

## 매입형 영구자석 동기전동기의 구동방식에 따른 회전자 형상 설계

표세호, 이현, 장기봉, 김규탁  
 창원대학교 전기공학과

### A rotor design according to drive in Spoke type motor

Se-Ho Pyo, Hyun Lee, Ki-Bong Jang, Gyu-Tak Kim  
 Changwon National University Electrical Engineering

**Abstract** - 일반적으로 BLDC 모터는 고효율 고토크의 특성을 가지고, 넓은 속도 범위에 걸쳐 높은 효율을 유지 하고 제어가 용이하므로 널리 사용 되고 있다. 이러한 BLDC 모터는 구동 원리에 의해서 역기전력의 파형이 구형파를 가지는 것이 유리하다. 또한 BLAC 모터는 효율, 역률, 전력밀도 및 토크 밀도가 높은 장점을 가지고 정현파 역기전력을 요구한다. 매입형 영구자석형 동기전동기 중 할박 구조로 인해서 자속을 집중 시키는 Spoke type 모터의 회전자 표면은 철심으로 이루어져 있기 때문에 회전자 표면의 형상을 Arc설계를 통해서 형상 최적화가 가능하다. 회전자 표면의 Arc 설계를 통해서 공극의 자속밀도 분포의 변화를 줄 수 있어 BLDC 구동 시 요구하는 구형파 역기전력 파형과 BLAC 구동 시 요구되는 정현파 역기전력 파형을 Arc 설계 각도에 따라 다르게 발생 시킬 수 있다. 이를 통해서 역기전력을 형태를 구형파와 정현파 형태를 가지도록 설계하여 BLDC와 BLAC 구동 시에 성능을 FEA를 통해서 비교 평가 하여, 구동 방식에 따른 Spoke type IPM 모터의 형상 설계방법을 제시한다.

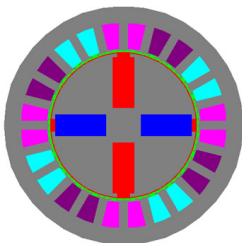
### 1. 서 론

Spoke Type 모터는 고휘력 특성의 이점을 가지고 최근 산업에 많이 이용되고 있지만 회전자 철심의 형태에 의한 역기전력의 구형파적 특성으로 BLDC 구동법이 널리 이용되고 있다. 공극의 높은 자속밀도 출력과 고속회전 시 비산을 완벽하게 방지할 수 있는 구조임에도 BLDC 구동으로 밖에 구동할 수 없다. 하지만 Spoke type 모터의 회전자 표면은 철심으로 구성되어 있고 철심의 공극 측 형상에 따라 자속밀도 분포가 변화될 수 있기 때문에 Arc설계로 정현파 역기전력을 출력할 수 있다. Arc설계는 Spoke type 모터에서 코깅토크를 저감시키기 위한 가장 적절한 방법일 뿐만 아니라 역기전력을 파형을 변화 시킬 수 방법으로써 Arc설계를 적용한 Spoke type 모터의 BLDC 구동과 3상 BLAC 구동을 연구하여 각 구동법에 타당한 역기전력을 발생시키기 위한 회전자 Arc 설계법을 제안하였다. 본 논문에서는 기본모델로 부터 Arc 설계를 하여 정현파 역기전력 모델과 구형파 역기전력 모델을 선정하여, BLDC 구동과 3상 BLAC 구동 시 특성을 비교분석하였다.

### 2. 해석모델 및 특성해석

#### 2.1 해석모델

그림 1과 표 1은 기본모델의 도면과 사양을 나타낸 것이다.



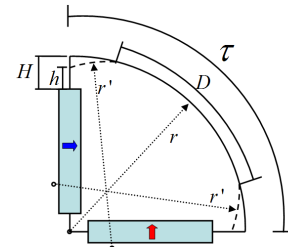
〈그림 1〉 기본모델

〈표 1〉 기본모델 사양

고정자 외경	116[mm]	극수	4극
회전자 외경	70[mm]	슬롯	24slot
슬롯개구폭	4[°]	자속밀도	0.4[T]
상부베리어폭	10[°]	공극	1[mm]

#### 2.2 회전자 형상 최적화

그림 2는 회전자의 형상 최적화를 위한 2개의 변수를 나타내고 있다. h는 상부 베리어 높이, D는 자극 표면 각도이다. Arc 설계 변수는 표 2에 나타 나 있다.

