

전자 권선 방법에 따른 매입형 영구자석 동기 전동기의 특성 비교

박수범, 권순오, 김성일, 홍정표  
 창원대학교 전기공학과

Characteristic Comparison of IPMSM according to Armature Winding

Su-Beom Park, Soon-O Kwon, Sung-Il Kim, Jung-Pyo Hong  
 Changwon National University

**Abstract** - Performance comparison of IPMSMs with distributed and concentrated winding is presented in this paper. Two IPMSMs have been designed and fabricated with identical rotor dimension, air-gap length, series turn number, stator outer radius, and axial length except winding configuration. Basic parameters and machine performance, such as resistances, back emf, output torque, and efficiency, are compared. From the comparison results, motor design considering winding configuration is discussed.

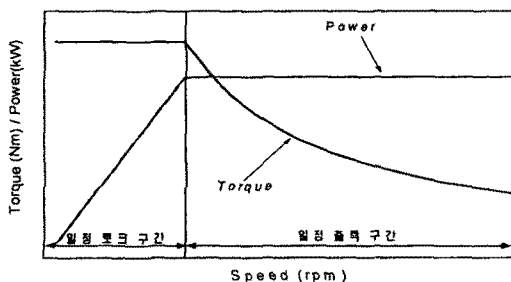
1. 서 론

최근 공작기계를 비롯한 다양한 분야에서 고속, 고회전력 전동기의 수요가 증가하고 있는 추세이다. 현재까지 고속 전동기에는 SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)과 IM(Induction Motor) 등이 주로 사용되고 있으나 고속 운전영역에서 영구자석의 비산 및 회전체의 기계적 강성에 대한 문제점과 운전영역의 다양화를 위한 제어가 용이하지 않은 단점이 부각되고 있다. 이러한 제한조건을 만족하기 위한 대안으로 현재 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. IPMSM은 마그네틱 토크만을 사용하는 표면부착형 전동기와 릴럭턴스 토크만을 이용하는 전동기와는 다르게 회전체에 영구자석을 삽입함으로써 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 모두 사용하여 출력 밀도를 높일 수 있다. 또한 회전체에 영구자석이 삽입됨으로 기계적 안정성을 확보하고 유효 공극이 작아짐으로 전기자 반작용 효과가 현저하다. 따라서 전기자 전류 제어를 이용한 계자 자속의 제어가 용이함으로 최대 토크/전류 제어를 이용한 저속 구간에서의 일정토크 영역과 약계자 제어를 이용한 고속 구간에서의 일정출력 영역을 확보할 수 있으므로 보다 광범위한 운전영역에서의 사용이 가능하다. 본 논문에서는 이러한 IPMSM을 대상으로 제작성과 생산비에 직접적인 영향을 주는 전기자 권선방법에 대하여 연구를 진행하였다. 일반적으로 분포권을 이용한 전동기는 집중권 형식의 전동기에 비하여 출력 밀도가 높으며 토크 리플 및 역기전력의 고조파 성분이 작아 보다 안정적인 구동상태를 보인다. 그러나 슬롯수의 증가와 권선 방식에 의해 제작이 용이하지 않으므로 생산설비 비용이 증가하며 집중권에 비하여 End-coil이 증가함으로 전동기의 전체 크기가 커지고 동량의 증가에 따른 생산비용의 부담이 집중권에 비하여 증가하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 분포권으로 제작된 IPMSM을 동일한 형상치수와 동일한 출력을 갖는 집중권 형식의 IPMSM을 개선 설계를 통하여 제작하였으며, 이 두 전동기의 특성을 비교분석 하였다. [1~4]

2. 본 론

2.1 IPMSM의 운전 특성

IPMSM의 운전특성은 <그림 1>과 같이 일정토크 발생구간과 일정출력 구간으로 나누어진다. 일정토크 영역에서는 최대 토크/전류 제어를 이용하며, 일정출력 영역에서는 약계자 제어 및 최대 효율, 역을 제어를 이용한다. 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 이용하므로 일정토크 구간에서는 다른 유형의 전동기에 비해 높은 출력 밀도를 얻을 수 있으며, 일정출력 구간에서는 약계자 제어등을 이용하여 고속영역까지 운전영역을 확장할 수 있는 장점을 가진다.



