

고조파, 와전류 및 열 해석을 통한 BLDCM, IPMSM의 특성비교

진창성*, 배재남*, 김기찬*, 손락원*, 김술**, 이주*

*한양대학교 전기공학과, **유한대학 전기과

A characteristic comparison of BLDCM, IPMSM by harmonics, eddy current and thermal analysis

Chang-Sung Jin*, Jae-Nam Bae*, Ki-Chan Kim*, Rak-Won Son*, Sol Kim**, Ju Lee*

*Hanyang University, **Yuhan College

Abstract - Brushless DC Motor (BLDCM) is DC motor and Interior PM Synchronous Motor (IPMSM) is AC motor. Besides their way of control is different. But it is similar that both motors rotate synchronous velocity and use the permanent magnet.

So, it is an objective to grasp a tendency of motor design and efficiency of motor through a characteristic comparison of BLDCM and IPMSM with the same power, rotation velocity, torque and input voltage.

1. 서 론

BLDCM의 경우 DC 모터의 단점을 극복하고 동일한 사양에서 보다 높은 성능을 얻을 수 있도록 하기 위해 일반적으로 회전자의 표면에 자석을 부착한 구조를 가지는 모터이다. 또한 직류 전원을 공급받아 구동되고 구형파 역기전력이 나타나며 구동을 위한 위치센서로 저렴한 헤센서의 사용으로도 간단하고 손쉽게 동작시킬 수 있는 특징을 가지고 있다. 직류 전원에 의해 동작한다는 점에서는 직류기로 분류할 수 있지만 점평 자제에 의해 동기속도로 회전한다는 점에서는 동기기라고도 볼 수 있어 구분이 어려운 모터이다. 그리고 영구자석의 전기자 쇄교자속의 변화에 의해 토크를 발생시키는 매커니즘을 가지고 있다.

반면 IPMSM의 경우에는 기존에 존재하는 동기기의 회전자에 영구자석을 삽입함으로써 영구자석의 삽입으로 인한 제조비용 및 제품단가가 증가하는 단점이 있지만 동일한 사이즈에서 보다 출력을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 교류 전원에 의해 구동되고 정현파 역기전력이 나타난다. 그리고 헤센서 등의 간단한 센서에 의해 비용이 많이 드는 엔코더 등을 이용해 위치측정을 하여 동작시켜야 하는 단점도 존재한다. IPMSM은 동기속도로 회전을 하고 영구자석의 전기자 쇄교자속에 의한 토크 뿐 아니라 자기인덕턴스 그리고 상호인덕턴스의 변화에 의해서 생기는 토크를 추가적으로 이용할 수 있어 동일 사양의 BLDCM보다 높은 출력을 나타낼 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

기준에 모터를 설계하고 제작하여 사용하는데 있어서는 적용 어플리케이션에 적합한 모터 타입을 선택하여 그에 맞춰 설계 및 제작이 이루어져 왔다. 특히 위에서 언급한 것처럼 BLDCM와 IPMSM은 약간의 차이점을 제외하면 같은 동기기로 분류된다는 점에서 모터의 설계 및 적용 상황을 고려할 때 어떤 모터로 설계할지에 대한 고민이 생길 수 있다.

따라서 본 논문에서는 전압 및 전류의 입력치, 토크와 회전 속도, 모터 각 부분의 사이즈 등의 요소가 동일한 BLDCM, IPMSM을 개략적으로 설계하고, 이를 유한요소법을 이용해 해석한 뒤, 후처리 과정을 통해 고조파 해석, 와전류손 해석 및 열 해석 진행하였다. 이 과정을 통해 얻어진 결과를 비교하여 BLDCM와 IPMSM 중 어

떤 모터를 사용하여도 무방한 조건하에서 어떤 타입의 모터를 선택하는 것이 보다 유리한지 비교해보고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석모델

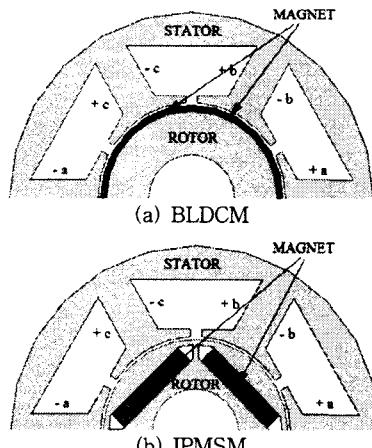


그림 1. 해석모델인 BLDCM와 IPMSM

표 1. BLDCM와 IPMSM의 제원

구분	항목	BLDCM	IPMSM
정격사양	출력	289 W	
	회전속도	2900 rpm	
	토크	0.95 Nm	
	입력전압	48 V	
고정자	상수	3	3
	슬롯수	6	6
	외경	64 mm	64 mm
	적층폭	70 mm	70 mm
	슬롯당 권선수	46 turns	52 turns
회전자	극수	4	4
	외경	32 mm	32 mm
	내경	15 mm	15 mm
	재질	NdFeB	NdFeB
영구자석	두께	1 mm	3.15 mm
	폭	90 deg	16 mm
	잔류자속밀도	1.23 T	1.23 T
공극	길이	0.5 mm	0.5 mm

