

집중권 IPMSM의 고속 운전을 위한 연구

이기덕*, 김원호*, 장익상*, 김미정*, 이재준*, 이주*
한양대학교 전기공학과*

Study on High Speed Operation of IPMSM with Concentrated Winding

Ki-Doek Lee*, Won-Ho Kim*, Ik-Sang Jang*, Mi-Jung Kim*, Jae-Jun Lee*, Ju Lee*
Department of Electrical Engineering, Hanyang University*

Abstract - In this paper, Interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) with concentrated winding for 110cc electric motorcycle is introduced. Optimum design is performed so as to satisfy wide speed operation range. And output characteristics is analyzed according to shoe height in many variables. Because partial magnetic saturation in shoe affects the harmonics, output characteristics of motor could be confirmed that a significant change. As a result, the new shape and the optimal design parameters considering the partial magnetic saturation is obtained. Compared with the base model, wide operating range was confirmed.

1. 서 론

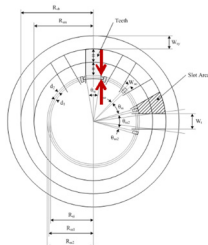
견인용 모터 중 인휠 방식은 두께가 얇은 박형 구조의 모터를 필요로 한다. PMSM의 대표적인 권선법은 집중권과 분포권이 있다. 집중권이 분포권에 비해 엔드 턴이 낮아 박형 구조에 유리 하지만 집중권 구조 및 부분적인 포화 때문에 분포권에 비해 많은 고조파를 포함하게 된다. 고조파의 영향 때문에 집중권의 견인용 모터는 고속 운전에 어려움을 가지고 있다.

110cc급 전기 오토바이용 견인모터로 집중권 방식의 IPMSM을 선택하였다. 초기 설계 후 위에서 언급한 문제점을 파악하고 원인을 분석하여 견인용 모터에 적합하도록 형상 설계를 수행하였다.

<TABLE 1> Requirement Specification and Simulation Results of Basic Model

Requirement Spec		
Item	Value	Unit
Torque@BaseRPM	27.35@1658	Nm
Torque@MaxRPM	8.31@4421	Nm
Simulation Results (Basic Model)		
Item	Value	Unit
Torque@BaseRPM	28.15@1658	Nm
Torque@MaxRPM	16.33@2580	Nm

Table 1은 견인모터의 요구 사항과 초기 설계된 모델의 특성 값을 나타내고 있다. 기저 속도인 1658RPM에서는 요구치를 만족하나 최고속도 운전이 불가능함을 알 수 있다.



<Fig. 1> Design variable in stator structure of IPMSM

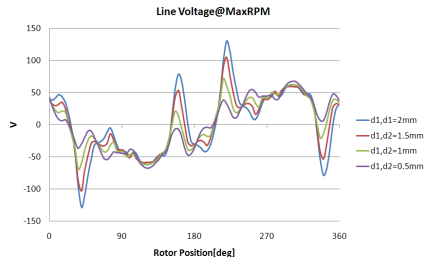
2. 고속에서의 특성 분석

2.1 고정자 치 형상에 따른 출력 특성 분석

기초 설계한 모터의 고속영역에서의 운전특성을 만족하는지 살펴보기 위해서는 고속영역에서의 전압 제한치를 만족하는지를 확인해야 한다. 본 논문에서 설계한 8극 12슬롯의 집중권 모델은 일반적으로 고속영역

에서 고조파 때문에 전압 제한치를 만족시키지 못하는 경우가 많아 고조파를 줄이는 설계가 필요하다.

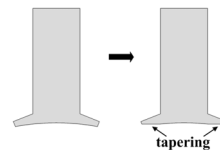
Fig. 1은 IPMSM의 고정자에서의 설계 변수들을 나타내고 있다. 위의 많은 변수 중 FEM 해석을 통해 분석 결과 화살표로 표시한 부분인 슈 높이에 따라 유기전압의 큰 차이를 보이고 있다. 이를 명확하게 분석하기 위해서 슈 높이인 d1(=d2)를 0.5mm~2mm까지 0.5mm단위로 바꾸며 MaxRPM에서의 선간 전압 제한치 특성을 살펴보았다. 0.5mm인 경우 67.45V임에 반해 2mm인 경우는 130.33V로 큰 차이를 보이고 있다. 슈 0.5mm, 2mm 두 경우다 선간전압 제한치인 54V 안에 들어오지 않기 때문에 고속영역에서 운전이 불가능하다. 하지만 슈 높이에 따라서 국부적으로 발생하는 피크 전압이 상당히 낮아짐을 확인할 수 있었다.



