

저전압용 BLDC 전동기의 소비전류 및 토크리플 최소화 연구

A Minimization Study of Consuming Current and Torque Ripple of Low Voltage BLDC Motor

김 한 들* · 신 판 석†
(Han-Deul Kim · Pan Seok Shin)

Abstract - This paper presents a numerical optimization technique to reduce input current and torque ripple of the low voltage BLDC motor using core, coil and switching angle optimization. The optimization technique is employed using the generalized response surface method(RSM) and sampling minimization technique with FEM. A 50W 24V BLDC motor is used to verify the proposed algorithm. As optimizing results, the input current is reduced from 2.46 to 2.11[A], and the input power is reduced from 59 [W] to 51 [W] at the speed of 1000 [rpm]. Also, applied the same optimization algorithm, the torque ripple is reduced about 7.4 %. It is confirmed that the proposed technique is a reasonably useful tool to reduce the consuming current and torque ripple of the low voltage BLDC motor for a compact and efficient design.

Key Words : Low voltage motor, BLDC motor, Back EMF, Optimization, Torque ripple, Consuming current,

1. 저전압 전동기 개요

최근에 저전압 전동기가 자동차산업 또는 가정용 전기기기에 많이 사용되면서 전동기 사용의 안전과 편의성을 위하여 다양한 연구 개발이 증가하고 있다. 일반적으로 사용 중인 산업용이나 가정용 팬 모터는 제품 설계와 사용의 편의성을 위하여 고전압이나 220V를 사용하고 있으나, 고전압 제품은 지역별로 별도의 안전 기준에 대한 시험을 통과하여야 한다. 이러한 이유로, 연구개발의 방향은 유도전동기에서 BLDC와 저전압, 고효율 전동기 등의 분야로 변하고 있다. 또한, 전동기의 어댑터가 70W 이상인 경우는 역률보상회로(PFC, Power Factor Correction)를 의무적으로 장착해야하며(유럽인증 EC), 타지역에서도 장착이 의무화 되어가는 추세이다. 이것은 원가상승의 큰 요인이 되므로, 70W 미만의 고효율 저전압 BLDC 전동기의 개발이 필요하게 된다.

본 논문에서는 저전압 전동기의 정격 운전시 소비되는 소비전류를 저감하기 위하여 고정자 철심 및 코일의 최적설계, BLDC 구동장치 및 토크리플 최소화 등의 연구를 통해서 소비전력을 최소화 하는 방법을 제안하였다. 최적화의 기본모델은 정격속도 1000 rpm, 24V의 전동기이며, 최적화하기 전의 기본 모델에 대한 속도-입력전류 특성을 직접 측정된 결과를 실측된 입력 소비전류는 제품 성능 요구 조건인 1000 rpm에서 2.46 [A]로 전동기의 소비 전력은 59 [W]이다. 추가적인 전장부품(어댑터, LED,

마이컴, 센서류 등)의 소비전력(보통 5-8 W 이내)을 고려하면 소비전력이 70W를 쉽게 초과할 수 있기 때문에 PFC 회로를 부착해야 되고 제품의 단가는 20-30%가 증가하게 된다. 본 연구에서는 제시된 전동기모델의 전자기적인 특성을 검토하여 부분적인 최적설계과정을 거치고, 전동기 스위칭 위상각과 회전자 슬롯반경을 설계변수로 하고, 최적화 방법의 하나인 반응표면기법(RSM: Response Surface Method)[1]을 이용하여 BLDC전동기의 입력전류를 최소화하고 효율을 증가시킬 수 있는 모델을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 기본 모델 전동기의 특성해석

최적화 대상 BLDC 전동기는 3상 24 [V], 50 [W] BLDC 로서 10극의 고정자 영구자석, 12 슬롯의 회전자로 구성되며, 모터의 기본적인 구조는 그림 1과 같고 외전형 전동기이다. 해석모델 전동기의 역기전력을 계산한 결과 전동기의 기계각과 전기각은 1:5의 비율이며 1200 [rpm] 구동 시 상전압최대치는 15 [V]로 확인되었다. 역기전력의 각 상간 피크치는 120V 이며, 60 [rpm]에서 cogging torque를 계산한 결과 최대치가 2.0 [mN·m]로서 출력토크의 평균치 380 [mN·m]에 비하면 아주 작은 것으로 전체 출력발생에는 크게 영향을 주지는 못하는 수치이다. 또한 U-V상간 전압의 스위칭 기준점을 계산하여 1000 [rpm] 정격 구동 시 출력 토크는 250 [mN·m]이며 이때의 토크 리플은 180 [mN·m]로서 약간 크게 나타나며 토크리플 저감에 대한 연구가 필요하다는 것을 알 수 있다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hongik University, Korea
E-mail: psshin@hongik.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hongik University, Korea

