

분수슬롯 권선 타입의 매입형 영구자석 동기 전동기의 철손 분석

서장호, 이경표, 정현교  
 서울대학교 전기역학 연구실

A Research on Iron Loss of IPMSM with a Fractional Number of Slots Per Pole

Jang-Ho Seo, Kyung-Pyo Yi, Hyun-Kyo Jung  
 Electromechanics Laboratory, Seoul National University

**Abstract** - In this paper, we investigated the iron losses in the rotor core of interior permanent magnet synchronous machine (IPMSM), which have distributed armature windings. From the analysis results, we can conclude that iron losses of rotor are definitely large at load condition if the number of slots per pole is fractional. Since the slot-pole combination may induce excessive heating, particular care should be necessary in design of PMSM for a high power rating application such as electric vehicles.

능하다. 그림 1.에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 모델을 나타내었다. 돌극성을 최대한 키우기 위해 위와 같은 회전자 구조를 가지고, 인덕턴스가 작은 d축에 자석을 매입하여 d축 자속을 상쇄한다. 또한, 정현파에 가까운 역기전력 파형이 나오게 하기 위해 각 층마다 부분적으로 자석을 매입하고, 누설 자속을 줄이고 고속 운전 영역에서의 원심력에 의한 회전자 파손을 방지하기 위하여 브릿지(bridge) 길이를 작게 한다.

1. 서 론

지금까지는 많은 연구자들이 회전자에 회전자계에 동기속도로 회전하는 사실 때문에 영구자석 동기 전동기의 회전자 철손을 무시하였다[1],[2]. 하지만 영구자석을 이용한 동기전동기(IPM, SPM)를 FCEV 나 HEV와 같이 높은 속도와 출력을 필요로 하는 견인전동기로 채택하는 경우, 자석의 열감자 문제에 쉽게 노출될 수 있기 때문에 회전자 철손문제가 중요한 문제가 될 수 있다.

한편, 극 당 슬롯 수가 분수인 모듈러 권선타입은 우수한 역기전력 파형, 낮은 토크리플특성 그리고 스큐효과를 가지는 이점 때문에 널리 채택되고 있다. 하지만, 모듈러 권선을 채택한 전동기는 공극에서 비대칭 힘이 발생하여 전동기의 진동과 소음면에서 불리하다는 보고가 많이 나오고 있다. 따라서 본 논문에서는 분포권 권선을 채택한 차량구동용(100 [kWatt]) 견인전동기를 권선방식(분수 슬롯, 정수 슬롯)에 따라 설계하여 철손해석을 수행한 후 그 영향을 알아보고자 하였다.

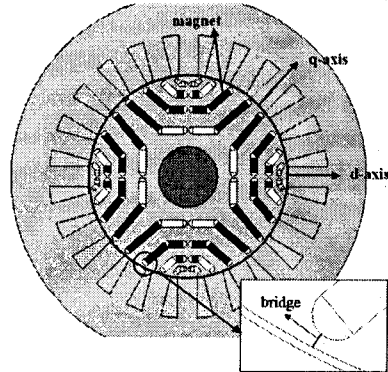


그림1. 다층 매입형 영구자석 동기 전동기의 구조

2. 본 론

2.1 매입형 영구자석 전동기

매입형 영구자석 전동기는 회전자 자속과 고정자 전류의 상호 작용 토크(Field Torque)와 자기 저항(Reluctance)의 차이에 의한 토크(Reluctance Torque)가 동시에 발생하여 높은 기동 토크를 가질 수 있으며, 또한 기저속도(정격속도)이상에서 속도에 비례하여 공극 자속의 크기를 줄이는 약제자 제어를 행하면 제한된 단자 전압과 단자 전류 하에서 전동기가 발생할 수 있는 광범위한 정출력 영역(=약제자 영역)을 확보할 수 있다.

