

# 저전압용 외전형 BLDC 전동기의 소비전류 최소화에 대한 연구

김한들<sup>1)</sup> · 정교범<sup>\*,1)</sup> · 신판석<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 홍익대학교 대학원 전기공학과

## A Study on the Current Minimization of a Outer-Rotor Type BLDC Motor for Low Voltage Application

Han-Deul Kim<sup>1)</sup> · Gyo-Bum Chung<sup>\*,1)</sup> · Pan Seok Shin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Electrical Engineering, Graduate School of Hongik University, Korea

(Received 3 August 2017 / Revised 15 December 2017 / Accepted 23 February 2018)

### ABSTRACT

This paper presents a numerical optimization technique and switching phase control technique aiming at improvement of efficiency of the low voltage BLDC motor. The optimization technique is performed using the generalized sensitivity technique, response surface method(RSM) and sampling minimization technique. In order to minimize current consumption of the BLDC motor, the switching method of the driving device is optimized using RSM with finite element analysis. The ratings of BLDC motor are 50 W, 24 V, 1200 rpm. As optimizing results, the input current is reduced from 2.78 to 2.51 [A] when the switching phase is shifted by -2.65 [DEG\_ELC] at the rated driving speed of 1200 [rpm]. It is confirmed that the proposed method reduces the consuming current of the low voltage BLDC motor through switching phase control method using the numerical optimization method.

Key Words : Current Minimization(전류최소화), Optimization Techniques(최적화기법), BLDC, Propulsion Motor(추진전동기), Low Voltage(저전압)

### 1. 저전압 전동기 개요

최근 추진용 전동기, 자동차산업 또는 가정용 전동기 분야에서 저전압 전동기의 사용도가 증가하고 있으며, 전동기의 신뢰성과 편의성 개선을 위한 개발 연구가 증가하는 경향이 있다.

일반적으로 사용 중인 산업용이나 가정용 팬 모터는 적용 제품의 설계와 사용의 편의성을 위하여 사용 조건이 고전압이나 220 V 용으로 되어 있다. 이러한 고전압 제품은 지역별로 별도의 안전 기준에 대한 시험을 통과하여야 한다. 또한, 기존 가정용 팬 모터는 유도기에서 에너지 효율 및 속도제어 등 제품 개발의 편의성을 위하여 BLDC 모터를 사용하는 경향이 점점 증가하고 있으며, 연구개발의 방향도 BLDC와 저전압, 고효율 등의 분야로 변하고 있다. 특히, 주택이나 사

\* Corresponding author, E-mail: gbchung@hongik.ac.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

무실에서는 안전성의 문제로 인해 고전압 전동기보다 저전압 전동기를 선호하는 추세로 시장이 변화하고 있다<sup>[1]</sup>. 일반적으로 고전압 BLDC 전동기의 경우 높은 방진/방수 등급으로 설계되나, 저전압 BLDC 전동기는 전기에 대한 위험성이 낮아서 상대적으로 낮은 등급의 방진/방수 구조로 설계 된다. 따라서 상대적으로 방열 구조와 안전시험 항목에 대해서는 상대적으로 유리한 구조를 가지고 있다. 또한, 소형 저전압 전동기의 소비전력이 70 W 이상이 되면 유럽, 미국, 중국이나 일본 등에서 역률보상(power factor correction)회로를 장착해야 하기 때문에 소비전류를 줄이는 것은 저전압 전동기 산업체의 과제가 되어 있다<sup>[2,3]</sup>.

저전압 전동기는 구동 시에 상대적으로 대전류를 요구하여 많은 열이 발생하게 된다. 이에 모터 발열의 일차 원인인 소비 전류를 저감할 필요성이 있으므로 정격 운전시 소비되는 소비 전류를 저감하기 위하여 BLDC 전동기의 스위칭 위상을 최적화 방법의 하나인 표면반응기법(RSM; Response Surface Method)<sup>[4]</sup>을 이용하여 BLDC 전동기의 입력전류를 최소화하여 효율을 증가시키고 열발생을 최소화할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 사용한 BLDC 전동기의 모델은 DC 24 V 50 W이며, 전동기 특성해서 프로그램을 이용하여 기본 설계 모델을 해석하고 전동기의 역기전력, 자속밀도, 토크리플, 출력토크 등을 계산하고, RSM과 유한요소 프로그램을 결합시켜서 전동기 구동 장치의 스위칭 제어각을 최적화하여 전동기의 전류를 최소화하는 기법을 제시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 최적화 기법의 적용

