

## IPMSM의 토크밀도 극대화를 위한 Barrier의 형상 설계

윤진규\*, 강규홍\*\*, 허 진\*  
울산대학교\*, 조선기자재연구원\*\*

### The barrier shape design for maximization of torque density in IPMSM

Jin-Gyu Youn\*, Gyu-Hong Kang\*\*, Jin Hur\*  
University of Ulsan\*, Korea Marine Equipment Research Institute\*\*

**Abstract** - This paper deal with the shape design of the flux barrier to maximize the torque density and minimize the torque ripple in IPM type BLDC motor. The variation of magnetic torque and reluctance toque according to the flux barriers is analyzed in the 120 conducting period. From the result, we confirmed the barrier can be quite worthwhile for the better performance of IPM type BLDC motor

#### 1. 서 론

최근 Hybrid 자동차와 같은 미래형 자동차에서 Traction Motor 및 각종 증대되는 Motorized System에 대한 수요가 급증하면서 전동기의 고출력 및 고 효율화에 대한 연구가 집중하고 있다. 이러한 전동기의 단위 체적당 토크밀도를 증가시키기 위해서 영구자석을 이용한 토크에 자기저항 차에 의한 릴럭턴스 토크를 부가 시키는 매입형 영구자석 전동기(Interior Permanent magnet Motor : IPM)의 연구와 더불어 고정자의 end coil을 저감시켜 전동기 체적을 감소시키는 돌극 집중권 IPM type BLDC Motor의 연구는 현재 매우 활발히 진행되고 있다.[1]

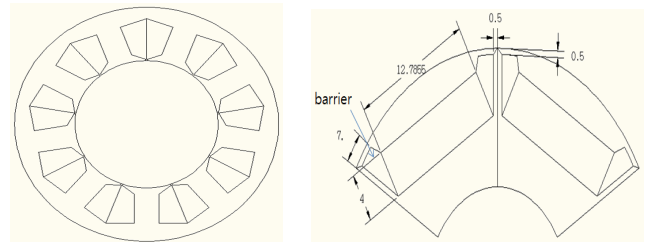
IPM 전동기는 영구자석이 회전자 내부에 삽입되어 있어 영구자석의 표면적보다 회전자의 자극면이 넓기 때문에 자속이 분산되는 특징을 가진다. 게다가 돌극 집중권의 120° 통전방식 IPM type BLDC 전동기는 영구자석의 자속 이용률이 감소하므로 릴럭턴스 토크가 부가되어도 전체 토크는 감소하는 문제뿐만 아니라 매우 극심한 토크 ripple의 문제점이 있다.[1][2] 따라서 돌극 집중권 IPM type BLDC 전동기의 토크 밀도를 증대시키기 위해서는 영구자석에 의한 자속을 권선에 집중시켜야 한다. 또한, IPM 전동기의 릴럭턴스 토크는 전자기적 토크에 2배의 주기를 가지므로 각각의 최대토크가 발생하는 위상은 달라진다. 따라서 회전자 및 고정자의 기계적 제한은 동일한 상태에서 토크 밀도 증가와 토크 ripple 저감을 동시에 만족시키기 위해서는 공극자속의 집중과 동시에 릴럭턴스 토크를 증가시켜 120° 통전 구간에서의 평균토크 증가 및 토크 ripple 저감을 달성해야 한다.

IPM 전동기는 표면 부착형 영구자석 전동기(Surface mounted Permanent magnet Motor : SPM)와는 달리 자극면이 영구자석이 아닌 철심으로 구성되어 있어, 코깅토크 저감을 위해 회전자 표면에 notch를 구성한 연구 [1], 회전자 극면에 air hole을 형성하여 특성향상을 발표한 연구결과 [3]와 같이 설계 목적에 따라 다양한 구조의 회전자 형상을 구성할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 본 논문에서는 120° 구형과 구동 돌극집중권 IPM type BLDC 전동기의 토크밀도 향상 및 토크 ripple 저감을 위한 회전자 형상 설계를 수행하였다. 회전자 극면의 기계적 제한은 동일한 상태에서 120° 통전 구간에서의 평균토크 증가 및 토크 ripple 저감을 동시에 만족시키기 위해 flux barrier의 형상과 공간적 위치 변화를 통한 120° 통전구간에서의 평균 토크 증가 및 토크 ripple 저감을 극대화하는 회전자 형상을 제시하였다.

