

영구자석 형상 변경을 통한 SPMSM 토크리플 저감 설계 및 특성해석

문정민*, 서상혁*, 박동혁*, 김용재**, 정상용*
성균관대학교*, 조선대학교**

Design of SPMSM for Reducing Torque Ripple through Magnet shape Change

Jung-Min Mun*, Yong-Jae Kim**, Sang-Yong Jung*
Sungkyunkwan University*, Chosun University**

Abstract - 본 논문에서는 영구자석의 형상을 변화시켜 표면 부착형 동기 전동기(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)의 토크리플을 저감하였다. 교류전동기의 경우 공극에 자속이 정현적으로 분포할수록 역기전력 파형이 정현파에 가까워지고, 토크리플이 작아진다. 위의 조건을 바탕으로, 자석의 사용 양을 동일하게 유지하면서 공간고조파를 최소화하기 위해 공극에 자속이 정현적으로 분포할 수 있도록 자석 형상에 보강기를 적용하여 SPMSM의 최적설계를 진행하였다. 2D 유한요소해석법(Finite Element Method)을 이용하여 각 형상별 토크, 역기전력 등의 모터의 기본 특성들을 해석하여 영구자석 형상이 SPMSM의 성능에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다.

1. 서 론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)의 경우 회전자의 자속이 외부 전원에서 공급되는 형식이 아니라 영구자석에서 발생하기 때문에 계자권선에 의한 동손이 없어 다른 타입의 전동기들에 비해 효율이 높은 특성을 갖는다. 출력 특성으로는, 무게 대비 출력토크가 크기 때문에 권상기와 같은 저속 고토크의 산업영역 전반에 널리 사용되고 있다. 또한 반응성이 우수하여 순시토크 제어가 필요한 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 최근 전력전자 기술의 발달로 제어기술이 진보함에 따라 정밀한 제어가 가능해져 산업현장에서 PMSM의 적용분야는 점점 더 늘어나고 있는 추세이다.

영구자석 전동기는 표면 부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)와 내부 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM) 두 가지로 구분 된다. 본 논문에서 다루는 SPMSM은 회전자 표면에 영구자석이 부착된 형태로 저속에서의 고토크 운전이 유리하고, 릴럭턴스에 의한 들뜬성을 갖지 않기 때문에 토크리플의 저감에 유리한 특성을 갖는다. 토크는 역기전력의 형상에 상당한 영향을 받는데, 토크리플이 커지면 전동기에 소음과 진동을 유발시켜 출력에 악영향을 준다. 따라서 토크리플 저감은 전동기를 설계할 때 고려해야 할 가장 중요한 요소 중 하나이다. [1],[2],[3]

한편, 영구자석 동기전동기는 영구자석(PM)과 고정자(Stator)의 슬롯(Slot)형상에 의하여 코깅토크가 발생하는데, 이는 전동기 내의 비 균일 토크로써 전동기 시스템의 자기 에너지가 최소인 위치로 이동하려는 접선방향의 힘이다. 부하 전류와 상관없이 영구자석과 고정자 슬롯의 상호작용에 의해 발생하는 코깅토크 역시 전동기의 소음과 진동을 유발하는 요인 중 하나로 이를 저감하여야 한다. [4],[5]

따라서 본 논문에서는 고정자 외경이 301.5mm이고 24극 72슬롯인 SPMSM의 영구자석 형상을 변경하여, 토크리플을 저감하기 위한 설계를 진행하였다.

2. 본 론

2.1 SPMSM 특성방정식

3상 동기 전동기의 출력은 제어부의 정격전류와 냉각방식에 의한 전류제한과, 입력 전압에 의한 전압제함에 따라 운전영역이 결정된다. 전압, 전류의 관계식은 다음과 같이 정의 된다.

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

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

위의 식에서 i_{ds} , i_{qs} 는 각각 고정자 권선의 d축과 q축의 전류이고, V_{ds} , V_{qs} 는 d축과 q축의 단자 전압이다. 영구자석 동기전동기의 전압방정식은 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 R_s 는 상 저항, λ_{ds} 와 λ_{qs} 는 각각 d축과 q축의 고정자 쇄교 자속, ω_r 은 동기속도를 나타낸다. 위 식의 고정자 쇄교 자속은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} + \lambda_m \quad (5)$$

$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} \quad (6)$$

λ_m 은 영구자석의 쇄교 자속이며, L_{ds} 와 L_{qs} 는 각각 d축과 q축의 인덕턴스를 나타낸다. SPMSM의 경우 d, q축의 인덕턴스가 같으므로 릴럭턴스 토크는 존재하지 않는다. 따라서 SPMSM은 영구자석에 의한 마그네틱 토크만을 가지게 되고 다음과 같다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \lambda_m i_{qs} \quad (7)$$

