

45kW급 2중 회전자 구조 동기전동기의 권선법에 따른 전자계 특성 분석

Analysis of the Electromagnetic Characteristics according to the Winding Method of 45kW-Class Dual-rotor-structured Synchronous Motor

임재현*, 정거철*, 김성휘*, 김동균*, 박찬배*†

Jae-Hyeon Lim*, Geochul Jeong*, Seong-Hwi Kim*, Dong-Kyun Kim*, Chan-Bae Park*†

초 록 매년, 국내 도심의 인구밀도 집중도에 대한 문제가 제기되고 있다. 이로 인한 교통체증을 해결하고자 대중교통의 연구개발 필요성이 대두되고 있는 시점이다. 그 중 친환경적인 기존철도교통시스템은 미래교통 시스템에 가장 적합하나 초기 건설비용 및 운영 측면에서의 부담으로 인해 신교통 시스템인 트램이 주목을 받고 있다. 이는 초기 인프라 구축 비용 및 유지 보수적인 측면뿐만 아니라 문전연결성에서도 이점을 갖는다. 이러한 트램의 저장대차는 추진시스템이 장착될 공간의 제약이 크다. 그래서 고효율밀도의 영구자석동기전동기(Permanent magnet Synchronous Motor, PMSM)와 수직 기어가 적용된다. 그럼에도 수직기어의 기계적 접촉은 유지 보수성에서의 단점을 갖게 되어 PMSM과 자기 기어가 하나의 시스템으로 결합된 2중 회전자 구조 동기전동기(Dual-Rotor-structured Permanent magnet Synchronous Motor, DR-PMSM)가 제안되었다. 하지만 이를 설계함에 있어 권선법에 따른 축방향 길이의 차이가 크기 때문에 장착될 공간의 기계적 제약을 받는 트램용 견인전동기에선 그에 따른 비교 분석이 필요하다. 본 논문에선 권선법에 따른 각 모델에 대한 전자계 특성 비교 및 축 방향길이에 대해 비교 분석하였다.

주요어 : 신교통시스템, 트램, 이중회전자구조, 영구자석동기전동기, 권선법, 축방향길이

1. 서 론

대도시의 도심은 집중적인 개발과 발전으로 인하여 수도권 중심화 및 광역화를 이루게 되었다. 이에 인구밀도 집중도가 증가하게 되었으며 이로 인한 여러 수도권 지역에서 교통체증이 발생하고 있다 [1]. 교통체증을 해결하고자 대중교통의 필요성이 대두되고 있는데 다른 대중교통 시스템에 비해 상대적으로 많은 인원을 수용하며 친환경적인 철도시스템은 미래 교통시스템으로 가장 적합하다고 볼 수 있다. 기존 철도시스템은 초기 건설비용 및 운영적 측면에서 문제점을 갖게 되는데 이를 해결할 수 있는 신교통 시스템으로써 트램이 주목받고 있다 [2].

이는 초기 인프라 구축 비용과 장기적인 운영에서의 유지 보수성 등에 이점을 갖기 때문이다. 또한 기존 철도시스템에 비해 문전연결성 또한 상대적으로 뛰어나다고 볼 수 있다. 이러한 트램은 저장대차가 적용되기에 구동을 위한 추진시스템이 장착될 공간에 대한 제약이 큰 편이다. 그렇기에 영구자석동기전동기(Permanent magnet Synchronous Motor, PMSM)와 수직 기어를 적용하여 소형화가 가능하다. 하지만 수직 기어의 기계적 접촉으로 인한 유지 보수성의 문제가 신뢰성에 대한 문제를 야기시킬 수 있으며 이를 해결하고자 PMSM과 자기기어가 하나로 결합된 2중 회전자 구조 영구자석 동기전동기(Dual-Rotor-structured Permanent magnet Synchronous Motor, DR-PMSM)가 제안되었다 [3]. 하지만 권선법에 따른 특성변화가 크기 때문에 본 논문에서는 권선법에 따른 각 모델에 대한 전자계 특성에 대해 비교 분석하였다.

