

차량 견인용 IPMSM의 집중권과 분포권 비교

오세영\*, 임종빈\*, 함상환\*, 조수연\*, 유광현\*, 이호용\*\*, 이주\*  
한양대학교\*, 한국철도기술연구원\*\*

Comparison of Concentrated and Distributed Winding in an IPMSM for Vehicle Traction

Se-Young Oh\*, Ho-Yong Lee\*\*, Ju Lee\*  
Hanyang University\*, Korea Railroad Research Institute\*\*

**Abstract** - Winding methods of the interior permanent magnet synchronous motor for vehicle traction have two kinds. They are concentrated winding and distributed winding. They have merits and demerits and influence motor performance. Therefore, this paper presents designs that concentrated winding and distributed winding motor what they have same capacity. And each motor characteristic was analyzed by finite element analysis.

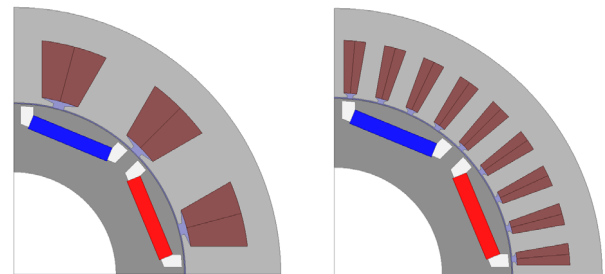
이 것을 기저속도 3,200rpm에 적용하면 276.8V가 된다. 배터리 전압은 DC 750V이고 전류밀도는 4.8A/mm<sup>2</sup>으로 결정하였다.

집중권 권선 방식과 분포권 권선 방식의 특성을 비교하기 위하여 8극 12슬롯과 8극 36슬롯의 극 수와 슬롯 수 조합을 선택하였고, 두 모델 모두 3,200rpm에서 역기전력이 270V가 되도록 설계를 진행하였다. <그림 2>는 IPMSM 설계 결과 형상을 나타내며, <표 1>은 설계 모델의 상세 사양을 보여주고 있다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)는 영구자석에 의해서 발생하는 마그네틱 토크뿐만 아니라, d, q축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크를 사용할 수 있기 때문에 높은 출력 밀도를 가지며 전류 위상제어를 통한 약제자 운전이 용이하므로 광범위한 운전영역을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 IPMSM은 저속영역에서의 일정토크와 고속영역에서의 광범위한 정출력 구간을 요구하는 차량 견인용 전동기로 많이 사용되고 있다[1].

IPMSM의 권선은 극 수와 슬롯 수의 조합에 따라 집중권 또는 분포권으로 갈 수 있다. 집중권 권선 방식의 IPMSM의 경우 엔드 코일의 길이를 짧게 할 수 있으므로 소형, 경량화가 가능하며 분포권 권선 방식의 IPMSM에 비해 권선작업이 간단하기 때문에 높은 생산성을 갖는 이점이 있다[2]. 그러나 분포권 방식은 릴럭턴스 토크 사용량을 늘릴 수 있고, 고속에서 와전류 손실이 작아 효율이 높은 장점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 110kW급 IPMSM을 집중권 권선 방식과 분포권 권선 방식으로 각각 설계하고 그 특성을 비교 분석하여 IPMSM의 초기 설계시 적절한 권선 방식의 전동기 선택에 대한 방향을 제시하고자 한다.



(a) 8극 12슬롯 (b) 8극 36슬롯

<그림 2> IPMSM 설계 모델

<표 1> IPMSM 설계 모델 사양

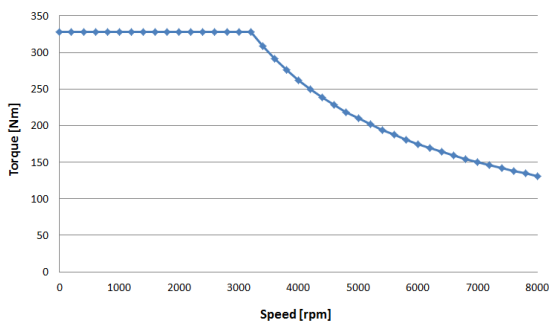
설계 모델	8극 12슬롯	8극 36슬롯
상당직렬턴수 [Turn]	24	24
병렬회로수 [개]	4	4
회전자 외경 [mm]	240	240
고정자 외경 [mm]	376	364
공극 길이 [mm]	1	1
축방향 길이 [mm]	160	160
영구자석 폭 [mm]	60	60
영구자석 두께 [mm]	10	10

