

SPMSM의 고정자 Slot 수에 따른 토크 특성 분석에 관한 연구

이진석*, 김광진**, 박관수*
부산대학교*, SK E&S**

A Study on the Characterization of the Torque with Slot Number of the Stator of the SPMSM

Jin-Seok Lee*, Kwang-Jin Kim**, Gwan-Soo Park*
Pusan National University*, SK E&S**

Abstract - 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 극수와 Slot수 조합에 따른 특성을 분석하고 비교해 보았다. 동기전동기의 극수를 8극으로 고정하고 Slot의 수를 9,12,30,42 Slot으로 설정하고, 이에 따라 Flux Line, Air Gap Flux, 토크특성, 역기전력을 각각 분석하였다. 또 사용용도에 따라 적합한 극수 Slot수 조합을 제시하였다.

1. 서 론

산업화가 급속히 진행됨에 따라 전동기의 소형화, 경량화, 고 정밀화, 고 효율화가 요구되고 있다. 특히 동기전동기는 제어가 용이하고 효율이 좋기 때문에 일반 가정 및 산업에 많이 쓰이는 전동기이다.

영구자석 동기전동기는 코깅토크(Cogging Torque) 및 토크리플(Torque Ripple)이라는 특성을 가지고 있는데 고 정밀화, 고 효율화의 관점에서 단점이 되는 특성이다. 코깅토크는 회전자의 극수와 Slot수의 최소공배수만큼 생성되며, 토크리플의 발생원인이 된다. 토크리플은 진동 및 소음을 유발시키며 전동기의 수명에도 관련이 있다.

본 논문에서는 고정자 Slot수에 초점을 맞추고 표면부착형 영구자석 동기전동기의 고정자 Slot수에 따른 자기장 분포를 해석하고 토크특성 및 역기전력을 분석하고자 한다. 영구자석 동기전동기의 극수에 따른 고정자 Slot수 조합이 어떤 특성을 가지고 있는지 알아 볼 것이다.

2. 본 론

2.1 동기전동기의 Slot수 선정

Slot이란 고정자 철심에 권선을 감기위한 홈으로써 적절한 Slot수의 선정은 전동기 설계에 있어서 매우 중요한 요소이다. 극수/Slot수 조합에 따라 전동기 특성이 달라지기 때문에 Slot수를 선정 할 때 반드시 코깅토크, 권선배치, 권선계수 및 유효턴수, Radial force, 출력밀도, 기계적인 구조등을 고려하여 선정하여야 한다. Slot수 증가에 따라 더 많은 비용이 요구되기도 하지만 Slot수에 따른 공극의 자기 분포를 정현적으로 만들어 줄 수 있기 때문에 전동기 특성에 맞는 선정이 필요하다. 또한 Slot수는 상수와 극수의 조합에 따라 결정되며 Slot수를 선정할 때 분수 Slot 또는 정수 Slot으로 나누어 선정할 수 있다[1].

$$q = \frac{N_{slot}}{p \times N_{ph}} \quad (2.1)$$

여기서 q 는 매극/매상 Slot수, N_{slot} 은 Slot수, p 는 극수, N_{ph} 는 상수를 나타낸다.

매극/매상당 Slot수가 정수이면 정수 Slot, 분수이면 분수 Slot으로 나누어진다. 일반적으로 정수 Slot은 코깅토크 및 토크리플이 크고 다극구조인 경우 Slot이 많아지면 소형화 및 설계가 어려워지지만 권선법이 복잡하지 않고 공극자기분포가 정현적으로 대칭을 이루기 때문에 고조파에 강하다. 분수 Slot은 낮은 토크리플과 코깅토크의 특성을 가지며 토크밀도가 높고 권선법이 복잡하지만 다양하기 때문에 설계를 다르게 할 수 있는 장점이 있다[2]-[3].

