

8극6슬롯과 8극12슬롯 PMSM의 전기적 파라미터 및 특성 분석

Analysis of Electrical Parameters and Characteristics of 8P6S and 8P12S PMSM

저자 (Authors)	원태준, 박진철, 박수환, 홍정표 Tae-Jun Weon, Jin-Chul Park, Su-Hwan Park, Jung-Pyo Hong
출처 (Source)	대한전기학회 학술대회 논문집 , 2017.7, 741-742 (2 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07232342
APA Style	원태준, 박진철, 박수환, 홍정표 (2017). 8극6슬롯과 8극12슬롯 PMSM의 전기적 파라미터 및 특성 분석. 대한전기학회 학술대회 논문집, 741-742.
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.168.149 2018/10/17 10:40 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

8극6슬롯과 8극12슬롯 PMSM의 전기적 파라미터 및 특성 분석

원태준, 박진철, 박수환, 홍정표
한양대학교

Analysis of Electrical Parameters and Characteristics of 8P6S and 8P12S PMSM

Tae-Jun Weon, Jin-Chul Park, Su-Hwan Park, Jung-Pyo Hong
Hanyang University

Abstract - 자동차 전장화 추세에 따라 자동차 각 시스템을 구동하는 액추에이터로 PMSM이 사용되고 있다. 차량 설계 시, 연비 절감을 위한 액추에이터 소형화에 따른 PMSM의 고효율, 고출력화가 필요하다. PMSM의 극/슬롯 수 조합은 사양을 결정하는 요인이다. 본 논문에서는 PMSM의 슬롯 수 변화에 따라 수학적 산정과 유한요소해석을 통해 PMSM의 전기적 특성을 분석하였다. 동일한 고정자 부피 조건 내에서 슬롯 수를 증가시킨 후, 전기적 파라미터와 전동기 특성을 비교하였다. 비교한 PMSM의 극/슬롯 수는 8극6슬롯과 8극12슬롯이다. 비교 결과 8극12슬롯의 경우 저항, 인덕턴스와 연기전력이 8극6슬롯보다 감소하였다. 전동기 특성은 8극12슬롯 모델에 8극6슬롯 모델보다 동일 토크에서 효율과 출력이 향상되었다.

1. 서 론

최근 DAS(Driving Assistance System)이나 ICT(Information and Communications Technologies)가 장착된 자동차가 출시되고 있다. 이런 자동차에 장착되는 부품들은 ECU(Electronic Control Unit)를 통한 제어가 수반되기 때문에 기존의 기계적 시스템에서 전동기를 이용하는 전기 전장 부품들로 대체되면서 전장화가 이루어지고 있다. 기존 기계적 시스템은 유압을 이용한 동력 증폭을 통해 구동되었으나, 전동기로 대체됨에 따라 전동기의 출력이 중요한 설계 사양이 되었다. 이러한 이유 때문에 다른 전동기 종류보다 출력이 높은 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)이 차량에 장착되는 시스템의 액추에이터로 주로 사용되고 있다.

하지만 차량에 장착되는 PMSM은 장착되는 시스템의 구조적인 제약 때문에 크기 사양에 제한이 있다. 또한 차량의 연비를 향상시키기 위해 전체적인 시스템을 소형화하고 있으며, 액추에이터로 사용되는 PMSM의 소형화가 새로운 설계 이슈로 부상하였다. 따라서 차량에 액추에이터의 기능으로 장착되는 PMSM의 고효율화, 고출력화는 필수적인 과제이다. 자동차 업계에서는 액추에이터로 장착되는 PMSM의 높은 출력 밀도를 위한 연구/개발을 진행하고 있다.

PMSM은 극/슬롯 수 조합에 따라서 전기적 특성이 달라진다. 따라서 초기설계 단계에서 최적의 극/슬롯 조합을 선정하면 고효율, 고출력의 PMSM을 설계할 수 있다. 본 논문에서는 PMSM의 극/슬롯 조합 변화에 따라 전기적 파라미터와 전동기 특성의 변화를 확인하였다. 먼저 변화를 해석하기 위한 모델로 8극6슬롯 모델과 8극12슬롯 모델을 제시하였다. 다음으로 제시한 PMSM의 전기적 파라미터를 수학적 산정과 유한요소해석을 통해 분석하였다. 마지막으로 분석한 전기적 파라미터를 바탕으로 8극6슬롯 모델과 8극12슬롯 모델의 전동기 특성을 비교하였다.

