

유도전동기를 사용한 전기자동차 구동용 전동기 설계

구본길, 남광희
포항공과대학교 전자전기공학과

Design of Electric Vehicle Traction Motor using Induction Motor

Bonkil Koo, Kwanghee Nam
Dept. of Electrical Engineering, POSTECH

ABSTRACT

전기자동차 구동용 전동기는 고투크/고과워 밀도, 고효율, 넓은 구동속도 범위의 특성을 가져야 한다. 영구자석 매입형 동기전동기는 이러한 특성에 가장 부합하는 전동기 형태로서 전기자동차 구동용 전동기로 각광받고 있다. 하지만 강한 자속밀도를 얻기 위하여 희토류 영구자석을 사용해야 하고, 이는 생산단가의 절감문제, 고온에서의 비가역적 감자문제, 인버터 결합 시의 안전성 문제 등의 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제들을 극복하기 위하여 전기자동차 구동용 유도전동기 설계를 제안한다. 유도전동기가 가지는 장점들과 함께 설계 시 고려해야 할 내용들을 제시한다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기모터(IPMSMs)는 높은 토크 및 과워 밀도, 높은 효율, 약계자 제어를 통한 넓은 구동 영역 등의 장점을 가지고 있어, 전기자동차 구동용 전동기로서 지속적으로 연구되어 왔다. 하지만 IPMSM에 사용되는 희토류 물질의 영구자석은 생산 단가를 높이는 주된 요소이다. 또한 영구자석은 고온에서는 비가역적 감자문제, 저온에서는 인버터의 제어불능에 따른 안전성 문제를 가진다. 이로 인해 영구자석은 일정 두께 이상을 사용해야 하며 최대속도에서의 역기전력의 선간전압이 인버터의 내압보다 작도록 설계해야 하는 문제가 있다. 이는 설계 시 설계 범위를 크게 제한하는 요소로 작용한다.

이러한 문제점을 극복하기 위한 방법으로 유도전동기(IMs)를 사용할 수 있다. 유도전동기는 생산 단가가 낮고 환경조건에 대한 안전성이 뛰어난 장점이 있다. 하지만 지금까지의 연구는 낮은 효율 및 출력 밀도로 인해 토크를 boosting 하는 정도의 하이브리드 전기자동차(HEV)용 전동기 설계에 그쳤다.^[1]

본 논문에서는 유도전동기를 사용하여 전기자동차 구동용 전동기 설계를 목표로 한다. 전동기 설계를 위해 고려해야 할 사항들을 검토하고 이를 극복하기 위한 방법들을 제안한다.

2. 본 론

2.1 설계 사양

유도전동기의 특성 상 극수를 높이면 누설자속량이 증가하기 때문에 극수를 6으로 제한하였다. 전기자동차 구동을 위한 출력 및 기본 사양이 다음과 같다.

표 1 설계 목표 사양

출력 파워	60 kW	극수	6
전압	320 V _{DC}	정격 속도	3000 rpm
정격 전류	160 A _{rms}	고정자 외경	250 mm
최대 전류	260 A _{rms}		

2.2 설계 고려사항

2.2.1 전류 밀도

IM은 일반적으로 큰 용량의 산업용 발전기 용도로서의 개발이 많았기 때문에, 고전적 설계에서의 설계 대상은 낮은 전류 밀도 (약 4 5A/mm²)로 일정속도로 구동하는 전동기였다.

하지만 전기자동차 구동용 유도전동기는 인버터를 통한 구동을 하여 넓은 속도 범위를 가지게 하고, 낮은 토크밀도의 약점을 극복하기 위하여 수냉 또는 유냉의 방식을 채택하여야 한다. 냉각조건이 향상되면 전류밀도를 연속 정격에서 약 8 10A/mm²의 값을 가지도록 설계할 수 있고 이를 통해 토크 및 출력 밀도를 증가시킬 수 있다.

2.2.2 효율

유도전동기가 가지는 최대 약점은 IPMSM에 비하여 나쁜 효율이다. 손실에서의 주된 요인은, 고정자측 동손, 회전자측 동손, 회전자 측 유도전류에 의한 철손이다.^[2] 동손을 줄이기 위하여 본 논문에서는 회전자측 도체를 알루미늄보다 비저항이 작은 구리를 사용하도록 한다. 또한 회전자측의 철손은 고조파 성분으로 인한 것이므로 공간고조파를 줄이기 위한 회전자 슬롯형상 최적화를 진행한다.

2.3 이론적 설계

상 역기전력 E_{ph} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{ph} = 4.44 \times f \times \phi \times N_{ph}, \quad (1)$$

여기서 f 는 주파수, ϕ 는 자속, N_{ph} 는 상당 턴 수를 의미한다. 정격 속도에서 역기전력이 상전압의 크기가 되도록 하여야 한다. 따라서 상당 턴 수는 다음과 같다.

$$N_{ph} = \frac{V_{ph}}{4.44 \times f \times \phi} = \frac{130.64}{4.44 \times 150 \times 0.0075} \approx 27, \quad (2)$$

여기서 V_{ph} 는 상전압의 크기를 의미하며, 자속 ϕ 는 전기

장하산출도를 참고하여 0.0075Wb 로 선정하였다.

전동기 설계에 있어 고정자에 대한 회전자의 비 (slit ratio) 를 결정하는 것은 매우 중요하다. 전기 장하로부터 회전자의 반지름을 결정한다. 극당 상당 슬롯 수(SPP)를 $q=3$ 이라고 할 때, 전기장하 AC는,

$$AC = q \times \frac{N_{ph}}{P/2} \times I_{ph} = 4320 \text{ A/cm}, \quad (3)$$

여기서 P 는 극수, I_{ph} 는 상전류 크기를 의미한다.