2.2 Slot 수에 따른 특성비교

2.2.1 Slot 수에 따른 Flux Line

그림 2.1은 고정자 권선에 전류를 0[A]했을 때 Slot수에 따른 Flux Line을 확인한 것이며, 그림 2.2는 회전자에 자석이 없을 때의 Slot수에 따른 자기장 분포를 나타낸 것이다. 그림 2.1-2.2에서 보는 바와 같이 Slot수에 상관없이 8극 모델이기 때문에 회전자 축 중심으로 8개의 고갈 모양의 자기장을 모든 모델에서 확인할 수 있으나 Slot수에 따라 각 모델 별로 고정자의 자기장 분포는 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 9Slot모델의 경우 자기장이 고르게 분포되어

<표 1> 설계사양

모터 스펙	전압	28V
	정격전류	13.86A
	정격속도	900rpm
	적층길이	60mm
회전자	공극 길이	0.7
	극수	8
	효율	95%
고정자	회전자 외경	83.3mm
	영구자석 두께	4.57mm
	영구자석 사이 간격	1.5mm
	코어 직경	25mm
권선	고정자 외경	130mm
	내경	84mm
	결선방식	delta
	입력파형	sine wave
	턴 수	126

있지 않고 한쪽으로 치우쳐 있거나, 서로 대칭을 이루지 못하고 있다. 이런 현상으로 극수와 Slot수의 조합이 잘 맞지 않는다는 것을 추측할 수 있다. 반면 12Slot모델과 30Slot, 42Slot은 서로 대칭을 이루며 자기장 고르게 분포되어 있다. 그리고 Slot수가 많아질수록 고정자에 자기장이 더 밀집되어 있는 것을 볼 수 있다.



<그림 2.1> 전류 [0]일 때 Slot 수에 따른 Flux Line

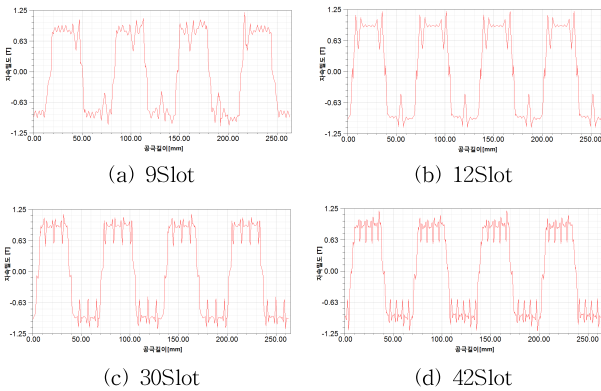
2.2.2 Slot 수에 따른 Air Gap Flux

그림 2.3에서 보는 바와 같이 8극이기 때문에 Slot수에 상관없이 비슷한 모양의 파형과 갯수를 가지지만 9Slot은 파형의 일그러짐이 심하고 균일하지가 않다. 즉 공극길이에 따른 자속밀도가 고르게 나타나고 있지 않다. 12Slot의 경우 파형의 모양은 서로 비슷하지만 자

속밀도의 최대값과 최소값의 차이가 크다. 30Slot과 42Slot은 비슷한 모양의 파형을 가지지만 9Slot과 12Slot에 비해 더 많은 리플 수를 가지며, 42Slot이 가장 많은 리플 수를 보이고 있다.



〈그림 2.2〉 회전자의 자석이 없을 때 Slot 수에 따른 Flux Line



〈그림 2.3〉 Air Gap Flux

2.2.3 Slot수에 따른 토크특성

각 모델마다 전류의 최대값은 19.6[A]와 부하각은 30°로 일정하게 유지하고 Slot수에 따른 영구자석 동기전동기의 토크분포를 확인하였다.

2.2.3.1 Slot수에 따른 토크분포

그림 2.4에서와 같이 각 모델에 따라 토크분포가 다르게 나타났다. 9Slot은 파형이 고르거나 일정하지 않고, 12Slot은 파형이 일정하지만 진폭이 다른 모델에 비해서 크게 나타났다. 30Slot과 42Slot은 파형이 일정하며 리플 수가 다른 모델 보다 많음을 알 수 있다.