설계 변수에 따른 실제의 응답함수는  $F$  이다. 표면 반응기법(RSM)은 설계 변수와 응답관계를 통계학적인 방법으로 찾아내고, 해당 목적함수를 근사화하여 최적화를 구하는 방법이다<sup>[5,7]</sup>.

연구자석을 포함한 전자계 문제는 다음 식 (1)의 지배방정식에 따라 해석된다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J_s + \nu_0 \nabla \times B_r \quad (1)$$

여기서,  $\nu$ 는 퍼미언스,  $A$ 는 벡터포텐셜,  $J_s$ 는 외부전류원의전류밀도(A/m<sup>2</sup>),  $\nu_0$ 는 공기의 퍼미언스,  $B_r$ 은 영구

자석의 잔류자속밀도[Wb/m<sup>2</sup>]이다.

최적화에 따른 목적함수의 최소화 방향은 식 (2)에서와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F([p]) &= F([p], [A]) \\ \text{Subject to } [p]^L &\leq [p] \leq [p]^u \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $[p]$ 와  $[A]$ 는 형상의 최적화를 위한 디자인 변수와 상태변수 벡터이다. 설계변수에 관한 목적함수의 비선형의 설계 민감도는 식 (3)과 같이 목적함수를 설계변수에 대해서 편미분함으로서 구해질 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$\begin{aligned} \frac{dF}{d[p]^T} &= \frac{\partial F}{\partial [p]^T} + \lambda^T \frac{\partial F}{\partial [p]^T} ([f] - [\tilde{K}][A]) \\ &+ \frac{\partial \nu}{\partial B^2} \frac{\partial B^2}{\partial [p]^T} [K][\tilde{A}] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $[\lambda]$ 는 수반행렬변수이고,  $[\tilde{A}]$ 는 식 (1)의 비선형 계산결과이다. 대리 목적 함수의 구축에서 설계 변수는 설계제한 범위내의 가능 영역의 점으로부터 몇 개의 서브 섹션으로 분할되고, 대응하는 목적 함수 값 및 설계 민감도는 식 (2)와 (3)을 사용하여 계산된다. 또한, 대리 목적 함수는 다음과 같이 수열화하여 구분 사용해 계산된다.

$$F_s([p]) = \sum_{k=0}^n \left[ f_k \alpha_k([p]) + \sum_{m=1}^{N_p} f'^{k,m} \beta_{k,m}([p]) \right] \quad (4)$$

여기서,  $f_k$ 와  $f'^{k,m}$ 는 목적함수 값의 설계 민감도이고,  $n$ 은 subsection의 개수,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 허미트 보간법의 기본 함수,  $N_p$ 는 설계변수의 개수이다. 단지 1개의 설계 변수를 가지고 있으면, 대리 목적 함수는  $k$ -th번째 서브섹션으로, 샘플링 위치( $x_k$  및  $x_{k+1}$ )에서 목적함수값 및 설계민감도를 기저함수의 점으로부터 표현할 수 있다.

설계변수의 수가 증가하는 경우, 대리 목적함수는 샘플링 안의 목적함수 값과 설계민감도의 구분적으로 patch해서 해석한다<sup>[8,9]</sup>.

보간법의 하나인 RSM은 다중방사상 기저함수(RBF: Radial Basis Function)를 사용하며, 반응평면의 gradient 벡터는 다음 식에 따라 구해진다.

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x^k} = \sum_{i=1}^N c_i \{ |x - x_i|^2 + h^2 \}^{-\frac{1}{2}} (x^k - x_i^k) \quad (5)$$

여기서,  $N$ 는 샘플링 데이터 포인트의 개수이고,  $x^k$ 는 설계변수 벡터  $x$ 의  $k$  번째의 요소이다. 이 데이터를 RSM을 통해 반응표면을 구성하고, 반복 수행을 통해 최적 값을 찾는다.