#### 2. 토크 증가 및 토크 ripple 저감을 위한 회전자 형상설계

회전자 형상 설계에 따른 토크 밀도증가를 위한 6극 9슬롯의 돌극 집중권 IPM type BLDC 전동기의 기본모델을 그림 1에, 유효요소 해석에 의한 무부하 역기전력 및 토크 특성을 그림 2와 그림3에 나타내었다. 해석 결과 120° 도통 구간에서 약 30%의 토크 ripple이 발생함을 알 수 있다. 따라서 120° 도통의 IPM type BLDC Motor의 토크 ripple을 저감하면서 평균토크를 증대시키기 위해서는 도통 구간 내에서 가능한 일정한 토크특성을 가지는 것이 유리하다. 이를 위해서는 돌극집중권 권선의 구조에 부합하는 영구자석에 의한 자속이 전기자 권선에 집중되도록 구조 설계가 강력히 요구되어진다. 본 논문에서는 flux barrier의 형상과 공간적 위치 설계로부터 돌극집중권 IPM type BLDC 전동기의 자속 이용률 증가와 더불어 릴럭턴스 토크 증가를 위한 설계변수에 따른 해석 모델을 그림 4에 나타내었다



(a) 고정자 (b) 회전자  
그림 1. 형상설계를 위한 IPM 전동기의 기본모델

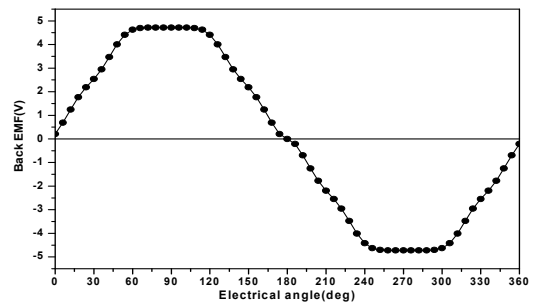


그림 2. 기본모델 무부하 역기전력 특성

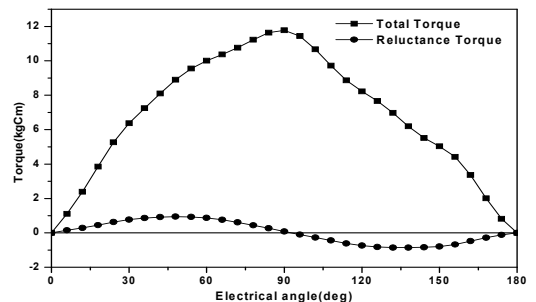
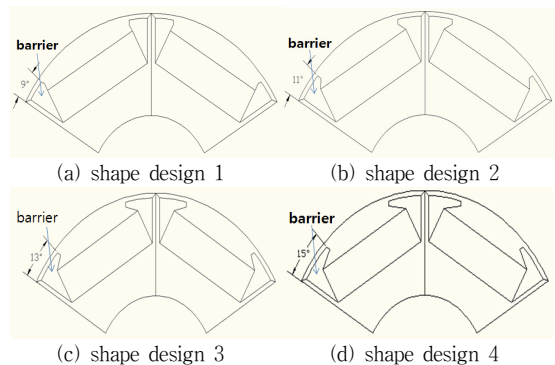


그림 3. 기본모델 토크 특성



(a) shape design 1 (b) shape design 2  
(c) shape design 3 (d) shape design 4  
그림 4. 설계변수 변화에 따른 IPM 전동기 회전자 형상 설계

### 3. IPM 전동기의 회전자 형상설계에 따른 해석결과

돌극 집중권 IPM type BLDC 전동기의 기본 모델과 flux barrier의 형상 변화에 대한 결과를 나타내었다. Flux barrier의 각도가 증가할수록 공극자속의 집중으로 인하여 shape model 4의 경우 기본모델에 비해 역기전력이 약 6.5% 증가함을 그림 5로부터 알 수 있다.

