

# 무가선 트램용 추진 전동기 설계 및 특성 비교

## Comparison of Traction Motor design and characteristics for battery driven hybrid tram

함상환\*      김광수\*      김미정\*      이형우\*\*      이주†  
Sang-Hwan Ham      Kwang-Soo Kim      Mi-Jung Kim      Hyung-Woo Lee      Ju Lee

---

### ABSTRACT

The latest generation of tram is low-floor design, various nations in europe and japan have developed battery driven hybrid trams that combine battery and wiring. Battery driven tram system is achieved by contactless power supply system, thus system is needed high efficiency, high power and low weight traction motor for maximization of energy efficiency. Research from abroad is still in induction motor(IM) application, and it is not meet the efficiency and the power per unit volume in IPMSM. In this paper, we design compare IM and IPMSM to apply battery driven tram, and then compare these motors. To design the motor, we estimate the loading condition at first. Loading condition includes rolling resistance, air-drag resistance, and slope resistance. Based on the loading condition by estimation, we determine the power and compute rated voltage and rated current. In this paper, voltage is limited by battery voltage level. As a result, volume about IM is 1.98 times bigger than IPMSM under same condition. Even though IPMSM is bigger than IM in power density per volume, we consider more factors for actual application because there are demagnetization of permanent magnet in IPMSM and so on by external environment conditions.

---

### 1. 서론

트램은 승객을 운송하기 위하여 설계된 철도 시스템으로 기존의 철도 차량에 비하여 가벼운 중량과 건설이 용이하고 도로 위의 트랙을 이동하므로써 마을과 도시의 접근성이 뛰어난 운송 시스템이다. 19세기 말과 20세기 초의 산업화에 걸쳐 많은 각광을 받았던 운송시스템으로 활용되었으나, 20세기 중반에 들어와서 영국, 캐나다, 프랑스 그리고 미국의 대부분의 도시에서 사라지게 되었다. 하지만 유럽 대륙의 일부 도시에서는 여전히 사용되었으며 몇몇 나라를 연결하는 수단으로도 사용되었다. 1980년대부터 다시 트램이 미국, 영국, 아일랜드, 프랑스 등 다양한 나라에서 새로운 장점을 바탕으로 등장하였다. 운행시의 환경오염물질 배출이 적고, 엔진으로 구동되는 버스 등에 비하여 소음이 적다. 하지만 트랙과 휠사이의 미끄러짐에 의한 고주파의 소음이 발생할 우려는 있다. 혼잡 시간에 있어서의 차량 증편을 통한 승객 수송량을 늘림에도 적합하며 버스에 비하여 높은 수용 인원을 가질 수 있다. 또한 버스에 비하여 주행 중 승객이 느끼는 편안함은 더 크다는 장점을 갖는다.

트램에 있어서 저상화 기술은 지면에서 차상 지면까지의 높이가 300에서 360 mm 정도를 갖도록 하여 승

---

† 책임저자 : 이주, 한양대학교, 전기공학과, 정교수  
E-mail : julee@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2220-0349 FAX : (02)2295-7111

\* 함상환, 한양대학교, 전기공학과, 박사과정  
\* 김광수, 한양대학교, 전기공학과, 박사과정  
\* 김미정, 한양대학교, 전기공학과, 박사과정  
\* 이형우, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실, 선임연구원

