동력분산형 고속 전철용 견인전동기의 고조파 철손 해석

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

서장호* 임재원* 전원** 정호창** 김민석** 정현교***

Seo, Jang-Ho Lim, Jaewon Jeon, Won Jung, Ho-chang Kim, Min-Suk 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 developed a new iron loss model of electrical machines for high-speed operation. The calculated iron loss was compared with the experimental data. It was clarified that the proposed method can estimate iron loss effectively at high-speed operation.

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 발생되는 철손양이 열원에서 차지하는 비중은 저속 구동상황보다 상대적으로 크다. 특히 회전자에서 발생하는 철손은 영구자석의 열감자문제와 직결되므로 정확히 계산되어야 한다.

지금까지, 철손계산을 위한 기존의 방식은 고정 철손계수를 사용하였다. 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 자속밀도와 주파수에 따라 변하는 변화철손계수 개념을 도입하였고 고조파 철손해석을 위한 새로운 방식을 제시한다. 전동기의 운전특성을 고려하기 위해 속도에 따른 운전점을 추출하여 2차원 자계해석에 적용하여 자속밀도 파형을 추출하였다. 추출된 요소(element)자속밀도 파형을 이용하여 제어 특성에 따른 전동기의 철손 특성을 분석하였다.

* 서울대학교, 전기역학 연구실, 박사과정, 정회원
E-mail :jangho78@elecmech.snu.ac.kr, einses@elecmech.snu.ac.kr
TEL : (02)880-7262 FAX : (02)878-1452
** 동아대학교, 석사과정
*** 서울대학교, 전기역학 연구실, 교수

2. 본 문

2.1 매입형 영구자석 전동기

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 견인전동기로써의 그 응용범위가 확대되고 있다.

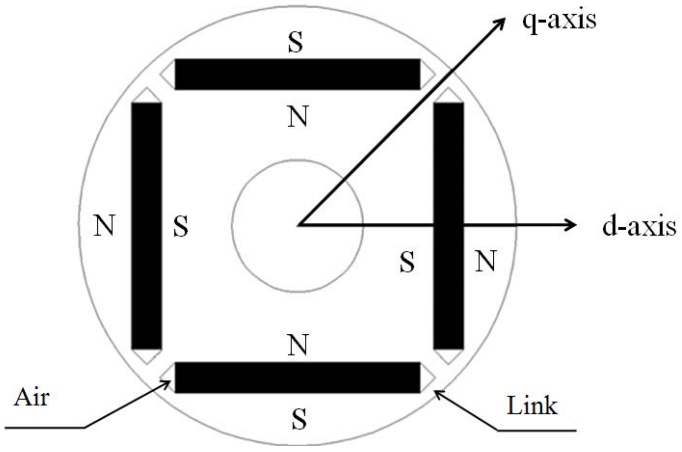


그림 1. 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 단면도

2.2 매입형 영구자석 전동기의 수학적 모델링

3상 교류 전동기의 a, b, c상(Phase)의 변수들은 좌표변환(Transformation)을 통하여 d, q의 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 ω로 회전하는 d, q축 좌표계로 변환시킨 IPMSM의 전압방정식은 다음과 같다.

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

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

Θ : d축과 a상과의 사이각

p : 미분 연산자

R_a : 상 저항

매입형 영구자석 전동기의 토크식을 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

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

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 돌극성에 의한 자기저항토크로서 전류의 제곱에 비례한다.

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

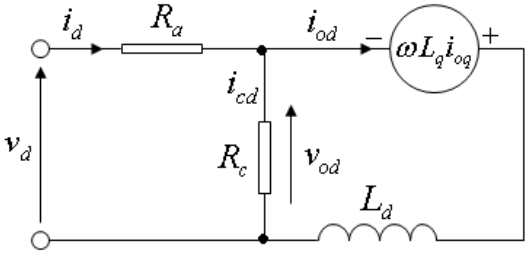
일반적으로 IPMSM은 자기포화 특성지점에서 동작하게 되므로 다른 전동기 타입에 비해 고조파 성분에 의한 철손이 많이 발생한다. 철손을 등가 철손저항 R_c로 근사적으로 표현하고 이를 고려한 등가회로를 그림 2에 제시하였다. 이때 계산한 철손을 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