8극 12슬롯 모델은 집중권 권선 방식을 적용하였고, 8극 36슬롯은 분포권 권선 방식을 적용하였다. 정확한 비교를 위하여 회전자 외경, 영구자석 사이드, 공극 길이, 축방향 길이, 병렬회로수를 동일하게 설계하였다. 또한, 상당직렬턴수와 영구자석 위치를 조정하여 기저속도에서 두 모델의 무부하 역기전력이 동일하도록 설계하였다.

2. 본 론

2.1 견인용 전동기의 설계

차량 견인용 전동기는 저속영역에서 일정토크와 고속영역에서 광범위한 정출력 구간을 요구하기 때문에, 전동기의 속도-토크 곡선은 <그림 1>과 같이 나타낼 수 있다. <그림 1>은 기저속도가 3,200rpm이고 최대속도는 8,000rpm인, 110kW급 IPMSM의 속도-토크 곡선을 나타낸다. 기저속도 3,200rpm에서 토크는 328Nm이며, 최대속도 8,000rpm에서 토크는 131Nm이다.



<그림 1> 견인용 IPMSM의 속도-토크 곡선

차량 견인용 전동기는 회생제동을 하기 때문에 IGBT와 같은 스위칭 소자의 내압을 고려하여 설계해야 한다. 즉, 최고속도에서 무부하역기전력이 스위칭 소자의 내전압을 넘지 않도록 설계해야 한다. IGBT의 내전압이 1200V(line-line)일 때, 상전압 기준으로 692V<sub>peak</sub>가 된다. 따라서 최고속도에서 무부하 역기전력이 692V를 넘지 않도록 설계해야 한다.

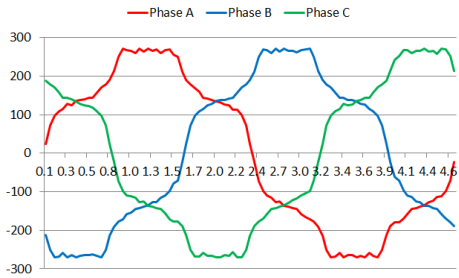
2.2 견인용 전동기의 특성 해석 및 분석

<그림 2>의 IPMSM 설계 모델을 가지고 FEM 해석을 수행하였다. 기저속도 3,200rpm에서 8극 12슬롯 IPMSM의 역기전력 파형을 <그림 3>에 나타내었고, 8극 36슬롯 IPMSM의 역기전력 파형을 <그림 4>에 나타내었다. 집중권 권선 방식을 적용한 8극 12슬롯 IPMSM의 역기전력은 분포권 권선 방식을 적용한 8극 36슬롯 IPMSM에 비하여 고조파 성분들이 많이 포함되어 있다.

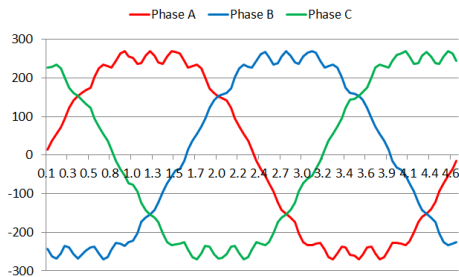
기저속도에서 8극 12슬롯 모델은 전류위상각 25deg일 때, 가장 큰 토크가 발생하며 요구 토크를 만족하기 위해서는 250A의 전류를 인가하였다. 반면에 8극 36슬롯 모델은 전류위상각 30deg일 때, 가장 큰 토크가 발생하며 요구 토크를 만족하기 위해서 230A의 전류를 인가하였다. 이 때의 토크 파형을 <그림 5>에 나타냈다. 토크리플이 8극 12슬롯 모델이 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