객의 승차를 수월하게 하도록 하며, 휠체어와 같은 보조기구도 리프트와 같은 기구를 필요치 않고 직접 신을 수 있으므로 편리함을 더할 뿐 아니라 승차시간을 단축시킬 수 있다. 따라서 최신의 트램 개발의 추세는 저상화가 일반적이며 이에 따른 승객의 만족도도 높아지고 있다. 현재 일본, 독일 및 유럽의 기술 선진국에서는 가선을 통한 전력 공급과 배터리를 통한 무가선 운용을 혼합한 저상 트램의 기술 개발을 위해 연구 중에 있으며 일부는 구간에 적용하여 운행중이다. 무가선 트램 시스템은 기존의 가선 방식에서의 전차선을 제거하고 초저상화를 실현하여 선로와의 비접촉 급전시스템을 통한 전력 급전 방식으로 실현되게 된다. 전기를 이용하는 시스템으로 기존 차량에서 발생하는 NOx 및 SOx를 줄일 수 있고 가선을 제거함으로써 도시환경과의 조화를 꾀할 수 있으며 새로운 관광상품으로의 효과를 기대할 수 있다. 또한 가선에서 발생하는 에너지 손실을 저감할 수 있으며, 회생 제동을 통한 차량의 운동 에너지의 30~40%의 회생이 가능하므로 에너지의 효율성을 높일 수 있으며, 경량화를 통한 에너지 손실 저감 효과를 기대할 수 있다. 무가선 방식의 친환경성 및 에너지 효율성의 극대화를 위하여 견인 전동기의 고효율화, 고풍력화 및 경량화가 필수적으로 요구된다. 최근의 연구 경향은 소형, 경량화 및 고효율화를 위하여 기존의 유도전동기를 효율과 출력 밀도가 우수한 IPMSM으로 대체하는 방향으로 진행 중이다. 무가선 영역에서는 배터리 전력을 이용하여 운영을 하게 되는데, 기존의 트램은 대부분 유도전동기를 사용하고 있기 때문에 운전영역에서의 효율 부분이 IPMSM에 비하여 낮기 때문에 무가선으로 운전할 수 있는 시간 및 거리의 제약이 IPMSM에 비하여 크다. 따라서 무가선 트램에 적합한 견인 전동기를 설계하는 방안에는 기존의 유도전동기의 효율을 더욱 향상시켜 무가선 운행에 적합하도록 개발하는 방안과 추진용 전동기로 적합하도록 IPMSM을 설계하는 방안이 요구된다. 본 논문에서는 무가선 트램에 적합한 유도 전동기와 IPMSM을 설계하는 방법과 그 특성에 대한 비교를 수행하도록 하겠다.

## 2. 본문

### 2.1 부하 산정

트램의 부하는 크게 레일과 바퀴 사이의 마찰력에 의해 발생하는 rolling 부하, 속도를 가지고 진행함에 따라 공기 저항으로 받게 되는 air-drag 부하, 그리고 경사도를 가질 경우 중력에 의해 발생하게 되는 slope 부하를 들 수 있다. 레일과 바퀴 사이의 마찰력을 이기기 위해 필요한 부하 및 그때 필요한 출력을  $P_{rolling}$  이라고 하면, 그 식은 다음과 같다.

$$P_{rolling} \approx M_g \cdot C_r \cdot \left( V \cdot \frac{1000}{3600} \right)$$

여기에서

$M$  : 트램 및 부하의 총 무게 [kg]

$g$  : 중력 가속도 [ $m/s^2$ ]

$C_r$  : rolling resistance 계수

$V$  : 차량의 속도 [km/h]

철도 시스템에서의 레일의 롤링 저항 계수는 약 0.0002에서 0.0010 값의 사이를 갖는다. 따라서 롤링 저항에 의한 부하를 계산하기 위해서는, 차량의 만차시의 무게와 최대 속도를 알아야 한다. 이는 운행 구간을 산정하고 주행 조건을 선정함에 따라 결정되어질 수 있는 사항으로 부하를 산정할 수 있다. 차량이 주행함에 따라 진행방향에 대하여 공기 저항을 받게 된다. 이는 단면적에 대하여 비례하는 함수의 형태로 나타나게 되며 속도가 증가함에 따라 빠르게 증가하는 형태로 발생하게 되며, 공기 저항에 의한 부하를 이겨내는 추진력이 주어져야 가속을 할 수 있다.

