPMSM의 벡터도는 일반적으로 d, q축 동기좌표계로 표현된다. 기존 등가회로 해석의 경우 극당 쇄교자속량  $\psi_a$ 는 부하 전류에 상관없이 일정한 값을 입력하는데 이것은 실제 현상과 차이가 있다. 이러한 기존의 해석 방법을 보완하기 위하여 부하에 따른 전자 반작용과 자기적 비선형 특성을 등가회로 해석에 반영하였다.

그림 2는 부하 입력 시( $i_d=0$ ) 전자 반작용에 따른 극당 자속량이 변화함을 간략하게 보여준다. 무 부하 상태에서의 극당 자속은 a와 같다. 하지만 부하 시 전기자 기자력 b에 의하여 영구자석의 자속 일부는 감소되어 자속량이 줄어들지만 일부는 증가되어 c와 같이 자속량이 증가한다. 자기적 포화현상이 없다면 증가된 자속량과 감소한 자속량은 동일하므로 전체 자속량은 무부하 시와 같다. 하지만 전류 위상각에 따라 각각 상이한 자기 포화현상에 의하여 줄어든 자속량 보다 증가하는 자속량이 상대적으로 작거나 또는 반대의 경우가 생긴다. 그러므로 그림 3에서 보는바와 같이 무 부하 시 쇄교자속은 부하의 증가에 따라 변화하게 되며 전류 위상각이 증가할수록 무 부하 쇄교자속은 증가하게 된다.

2.3 해석모델

해석모델은 HEV 구동용 모터로 설계된 IPMSM이며 대략적인 사양은 표 1과 같다. 최대전류 약 140Arms에서 최대토크 105Nm를 발생시키며 최대 속도 6000rpm까지 운전된다.

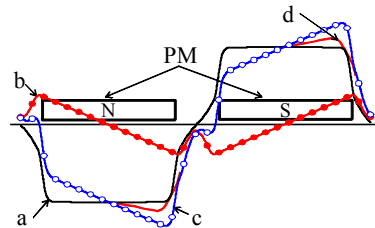


그림 2 > 전자 반작용에 의한 극당 자속량의 변화

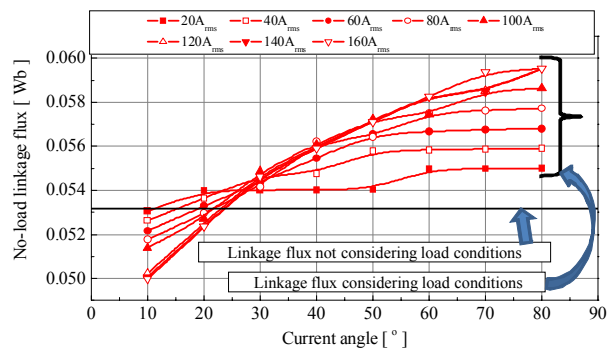
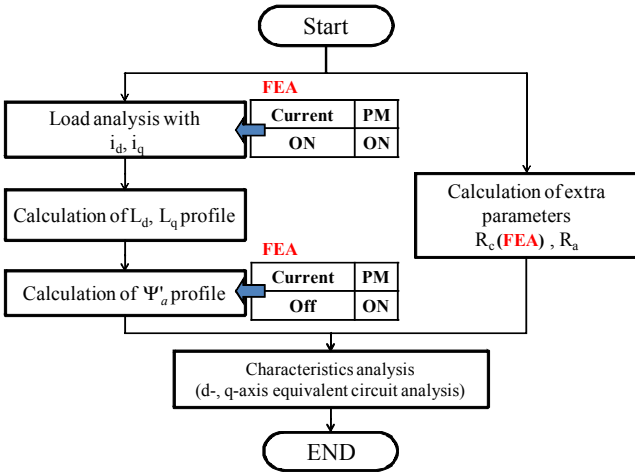


그림 3 > 전류 및 전류 위상각에 따른 쇄교자속 profile

〈표 1〉 해석모델의 사양

	Value	Unit	비고
단자전압	139.7	V <sub>rms</sub>	-
전류제한	200	A <sub>rms</sub>	-
최대토크	105	Nm	60초 정격
기저속도/최대속도	1400 / 6000	rpm	-



〈그림 4〉 특성해석과정

2.4 해석과정

본 논문에서 제시하는 IPMSM의 특성해석을 수행하는 과정은 기존의 방법과 크게 다르지는 않지만 무부하 쇄교자속 산정에 있어서 전류 크기에 따른 비선형성을 고려하여 특성해석을 반영하고자 한다. 전체적인 특성해석과정은 그림 4와 같다. 자기적 비선형성을 등가회로 해석에 고려해 주기 위하여 기존의 방법에서 사용하던 전류 및 전류 위상각 별 인덕턴스 프로파일을 산정한다. 이 때 인덕턴스는 무부하 시와 부하 시 쇄교자속의 크기와 위상의 관계로부터 유도된 식 (4)를 통하여 산정한다 [3].

$$L_d = \frac{\Psi_a - \Psi_o \cos \alpha}{i_d}, \quad L_q = \frac{\Psi_o \sin \alpha}{i_q} \quad (4)$$