2. 극/슬롯에 따른 전기적 파라미터

2.1 전압방정식

PMSM의 특성은 전기적 파라미터에 의해서 결정된다. 전기적 파라미터가 전동기의 특성에 미치는 영향은 전압방정식을 통해 알 수 있다. 식 (1)은 PMSM의 한 상에 대한 전압방정식이다.

$$V_a = R_a I_a + j\omega_e L_a I_a + E_a \quad (1)$$

식 (1)에서 V_a 는 전압, R_a 는 상 저항, I_a 는 상 전류, ω_e 는 동기속도, L_a 는 상 인덕턴스, E_a 는 상 역기전력이다. 전압방정식을 통해 전동기 특성을 분석하기 위해서 상 저항, 상 인덕턴스와 상 역기전력 산정이 필요하다.

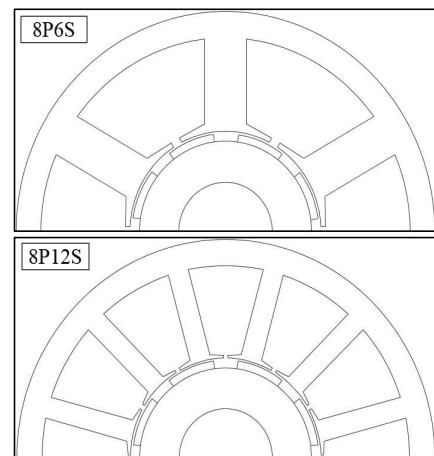
2.2 전동기 제시

<표 1>은 극/슬롯 조합에 따른 전기적 파라미터 분석을 진행할 전동기의 사양이다. 구동방식은 모두 BLDC이다. 회전자 극 수는 8로 동일

한 조건이며, 고정자의 슬롯 수는 6에서 12로 증가시켰다. 동일한 고정자 부피 조건에 따라서, 8극12슬롯 모델의 고정자 치 폭과 슬롯 오픈은 8극6슬롯 모델보다 감소하였다. 동일 권선 조건에 따라서, 상당 직렬 턴 수는 동일하다. <그림 1>은 비교를 위해 제시한 전동기의 형상이다.

<표 1> 전동기 사양

종류	8극6슬롯	8극12슬롯
구동방식	BLDC	
병렬 회로 수	1	
상당 직렬 턴 수	80	
치 폭 [p.u]	2	1
슬롯 오픈 [p.u]	2	1



<그림 1> 전동기 형상

2.3 상 저항

식 (2)은 한 상에 대한 저항을 산정하는 식이다.

$$R_a = \frac{2(l_{stk} + l_{end})}{\sigma A_{coil}} N_c \frac{s}{m} \quad (2)$$

식 (2)에서 l_{stk} 은 적층 길이, l_{end} 는 엔드턴 길이, N_c 는 코일당 턴 수, s 는 슬롯 수, m 은 상 수, A_{coil} 는 코일 단면적, σ 는 코일 도전율이다. 상당 직렬 턴 수가 동일하기 때문에, Bus bar 저항이 동일하다고 가정하면, 엔드턴 길이가 증가할수록 저항은 증가한다.

2.4 상 인덕턴스

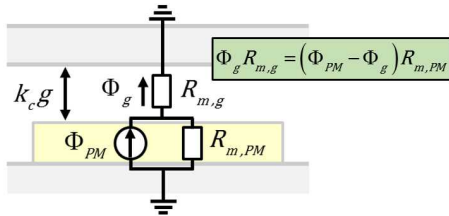
인덕턴스는 턴 수의 제곱에 비례하고 자기저항에 반비례한다. 한 상에 대한 인덕턴스는 식 (3)를 통해 산출한다.

$$L_a = \frac{s}{m} \frac{N_c^2}{R_m} \quad (3)$$

식 (3)에서 R_m 은 자기저항이다. 코일당 턴 수는 슬롯 수에 반비례하고 자기저항은 슬롯 수에 비례하므로 인덕턴스는 슬롯 수의 제곱에 반비례한다.