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

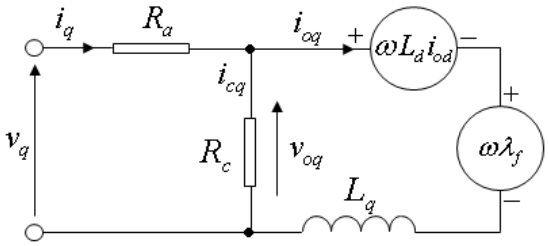
이때 병렬로 연결한 철손저항을 고려하여 고정자의 전류를 표현하면 다음과 같다.

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

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



(a) d축 등가회로



(b) q축 등가회로

그림 2. 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)의 등가회로도

2.3 고조파 철손 해석 기법 개발

매입형 영구자석 전동기는 고속에서 높은 주파수 특성으로 인하여 철손이 많이 발생하여 회전자에 매입된 자석의 감자 위험이 높으며 효율저감의 위험성도 가진다. 또한 고속에서 구동할 때에 고정자 및 회전자 강판에서 발생되는 철손양이 열원에서 차지하는 비중은 저속 구동상황보다 상대적으로 크다. 특히 회전자에서 발생하는 철손은 영구자석의 열감자문제와 직결되므로 정확히 계산되어야 한다.

고조파 철손을 위한 기존의 방식을 살펴보면, 요소의 자속밀도 파형을 주파수 분석하여 각 요소별 철손의 합으로 계산하는 FFT법, 자속밀도 파형의 마이너, 메이저 최대값을 이용하여 와전류 손실과 히스테리시스 손실을 구분하고 주파수 변환 없이 빠른 시간내에 철손해석을 수행하는 K.Yamazaki철손 해석법이 대표적으로 사용되고 있다.

지금까지 철손계산을 위한 기존의 방식은 고정 철손계수를 사용하였다. 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 구동상황에 따라 자속밀도와 주파수에 따라 변하는 변화 철손계수 개념을 도입하였고 고조파 철손해석을 위한 새로운 방식을 제시한다.

1) FFT 철손 해석 기법 개발

자계해석에서 얻은 요소별 자속밀도 파형을 가지고 퓨리에 변환하여(FFT) 각 주파수별 자속 밀도 크기에 대응하는 철손커브를 가지고 해석에 이용하였다. FFT방식을 채택한 철손해석 기법의 순서도를 그림 3에 나타내었다 [1].

