

Helical 형상의 슬롯리스 BLDC 전동기의 출력 최대화 설계

차현록, 백승훈, 윤철호, 정태욱, 김광현
한국생산기술연구원, 전남대학교 전기공학과 전력전자실험실

The Maximum Output Designs of Slotless BLDC Motor Using Helical Shape

Hyun Rok Cha, Seung Hun Baek, Yun Cheol Ho, Jung Tae Uk, Kwang Heun Kim
Korea Institute of Industrial Technology, Electrical Engineering, Chonnam National University

Abstract - 본 논문은 Slotless BLDC 모터를 고출력화 하기 위해서 나선형(Helical)방식을 적용하여 모터의 고출력화를 이루는 방식에 대한 연구이다. 기존의 Slotless BLDC 모터는 코깁이 없고, Slot이 없으므로 소형화에 유리한 장점을 지녔다. 반면에 공극의 자속 밀도가 낮아 출력을 높이는 데 한계가 있었다. 따라서 본 논문에서는 기존의 SLBLDCM의 단점을 극복할 수 있는 Helical 방식을 제안하였다. Helical 방식을 적용할 때 기존의 인덕턴스 영향으로 인한 전류 확립에 한계가 있었으나 본 방식을 적용 시 높은 전류를 흘릴 수 있었으며 이로 인해 고출력화를 이룰 수 있었다. 아울러 Helical 방식을 취하므로 높은 전류로 인한 발열문제까지도 동시에 해결할 수 있는 장점이 있었다. 본 논문에서는 Helical 방식을 적용하여 기존 대비 출력을 15% 이상 향상시킬 수 있었으며, 온도 상승도 10% 이상 억제할 수 있었다.

1. 서 론

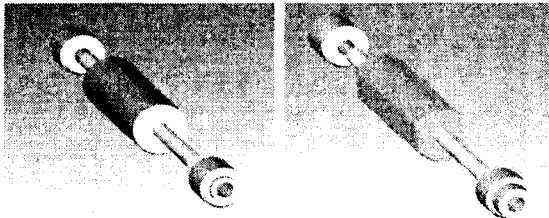
BLDC 모터는 고출력과 높은 제어성 때문에 많은 분야에서 사용되고 있다. 그러나 BLDC 모터의 코깁 토크 때문에 진동과 소음이 발생할 수 있는 문제점이 있다. 그래서 슬롯이 없는 슬롯리스 BLDC 모터에 대해 연구되었다. 슬롯과 teeth가 존재하지 않는 슬롯리스 BLDC(SLBLDC) 모터는 몇 가지 장점을 가지고 있다.

첫째, 코깁 토크가 아주 작기 때문에 부드러운 회전이 가능하다. 둘째, 에어 갭 부분이 존재함에 따라 모터가 작동됨에 따라 발생하는 열이 iron 부분이 아닌 에어 갭 부분을 통해서 제거되기 때문에 권선부분이 효과적으로 식혀질 수 있다. 셋째, 인덕턴스가 슬롯형과 비교해 작기 때문에, 슬롯리스 BLDC 모터는 그 전에 존재하던 모터보다 Sensorless 드라이브에 더 적합하다[1]. 또한 SLBLDC 모터는 슬롯의 부재로 인해 소형화에 유리하고, 코깁 토크가 거의 없어 고속화에 유리하다[2].

본 논문은 출력 설계를 위해 소형이고 2극인 SLBLDC 모터의 설계를 제안하였다. 소형이고 고속인 모터에 있어서 열의 발생은 모터 동작 중 중요한 요소이다[3]. 그러나 Helical 형상의 모터에서는 열의 발생을 나선형의 로터에 의해 자연스럽게 송풍으로 감소할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 열의 발생에 의한 변화로 인해 토크와 효율의 변화를 연구하였다.