2.2 해석모델

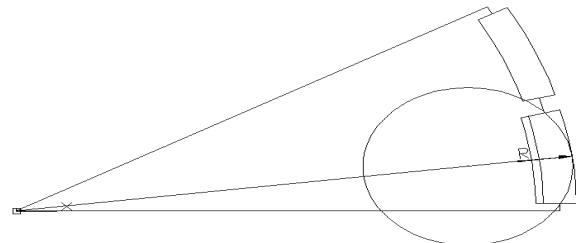
<표 1> 목표 사양 및 설계 제한

구 분	사 양
정격 속도[rpm]	150
정격 토크[Nm]	600
극수 /슬롯 수	24 / 72
고정자 외경[mm]	301.5
자석	N40SH

<표 1>은 본 논문에 사용된 SPMSM의 설계 사양을 나타낸다. 매극 매상 슬롯 수는 1이고 고정자의 코일 권선법은 집중권 방식을 사용하였다.

2.3 영구자석 형상에 따른 설계 변수

기본 모델 자석을 기준으로 잡고, <그림 1>과 같은 설계 변수를 선정하여 영구자석 형상을 제안하였다.



<그림 1> 영구자석 형상의 설계변수

<그림 1>에서 나타낸 것처럼 영구자석의 형상을 변경하기 위하여 설계변수 R을 선정하였다. R은 영구자석의 중심선 위에 원점을 가지고 영구자석의 바깥쪽 면과 접하는 원의 반지름을 나타낸다. 회전자의 외경을

유지하면서 원과 겹치지 않는 부분의 영구자석을 깎아내는 방식으로 형상을 설계하였다. 즉 원의 반지름 R이 작아질수록 더 많은 양의 영구자석이 깎여나가는 형태이다. 모델 별로 자석 사용 양을 동일하게 유지하기 위하여 자석이 깎여나간 만큼 모터 안쪽으로 자석 두께를 연장하였다.

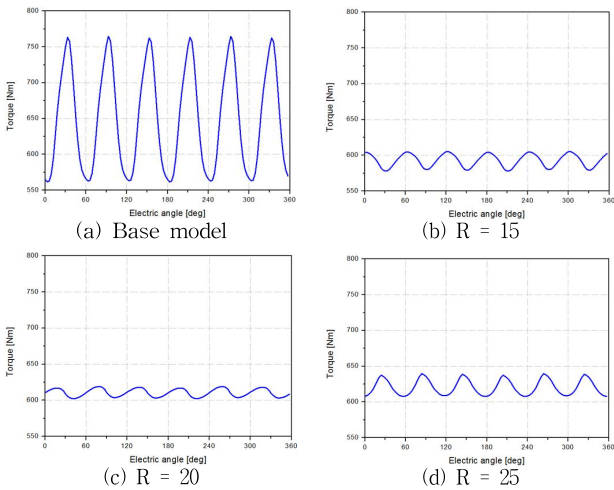
2.4 자석형상 변경에 따른 결과비교

2.4.1 토크 및 코깅토크 비교

설계변수 R의 길이를 조정하여 기본모델을 포함한 4가지 모델에 대한 해석을 실시하였다. 자석의 극호각을 변화시키지 않는 선에서 R=15, 20, 25 세 가지 경우를 설정하였다. 변수 R의 길이에 따른 평균토크 및 토크리플에 대한 결과는 <표 2>와 같다.

<표 2> 모델별 해석 결과

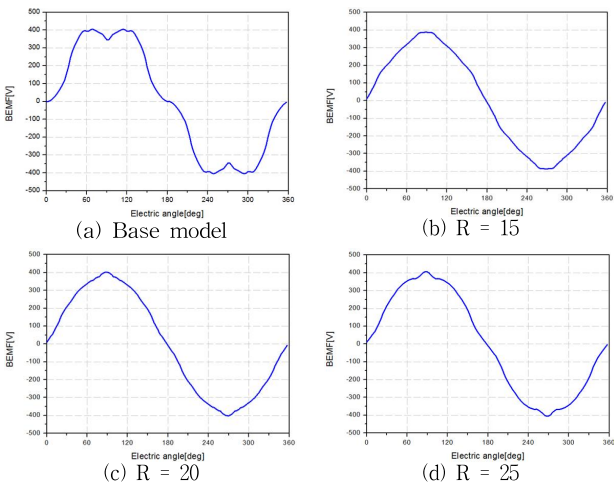
R [mm]	평균토크 [Nm]	토크리플 [%]
Base	649.53	31.22
25	620.70	5.13
20	610.50	2.74
15	592.70	4.58



<그림 2> 모델별 토크 파형

해석 결과에 따르면 토크리플은 R=20 인 모델이 2.74%로 가장 우수한 성능을 보였다. <그림 2>는 네 가지 모델의 토크파형을 나타낸다. 이를 통해 자석형상 변경이 토크리플을 저감하는데 큰 기여를 함을 알 수 있다.

