

전기 자동차용 견인 전동기 설계 및 극수 변화에 따른 특성 분석

Design of Traction Motor for Electric Vehicle and Characteristic Analysis according to Number of Poles

저자 (Authors)	이동희, 박민로, 차경수, 홍정표 Dng-hee Lee, Min-Ro Park, Kyung-Soo Cha, Jung-Pyo Hong
출처 (Source)	한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회 , 2018.11, 1135-1140(6 pages)
발행처 (Publisher)	한국자동차공학회 The Korean Society Of Automotive Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07593409
APA Style	이동희, 박민로, 차경수, 홍정표 (2018). 전기 자동차용 견인 전동기 설계 및 극수 변화에 따른 특성 분석. 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 1135-1140
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.168.122 2019/05/22 10:30 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

전기 자동차용 견인 전동기 설계 및 극수 변화에 따른 특성 분석

이 동 희 · 박 민 로 · 차 경 수 · 홍 정 표*

한양대학교 미래자동차공학과

Design of Traction Motor for Electric Vehicle and
Characteristic Analysis according to Number of Poles

Dong-Hee Lee · Min-Ro Park · Kyung-Soo Cha · Jung-Pyo Hong*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

Abstract : In this paper, traction motor for Electric Vehicle(EV) is designed according to system requirements, and high power density motor is designed and compared in the same system. The design specifications of the standard motor are Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) of 8pole-48slot of 100kW class, 280Nm for maximum torque and 12,000rpm for maximum speed. The design of the motor was aimed at maximizing the torque density using Response Surface Methodology (RSM). The specifications of the high power density motors to be compared were determined after increasing the reduction gear ratio in the same system specification. Based on the assumption that the carrier frequency of the inverter is the same, the number of poles is determined according to the maximum speed of the motor and the 6pole-36slot model is designed through the same process. The characteristics of the motor such as power density and efficiency were compared according to the design results of the two motors.

Key words : Traction motor(견인 전동기), Electric vehicle(전기 자동차), Interior permanent magnet synchronous motor(매입형 영구자석 동기), Pole-slot combination(극 슬롯 조합), Electrical characteristic(전기적 특성)

Nomenclature

T : torque, Nm
 λ : reduction gear ratio
 η : gear efficiency
 ω : rotational speed, rad/s
 F : force, N
 r : radius, m
 P : power, W
 M : mass of vehicle, kg
 g : gravity acceleration, m/s^2
 f_r : friction coefficient
 A_f : front area of vehicle, m^2
 C_D : air resistance coefficient
 ρ : air density, kg/m^3
 V : velocity, m/s

 a : acceleration, m/s^2

Subscripts

w : wheel
 m : motor
 T : traction
 R : resistance
 r : rolling resistance
 D : drag resistance
 G : grading resistance
 vh : vehicle
 wd : wind

* 홍정표, E-mail: hongjp@hanyang.ac.kr

1. 서론

최근 환경문제의 대두로 배출가스 연비 규제가 강화됨에 따라, 여러 자동차 회사에서는 연비 규제를 충족시키기 위한 각고의 노력을 기울이고 있다. 이러한 연비 규제에 인하여 하이브리드자동차(HEV), 전기자동차(EV)와 같은 친환경 자동차의 개발이 활발하다. 친환경 자동차용 견인 전동기는 고출력화, 고효율화, 경량화의 요구사항을 만족해야 하며¹⁾, 고출력밀도에 유리한 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)타입이 주로 적용된다. 또한, 이와 같은 요구사항을 만족하기 위한 방법으로 높은 감속비의 기어를 적용하여, 고속 저토크의 전동기를 설계하는 방안이 있다. 왜냐하면 전동기의 사이즈는 토크에 비례하기 때문에, 고속화를 통해 동일 출력에서 전동기의 사이즈를 줄이고 경량화를 할 수 있기 때문이다. 그 예로, 도요타 프리우스의 세대별 전동기 사양은 최대속도가 증가하고, 최대토크가 감소하는 고속 저토크화 경향으로 변함을 확인 할 수 있다.

하지만, 전동기의 고속화를 위해서는 회전자의 강성확보를 위해 사이즈를 줄여야 하고, 줄어든 회전자 직경에서 같은 극수의 자석배치에는 한계가 존재한다. 또한 같은 극수에서 고속화는 인버터의 캐리어 주파수를 높여야하는 부담이 있다.²⁾ 그러나, 극수를 줄이게 된다면 같은 캐리어 주파수에서 제어 가능한 장점이 있지만 동일 형상에서 극수 감소는 극당 자로의 길이가 길어지는 단점³⁾도 존재한다. 따라서 동일 시스템 조건에서 극수 변화에 따른 전동기의 특성을 확인해 볼 필요가 있다.