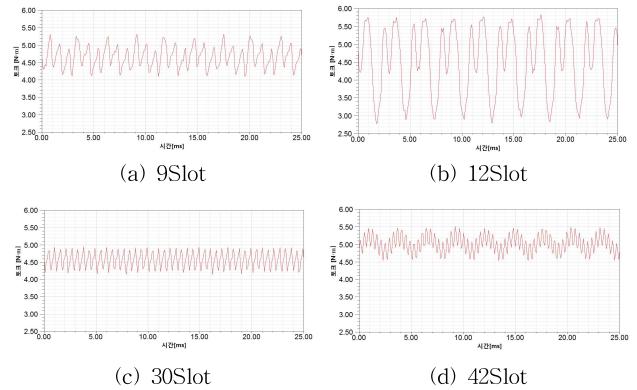
2.2.3.2 토크특성 비교

표 2는 극수와 Slot의 최소공배수, 매극/매상 Slot을 Slot에 따른 토크분포를 표로써 나타내었다. 표 2에서 보듯이 극수와 Slot의 최소공배수가 클수록 리플 수는 적고 리플크기는 작게 나타났으며, 42Slot의 경우 30Slot보다 리플 수는 증가했으나 리플크기는 소폭 상승했다. 42Slot을 제외한 다른 모델들은 극수와 Slot의 최소공배수가 작을수록 최대토크는 크게 나타났으며, 평균 토크는 42Slot이 가장 크고 나머지 3개의 모델은 거의 비슷한 수준을 보이고 있다[4].

2.3 역기전력 비교

그림 2.5에서 보는 바와 같이 역기전력의 크기는 12Slot이 가장 높고 30Slot이 가장 낮게 나타났으며 9Slot과 42Slot은 비슷한 수준의 역기전력 크기를 보이고 있다. 또한 12Slot은 파형의 왜곡이 가장 심하고 9Slot은 정현파의 형태를 띠고 있으며 Slot수가 많아질수록 구

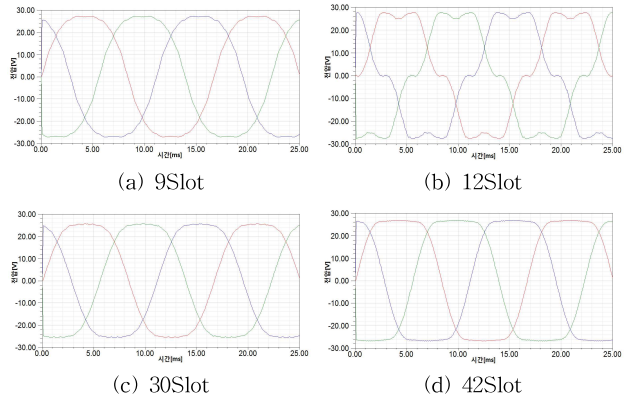
형과 형태에 가깝게 나타났다. 30Slot과 42Slot이 구형과 형태에 가장 가깝지만 역기전력 최대치에서 작은 리플을 확인할 수 있다.



〈그림 2.4〉 토크 분포

〈표 2〉 Slot 수에 따른 토크특성

	9slot	12slot	30slot	42slot
매극/매상 Slot	0.375	0.5	1.25	1.75
극수와 Slot의 최소공배수	72	24	120	168
리플 갯수	27	18	45	63
최대토크[N·m]	5.31	5.83	4.95	5.51
최소토크[N·m]	4.09	2.78	4.14	4.53
평균토크[N·m]	4.67	4.52	4.56	5.02
토크리플[N·m]	1.22	3.05	0.81	0.97



〈그림 2.5〉 역기전력 분포

3. 결 론

극수와 Slot수의 최소공배수가 크면 토크리플 수가 많고 토크리플 크기는 작으며 극수와 Slot수의 최소공배수가 작으면 토크리플 수는 적고 토크리플크기는 커지는 것을 확인 할 수 있다. 단, 42Slot은 30Slot에 비해 토크리플 수는 증가 했으나 리플크기는 오히려 조금 증가한 것을 볼 수 있다. 또한 그에 따른 평균토크 역시 약간씩 차이를 보이고 있다.

앞의 분석 결과로 볼 때 3상 8극 모델의 경우 안정적인 자기장 분포와 높은 평균토크, 낮은 토크리플 특성을 가지고 있는 30Slot과 42Slot이 가장 이상적이며, 여기서 가장 낮은 토크리플의 전동기를 설계한다면 30Slot으로 설계하고, 가장 높은 평균토크의 전동기를 설계한다면 42Slot이 최적의 설계 모델이 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이진환, “분수슬롯과 정수슬롯을 사용한 매입형 영구자석 동기전동기의 토크리플 및 역기전력의 특성 분석”, 2013년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 843-844, 2013. 07
- [2] Duane C. Hanselman, “Brushless Permanent Magnet Motor Design”, McGraw-Hill, pp. 1-82
- [3] J.R. Hendershot & T.J.E. Miller, “Design of Brushless Permanent Magnet Machines”, Motor Design Books LLC, pp. 77-92
- [4] Flux Ver.12, 계우기술(주)