<Fig. 2> Line voltage as the shoe height, d1(d1=d2)

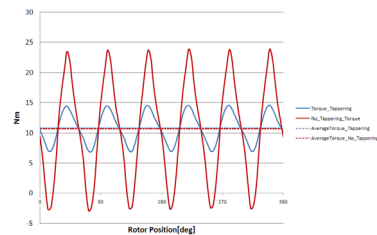
0.5mm일 경우에는 부분포화가 지속적으로 발생하여 유효공극이 일정한 현상을 나타내는 반면 2mm는 시간에 따라 부분포화가 발생하고 풀리고를 반복하게 되면서 총 쇠교자석에 고조파를 발생시킨다.

FEM 결과만을 고려하면 고조파를 줄이기 위해서는 슈 높이인 d1, d2를 낮게 할수록 고조파가 줄어들면서 선간전압에서 국부적으로 피크치는 전압도 낮아진다. 하지만 기계적인 강성을 고려하며 고조파에 따른 문제를 해결하기 위해서 새로운 형상을 도입하였다.

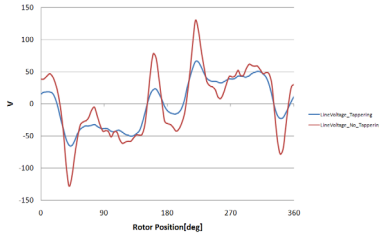


<Fig. 3> New teeth structure with tapering

새로운 형상은 회전자에서 치의 끝단을 통해 넘어가는 자속의 패스를 tapering을 통해 없애게 되면 치 끝단에서의 시간에 따라 발생하던 국부적인 포화는 발생하지 않아 고조파가 줄어들게 된다. Fig. 4와 Fig. 5은 기존형상과 기존형상에서 슈 형상만 바꾼 모델의 MaxRPM에서의 출력 특성을 보여주고 있다.



<Fig. 4> Torque waveform as tapering



<Fig. 5> Line voltage with the field weakening as tapering

새로운 형상 도입에 따른 고조파의 감소는 평균토크의 크기에는 영향을 주지 않으나 토크리플의 저감과 유도기전력의 고조파에 의해 부분적으로 발생하는 피크 전압을 감소시켰다.

2.2 턴수와 전류 변화에 따른 출력 특성 분석

기초 설계된 모델이 고속영역에서 고조파의 영향으로 선간전압이 전압 제한치를 넘어 2장에서 기계적 강성을 고려하여 고조파를 줄일 수 있는 새로운 teeth 형상을 제안하였다. 하지만 고조파의 영향이 감소되었지만 선간전압이 전압 제한치 안으로 들어오지 않아 최고속도에서 운전이 불가능하다. 이럴 경우에 고속영역에서의 운전을 가능하게 하기 위해서는 출력 특성은 변하지 않으며 전압 제한치 안에 들어오게끔 최적설계를 수행해야 한다. 기차력 즉 전기 비장하를 고정시킨 상태에서 턴수를 줄이고 전류를 늘리는 설계를 수행하였다. 배터리 전압에 따라 전압 제한치가 결정된다. 반면 전류 제한치는 인버터의 스위칭 소자의 최대 허용 전류 및 각 소자들의 내전류의 크기까지를 전류 제한치로 볼 수 있다. 본 논문에서 허용 전류는 288A_peak이기에 전류를 높이는 설계는 가능하다. 턴수를 줄이고 전류를 늘리게 되면 무부하 역기전력의 크기, 인덕턴스 크기는 변경되지만 토크, 전류위상각, 코깅토크, 역기전력 고조파 비율, 동손, 철손, 형상 등은 변화하지 않는다. 턴수가 1/2배, 전류가 2배로 변화되었을 때 파라미터를 살펴보면 아래의 Table 2와 같다.

<TABLE 2> Parameters when turn number is reduced to 1/2

변경전	N	I_a	NI_a	Ψ_a	L_d	L_q
변경후	$\frac{1}{2}N$	$2I_a$	NI_a	$\frac{1}{2}\Psi_a$	$\left(\frac{1}{2}\right)^2 L_d$	$\left(\frac{1}{2}\right)^2 L_q$

$\Psi_a = N\phi_g$ 로 턴수에 비례하고 $L = \frac{N^2}{R}$ 로 형상이 동일하면 자기저항 R 이 변화가 없기에 인덕턴스는 턴수의 제곱에 비례하게 된다.

