

코깅토크를 고려한 자동차 EPS용 전동기 설계

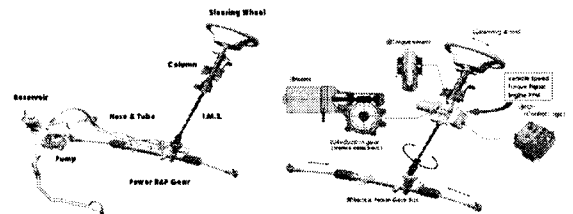
김창기, 이상관, 정상용
 동아대학교 전기공학과

Design of Vehicle Motor for EPS considering Cogging Torque

Chang-ki Kim, Sanggon Lee, Sang-yong Jung
 Department of Electric Engineering, Dong-A University

Abstract - 자동차 EPS(Electric Power Steering)용 소용량 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM : Surface mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)의 설계에는 주로 토크리플 및 코깅토크 저감이 설계목표로 결정되는데, 토크리플과 코깅토크는 치폭, 요크폭, 자석 극호각 등 전동기 형상에 영향을 많이 받는다. 특히, 자석 극호각에 따라 변동이 극심한데, 이는 출력특성이 공극 자속밀도 변화량에 크게 의존하기 때문이다. 한편, 일반적으로 토크리플과 코깅토크의 최소점은 각각 다르기 때문에, 소용량 SPMSM 설계시 큰 어려움으로 작용한다. 따라서 본 논문은 이러한 현상을 효과적으로 고려한 소용량 SPMSM 최적설계를 목적으로 하며, 600W급 고전압 EPS용 전동기 설계를 통해 연구의 타당성을 검증한다.

현상을 효과적으로 고려한 소용량 SPMSM의 토크리플 및 코깅토크 최소화 설계를 목적으로 하며, 600W급 고전압 EPS용 전동기 설계를 통해 연구의 타당성을 검증한다.



(a) Hydraulic Power Steering (b) Electric Power Steering
 그림 1. 유압식 및 전동식 조향시스템의 구조

1. 서 론

자동차 EPS용 전동기로 과거 DC 전동기가 주로 사용되어 왔으나, 최근 전력전자 기술의 발달로 제어기술이 진보함에 따라 벡터제어에 의한 제어용 모터의 영역이 확대됨으로써 영구자석 동기전동기를 이용한 소형 AC 서보모터 등 정밀제어용으로 영구자석 동기전동기가 각광받고 있다[1-3]. 이는 제어기술의 발달에 의한 제어장치의 간소화와 더불어 그 동안 고가이던 영구자석의 가격하락에 힘입어 영구자석 동기전동기가 가격 경쟁력을 가지게 된 데에 기인한다. 그리고 동기전동기의 최대 약점이던 자기동 불가는 자극 위치 검출 및 제어성능 향상으로 미세 속도 제어까지 가능하게 됨으로써 해결되었다. 또한, 영구자석 동기전동기는 회전자에 영구자석을 사용함으로써 회전자의 손실이 없어서 고효율화 및 소형화가 실현된다.

한편, 영구자석 동기전동기는 자석결합 형태에 따라 자석을 회전자 표면에 부착하는 표면부착형(Surface Mounted Type)과 회전자 내부에 삽입하는 매입형(Interior Buried Type)으로 나뉜다. 특히, 자석이 내부에 있어 회전자 돌극성으로 인한 릴럭턴스 토크를 가지는 매입형 영구자석 전동기와 달리, 표면부착형 영구자석 전동기는 전자기 토크(alinment torque)만을 가지므로 전류를 정확한 정현파 형태로 인가해 주면 토크리플이 없는 이상적인 토크를 발생시킬 수 있는 장점을 지니고 있다[4].

반면, 영구자석 전동기는 일반적으로 다른 전동기와 달리 회전자의 자석과 고정자 슬롯 구조간의 자기저항에 의한 코깅토크를 가진다[5]. 코깅토크는 전동기의 소음 및 진동 발생에 큰 영향을 미치므로 이를 최대한 저감시켜야 하며, 역기전력의 고조파와 관련된 토크리플 또한 전동기의 소음 및 진동 발생에 영향을 주기 때문에 이들 모두 최소화 설계가 필요하다[6]. 하지만, 코깅토크와 토크리플의 최소점은 대개 서로 다른 점을 가져 설계시 어려움으로 작용한다. 따라서 본 논문에서는 이러한