Received : September 25, 2017; Accepted : November 21, 2017

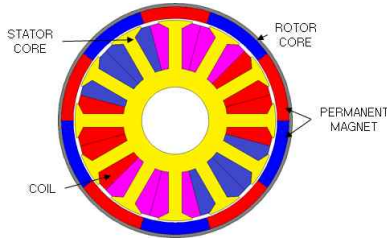


그림 1 유한요소해석 BLDC 전동기 모델
Fig. 1 Finite element analyzing model of BLDC motor

2.2 대상 모델의 최적화 연구

전동기의 입력소비전류를 최소화하기 위하여 고정자 철심 및 코일의 최적화, 스윙칭 위상각의 최적화를 통해서 소비전류를 최소화하였다. 본 논문에 적용된 최적화 기법은 반응표면기법으로 최적화를 진행하였다. 설계변수와 목적함수를 설정한 후 다중 방사상 기저함수를 사용한 반응표면법을 통하여 근사함수를 구하고, 진화전략기법을 이용하여 최적점을 구하였다. 초기의 샘플링 포인트를 이용한 결과만으로는 그 정확성을 예측하기 어렵기 때문에 최적화 시간의 단축을 위하여 민감도기법을 이용한 샘플링 포인트 추가 작업을 실시하였다.[2,3]

전동기의 정자계의 지배방정식 $\nabla \times \nu(\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}$ 에서, 최적화대상의 초기설계치가 주어졌을 때 이에 유한 요소법을 적용하여 유한 차원화된 시스템방정식을 얻는다.

$$[K][A] = [f] \tag{1}$$

여기서 [A]는 절점에서의 자기벡터포텐셜이며, 설계변수에 대한 민감도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dF}{d[p]^T} = \frac{\partial F}{\partial [p]^T} + [\gamma]^T \frac{\partial}{\partial [p]^T} \tag{2}$$

$$[K][\lambda] = \frac{\partial F}{\partial [A]} \tag{3}$$

설계대상마다 목적함수가 각기 다르며 본 연구에서는 1단계로 고정자 철심과 코일을 최적화한 후에 모델전동기의 역기전력을 기준으로 스윙칭 위상각(δ)을 설계변수로 하고, 목적함수는 전동기 소비전류를 최소화하는 함수로 정의하여 최적화를 진행하였다[4]. 설계변수 δ의 범위는 -6.0~2.0 [M_Deg]이며, 최초 샘플링 포인트 9개를 정의하여 초기모델에 대한 입력전류를 계산하고 최적화 과정을 수행하였다. 최적화 목적함수는 수식 (4)와 같다.

$$Minimize F_{obj} = I_{input} [S_N] \tag{4}$$

$$[S_N] = \begin{bmatrix} S_{1on} + \delta & S_{1off} + \delta \\ S_{2on} + \delta & S_{2off} + \delta \\ S_{3on} + \delta & S_{3off} + \delta \\ S_{4on} + \delta & S_{4off} + \delta \\ S_{5on} + \delta & S_{5off} + \delta \\ S_{6on} + \delta & S_{6off} + \delta \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서, I_{input} 는 $[S_N]$ 의 변화에 따른 입력 소비 전류의 평균 값이고, $[S_N]$ 은 각 코일의 Back EMF를 기준으로 제어되는 스윙칭 각도이다. RSM 최적화 과정은 먼저 목적함수와 설계변수 δ를 설정하고 설계변수에 따른 각각의 목적함수를 계산한 후에 최적점의 여부를 확인하고 최적설계변수가 결정되면 BLDC 전동기의 특성을 해석하고 입력 전류 값을 계산하여 평가하게 된다.