그림 1은 본 논문에서 비교 대상으로 하는 BLDCM와 IPMSM을 나타내고 있고 표 1에 기본스펙을 나타내었

다. 고조파 해석과 열 해석에 비교 대상으로 하고 있는 BLDCM과 IPMSM은 출력, 회전속도, 토크 및 입력전압이 모두 동일한 모델로 선정하였다. 비교 해석 대상을 선정하는 과정에서 영구자석의 경우는 형상을 완전히 같게 설계하기가 어려운 점이 있어 영구자석의 전류자속밀도와 체적을 같게 하여 선정하였다.

2.2 고조파, 와전류 순설 및 열 해석 방법

본 논문에서는 여러 가지 수치해석 방법 중 하나인 유한요소법을 이용하여 각 위치에 대한 자속밀도 B 를 구하고 각각에 대해 고조파 해석과 열 해석을 수행하였다.

2.2.1 BLDCM과 IPMSM의 유한요소 정식화

z 축 방향으로의 모든 기하학적, 물리적 현상은 동일하며 자기벡터 포텐셜 A 는 z 축 성분만 존재하고 영구자석의 전류 자화량 M_r 은 x, y 성분만 존재한다면 영구자석을 포함하는 BLDCM과 IPMSM의 지배방정식은 자기벡터 포텐셜, 입력전류밀도 그리고 영구자석의 전류 자화량으로 식 (1)과 같이 나타난다.[1]

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) + J_0 + \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial M_{rx}}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

여기서, μ 는 투자율, μ_r 은 비투자율, A 는 자기벡터 포텐셜, J_0 는 입력 전류밀도, M_{rx}, M_{ry} 는 각각 x, y 방향의 영구자석 전류 자화량이다.

식 (1)에서 자기벡터 포텐셜 A 를 구하고 식 (2)를 이용하여 자속밀도 B 를 구할 수 있다.

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

2.2.2 고조파 해석 방법

모터의 고조파 특성을 비교하기 위해 우선 유한요소법으로 회전자 표면에서의 공극 자속밀도 B 를 식 (2)를 통해 구한다.

이렇게 구한 자속밀도 B 를 식 (3)의 푸리에 변환에 적용한 뒤 얻을 수 있는 고조파 성분을 공간고조파와 시간고조파로 분리해 볼 수 있다.[2]

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j k \Omega_c n} \quad (3)$$

$x[n]$: 주기성을 가지는 신호

N : 주기

$\Omega_c = 2\pi/N$: 기본 주파수

식 (3)에서 $x[n]$ 은 주기성을 가지는 신호임으로 자속밀도 $B[n]$ 로 정의할 수 있고 기본파 성분과 고조파 성분을 분리해 내는 것이 목적이므로 DTFS (Discrete Time Fourier Series)를 이용하면 식 (4)와 같이 표현 할 수 있다.

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} B[n] e^{-j k \Omega_c n} \quad (4)$$

식 (4)를 풀어 전개를 한 후에 정리를 하면 자속밀도에 대한 기본파 성분과 고조파 성분으로 분리할 수 있다. 이때 얻어진 고조파 성분은 다시 공간고조파 성분과 시간고조파 성분으로 분리할 수 있다.

회전자의 위치에 대해 푸리에 변환을 적용하고 회전스텝별로 푸리에 변환을 반복하면 회전자의 회전에 따른 공간고조파의 변화를 살펴볼 수 있다.

또한, 회전자의 한 지점에서 회전방향에 대해 푸리에

변환을 하고 회전자의 위치에 대해 푸리에 변환을 반복하면 회전자 표면의 각 부분에 대한 시간고조파 성분을 얻을 수 있다.

