

# 차세대 고속철도용 견인전동기 손실특성 해석

## Loss characteristic analysis of propulsion motor applied for high speed train

이동수†                      김상훈\*                      이상곤\*                      정상용\*  
Dongsu Lee                      Shanghoon Kim                      Sanggon Lee                      Sang-Yong Jung

---

### ABSTRACT

The propulsion Motor system has changed from the DC motor system to the induction motor system. Although the induction motor system has almost reached the stage of maturity, this system also need changed to the IPMSM system for direct drive without reduction gear. Thus, the IPMSM(Interior buried Permanent magnet synchronous Motor) has been adopted to meet the driving specification. In this paper, loss characteristic analysis of IPMSM has been performed using adopted F.E.M.

---

### 1. 서 론

고속철도용 견인시스템은 반도체 소자의 발전에 따라 인버터 등 전력 변환기의 고성능, 저림화, 제어용 마이크로프로세서를 이용한 제어 기술이 실용화 되어 저항제어에 의한 직류전동기 방식에서 초퍼 및 인버터 제어에 의한 유도전동기 제어방식으로 획기적인 발전을 이루었다. 유도 전동기는 구조가 간단하고 강건하며, 인버터에 의한 구동 시스템에 관한 연구가 오래되었기 때문에 그 완성도가 높다. 한편, 고속 스위칭이 가능한 IGBT가 상용화되면서 개별제어가 가능하게 되고 철도차량용으로 영구자석 동기전동기의 적용이 가능하게 되었다. 영구자석 전동기는 계자 자속이 외부 전원에 존재 하지 않고 회전자의 영구 자속에 의해 공급되기 때문에 효율, 출력 밀도가 타 전동기에 비해 월등히 높다.

고속철도용 전동기는 전동차시스템의 운전특성을 고려하여, 구조적 강건성, 높은 출력 및 토크밀도, 넓은 운전 속도영역, 우수한 내환경성(내진, 내열, 내부식 등), 고효율 운전제어성 등의 다양한 성능사양을 만족해야 한다. 이와 같은 특징에 부합할 수 있는 고급형 전동기로는 고에너지 희토류계 영구자석을 사용하는 영구자석전동기로, 그중에서 특히 매입형 영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자에 매입되어 있어 구조적으로 안정성이 크며, 자기적 돌극성이 좋아 넓은 속도영역 운전을 위한 약계자 제어성과 출력/토크 밀도가 우수하여 고효율 운전이 가능하다.

한편 매입형 영구자석 동기전동기는 구성하고 있는 요소부품의 자기적 물성 및 구성형태에 따라 구조적 자기포화 특성이 두드러진다. 이러한 자기포화 특성으로 인해 전동기의 자속밀도파형은 다른 전동기에 비해 많은 고조파 성분을 함유하여 철손이 많이 발생할 수 있다. 따라서 매입형 영구자석 전동기는 정밀도가 높은 고급화된 비선형 수치해석(Nonlinear Numerical Analysis)을 이용하여 손실특성을 고려한 설계가 필요하다. 아울러 본 논문은 운전조건별로 비선형적인 자기포화에 따른 철손 및 동손등을 고려하여 차세대 고속철도에 장착되는 매입형 영구자석 견인전동기의 신뢰성 높은 손실특성 해석 및 설계 방법을 다루고자 한다.

---

† 동아대학교, 전기공학과, 비회원  
E-mail : syjung@dau.ac.kr  
TEL : (051)200-6945 FAX : (051)200-7743  
\* 동아대학교, 전기공학과, 회원

## 2. 매입형 영구자석 동기전동기

### 2.1 IPMSM의 구조 및 특징

매입형 영구자석 동기전동기에서 회전자의 영구자석 배치는 N, S극이 번갈아 가며 놓여있으며, 회전자의 영구자석에 의한 자화 방향은 반경 방향의 중심축에 평행한 방향이다. 자석의 자속 방향을 고려하여 반경 방향의 자석 중심축을 d축으로, d축으로부터 전기각으로 90°만큼 떨어져 있는 자석 사이의 중심을 q축으로 정의한다. 그림1에 매입형 영구자석 동기전동기의 형상을 나타낸다.