2.5 상 역기전력

대상 전동기를 <그림 2>와 같은 자기회로로 구성하였다. 고정자를 평활 철심화하고, 기존 공극 길이를 카터 계수를 곱한 공극 길이로 대신하여 슬롯 효과를 적용한다. 식 (5)는 자기회로를 통해 구한 공극의 자속이다.



<그림 2> 전동기 자기회로

$$\Phi_g = \frac{R_{m,PM}}{R_{m,PM} + R_{m,g}} \Phi_{PM} = \frac{l_{PM}}{l_{PM} + k_c g} \Phi_{PM} \quad (4)$$

식 (4)에서 l_{PM} 은 영구자석 두께, g 는 공극 길이, Φ_{PM} 은 영구자석에 의한 자속, k_c 는 카터 계수이다.

$$E_a = \frac{2\Phi}{A_{pm}} N r_g \omega \quad (5)$$

식 (4)에서 계산한 공극 자속을 통해 역기전력을 계산한다. 식 (5)에서 N 은 상당 직렬 턴 수, r_g 는 공극 반경, ω 는 회전자 회전속도, A_{pm} 은 영구자석의 반경반향 면적이다. 동일 고정자 부피에서 슬롯 수가 2배로 증가할 때, 카터 계수는 동등한 수준의 값을 가진다. 이상적인 경우, 역기전력은 슬롯 수가 변화해도 동일하다.

3. 전기적 파라미터 및 전동기 특성 비교

3.1 전기적 파라미터 비교

8극6슬롯 모델과 8극12슬롯 모델의 전기적 파라미터를 수학적 산정과 유한요소해석으로 산출하였다. 각 방법에 따른 전기적 파라미터의 수치 비교는 <표 2>에 나타내었다.

<표 2> 전기적 파라미터 비교

종류		8극6슬롯	8극12슬롯
수학적 산정	상 저항[mΩ]	280	230
	상 인덕턴스[mH]	0.900	0.210
	상 역기전력[V _{rms} @1000rpm]	10.81	10.75
유한요소 해석	상 인덕턴스[mH]	1.193	0.333
	상 역기전력[V _{rms} @1000rpm]	9.64	9.21

수학적 산정 결과, 저항은 8극12슬롯 모델이 8극6슬롯 모델보다 엔드 턴 길이가 작기 때문에 17.9% 감소했다. 인덕턴스는 슬롯 수의 증가에 반비례하므로 8극12슬롯 모델이 8극6슬롯 모델보다 76.6% 감소하였다. 8극12슬롯 모델의 역기전력은 8극6슬롯과 0.56%의 차이만 발생했다.

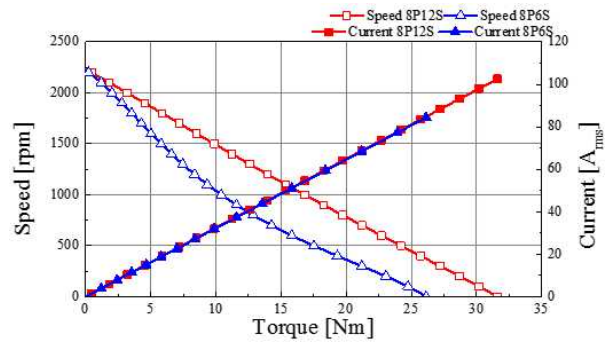
유한요소해석 결과, 8극12슬롯이 8극6슬롯보다 상 인덕턴스가 72.0% 감소하였고, 역기전력은 4.16% 감소하였다. 슬롯 수 변화에 대한 전기적 파라미터의 경향은 두 방법이 동일하였다. 하지만 두 모델의 수학적 산정 결과와 유한요소해석 결과의 전기적 파라미터 수치의 차이가 발생하였다. 그 이유는 수학적 산정 과정에서 역기전력의 경우 자기 포화현상, 인덕턴스의 경우 누설 자속을 고려하지 않았기 때문이다.

