



## 전기자동차 견인용 전동기의 극 수 슬롯 수 조합에 따른 전기적 특성 및 진동 특성 분석

Analysis of Electrical and Vibration Characteristics for Electric Vehicle Traction Motors According to the Pole-Slot Combination

---

저자 (Authors)	박권일, 차경수, 윤명환, 홍정표 Kwon-Il Park, Kyoung-Soo Cha, Myung-Hwan Yoon, Jung-Pyo Hong
출처 (Source)	<a href="#">한국자동차공학회 춘계학술대회</a> , 2017.5, 1159-1163 (5 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국자동차공학회</a> The Korean Society Of Automotive Engineers
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07205093">http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07205093</a>
APA Style	박권일, 차경수, 윤명환, 홍정표 (2017). 전기자동차 견인용 전동기의 극 수 슬롯 수 조합에 따른 전기적 특성 및 진동 특성 분석. 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1159-1163.
이용정보 (Accessed)	한양대학교(서울) 166.***.168.148 2017/11/30 23:30 (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.

# 전기자동차 견인용 전동기의 극 수 슬롯 수 조합에 따른 전기적 특성 및 진동 특성 분석

박 권 일 · 차 경 수 · 윤 명 환 · 홍 정 표

한양대학교 미래자동차공학과

## Analysis of Electrical and Vibration Characteristics for Electric Vehicle Traction Motors According to the Pole-Slot Combination

Kwon-Il Park\* · Kyoung-Soo Cha · Myung-Hwan Yoon · Jung-Pyo Hong

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

**Abstract :** The greenhouse effect is getting worse in these days. To reduce this environmental problem, emission regulation in the automotive industries became strict. Accordingly, the automotive makers started to develop the environmental friendly vehicles such as the hybrid electric vehicle(HEV) and the electric vehicle(EV). EV is an excellent alternative for conventional combustion engine vehicle. As high torque and wide operation range are essential for EV traction motor. Recently, it is necessary to design an electric motor having excellent vibration characteristics as well as electrical characteristics in accordance with the desire of the consumer who demands a comfortable riding condition. This paper deals with electrical and vibration characteristic of a traction motor for EV depending on pole-slot combination. First, four motors having the same output and different number of slots were selected. Second, the electrical characteristics such as average torque and torque ripple induced voltage of each motor were compared using finite element analysis. Third, the vibration order of the four models is calculated numerically and the vibration characteristics of each motor are compared. Finally number of pole slot combinations suitable for traction motor using the results of electrical and vibration characteristics.

**Key words :** Electric vehicle(전기 자동차), Electrical characteristic(전기적 특성), Pole-Slot Combination(극 슬롯 조합), Traction motor(견인 전동기), Vibration characteristic(진동 특성)

### Nomenclature

$p$  : pole-pair number  
 $n$  : Harmonic order  
 $k_{wn}$  : winding factor of nth order harmonic  
 $k_{dn}$  : distribution factor of nth order harmonic  
 $k_{pn}$  : pitch factor of nth order harmonic

$k_{sn}$  : skew factor of nth order harmonic  
 $m$  : phase number  
 $q$  : slots per pole per phase  
 $\beta$  : coil pitch per pole pitch  
 $\gamma$  : skew angle(electric)  
 $T_{max}$  : Maximum torque, Nm  
 $T_{min}$  : Minimum torque, Nm  
 $T_{avg}$  : Average torque, Nm  
 $P_r$  : Radial force density, Nm/m<sup>2</sup>  
 $B_r$  : Radial flux density, T  
 $\mu_0$  : Air permeability, H/m

\* 박권일, E-mail: zkdn7769@hanyang.ac.kr.

