

운전 특성을 고려한 고속 전철용 영구자석 동기전동기의 철손 해석

Harmonic Iron Analysis of Traction Motor in the High Speed Train with the Distributed Tractions

서장호* 임재원* 이상엽* 정현교***

Seo, Jang-Ho Lim, Jaewon Lee, Sang-Yub Jung, Hyun-Kyo

ABSTRACT

To predict efficiency of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors(IPMSM) and to cope with the demagnetization risk of permanent magnets used in the IPMSM, accurate iron analysis of the IPMSM is very important at the motor design stage. In the analysis, we calculate the operation condition such as rotor speed and current angle. and then, we analyzed the iron loss of the machine for electric vehicle according to its driving condition. From the analysis results, it was shown that the harmonic iron losses of stator are larger than before at field-weakening region. In addition, it was revealed that rotor iron loss mainly induced by stator slot-ripples is independent of current angle and only varied according to the speed.

1. 서 론

최근 높은 효율과 광범위한 속도 영역 얻기 위해 회전자의 인덕턴스 분포 차이를 이용한 매입형 영구자석 전동기의 응용분야가 확대 되고 있다. 하지만, 매입형 영구자석 전동기는 운전 특성상 고속에서 높은 주파수 특성으로 인하여 철손이 많이 발생하여 회전자에 매입된 자석의 감자 위험이 높으며 효율저감의 위험성도 가진다. 또한 고속에서 구동할 때에 발생하는 철손량이 열원에서 차지하는 비중은 저속 구동상황보다 상대적으로 크다.

지금까지, 철손계산을 위한 기존의 접근 방법은 일정속도에서 동작하는 전동기의 철손을 계산하였다. 이러한 방식은 일정속도 영역에서 동작하는 일반 상용 전동기에서는 비교적 정확한 철손해석을 보장하지만 속도영역에 따라 동작 주파수와 자계 분포 상황이 급격히 변하는 견인전동기의 철손해석에는 적용할 수 없다.

따라서, 본 논문에서는 전동기의 구동상황을 고려한 정확한 철손 계산을 위해 전동기의 약제자 제어(field-weakening control)와 같은 동작 상황에서의 운전점을 계산하고 2차원유한요소법(FEM 2D)를 이용하여 자속밀도파형을 추출하였다. 푸리에 변환(FFT)을 이용하여 전동기의 속도에 따른 철손특성을 면밀히 검토하였다.

* 서울대학교, 전기역학 연구실, 박사과정, 정희원
E-mail : jangho78@elecmech.snu.ac.kr, eínses@elecmech.snu.ac.kr
TEL : (02)880-7262 FAX : (02)878-1452

*** 서울대학교, 전기역학 연구실, 교수

2. 본 문

2.1 매입형 영구자석 전동기

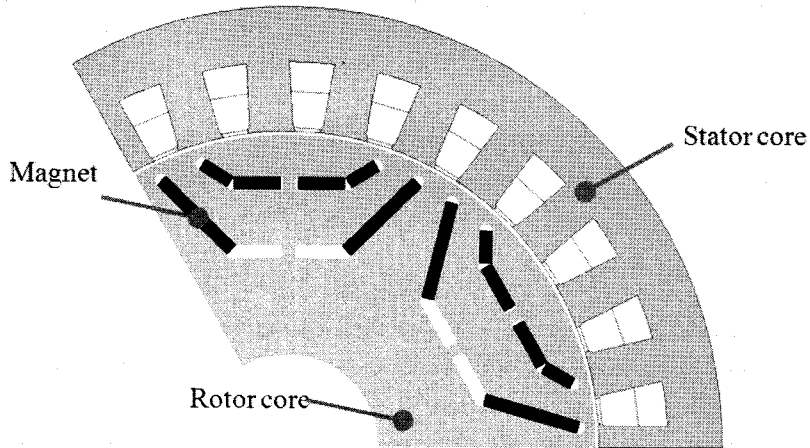


그림 1. 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 단면도

매입형 영구자석 전동기의 형상을 그림 1에 나타내었다. 자석의 배치는 N, S극이 번갈아가며 놓여있다. 회전자의 영구자석에 의한 자화방향은 반경방향의 중심축에 평행한 방향으로 자화되어 있다. 자석에 의한 자속의 방향을 고려하여 반경방향의 자석의 중심축을 d축으로, d축으로부터 전기각(Electrical Angle)으로 90도 만큼 떨어져 있는 자석 사이의 중심을 q축으로 정의한다. d축의 자로는 철심, 자석, 공극, 그리고 철심으로 이루어져 있으며, q축은 공극과 철심만으로 이루어져 있다. 일반적으로 페라이트나 희토류 계통의 영구자석의 투자율은 공극과 거의 같으므로 영구자석에 의한 공간을 공극으로 취급하여도 무방하다.

IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 있어 회전자 표면의 기계적인 구조는 대칭이지만 자기적으로는 q축과 달리 d축의 공극이 d축 자로에 존재하는 효과가 있다. 그러므로, 자석을 통과하지 않는 q축 자로에 비해 d축 자로의 자기저항이 크므로 q축의 인덕턴스가 d축보다 크다. 따라서 IPMSM은 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 회전자에 돌극성이 생기기 때문에 여러 독특한 특성을 갖는다.

IPMSM은 영구자석이 회전자에 매입되어 있어 d-q축 자기 저항차이에 의한 릴럭턴스 토크성분을 부가적으로 가지므로 단위체적당 큰 토크를 얻을 수 있는 장점을 지닌다.

또한 유효공극이 작아 고정자의 인덕턴스가 크기 때문에 전기자 반작용 효과가 현저하여 고정자 전류에 의하여 공극자속을 감소시킬 수 있으므로 일정 출력 영역에서 약계자 운전이 가능하여 매우 높은 속도까지의 운전이 가능하다.

아울러, 영구자석이 매입된 구조로 회전자의 기계적 견고함이 우수하여 견인전동기로서의 그 응용범위가 확대되고 있다.

2.2 매입형 영구자석 전동기의 수학적 모델링

3상 교류 전동기의 a, b, c상(Phase)의 변수들은 좌표변환(Transformation)을 통하여 d, q 의 두 개(Direct, Quadrature)의 직교 좌표계(Orthogonal)상의 변수로 변환될 수 있다. 통상 d축은 여자 자속(Excitation Flux)이 존재하는 축이며 q축은 그와 직각을 이루는 축이며 회전자속이 정방향(Positive Direction)으로 회전할 때 d축에 비해 회전 할 방향에 앞서서 위치한다.

이 변환행렬을 이용하여 전기각속도 ω 로 회전하는 d, q축 좌표계로 변환시킨 IPMSM의 전압방정식은

다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \lambda_m = \sqrt{\frac{3}{2}} \lambda_f$$

λ_f : 한 상당 영구자석에 의한 쇄교자속

v_d, v_q : 전기자 전압의 d축, q축 성분

i_d, i_q : 전기자 전류의 d축, q축 성분

L_d, L_q : d, q축 인덕턴스

\ominus : d축과 a상과의 사이각

p : 미분 연산자

R_a : 상 저항

매입형 영구자석 전동기의 토크식을 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P}{2} \{ \lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \\ &= \frac{P}{2} \{ \lambda_d i_q - \lambda_q i_d \} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, P : 극수

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (3)$$

$$i_d = -I_a \sin \beta, \quad i_q = I_a \cos \beta \quad (4)$$

$$I_a = \sqrt{\frac{3}{2}} I_s, \quad (I_s : \text{상전류 최대값}) \quad (5)$$

위 (2)식에서 첫째 항은 회전자 d 축에 일치된 영구자석과 q축에 일치된 고정자 전류의 상호작용에 의하여 발생한 마그넷 토크로서 자속과 q축 전류의 크기에 비례한다. 둘째 항은 d-q축 들극성에 의한 자기저항토크로서 전류의 제곱에 비례한다.

d축 인덕턴스가 q축 인덕턴스에 비해 작기 때문에, 음의 d축 전류를 흐르게 함으로써 마그넷 토크에 릴럭턴스 토크를 추가하여 토크를 발생시킨다. 이때, d축 전류에 의해 발생한 d축 전기자 반작용 자속이 영구자석의 불가역 감자를 일으킬 수 있으므로 설계단계 시 주의해야 한다.