2.4.2 역기전력 비교



<그림 3> 모델별 역기전력 파형

<표 3> RMS 및 THD비교

	Base	R=15	R=20	R=25
RMS[V]	297.49	266.05	274.74	280.17
THD[%]	14.55	3.44	2.42	4.35

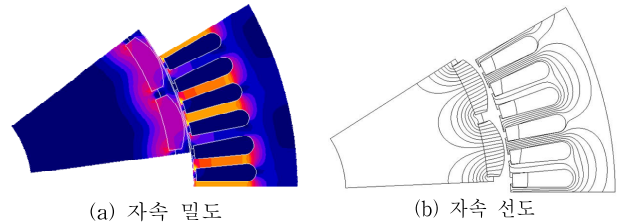
역기전력 파형 분석 결과 R=20 모델이 THD 2.42%로 정현파에 가장 가까운 모델임을 알 수 있었다. 즉 공간고조파를 가장 크게 저감시킨 모델이다. RMS값의 경우 초기 모델과 비교하여 R값을 작게 설계 할수록 감소하는 특성을 보였다. R값이 작아질수록 자석이 깎여나가는 면적이 늘어나고 이에 따라 유효공극이 증가하기 때문에 역기전력의 RMS값이 줄어든다.

2.4.3 최종 모델 선정

모델별로 토크 및 역기전력을 분석한 결과 R=20 모델이 토크리플과 역기전력 특성이 가장 우수하였다. R=20 모델의 평균토크 또한 610.50[Nm]로 정격토크 600[Nm] 기준을 만족하는 것을 알 수 있다. 따라서 최종모델로 R=20을 선정하였다. <표 4>에 Base 모델과 최종 모델의 해석 결과를 비교하였으며, <그림 4>는 최종 모델의 자속밀도와 자속선도를 나타낸다.

<표 4> 초기 모델 및 최종 모델 해석 결과

구 분	초기 모델	최종 모델
평균 토크 [Nm]	649.53	610.50
토크 리플 [%]	31.22	2.74
코깅토크 [Nm]	175.93	17.22
역기전력 [V]	297.49	274.74
THD [%]	14.55	2.42



<그림 4> 최종 모델 자속밀도 및 포화도

3. 결 론

본 논문에서는 자석 사용량을 동일하게 하는 조건 하에서 SPMSM의 토크리플과 코깅토크 저감 설계를 위해 영구자석 형상에 설계변수를 적용하여 설계를 진행하였다. 4가지 영구자석 형상별로 토크리플, 역기전력을 분석하였으며, 토크리플과 역기전력 THD가 가장 작은 모델을 최종 모델로 선정하여 초기 모델과 비교하였다. 해석 결과를 통해 알 수 있는 것처럼, 자석형상에 모깍기를 적용하면 공간고조파를 줄여 토크리플, 역기전력 THD를 저감할 수 있었다. 하지만 이번 논문의 경우 토크리플을 발생시키는 여러 요인들 중 오직 공간 고조파만 고려하였다. 시간 고조파 역시 토크리플에 영향을 주는 요인 중 하나이므로 공간 고조파와 시간 고조파를 함께 고려하여 SPMSM의 토크리플을 저감시키는 연구가 필요할 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김창기, 이상근, 정상용, “정밀제어용 표면부착용 영구자석 동기전동기의 코깅토크 및 토크리플 저감 설계”, 전기학회논문지 제58권 10호, 1923-1929, 2009
- [2] 서명기, 김용재, 정상용, “코깅토크 저감형 Electric Power Steering용 표면부착형 동기전동기 최적설계 및 특성분석”, 대한전기학회 춘계 학술대회논문집, 123-125, 2015
- [3] 장석명, 안지훈, 고정진, 조한욱, 이용복, “손실 저감을 위한 초고속 영구자석 동기전동기의 회전자 슬리브와 고정자 형상 설계”, 대한전기학회 하계 학술대회논문집, 1073-1074, 2011
- [4] 김태우, 장정환, “표면부착형 영구자석 동기전동기의 노치 및 영구자석 offset에 의한 코깅토크 저감 연구”, 대한전기학회 하계 학술대회논문집, 969-970, 2011
- [5] 김규섭, 이재민, 김도진, 홍정표, “SPM의 편심을 고려한 코깅토크 산정에 관한 연구”, 대한전기학회 하계 학술대회논문집, 750-751, 2010