

# 무가선 트램용 45kW급 2중 회전자 구조 동기전동기의 기어비 산정식에 따른 전자계 특성 분석

## Analysis of the Electromagnetic Characteristics according to the Gear Ratio Calculation Formula of 45kW-Class Dual-rotor-structured Synchronous Motor for Wireless Tram

임재현\*, 정거철\*, 김성휘\*, 황유안\*, 류상균\*, 박찬배\*†

Jae-Hyeon Lim\*, Geochul Jeong\*, Seong-Hwi Kim\*, Yoo-An Hwang\*, Sang-Gyun Ryu\*, Chan-Bae Park\*†

**초 록** 최근 신교통 시스템에서 주목하는 트램은 타 시스템과 달리 기존 노면을 이용하기에 건설 비용 및 시간 면에서 경쟁력 있는 시스템으로 떠오르고 있다. 이러한 트램은 저상 운전으로 인해 구조적인 문제로 기존 기어 감속기 대신 수직 기어가 사용되고 있다. 기계식 수직 기어는 구조가 복잡하고, 기계식 기어를 이용함으로써 치 마모 등으로 인한 유지보수성에서 큰 단점을 가지고 있다. 위와 같은 문제점을 해결하기 위한 추진을 위한 견인전동기와 자기 기어를 통합한 2중 회전자 구조 동기전동기의 설계를 진행하였다. 그리고 두 종류의 특성 산정식을 이용하여 각 모델들에 대한 전자계 특성에 대해 비교 분석하였다.

**주요어** : 신교통시스템, 트램, 이중회전자구조, 영구자석동기전동기, 전자계 특성

### 1. 서 론

최근 철도차량의 기술발전 양상은 친환경적 신교통 시스템의 대두로 인하여 기존의 중량 전철보다 경량전철에 더욱 집중되고 있다. 그 중 트램은 기존 중량전철의 큰 단점이었던 접근성이 용이하다. 그리고 타 경량 전철에 비해 기존의 노면을 그대로 사용하기에 무가선 트램을 위한 인프라 건설기간이 짧으며 건설비용 또한 상대적으로 저렴하다.

그러나 이러한 트램에서는 저상운전으로 인해 기존의 기어 대신 수직기어가 사용된다. 수직기어가 적용된 기계식 기어 감속기의 구조는 복잡할 뿐만 아니라 기계식 기어를 이용하기에 직접적인 접촉으로 인한 소음, 진동이 발생하고 치 마모 등이 발생하여 유지 보수성도 떨어진다 [1].

위와 같은 문제점을 해결하기 위해서 기존의 추진 시스템인 기계식 기어와 유도전동기의 결합이

아닌 영구자석 견인전동기와 자기기어가 통합된 2중 회전자 구조 영구자석 동기전동기 (Dual-Rotor-structured Permanent magnet Synchronous Motor, DR-PMSM)를 제안한다. DR-PMSM은 일반적인 영구자석 동기전동기와 다르게 기어비 산정식에 의해 전자계 특성이 매우 크게 달라진다. 따라서 본 논문에서는 두 가지 특성식을 소개하며 그에 따른 설계 모델을 도출 및 해석을 수행하여 전자계 특성을 비교 분석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 무가선 트램용 45kW급 DR-PMSM의 토폴로지

무가선 트램용 45kW급 DR-PMSM은 고정자, 표면에 영구자석이 부착된 1차 회전자 그리고 2차 회전자인 폴피스로 구성된다. 무가선 트램용 45kW급 DR-PMSM의 토폴로지는 Fig. 1과 같다.

† 교신저자: 한국교통대학교 철도대학 철도공학부 (cbpark@ut.ac.kr)

\* 한국교통대학교 철도대학 철도공학부

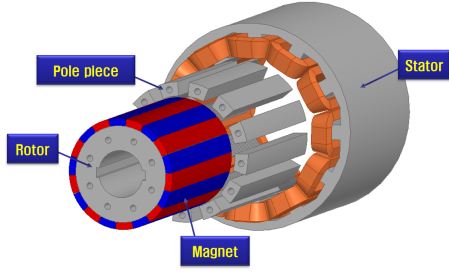


Fig. 1 Topology of 45kW-class DR-PMSM for tram

## 2.2 폴피스 개수 및 기어비 산정식

첫 번째로 DR-PMSM에서 폴피스 개수 및 기어비 산정식은 다음과 같다 [2].

$$N_{pp1} = p_{fm1} + p_{s1} \quad (1)$$

$$G_{r1} = \frac{N_{pp1}}{p_{s1}} \quad (2)$$

여기서  $N_{pp1}$ 는 폴피스 개수,  $p_{fm1}$ 는 회전자 극쌍수,  $p_{s1}$ 는 고정자 극쌍수이다. 폴피스 개수는 회전자 극쌍수와 고정자 극쌍수의 합으로 도출된다. 도출된 값을 고정자 극쌍수로 나누어주면 기어비  $G_{r1}$ 가 된다. 기어비  $G_{r1}$ 를 적용한 모델을 Model 1로 정의한다.