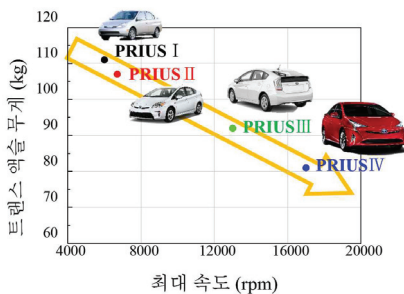


Fig. 1 PRIUS 세대별 전동기 사양 비교 그래프

Table 1 PRIUS Transaxle 세대별 전동기 사양

	PRIUS I	PRIUS II	PRIUS III	PRIUS IV
트랜스 액슬 무게 (kg)	111	107	92	81
최대 속도 (rpm)	6,000	6,700	13,000	17,000
최대 토크 (Nm)	350	400	207	163

본 논문에서는 전기 자동차 견인용 전동기를 시스템 요구사항에 따라 설계하고, 같은 시스템에서 고출력 밀도 전동기를 설계하여 비교하였다. 기준 전동기의 설계사양은 100kW급 8극 48슬롯의 IPMSM으로 최대토크 280Nm, 최대속도 12,000rpm이다. 전동기의 설계는 반응표면법(RSM)을 이용하여, 출력밀도 최대화를 목표로 하였다.⁴⁾ 비교할 고출력 밀도 전동기의 사양은 동일 시스템의 사양에서 감속 기어 비를 증가 시킨 후, 전동기의 요구사항을 결정하였다. 인버터의 캐리어 주파수는 동일하다는 가정으로, 전동기 최대속도에 따라 극수를 결정하고 동일한 과정을 통해 6극 36슬롯 모델을 설계하였다. 두 전동기의 설계결과에 따라 출력 밀도, 효율 등의 전동기의 특성을 비교하였다.

2. 전동기 설계사양

2.1 8극 48슬롯 전동기 설계 사양

기준 전동기는 전기 자동차용 견인전동기로 100kW급 8극 48슬롯 IPMSM이다. 상세 설계 사양은 Table 2 와 같다.

2.2 극 슬롯 수 변화에 따른 사양 결정

2.2.1 Vehicle Dynamics Equations

같은 차량에서 최종 감속단 에서 요구하는 시스템의 요구사항이 일정하며, 차량에 작용하는 구동력 및 차량 가속도 산정은 아래의 식과 같이 결정된다.

$$T_w = \lambda \eta T_m \quad (1)$$

$$\omega_w = \frac{1}{\lambda} \omega_m \quad (2)$$

Table 2 8극 48슬롯 전동기 설계 사양

최대 토크 (Nm)	280
최대 출력 (kW)	100
최대 속도 (rpm)	12,000
냉각 방식	수냉
Carrier frequency (kHz)	12
DC 전압(V_{dc})	360
최대 전류 (A_{rms})	440
기저 속도 (rpm)	3410
감속비	6 : 1

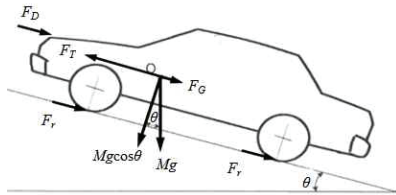


Fig. 2 차량에 작용하는 힘

전동기의 토크는 감속비에 따라 증폭되어 휠로 전달되고, 전동기의 속도는 감속비만큼 감소된다. 차량의 속도와 전동기의 회전 속도의 관계를 (3)과 같이 구할 수 있고, Fig.1의 차량에 작용하는 힘을 F_R 이라 할 때, 차량의 가속도는 (5)와 같이 전개 된다.

$$F_T = \frac{T_w}{r_w} = \frac{\lambda \eta T_m}{r_w} = \frac{\lambda \eta}{r_w} \frac{60P}{2\pi \omega_m} = \frac{\eta}{r_w \omega_w} \frac{60P}{2\pi} \quad (3)$$

$$F_R = Mg f_r \cos \theta + Mg \sin \theta + \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V_{vh} + V_{wd})^2 \quad (4)$$

$$a = \frac{F_T - F_R}{M} \quad (5)$$

위와 같은 차량 동역학 방정식을 통해 시스템의 요구 사항을 만족하는 전동기와 감속기 조합이 다양할 수 있음 확인 할 수 있다. 즉, 8극 48슬롯 전동기 요구사항은 감속비 조합에 따라 아래 Table 3과 같이 여러 조합이 존재 한다(이때 시스템 요구사항은 최대 휠 토크, 최대 휠 속도를 의미하며 기어효율은 100%라 가정한다). 하지만 감속기어의 경우 기어비가 높아질수록 토크 밀도가 감소하고, 설계에 제한