Fig. 1은 RSM 최적화 흐름도이며, 다음과 같은 과정으로 최적 지점을 계산한다. 먼저 목적함수와 설계변수를 설정하고 설계변수에 따른 각각의 목적함수를 계산한 후에 최적점의 여부를 확인하고 RSM에 적용하는 과정이다. 구동전류의 최적설계변수가 결정되면 모델 BLDC 전동기의 특성을 해석하고 입력전류값을 계산하여 평가하게 된다. 최적점을 판단하는 기준은 설계변수인 스위칭 각도를 샘플링 계산하여 소비전류가 최소가 되는 각도를 최적점으로 결정한다.

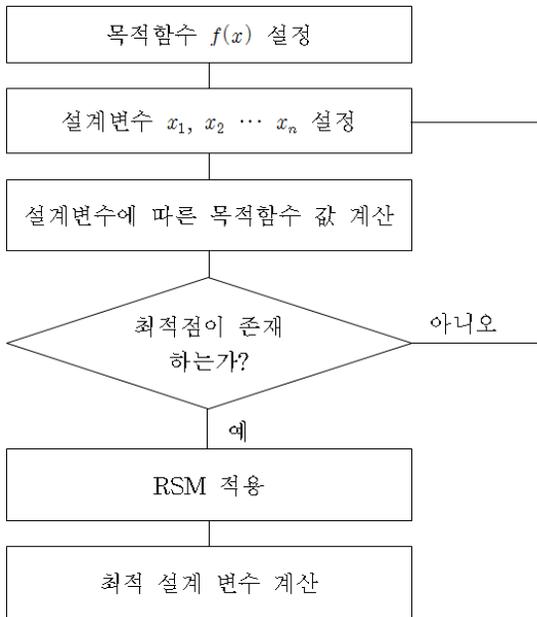


Fig. 1. Flow chart of RSM optimization method

2.2 전동기 특성 해석

최적화 대상 BLDC 전동기의 3상 24 V 50 W BLDC 주요 사양은 Table 1과 같다. 모터의 기본적인 구조는 Fig. 2는 BLDC 전동기 구조의 단면으로 외전형 전동기이다. 고정자 외경은 30 mm, 축길이는 18 mm, 극간 간격은 24도 이다. Fig. 3은 전동기의 역기전력을 계산하기 위하여 자속밀도를 분석한 것이며, Fig. 4는 유한요소프로그램을 이용하여 계산된 모델전동기의 3상 역기전력을 보여주고 있다.