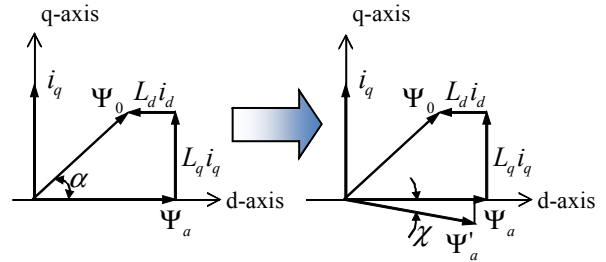
부하 상태를 고려한 무부하 쇄교자속의 경우 인덕턴스 산정 때 입력되는 전류 및 전류 위상각에서 부하해석을 수행한 후 각 요소의 투자율을 갱신한다. 갱신된 요소의 투자율을 고정시킨 상태에서 무부하 해석 수행함으로써 부하 시의 투자율이 고려된 무부하 쇄교자속량 프로파일을 산정할 수 있으며 그림 3과 같다. 이 때 산정되는 무부하 쇄교자속은 그림 5에서 나타낸 바와 같이 기존의 부하상태를 고려하지 않은 무부하 쇄교자속과 크기와 위상에서 약간의 차이가 발생한다. 그러므로 기존의 토크수식 식 (3)은 식 (5)와 같이 수정되어야 하며 특성해석에는 이를 고려하였다.

$$T = P_n \{ \psi'_a i_{oq} \cos \chi + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \} \quad (5)$$

2.5 해석결과의 검증

본 논문에서 제시한 방법을 통하여 계산된 토크변화에 따른 전류 값을 기존의 방법으로 산정한 전류 값과 실험을 통하여 측정된 전류 값을 비교하여 제안된 방법으로 해석된 결과의 신뢰성을 검증하였다. 그림 6은 실험 시 구성된 장비들을 나타낸다.

그림 7은 1000, 3000, 6000rpm에서 부하 크기에 따라 해석치와 실험치 전류를 비교해놓은 그래프이다. Ana\_L로 표시된 본 논문에서 제안한 방법으로 해석한 결과가 Ana로 표시된 기존의 방법보다 실험결과에 더 근접해 있음을 확인 할 수 있다. 속도별로 보면, maximum torque per ampere 제어를 하는 1000rpm에서는 기존의 방법과 본 논문에서 제시한 방법으로 산정된 전류 값이 비슷한 양상을 가진다 하지만 약계자 제어를 하는 6000rpm에서 두 해석 방법으로 산정된 전류 값은 큰 차이를 보이며, 논문에서 제시하는 방법으로 산정된 해석 값이 실험결과에 더 근접해 있음을 볼 수 있다. 이러한 해석결과가 나타나는 이유는, 전류 위상각 증가에 따라 부하상태를 고려한 무부하 쇄교자속이 증가하기 때문에 전압만족을 위한 d축 전류가 더 인가되기 때문이고 결과적으로 해석치와 실험치의 오차를 줄일 수 있었다.



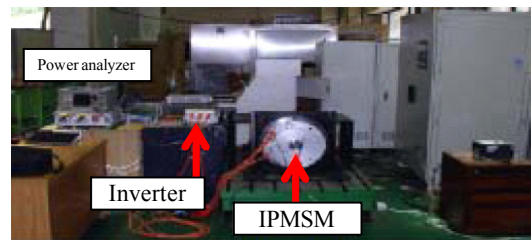
〈그림 5〉 부하를 고려한 극 당 쇄교자속의 벡터도

3. 결론

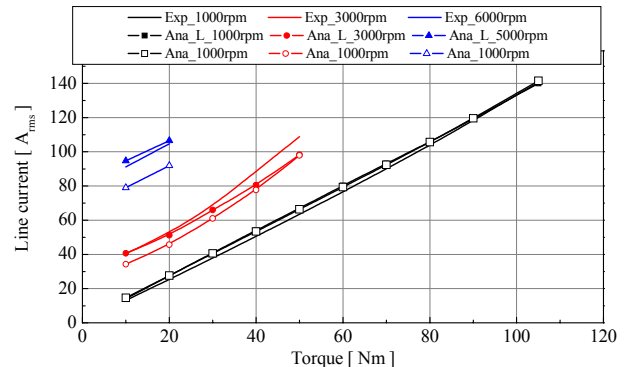
자기적 비 선형성이 강한 IPMSM은 특성해석 시 여러 가지 해석적 기법이 요구된다. 특히 약계자 영역에서는 무부하 시 쇄교자속과 부하를 고려한 무부하 쇄교자속의 값과 위상이 큰 차이를 보인다. 본 논문에서는 기존의 등가회로에서 고려하지 못한 부하를 고려한 쇄교자속을 전류 및 전류 위상별로 산정하고 쇄교자속 profile을 등가회로 해석에 반영하였다. 그 결과 약계자 구간인 6000rpm에서의 전류 값의 오차가 기존의 약 12.7%에서 약 2.7%로 감소하였음을 확인하였다. 제시된 방법은 부하에 따른 IPMSM의 신뢰성 있는 전류 예측에 도움이 될 것으로 판단된다.

[참고 문헌]

[1] F. B. Fidel, G. C. Aurelio, and F. Roberto, "Determination of parameters in interior permanent-magnet synchronous motors with iron losses without torque measurement," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 5, pp.1265-1272, Sep./Oct. 2001.  
 [2] K. Yamazaki, "Torque and efficiency calculation of an interior permanent magnet motor considering harmonic iron losses of both the stator and rotor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 3, pp. 1460-1463, May 2003.  
 [3] J. Y. Lee, S. H. Lee, G. H. Lee, J. P. Hong, and J. Hur, "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] 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.



〈그림 6〉 실험장치 구성



〈그림 7〉 부하에 따른 실험치와 해석치의 전류비교