소비전류를 줄이기 위하여 고정자 철심과 코일에 대한 최적화를 특성해석 프로그램인 FLUX2D를 이용하여 순차적인 방법으로 철심의 적층 수(N_{CS})와 코일의 턴 수(n)를 설계변수로 하여 최적화하였다. 고정자의 적층길이의 증가는 누설자속의 감소를 가져오므로 소비전력이 감소되는 것으로 판단된다. 1단계 최적화 결과 그림 2에 나타난 바와 같이 고정자 철심의 적층 수는 8.5 [%] 증가되었고, 코일은 6.5 [%] 증가한 결과 입력전류 값이 2.46 [A]에서 2.25 [A] 및 2.29 [A]로 각각 저감되는 효과를 가져왔다.

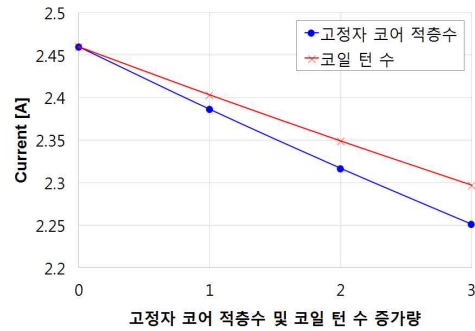


그림 2 고정자 철심 적층수 및 코일 턴수에 따른 입력소비전류 변화

Fig. 2 Input current as functions of number of stator core stack and number of coil turns

2.3 스윙칭 위상에 대한 최적화 결과

1단계의 샘플링 포인트를 활용하여 RSM 최적화를 총 3 회의 반복계산으로 전류최소화 목적함수가 수렴되었다. 추가되는 샘플링 포인트는 적응(adaptive) 샘플링 포인트 기법[5]를 활용하였으며 그에 따른 RSM Spline 곡선을 활용하여 각 설계변수에 따라 각 단계별로 소비전류가 계산되었다. 최적화 결과 그림 3에서 보여준 것과 같이 초기 값 2.46[A]에서 최저값 2.44[A]로 수렴되었다. 고정자 철심과 코일에 대한 최적화 결과와 스윙칭 각도 최적화 결과를 종합하면 최종 전류값은 2.11 [A]로 약 14 [%] 저감되는 결과로서 제품설계에 대단히 유용한 결과가 도출된 것으로 판단된다.

최적 설계된 전동기를 실제로 제작하여 소비전류를 측정한 결과 그림 4의 그래프와 같이 1000 [rpm]에서 초기모델의 2.46 [A]에서 2.12 [A]로 대폭 저감된 것(약 14 [%])으로 최종소비전력은 59 [W] 에서 51 [W] 로서 8 [W]가 저감되어 PFC가 필요 없는 어댑터를 적용할 수 있게 되어 대단히 경제적인 최적설계라고 평가할 수 있게 되었다.

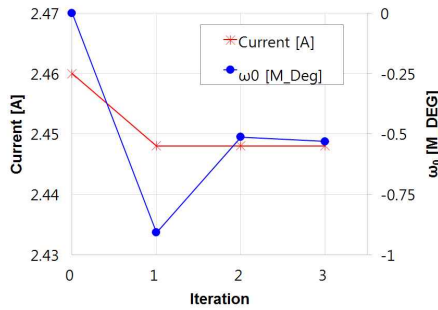


그림 3 최적화 결과 소비전류와 스위칭 각도
 Fig. 3 Consuming current and switching angle

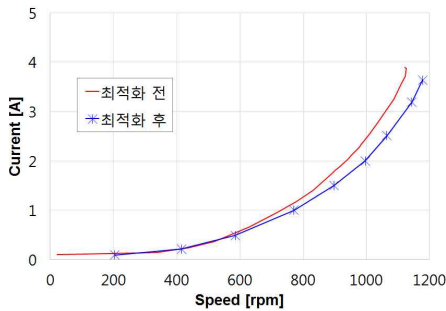


그림 4 최적화 결과의 전류-속도 그래프
 Fig. 4 Current-speed curves as optimization result

3. 토크 리플 저감 최적화

동일한 최적 설계 알고리즘을 이용하여 해석모델의 토크리플 저감에 대한 연구를 수행하였다. 그 목적 함수와 설계변수를 설정하여 최대 토크시 발생하는 토크리플을 저감하여 모터의 진동 및 소음과 스위칭시 발생하는 리플을 감소시키는 것이 연구의 목적이다