이와 달리 Noboru Niguchi 외 [2]에서는 기어비를 다음과 같이 정의한다.

$$N_{pp2} = 2p_{fm2} + N_{slots} \quad (3)$$

$$G_{r2} = \frac{N_{pp2}}{p_{fm2}} \quad (4)$$

여기서  $N_{slots}$ 는 슬롯 개수이다. 폴피스 개수는 회전자 극쌍수의 두 배와 슬롯 개수의 합으로 도출된다. 도출된 값을 회전자 극쌍수로 나누어주면 기어비  $G_{r2}$ 가 된다. 기어비  $G_{r2}$ 를 적용한 모델을 Model 2로 정의한다.

## 2.3 모델별 설계제원 및 형상

45kW급 트램용 DR-PMSM을 연구하는 데 있어 여러 제약으로 인하여 축소형 모델로 설계를 진행

하였다. 설계 모델은 4.5kW로 진행하였으며 Table 1과 Fig. 2는 기어비  $G_{r1}$ ,  $G_{r2}$ 를 적용한 각각의 모델별 설계제원 및 형상이다. 두 모델 모두 축소형 모델에서의 요구토크 201Nm, DC Link 전압 500V, 상전류 30A<sub>rms</sub>를 만족하는 범위에서 기초설계를 진행하였다. 제한 사양을 만족하는 범위에서 Model 1이 외경과 적층길이를 고려하였을 때 토크밀도가 높다.

Table 1 Design specification by model

	Model 1	Model 2
슬롯 개수	12 슬롯	
고정자극수	8 극	10 극
폴피스 개수	13 개	22 개
회전자극수	18 극	10 극
고정자외경	260mm	273mm
적층길이	210mm	220mm
상전류	16A <sub>rms</sub>	29.8A <sub>rms</sub>
턴 수	70 턴	62 턴

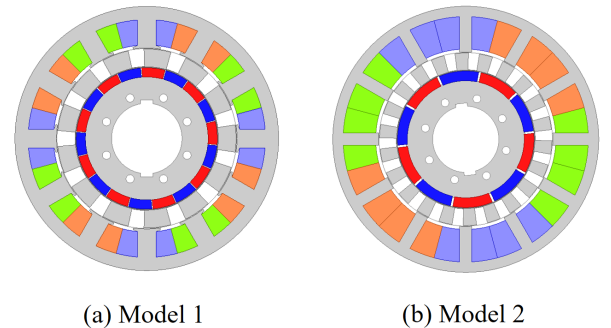


Fig. 2 Model shape according to each gear calculation formula

## 2.4 전자계 특성 비교

Table 2는 각 모델별 전자계 특성을 나타낸다. Model 1의 토크는 233.4Nm로 Model 2보다 9.21% 높다. Model 1의 토크 리플은 4.5%이므로 Model 2의 보다 0.2% 낮다. 전고조파 왜율(Total Harmonic Distortion ratio, THD) 또한 Model 2의 값인 10.6%보다 Model 1의 값이 현저히 낮은 수치임을 확인 할 수 있다. 마지막으로 효율 또한 Model 1이 5% 높다.

**Table 2** Comparison of electromagnetic characteristics by model

	Model 1	Model 2
평균 토크 (정격)	233.4Nm	213.7Nm
토크 리플율	4.5%	4.7%
THD (정격)	1.3%	10.6%
효율	96.1%	91.1%

### 3. 결 론

본 논문에서는 기존의 수직기어와 견인전동기가 통합된 구조가 아닌 자기기어와 영구자석 동기전동기가 통합된 무가선 트랩용 45kW급 2중 회전자구조 동기전동기의 설계를 진행하였다. 기존 견인전동기와 다르게 기어비 산정식이 모터 특성에 큰 영향을 준다. 그래서 두 가지의 폴피스 개수 및 기어비 산정식에 따라 Model 1, Model 2를 설계하여 해석을 진행하였다. 그에 따른 전자계 특성을 비교한 결과 Model 1이 Model 2보다 토크 밀도가 높다는 것을 확인 할 수 있었다. 효율 또한 Model 2에 비해 상대적으로 높으며 전자계 특성 면에서도 우수하다는 것을 알 수 있다.

### 후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20CTAP-C151867-02)

### 참고문헌

- [1] Chan-Bae Park (2020) Performance verification of DR-PMSM for traction system according to permanent magnet shape, *AIP Advances*, Volume 10, Issue 2, pp.025105-1 – pp.025105-7
- [2] Seyed Ahmadrza Afsari, Hossein Heydari, Babak Dianati (2015) Cogging Torque Mitigation in Axial Flux Magnetic Gear System Based on Skew Effects Using an Improved Quasi 3-D Analytical Method, *IEEE Transactions on*

*Magnetics*, Volume 51, Issue 9, pp.1 - pp.11

- [3] Noboru Niguchi, Katsuhiro Hirata (2013) Torque-Speed Characteristics Analysis of a Magnetic-Geared Motor Using Finite Element Method Coupled With Vector Control, *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 49, Issue 5, pp.2401-2404