또한 영구자석을 회전자 내부에 매입하여, 이를 통해 표면 부착형 영구자석 전동기에서 발생하는 고속 운전시의 기계적 취약성을 극복할 수 있으며, 자석이 회전자 내부에 있어 고정자 권선에서 발생하는 열의 영향을 직접적으로 받지 않아 보다 열악한 환경에서도 운전이 가능하다. 또한 유효 공극을 작게 할 수 있는 장점이 있어 전기자 반작용 효과가 현저하여 약제자 제어가 가능하며, 광범위한 운전 속도에서 일정 출력 운전 영역이 가

2.2 해석 모델

분수슬롯 타입의 철손에 대한 영향을 알아보기 위하여, 매극 매상 슬롯 수가 1.5인 8극36슬롯 모델1과 매극 매상 슬롯 수가 2인 8극48슬롯 모델 2를 채택하였다. 두 모델 모두 12000[rpm]에서 100[kW]를 만족할 수 있도록 설계하였으며, 동일한 자석량, 고정자 외경 크기, 공극길이 등 동일한 치수를 가진다. 다만, 최고속도 12000[rpm]에서 동일한 상당 역기전력 파형을 가질 수 있도록 자석의 매입 위치와 형상을 다르게 하여 설계하였다. 설계된 모델 1과 2를 그림 2와 3에서 보여준다.

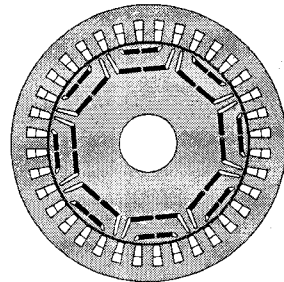


그림2. 분수슬롯을 채택한 8극36슬롯, 모델 1의 단면도

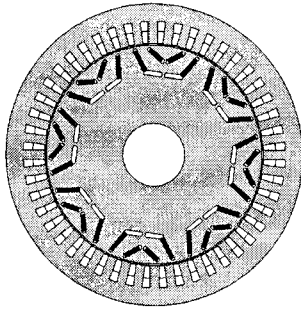


그림3. 정수슬롯을 채택한 8극48슬롯, 모델 2의 단면도

### 2.3 해석 모델의 역기전력 파형

해석 대상 모델들의 역기전력 파형을 그림 4에서 보여 준다. 정수슬롯을 채택한 모델2는 모델1과 같이 정현파 역기전력 파형( THD: 4.3 [%])을 얻을 수 있도록 코일 피치를 4슬롯으로 단절하여 역기전력 파형의 THD가 최소(THD: 4.4[%])값을 갖도록 설계하였다. 그림 4(b)에서 보여준 것처럼, 두 모델의 기본파 역기전력크기는 450[V]로 거의 일치하였다.

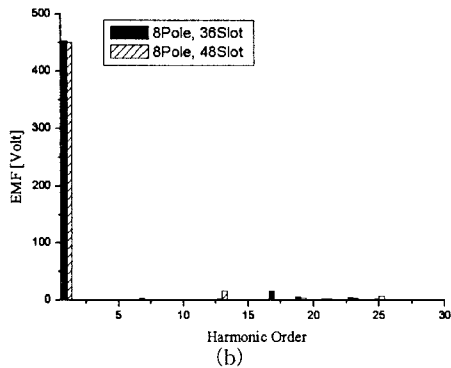
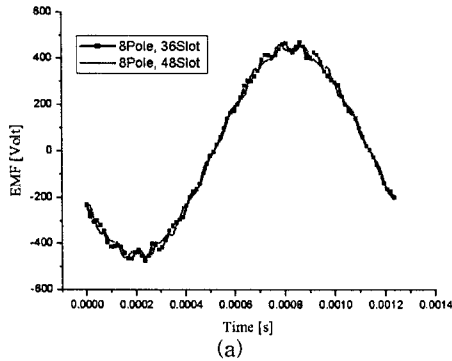