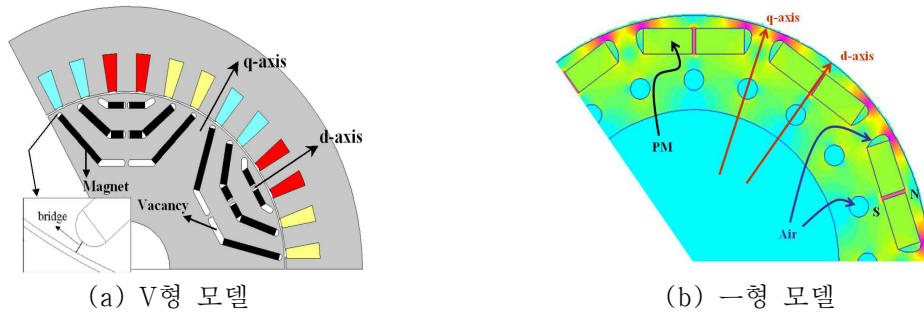


그림1. 매입형 영구자석 동기전동기의 d-q축 모델링

d축의 자로는 철심, 자석, 공극으로 이루어져 있으며, q축은 공극과 철심만으로 이루어져 있다. 일반적으로 페라이트나 희토류 계통 영구자석의 투자율은 공극과 거의 같으므로 영구자석에 의한 공간을 공극으로 취급하여도 무방하다. 매입형 영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 있어 회전자 표면의 기계적인 구조는 대칭이지만 자기적으로 q축과는 달리 d축은 공극이 d축 자로에 존재하는 효과가 있다. 그러므로 자석을 통과하지 않는 q축 자로에 비해 d축 자로의 자기저항이 크므로 q축의 인덕턴스가 d축보다 크다. 이러한 자기저항 차이로 매입형 영구자석 전동기에서는 회전자의 영구자석에 의한 토크뿐만 아니라 d,q축 차이로 인한 릴럭턴스 토크도 존재하게 된다.

### 2.2 매입형 영구자석 동기전동기의 특성 방정식

전동기의 출력은 일반적으로 인버터의 전류 정격과 전동기의 열 정격에 의해 결정되는 최대 전류  $I_{max}$  및 인버터의 PWM 방법과 인버터가 공급할 수 있는 최대 직류단(DC Link) 전압에 의해 결정되는 최대 출력 전압  $V_{max}$ 에 의해 제한되며, 그 식은 다음과 같이 정의된다.

$$V_{ds}^2 + V_{qs}^2 \leq V_{max}^2 \quad (1)$$

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{max}^2 \quad (2)$$

여기서  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ 는 d, q축 전류이고,  $V_{ds}$ ,  $V_{qs}$ 는 d, q축 단자전압을 뜻한다. 동기 속도로 회전하는 회전자를 기준 좌표로 한 동기 좌표계로 표현한 영구자석 전동기의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_r \lambda_{qs} \quad (3)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_r \lambda_{ds} \quad (4)$$

여기서  $\omega_r$ 은 동기 전기각속도,  $R_s$ 는 고정자 상저항, 그리고  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{qs}$ 는 각각 d, q축 고정자 쇄교자속이다. 또한 d, q축 고정자 쇄교 자속은 아래와 같이 표현된다.

$$\lambda_{ds} = L_{ds}i_{ds} + \lambda_f, \quad \lambda_{qs} = L_{qs}i_{qs} \quad (5)$$

$L_{ds}$ ,  $L_{qs}$ 는 d, q축 인덕턴스이고  $\lambda_f$ 는 영구자석에 의한 쇄교 자속이다. 식(5)에 의해 식(3), (4)는 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_{qs} i_{qs} \quad (6)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r (L_{ds} i_{ds} + \lambda_f) \quad (7)$$

두 번째 항인 d, q축 전류의 급변시 발생하는 전류 미분에 비례하는 전압 성분을 무시한다고 가정하면, 다음과 같이 전압 방정식을 간단하게 나타낼 수 있다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_r L_{qs} i_{qs} \quad (8)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_r (L_{ds} i_{ds} + \lambda_f) \quad (9)$$

식에서 보는 바와 같이 고정자의 상저항에 의한 전압 강하가 크지 않다고 가정하면 전동기의 단자 전압은 속도  $\omega_r$ 에 비례함을 알 수 있다.

한편, IPMSM의 기계적 출력은 다음과 같다.

$$P_m = \frac{3}{2} \omega_r (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (10)$$

발생 토크  $T_e$ 는 식(5)를 적용하게 되면 다음과 같이 정의 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_f i_{qs} + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs}] \quad (11)$$

첫째항은 영구자석에 의한 자속과 고정자 q축 전류의 상호 작용에 의해 발생하는 자석토크(Magnet Torque)이고 둘째 항은 d, q축의 돌극성으로 인해 발생하는 자기 저항 토크(Reluctance Torque)이다.