최대속도에서 8극 12슬롯 모델의 상전류는 기저속도에서와 동일하게 250A를 인가하였고, 8극 36슬롯 모델도 기저속도에서와 동일하게 230A를 인가하였다. 전류위상각은 약제자 제어를 고려하여 두 모델 모두 75deg로 하였다. 이 때의 토크 파형을 <그림 6>에 나타냈다. 기저속도

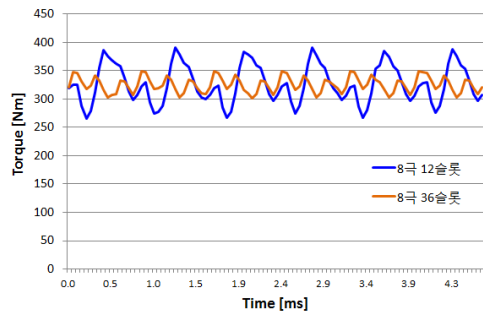
에서의 요구 토크는 두 모델 모두 만족하였지만, 최대속도에서의 요구 토크는 약간 부족하게 나타났다. 이것은 전류위상각을 5deg 단위가 아닌 1deg 단위로 조정하면 만족시킬 수 있는 요소이다.



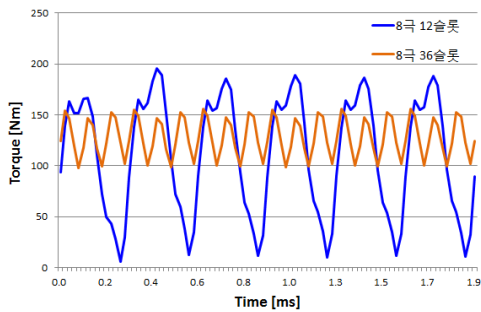
<그림 3> 8극 12슬롯 IPMSM의 역기전력 파형



<그림 4> 8극 36슬롯 IPMSM의 역기전력 파형



<그림 5> 3200rpm에서의 토크 파형



<그림 6> 8000rpm에서의 토크 파형

### 2.2.1 d축 q축 인덕턴스 및 토크 성분 비교

IPMSM은 식 (1)과 같이 영구자석에 의한 마그네틱 토크와 d-q축 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크를 모두 얻을 수 있다.

$$T = P_n \Psi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q \quad (1)$$

위 식에서  $P_n$ 은 극쌍수,  $\Psi_a$ 는 영구자석에 의해 전기자 권선에 쇠고 하는 자속,  $i_d$ 는 d축 전류,  $i_q$ 는 q축 전류,  $L_d$ 는 d축 인덕턴스,  $L_q$ 는 q축 인덕턴스이다.

돌극비( $L_q/L_d$ )가 크면 d-q축 인덕턴스 차가 크기 때문에 더 많은 릴럭턴스 토크를 이용할 수 있다. 전류위상각 75deg에서 8극 12슬롯 모델의 돌극비는 약 2.2이고, 8극 36슬롯 모델의 돌극비는 약 3.2이다. 따라서 <표 2>에 나타난 것처럼 8극 36슬롯 모델의 릴럭턴스 토크가 더 크다는 것을 알 수 있다.

### 2.2.2 손실 및 효율 비교

동손은 상전류와 상전압을 통해서 계산하였으며, 집중권 권선 방식을 적용한 8극 12슬롯 모델이 분포권 권선 방식을 적용한 8극 36슬롯 모델에 비하여 도선의 길이가 짧기 때문에 상저항이 작으며 결과적으로 동손도 작게 된다.

철손은 두 모델 모두 기저속도에서는 비슷한 수준이지만, 최대속도에서는 큰 차이를 보인다. 8극 36슬롯 모델의 철손이 최대속도로 가면서 급격히 증가한다.