<그림 1> IPMSM의 토크, 출력, 속도 곡선

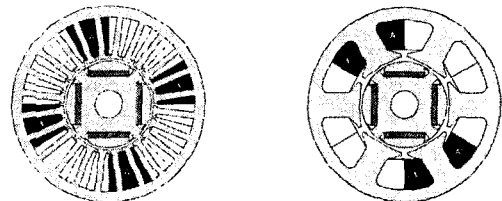
2.2 설계사양 및 형상설계

전자 권선 방식의 차이에 의한 전동기의 특성변화를 검토하기 위해서 동일한 운전구간에서의 일정토크와 일정출력을 만족시키는 분포권과 집중권 형식의 IPMSM을 설계하였으며, 이 전동기는 시스템 요구사항과 형상치는 동일하며 전자 권선방식의 차이에 의해 슬롯수의 변화만을 주었다. 단 집중권의 경우 분포권에 비해 리플 및 역기전력의 THD(Total Harmonic Distribution)가 높으므로 치 형상설계를 이용한 리플 및 THD 저감설계를 동시에 진행하였다. [3][4]

설계된 분포권과 집중권 타입의 전동기 설계사양은 <표 1>과 같다. 최종 설계된 전동기의 형상은 <그림 2>와 같으며 a상 권선을 나타내어 분포권과 집중권의 권선 방식 차이를 나타내었다. 분포권의 단절계수는 5/6 피치이다.

<표 1> 전자 권선방법에 따른 IPMSM의 설계사양

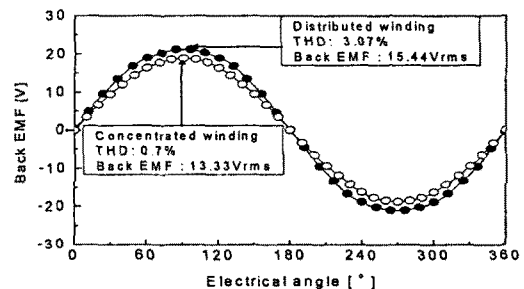
구분	분포권	집중권	
System 요구사항	DC-link 전압 (V)	300	
	정격 출력 (kW)	11	
	정격 토크 (Nm)	17.5	
	정격 전류 (A)	43	
	기저/최대 속도 (rpm)	6000/20000	
형상치수	고정자외경/내경(mm)	80/37.1	
	회전자 외경 (mm)	35.3	
	적층 길이 (mm)	130	
전동기 파라미터	상당 직렬턴수	40	
	극수/슬롯수	4 / 24	4 / 6
	병렬회로수	1	2
	상저항 (mΩ)	45.7	37



<그림 2> 분포권 및 집중권 전동기의 고정자 및 회전자 형상

2.2.1 형상설계 결과분석

2D-FEA(2D-Finite Element Analysis)를 이용하여 산정한 무부하 상역기 전력의 값은 <그림 3>과 같이 집중권에 비해 분포권의 상역기전력이 약 15.8%정도 높다. 따라서 마그네틱 토크에 의한 동일 속도에서 동일한 발생 토크를 얻기 위한 입력전류의 크기는 집중권이 더 크다. [1][3] 일반적으로 집중권의 역기전력 THD는 분포권에 비해 많지만 본 연구에서 설계된 집중권 전동기는 리플 및 THD 저감 설계 결과 <그림 3>과 같이 집중권이 분포권에 비해 약 77% 낮음을 알 수 있다.



<그림 3> 무부하 상역기전력 (at, 1000rpm)

### 2.3 전동기 특성비교

<그림 4>와 같이 일정토크 구간에서 집중권의 전류가 분포권에 비해 높게 나타난다. 따라서 집중권의 상저항이 분포권에 비해 약 19% 낮지만 일정토크 구간에서의 동손은 <그림 5>와 같이 집중권이 더 크다. 기저속도 이후의 고속 운전영역에서는 운전구간을 확보하기 위한 약제자 전류가 증가한다. 즉, d축 전류가 증가함에 따라 <그림 6>과 같이 d축 인덕턴스가 분포권에 비해 큰 집중권은 20000rpm지점에서 동일한 출력을 얻을 수 있는 약제자 전류가 약 18.2% 감소한다. 동일지점에서 집중권은 분포권에 비해 동손 약 45.8%, 철손 약 9.1% 낮다. 따라서 분포권에 비해 낮은 동손 및 철손과 전류를 유지할 수 있는 고속 운전영역에서는 집중권이 분포권에 비해 더 효율적이며 이때의 효율은 <그림 7>과 같다. 그러므로, 본 논문에서 고속 운전영역에서의 효율 및 운전특성은 집중권이 분포권에 비해 더 높다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 고속 운전이 가능한 IPMSM을 대상으로 동일한 출력과 운전구간을 가지며, 전기자 권선방식을 제외한 형상치수 및 시스템 요구사항이 동일한 분포권 타입과 집중권 타입의 IPMSM을 비교분석하였다.

1. 집중권에 비해 큰 권선계수를 가지는 분포권이 영구자석에 의한 상역기전력이 약 15.8% 높다. 따라서 마그넷 토크에 의한 동일 속도, 토크에서의 입력전류는 집중권이 더 높다.