Table 3 시스템 요구사항을 만족하는 조합 예시

	시스템 요구사항	기준모델 (8p48s)	조합1	조합2	조합3
최대 토크 (Nm)	1,680	280	210	140	70
최대 출력 (kW)	-	100	100	100	100
최대 속도 (rpm)	2,000	12,000	16,000	24,000	48,000
감속비	-	6:1	8:1	12:1	24:1

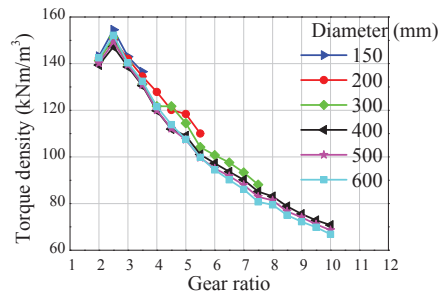


Fig. 3 기어 비에 따른 유성기어의 토크밀도

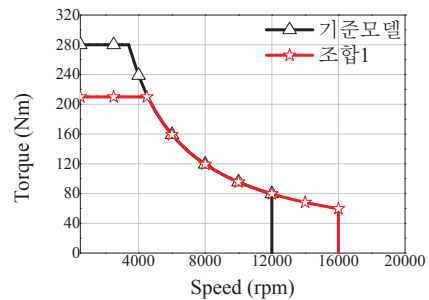


Fig. 4 감속비에 따른 전동기 TN Curve 변화

이 있다⁵⁾(Fig. 3). 본 논문에서는 시스템의 최대 감속비를 10:1 이하로 제한하고 8극 48슬롯의 기준모델과 조합1에 대한 전동기 설계를 진행하였다(Fig. 4).

2.2.2 Carrier frequency

Carrier frequency는 PWM 구동 시 삼각 반송파 (Carrier Wave)의 주파수를 의미하며, 정현적인 전류를 인가하기 위해서는 특정 주파수 이상이 돼야 한다. 그 관계는 (6)과 같으며 전동기의 최대 속도와 극수가 관련이 있다.

$$\text{Carrier frequency} > \frac{n_{\max}(\text{rpm})}{60} \times p \times 15 \quad (6)$$

이때, n_{\max} 는 전동기의 최대속도, p 는 pole pair를 의미한다. 기준전동기의 경우 최대 속도 12,000rpm이며, p 는 4이므로 12kHz로 계산되고 인버터 제한 사양을 만족한다.

조합 1의 경우, 최대 속도 16,000rpm이며, 같은 극수 선정 시, 요구되는 carrier frequency는 16kHz 이상을 요구한다. Carrier frequency 사양 변동은 인버터의 개선의 요구되므로, 본 논문에서는 이를 제한 사항으로 가정하였다. 따라서 조합1의 성능 만족을 위해 극수를 줄이는 방안을 고려하였다.

2.2.3 극 슬롯 수 선정

조합 1의 요구사항에 대해 carrier frequency의 제한 조건을 만족하는 극수는 6극 이하이다. 하지만, 앞서 언급하였듯이 극수의 감소는 극당 자로의 길이를 증가시켜 출력 확보에 불리하다. 또한, 기준모델과 동일한 분포권 권선계수를 갖는 극/ 슬롯 조합을 선택하여, 권선계수에 따른 성능변화를 배제하였다. (7)의 식을 통해 동일 상수에서 같은 권선계수를 가지는 극 슬롯 수 조합을 찾을 수 있다. (권선 방식 또한 동일하다.)

$$q = \frac{N_s}{2p \times m} = \frac{48}{8 \times 3} = \frac{36}{6 \times 3} \quad (7)$$

q 는 매극 매상당 슬롯수, N_s 는 슬롯수, m 은 상 수를 의미한다. 따라서 본 논문에서는 8극 48슬롯과 동일한 권선계수를 갖는 6극 36슬롯의 전동기를 비교대상 전동기로 선정하였다. 두 대상 전동기의 사양은 Table 4와 같다.