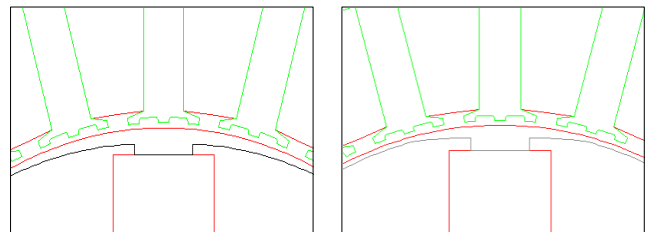


〈그림 2〉 Arc 설계 변수

〈표 2〉 Arc 설계 변경 파라미터

자극면 고정		상부베리어 높이(h)
기계각(D)	자극면의(D/τ)	
20	2/9	1.5
30	3/9	
40	4/9	1.2
50	5/9	1
60	6/9	
70	7/9	

Spoke type 모터의 회전자에 Arc설계를 통하여 코깅 토크와 역기전력을 고려한 최적모델을 구성하였다. 구형파, 정현파 역기전력을 최적화한 모델을 선정할 때 코깅 토크와 역기전력의 고조파 저감 뿐만 아니라, Arc설계에 의한 역기전력 감소분 등을 고려하여야 한다. Arc설계 최적화는 계자부를 형성하는 회전자의 철심에 포화현상을 고려하기 위하여 FEA를 시행하였다. 회전자 고정각(D)을 총 7단위로 나누고 상부 베리어 높이(h)를 총 3단계로 나누어 21개 모델 중 가장 최적 값을 가지는 구형파, 정현파 역기전력 모델을 선정하였다.

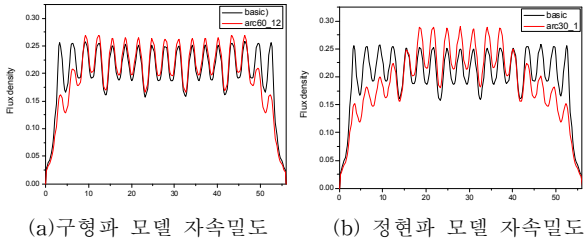


(a) Arc 30 모델

(b) Arc 60 모델

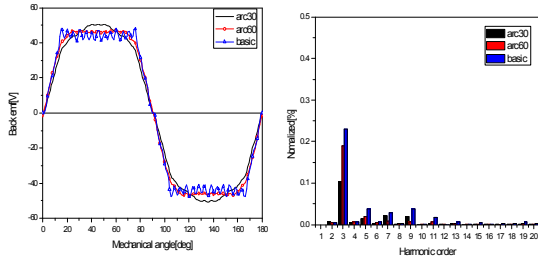
〈그림 3〉 Arc 모델

상부 베리어 높이는 1 mm 높이에서 가장 좋은 특성을 나타내었으며, 자극면이 기계각 30도(자극면의 3/9)를 가지는 Arc 설계 모델에서 정현파에 가장 가까운 역기전력을 발생 하였고, 이를 그림3 (a)에 나타나 있고 Arc 30 모델이라고 하였다. 기계각 60도(자극면의 6/9)를 가지는 모델에서 역기전력이 가장 구형파에 가까운 역기전력을 발생 하였다. 이는 그림3 (b)에 나타나 있고 Arc 60 모델이라고 하였다. 기본모델과 Arc 30 모델과의 자속밀도 비교에서 Arc 30 모델로 변화 될수록 공극의 자속밀도가 정형적이 되고 고조파가 줄어드는 것을 알 수 있다. 그에 따라 코깅토크 또한 감소하고 역기전력의 고조파가 감소된다. 그림 4는 기본 모델과 Arc 설계에 의해 선정 된 구형파와 정현파 모델의 자속 밀도를 나타내고 있다.



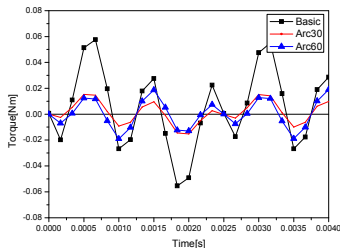
〈그림 4〉 자속 밀도 분포

그림 4에 나타난 것과 같이 Spoke type IPM 모터의 회전자 표면을 Arc 설계 시의 공극부 자속밀도 분포가 변화하게 되어 Arc 형상에 따라 역기전력 파형이 그림 5 (a)와 같이 나타났다.



〈그림 5〉 역기전력 및 고조파 분석

기본모델의 1000 rpm으로 구동 시의 상 역기전력 rms 값은 39.34[V]이다. Arc30 모델은 39.295[V]로써 그 크기가 동일하나, 고조파 성분이 크게 저감된 정현파 형태의 역기전력이 발생하고 있다. 또한 Arc60 모델은 39.86[V]로써 기본 모델에 비해서 역기전력의 리플이 크게 저감되어 역기전력의 rms치가 기본 모델에 비해서 약간 증가한 구형파 역기전력이 발생하고 있다.



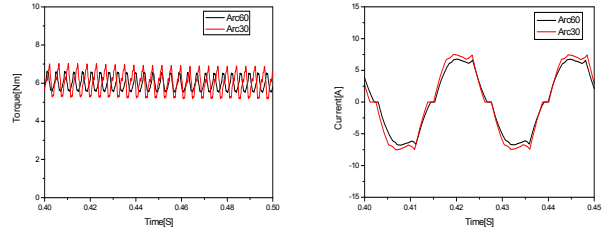
〈그림 6〉 코깅 토크

Spoke type 모터는 자속 밀도의 분포가 자석의 상부 베리어 위치에서 급격한 변화와 할박 구조로 인한 높은 자속 밀도의 집중으로 인해서 큰 코깅 토크가 발생한다. 하지만 회전자 철심의 Arc 설계에 의해서 상부 베리어 부분의 자속밀도 분포가 변화하여 역기전력의 고조파 성분이 그림 5 (b)와 같이 크게 감소하게 되어 코깅 토크 성분이 감소하게 된다. Arc 30 모델과 Arc 60 모델에서 기본모델의 약 60% 이상 코깅토크가 저감되는 것을 그림 6을 통해서 확인할 수 있다.