공기 저항에 의한 부하는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{air-drag} \approx \frac{1}{2} \rho \cdot (C_d A \cdot 0.093) \cdot \left( V \cdot \frac{1000}{3600} \right)^3$$

여기에서,

$\rho$  : 27°C에서의 공기 밀도 [ $kg/m^3$ ]

$C_d$  : Aerodynamic drag 계수

$C_d A$  : 차량 앞면의 유효 면적 [ $ft^2$ ]

$V$  : 차량의 속도 [ $km/h$ ]

그리고 경사를 오르는 데는 중력에 의해 경사도의 아래 방향으로의 힘이 작용하게 되며 이러한 힘 이상의 힘이 가해져야 경사도를 오를 수 있다. 이와 같은 부하를 다음과 같은 수식으로 산정할 수 있다.

$$P_{slope} \approx Mg \cdot \sin\alpha \cdot \left( V \cdot \frac{1000}{3600} \right)$$

여기에서,

$M$  : 트램 및 부하의 총 무게 [ $kg$ ]

$g$  : 중력 가속도 [ $m/s^2$ ]

$\alpha$  : 경사 각 [deg]

$V$  : 차량의 속도 [ $km/h$ ]

위와 같은 부하의 특성을 바탕으로 하여 속도에 따른 부하곡선을 결정하게 된다. 부하 결정을 위한 트램의 성능 조건은 다음과 같다.

도표 1. 트램의 성능 조건

항목	목표사항
차량 무게	35ton/45ton[공차/만차]
전동기 용량	45kW
최대 가속도	3.5km/h/s
입력 전압	750VDC[가선]
	613VDC[무가선]
권선전류밀도	5A/mm <sup>2</sup>
최급기율기	6% 이상

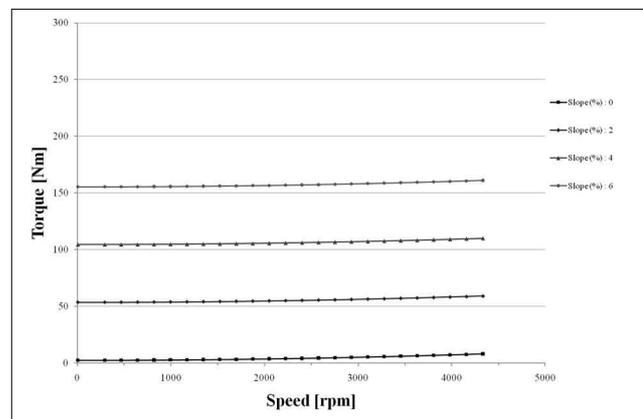


그림1. 트램의 부하곡선

트램의 부하특성 곡선에 비하여 전동기의 특성 곡선이 매우 크게 선정이 되었는데 이는 가속도를 증가시키기 위한 이유이기도 하지만 대차의 전동기 중 일부에 고장이 발생하게 될 경우 다른 전동기에서 그 역할의 일부를 수행하여야하기 때문에 큰 용량으로 성능 조건이 선정되었다.

부하특성 및 출력특성이 정해지면 입력 특성이 결정되어야 한다. 전기적인 입력특성에선 입력 전압 및 전류를 결정하게 되는데, 트램용 견인 전동기와 같은 인버터 구동 전동기의 경우 입력 전압 및 전류는 DC 링크 단 전압과 스위칭 소자의 특성에 따라 달라지게 된다. 스위칭 소자가 전동기에서 필요한 충분한 전력을 공급할 수 있다고 가정하면 결국 DC 링크단 전압이 전동기의 입력 전압을 제한하게 된다. 따라서 트램의 경우 가선시 750V의 DC 전압을 인가받고, 무가선 시에는 613V의 배터리 전압을 인가 받게 되는데 613V의 전압을 부스팅시켜 750V DC로 변환시키므로 본 논문에서는 750V를 기준으로 하여 설계를 수행하였다. DC 링크단의 전압은 PWM을 거쳐 상전압으로 변환되게 되며 최대 상전압의 크기는 PWM 방식에 따라 달라지게 된다.