3. 전동기 설계

두 전동기는 2층권의 IPMSM 타입이며, 동일한 과정으로 설계하였다. 전동기의 초기 설계를 통해 설계 사양을 만족하는 전동기를 설계하였고, 기저 속도와 최대 속도에서 선간 유기전압이 DC 전압을 넘지 않는지를 확인 하였다. 개선 설계에서 반응표면법(RSM)을 이용하여 토크밀도를 최대로 갖는 전동기를 설계하였다. 회전자 강성해석을 통해 최대 속도에서 리브와 브릿지의 파단 발생여부를 확인하였다.

Table 4 전동기 설계 사양 비교

	기준 모델	비교 모델
극 / 슬롯 수	8극48슬롯	6극 36슬롯
최대 토크 (Nm)	280	210
최대 출력 (kW)	100	
최대 속도 (rpm)	12,000	16,000
냉각 방식	수냉	
Carrier frequency (kHz)	12	
DC 전압(V _{dc})	360	
최대 전류 (A _{rms})	440	
기저 속도 (rpm)	3410	4550
감속비	6 : 1	8 : 1

4. 극 슬롯 수 변화에 따른 전동기 성능 검토

설계 사양에 따라 설계한 두 전동기의 결과는 다음과 같다. Fig. 5는 설계한 8극 48슬롯 IPMSM과 6극 36슬롯 IPMSM 형상을 나타낸다. 구체적인 전동기 성능 비교를 통해 극 슬롯 수 변화에 따른 전동기의 성능에 대해 논의 하겠다.

4.1 두 대상 전동기 형상 치수 및 성능비교

두 전동기의 구체적인 성능은 Table 5에서 확인할 수 있다. 전동기 사이즈와 토크는 비례하는 관계에 있고 시스템 기어 비 증가에 따라 전동기의 토크 요구 성능이 감소하였고, 이는 전동기의 부피 감소를 통해 확인 할 수 있다. 설계 결과 8극 48슬롯의 전동기는 6극 36슬롯 전동기 대비 부피가 약 21% 더 크다.

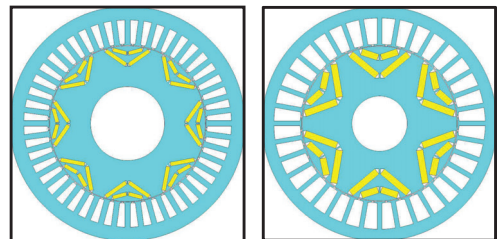


Fig. 5 설계한 두 전동기 형상(8극48슬롯, 6극36슬롯)

Table 5 두 대상 전동기 dimension 및 주요 성능

	기준 모델	비교 모델
극 / 슬롯 수	8극48슬롯	6극 36슬롯
고정자 외경 (mm)	190	170
회전자 외경 (mm)	126	112
적층 길이 (mm)	124	128
부피 비	1.21	1
토크(Nm)	280	210
토크밀도(kNm/mm ³)	79.64	72.28
전동기 무게(kg)	25.3	20.6
출력밀도(kW/kg)	3.96	4.85
턴 수	10	15
최대 전류 밀도(A _{rms} /mm ²)	19.42	19.32
자석 사용량 비	1	1.37

두 전동기의 부피와 재질정보를 이용하여 전동기의 무게를 예측할 수 있다. 따라서 6극 36슬롯 전동기의 무게가 가볍고 출력밀도가 더 높음을 확인 할 수 있다. 두 전동기의 최대 전류밀도는 20A_{rms}/mm² 이하로 요구사항을 만족한다. 성능 확보를 위해 6극 36슬롯의 전동기의 자석 사용량이 증가함을 확인할 수 있다.

4.2 두 대상 전동기 특성 곡선 및 효율 맵

전동기의 특성 곡선과 효율 맵을 통해 전동기의 운전 특성을 확인 할 수 있다. 특성곡선은 DC 전압 제한을 360V_{dc}, 상 전류 제한 440A_{rms}, 온도 100℃의 조건의 그래프 이며, 효율맵은 동일 제한조건에서 MTPA 제어, 철손/동손 포함, 기계손은 포함하지 않는다.