## 2.3 IPMSM의 손실특성 해석

### 2.3.1 동손특성

발전기, 전동기 등 전기기계에서 코일에 전류가 흐름으로써 도체 내에 동손이 발생하여 에너지의 손실을 가져올 뿐만 아니라 온도 상승을 유발하며 효율을 낮추게 된다. 이러한 동손은 코일의 상전류 값과 상저항을 통하여 계산하며 식은 다음과 같이 표현한다.

$$W_{copper} = \frac{1}{T} \int_0^T (R_a I_u^2 + R_a I_v^2 + R_a I_w^2) dt \quad (12)$$

여기서 T는 고정자 전류 파형의 주기,  $R_a$ 는 상 저항  $I_u, I_v, I_w$ 은 상 전류의 크기를 나타낸다. 본 논문에서는 식(12)을 적용하여 고속철도용 견인전동기 동손특성 해석을 하였다.

### 2.3.2 철손특성

강판에 단일 주파수의 교번자계가 가해졌을 때, 단위 중량당의 철손  $W_i$ 을 다음 식을 이용하여 표현할

수 있다.

$$W_i = K_e f^2 B_{\max}^2 + K_h f B_{\max}^2 \quad (13)$$

여기서  $f$ 는 주파수, 우변의 제1항은 와전류손실, 제2항은 히스테리시스손실을 의미한다.  $k_e$ 와  $k_h$ 는 엡스타인 시험에서 얻은 철손 커브를 이용하여 계산하였다.  $k_e$ 와  $k_h$ 는 자속밀도 크기에 따라 변하는 양상을 보이지만 0.7[T]이상 부터는 거의 일정한 값을 가진다. 본 논문에서는 이 일정한 값( $k_e$ 와  $k_h$ )을 철손 해석에 적용하여 앞에서 언급한 동손과 더불어 고속철도용 견인전동기 손실특성 해석을 하였다.

### 2.3.3 정상상태 등가회로

전압방정식으로부터 IPMSM의 특성을 해석하기 위해서는 복잡한 미분방정식을 풀어야 하므로 계산과정이 매우 복잡하다. 따라서, 3상 전압방정식을 2상 d-q축 전압방정식으로 변환하여 간략화 하는 방법을 많이 사용하며 아래에 정상상태에서의 d축과 q축의 등가자기회로를 각각 나타낸다.

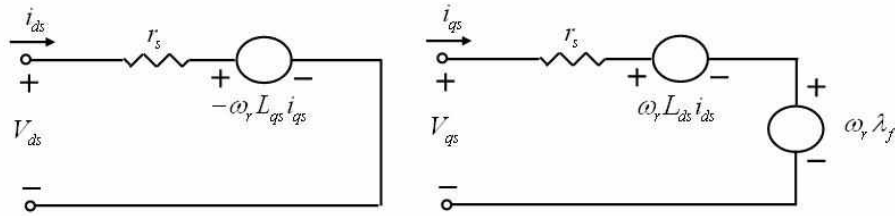


그림2. d-q축 등가자기회로

### 2.3.4 철손고려 등가회로

IPMSM에서 철손을 고려하여 상세한 해석이나 효율의 검토를 위해서는 등가철손저항  $R_c$ 를 유기전압에 병렬로 접속한 등가회로를 사용한다.

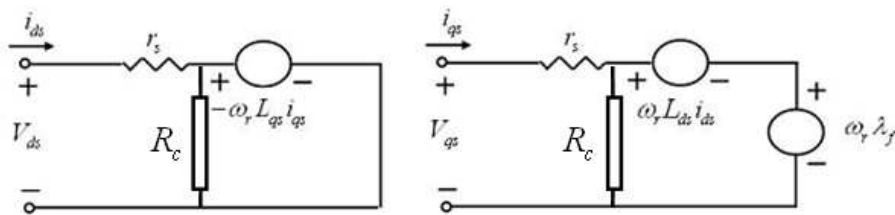


그림3. 철손을 고려한 d-q축 등가자기회로

## 2.4 고속철도용 견인전동기 손실특성 해석 및 결과

### 2.4.1 고속철도용 견인전동기 설계 사양

고속철도용 견인전동기의 경우 차량의 가용 공간의 한정으로 전동기의 무게와 사이즈의 저감이 필요하며 연비, 철도차량의 동력 전달 효율, 철도차량의 주행 성능 향상과 밀접한 관련이 있으며 특히 넓은 속도 영역에서 고효율 운전이 가능해야 한다. 또한 열악한 철도차량 온도 조건에서도 운전의 신뢰성을 확보하여야 하며 넓은 운전 속도 영역을 요구하는 차량 구동용 전동기의 특성상 고속 회전시에도 기계적 안전성이 확보되어야 한다.

