

## 극 수와 슬롯 수 조합에 따른 HEV용 IPMSM의 특성 비교 및 분석

정재우, 권순오, 홍정표  
한양대학교 자동차공학과

### Characteristic Analysis and Comparison of IPMSM for HEV According to Pole and Slot Combinations

Jung Jae-Woo, Kwon Soon-O, Hong Jung-Pyo  
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

**Abstract** - Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) for traction motor in the hybrid electric vehicle (HEV) has different parameters and characteristics according to pole and slot combinations. The fitting combination of pole and slot in the IPMSM improves characteristics of traction system ultimately. This paper deals with analyzing the characteristics of IPMSM for mild type HEV according to pole and slot combinations. Based on the result of characteristics, suitable pole and slot combination is presented to maximize efficiency of traction motor in the HEV system.

#### 1. 서 론

최근 자동차의 배기가스로 인한 대기오염 및 지구 온난화와 같은 문제의 대책의 일환으로 대체에너지의 개발 및 고효율 기기 설계에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히 자동차 분야에서는 Hybrid electric vehicle (HEV), Fuel cell electric vehicle (FCEV), Electric vehicle (EV)의 개발에 기업과 대학에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 전기에너지로 구동되는 FCEV와 EV의 경우 배터리 또는 연료전지 성능의 한계를 극복하지 못하고 있어 HEV가 중단기적인 대안으로 기대되고 있다. HEV는 동력원인 엔진/모터/배터리를 조합하여 기존 차량성능을 만족하면서 연료소모량과 배기가스량을 줄이는 것이 핵심 기술이다[1]. 이러한 HEV의 연비향상을 위해서는 주행상태에 따라 내연기관과 전동기의 구동을 적절히 제어해주는 최적제어전략이 필요하다[1]. 하지만 이러한 제어전략 이전에 선행되어야 할 것이 구동 전동기의 성능을 극대화 시키는 것이라고 판단된다.

전동기는 극 수와 슬롯 수의 조합에 따라 권선계수, 인덕턴스, 발생 force 등과 같은 특성들이 서로 다르므로 초기 설계 시 부하 상태에 따라 조합을 적절하게 선택해야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 HEV 구동 시스템의 성능향상을 위하여 설계된 배입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 특성분석에 대해서 다루고자 한다. 극 수와 슬롯 수의 조합이 다른 세 가지 IPMSM의 특성을 비교하고 HEV 구동 전동기에 적합한 극 수 및 슬롯 수 조합을 제시하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 설계 대상의 극 수 및 슬롯 수 조합

전동기를 설계함에 있어 극 수와 슬롯 수의 조합은 전동기의 사용 목적 및 구동 방식 등에 따라 초기 설계 단계에서 결정되어야 하는 중요한 요소이다. 전동기 설계에 있어 가장 중요한 파라미터 중의 하나는 역기전력으로써 전동기의 출력 및 성능에 큰 영향을 준다. 전동기가 동일한 도체수와 영구자석 체적을 가진다고 할 때 극 수와 슬롯 수의 조합에 따라서 역기전력은 각각 다른 값을 가진다. 표 1은 공간고조파 이론을 적용하여 얻은 역기전력을 이용하여 극 수와 슬롯 수 조합에 따른 권선계수를 나타낸 것이다[2]. 본 논문에서 검토한 HEV용 IPMSM은 리플비 보정 연산 용이성을 위하여 12극과 16극에 대해 검토하였으며, 권선 분포가 대칭적이면서 권선계수가 비교적 높은 12극 18슬롯, 16극 18슬롯 그리고 16극 24슬롯 모델에 대하여 설계하였다.