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

* 한국교통대학교 철도대학 철도공학부

2. 본 론

2.1 45kW급 DR-PMSM 모델

트램용 45kW급 DR-PMSM의 형상은 Fig. 1이며 기초 설계 제원은 Table 1과 같다. 권선법은 분포권 및 집중권으로 진행되었다. 극수와 슬롯 수 조합은 여러 조합에 대해 해석을 진행 한 후 최적의 조합을 도출한 것이며 각 권선법에 따라 최적의 극수 슬롯 수 조합이 상이하다. 분포권 모델은 42슬롯에 고정자 4극, 회전자 14극이며 폴피스 개수는 9개이다. 고정자 외경은 장착될 공간 대비 외함을 고려하여 400mm로 설정하였다. 코어의 적층길이는 430mm이며 상전류는 115A_{rms}, 턴 수는 6턴이다.

집중권 모델은 12슬롯에 고정자와 회전자 극수는 각각 8극 및 18극이며 폴피스 개수는 13개이다. 고정자 외경은 분포권에서 진행했던 모델과 동일하게 400mm로 설계 하였다. 요구조건을 만족시키는 코어의 적층길이는 410mm이며 상전류는 141A_{rms}이고 턴 수는 25턴이다.

요구 토크는 2,000Nm이며 DC Link 전압 750V에서 SVPWM방식으로 제어하기에 상당 역기전력 전압 제한의 요구 값은 433V이다. 두 가지 모델 모두 요구 조건을 만족하게 설계를 진행하였다.

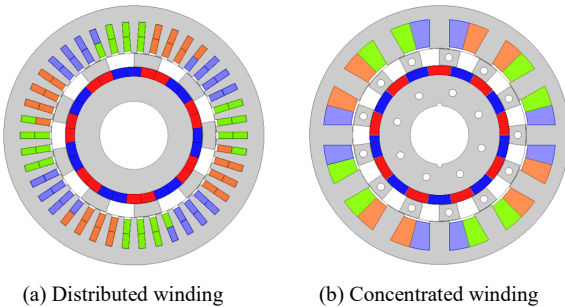


Fig. 1 Model shapes of 45kW-class DR-PMSM

Table 1 Design specification of 45kW-class DR-PMSM

Contents	Specification	
슬롯 개수	42 슬롯	12 슬롯
고정자극수	4 극	8 극
폴피스 개수	9 개	13 개
회전자극수	14 극	18 극
고정자외경	400mm	400mm

적층길이	430mm	410mm
상전류	115A _{rms}	141A _{rms}
턴 수	6 턴	25 턴

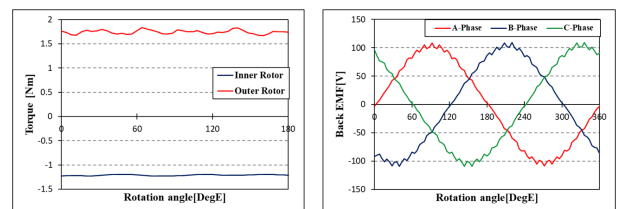
2.2 권선법에 따른 특성비교

45kW급 DR-PMSM에 대한 전자계 특성은 권선법에 의해 크게 달라진다. Table 3에서 유한요소법의 시뮬레이션 오차를 감안하여 두 가지 모델에 대해 요구 토크인 2,000Nm를 만족시키는 설계를 완료 하였다.

Fig. 2은 분포권 모델의 정격속도에서 토크 및 역기전력 파형이며 토크는 2,096Nm이고 전고조파 왜율(Total Harmonic Distortion, THD)은 4.1%이다.