이에 따라 기동 토크가 높고 유도 전동기에 비해 토크/관성 비가 크며, 효율과 출력 특성이 매우 우수하고 자기저항 토크를 극대화 할 수 있으며 타 영구자석 동기 전동기에 비해서 차량 구동용으로 적합한 매입형 영구자석 동기전동기로 설계 모델을 선정하였으며, 아래의 그림4와 도표1은 설계된 전동기 형상

과 설정된 목표 사양이다.

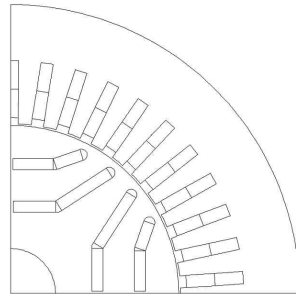


그림4. 매입형 영구자석 전동기 형상

도표1. 견인전동기 목표사양

형식	매입형 영구자석 전동기	용량	410kW 급
정격전압	2180V(DC link 2800VDC)	목표사양	2138Nm@2040rpm

#### 2.4.2 손실특성 및 효율 해석

다음 그림5는 온도에 따른 동손 분포를 나타낸다. 전동기가 운전함에 따라 열이 발생하여 온도 상승을 초래 한다. 그에 따라 코일의 저항이 올라가며 동손이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그림6은 속도가 2040rpm과 5441rpm일 때 철손 분포를 나타내고 있다. 철손은 주로 회전자 표면에 주로 분포하고 있으며 전동기의 운전 영역에 따라 철손 양상이 변하고, 속도가 증가함에 따라 철손도 증가함을 알 수 있다.

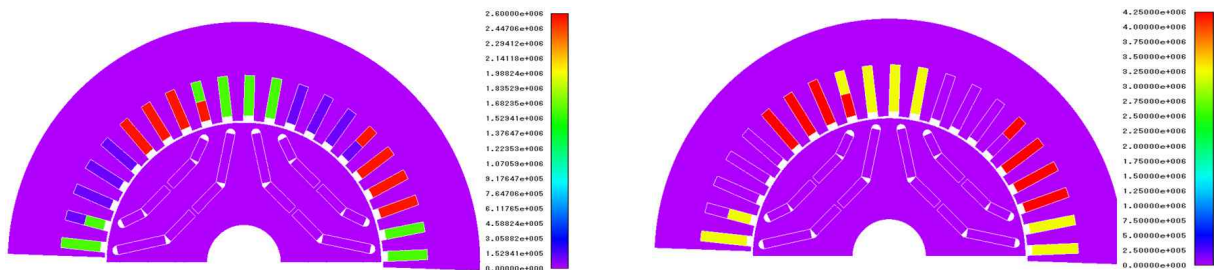


그림5. 온도에 따른 동손 분포(좌 20°C, 우 140°C)

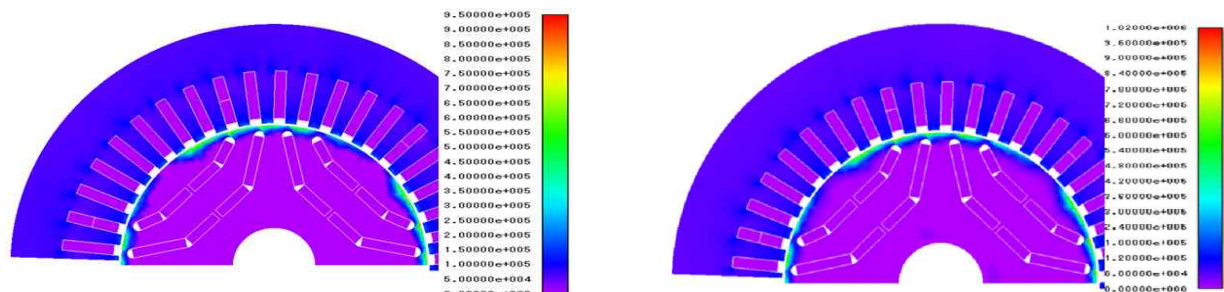


그림6. 속도에 따른 철손 분포(좌 2040rpm, 우 5441rpm)

다음 도표2는 운전 속도에 따른 손실 및 효율을 검토한 결과를 나타내고 있다. 먼저 목표별 성능사양을 만족 시키고 있는 것을 볼 수 있으며, 전동기의 운전 속도에 따라 동손은 일정한 반면에 철손이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 저속으로 운전 할 때는 철손에 비해 동손이 크지만 고속으로 운전 할 때

는 동손에 비해 철손이 훨씬 커지는 것을 알 수 있다.