##### 2.2 형상 및 구조

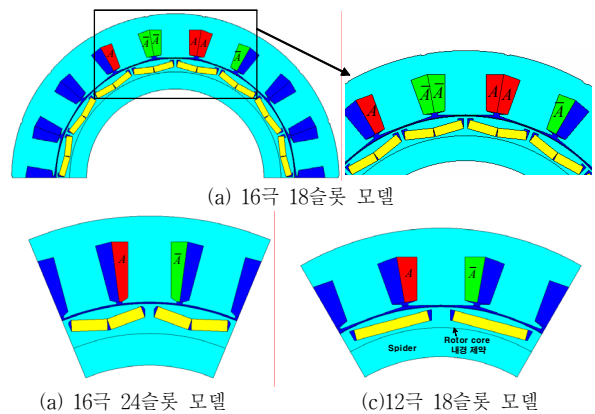
최적설계를 통해 설계된 세 가지 모델의 형상 및 구조는 그림 1.과 같으며, 자기적으로 대칭을 이루는 부분만을 나타내었다. 16극 18슬롯의 권선 형태는 한 상의 권선이 공간적으로 한 부분에 집중된 형태로써 나머지 두 모델과는 다른 권선분포를 가진다. 로터코어의 내경에 제약이 있어 12극 모델의 경우 영구자석의 형상을 -형태로 가져갔다.

##### 2.3 파라미터 및 특성해석 결과 비교

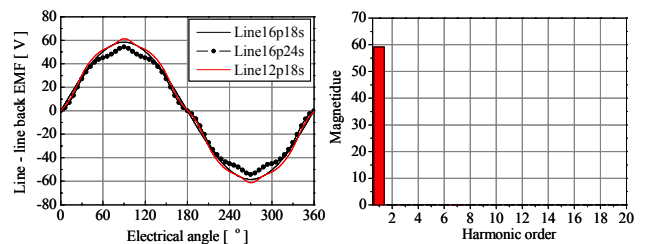
원하는 특성을 만족시키는 전동기를 설계하기 위해서는 정확한 파라

〈표 1〉 극 수 슬롯 수 조합에 따른 집중권 모델의 권선계수

극 수 \ 슬롯 수	4	6	8	10	12	14	16
6	0.866		0.866	0.500		0.500	0.866
9	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328
12			0.866	0.933		0.933	0.866
15			0.711	0.866		0.951	0.951
18				0.735	0.866	0.901	0.945
21						0.866	0.891
24						0.760	0.866



〈그림 1〉 해석 모델의 형상 및 구조



(a) 선간 역기전력 (b) 역기전력의 고조파 분석 (16극18슬롯)

〈그림 2〉 검토대상 모델의 역기전력 해석 결과

미터의 산정이 중요하다. 수치해석기법을 사용하여 각 전동기의 역기전력과 인덕턴스를 산정하였다. 특성해석은 d-q축 등가회로 시뮬레이션을 이용하여 수행하였다[3].

##### 2.2.1 역기전력

수치해석기법 중의 하나인 유한요소해석법을 사용하여 세 가지 모델에 대한 역기전력을 산정하였다. 그림 2의 (a)는 각 모델의 역기전력 해석결과를 나타낸 것이며 그림2의 (b)는 16극 18슬롯 모델의 고조파 분석을 한 결과이다. 극 당 슬롯 수가 분수의 값을 가지는 16극 18슬롯 모델의 경우 역기전력의 THD가 0.1%로써 THD가 각각 7.0%와 4.3%인 16극 24슬롯 모델과 12극 18슬롯 모델에 비하여 현저히 낮음을 알 수 있으며, 이것은 16극 18슬롯 모델이 철손 저감에 유리하다는 것을 간접적으로 보여준다[4].

### 2.2.2 인덕턴스 및 돌극비

설계된 전동기의 특성을 분석하기 위하여 d-q축 등가회로 시뮬레이션을 수행하였다. 세 모델 모두 동일한 출력 및 특성을 만족 할 때 d-q축 인덕턴스와 돌극비를 비교해 본 결과 그림 3의 (a)에서 보듯와 같이 대체로 세 모델 모두 속도가 증가 할수록 d-q축 인덕턴스도 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 그림 3의 (b)에서 확인 할 수 있듯이 16극 18슬롯 모델의 경우 d-q축 인덕턴스의 비인 돌극비가 다른 두 모델에 비해 약 40~50% 작은 것을 확인 할 수 있다. 이것은 16극 18슬롯 모델이 다른 두 모델에 비해 토크 인덕턴스 토크 확보에 불리하다는 것을 보여준다. 하지만 권선계수가 높은 16극 18슬롯 모델은 동일 직렬 턴 수에서 나머지 두 모델대비 약 9% 높은 역기전력을 확보할 수 있으므로 동일한 토크를 확보하기 위한 입력전류는 모델과 비슷한 크기를 갖는다.