2. 자석의 새로운 형상 설계

2.1 분석적 모델



(1) (2)

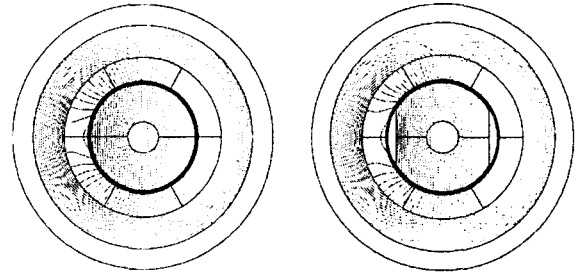
- (1) SLBLDC 모터의 자석 형상
(2) 커팅 SLBLDC 모터의 자석 형상

〈그림 1〉 로터의 형상 설계

본 논문에서는 자석의 효과적인 이용을 위해 그림 1과 같은 형태의 자석을 제안하였다. 그림 1-(2)와 같은 자석 형상은 air-gap으로 직접 지나가는 자속이 감소하므로 인해, 스테이터 도체에 흐르는 자속의 양이 증가하는 방법이다[4][5]. 그림 1-(2)와 같은 형상을 제안한 것은 토크에 영향을 미치는 여러 가지 변수 중에 자속밀도를 효과적으로 사용하기 위함이다.

2.2 자속 파형의 비교

그림 2-(1)은 기존의 SLBLDC 모터의 자속을 나타내고, 그림 2-(2)는 본 논문에서 제안된 새로운 형상의 SLBLDC 모터의 자속을 나타낸 그림이다. SLBLDC 모터에서는 air-gap이 크다. 그로 인해 코어에 생기는 자기력은 air-gap에서 보다 더 작아지고 자속선은 선형적이다.

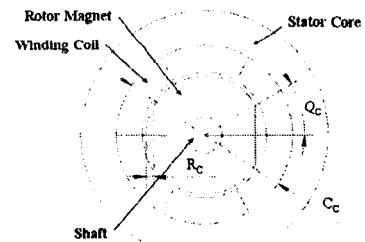


(1) (2)

- (1) SLBLDC 모터의 자속
(2) 커팅 형상의 SLBLDC 모터의 자속

〈그림 2〉 자석의 자속 비교

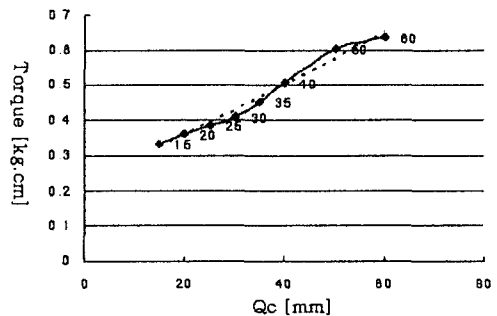
제안된 형식의 로터와 같이 Rs만큼 자르게 되면 그림에서 나타난 것과 같이 더 많은 자속이 코어에 흐르게 됨을 알 수 있다. 자석의 극이 만나는 부분에서 기존의 자석 형상은 그림 2-(1)에서 보는 바와 같이 그 끝부분에서 air-gap 또는 권선으로 지나가는 양이 많은데 비해, 그림 2-(2) 형상에서는 그 끝부분에서 자속의 나오는 부분이 더 길어져 air-gap 또는 권선으로 지나가는 양이 더 적어지게 되어, 상대적으로 코어로 지나가는 자속의 양이 많아지게 된다. 코어에 흐르는 자속의 양이 증가하게 되면 토크의 증가를 가져오게 된다. 여기에서 해석의 편의를 위해 커팅 부분까지의 각도를 Q_c 라 하면 Q_c 의 변화에 따른 토크의 변화를 알아보았다.



- Q_c : 커팅 각도
 R_c : 로터 외경에서 커팅 위치까지의 거리
 C_c : 스테이터 코어 내경

〈그림 3〉 커팅 형상의 변수 설정

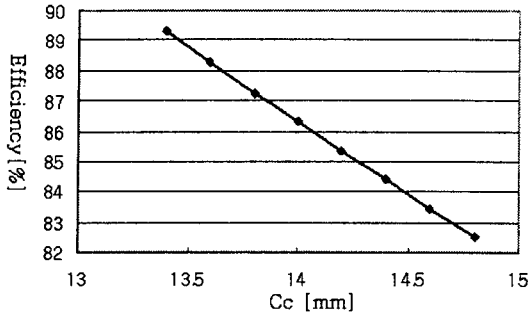
그림 4은 Q_c 를 증가하였을 때 토크를 그래프로 나타낸 그림이다. 그림 4에서 보듯이 각 Q_c 가 증가함에 따라 토크의 크기도 증가됨을 알 수 있다. 토크의 증가를 가져오기 때문에 고출력 부분에 유리한 면이 있다. 그렇지만, Q_c 의 증가는 coil에 흐르는 입력 전류의 양을 증가시켜 입력 또한 증가하게 된다. 이로 인해 효율의 측면에서 보았을 때는 오히려 나빠지는 것을 알 수 있었다.



