

실험 계획법을 이용한 IPM BLDC 전동기의 토크리플 저감 설계

이상호, 김성일, 이지영, 홍정표, 김영균*, 최재영*
창원대학교 전기공학과, 삼성전자*

Design to reduce Torque Ripple using Experimental Design in IPM BLDC Motor

Sang-Ho Lee, Sung-Il Kim, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, Young-Kyoun Kim*, Jae-Young Choi*
Changwon National University, SAMSUNG ELECTRONICS*

Abstract - This paper deals with optimal design technique to reduce torque of IPM BLDC motor having concentrated winding. Optimization process using experimental design method which is one of the design technique is explained. Finally, the validity of experimental design method is proved by the results between prototype and optimization model.

1. 서 론

매입형 영구자석(IPM) 전동기는 회전자 철심내부에 영구자석이 매입되어 있어 고속 회전시 영구자석의 비산을 방지할 수 있다. 또한 자기적인 토크와 자기 저항차에 의해 발생하는 릴릭턴스 토크를 동시에 이용함으로써 단위 체적당 에너지 밀도가 높아 고출력의 기기로 각광받고 있다. 그러나 표면 부착형 영구자석(SPM) 전동기의 경우 철심에서의 자기 포화에 따른 자기 불평형이 심해 전동기 소음과 진동의 원인이 되는 토크 리플을 증가시킨다 [1][2].

전기기기에서 사용되는 권선방식중 집중권은 분포권에 비해 엔드턴(End turns)이 짧으므로 누설 자속 성분을 감소시킬 수 있고 간단한 구조로 이뤄진 대용량 기기의 자동화 구현 공정으로의 적용이 용이하므로 최근 각광받고 있다.

3상 BLDC 전동기는 구동방식에 따라 크게 정현파 구동과 구형파 구동으로 나눌 수 있다. 3상 정현파 구동의 경우, 120° 위상차를 가지는 정현적인 전원을 인가하는 것으로 토크리를 축면에서는 우수한 특성을 가진다. 반면 3상이 항상 도통되어야 하는데 따른 구동 소자의 부담과 배터리 전원을 사용하는 경우, 왜형율(THD)이 낮은 3상 정현파를 만들어 내기 위해서는 기본 스위칭 소자 이외에 부가적인 회로 구성이 필요하다는 단점이 있다. 구형파 구동의 경우는 120° 도통방식과 180° 도통방식으로 다시 나눌 수 있다. 전자는 드라이버 제작이 용이할 뿐만 아니라 가격경쟁에 있어서도 유리한 이점이 있고, 후자는 정현파 구동과 마찬가지로 전동기 토크 리플을 감소시킬 수 있다.

특성에 영향을 미치는 중요 인자들을 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 제품의 최적조건을 찾아내는 기법으로 실험 계획법(Experimental design)이 있다 [3]. 실험의 목적과 비용 및 시간 등을 고려하여 실험 계획법의 종류를 선택해야 하며 그 종류에는 일부·완전 요인 실험, 반응표면 실험 등이 있다. 그림 1은 실험 계획법 과정을 나타낸 것이다.

본 논문에서는 실험 계획법을 이용한 IPM BLDC 전동기의 토크 리플 저감을 위한 형상 설계를 다룬다. 우선, 많은 설계 인자 중에 일부 요인 설계(Fractional factorial design)을 통해 토크 리플에 유의한 영향을 미치는 인자가 어떤 것이 있는지 살펴보았으며, 두 번째는

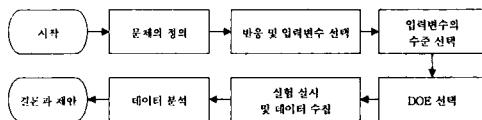


그림 1. 실험 계획법 과정

유의한 설계 인자 중에서 영향도 평가에 따라 두 그룹으로 나누어 각각에 대한 최적화를 수행하였다. 마지막으로 최적화에서는 고려하지 못했던 설계 인자를 이용해 토크 리플을 저감시키기 위한 설계를 최종적으로 수행하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 2는 해석 대상 전동기(prototype model)의 형상 및 설계 인자들을 나타내었으며, skew의 여부도 설계 인자로 추가하였다.