2.2.3 와전류 순설 계산 방법

식 (2)에서 구한 자속밀도 B 는 자계 H 는 $B = \mu H$ 의 관계가 있고 암페어의 주회법칙을 적용하면 식 (5)와 같이 전류 J 를 구할 수 있다.

$$\oint \frac{\nabla \times A}{\mu} \cdot dL = I \quad (5)$$

이때, 전류밀도 J 는 단위 면적당 전류 I 임으로 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \frac{1}{S} \oint \frac{\nabla \times A}{\mu} \cdot dL \quad (6)$$

식 (6)에서 구한 전류밀도 J 를 이용하여 식 (7)에서 나타내어진 식으로 와전류를 구할 수 있다.

$$\text{Eddy current loss} = \text{length} \times \frac{1}{\sigma} \int J^2 dA \quad (7)$$

2.2.4 열 해석 방법

일반적으로 열에 의한 온도가 소스가 되어 전체 계에 대한 열의 분포, 즉 온도 분포를 분석해 내는 것이 열 해석의 일반적인 경향이다. 식 (6)에서 구한 전류밀도 J 를 이용하여 열하중 Q 와의 관계를 나타내면 식 (8)과 같이 나타난다.[3][4]

$$Q = \frac{J^2}{\sigma} = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{S} \oint \frac{\nabla \times A}{\mu} \cdot dL \right)^2 \quad (8)$$

여기서, σ 는 전기전도도이다.

식 (8)에서 구한 열하중 Q 를 이용하여 온도 분포를 다듬과 식 (9)와 같이 구할 수 있다.[4]

$$[k][T] = [Q] \quad (9)$$

k : 매질의 열전도도

T : 온도

2.3 고조파, 와전류 및 열 해석 비교

BLDCM과 IPMSM의 특성을 비교하기 위하여 고조파, 와전류, 열 해석의 3가지 해석을 진행하였다. 설계 및 개략적인 해석을 할 경우에 고조파를 고려하지 않은 경우가 많은데 실제 모터에서는 시간의 변화에 따른 전류의 파형에 의해 시간고조파가 발생하고 모터 각 부분의 형상이 동일하지 않기 때문에 매 회전 스텝마다 공간 고조파가 발생하게 된다.

또한 이때 발생하는 고조파에 의해 기본파만 고려했을 때의 와전류 성분에 비해 와전류 성분이 커져 와전류 순설이 증가하는 경향을 띠게 된다. 와전류 순설은 주파수와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 고조파 성분이 증가하면 할수록 와전류 순설은 커지는 경향을 보인다.

그리고 추가적인 와전류 순설 및 철순 등의 영향에 의해 모터 각 부분의 온도 분포가 과도 상태 및 정상 상태에 비해 더 증가하게 되는 것을 예측 할 수 있다.

2.3.1 고조파 해석 및 비교

자속밀도의 기본파 이외에 고조파 성분이 많이 존재한다는 것은 토크리플에 좋지 않는 영향을 미칠 뿐 아니라 와전류의 기본파 성분뿐 아니라 고조파 성분도 증가하게

되어 와전류순이 증가하는 현상이 나타난다. 또한 철손에도 고조파 성분이 많이 포함되어 철손도 증가되는 현상이 나타난다.

그림 2에서는 BLDCM와 IPMSM의 공간고조파와 시간고조파를 각각 나타내었다.

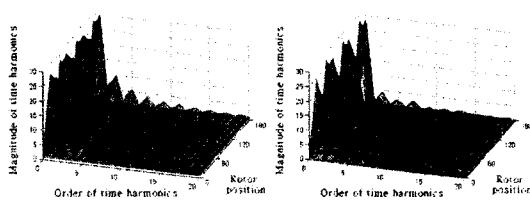
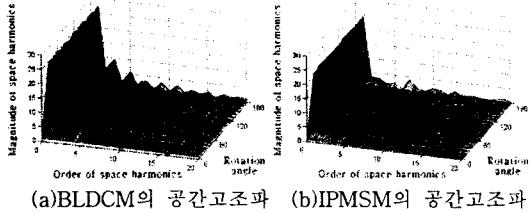


그림 2. 각 모터 자속밀도의 공간고조파와 시간고조파

그림 2에서 보는 바와 같이 BLDCM 자속밀도의 공간고조파와 시간고조파 성분이 IPMSM의 자속밀도에 비해 상대적으로 큰 현상이 나타남을 알 수 있다. BLDCM과 IPMSM에 비해 고조파 성분이 많다는 것은 그만큼 성능 및 효율이 상대적으로 저하된다는 알 수 있고 그만큼 모터 설계 시 자속밀도의 고조파 성분을 고려하여 설계를 해야 한다는 것이다.