120° 도통 IPM type BLDC Motor에서는 전자기적 토크와의 위상차에 의해 릴럭턴스 토크는 토크 ripple로 작용한다. 따라서 120° 도통방식의 BLDC Motor에서 토크 밀도의 증가와 더불어 토크 ripple 저감을 위해서는 역기전력은 증가시키는 반면 릴럭턴스 토크는 감소시켜야 한다. Flux barrier의 각도에 따른 릴럭턴스 토크특성을 그림 6에 나타내었다. Barrier의 각도가 증가할수록  $q$ 축 자기저항의 증가에 의해 릴럭턴스 토크는 감소함을 알 수 있다.

전자기적 토크에 릴럭턴스 토크가 부가된 IPM 전동기의 정토크 특성은 그림 8에, 120° 도통구간에서의 토크 분포 특성은 그림 9에 나타내었다. Flux barrier의 각도에 따른 120° 도통구간에서의 평균토크를 그림 10에 나타내었다. 해석결과, shape 3 model의 평균토크는 11.16[kg·cm]로 기본모델의 10.55[kg·cm]에 비해 약 5.8% 증가하며 flux barrier의 각도가 증가 할수록 120° 도통구간에서의 평균토크는 증가함을 그림 10에 나타내었다. 2상의 토크가 중첩되는 120° 도통구간에서의 토크 ripple은 기본모델에서는 평균 토크에 약 27%였지만 shape model 3에서는 14%로 약 13%이상 감소한 것을 알 수 있다. 따라서 120° 도통방식의 IPM type BLDC Motor의 토크밀도 증가 및 토크 ripple 감소를 위해서는 자속의 집중을 전기자 권선의 슬롯 피치에 부합되도록 설계해야 함을 IPM type BLDC Motor 회전자 설계 및 해석으로부터 알 수 있다.