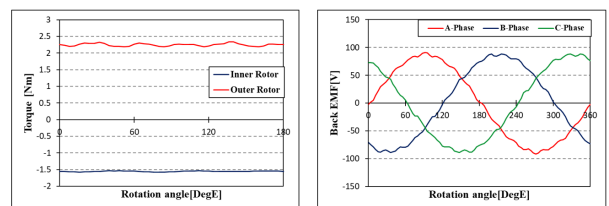
Fig. 3은 집중권 모델의 정격속도에서 토크 및 역기전력 파형이며 토크는 2,249Nm이고 THD는 2.9%이다.

각각의 모델에 대한 토크 리플율은 8.8%, 7.4%이며 상역기전력 기본파는 최대속도에서 분포권이 250V, 집중권이 335V이다. 집중권의 상역기전력 기본파는 분포권에 비해 약 25% 높은 것으로 나타나지만 역기전력 제한치인 433V에 비해 약 23% 적은 수치이다. THD는 앞서 확인 했던 것과 같이 분포권 4.1%, 집중권 2.9%이다. 일반적인 PMSM과는 달리 집중권의 THD가 더 낮은 특성을 지닌다. 효율은 크게 차이 나지 않으며 코어 적층길이는 집중권이 분포권에 비해 4.7%만큼 적지만 엔드턴을 포함한 축방향 길이는 분포권에 비해 44% 적은 것을 확인할 수 있었다.



(a) Torque characteristics (b) Waveforms of the Phase-BEMF

Fig. 2 Electromagnetic Characteristics of 45kW-class DR-PMSM at distributed winding (Rated speed)



(a) Torque characteristics (b) Waveforms of the Phase-BEMF

Fig. 3 Electromagnetic Characteristics of 45kW-class DR-PMSM at concentrated winding (Rated speed)

Table 2 Comparison of electromagnetic and axial length characteristics by winding method

	Distributed winding	Concentrated winding
평균 토크 (정격속도)	2,096Nm	2,249Nm
토크 리플율	8.8%	7.4%
상-역기전력 기본파 (최대속도)	250V	335V
THD (정격속도)	4.1%	2.9%
효율	97%	97.1%
코어 적층길이	430mm	410mm
축방향길이 (엔드턴포함)	891mm	500mm

3. 결론

친환경적이고 경제적인 트램의 구동용 추진 시스템은 저상대차에 장착되어야 하기에 공간적 제약이 존재한다. 추진 시스템의 소형화를 위해 출력밀도가 높은 PMSM과 수직 기어를 사용하는데 이에 기계적 직접 접촉이 존재하여 유지 보수성이 떨어지며 이는 신뢰성 유지에도 큰 어려움을 겪는다. 따라서 이를 해결하기 위해 자기적 기어와 PMSM을 결합한 DR-PMSM의 개념이 제안되었는데, 해당 시스템은 권선법에 의해 큰 차이가 존재한다. 전자계 특성에서도 기존 PMSM과 달리 집중권에서 THD가 더 좋은 양상을 보이며 엔드턴 포함 길이에서는 집중권이 44% 적은 것을 알 수 있다. 이를 통해 실제 저상대차에 적용하기 위한 DR-PMSM에서 기계적 제한을 고려하였을 시 분포권 대비 집중권이 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

후 기

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

참고문헌

- [1] WOOJIN Industrial System (2016) Technical Development for the Commercialization of the Bimodal Tram, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*, pp.1-5.
- [2] Chan-Bae Park, Dong-Hoon Jung, Geochul Jeong (2020) Wireless Tram Propulsion System Specification Analysis and Magnetic Gear Design Strategy, *Journal of the Korean Society for Railway*, 23 (8), pp.784 - pp.793
- [3] Geochul Jeong, Hyung-Woo Lee, Jae-Bum Lee, Chan-Bae Park (2020) Comparative Study of the Characteristics of Dual-rotor Permanent Magnet Synchronous Motor for Low-floor Tram Vehicles according to Gear Ratio Variation, *Journal of the Korean Society for Railway*, 23 (7), pp.660-668