2. 본 론

2.1 SPMSM의 특성 해석 및 수학적 모델링

영구자석 전동기는 고정자에 정현적으로 분포된 3상 권선과 회전자에 영구자석을 가지며, 자기적 포화를 무시한다면 영구자석 전동기의 출력은 일반적으로 인버터의 전류 정격과 전동기의 열 정격에 의해 결정되는 최대 전류 I_{max} 및 인버터의 PWM 방법과 인버터가 공급할 수 있는 최대 직류단(DC Link) 전압에 의해 결정되는 최대 출력 전압 V_{max} 에 의해 제한되며, 그 식은 다음과 같이 정의된다.

$$V_{ds}^2 + V_{qs}^2 \leq V_{max}^2 \quad (1)$$

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{max}^2 \quad (2)$$

여기서 i_{ds} , I_{qs} 는 d, q축 전류이고, V_{ds} , V_{qs} 는 d, q축 단자전압을 뜻한다.

동기 속도로 회전하는 회전자를 기준 좌표로 한 동기 좌표계로 표현한 영구자석 전동기의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_r \lambda_{qs} \quad (3)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_r \lambda_{ds} \quad (4)$$

여기서 ω_r 은 동기 전기각속도, R_s 는 고정자 상저항, 그리고 λ_{ds} , λ_{qs} 는 각각 d, q축 고정자 채교자속이다.

이 때, 첫 번째 항의 고정자 상저항에 의한 전압 강하가 크지 않고 두 번째 항인 d, q축 전류의 급변시 발생하는 전류 미분에 비례하는 전압 성분을 무시한다고 가정하면, 다음과 같이 전압 방정식을 간단하게 나타낼 수

있다.

$$V_{ds} = -\omega_r \lambda_{qs} = -\omega_r (L_q i_q) \quad (5)$$

$$V_{qs} = \omega_r \lambda_{ds} = \omega_r (L_d i_d + \lambda_m) \quad (6)$$

여기서 L_{ds} , L_{qs} 는 각각 d, q축 인덕턴스이며, λ_m 은 영구 자석에 의한 쇄교자속이다.

한편, SPMSM의 경우, 회전자에 돌극성이 없기 때문에 $L_d=L_q=L_s$ (동기 인덕턴스)를 만족하므로 식 (5)와 식 (6)을 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$\left(i_d + \frac{\lambda_m}{L_s}\right)^2 + i_q^2 \leq \left(\frac{V_{max}}{\omega_r L_s}\right)^2 \quad (7)$$

따라서 SPMSM은 그림 2와 같은 제어특성을 가지며, L_d , L_q 인덕턴스 차이에 의한 자기저항토크(Reluctance Torque)가 없으므로, 다음과 같은 토크 방정식을 가진다.

$$T = \frac{3}{2} P \lambda_m i_q \quad (8)$$

여기서 P는 극수를 뜻한다.

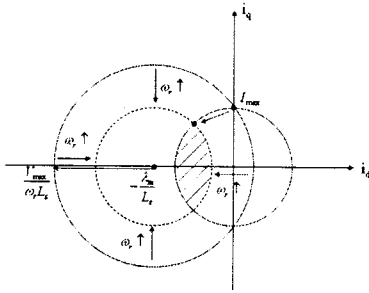


그림 2. SPMSM의 제어특성

2.2 코깅토크 및 토크리플 해석

2.2.1 코깅토크 및 토크리플 산정법

코깅토크는 무부하시 회전자의 자석과 고정자 슬롯 구조간의 자기저항 차에 의해 전동기가 떨리는 현상을 말하는데, 이 코깅토크는 자석의 중심축이 고정자 치(Tooth)의 중심축 및 슬롯의 중심축과 일치할 때는 발생하지 않으나, 그 외의 경우, 즉, 자속이 불균형을 이룰 때 발생한다. 이와 같이, 코깅토크는 자석과 슬롯 간의 관계에 의해 결정되므로 일반적으로 다음 식과 같은 주기성을 지닌다.

$$K = \frac{360}{LCM\{pole, slot\}} [mechanical\ angle] \quad (9)$$

여기서, LCM은 최소공배수를 뜻한다. 코깅토크는 식 (9)의 주기만큼 구하며, 일반적으로 그 주기의 1/20의 스텝 간격으로 해석을 한다.

토크리플은 역기전력의 고조파 성분과 코깅토크 성분에 의해 발생되며, 토크리플 또한 코깅토크와 동일한 주기성을 가진다. 코깅토크 및 토크리플은 대개 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 산정하는데 구체적으로 맥스웰 응력 텐서법을 사용하여 구한다. 특히, 코깅토크 산정시에는 공극 요소의 크기를 충분히 작게 하여야 정확한 해석을 수행할 수 있다.