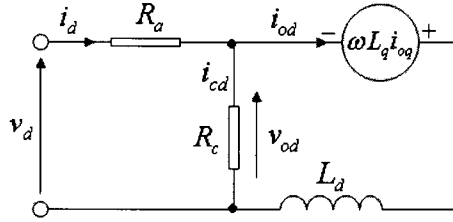
일반적으로 IPMSM은 자기포화 특성지점에서 동작하게 되므로 다른 전동기 타입에 비해 고조파 성분에 의한 철손이 많이 발생한다. 철손을 등가 철손저항 R_c 로 근사적으로 표현하고 이를 고려한 등가회로를 그림 2에 제시하였다. 이때 계산한 철손을 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$W_{iron\ loss} = \frac{\omega^2 \{ (L_d i_{od} + \lambda_m)^2 + (L_q i_{iq})^2 \}}{R_c} \quad (6)$$

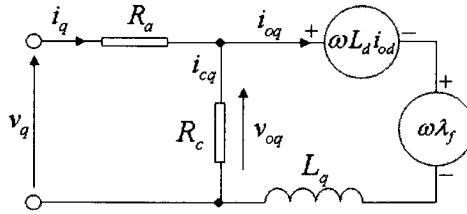
이때 병렬로 연결한 철손저항을 고려하여 고정자의 전류를 표현하면 다음과 같다.

$$i_{od} = i_d - i_{cd}, \quad i_{oq} = i_q - i_{cq}$$

$$i_{cd} = -\frac{\omega L_d i_{od}}{R_c}, \quad i_{cq} = -\frac{\omega(\lambda_m + L_d i_{od})}{R_c} \quad (7)$$



(a) d축 등가회로



(b) q축 등가회로

그림 2. 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 등가회로도

2.3 매입형 영구자석 전동기의 가변속 운전특성

IPMSM은 돌극비(saliency ratio, L_q/L_d)에 비례하여 약계자 제어를 통한 광범위한 가변속 운전 특성을 지닌다. 이러한 전동기의 운전영역에 따른 제어방법은 전류 크기와 전류 위상각을 제어하는 방법을 많이 사용한다.

IPMSM의 운전영역은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 정토크 영역(Constant Torque)과 정출력(Constant Power)영역으로 나눌 수 있다. 일반적으로 정토크 영역에서는 최대토크제어를 통해 높은 기동토크를 얻고 정출력 영역에서는 전류 위상각 제어를 통해서 운전 속도 범위를 확장할 수 있다.

2.3.1 정토크 운전 영역: 단위 전류당 최대토크 제어(MPTA control)

회전자의 영구자석에 의한 토크와 자기저항 토크와의 합이 최대가 되게 하는 제어방법을 단위 전류당 최대토크제어(Maximum Torque Per Ampere Control)라 한다. 같은 토크를 발생시키는 여러 가지 전류 조합 중에서 최소가 되는 전류 궤적을 따라 운전하는 것을 말한다. Fig. 4에서와 같이 하나의 토크 값이 결정되면 그 토크 값을 발생시키기 위한 고정자 전류벡터의 수는 무한히 많이 존재한다.

단위 전류당 최대토크 제어가 사용되는 저속영역 구간에서는 전압 여유분이 충분하여 전류 제한만이 제약조건이 된다.

2.3.2 정출력 운전 영역: 약계자 제어(Field weakening control)

일정 출력 운전 영역은 전동기의 속도가 증가함에 따라 전동기의 인덕턴스와 영구자석에 의한 역기전력이 인버터가 공급할 수 있는 최대 전압이상으로 증가하는 영역이다. 이 영역에서는 식 (8)와 같이 전압과 전류가 동시에 제한되어 높은 속도와 큰 토크를 얻기 위하여 음의 방향으로 d축 전류를 흘리는데 이때 사용되는 제어 방식이 약계자 제어이다. 이론적으로 약계자 제어시 운전점은 Fig. 5와 같이 전류 제한원과 전압 제한 타원의 교차점을 따라 이동한다.

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_{s \max}^2, \quad v_d^2 + v_q^2 \leq V_{s \max}^2 \quad (8)$$