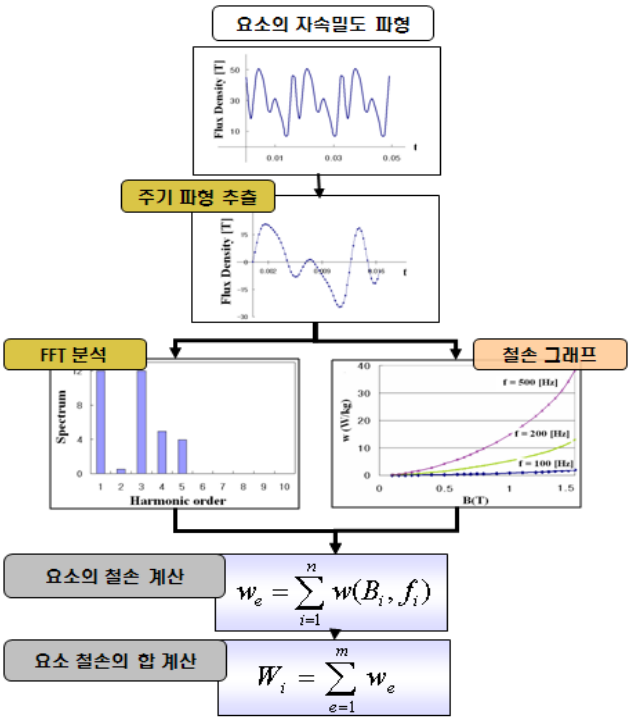


그림 3. FFT를 이용한 고조파 철손 해석 기법

2) K.Yamazaki 철손 해석 기법 개발

기존의 철손 해석 기법 중 잘 알려진 K.Yamzazaki 방식은 철손데이터로부터 철손계수를 추출하여 철손해석을 수행한다. 이 방식은 마이너루프에 의한 히스테리시스 손실도 고려할 수 있는 해석기법이라 최근에 널리 쓰인다. 푸리에 변환을 이용하지 않고 단지 자속밀도의 시간 변화에 대한 극대·극소치 값만 기억하는 것으로 그 계산이 가능하여 해석 시간이 빠르다[2].

K.Yamazaki방식에서 사용하는 수식은 (8)과 (9)에 나타내었다.

$$W_{ie} = \frac{k_e D}{2\pi^2} \int_{iron} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \left\{ \left(\frac{B_r^{k+1} - B_r^k}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{B_\theta^{k+1} - B_\theta^k}{\Delta t} \right)^2 \right\} dv \qquad (8)$$

$$W_{ih} = \frac{k_h D}{T} \sum_{i=1}^{NE} \frac{\Delta V_i}{2} \left(\sum_{i=1}^{N_{pr}^i} (B_{mr}^{ij})^2 + \sum_{i=1}^{N_{p\theta}^i} (B_{m\theta}^{ij})^2 \right) \qquad (9)$$

3) 새로운 철손 해석 기법 개발

기존의 K.Yamazaki방식은 철손계수가 모든 주파수 및 자속밀도에 대해서 일정하다는 가정하에서 철손해석을 수행하는 방식이다. 하지만 초고속 전철용 전동기를 고속 영역에서 제어할 경우, 자속밀도의 파형 및 주파수는 급격히 변하기 때문에 이러한 방식으로는 정확한 해석이 불가능하다. 또한 FFT 방식은 실제 실험에 의한 철손값보다 너무 큰 값을 계산하기 때문에 초고속 전철용 전동기의 철손해석에 적합하지 않다. 따라서 본 과제에서는 기존의 Yamazaki방식을 활용하면서 Yamazaki방식의 문제점인 철손계수를 주파수와 자속밀도 파형에 따라 변화시켜 보다 정확한 철손값을 추출하였다. 주파수 및 자속밀도에 따라 변하는 철손계수를 그림 4과 5에 나타내었다. K.Yamazaki 방식을 향상시킨 새로운 철손 수식은 (10)과 (11)에 나타내었다.