기저속도에서 영구자석 와전류손은 집중권 권선 방식을 적용한 8극 12슬롯 모델이 분포권 권선 방식을 적용한 8극 36슬롯 모델에 비해 약 61배 더 크다. 특히 고속으로 갈수록 그 차이는 더욱 커지는데, 최대속도에서는 약 105배까지 커진다. 이것은 와전류손은 자속밀도의 변화 주파수의 제곱에 비례하기 때문으로 볼 수 있다. 집중권 권선 방식은 상전류에 의한 기저력의 분포가 정현파가 아닌 많은 고조파 성분을 포함하는 구형파에 가깝다. 이 경우 고조파 성분이 높은 주파수로 회전하기 때문에 집중권 권선 방식의 IPMSM의 영구자석 와전류손이 큰 것으로 볼 수 있다.

앞서 언급한 동손, 철손, 영구자석 와전류손 이외에 기계손으로 기저속도에서 2kW, 최대속도에서 3.6kW라고 가정하면, 기저속도에서 8극 12슬롯 모델의 효율은 93.89%이고, 8극 36슬롯 모델은 96.29%이다. 최대속도에서 효율은 8극 12슬롯 모델이 83.36%, 8극 36슬롯 모델이 91.29%이다. 기저속도에서 8극 12슬롯 모델이 8극 36슬롯 모델에 비하여 약 2.4% 낮으며, 최대속도에서도 약 8%가 낮는데, 이것은 영구자석 와전류손이 전체 손실에서 차지하는 비중이 크기 때문이다.

<표 2> IPMSM 설계 모델 해석결과

구분	3200rpm		8000rpm	
	8극 12슬롯	8극 36슬롯	8극 12슬롯	8극 36슬롯
역기전력 [ $V_{peak}$ ]	270.3	270.3	675.8	675.6
상전류 [ $A_{peak}$ ]	250	230	250	230
전류위상각 [deg]	25	30	75	75
$L_d$ [mH]	0.297	0.289	0.411	0.313
$L_q$ [mH]	0.778	0.858	0.902	0.995
마그네틱 토크 [Nm]	264.24	248.04	75.52	74.19
릴럭턴스 토크 [Nm]	62.21	77.68	35.4	53.69
전체 토크 [Nm]	326.45	325.72	110.92	127.88
상저항 [ $\Omega$ ]	0.0046	0.0067	0.0046	0.0067
동손 [W]	431.25	531.65	431.25	531.65
철손 [W]	1569.1	1492.1	2633.9	5160.5
영구자석 와전류손 [W]	2708.5	44.3	8873.5	84.6
기계손 [W]	2000	2000	3600	3600
효율 [%]	93.89	96.29	83.36	91.29

## 3. 결 론

본 논문에서는 동일한 용량의 집중권 권선 방식과 분포권 권선 방식의 차량 전이용 IPMSM을 설계하여 그 특성을 비교 분석하였다. 집중권 권선 방식의 8극 12슬롯 모델은 분포권 권선 방식의 8극 36슬롯 모델에 비해 상대적으로 짧은 권선 길이를 갖기 때문에 더 작은 동손을 가지며 고속영역에서 더 작은 철손을 갖는다. 반면 분포권 권선 방식의 8극 36슬롯 모델은 집중권 권선 방식의 8극 12슬롯 모델이 비해 동손이 크고 고속영역에서 철손이 더 많이 증가하지만, 영구자석 와전류손이 기저속도에서 약 61배, 최대속도에서 약 105배 작은 특징을 갖는다. 따라서 효율면에서는 분포권 권선 방식의 8극 36슬롯이 우수하다. 또한, 8극 36슬롯 모델은 8극 12슬롯에 비하여 더 큰 릴럭턴스 토크를 가지므로 고속영역에서 더 높은 토크를 낼 수 있는 장점이 있다.

본 논문은 도시철도용 고속저상 대차시스템 핵심기술개발사업의 지원으로 수행하였습니다. (PK11001E)

### [참 고 문 헌]

- [1] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda " Machine Parameters and Performance of Interior Magnet Synchronous Motors with Different Permanent Magnet Volume", Electrical Engineering in Japan, Vol.131, No4 2000
- [2] 반지형, 권순오, 하승형, 홍정표, "매입형 영구자석 동기전동기의 극수 슬롯 수 조합에 따른 특성에 관한 연구", 대한전기학회 제37회 하계 학술대회 논문집 B, pp771-772, 2006