## 2.2 유도 전동기 기초 설계

견인용 유도 전동기는 앞서서 산정한 부하 조건을 바탕으로 사양을 결정하게 된다. 그리고는 다음과 같은 순서에 의해 설계가 수행된다.

- ① 자속밀도와 전류밀도 값을 가정 -> 고정자와 회전자의 전류 계산
- ② 회전자에서 공극 지름  $D_{in}$ , 적층 길이, 고정자 슬롯, 회전자 외부 지름  $D_{out}$  을 계산
- ③ 전기 장하, 자기장하(전류와 자속밀도) 검증
- ④ 자화 전류  $I_o$  를 계산
- ⑤ 등가회로 파라미터 계산
- ⑥ 손실과 정격 슬립  $S_n$ , 효율 계산
- ⑦ 역률과 구속 회전자 전류, 토크, 한계 토크, 그리고 온도상승 계산

모든 이런 과정들이 확인되어지고 만일 결과가 만족적이지 않다면 새로운 자속 밀도와 전류밀도, 적층비를 가지고 모든 과정이 다시 ①부터 시작된다. 이를 도식화 하면 그림2와 같다.

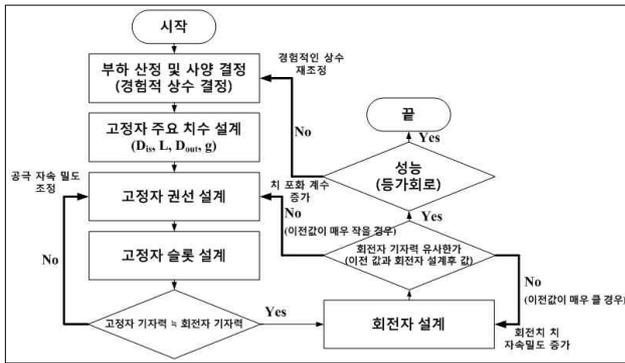


그림2. 유도전동기 설계 프로세스

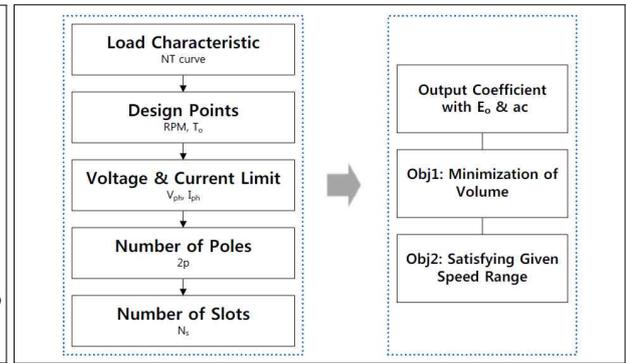


그림3. IPMSM 설계 프로세스

### 2.3 IPMSM 기초 설계

견인용 IPMSM의 설계는 전압방정식과 출력식을 동시에 만족하는 전동기 파라미터 셋, 즉, 영구자석에 의한 전기자 쇠교자속  $\lambda_{pm}$ , d축 인덕턴스  $L_d$ , 그리고 돌극비  $\xi$ 을 결정하고 그러한 파라미터 셋을 가질 수 있는 형상설계를 하는 것이다. 단, 이러한 파라미터 셋은 수없이 많이 존재할 수 있으며 어떠한 파라미터 셋을 선택했는지에 따라 전동기의 사이즈, 출력밀도, 손실 그리고 약계자 제어특성 등이 바뀌게 된다. 따라서 트랩에 적합한 견인용 IPMSM의 설계 시 부하 조건을 만족할 수 있는 파라미터 셋을 가질 수 있는 전동기를 설계하여야 한다. 장하분배법을 이용하여 크기를 결정하고 형상을 설계할 경우, 역기전력 및 비전기장하에 따라 전동기의 파라미터가 결정되며 정격 속도 및 토크에 따른 IPMSM의 설계 프로세스를 아래의 그림3에서 나타내었다. 주요 전동기 설계 파라미터인 전압, 전류제한 및 극수, 슬롯수의 선정 후 설계 목적에 적합하게 역기전력 제한치와 비전기장하를 선택한 후 설계를 수행한다.