표 1은 prototype model의 사양을 나타낸 것이다. 일반 BLDC 전동기의 토크 리플을 저감시키는 방법으로는 코깅(Cogging) 토크 저감, 무부하시 선간 역기전력 리플 저감 그리고 운전 상태를 반영한 자기회로 설계 등이 있다 [4]. 그러나 IPM 전동기는 운전 시 철심에서의 자기 포화로 인한 불평형이 심하므로 코깅 토크 저감 및 무부하시 선간 역기전력 리플 저감 등으로 토크 리플을 저감시키는 것은 적합하지 않으므로 운전 상태를 반영한 자기회로의 형상 최적화 및 스위칭 구간 변화를 이용한 방법으로 토크 리플을 저감시켜야 한다.

그림 3은 prototype model과 코깅 토크 최소 형상 그리고 무부하시 선간 역기전력 리플이 최소인 형상에서의 토크 비교를 나타낸 것이다. 스위칭 구간이 prototype model과 동일한 $15^\circ\text{--}45^\circ$ 에서의 토크 리플은 30%, 39% 그리고 70%이다.

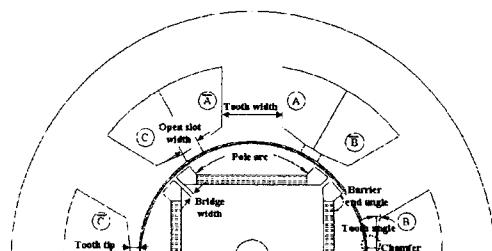


그림 2. Prototype model 형상 및 설계 인자

표 1. Prototype model 사양

항 목	내 용	단 위
DC link 전압	300	V
정격 속도	3000	rpm
정격 토크	80	kgf.cm
정격 출력	2.4	kW
전기자	권선방식	집중권
	정격 전류	A_{rms}
	상당 직렬턴수	Turns
영구자석	Br	T
	μ_{rc}	-
축 방향 길이	90	mm
철심 재질	SI8	

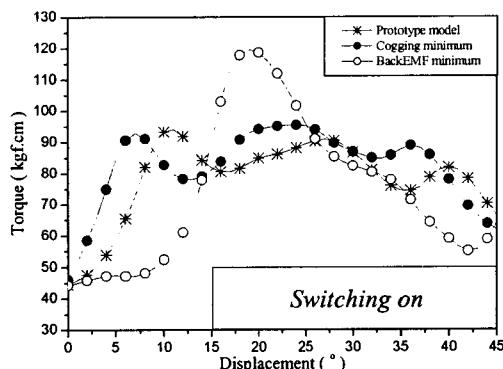


그림 3. 토크 비교

2.2 해석 방법

그림 2의 전동기 초기 위치(A상 역기전력 시작점)로부터 기계적으로 45° 만큼 회전자를 이동시키면서 설계 인자 및 스위칭 구간 변화를 고려한 실험 계획법을 실시하였다. 이에 실험 계획법은 설계 인자가 토크 리플에 미치는 영향을 분석하는 것이 목적이므로 prototype model과 동일한 기자력을 인가시킨 상태에서 중요 인자의 식별이 가능한 일부 요인실험을 수행하였다.

그림 4와 그림 5는 설계 인자의 영향도 평가 및 주 효과를 나타낸 것이다. Tooth tip을 제외한 모든 설계 인자가 토크 리플에 유의한 인자로 판명되었고, skew는 스위칭 구간에 따라 토크 리플에 미치는 영향이 달라지므로 설계 인자에서 제외하였다. 고려해야 할 설계 인자들이 많으므로 실험 횟수 및 설계 인자간의 상호작용 그리고 해석 시간 등을 고려하여 토크 리플에 대해 영향도가 상대적으로 큰 pole arc, bridge width 그리고 tooth angle을 그룹 I, 나머지 인자들은 그룹 II로 나누었다. 그룹 I의 설계 인자들을 이용하여 첫 번째 최적화를 수행하고 그 결과를 바탕으로 그룹 II의 설계 인자를 이용하여 두 번째 최적화를 하였다. 최적화 방법으로는 최근 전기기기 설계에 많이 사용되고 있는 RSM (Response Surface Methodology)을 이용하였다 [5].

그림 6과 7은 영향도 크기에 따라 그룹 I와 II로 나누어진 설계 인자들의 교호 작용을 나타낸 것이다.