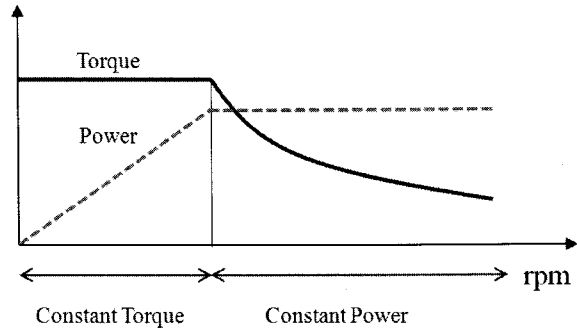


그림 3. 약계자 영역 및 IPMSM의 토크 능력 곡선

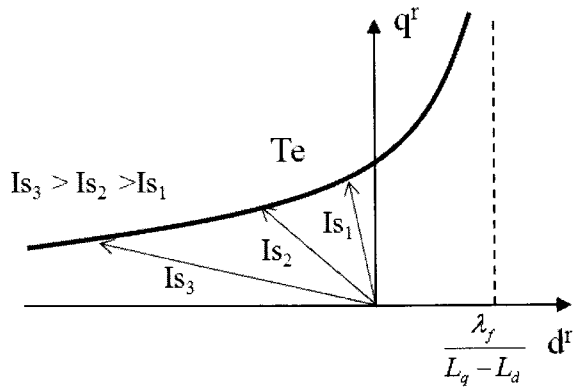


그림 4. 단위 전류당 최대 토크 제어

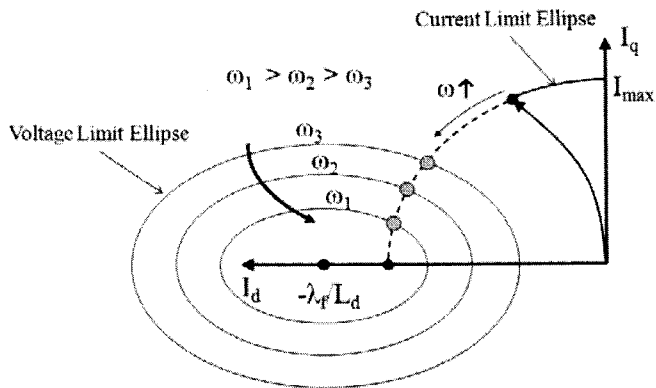


그림 5. 약계자 영역 및 전압제한 타원

2.4 운전특성을 고려한 고조파 철손 해석

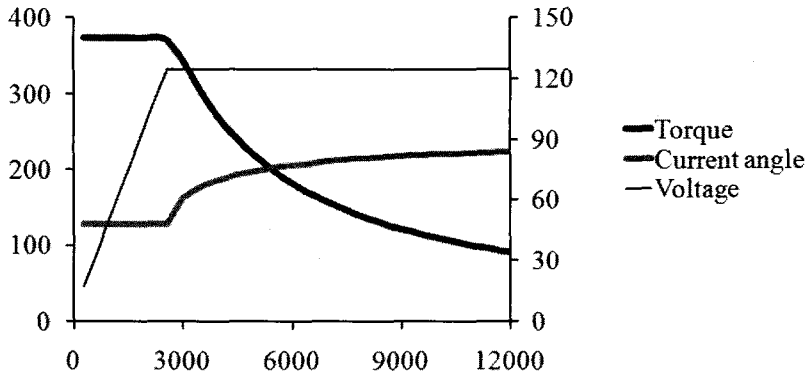


그림 6. 해석 모델의 속도에 따른 전류 위상각, 전압, 토크 특성

속도에 따른 동작 특성을 고려한 고조파 철손해석 수행을 위해 100[kw]출력을 가지는 전동기를 설계 하였고, 그 형상을 그림 1에 제시하였다. 해석 모델의 능력 곡선 및 전류 위상각, 전압 특성을 그림 6에 나타내었다. 고조파 철손해석을 위해 2차원 유한요소법을 적용하여 고정자 및 회전자 강판에서의 시간에 따른 자속밀도 파형을 추출하였다.

단일 주파수의 교번 자계에서의 단위 무게당 철손은 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$w_i = w_{ie} + w_{ih} = K_e f^2 B_{\max}^2 + K_h f B_{\max}^2 \quad (9)$$

여기서, w_{ie} 와 w_{ih} 는 단위 무게당 와전류 및 히스테리시스 손실이고 K_e, K_h 는 Epstein 테스트에서 얻은 실험 철손 계수 값이다. f 는 전동기의 동작 주파수 이고, B_{\max} 는 자속밀도 파형의 최대 값이다.