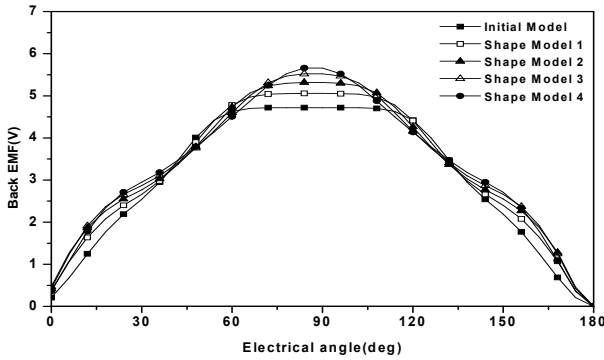


그림 5. 무부하 역기전력 특성

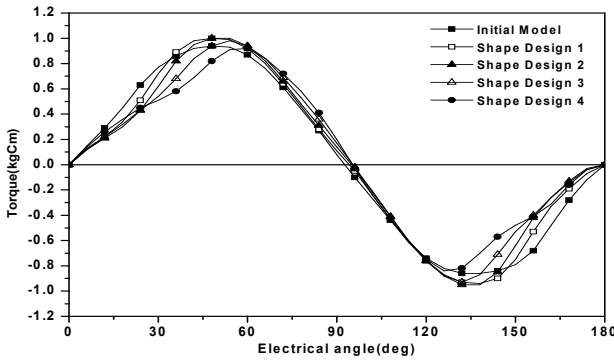


그림 6. 릴럭턴스 토크 특성

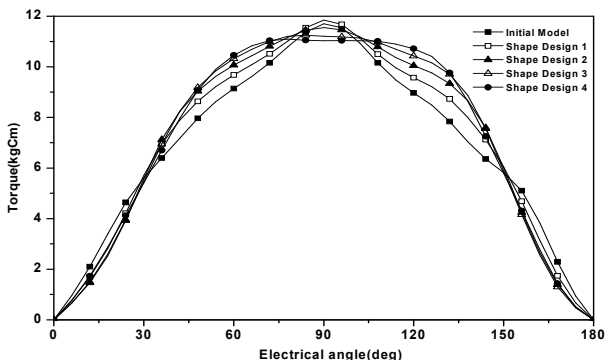


그림 7. Magnetic Torque 특성

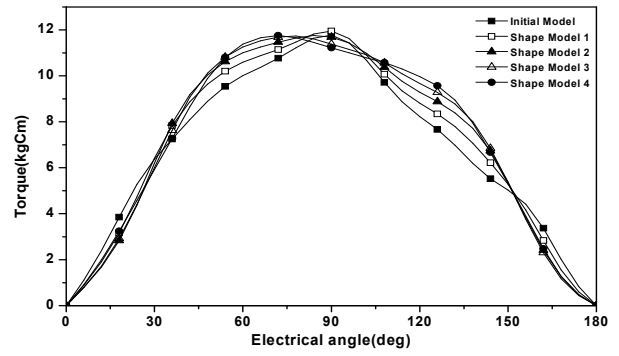


그림 8. Total torque 특성

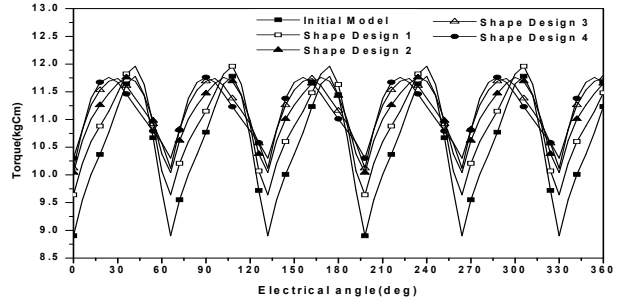


그림 9. 120° 도통구간에서의 토크 분포 특성

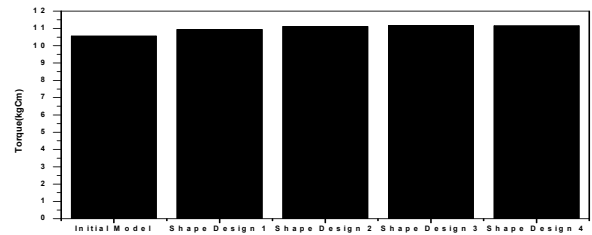


그림 10. 120° 도통구간에서의 평균토크 특성

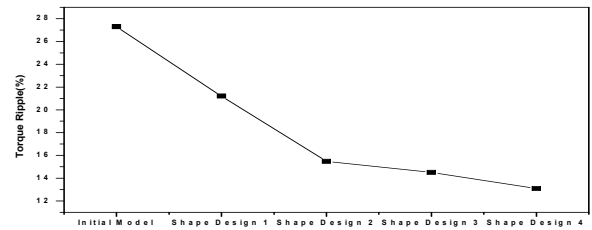


그림 11. 120° 도통구간에서의 Torque Ripple를

### 4. 결론

본 논문에서는 120° 도통방식의 돌극 집중권 IPM type BLDC 전동기의 토크밀도 향상 및 토크 ripple 저감을 위한 회전자 형상설계를 수행하였다. Flux barrier의 각도가 증가할수록 자속의 집중은 집중되고, 릴럭턴스 토크는 저감되었으나, 120°도통구간에서의 평균토크의 증대 및 토크리플의 저감을 확인하였다. 이를 통하여 IPM type 전동기의 경우 구동방식과 목적함수를 고려한 형상설계가 이루어져야 함을 제시하였고, 이는 향후의 전동시스템 설계에 매우 중요한 설계요소임을 제시하였다.

### [참고 문헌]

- [1] Jin Hur, "Characteristic Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor in Electro-Hydraulic Power Steering System", IEEE Trans. on. IE, vol. 55, No 6, pp 2316~2322, 2008
- [2] Gyu-Hong Kang, Young-Dae Song, Gyu-Tak Kim and Jin-Hur, "The Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior Type Permanent Magnet Motor", IEEE Trans. on. IA, vol. 45, No 1, pp 161~167, 2009
- [3] B. Fashimi etc., "Midigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optical Shape Design", IEEE Trans. on magnetics, vol. 42, No. 11, pp.3706~ 3711, 2005