〈그림 4〉 Q_c 에 따른 torque의 변화

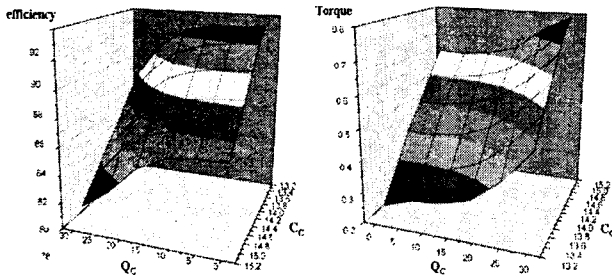
2.3 stator core의 내경 변화

위의 해석에 따르면 Q_c 가 증가할 때 효율은 감소함을 알 수 있었다. 여기에서는 효율을 고려하여 stator core 내경에 변화를 주어 해석하여 보았다.



〈그림 5〉 C_c 에 따른 효율의 변화

기존의 core내경이 $\phi 15$ 인데 내경을 점점 줄여서 효율을 측정하여 보았다. $\phi 13.4$ 까지 줄였는데 이는 coil의 space factor를 고려하여 설정하였다. 그림에서 보듯이 내경을 줄임에 따라 효율이 증가됨을 알 수 있다. 위의 두 결과를 조합하여 최적의 설계 사양을 설정하기 위하여 각 조건에 따라 해석해 보았다. 그림은 위 두 설계에 따른 효율의 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 최적의 조건을 구해서 기존의 SLBLDC 모터와 비교해 보면 더 나은 해석 결과를 도출할 수 있다.



(1) Efficiency graph (2) Torque graph

〈그림 6〉 Q_c , C_c 에 따른 효율 토크 그래프

그림의 두 그래프를 비교하여 보면, 효율은 Q_c 가 $0^\circ \sim 15^\circ$ 일 때까지는 거의 일정하고 그 후 감소하는 것을 알 수 있었고, 토크는 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 위의 두 결과를 비교하여 효율이 거의 같고 토크의 크기가 증가하는 Q_c 와 C_c 를 선택한다. 그림은 기존의 SLBLDC 모터와 위의 결과 나타난 spec의 SLBLDC 모터를 비교한 표이다. 아래 표에서와 같이 토크의 증가가 나타나는데 이는 기존 출력 대비 11% 정도의 출력이 증가함을 알 수 있다.

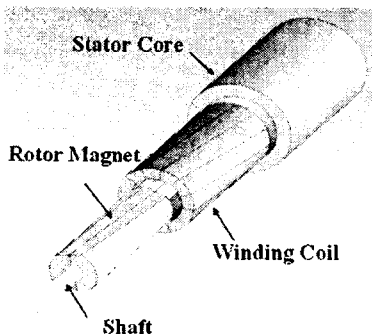
〈Table 1〉 토크와 효율의 비교

	기존 SLBLDC 모터	컷팅 형상의 SLBLDC 모터
Q_c	0°	30°
C_c	$\phi 15$	$\phi 14.4$
Torque	0.64	0.7141
Efficiency	83.527	82.932

3. 열 발생을 고려한 설계

스테이터 도체는 축에 평행하게 존재하지 않기 때문에, 초전도체 AC 발전기나 매우 작은 PM 전류모터에 Helical 권선이 사용될 수 있다. Helical 권선은 end-turns가 없기 때문에, 구리(copper)는 몇몇 skew에 의한 것보다 더 높고, 매우 작고 강한 모터 디자인을 가능하게 한다.