2.3.2 자석 1개에 대한 와전류 손실 계산 및 비교

페라이트 영구자석을 사용하였다면 전기전도도를 무시할 수 있지만 영구자석을 히토류계의 NdFeB 자석은 페라이트보다 전기전도도가 약 5배에 이르기 때문에 전기전도도를 무시할 수 없다. 그림 3은 자석 1개에 대해 BLDCM과 IPMSM의 와전류손실을 나타낸 것이다.

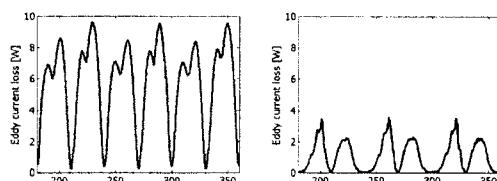


그림 3. 각 모터의 자석 1개에 대한 와전류 손실

BLDCM의 IPMSM에 비해 와전류손이 상당히 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

2.3.3 열 해석 및 비교

그림 4는 BLDCM과 IPMSM를 온도에 대한 유한요소 해석을 하고 모터 각각의 온도 분포 해석한 것을 나타낸다.

모터의 주된 온도 상승 요인은 전류가 흐르는 권선에 의해 발생하는 열이 된다. 이로 인해 권선 부분의 온도 상승이 가장 빠르며, 이 열이 주변 고정자와 회전자로 전도 현상에 의해 이동하면서 모터의 전체적인 온도가 상승하게 되는 결과를 가져오게 된다. BLDCM의 온도가 더 높고 빠르게 진행되는 것은 BLDCM의 경우 입력 전류의 실효치가 8A 수준인데 반해 IPMSM의 경우 5.8A

로 전류비가 약 1.38:1 정도로 차이나는 것에 기인한다고 볼 수 있다. 그 외에도 자석에 흐르는 와전류의 영향, 철심에서 발생하는 와전류손 및 히스테리시스손등에 의해 영향을 받는다고도 볼 수 있다. 동일한 구조를 가지고 출력이 같은 두 모터를 고려할 때 BLDCM에 비해 IPMSM이 열적 특성이 좋고 손실이 작음을 확인 할 수 있다.

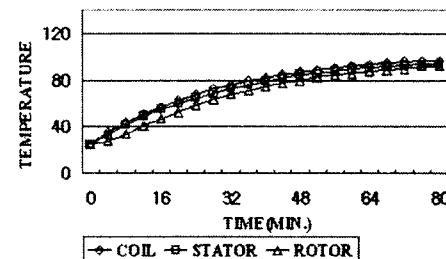
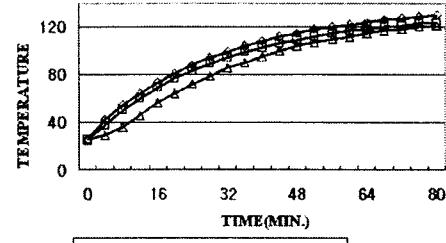


그림 4. BLDCM와 IPMSM의 온도 분포 그래프

3. 결 론

본 논문에서는 출력, 회전속도, 토크 및 입력전압이 모두 동일한 BLDCM과 IPMSM을 비교 모델로 선정하고 두 모터의 특성을 비교하는데 중점을 두었다. 동일한 구조에 같은 출력을 내는 모터를 고려한다면 IPMSM이 BLDCM보다 고조파, 와전류 손실 그리고 열적 특성 면에서 좋음을 알 수 있었다.

그렇지만 이러한 특성 해석을 통해 IPMSM이 BLDCM 보다는 좋은 모터라고 단정 짓을 수는 없다. 모터의 외관으로 봤을 때 단지 영구자석을 회전자 표면에 부착하였다는 것과 매입하였다라는 것 차이일지라도 두 모터가 응용되는 곳도 다르고 모터를 구동하는 제어 방식도 다르기 때문이다.

BLDCM와 IPMSM에서 고조파, 와전류 손실 및 열 해석 비교한 이유는 어떤 모터가 좋은지를 파악하기 보다는 이를 통해 향후 각 모터의 설계 시 어떻게 손실을 줄일 수 있고 효율적인 모터를 설계할 것인가를 파악하는 것이 더 중요하다고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 임달호, “전기계의 유한요소법”, 동명사, 1992
- [2] Simon Haykin, Barry Van Veen, “Signals and Systems”, 2nd, Wiley, 2003
- [3] Kreith, F., “Principles of Heat Transfer”, 3rd ed., Intext Press, New York, 1973
- [4] Cook, R. D., “Concepts and Applications of Finite Element Analysis”, 2nd., Wiley, New York, 1981