## 1. 서론

최근 환경오염 문제가 중요한 과제로 대두되고 있는 현실에서 특히 대기오염은 자동차의 배출가스에 의해 이루어지고 있다는 인식에 따라 전 세계적으로 배출가스로 인한 오염 및 온실효과를 줄이고, 화석연료의 고갈 문제를 해결할 전기자동차(Electric Vehicle, EV) 또는 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle, HEV)에 대한 관심이 전 세계적으로 높아지고 있다. 특히 미국 캘리포니아 주를 시작으로 여러 주에서 무배기 자동차 및 저공해 자동차 의무 판매 사항을 입법화하여 배기가스 규제를 실시하고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 협약은 불이행시 무역규제 조치가 이루어지기 때문에, 전기자동차나 하이브리드 자동차의 개발은 선택이 아닌 필수가 됐다. EV에 있어서 기존 자동차의 엔진에 해당하는 견인용 전동기는 필수적인 부품의 하나로써 자동차 기동의 동력원이 된다. 따라서, 견인용 전동기의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 전기자동차 견인용 전동기는 고효율, 고풍력 그리고 넓은 운전 영역 조건을 만족시켜야 한다. 또한, 최근 편안하고 안락한 승차 조건을 요구하는 소비자의 욕구를 반영하여 전기적인 특성뿐만 아니라 진동 특성이 우수한 전동기를 설계하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 전기자동차 견인용 전동기 극수 슬롯수 조합에 따른 전기적인 특성과 진동 특성을 분석했다. 목표사양을 만족하는 4개의 슬롯수가 다른 전동기의 모델의 권선계수, 역기전력의 크기 및 THD, 토크리플 및 코깅토크를 살펴볼 것이다. 또한, 진동특성을 알아 보기 위하여 방사방향의 전자기력의 Vibration order를 살펴볼 것이다.

## 2. 목표 사양과 비교 모델

### 2.1 목표 사양

본 논문에서 다룰 EV Traction용 전동기는 30kW의 최대출력을 갖는 매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)이다. 동일 출력과 부피를 가지며, 극 수 슬롯 수가 다른 전동기의 전기적 특성과 진동특성을 비교한다.

### 2.2 극 수 선정

정현적인 전류를 인가하기 위한 인버터의 최소 Carrier frequency는 식 (1)에서 나타낸다. 대상 전동기 인버터의 Carrier frequency가 13kHz임을 고려하면, 정현적인 전류를 인가하기 위한 전동기의 최대 극 수는 8극이다.

$$\text{Carrier frequency} > \text{최대속도[rps]} \times p \times 15 \quad (1)$$

### 2.3 슬롯 수 선정

슬롯 수를 선정 하기 위하여 권선계수를 이용하였다. 전동기는 전기자 권선방식에 따라 전기 에너지의 입출력 특성이 달라진다. 권선계수는 무부하 역기전력에 영향을 미치며 이는 출력에 직접적으로 기여한다. 권선계수는 분포계수, 단절계수, 스큐계수의 곱으로 표현된다. 권선계수는 식 (2)과 같이 표현되며 식 (3), (4), (5)는 각각 분포계수, 단절계수 스큐계수를 나타낸다.

$$k_{wn} = k_{dn} \times k_{pn} \times k_{sn} \quad (2)$$

$$k_{dn} = \frac{\sin(n\pi / 2m)}{q \sin(n\pi / 2mq)} \quad (3)$$

$$k_{pn} = \sin(n\beta\pi / 2) \quad (4)$$

$$k_{sn} = \frac{\sin(n\gamma / 2)}{(n\gamma / 2)} \quad (5)$$

위의 수식을 이용하여 권선계수를 구하였으며, 비교모델의 경우 전동기의 출력을 만족하기 위하여 권선계수의 기본파는 0.9이상, 토크리플을 저감하기 위하여 권선계수의 고조파가 낮은 극 수 슬롯 수 조합을 선택하였다. Table 1은 조건에 만족하는 극 수 슬롯 수의 기본파 및 5차, 7차 고조파 권선계수이다. Fig. 1은 위의 조건을 만족하고, 슬롯 수만 다른 4개의 비교 모델 전동기 형상을 나타낸다.

