

전기자동차 구동용 비희토류 자속집중형 전동기와 희토류 전동기의 주행사이클에 따른 차량 효율 비교

차경수, 김동민, 임명섭, 홍정표
한양대학교

Comparison of Vehicle Efficiency Applying Rare Earth Free Concentrated-Flux Synchronous Motor and Rare Earth Interior Permanent Magnet Synchronous Motor According to Driving Cycle

Kyoung-Soo Cha, Dong-Min Kim, Myung-Seop Lim, Jung-Pyo Hong
Hanyang University

Abstract - 현재 전기자동차 구동전동기는 일반적으로 희토류 영구자석을 사용한 동기전동기를 사용하고 있다. 하지만 희토류는 수급불안정성이 높아 자동차 업계는 희토류 전동기를 대체할 수 있는 방안을 찾고 있으며 그 방안 중 하나가 비희토류 자속집중형 전동기이다. 비희토류 영구자석의 수를 늘려서 희토류 전동기와 동일한 크기에 유사한 출력을 만족하게 설계했다. 마지막으로 전기자동차 구동용 비희토류 자속집중형 전동기의 특성 및 크기를 희토류 전동기와 비교하고 두 전동기를 탑재한 차량을 Advisor(Advanced Vehicle Simulator)를 사용해 주행사이클에 대한 차량효율을 비교할 것이다.

1. 서 론

2012년, 미국 캘리포니아 대기자원위원회는 오는 2025년까지 미국 내에서 판매되는 신차의 15% 이상이 전기자동차(Electric Vehicle, EV) 등 이산화탄소를 거의 배출하지 않는 환경 보호용 차량으로 의무 도입하도록 하는 새로운 규제안을 마련하기로 했다. 유럽 또한 이산화탄소 배출량을 규제하고 있는데 이는 전기자동차가 아니면 규제에 맞출 수 없는 수준이다. 따라서 전기자동차나 하이브리드 자동차의 개발은 선택이 아닌 필수가 됐다.

전기자동차나 하이브리드자동차는 구동에 전동기가 사용된다. 구동용 전동기는 자동차 내부에 탑재되어야 하기 때문에 공간적 제약이 따른다. 그래서 구동용 전동기는 부피가 작아야하고 높은 출력밀도가 요구된다. 따라서 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 동시에 사용하여 다른 전동기에 비해 출력밀도가 높은 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)을 주로 사용하며, 회전자에 매입하는 영구자석으로는 희토류 자석을 주로 사용한다. 이는 희토류 자석이 잔류자속밀도와 보자력이 우수하여 출력밀도를 높이기 용이하기 때문이다.

하지만 현재 희토류의 수급불안정성에 따라 자동차업계는 희토류 자석을 사용한 IPMSM을 대체할만한 전동기를 찾고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 비희토류 자속집중형 전동기에 대해 연구를 진행하였다.

자속집중형 전동기 또한 릴럭턴스 토크를 발생시켜 출력밀도가 높아 전기자동차 구동용 전동기로 적합하다. 따라서 본 논문에서는 전기자동차 구동용 전동기로 비희토류 자속집중형 전동기를 희토류 전동기와 동일한 크기에서 유사한 출력으로 설계했다. 그리고 두 전동기를 탑재한 차량을 Advisor(Advanced Vehicle Simulator)를 통해 도심주행 사이클(Urban Driving Dynamometer Schedule, UDDS), 고속도로주행 사이클(Highway Fuel Economy Test, HWFET)에 대해 차량효율을 비교할 것이다.

2. 전동기 제시

2.1 비희토류 자속집중형 전동기

페라이트 영구자석은 Nd 영구자석에 비해 보자력과 잔류자속밀도가 30% 수준이다. 이러한 비희토류 영구자석으로 자속집중형 전동기를 설계하면 영구자석에 의한 전기자 쇄교자속(Ψ_a)이 작다. 따라서 비희토류 영구자석을 전동기에 사용하려면 자석사용량을 늘리기 위해 식 (1)과 같이 극쌍수(P_n)를 늘린 자속집중형 전동기를 설계하여야 희토류 전동기와 성능이 유사해질 수 있다.

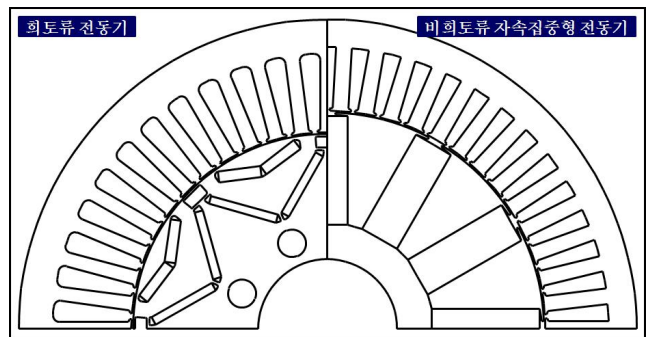
$$T = P_n (\Psi_a i_q^+ (L_d^- L_q) i_d i_q) \quad (1)$$

식 (1)은 자속집중형 전동기의 토크 수식이다. 식 (1)에서 P_n 은 극쌍수, Ψ_a 는 영구자석에 의한 전기자 쇄교자속, i_d , i_q 는 전기자 d축, q축 전류, L_d , L_q 는 d축, q축 인덕턴스이다.

