

직동력 고응답 액츄에이터 구동용 표면부착형 영구자석형 동기 전동기의 슬롯 수에 따른 특성 연구

권순오*, 이병화*, 이정중*, 김대성**, 김범중**, 홍정표*

한양대학교 자동차공학과*, (주) 동성전기**

Characteristics of SPMSM for electro-hydraulic actuator according to the slot number

Soon-O Kwon*, Byeong-Hwa Lee*, Jeong-Jong Lee*, Dae-Sung Kim**, Bum-Joong Kim**, Jung-Pyo Hong*
Department of Automotive Engineering, Hanyang University*, Dongsung Electric co. ltd.**

Abstract - This paper deals with the characteristics of SPMSM for hydraulic actuator according to the slot number. As a design variable, slot number affects the winding configuration and this leads to the total variation of motor characteristic. Therefore number of slot should be cautiously determined. Three SPMSMs are designed and THD of back emf, cogging torque, and torque ripple are compared. Among three SPMSMs, 36slots with 12 pole is chosen for further development considering motor characteristics and manufacturing.

1. 서 론

현재 항공기에 적용되고 있는 전자비행제어 (FBW ; Fly-By-Wire)는 파워밀도가 높은 전자 유압 서보 장치에 의해 작동된다. 유압 서보 장치의 구동을 위해서는 높은 출력밀도, 속응성, 제어성 등이 요구되며, 이러한 요구 특성을 만족시키기 위해 유도전동기, 릴럭턴스 전동기 등에 비해 높은 출력 밀도를 갖는 영구자석형 전동기가 효과적으로 적용될 수 있다.

전동기 설계 시 극수와 슬롯수의 조합에 따라 출력 특성 및 주요 파라미터가 변화한다. 일반적으로 극수가 증가 할수록 극당 자로의 감소를 통해 소형화, 고출력화가 가능하지만 주파수 증가로 인해 철손의 증가로 인한 효율 감소가 따른다.

권선 방식은 크게 분포권과 집중권으로 나뉘어지며 극수와 슬롯 수에 따라 제약을 받는다. 일반적으로 분포권은 집중권에 비해 높은 권선계수를 가지며 단부 권선이 집중권에 비해 길어 전동기의 전체 크기가 커진다. 집중권의 경우 분포권에 비해 짧은 단부 권선, 낮은 권선계수, 높은 생산성의 장점을 갖는다.

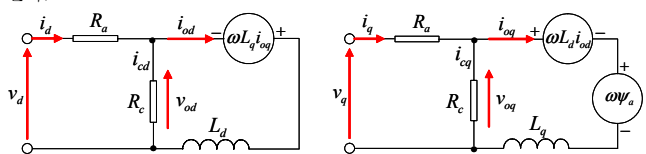
본 연구에서는 12극의 회전자에 슬롯수가 39, 18, 36으로 변화 할 때 전동기의 정상상태 특성을 산출하고, 역기전력 THD, 코깅토크, 토크 리플을 비교하였다. 또한 전동기의 크기, 제작성, 설계의 용이성을 고려하였다. 정상 상태의 출력 특성은 등가회로 시뮬레이션을 통해 확인 하였으며 코깅토크, 토크리플, 역기전력 THD는 유한요소 해석을 통해 산정하였다.

2. 본 론

2.1 철손을 고려한 PMSM의 d-q축 등가회로 모델링

철손을 고려한 PMSM의 d-q축 등가회로는 일반적으로 철손 저항이 입력단과 병렬로 모델링 된 그림 1이 사용된다. 그림 1의 등가회로에 대한 전압 방정식과 출력 토크는 (1), (2), (3)과 같다[1]. 일반적으로 표면 부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)은 돌극비가 0 이므로 릴럭턴스 토크가 존재하지 않는다. d-q축 인덕턴스는 재료의 유한요소 해석을 통해 재료의 비선형을 고려하여 산정한다[2].

철손 저항의 병렬 모델링은 저항의 전압 강하를 제외한 전압의 예측이 가능하고, 직렬 모델링은 입력 전류가 바로 출력 토크에 기여한다는 차이가 있다. 따라서, 실제 운전 상태의 병렬 모델링에서 철손 전류는 측정이 불가능 하므로 전류 위상 제어에서 지령 및 피드백 전류는 유효한 축 토크를 발생 시키는 전류가 아니라 철손 성분을 포함하는 전류가 된다.