그림 5(a)는 최적화에 적용되는 회전자 치의 설계변수를 나타낸 것으로, D 는 보조권선이 들어갈 홈의 외경 설계변수 이고, L 은 슬롯 외각과 홈의 거리 설계변수이다. 보조권선에 인가되는 전압 V 로 설계 변수를 지정하였고, 보조권선의 사양은 제품의 홈 및 모터의 제조과정을 고려하여 1턴으로 제한하였다. 모터 설계 검토 시 권선의 저항은 아주 작은 값으로 전류제어용 저항(1 [Ω])으로 설계검증 차원에서 설정한 값으로 실제 모터에 관련 기술을 적용 할 경우에는 그 값을 조절할 필요가 있다. 상기 3개의 설계 변수를 지정하여 모터 구동시 슬롯치에서 나아가는 자속을 변화하여 토크 리플을 저감하는데 그 목적이 있다. 최적화의 목적함수로 토크리플을 최소화하기 위하여 식 (6) 같이 정의하고, 설계변수의 제약조건은 수식 (7)과 같이 제한하였다.

1차 샘플링 포인트의 개수는 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 로 균등 분할로 진행하였다. 1차 최적화에 따른 반응표면 근사함수를 구한 후 민감도 기법을 이용하여 샘플링 포인트를 추가하여 총 3차례의 RSM 근사함수를 구하여 최적화하였으며, 3차 계산결과 spline

근사함수는 그림 5(b)와 같다.

그림 6은 목적함수의 계산값 및 해석 결과를 그래프로 표현한 것으로 총 3단계의 최적화 진행 결과 수렴함을 보여주고 있다. 그림 7은 최적화에 따른 토크리플 특성 곡선이며, 총 3회의 최적화에 따른 목적함수의 변화값은 13.98[mN·m]에서 9.98[mN·m]로 28.6 [%]로 저감 하였다 이때의 평균 출력토크는 381.4 [mN·m]에서 400.0[mN·m]로 18.5 [mN·m](4.9 [%]) 증가하였으며, 토크리플의 피크-피크값은 198.4 [mN·m]에서 183.0 [mN·m]로 14.6 [mN·m](7.4 [%]) 저감되었다.

$$\text{Minimize } F_{obj} = \sum_{i=1}^{N_p} \sqrt{\left(\frac{\tau_i - \tau_0}{\tau_0}\right)^2} \quad (6)$$

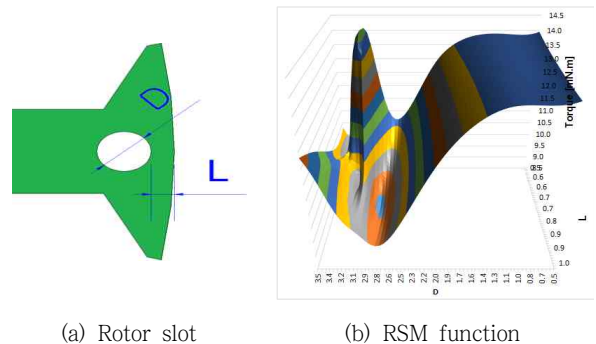


그림 5 회전자치의 설계 변수와 RSM 근사함수
 Fig. 5 Design variable of teeth and RSM function

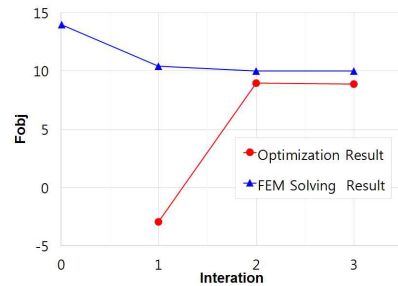


그림 6 최적화에 단계별 토크 계산 결과값
 Fig. 6 Calculation results of optimizing steps

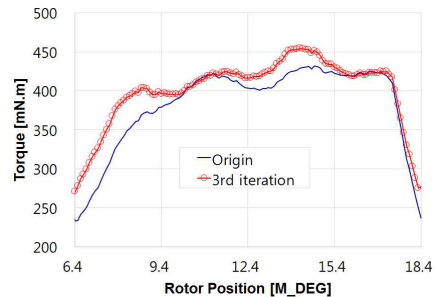


그림 7 최적화 전후의 출력 토크 곡선 비교
 Fig. 7 Comparison of output torque profiles

$$\text{subject to } \begin{cases} 0.5 [mm] \leq L \leq 1.0 [mm] \\ 0.5 [mm] \leq D \leq 3.5 [mm] \\ 0.1 [Volt] \leq V \leq 4.0 [Volt] \end{cases} \quad (7)$$