하지만 자속집중형 전동기는 영구자석 하단으로 자속의 누설이 많기 때문에 본 논문에서는 영구자석 하단을 비자성체로 구성했다.

<표 1> 전동기 사양 및 치수 비교

항목	희토류 전동기	비희토류 자속집중형 전동기
영구자석 종류	Nd	Ferrite
극수 / 슬롯수	8 / 48	12 / 54
권선방법	분포권 (전절권)	
DC전압 [V _{dc}]	360	
최대입력전류 [A _{rms}]	420	
출력 [kW]	80	
상당직렬턴수	16	18
병렬회로수	2	6
기저 / 최고속도 [rpm]	2,700 / 10,000	
고정자 외경 [mm]	200	
회전자 외경 [mm]	126	140
적층 길이 [mm]	150	



<그림 1> 비희토류 자속집중형 전동기와 희토류 전동기의 형상

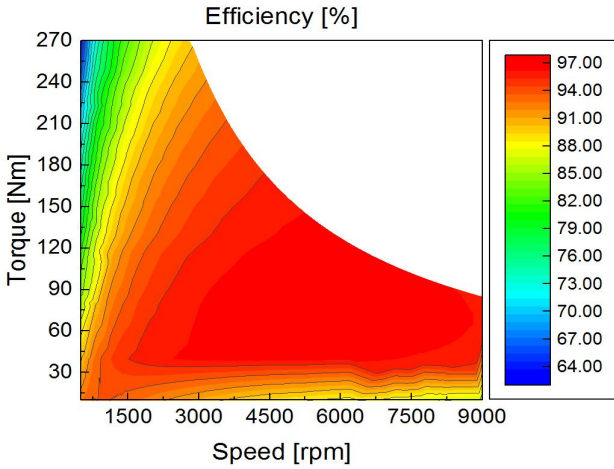
<표 1>에 비희토류 자속집중형 전동기의 사양을 나타냈다. 희토류 전동기와 유사한 성능을 내기 위해서 비희토류 자속집중형 전동기의 극수를 12극, 상당직렬턴수를 18턴으로 늘려서 설계했다. 그 결과 비희토류 자속집중형 전동기를 희토류 전동기와 같은 크기에서 유사한 출력을 내는 것을 확인할 수 있었다.

2.2 전동기 비교

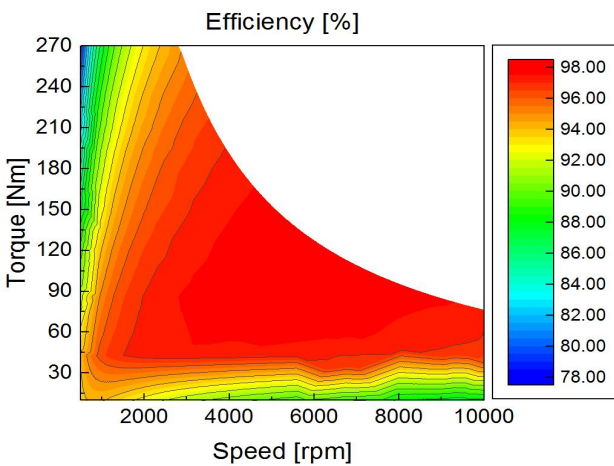
<그림 1>은 비희토류 자속집중형 전동기와 희토류 전동기의 형상이다. 비희토류 자속집중형 전동기는 영구자석을 방사형으로 구성한다. 비희토류 자석으로 구성되어 있기 때문에 희토류 자석으로 구성된 전동기보다 영구자석에 의한 쇄교자속이 작다. 따라서 회전자에 비희토류 영구자석을 더 많이 사용하고 영구자석에 의한 자속이 집중되도록 영구자석을 방사형으로 배치시킨다. 영구자석의 배치가 방사형으로 되어있기 때문에 비희토류 자속집중형 전동기 회전자의 외경이 희토류 전동기의 회전자 외경보다 크다.

<표 1>에 두 전동기의 치수를 나타내었다. 고정자의 외경은 두 전동기가 200mm로 동일하다. 회전자 외경은 비희토류 자속집중형 전동기는 140mm이고 희토류 전동기는 126mm이며 14mm의 차이가 있다.

<그림 2>는 비희토류 자속집중형 전동기의 효율맵이다. 비희토류 자속집중형 전동기의 최고 효율은 96.9%이다. 그림 3은 희토류 전동기의 효율맵이다. 희토류 자속집중형 전동기의 최고 효율은 97.8%이다.