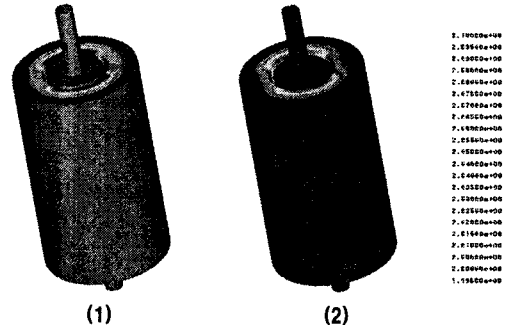
3.1 해석적 모델



〈그림 7〉 Helical 형상의 적용

본 논문에서는 권선 뿐 아니라 자석에도 Helical 방식을 적용하였다. 나선형 구조로서 그림 7에서와 같이 자석부분과 코일 부분이 동일한 각도를 가지고 꼬아진 형태를 설계하였다. 그림 7과 같이 Helical 형상을 적용한 것은 나선형 구조를 사용하여 열 발생을 감소할 수 있다. 모터의 운전에서 입력전류에 의해 발생하는 열은 Helical 형상을 따라 밖으로 전달되게 된다.

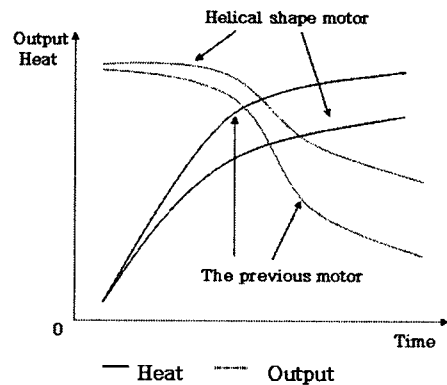
3.2 열해석



(1) 기존 SLBLDC 모터 (2) Helical 형상의 SLBLDC 모터

〈그림 8〉 SLBLDC 모터의 열 분포

그림 8은 3차원으로 열해석한 결과를 보여준다. 위와 같이 Helical 형상은 비록 토크가 감소하지만 더 큰 열 발생의 감소가 나타난다. 그림 9는 출력의 변화를 데이터로 보여주는 그림이다. 여기서 Helical 형상이 기존 SLBLDC 모터보다 열 발생에 의한 출력감소가 더 적음을 알 수 있다. 열 발생의 감소로 인한 출력의 감소가 적어져서 기존 대비 5%의 출력 증가를 가져오게 되었고, 온도에서 또한 기존 대비 10% 이상 감소함을 알 수 있었다. 결과적으로 Helical 형상의 모터가 출력에서 더 큰 향상을 가져올 수 있다.



〈그림 9〉 기존 모터와 Helical 형상 모터의 출력과 열의 비교

4. 결 론

본 논문은 SLBLDC 모터에 잘린 자석 형상과 Helical 형상을 고효율 설계에 적용하였다. 결과적으로 이 방법으로 인해 출력은 모터 운전 시 증가할 것이 예상된다. 본 논문에 제안된 설계는 소형이고 높은 속도가 요구되는 모터에 유용할 것이다. 또한 초전도 모터의 냉각에 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. Kenjo and S. Nagamori, "Permanent-magnet and Brushless DC Motor," Clarendon Press, Oxford, New York, 1985
- [2] Seok-Myeong Jang, "Design and Analysis of High Speed Slotless PM Machine with Halbach Array," IEEE transactions on magnetics, VOL. 37, NO. 4, July 2001
- [3] Jin Hur, Se-Hyun Rhyu, "Three-Dimensional Characteristic Analysis of Micro BLDC Motor According to Slotless Winding Shape," IEEE transactions on magnetics, VOL. 39, NO. 5, September 2003
- [4] Y. S. Chen, Z. Q. Zhu, "Slotless Brushless Permanent Magnet Machines: Influence of Design Parameters," IEEE transactions on energy conversion, VOL. 14, No. 3, September 1999
- [5] Frederic Messine, Bertrand Nogaede, and Jean-Louis Lagouanelle, "Optimal Design of Electromechanical Actuators: A New Method Based on Global Optimization," IEEE transactions on magnetics, VOL. 34, NO. 1, January 1998