변경 전 파라미터 값들로부터 토크와 전류위상각을 계산해보면

$$T = P_n \Psi_a I_a \cos\beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \quad (1)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{-\Psi_a + \sqrt{\Psi_a^2 + 8(L_q - L_d) I_a^2}}{4(L_q - L_d) I_a} \right) \quad (2)$$

이 되고, 변경 후 파라미터 값들로부터 토크와 전류위상각을 계산해보면

$$T = P_n \left\{ \left(\frac{1}{2} \Psi_a \right) (2I_a) \cos\beta + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{1}{4} L_q \right) - \left(\frac{1}{4} L_d \right) \right) (2I_a)^2 \sin 2\beta \right\} \quad (3)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{-\left(\frac{1}{2} \Psi_a \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \Psi_a \right)^2 + 8 \left(\left(\frac{1}{4} L_q \right) - \left(\frac{1}{4} L_d \right) \right) (2I_a)^2}}{4 \left(\left(\frac{1}{4} L_q \right) - \left(\frac{1}{4} L_d \right) \right) (2I_a)} \right) \quad (4)$$

이 된다. 결과적으로 약분을 수행하면 동일함을 알 수 있다. 매입형 영구자석 전동기에서의 손실은 권선에서의 동손, 철심에서의 히스테리시스 손실과 와전류 손실, 영구자석에서의 와전류 손실이 있다. 변경 전 후 각각의 파라미터 값들로부터 손실들을 살펴보자. 아래 식(5), (6)은 히스테리시스 손실과 와전류 손실로 철심의 종류와 회전 속도 그리고 자속밀도의 최대치가 변하지 않으면 변화하지 않는다. 턴수가 낮아지고 전류가 올라갔다고 해도 기차력의 변화는 없기 때문에 철심에서의 자속밀도의 최대치는 변하지 않아 히스테리시스 손실과 와전류 손실은 파라미터 변경 전 후에도 동일하다.

$$P_h = k_h f B_m^n \quad (5)$$

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 \quad (6)$$

권선에서 발생하는 동손을 살펴보면 저항 $R_a = \frac{\rho l}{s}$ 에 비례하고 I_a 제곱에 비례한다. 턴수가 절반이 되었다는 것은 권선 길이가 2배 늘어나고 반대로 권선의 넓이가 2배 증가하여 결과적으로 저항이 기존보다 1/4되었음을 의미한다. 변경 전의 파라미터로 3상의 동손을 구해보면

$$Loss_{copper} = \frac{3}{2} I_a^2 R_a \quad (7)$$

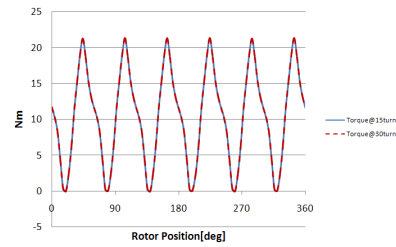
변경 후의 파라미터로 3상의 동손을 구해보면

$$Loss_{copper} = \frac{3}{2} (2I_a)^2 \frac{\rho \left(\frac{1}{2} l \right)}{2s} \quad (8)$$

된다. 결과적으로 약분을 수행하면 동일한 식임을 알 수 있다.

모터의 출력에 관계되는 토크, 손실 등이 동일하기에 턴수와 전류의 비를 바꾸는 것은 모터 출력특성에 영향을 미치지 않는다. 반면 역기전

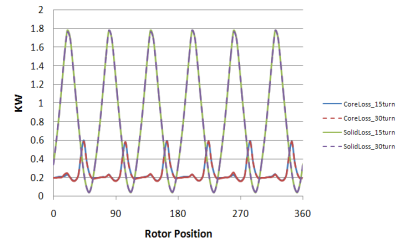
력은 $e = \frac{dN\phi_g}{dt}$ 로 N 에 비례하여 낮아져 N 을 낮추고 전류를 높게 되면 고속영역에서의 전압을 제한치 안으로 설계할 수 있다. 수식적으로 확인해 보지 못했던 고조파, 코깅토크, 토크리플 등은 FEM(Finite Element Method)를 통해 확인할 수 있다. 기초모델에서 30turn이던 상당 직렬턴수를 15turn으로 줄이고 대신 전류를 2배 키워서 고속(MaxRPM)에서의 FEM해석을 통해 위의 이론을 확인하였다.



<Fig. 6> Torque waveform of 15turn and 30turn



<Fig. 7> Line voltage of 15turn and 30turn



<Fig. 8> Core loss and solid loss of 15turn and 30turn

감사의 글

본 연구는 방위사업청/민군겸용기술센터의 민군겸용 기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [09-DU-EN-02. 특수임무 차량용 고기동 하이브리드 추진시스템 개발]

3. 결론

집중권 타입의 IPMSM은 고속 영역에서 구조적인 이유 때문에 많은 고조파가 발생되고 이 때문에 고속영역 운전이 어렵게 된다. 고조파의 저감을 위해 고정자의 형상 변화와 추가적으로 기차력이 같은 상황에서 전류와 권선수를 변화시켜 고속영역에서의 전압이 제한치 안에 들어오게끔 최적화를 수행하였다.

[참고 문헌]

[1] Tomas M. Jahns, "DESIGN, ANALYSIS, AND CONTROL OF INTERIOR PM SYNCHRONOUS MACHINES", October 2004