표 2, 3은 최적화를 위한 설계 영역을 나타내는데 이는 앞서 실행한 실험 계획법의 설계 결과를 바탕으로 재설정 하였다. Tooth angle과 slot open width의 경우 주효과 그라프에선 21° 과 4(mm)에서 토크 리플이 최소이지만 각각 pole arc와 tooth width와의 교호작용으로 인하여 prototype 의 치수를 기본 영역으로 설정하였다.

Chamfer는 토크 리플에 중요한 인자로 나타났지만 임의 형상 유무에 따른 결과가 실험 계획법에 반영된 것이

므로 설계 영역의 재설정이 필요하다. 실험 계획법의 복잡성을 피하기 위하여 두 번째 최적화 이후 chamfer를 이용한 세 번째 모델(Impacted model)을 결정하였다. Chamfer의 형상을 결정하기 위하여 설계 변수는 x, y의 3수준으로 설정하였으며 완전 요인실험(Full factorial design)을 시행하였다. 그리고 prototype model과 동일한 평균 토크에서의 토크 리플 변화를 분석하기 위하여 기자력을 조절하였다. 그럼 8은 chamfer를 주기위해 설정된 설계 변수의 위치를 보여주고 있다.

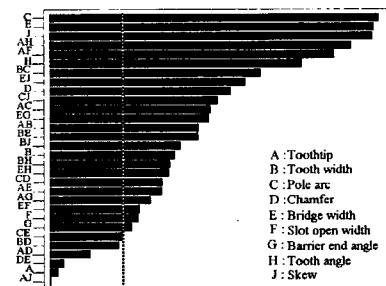


그림 4. 설계 인자의 영향도 평가

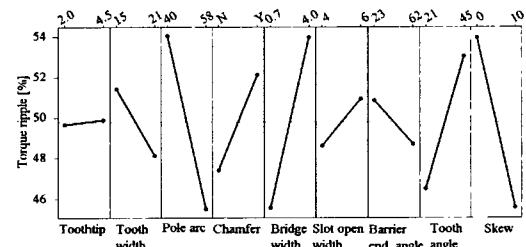


그림 5. 설계 인자의 주 효과

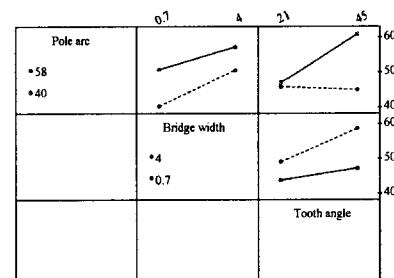


그림 6. 그룹 I 설계 인자의 교호 작용

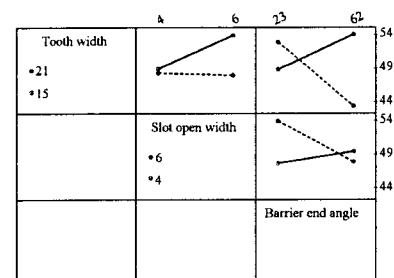


그림 7. 그룹 II 설계 인자의 교호 작용

표 2. 그룹 I의 최적 설계를 위한 설계 영역

Code values		-1	0	1
Real values	Pole arc	56°	58°	60°
	Bridge width	0.6mm	0.7mm	0.8mm
	Tooth angle	30°	34°	38°

표 3. 그룹 II의 최적 설계를 위한 설계 영역

Code values		-1	0	1
Real values	Tooth width	20.7mm	21.0mm	21.3mm
	Slot open width	5.2mm	5.5mm	5.8mm
	Barrier end angle	58°	60°	62°

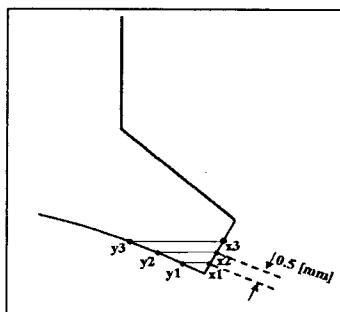


그림 8. Chamfer 설계 영역

2.3 해석 결과

그림 9는 prototype model, 두 번째 최적화 그리고 improved model에 대한 토크 비교를 나타낸 것이다. 여기서 prototype model과 두 번째 최적화 모델의 기자력은 동일하고, prototype model과 동일한 평균 토크 갖도록 하기 위하여 improved model의 기자력은 10(%) 감소 시킨 상태이다. Prototype model과 동일한 스위칭 구간인 15~45(°)에서 두 번째 최적화 모델의 토크 리플은 거의 동일하였다. 그러나 두 번째 최적화 모델의 평균 토크는 prototype model에 비해 5(%) 증가하였으므로 실제 전동기에서 발생하는 소음과 진동은 커지게 된다.