### 2.2.3 부하 시 역기전력

IPMSM의 경우 넓은 운전영역을 확보하기 위하여 약계자 제어가 필수적이다[5]. 약계자 제어를 할 때 부하 시 역기전력의 왜형에 의하여 전류 고조파가 증가하고, 이로 인하여 철손이 증가하는 경향이 있다. 그림 4는 세 가지 모델의 부하 시 역기전력 파형을 나타낸다. 낮은 운전영역에서의 부하 시 역기전력의 THD는 세 모델 모두 20%내에서 만족하지만 전류위상각이 약 80°까지 올라가는 6000rpm에서의 부하 시 역기전력의 THD는 16극 18슬롯 모델이 나머지 두 모델에 비해 현저하게 작은 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이러한 사실은 16극 18슬롯 모델이 고속영역에서의 전류제어 성능확보 측면에서 유리할 뿐만 아니라 철손저감 측면에서도 유리한 특성을 지닌다는 것을 간접적으로 보여준다.

### 2.2.4 코깅토크 및 토크리플

운전자의 편안한 승차감을 위하여 HEV 구동용 전동기의 코깅토크 및 토크리플은 최소가 되도록 설계 하여야 한다. 특히 약계자 구간에서의 토크리플은 전류위상각이 작은 운전 영역에서 보다 크게 나타나는 경향이 있다. 하지만 그림 5에서 보듯와 같이 16극 18슬롯 모델은 다른 두 모델에 비하여 코깅토크와 토크리플이 매우 작다. 이것은 극 수와 슬롯 수의 비가 분수 비이기 때문인데, 이러한 특징은 HEV구동용 전동기에 있어 EV(electric vehicle) mode 동작 시 매우 유리하게 작용될 수 있을 것이라 판단된다.

### 2.2.5 Normal force

전동기의 소음과 진동에 지배적인 영향을 미치는 원인으로써 앞서 언급한 코깅토크와 토크리플 외에 normal force를 들 수 있다. 전동기에 전류를 인가하였을 때 회전방향으로 토크를 발생시키는 힘 외에 normal 방향 성분의 힘이 존재하게 된다. 이와 같은 normal force는 극 수와 슬롯 수의 조합에 따라서 각각 다른 양상으로 발생하게 된다. 그림 6은 본 논문에서 검토하고 있는 세 가지 모델의 기계 각에 따른 normal force를 나타낸다. 세 가지 모델 모두 동일한 토크를 발생 시키는 조건에서 normal force의 크기와 발생 양상을 살펴본 결과이며, 16극 18슬롯의 경우 normal force의 분포가 공간적으로 한 쪽에 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성은 한 상의 권선배치가 공간적으로 집중되어있는 형태이기 때문에 나타나는 현상으로써 공극의 밸런스가 맞지 않을 경우 힘의 균형이 흐트러지기 쉬우므로 소음과 진동에 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

## 3. 결 론

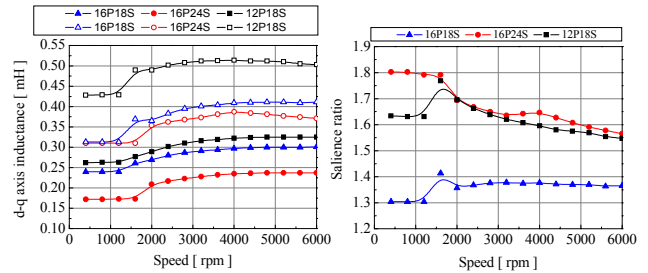
본 논문에서는 극 수와 슬롯 수 조합에 따른 HEV 구동용 IPMSM의 특성에 대해서 다루었다. 16극 18슬롯 모델의 경우 전통적인 극 수와 슬롯 수 조합인 16극 24슬롯과 12극 18슬롯에 비해 무 부하 및 부하 시에 정현적인 역기전력 파형을 가지며 작은 코깅토크와 토크리플을 갖는다. 이러한 측면만을 보았을 때 HEV 구동용 전동기로서 매우 우수한 특성을 갖는다고 볼 수 있지만 normal force의 발생 양상이 다른 두 모델과 달리 공간적으로 특정한 두 부분에 집중되어 있으며, 전류의  $\omega t$ 에 따라 특정부분이 회전하게 된다. 이러한 특성으로 인하여 진동과 소음이 다른 두 모델에 비해 높다는 단점을 가지므로 HEV 구동용 전동기로서 적합하지 않다. 그러므로 16극 24슬롯, 12극 18슬롯 모델과 같은 극 수와 슬롯 수 비가 1.5인 모델이 HEV 구동 전동기로 적합하다고 판단된다. 한편 16극 18슬롯 모델의 경우 전기자 반작용이 크지 않은 소형 서보전동기에 응용하는 것이 적합하다.