Table 1 Winding factor

Pole / Slot	Winding factor( $k_{wm}$ )		
	$k_{w1}$	$k_{w5}$	$k_{w7}$
8 / 36	0.945	0.140	0.061
8 / 48	0.933	0.067	0.067
8 / 60	0.951	0.173	0.111
8 / 72	0.945	0.140	0.061

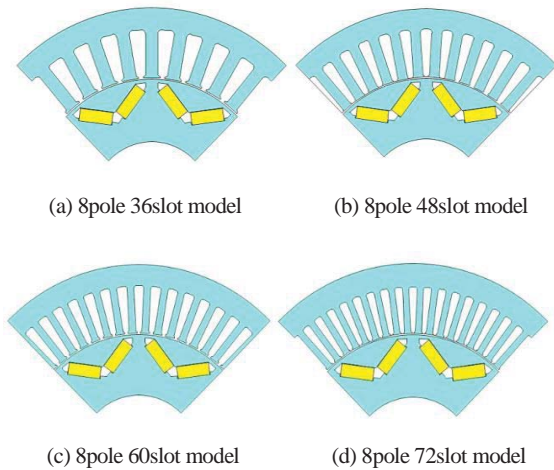


Fig. 1 Configuration of analysis model

### 3. 전기적 특성 비교

#### 3.1 무부하 역기전력 및 부하시 유기전압

무부하 역기전력은 전동기 출력에 직접적인 영향을 미친다. 특히 무부하 역기전력의 기본과 성분은 토크의 기본과 성분을 만들기 때문에 높을수록 전기적인 특성이 우수하고, 무부하 역기전력의 고조파 성분은 토크의 고조파 성분 즉 토크리플을 만들기 때문에 낮을수록 토크리플을 저감 할 수 있다.<sup>2)</sup> Fig. 3과 Fig. 4는 각 비교모델의 1000rpm에서의 선간 역기전력의 파형과 고조파 분석 결과이다. Fig. 5는 최대속도에서의 선간 유기전압과 전압제한을 나타낸다. 전압제한의 경우 인버터 배터리단 전압이며, 전압제한은 240V이다.