## 2.3 운전 특성

### 2.3.1 BLDC 구동

Arc 30 모델과 Arc 60 모델을 동일한 조건 하에서 BLDC 구동을 이용하여 FEA를 통해서 운전 특성을 해석하였다. 그림 7는 Arc 30 과 Arc 60 모델을 동일한 BLDC 구동으로 Spoke type 모터를 구동했을 경우의 운전특성을 나타내고 있다. 그림 7 (a)를 보게 되면 Arc 30 모델과 Arc 60 모델의 평균 토크는 동일하게 나오지만 리플이 Arc 30 모델이 더 크게 발생하고 있다. 이는 Arc 30 모델은 정현파 역기전력을 가지므로 구형파 구동인 BLDC 구동 시 토크 리플이 증가됨을 알 수 있다. 그로인해서 상전류의 파형이 (b)에 나타나듯이 Arc 30 모델에서 더 큰 전류가 발생됨을 알 수 있다. 이를 통해서 역기전력이 구형파 형태를 가지는 Arc60 모델이 BLDC 구동을 위해서 더 적합하다는 것을 알 수 있다.



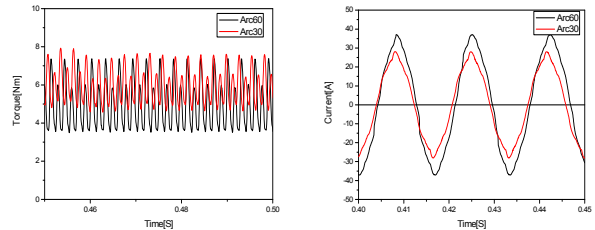
(a) 운전 토크

(b) 전류

〈그림 7〉 BLDC 구동

### 2.3.2 정현파 구동

정현파 구동 시 운전 특성을 보기 위해서 Arc30 모델과 Arc60 모델에 각각 220[V] 3상 정현파 전압을 인가하여 FEA를 통해서 특성을 해석하였다.



(a) 운전 토크

(b) 전류

〈그림 8〉 정현파 구동

그림 8는 Arc30과 Arc60 모델을 동일한 전압의 정현파 구동으로 Spoke type 모터를 구동했을 경우의 운전특성을 나타내고 있다. 그림 8 (a)를 보게 되면 Arc30 모델과 Arc60 모델의 평균 토크는 비슷하게 발생하고 있으나, 그림 8 (b)의 전류를 보면 Arc60 모델의 전류가 Arc 30 모델의 전류보다 크를 알 수 있다. 동일한 토크를 발생시키기 위해서 Arc 60 모델에서는 더 많은 전류가 공급되어야 함을 알 수 있다. 또한, 그로 인해 운전 토크의 리플이 크게 증가하였다. 그러므로 BLAC 구동에서는 역기전력의 파형이 정현파의 형태를 가지는 Arc 30 가 타당함을 알 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 BLDC로만 이용되어 왔던 Spoke type 모터를 코깅토크 감소와 역기전력의 고조파 감소를 위한 Arc설계로 모터 설계시 구동 방법에 따라 Arc를 통해서 공극의 자속밀도 분포를 변화를 주어 역기전력을 파형을 정현파 또는 구형파로 출력 하도록 만들어 구동 방법에 맞는 회전자 형상 설계를 가져 갈 수 있다. BLDC 구동 시에는 역기전력의 파형을 정현파 형태를 가질 경우 모터의 특성이 증가하므로, 회전자 형상 설계 시 Arc를 자극면의 6/9 인 기계각 60로 설계 하는 것이 토크 크리플이나 효율면에서 우수하다. 또한 3상 BLAC 구동 시에는 자극면의 3/9 인 기계각 30로 가져 갔을 때 가장 우수한 성능을 보였다. 그러므로, Spoke type 모터의 Arc 설계를 통해서 역기전력 파형을 구동방법에 따라 다르게 설계 하여야 한다.

일반적으로 사용 되는 BLDC 구동형 뿐만 아니라 회전자 Arc 설계를 통해서 3상 BLAC 구동의 가능성을 제시 하였으며, 3상 정현파 구동이 가능하게 되면서 Spoke type 모터의 유용성이 크게 증대 할 것으로 기대 된다.

### 〈참고 문헌〉

- [1] Kyu-Yun Hwang, "Rotor Pole Design in Spoke-Type Brushless DC Motor by Response Surface Method" IEEE Tans. on Magnetics, vol. 43, on. 4, pp. 1833~1836, 2007
- [2] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, and Jung-Woo Park, "Improved Paramater Modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Finitly Element Analysis", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 36, no. 4, pp. 1867 ~ 1870, 2000.