4. 결 론

본 논문에서 산업용 또는 가정/상업용 저전압 BLDC 전동기 (24 [V], 50 [W] BLDC)의 효율향상을 위하여 소비전류를 최소화 하는 기술을 적용하여 최적설계를 하는 방법을 제안한 것이다. 최적화 알고리즘은 수치해석기법인 민감도기법과 적응 샘플링 포인트 기법, RSM을 활용하고 유한요소프로그램과 연동하여 계산 하였다. 최적화 설계모델은 3상 10극 BLDC 전동기로서 기기의 특성은 FLUX2D와 특성해석 프로그램을 이용하여 계산하고 분석 하였다. 본 논문에서 제안한 최적화 알고리즘은 두 단계로 수행 하였으며, 1단계에서 전동기의 고정자 철심과 코일을 주어진 범위 내에서 최적화하고, 2단계에서 1000 [rpm]의 정격 구동 시 스위칭 위상을 최적화하여 종합적으로 소비되는 입력전류를 최소화 하였다. 그 결과 정격구동 시 소비 전류는 2.46 [A]에서 2.11[A]로 14 [%] 저감되었으며, 소비전력은 초기 설계치 59 [W]에서 51[W]로 감소되어 PFC 회로가 없는 범용 어댑터를 사용할 수 있는 제품설계가 가능한 결과를 도출하였다. 이것은 소비 전류의 최소화를 위하여 전동기의 구조적인 최적설계 뿐만 아니라 위상각 제어의 최적화를 통한 입력전류 저감의 가능성을 확인한 것이다.

또한, 슬롯치에 권선을 삽입하는 홀을 최적설계하여 토크리플 저감에 대한 연구를 하였다. 최적화결과 토크리플은 약 4 [mN·m](28 [%])로 저감되었으며, 평균 출력 토크는 4.9 [%] 증가하는 우수한 결과를 도출하였다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 미래창조과학부의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2017K000451).

References

[1] P.S. Shin, S.H. Woo, C.S. Koh, "An Optimal Design of Large Scale Permanent Magnet Pole Shape Using Adaptive Response Surface Method With Latin Hypercube Sampling Strategy", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1214-1217, March 2009

[2] J.S. Ryu, Y.Yao and C.S. Koh, "Utilizing Design Sensitivity Analysis for the Global Optimization of Electromagnetic Devices with C1 Piecewise Response Surface Patches", *IEEE Trans on Magnetics*, vol. 41, no 5, pp. 1792-1795. May 2005.

[3] W.Y. Lee, B. Kim, S.R. Hwang and P.S. Shin, "An Optimum Design of Rotor Slot Shape of Induction Motor for Electric Vehicles using Numerical Techniques", *IJAEM* Vol. 45, 1-4, IOS Press.(2013)

[4] Han-Deul Kim, et. al, " A Current Minimization of BLDC Traction Motor for Low Voltage", *Proceeding of 2017 Summer Conference of KIMST*, pp. 1562-1563, 2017. Jeju Korea

[5] P.S. Shin, et. al., "Shape Optimization of a Large-Scale BLDC Motor Using an Adaptive RSM Utilizing Design Sensitivity Analysis," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 43, no. 4, pp. 1653-1656, April 2007

저 자 소 개



김 한 들 (Han-Deul Kim)

2005. 2. 홍익대학교 전기공학과 졸업
 2007. 2. 홍익대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사)
 2016. 2. 홍익대학교 대학원 박사과정 수료
 2015. 12~현재 코웨이 연구소 과장



신 판 석 (Pan Seok Shin)

1977. 3. 서울대학교 전기공학과 졸업
 1989.12. (미) Rensselaer Polytechnic Institute 졸업(Ph.D)
 1981. 1~1993. 2. 한국전기연구원 근무
 1993. 3~현재 홍익대학교 전자·전기공학과 교수