2.2.2 스큐 효과

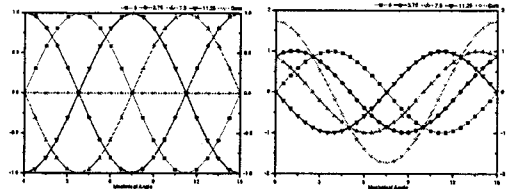
코깅토크를 줄이기 위한 가장 효과적인 방법으로는 스큐(skewing)가 있으며, 이 중 제작성을 고려했을 때 주로 자석 스큐를 사용한다. 자석스큐 적용시에는 스큐각과 자석을 몇 단 스큐로 적용할 지가 중요한 변수로 작용하는데, 이론적으로 코깅토크가 0이 되는 점은 다음과 같다.

$$zero\ cogging\ point = K \times \frac{자석\ 단수 - 1}{자석\ 단수} \quad (10)$$

하지만, 코깅토크가 최소화되는 스큐각을 적용했을 시 그 스큐각만큼 전류 위상각이 틀어지므로 평균토크가 떨어지는데, 이 때 토크리플 값은 커질 수도 작아질 수도 있다. 따라서 코깅토크와 토크리플을 고려한 적절한 스큐각을 설정하는 것이 중요하다. 다음 표 1은 8극12슬롯 모델(코깅주기=15°)을 대상으로 코깅토크가 정현적인 파형을 가진다고 가정했을 때, 스큐각 및 자석 단에 따른 코깅토크 저감 효과를 나타내며 그림 3은 각각 스큐각 11.25°, 7.5°이고 4단 스큐시 코깅토크 파형을 나타낸다.

<표 1> 코깅토크 저감 효과(8극12슬롯)

스큐각	자석 단	저감율[%]
10	3	100
11.25	4	100
12	5	100
7.5	3	66.7
	4	56.7
	5	51.7



(a) 스큐각 11.25°, 자석 4단 (b) 스큐각 7.5°, 자석 4단
그림 3. 코깅토크 파형

4단 스큐일 경우, 그림 3 (a)와 같은 스큐각 적용시 코깅토크의 함은 0이 되고, 그림 4 (b)와 같이 7.5° 스큐각은 코깅토크 최대치가 1.73으로 56.7% 감소한다.

2.3 자동차 EPS용 전동기 설계

2.2.1 해석모델

본 논문의 코깅토크 저감화 대상인 전동기는 자동차 EPS용 소용량 표면부착형 영구자석 동기전동기(8극12슬롯)이며, 코깅토크 및 토크리플에 가장 큰 영향을 미치는 극호각을 설계변수로 선정하였다.

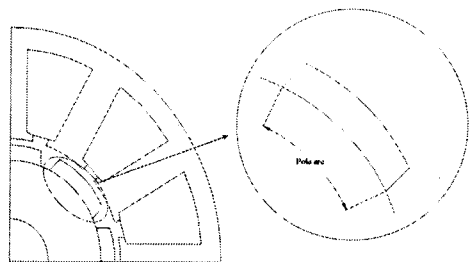


그림 4. SPMSM 해석 모델 및 설계변수

2.2.2 SPMSM 설계

표 2는 극호각에 따른 SPMSM의 코깅토크, 토크리플, 역기전력 및 고조파 분석을 나타낸다. 정밀한 코깅토크를 추출하기 위해 공극 요소의 크기를 충분히 작게 하였다. 코깅토크 및 토크리플 값은 peak to peak 치이다.

<표 2> 극호각에 따른 파라미터(No skew)

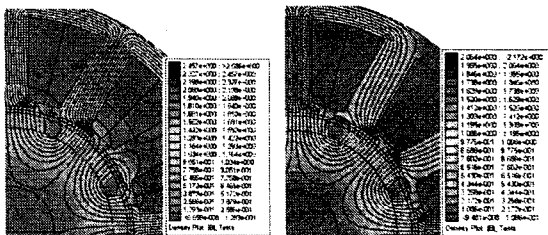
극호각	코깅토크 [mNm]	토크리플 [Nm]	무부하 역기전력 [V, rms]	THD [%]
38.6	38.16	0.152	172.76	3.38
38.8	31.92	0.126	173.13	3.16
39.0	51.92	0.108	173.51	2.96
39.2	70.96	0.099	173.89	2.75
39.4	89.71	0.090	174.24	2.52

표 2의 결과와 같이, 코깅토크 및 토크리플의 최소화는 다르기 때문에 설계에 어려움으로 작용된다. THD가 작을수록 토크리플 또한 낮으며, 2150rpm에서의 무부하 역기전력은 극호각이 클수록 자석량이 많아지기 때문에 조금씩 증가하였다. 표 3에서는 표 2의 모델에서 3단 skew를 적용한 데이터이다.