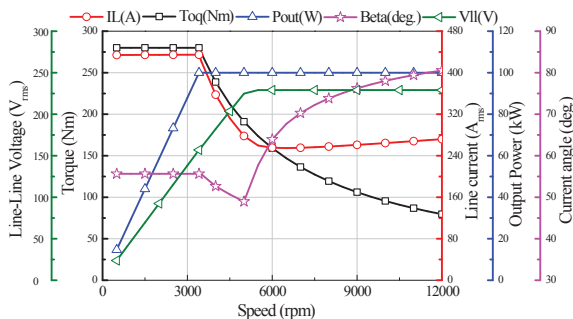


Fig. 6 8극 48슬롯 IPMSM 특성 곡선

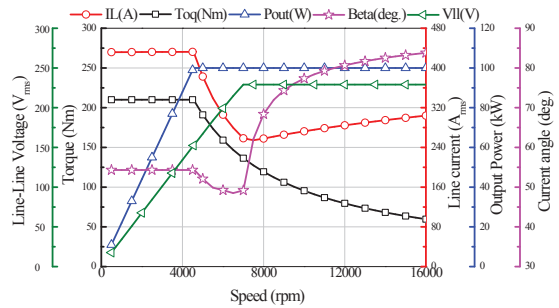


Fig. 7 6극 36슬롯 IPMSM 특성곡선

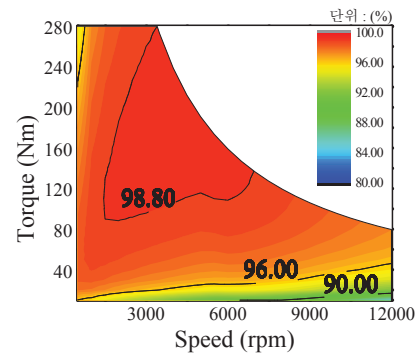


Fig. 8 8극48슬롯 IPMSM 효율맵

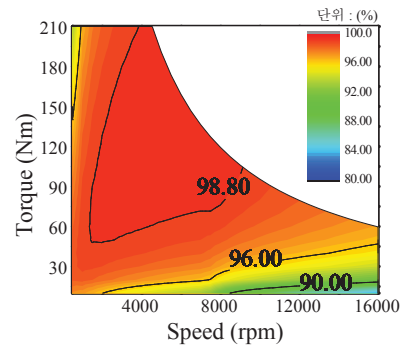


Fig. 9 6극36슬롯 IPMSM 효율맵

5. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 견인전동기용 8극 48 슬롯 IPMSM 기준모델로 설계하고, 동일 시스템 요구사항을 만족하는 6극 36슬롯 IPMSM 비교모델을 설계 하였다. 비교모델은 감속비를 높인 고속 저토

크 전동기이며, 기준 모델 대비 전동기 사이즈 저감, 경량화, 고출력밀도 설계를 확인하였다.

하지만 비교모델은 회전자 사이즈가 감소함에 따라 공극 단면적이 줄어들어 토크 확보에 어려움이 있었고, 자석사용량을 늘려 성능 요구사항을 만족시켰다.

논문에서는 기어비, carrier frequency 등의 제약사항을 가정하여 시스템 사양을 결정하였지만, 제약사항 변동을 통해 다른 특성의 고속 저토크 전동기 설계 또한 가능할 것이다. 다만, 설계시스템의 기어비를 높이게 되면 감속기어의 내구성 확보 문제 등의 시스템 설계 요구사항이 증가하고 인버터의 carrier frequency를 높이기 위해서는 높은 사양의 스위칭 소자가 필요하므로, 전동기 설계 시 이를 고려해야 한다.

References

- 1) Byongjo Hyon, Yong-Su Noh, Joon Sung Park, Jin-Hong Kim and Jun-Hyuk Choi, 2018, "Development of High Power Density Traction Inverter," Power Electronics Annual Conference, , pp. 292~293.
- 2) Kwon-Il Park, Kyoung-Soo Cha, Myung-Hwan Yoon and Jung-Pyo Hong, 2017, "Analysis of Electrical and Vibration Characteristics for Electric Vehicle Traction Motors According to the Pole-Slot Combination," 한국자동차공학회 춘계학술대회, , pp. 1159~1163.
- 3) Do-Jin Kim, Soon-O Kwon, Jeong-Jong Lee, Jae-Woo Jung and Jung-Pyo Hong, 2010, "A Study on size of rotor considering pole number to satisfy maximum torque in permanent magnet motor," 대한전기학회 학술대회 논문집, , pp. 742~743.
- 4) Dong-Kyun Son, Young-Hoon Jung, Myung-Hwan Yoon and Jung-Pyo Hong, 2017, "Power Density Improvement Design of Motor for PHEV by Optimization," 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, , pp. 1297~1301.
- 5) E. Gouda, S. Mezani, L. Baghli and A. Rezzoug, "Comparative Study Between Mechanical and Magnetic Planetary Gears," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 2, pp. 439-450, Feb. 2011.