도표2. 운전 속도에 따른 손실 및 효율

구분	토크	손실[W]	동손	철손	효율
2040 rpm	2551Nm	10652	6821	3831	0.981
5441 rpm	1338Nm	21774	6821	14953	0.972

### 2.4.3 설계 모델의 출력 특성

다양한 부하조건에 대응하고 손실특성을 고려한 철도차량용 구동모터를 여러 가지 d, q축 전류조합( $\theta = 90^\circ \sim 180^\circ$ ,  $i_d = I_{max}\cos\theta$ ,  $i_q = I_{max}\sin\theta$ )별로 추출된 출력 특성을 그림7에 나타내었다.

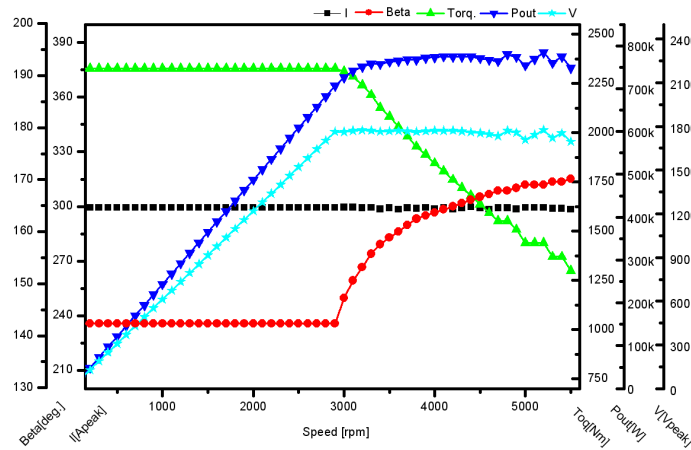


그림7. 출력 특성

수치해석적으로 전류조합별 d, q축 쇄교자속을 추출하여 전압제한을 초과하지 않는지를 식 (8), (9)에 서 판단할 수 있다. 그림7의 출력특성 곡선에서 회전속도가 증가하면서 역기전력이 커지고, 제한된 전압 을 초과하지 않도록 전류의 위상각이 커짐을 확인할 수 있다. 이는 약계자 제어영역으로 속도증가로 인 해 역기전력 성분이 증가하면 d축 전류를 음의 방향으로 증가시키는 전류 위상각 제어를 할 수 있음을 보여준다.

## 3 결론

영구자석 전동기는 유도전동기에 이어 소형, 경량화 및 유지보수 비용 절감등의 이점이 있다. 아울러 차세대 주전동기로 주목 받는 것은 소형, 경량화가 유리하면서도 효율이 높은 매입형 영구자석 전동기 이다. 본 논문에서는 고속 철도용 견인전동기의 손실 특성을 고려한 매입형 영구자석 전동기를 설계를 수행하였다. 견인전동기의 구조특성 및 특정방정식을 나타냈고 이에 따른 손실특성 해석을 하였다.

해석결과, 운전 영역에 따라 영구자석 전동기의 철손 양상이 변화였고, 약계자 영역 구간에서는 철손이 속도에 따라 증가함을 알 수 있었다. 또한 회전자 영역의 철손은 고속 영역에서 와전류 손실에 의해 주 로 발생하였으며 발생 위치는 회전자 표면에 주로 분포하였다. 그에 따라 동손은 속도에 관계 없이 전 류밀도 혹은 코일의 단면적에 따라 변화함을 알 수 있었다. 따라서 고속전철용 견인전동기의 고효율 설 계를 위해서는 운전조건을 고려한 손실특성 해석을 충분히 고려해야 할 것이다.

감사의 글

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

#### 참고문헌

1. Yoshida, Abiko, et. al., Development of Main Circuit System using Direct Drive Motor(DDM), 38th Railway Cybernetic Symposium
2. 김민석, 광상엽, 정현교, 정상용(2007년), “교차자화작용을 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 통합형 d-q축 쇄교자속 추출”, Trans. KIEE. Vol. 56, No. 12, DEC, 2007
3. S. Y. Kwak, J. K. Kim and H. K. Jung, “Characteristic analysis of multi layer-buried magnet synchronous motor using fixed permeability method”, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 20, pp. 549-555, Sept. 2005.
4. Yamazaki, K.(2003), “orque 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, May, pp. 1460-1463.
5. Yamazaki, K. and Haruishi, Y.(2004), “tray load loss analysis of induction motor-comparison of measurement due to IEEE standard 112 and direct calculation by finite-element method,”z IEEE Ind. Applicat., Vol. 40, No. 2, March/April, pp. 543-549.