### 2.4 트랩용 유도전동기 및 IPMSM의 설계

앞서의 2.3, 2.4 절의 설계 프로세스를 기초로 하여 부하조건에 적합한 유도전동기 및 IPMSM의 설계를 수행하였다. 설계시의 제약조건으로 직경 380mm, 축방향 길이 140mm의 제한을 두고 설계를 수행하였으며, 목표 효율 90% 이상을 만족할 수 있도록 설계를 수행하였다.

유도전동기의 경우 각동선을 이용하여 설계가 수행되었으며 IPMSM의 경우 환동선으로 가정하였다. 이에 따른 점적률의 차이가 발생하게 되었으며 이를 고려하여 슬롯의 형상이 결정되었다. 또한 전압 인력 조건에 있어서 유도전동기의 경우 6 step PWM 변환 방식을 고려하였고 IPMSM의 경우 SVPWM을 이용한 변환 방식을 고려하였으므로 IPMSM이 유도전동기에 비해 낮은 전압 제한치를 갖게 되었다.

유도전동기와 IPMSM의 설계 치수는 다음의 도표2와 같다.

도표 2. 유도전동기 및 IPMSM의 설계치수

	유도전동기	IPMSM	Unit
고정자 외경	380	379.3	mm
고정자 내경	225.9	199.4	mm
적층길이	140	83.1	mm
전체체적	0.015877609	0.0093898	m <sup>3</sup>
고정자 슬롯수	36	36	
고정자 턴수	7	27	
점적율	60.8	40	%
회전자 외경	223.5	197	mm
회전자 슬롯수/극수	46	8	

위의 도표 2에서와 같이 각동선을 쓸 때와 환동선을 쓸 때의 점적률의 차이를 보이고 있다. 전동기의 형상 및 정토크 중단 지점에서의 자속 밀도 분포를 다음의 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

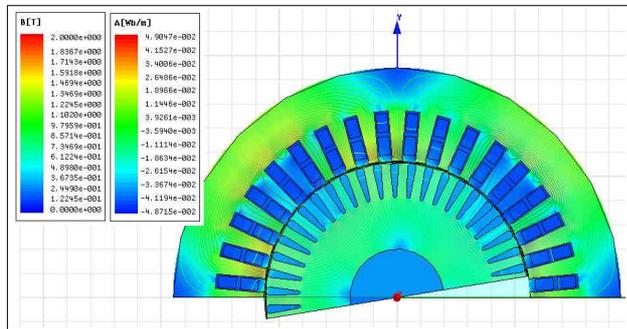


그림4. 정토크 중단점의 자속밀도(유도전동기)

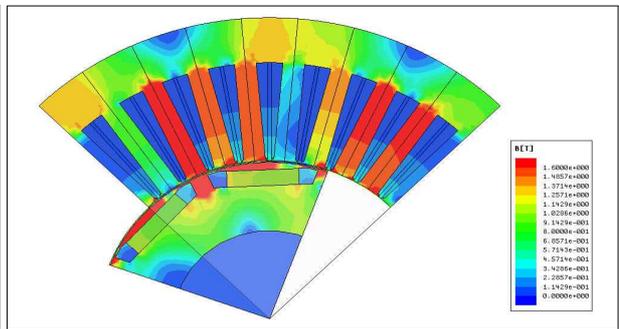


그림6. 정토크 중단점의 자속밀도(IPMSM)

위 모델들에 대한 정토크 중단 지점 및 최고속도에서의 유도전동기와 IPMSM의 특성 해석 결과를 아래의 도표 3에 나타내었다.