3.2 전동기 특성 비교

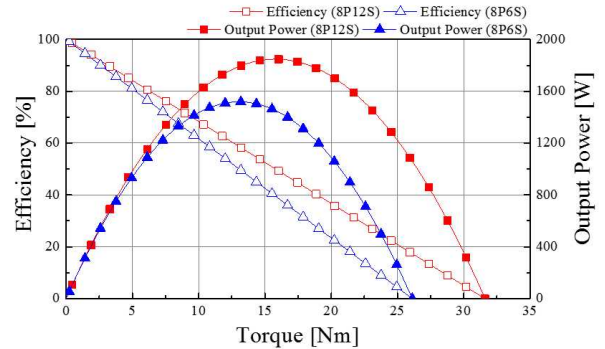
<표 3>은 8극6슬롯 모델과 8극12슬롯 모델의 No Load Speed, Stall Torque와 Maximum Current이다. <그림 3>은 식 (1)을 통해 계산한 8극6슬롯 모델과 8극12슬롯 모델의 TNI 곡선이다. <그림 4>는 8극6슬롯 모델과 8극12슬롯 모델의 효율과 출력 그래프이다.

<표 3> 전동기 특성 비교

항목	8극6슬롯	8극12슬롯
No Load Speed [rpm]	2228	2219
Stall Torque [Nm]	26.12	31.61
Maximum Current [A _{rms}]	84.35	102.64



<그림 3> 전동기 TNI 곡선



<그림 4> 전동기 출력/효율 그래프

8극6슬롯 모델이 8극12슬롯 모델보다 상 저항이 크기 때문에 Stall Torque가 17.5% 작은 값을 나타내었다. 8극12슬롯 모델의 인덕턴스가 더 작기 때문에 <그림 3>의 회전속도 그래프가 8극6슬롯 모델의 그래프보다 선형적인 형태이다. 동일한 토크에서 회전속도는 8극12슬롯 모델이 8극6슬롯 모델보다 높다. 따라서 <그림 4>에서 동일한 토크에서 출력과 효율이 8극12슬롯 모델이 8극6슬롯 모델보다 크다.

4. 결 론

본 논문에서는 8극6슬롯과 8극12슬롯 PMSM에 대한 전기적 파라미터와 전동기 특성을 비교하였다. 전기적 파라미터의 경우, 슬롯 수가 증가할 때 저항, 인덕턴스와 역기전력 모두 감소하였다. 전동기 특성의 경우, 슬롯 수가 증가할 때 효율과 출력이 향상되었다. 따라서 극/슬롯 수 조합이 변화할 때, PMSM의 효율과 토크 특성이 변할 수 있음을 확인하였다. 또한 극/슬롯 수 조합을 8극12슬롯으로 선정하였을 때, 8극6슬롯 경우보다 고효율, 고출력 PMSM을 설계할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 방광, 이수진, 이병화, 홍정표, “극수/슬롯수 조합에 따른 Radial Vibration Force 고려한 매입자석 동기모터 특성 연구”, 전기학회논문지, 60(5), 949-954, 2011
- [2] 김용호, 손도, 권순오, 방광, 김해중, 홍정표, “공간고조파해석을 이용한 설계 파라미터 분석”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 834-835, 2010
- [3] 진준우, 박민로, 김해중, 홍정표, “EV Traction용 매입형 영구자석 동기전동기의 집중권/분포권에 따른 특성 비교”, 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1030-1034, 2015
- [4] 반지형, 권순오, 하승형, 홍정표, “매입형 영구자석 동기전동기의 극수 슬롯수 조합에 따른 특성에 관한 연구”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 771-772, 2006
- [5] 최장영, 박형일, 장석명, 이성호, “전기자동차 압축기용 표면부착형 영구자석 전동기의 극/슬롯수 조합에 따른 특성해석 및 설계”, 전기학회논문지, 60(10), 1846-1857, 2011