AC로부터 회전자의 반지름 r 을 구하면,

$$r = \frac{AC \cdot P}{ac \cdot 2\pi} = 8.25\text{cm}, \quad (4)$$

여기서 ac 는 전기비장하로서, 고전적인 설계 관점에서 중형, 고전압 유도전동기의 경우 약 280 340AC/cm 의 값을 가진다. 앞에 서술한 바와 같이 본 논문에서는 전류밀도를 높여 설계할 것이므로 여기서는 약 1.5배인 500AC/cm을 가진다고 가정하였다.

공극에서의 자속밀도 B_g 를 0.65 T 로 가정하면, 적층두께 l 과 공극의 길이 g 는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l = \frac{\phi}{B_g \times 2/\pi \times \tau} \times 10^4 = 20.7\text{cm}. \quad (5)$$

$$g = 10^{-5} \times \frac{AC}{B_g} = 0.066\text{cm}. \quad (6)$$

이론적 설계내용을 바탕으로 결정된 전동기 설계 변수를 요약하여 정리하면 아래와 같다.

표 2 설계 변수

고정자/회전자 슬롯 수	54/39	회전자 반지름 (split ratio)	83.65 mm (0.67)
코일 피치	8/9	적층 두께	200 mm
상당 턴 수	27	공극 길이	0.65 mm

2.4 유한요소법 시뮬레이션

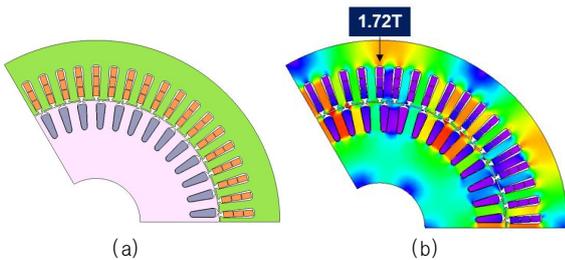


그림 1 (a) 설계 된 유도전동기 (1/3 모델)과 (b) 최대출력 조건 ($260A_{rms}$, $s=0.01$)에서의 자속밀도분포

아래는 슬립 s 에 따른 토크 곡선과, 정격조건에서 토크 파형을 나타낸다. 결과적으로 최대 토크를 250 Nm 이상 얻을 수 있고, 이는 60kW의 설계 목표에 부합한다.

표 3 전류 밀도

정격 출력 전류 밀도 ($160A_{rms}$)	Stator	10.3 A/mm ²
	Rotor bar	9.9 A/mm ²
최대 출력 전류 밀도 ($260A_{rms}$)	Stator	16.8 A/mm ²
	Rotor bar	13.1 A/mm ²

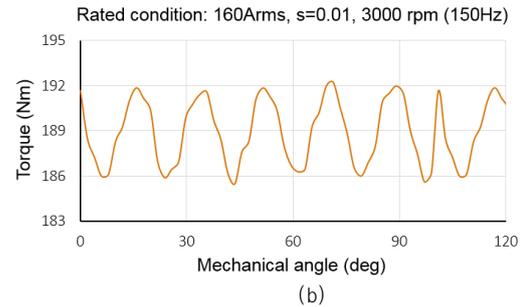
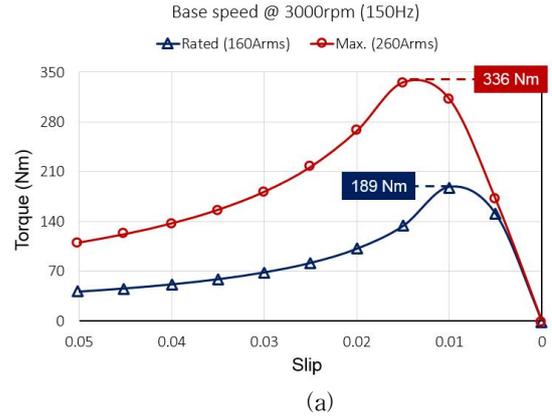


그림 2 정격속도(150Hz)에서의 (a) 토크-슬립 곡선과 (b) 정격 토크($160A_{rms}$, $s=0.01$)

결과적으로 최대 토크를 250 Nm 이상 얻을 수 있고, 정격에서 전류밀도는 10.3A/mm² 으로 냉각 조건에 의해 합리적인 수치로 판단된다. 토크 리플은 약 4% 정도로 나타났다.

3. 결론

IPMSM으로 주로 설계되었던 기존의 전기자동차 구동용 전동기를 대체하기 위해 유도전동기 형태로 설계 가능성을 검토하였다. 유도전동기는 생산 단가가 낮고 환경조건에 대한 안전성이 뛰어나 전기자동차 구동용 전동기로 설계 시 큰 장점이 있다. 낮은 효율과 출력성능의 단점을 개선하기 위하여 냉각 성능을 올려 전류밀도를 높이고, 회전자의 도체를 구리로 하여 효율을 높이는 방법을 제안하였다. 이론적인 방법으로 설계 프로세스를 설명하였고, 이후 시뮬레이션을 통해 설계된 유도전동기의 성능을 알아보았다. 결과적으로 IPMSM을 대체하는 전기자동차 구동용 유도전동기 설계의 가능성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J. L. Kirtley, R. F. Schiferl, D. T. Peters, and E. F. Brush, "The Case for Induction Motors with Die cast Copper Rotors for High Efficiency Traction Motors", SAE Technical Paper 2009 01 0956, Apr., 2009.
- [2] N. Kunihiro, M. Iizaka, M. Sawahata, K. Nishihama, and K. Sugimoto, "Investigation into Loss Reduction Rotor Slot Structure by Analyzing Local Behaviors of Harmonic Magnetic Fluxes of Inverter Feeding Induction Motor", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE, 20 24 Sep., 2015.