2. 기저속도이후 20000rpm까지의 운전영역을 확보하기 위해서 영구자석의 자속을 작게 만들어야 한다. IPMSM에서는 d축 전류의 증가를 이용한 등가 약제자 제어를 이용한다. 따라서 고속 운전영역에서는 분포권에 비해 높은 d축 인덕턴스를 가지는 집중권의 약제자 전류가 20000rpm에서 약 18.2% 작다.

3. 고속 운전영역에서 집중권의 약제자 전류가 분포권에 비해 낮다. 따라서 속도가 증가할수록 집중권의 동손 및 철손은 분포권에 비해 감소한다. 20000rpm지점에서 동손 약 45.8% 철손 약 9.1% 낮다.

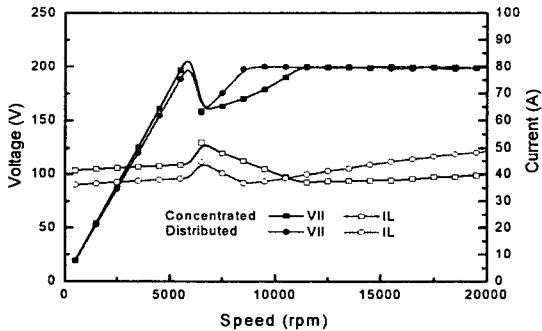
따라서 IPMSM의 설계시 전동기의 상시 운전구간을 판단하여 전기자 권선 방법을 선택해야 된다.

본 논문에서 설계된 전동기는 현재 제작되어 실험을 통한 특성분석 중이며 제작된 전동기는 <그림 8>과 같다.

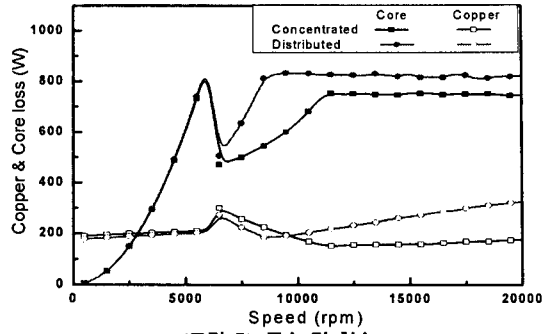
본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

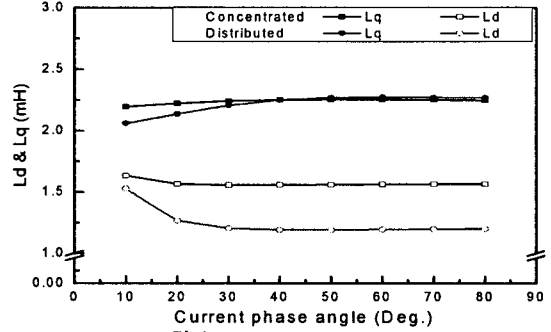
- [1] Freddy Magnussen, Chandur Sadarangani, "Winding Factors and Joule Losses of Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct, 2004,
- [2] Pia Salminen, Markku Niemeläand Juha Pyrhönen, Juhani Mantere, "Performance analysis of fractional slot wound PM motors for low speed applications", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct, 2004,
- [3] Sung-Il Kim, Ji-Young Lee, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Yoon Hur, Yeon-Hwan Jung, "Optimization for Reduction of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motor by Using the Taguchi Method", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, No. 5. May. 2005,
- [4] F. Libert, J. Soulard, "Investigation on Pole-Slot Combinations for Permanent Magnet Machines with Concentrated Windings" IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2004,



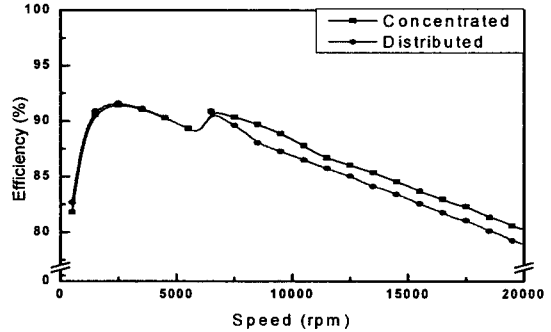
<그림 4> 전압 및 전류



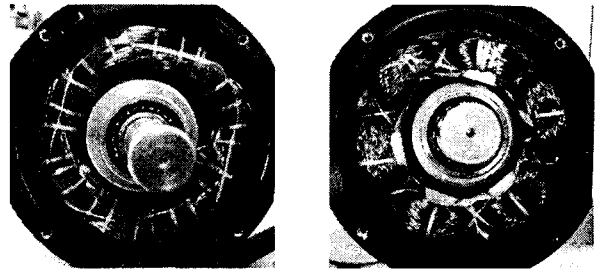
<그림 5> 동손 및 철손



<그림 6> Inductance profile



<그림 7> 효율



<그림 8> 제작된 분포권과 집중권 IPMSM