전동기의 고조파 성분을 고려한 총 손실은 다음과 같은 수식을 이용하여 계산하였다.

$$W_i = \int_{iron} \sum_n K_e D \cdot (nf)^2 \cdot \{B_{r,n}^2 + B_{\theta,n}^2\} dv \quad (10)$$

$$W_h = \int_{iron} \sum_n K_h D \cdot (nf) \cdot \{B_{r,n}^2 + B_{\theta,n}^2\} dv \quad (11)$$

그림 7은 속도에 따른 전동기의 철손 특성을 나타낸다. 약계자 제어가 시작하는 기저 속도(base speed)에서 고정자 철손이 증가율이 저감함을 알 수 있다. 이에 반해, 회전자 철손은 제어 특성에 무관하게 속도에 따라 증가하였다. 그림 8은 고정자 철손을 기본파와 고조파 성분으로 나누어 계산한 결과를 보여 준다. 그림에서 알 수 있듯이, 고정자의 기본파 철손은 약계자 제어가 시작하기 전에 증가하다가 약계자 제어가 시작되면서 기본파 철손은 감소하는 반면, 고조파 철손이 크게 증가함을 알 수 있었다.

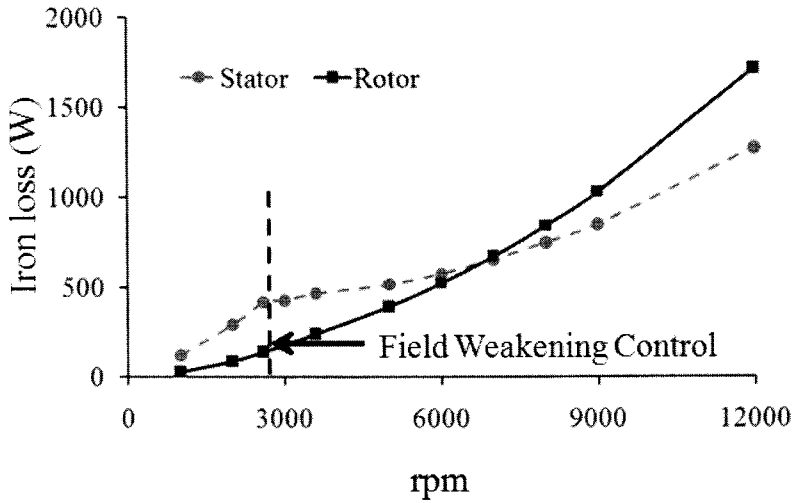


그림 7. 속도에 따른 고정자 및 회전자 철손

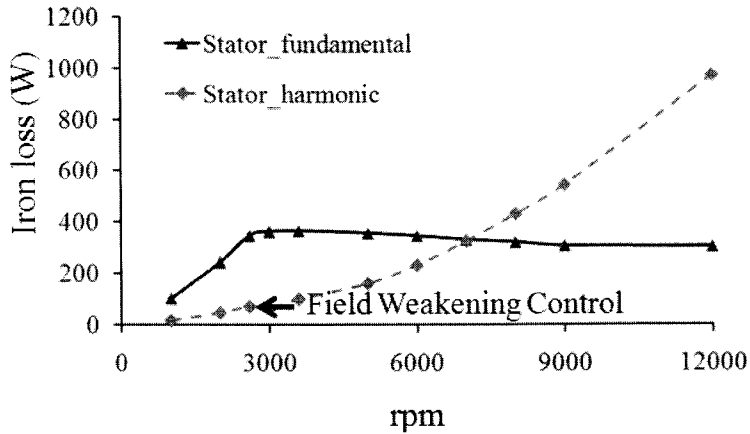


그림 8. 속도에 따른 고정자의 기본파 철손 및 고조파 철손

3. 결론

본 논문에서는 고속 전철 건인전동기의 정확한 발열량 계산을 위해 전동기의 약계자 제어 특성을 고려한 철손해석을 수행하였다. 속도에 따른 운전점(operating point)을 추출하였고 이를 유한요소법을 적용하여 자속밀도파형을 계산하였다. 이를 FFT에 적용하여 속도에 따른 철손 특성을 살펴보았다. 전압제한조건이 적용되는 기저속도에서 고정자 철손은 약계자 제어 특성을 영향을 받아 기본파 철손이 줄어드는 대신, 고조파 철손이 급격히 증가함을 알 수 있었다. 회전자 철손은 약계자 제어의 영향을 받지 않고 속도에 따라 증가하는 특성을 나타내었다. 또한 기저 속도 이하의 영역에서는 고정자의 기본파 철손이 우세한 반면, 약계자 제어가 동작하는 고속 구간에서는 회전자 철손 및 고정자 고조파 철손이 우세함을 알 수 있었다.

4. 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 1 K. Yamazaki, Y. Seto "Iron loss analysis of interior permanent-magnet synchronous motors-variation of main loss factors due to driving condition," *IEEE Trans. ind. Appl.*, Vol. 42, No. 4, pp. 1045-1052, 2006.