도표 3. 유도전동기 및 IPMSM의 특성해석 결과

구분	항목	Unit	유도전동기		IPMSM	
			정토크 중단	최고속도 [70km/h]	정토크 중단	최고속도 [70km/h]
입력조건	출력	kW	45	28.6	45.72	45.08
	전압	V	458	550	433	433
성능	회전수	rpm	1475.63	4113.37	1480	4100
	입력전류	A	71.33	35.14	68	68
	효율	%	93.43	96	97.86	97.63
	역률	%	84.3	88.19	-	-
전류밀도	토크	Nm	291.13	66.42	295	105
	권선	A/mm <sup>2</sup>	3.6	1.77	5	5

위의 특성해석 결과를 분석하여 보면, 유도전동기에 비하여 IPMSM이 정토크 중단 및 최고속도에서의 토크 및 효율이 모두 우수함을 보이고 있다. 또한 초기 설계에서 고려한 치수의 제한치안에 모두 만족하는 설계가 수행되었으며, 전체 체적은 IPMSM이 유도전동기에 비해 약 59% 정도의 체적을 갖고 있음을 알 수 있

다. 이 때의 IPMSM의 점적률은 환동선을 사용하였으므로 만약 유도전동기와 같이 각동선을 사용하게 된다면 차이는 더욱 벌어질 것임을 알 수 있다. 이와 같은 전동기의 설계 치수는 저상 트랩에서 더욱 중요한 의미를 갖게 되며 IPMSM을 실제 트랩에 적용할 경우 전동기의 설치 공간을 줄일 수 있으므로 저상화에 더욱 유리하다는 것을 의미한다. 하지만 영구자석을 이용하는 IPMSM의 경우 외부 환경 조건에 따라 특성이 달라지게 되는데 영구자석이 고온에서 감자가 되기 때문에 이에 대한 냉각 방식 등의 대책이 요구된다. 내환경적인 측면에서는 유도전동기가 강인한 특성을 갖게 되므로 실제로 IPMSM을 저상 트랩에 적용하기 위해서는 IPMSM의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방안이 논의되어야 할 것이다.

### 3. 결론

본 논문에서는 저상 트랩에 적합한 유도전동기 및 IPMSM에 대한 설계 및 특성 평가를 수행하였다. 저상 트랩에 적합한 유도전동기 및 IPMSM을 설계하기에 앞서 트랩의 부하 조건에 대한 고려가 필요하며, 이러한 결과를 바탕으로 기초 설계를 수행하게 된다. 최종적으로 원하는 성능에 부합할 수 있도록 전동기 세부 파라미터의 튜닝을 하게 되며 이와 같은 결과로 전동기를 설계할 수 있다. 또한 이렇게 설계된 유도 전동기와 IPMSM의 특성 해석을 통하여 그 결과를 비교하게 되었으며, 저상 트랩에는 IPMSM을 적용하는 것이 전동기의 효율 뿐만 아니라 공간을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 하지만 IPMSM의 신뢰성 향상에 대한 고려가 선행되어야 할 것이다. 따라서 유도 전동기의 효율을 더욱 높이는 설계를 통하여 이를 극복하는 하나의 방법으로도 제시할 수 있다.

### 참고문헌

1. I. Boldea and S. A. Nasar, "The induction machines design handbook," Taylor & Francis, 2002.
2. C. G. Veinott, "Theory and design of small induction motors," McGraw-Hill, 1959.
3. J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, "Design of brushless permanent-magnet motors," Clarendon Press, 1994.
4. J. F. Gieras and M. Wing, "Permanent magnet motor technology : design and applications, 2nd ed," Marcel Dekker, 2002.
5. V. B. Honsinger, "Sizing Equations for Electrical Machinery," Ieee Transactions on Energy Conversion, vol. 2, pp. 116-121, Mar 1987.
6. B. Stumberger, et al., "High-performance permanent magnet brushless motors with balanced concentrated windings and similar slot and pole numbers," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 304, pp. E829-E831, Sep 2006.