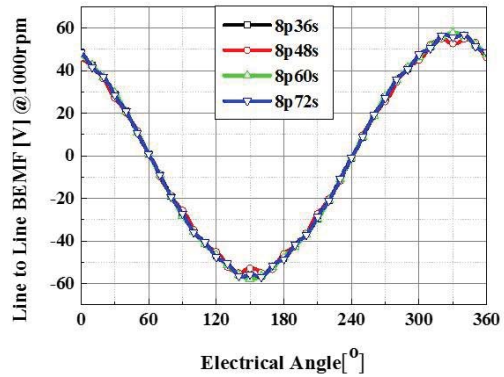


Fig. 3 Back electromotive force of analysis models

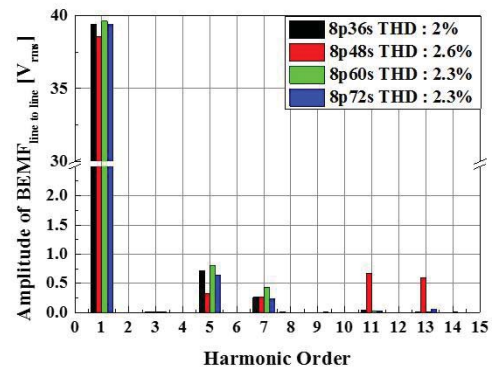


Fig. 4 Harmonic magnitude of Back electromotive force

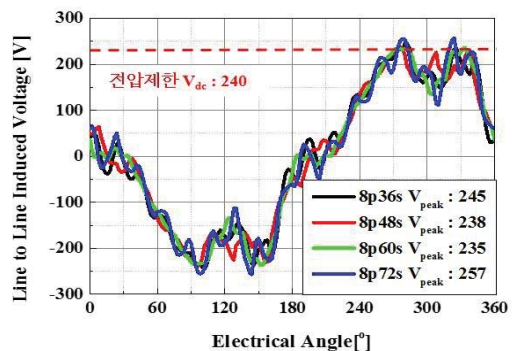


Fig. 5 Induced Voltage and Voltage limit

#### 3.2 코깅토크 및 토크리플

코깅토크는 영구자석 전동기의 구조적인 특징에 의해 발생하는 것으로 고정자 치에 불균형적인 힘이 작용하여 발생하는 토크다. 코깅토크의 주기는

극 수와 슬롯수의 최소공배수(LCM)이며, LCM이 클수록 코깅토크의 크기는 작아진다. Table 2은 각 비교모델의 최소공배수와 코깅토크를 나타낸다.

토크리플은 식 (6)과 같이 표현되며, 평균토크를 기준으로 토크가 얼마나 떨리는지를 나타내는 지표이다. 토크리플은 전동기의 진동 소음의 원인이 되기 때문에 토크리플이 작을수록 좋다. Fig. 6과 Table 3는 비교모델의 토크파형과 평균토크 및 토크리플을 각각 나타내었다.

Table 2 Cogging torque of analysis models

Pole / Slot	LCM	Cogging torque peak to peak [Nm]
8 / 36	72	0.8
8 / 48	48	2
8 / 60	120	0.21
8 / 72	72	1.03

$$\text{Torque ripple}[\%] = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{avg}}} \times 100[\%] \quad (6)$$

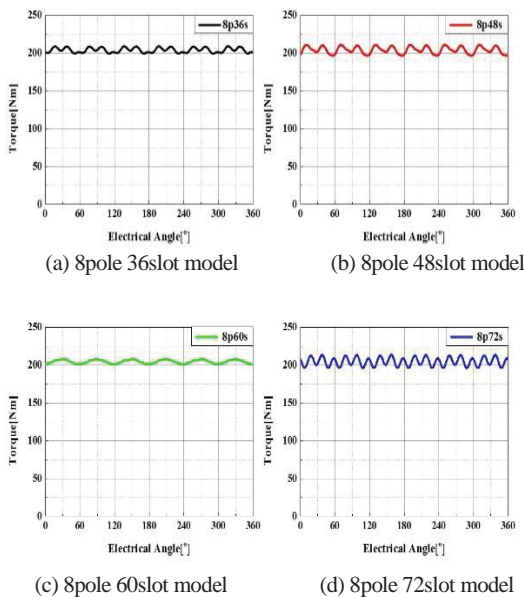


Fig. 6 Torque of analysis models

Table 3 Average torque and torque ripple of analysis models

Pole / Slot	Average torque [Nm]	Torque ripple [%]
8 / 36	204.0	2.67
8 / 48	204.1	3.44
8 / 60	204.5	1.75
8 / 72	204.6	4.35

## 4. 진동 특성 비교

### 4.1 Radial force density

공극에서의 Radial force density는 고정자 치의 진동을 유발하게 되고, 이는 고정자 외경의 떨림을 만들어 전동기의 진동을 야기한다. 이때, Radial force density의 공간적인 분포는 전동기의 극 수와 슬롯수에 의하여 결정이 되며, 공간적인 분포의 차수를 Vibration order라고 한다. Vibration order와 고정자의 변형량은 식 (7)과 같이 Vibration order의 네 제곱에 반비례하여 증가하게 되므로 Vibration order가 낮은 극 수 슬롯 수 전동기는 진동에 취약하다.<sup>3)</sup> 따라서 Vibration order가 크도록 설계하는 것이 유리하다. Radial force density는 유한요소 해석을 이용하여 부하시 공극자속밀도를 구한 후 식 (8)과 같이 Maxwell stress tensor를 이용하여 산정하였다.

$$\Delta d \propto \frac{1}{(\text{vibration order})^4} \quad (7)$$

$$P_r(\theta, t) = \frac{B_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (8)$$

Fig. 7은 공간과 시간의 함수로 표현된 Radial force density를 Spectrum 분석을 통하여 비교모델의 전원 주파수 2배성분 즉, Radial force density의 기본파 성분의 크기를 정규화하여 나타내었으며, 이때 발생하는 Vibration order를 나타내었다.