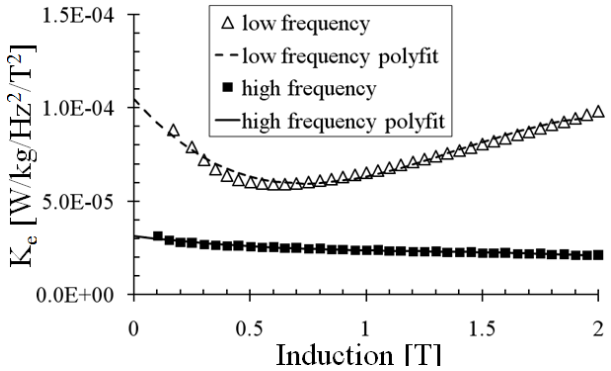


그림 4. 주파수 및 자속밀도에 따라 변하는 와전류 철손 계수

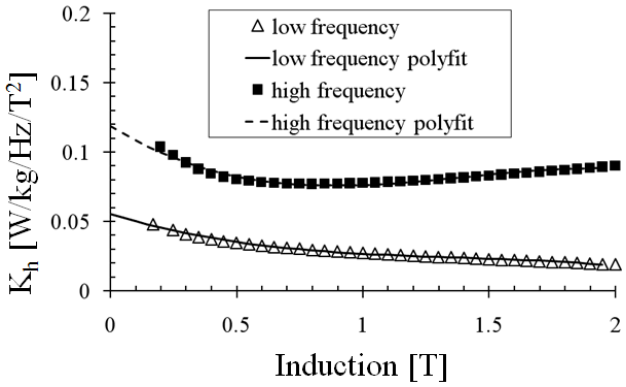


그림 5. 주파수 및 자속밀도에 따라 변하는 히스테리시스 철손 계수

$$W_{ie} = \frac{D}{2\pi^2} \int_{iron} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \left\{ K_{er}(f, B_r) \left(\frac{B_r^{k+1} - B_r^k}{\Delta t} \right)^2 + K_{e\theta}(f, B_\theta) \left(\frac{B_\theta^{k+1} - B_\theta^k}{\Delta t} \right)^2 \right\} dv \quad (10)$$

$$W_{ih} = \frac{D}{T} \sum_{i=1}^{NE} \frac{\Delta V_i}{2} \left(\sum_{j=1}^{N_{pr}{}^i} K_{hr}(f, B_{mr}^{ij}) \left(B_{mr}^{ij} \right)^2 + \sum_{j=1}^{N_{p\theta}{}^i} K_{h\theta}(f, B_{m\theta}^{ij}) \left(B_{m\theta}^{ij} \right)^2 \right) \quad (11)$$

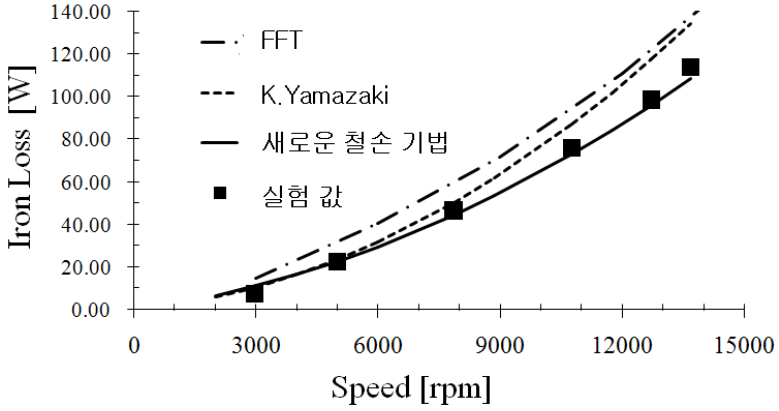


그림 6. 철손 해석 결과 비교

새롭게 제안한 철손 해석기법의 타당성을 검증하기 위해 실험 값 및 기존의 방식들(FFT, K.Yamazaki 방식)과 비교하였다. 그림 6은 무부하 제어(no-load control) 시 속도에 따른 철손해석 결과를 보여준다. FFT 방식은 저속 영역에서 고속 영역에 이르기까지 실험값에 비해 높은 값을 보여주었다. K.Yamzaki 방식은 저속 영역에서는 실험값과 유사하였지만 높은 속도 영역에서는 높은 오차를 보여주었다. 본 논문에서 제시한 철손 해석 기법은 저속 영역 및 고속 영역에 이르기까지 실험값과 잘 일치된 결과를 보여주었다. 따라서 새롭게 제안한 철손해석기법이 고속 구동용 견인전동기의 철손 해석 기법으로서 가장 우수함을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 자석밀도 파형의 고조파 성분 및 전동기의 약계자 제어 특성을 고려한 철손해석 기법을 제시하였다. 동력 분산형 고속 전철 견인전동기의 정확한 발열량 계산을 위해 자속밀도와 주파수에 따라 변하는 변화철손계수 개념을 도입하여 고조파 철손해석을 위한 새로운 방식을 제시하였다. 제안한 철손해석 기법의 검증을 위해 기존의 방식들과 실험값으로 본 논문에서 제시한 새로운 철손해석 기법의 타당성을 확인하였다.

4. 감사의 글

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

참고문헌

1. H. Nam, K. H. Ha, J. J. Lee, J. P. Hong, and G. H. Kang(2003), "A study on iron loss analysis method considering the harmonics of the flux density waveform using iron loss curves tested on Epstein samples" IEEE Trans. Magn., Vol.39, No.3, pp.1472-475.

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.