<표 3> 극호각에 따른 파라미터(3단 skew)

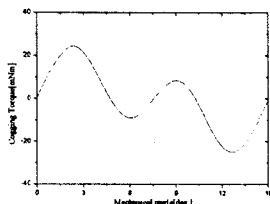
극호각	코깅토크 [mNm]	토크리플 [Nm]	무부하 역기전력 [V, rms]	THD [%]
38.6	12.77	0.177	168.76	1.62
38.8	10.07	0.165	169.13	1.51
39.0	16.18	0.152	169.51	1.40
39.2	23.06	0.140	169.88	1.29
39.4	29.74	0.128	170.24	1.17

앞 절에서 언급한 바와 같이, 3단 skew 적용시(스큐각 7.5°) 코깅토크는 약 66% 정도 감소하였지만, 토크리플은 약간 증가하였다. 자동차 EPS용 전동기는 진동 및 소음을 줄이기 위해 코깅토크가 20 [mNm] 이하로 설계되어야 하며, 토크리플 또한 고려한다면, 극호각 39.0°의 모델이 적합하다고 할 수 있다. 그림 5는 극호각 39.0° 설계 모델의 부하 및 무부하시 자계분포, 코깅토크, 토크리플, 역기전력 파형을 나타낸다.

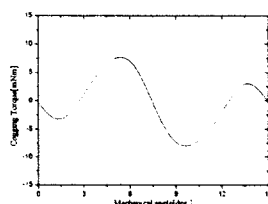


(a) 부하시 자계분포

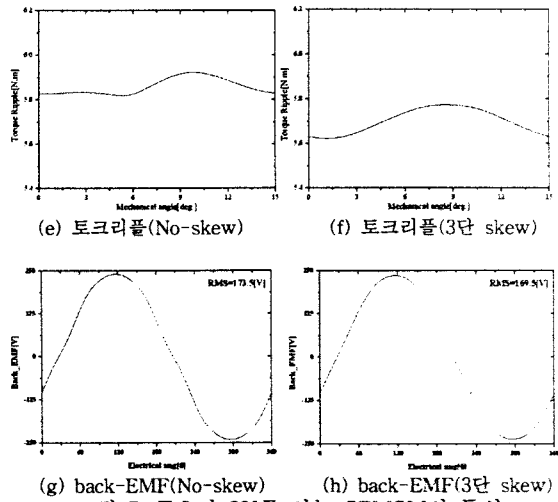
(b) 무부하시 자계분포



(c) 코깅토크(No-skew)



(d) 코깅토크(3단 skew)



(g) back-EMF(No-skew) (h) back-EMF(3단 skew)
그림 5. 극호각 39°를 갖는 SPMSM의 특성

3. 결론

본 논문에서는 자동차 EPS용 소용량 표면부착형 영구자석 전동기의 코깅토크 및 토크리플을 고려한 설계를 시행하였다. 특히, SPMSM의 경우 극호각에 따라 코깅토크 및 토크리플의 변화량이 크므로, 이를 설계변수로 선택하였으며, 코깅토크를 저감시키는 방법 중 가장 많이 쓰이는 자석 스큐를 적용하여 자동차 EPS용 전동기의 제한치를 만족시켰다.

< 감사의 글 >

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Tanja Heikkia, "Permanent Magnet Synchronous Motor for Industrial Inverter Applications - Analysis and Design", Ph. D. Thesis, Lappeenranta University of Technology.
- [2] M. A. Rahman & T. A. Little, "Dynamic Performance Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors", IEE E Trans. on Power App. & Sys, Vol.103, No.6, 1984, pp. 1277-1282.
- [3] C. C. Chan, K. T. Chau, "Novel Permanent Magnet Motor Drives for Electric Vehicles", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.43, No.2, 1996.
- [4] V. B. Hosinger, "Performance of Polyphase Permanent Magnet AC Motors", IEEE Trans. on Power App. & Sys. Vol.99, No.4, 1980, pp.1510-1518.
- [5] 고희석, 김광준, "영구자석을 사용한 모터의 코깅토크에 관한 이론적 해석", 대한기계학회, 제24권 7호, 2000, pp.1795-1800.
- [6] Z. Q. Zhu, David Howe, "Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", IEE E Trans. on Energy Conversion, Vol.15, No.4, 2000.