### [참고 문헌]

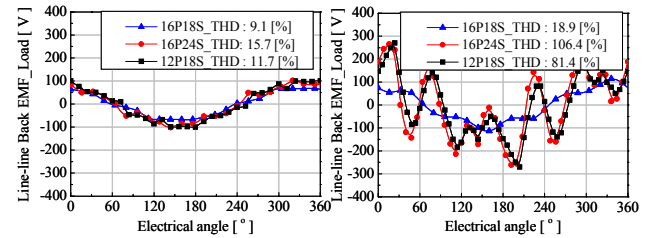
- [1] 오경철, 최동훈, 김현수, “병렬형 하이브리드 전기자동차의 엔진/모터 배터리 용량 및 운전전력 최적화”, 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp.1737-1742, 2004
- [2] 반지형, 권순오, 하승형, 홍정표, “매입형 영구자석 동기전동기의 극 수 슬롯 수 조합에 따른 특성에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회

논문집, pp.771-772, 2006

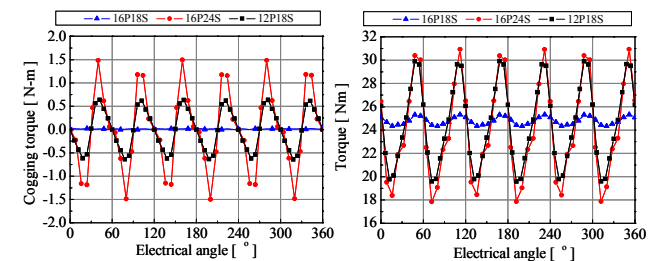
- [3] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong and Jin Hur, “Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in and Interior Permanent Magnet Synchronous Motor”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp.1303-1306, April, 2006
- [4] L. Ma, M. Sanada, S. Morimoto and Y. Takeda, “Iron loss prediction considering the rotational field and flux density harmonics in IPMSM and SynRM”, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 150, no. 6, November, 2003
- [5] Yoji Takeda, Nobuyuki Matsui, Shigeo Morimoto, Yukio Honda, “Design and control of interior permanent magnet synchronous reluctance motor”, Ohmsa, 2001



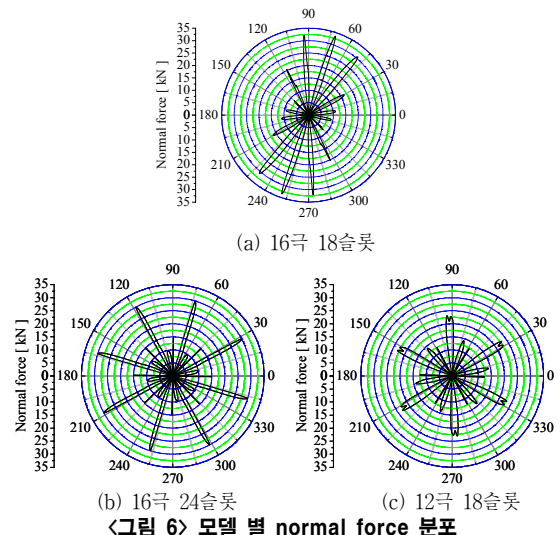
(a) d-q축 인덕턴스 (b) 돌극비  
**<그림 3> 속도에 따른 d-q축 인덕턴스와 돌극비 변화**



(a) 1200rpm (b) 6000rpm  
**<그림 4> 운전속도 별 부하 시 역기전력 파형**



(a) Cogging torque (b) Torque@6000rpm  
**<그림 5> 운전속도 별 부하 시 역기전력 파형**



(a) 16극 18슬롯 (b) 16극 24슬롯 (c) 12극 18슬롯  
**<그림 6> 모델 별 normal force 분포**