그림4. 모델1, 모델2의 역기전력파형 비교

### 2.4 자계 해석 및 회전자 부위의 자속밀도 파형

해석 대상의 철손해석을 위해서 2차원 유한요소법과 타임스텝핑 기법을 적용하여 강판에 있는 모든 요소의 자속밀도 파형을 추출 하였다. 그림5와 6은 모델1,2의 9000[rpm] 전류각 75도에서의 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 그림 7은 그림6에 표시한 P지점에서의 자속밀도 파형을 나타낸다. 그림 7에서와 같이 자속밀도 파형의 기본 주파수는 고정자 슬롯수에 의해 결정되며 이를 표현하면 식 (1)과 같다.

$$f_r = f_s \times \frac{\text{고정자슬롯수}}{\text{극수}/2} \quad (1)$$

단, 여기서  $f_r$ 는 회전자 자속밀도의 주파수,  $f_s$ 는 고정자 입력 주파수이다. 모델 1(8극36슬롯)의 경우, 회전자 자속밀도 파형의 기본고조파가 36슬롯/8극/2 = 9 이므로 9000rpm 입력주파수가 600[Hz]이기 때문에 5400[Hz]가 회전자 자속밀도의 기본 주파수가 된다. 마찬가지로 모델2(8극48슬롯)의 경우, 회전자 자속밀도 파형의 기본고조파가 48슬롯/8극/2=12 이므로 7200[Hz]가 회전자 자속 밀도 파형의 기본주파수가 된다.

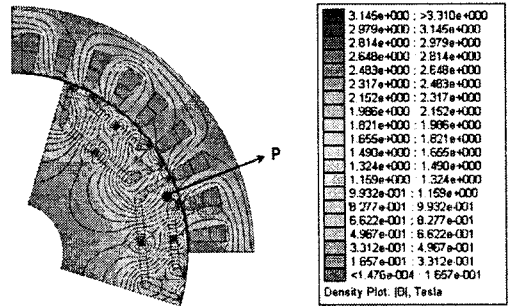


그림5. 모델1의 자속밀도 분포 (9000rpm, 전류각 75도)

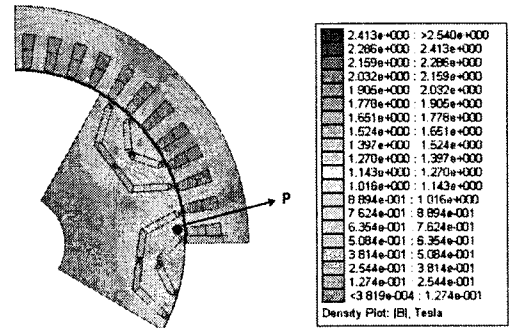


그림6. 모델2의 자속밀도 분포 (9000rpm, 전류각 75도)

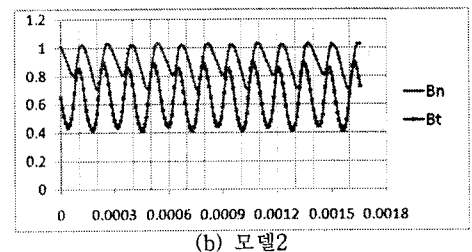
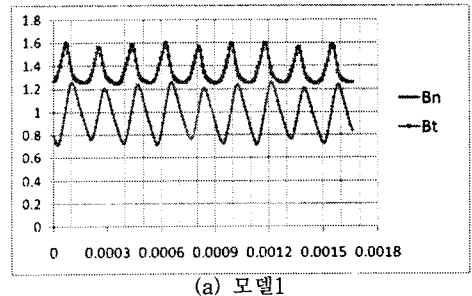


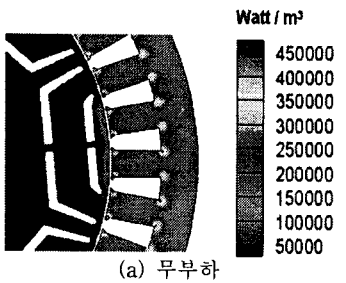
그림7. 모델1, 모델2의 'P'지점에서의 자속밀도 파형

## 2.5 철손 해석 결과

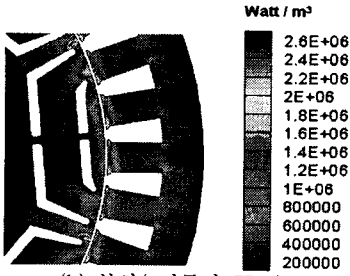
그림 8과 9는 12000 [rpm]에서 무부하, 부하 시 모델 1, 2의 철손의 분포를 각각 보여준다. 표1 과 표2는 철손 해석의 정량적인 결과를 나타낸다.