그림 10은 스위칭 구간에 따라 prototype model과 improved model의 토크 리플 변화를 나타낸 것이다. 여기서 lead angle 0은 A상 역기전력 시작점으로부터 기계 각으로 15(°) 뒤진 상태를 말하며 lead angle이 증가할수록 스위칭 시작점이 A상 역기전력 시작점과 가까워지는 것이다. Prototype model은 lead angle이 2(°)일 때 토크 리플이 20(%)로 최소가 된다. 반면에 improved model은 lead angle이 8(°)까지 토크 리플이 계속해서 감소하는 경향을 보인다. Improved model의 토크 리플 최소값은 7(%)이다.

3. 결 론

본 논문에서는 실험 계획법을 이용한 IPM BLDC 전동기의 토크 리플 저감 설계에 대해 다루었다.

IPM BLDC 전동기의 무부하시 선간 역기전력 리플 및 코킹 토크 최소인 형상은 전동기 운전 상태에서의 자기 포화를 고려하지 못하므로 운전 상태를 고려한 상태에서 토크 리플에 대한 실험 계획법을 하였다. 실험 계획법의 결과를 토대로 토크 리플에 대하여 영향도가 큰 설계 인자들을 이용하여 토크 리플을 저감시킬 수 있는

형상을 최적화하고, 나머지 영향도가 작은 설계 인자들과 스위칭 도통구간 변화를 이용하여 토크 리플을 좀 더 저감 시킬 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.I. Kim, J.Y. Lee, Y.K. Kim and J.P. Hong, "Optimization for Reduction of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motor by using Taguchi Method," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 41, pp1796-1799, May 2005.
- [3] Kyung-Tae Kim, Kwang-Suk Kim, Sang-Moon Hwang, Tae-Jong Kim and Yoon-Ho Jung, "Comparison of Magnetic Force for IPM and SPM Motor with Rotor Eccentricity," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, No. 5, pp3448-3451, Sept 2001.
- [3] Stephane Vivier, Frederic Gillon and Pascal Brochet, "Optimization Techniques Derived from Experimental Design Method and Their Application to the Design of a Brushless Direct Current Motor," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, No. 5, pp3622-3626, Sept 2001.
- [4] Dong-Hun Kim, Il-Han Park, Joon-Ho Lee and Chang-Eob Kim, "Optimal Shape Design of Iron Core to Reduce Cogging Torque of IPM Motor," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 39, No. 3, pp1456-1459, May 2003.
- [5] Xianke Gao, Teck-Seng Low, Shixin Chen and Zhejie Liu, "Structural robust design for torque optimization of BLDC spindle motor using response surface methodology," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 37, No. 4, pp2814-2817, July 2001.

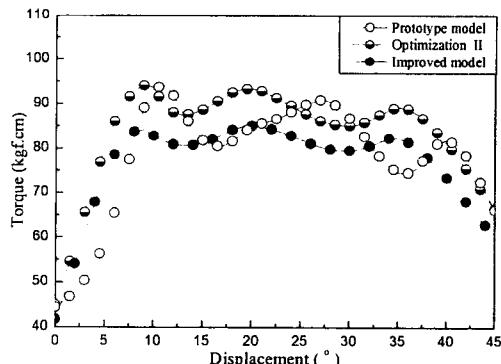


그림 9. 토크 리플

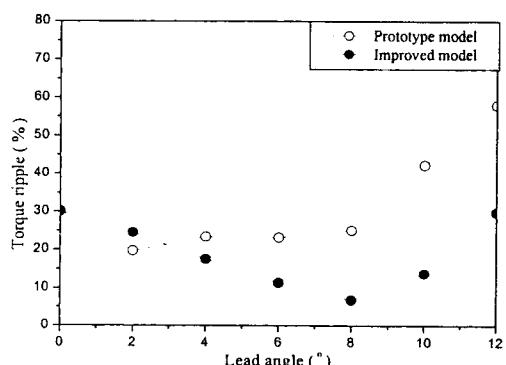


그림 10. 스위칭 구간에 따른 토크 리플