<그림 1> d-q축 등가회로

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = P_n \{ \psi_a i_{od} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \} \quad (3)$$

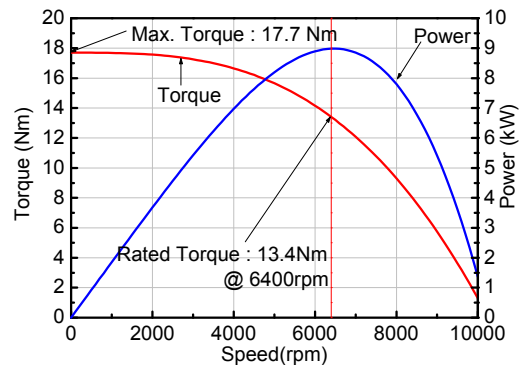
i_d, i_q 는 각각 d, q축 전류, i_{cd}, i_{cq} 는 d, q축 철손 전류, v_d, v_q 는 d,q 축 전압, R_c 는 권선저항, R_c 철손저항, ψ_a 는 무부하시 영구자석체 의한 권선 쇄교자속, L_d 와 L_q 는 각각 d,q축 인덕턴스를, P_n 은 극 쌍수를 나타낸다.

2.2 검토 대상 전동기

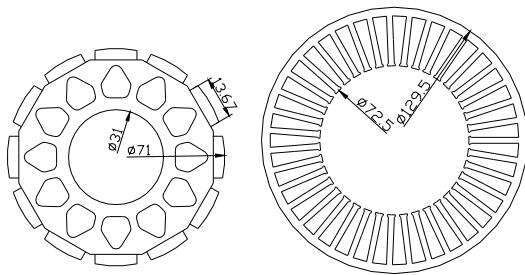
표 1에 본 논문에서 검토된 대상전동기의 주요 사양을 나타낸다. 세가지 전동기는 동일한 출력을 갖도록 설계 되었다. 39슬롯 모델은 자극폭, 18슬롯은 자극폭과 고정자의 치, 36슬롯 모델은 자극폭과 회전자의 편심을 적용하여 역기전력 THD, 코깅토크, 토크 리플 저감 최적 설계를 수행하였다. 최적설계에는 반응 표면법을 이용하였다. 그림 3은 설계된 전동기의 회전자와 고정자의 주요 형상 치수를 나타낸다.

<표 1> 대상전동기의 주요사양

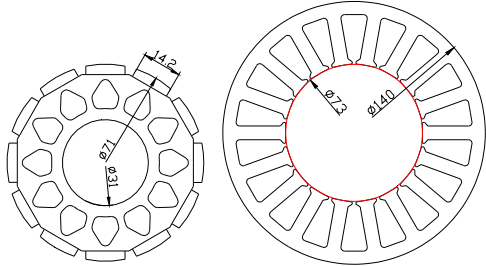
	12극 39슬롯	12극 18슬롯	12극 6슬롯
DC link 전압	270		
전류제한(Arms)	80		
정격토크(Nm)	13.4		
정격출력(kW)	9.0		
정격속도(rpm)	6400		
권선방식	분포권(비대칭)	집중권	분포권
적층길이(mm)	88		



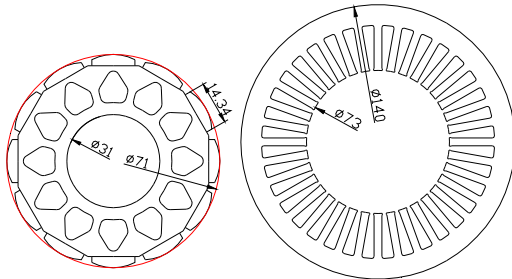
<그림 2> 출력 특성



(a) 12극 39슬롯의 회전자와 고정자



(b) 12극 18슬롯의 회전자와 고정자

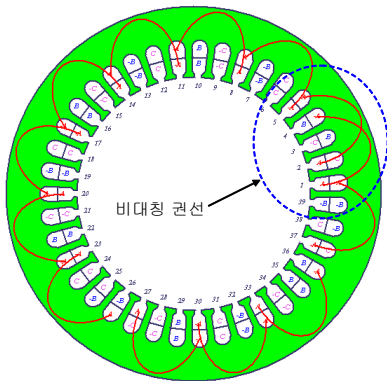


(c) 12극 36슬롯의 회전자와 고정자

<그림 3> 대상 전동기의 주요 형상치수

그림 4는 12극 39슬롯 전동기의 1상 권선 방식을 나타낸다. 그림에 나타나듯이 비대칭적인 권선 분포로 인해 설계 시 해석영역 전체를 모델링해야 하는 부담이 있다. 반면 12극 18슬롯과 36슬롯 모델은 1/6 모델링으로 해석영역을 줄일 수 있으므로 12극 39슬롯에 비해 최적 설계 단계에서 해석 시간을 단축시킬 수 있다.