무부하 시, 모델2의 회전자측 철손은 모델1보다 크게 발생한다. 이는 모델2의 고정자 슬롯 수가 더 많아 회전자에서 느끼는 자기저항 변화율이 많이 발생하기 때문이다. 고정자 철손의 경우, 모델2가 모델1보다 크게 발생하였는데 이는 모델2의 슬롯수가 많아 회전자계가 많이 발생하는 영역이 증가했기 때문이며[3], 자속을 회전자 바깥으로 모아주는 자석의 형상으로 기인하였다고 말할 수 있다.

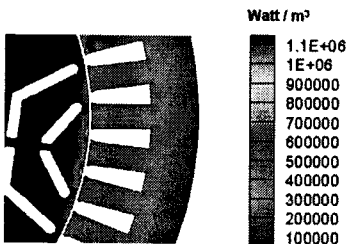
부하 시에는, 고정자 철손의 경우 무부하 시의 경우와 마찬가지로 이유로 모델2에서 많이 발생하였다. 하지만, 모델1의 회전자 철손이 모델2보다 더욱 커진다. 이는 분수 슬롯을 채택한 전동기에서 진동, 소음을 크게 발생시키는 원인으로 인해 많이 발생한 것으로 판단된다.



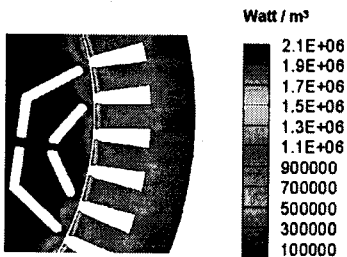
(a) 무부하



(b) 부하(전류각 75도)  
그림8. 모델1의 철손 분포



(a) 무부하



(b) 부하(전류각 75도)  
그림9. 모델2의 철손 분포

표 1. 무부하 철손 해석 결과 (12000[rpm])

단위 = Watt	무부하		
	고정자 철손	회전자 철손	비율
8극36슬롯	563.06	36.49	15.43
8극48슬롯	748.76	68.12	10.98

표 2. 부하 철손 해석 결과 (12000[rpm], 전류각 75도)

단위 = Watt	부하		
	고정자 철손	회전자 철손	비율
8극36슬롯	973.63	540.01	1.80
8극48슬롯	1228.40	277.41	4.42

## 3. 결 론

수치해석의 결과로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 분수슬롯을 채택하게 되면 부하 시 회전자 철손은 정수슬롯의 경우보다 많이 발생하여 전동기의 효율을 떨어뜨릴 수 있으며 과도한 열을 발생시켜 자석의 부분 불가역 감자를 발생시킬 수 있다. 따라서 FCEV나 HEV와 같은 높은 속도와 많은 용량을 필요로 하는 전동기 설계 단계에서는 극수와 슬롯 수의 선택을 반드시 신중하게 해야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Dan M. Ionel, Mircea Popescu, Stephen J. Dellinger, T. J. E. Miller, Robert J. Heideman, and Malcolm I. McGillp, "On the Variation With Flux and Frequency of the Core Loss Coefficients in Electrical Machines", Trans. Ind. App, vol.42(3), pp.658-667, 2006.
- [2] Dan M. Ionel, Mircea Popescu, Malcolm I. McGillp, T. J. E. Miller, Stephen J. Dellinger, and Robert J. Heideman, "Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel", Trans. Ind. App, vol.43(6), pp.1554-1564, 2007.
- [3] Lei Ma, Masayuki Sanada, Shigeo Morimoto, and Yoji Takeda, "Prediction of Iron Loss in Rotating Machines With Rotational Loss Included", Trans. Magnetics, vol.43(6), pp.2036-2041, 2007.