〈그림 2〉 비회토티류 자속집중형 전동기 효율맵



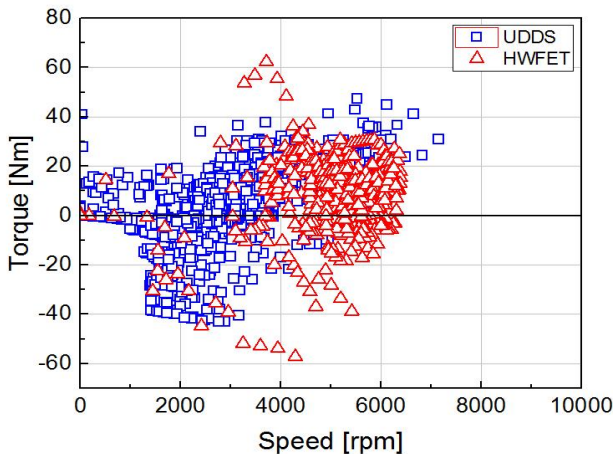
〈그림 3〉 회토티류 전동기 효율맵

3. 전체 자동차 효율 비교

3.1 전체 자동차 효율 해석 조건

전체 차량 시스템 효율은 주행사이클에 따라 크게 다르다. 그렇기 때문에 Advisor를 이용해 도심주행 사이클(UDDS)과 고속도로주행 사이클(HWFET)의 두 가지 상황에 맞춰 효율을 해석하였다.

〈그림 4〉는 도심주행 사이클(UDDS)과 고속도로주행 사이클(HWFET)에 대한 전동기 운전점이다. 자동차가 도심주행 사이클에서는 저속주행을 주로 하고 고속도로주행 사이클에서는 고속주행을 주로 하는 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 주행 사이클에 대한 전동기 운전점

〈표 2〉 자동차 사양

항목	명칭
Vehicle	PARALLEL HYBRID
Fuel Converter	FC_PRIUS_JPN
Exhaust Aftertreat	EX_SI
Energy Storage	ESS_PB25
Transmission	TX_5SPD
Torque Coupling	TC_DUMMY
Wheel/Axle	WH_SMCAR
Accessory	ACC_HYBRID
Powertrain Control	PTC_FUZZY_EMISSION

〈표 3〉 주행 사이클에 따른 전체 차량 시스템 효율 비교

	회토티류 전동기	비회토티류 자속집중형 전동기
도심주행 효율 [%]	15.9	15.9
고속도로주행 효율 [%]	30.1	30

〈표 2〉는 전동기를 탑재하여 해석할 자동차의 사양이다. 두 전동기를 병렬하이브리드 차량에 탑재하여 효율을 해석하였다.

3.2 전체 자동차 효율 비교

〈표 3〉에 주행사이클에 따른 전체 차량 시스템 효율을 비교했다. 회토티류 전동기를 탑재한 차량의 도심주행 효율은 15.9%이고 비회토티류 자속집중형 전동기도 15.9%로 동일한 효율을 보였다. 그리고 고속도로주행 효율면에선 회토티류 전동기를 탑재한 차량은 30.1%, 비회토티류 자속집중형 전동기를 탑재한 차량은 30%로 0.1%의 차이만 났다. 따라서 회토티류 전동기를 탑재한 차량과 비회토티류 자속집중형 전동기를 탑재한 전체 차량 시스템의 효율이 유사하다.

4. 결 론

본 논문에서는 비회토티류 자속집중형 전동기를 회토티류 전동기와 유사한 성능 및 크기로 설계하여 주행사이클에 따른 전체 차량 시스템 효율을 비교했다. 비교 결과, 회토티류 전동기를 탑재한 차량과 비회토티류 자속집중형 전동기를 탑재한 차량의 효율이 유사한 수준임을 알 수 있다. 본 논문에서 비교한 비회토티류 자속집중형 전동기는 영구자석 하단을 비자성체로 구성하여 영구자석 하단으로의 자속 누설을 무시하고 해석하였다. 따라서 영구자석 하단을 강자성체로 구성할 시 영구자석 하단으로 자속의 누설이 크기 때문에 비자성체로 이를 보완한다면 가격적인 측면에서 경쟁력을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Tao Sun, Byeong-Woo Kim, Jung-Ho Lee and Jung-Pyo Hong, "Determination of Parameters of Motor Simulation Module Employed in ADVISOR", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 6, pp. 1578-1581, 2008
- [2] Hae-Joong Kim, Doo-Young Kim and Jung-Pyo Hong, "Structure of Concentrated-Flux-Type Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors Using Ferrite Permanent Magnets", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No. 11, 2014
- [3] 김규섭, 정재우, 홍정표, 김기남, "페라이트 영구자석을 사용한 자속집중형 전동기의 특성 분석", 2012년도 대학전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 516-517, 2012
- [4] J.R. Hendershot JR. and T.J.E. Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Machines"