Fig. 8은 위의 식 (7)를 이용하여 앞서 확인한 Radial force density를 변형량으로 변환하여 그 크기를 정규화 하여 나타내었다.

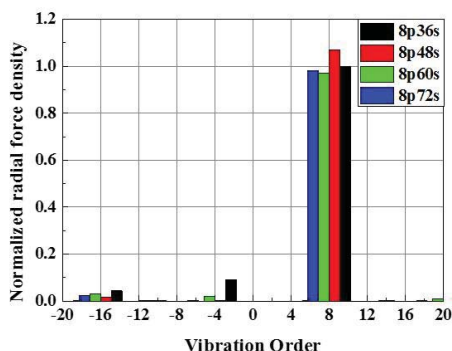


Fig. 7 radial force density spectrum analysis of models

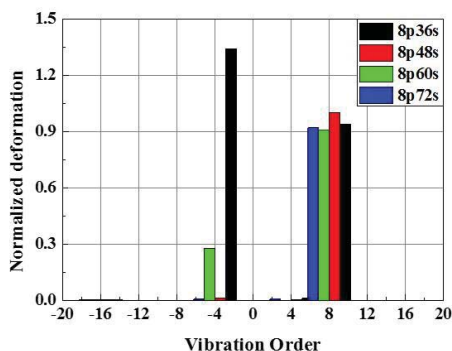


Fig. 8 Normalized deformation of models

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전기자동차용 견인용 전동기의 출력이 동일하고 슬롯 수가 다른 4개의 모델의 전기적 특성과 진동 특성을 비교하였다. 전기적 특성 중 무부하 역기전력은 기본과 크기가 가장 큰 8극 60슬롯 모델이 가장 유리하다. 부하시 유기전압의 경우 8극36슬롯과 8극72슬롯의 경우 유기전압의 최대값이 전압제한을 만족하지 못하였다. 또한 코 킥토크 및 토크리플의 경우 8극60슬롯이 유리하다. 진동 특성의 경우 8극36슬롯, 8극60슬롯의 저차 Vibration order는 4이고, 8극48슬롯, 8극72슬롯의 저차 Vibration order는 8이다. 따라서, 진동특성은 8극 48슬롯 및 8극 72슬롯이 다른 모델에 비하여 유리하다.

따라서, 전기적인 특성은 8극60슬롯이 다른 모델에 비하여 우수하다. 하지만, Vibration order가 8극 48슬롯과 8극72슬롯에 비하여 낮아 진동 특성은 불

리함을 알 수 있었다. 또한, 8극 72슬롯은 고속운전시 선간 유기전압 성분이 전압제한 조건을 만족시키지 못한다. 따라서, 전기적인 특성과 진동 특성을 모두 고려하면 8극48슬롯 모델이 EV Traction motor로 적합하다.

#### Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2017-2012-0-00628)

#### References

- 1) Kyoung-Soo Cha, Dong-Min Kim, Myung-Seop Lim, Jung-Pyo Hong, "Comparison of Vehicle Efficiency Applying Rare Earth Free Concentrated-Flux Synchronous Motor and Rare Earth Interior Permanent Magnet Synchronous Motor According to Driving Cycle", KIEE Conf. 858-859, 2015
- 2) Jun-Woo Chin, Min-Ro Park, Hae-Joong Kim, Jung-pyo Hong, "Characteristic Comparison of Concentrated and Distributed Winding of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for EV Traction", KSAE Conf. , 1030-1034, 2015
- 3) Chang-Wook Shin, Hyung-Soo Son, Myung-Hwan Yoon, Jung-pyo Hong, "Study on the Combination of the Number of Pole and Slot of IPMSM for Vibration Reduction of Electromagnetic Force Fundamental Harmonic Component", KIEE Conf. 726-727, 2015