분포권 전동기에 비해 집중권 전동기의 장점으로 거론되는 것이 짧은 단부 권선이다. 집중권의 단부 권선은 분포권에 비해 짧게 가져 갈 수 있으므로 상저항 및 전동기의 전체 길이를 저감 할 수 있다. 그러나 극수가 증가 할수록 코일 피치는 작아지므로 단부 권선 저감 및 소형화의 장점이 작아진다.

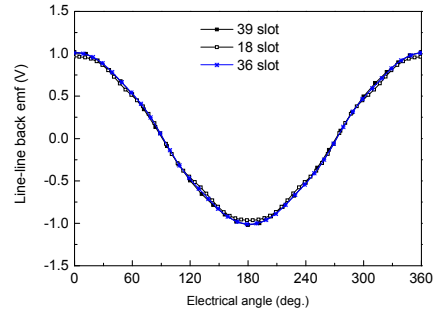


<그림 4> 12극 39슬롯의 1상 권선

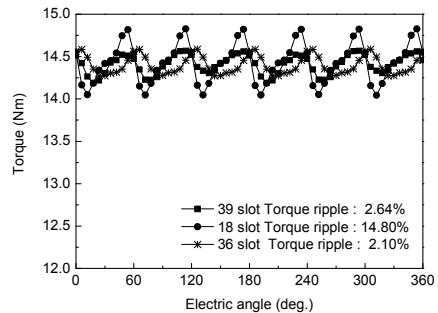
그림 5는 선각 역기전력 파형을 나타내었다. 세가지 모델 모두 동일한 수준의 THD를 갖고 있다. 그림 6은 각각의 전동기의 출력 토크 리플을 나타낸다. 각각 동일한 출력 토크를 얻기 위해 입력 전류가 등가 회로 시뮬레이션으로 산정되고 FEA에 적용하여 출력 토크 파형을 얻었다. 입력전류는 순수한 정현파로 가정하였으며 역기전력과 전류가 동상인

id=0 제어를 적용하였다. 그림에서 12극 39슬롯과 36슬롯은 거의 동일한 토크 리플을 나타냈으며 18슬롯이 소음 및 진동에 취약할 것으로 예상된다.

표 2는 세가지 전동기의 특성을 요약한 표이다. 역기전력의 THD와 토크 리플은 12극 39슬롯과 36슬롯이 거의 동일한 특성을 나타내었다. 코깁토크의 경우 12극 39슬롯은 1주기가 기계각으로 2.30° 이므로 유한요소 해석시 현실적으로 어려움이 있다.



<그림 5> 선간역기전력 파형



<그림 6> 출력토크 리플

<표 2> 주요 특성비교

	12극39슬롯	12극 18슬롯	12극 36슬롯
선각역기전력 THD(%)	1.87	2.92	2.0
코깁토크(Nm)	-	0.43	0.11
토크 리플(%)	2.64	5.4	2.2
극수와 슬롯수의 최소 공배수	156	36	36
제작성	X	△	△

3. 결 론

12극에 대해 39슬롯, 18슬롯, 36슬롯을 검토한 결과 코깁토크, 토크리플, 선각역기전력의 THD, 권선 계수 등은 39슬롯이 가장 우수하지만 권선 작업의 어려움으로 인해 상용화에는 부적합하다. 또한 본 검토에서는 높은 극수에 따른 코일 피치의 감소로 인해 권선 방식에 따른 집중권의 짧은 단부 권선의 장점이 감소하여 결과적으로 12극 36슬롯을 상용화를 위한 모델로 선택하였다. 3 모델 모두 출력은 만족 하며 향후 전동기 파라미터 및 효율, 소음 및 진동에 대한 영향 분석이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 武田洋次, 森本茂雄, 本田幸夫, "영구자석 동기 모터의 설계와 제어", Ohmsha, 2001.
- [2] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Guen-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Jin Hur, "Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magn., vol. 42, no. 4, April 2006.