Table 1. Specification of the BLDC motor

용량	극수	상수	슬롯수	정격전압	정격 속도
50 w	10 pole	3 phase	12 slot	24 V	1200 rpm

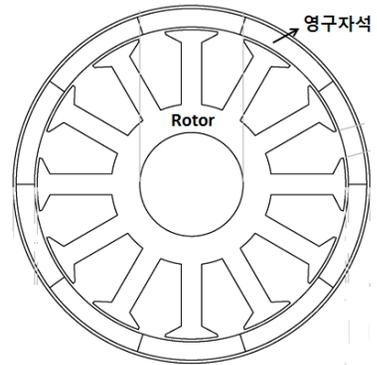


Fig. 2. Finite element analyzing model of the BLDC

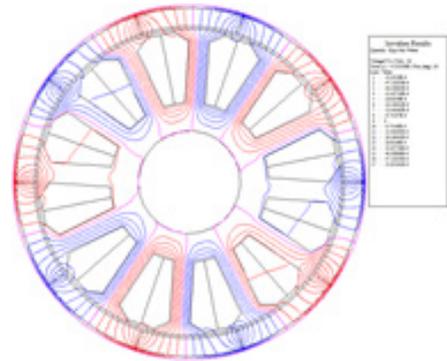


Fig. 3. Flux lines of the BLDC model

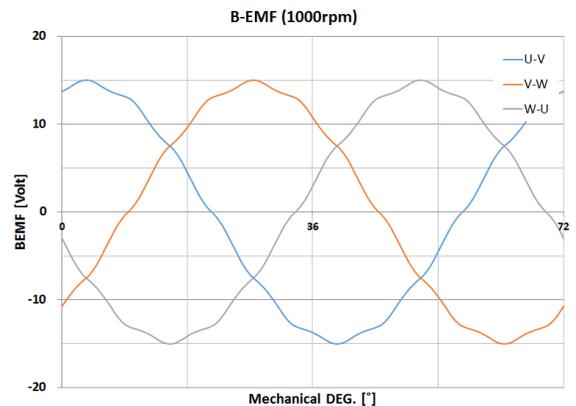


Fig. 4. Back EMF of the BLDC motor

해석모델 전동기의 역기전력을 계산한 결과 전동기의 기계각과 전기각은 1:5로 비율이며 1200 [rpm] 구동시 상전압최대치는 15 [V]로 확인되었다. 60 [rpm]에서 cogging torque를 계산한 결과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 최대치가 약 20.0 [mN·m]로서 출력토크의 평균치 380 [mN·m]의 5 % 정도에 해당하는 크기로서 토크리플 저감에 대한 연구도 필요하다. 또한 U-V상간 전압의 스위칭 기준 점을 계산하여 1200 [rpm] 운전시 최대 출력 토크를 아래와 Fig. 6과 같이 측정하였다. 정격구동시 출력 토크는 380 [mN·m]이다.

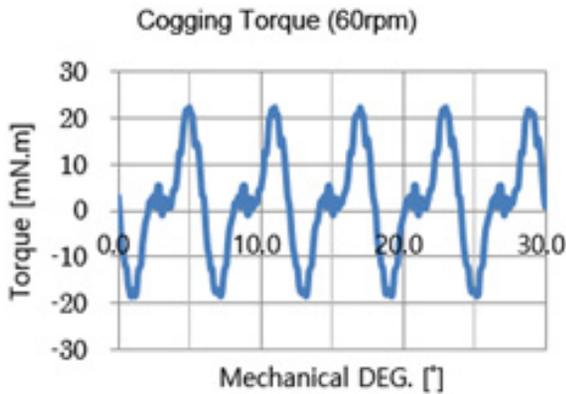


Fig. 5. Cogging torque of the model

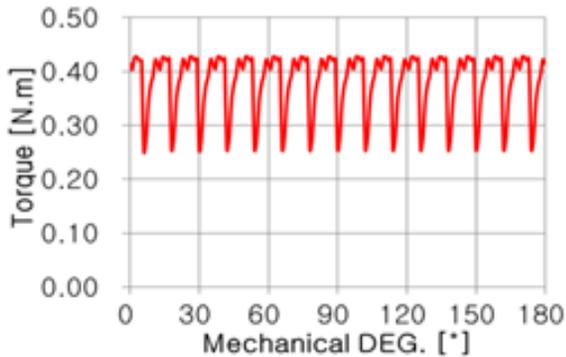


Fig. 6. Rated output torque profile of the low voltage BLDC motor

2.3 스위칭 위상 최적화 연구

BLDC 전동기의 구동회로는 일반적으로 6개의 스위칭 소자를 조합하여 각 상의 코일에 전류를 인가하여 구동시키며, 각 상의 스위칭 시각의 차이를 위상차로 정의한다(Fig. 7 참조).

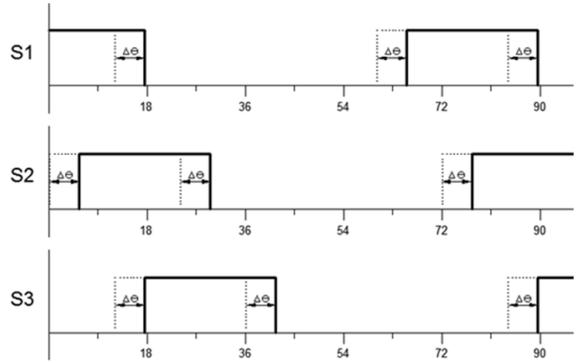


Fig. 7. Switching sequence of driving circuit with design variable  $\Delta\theta$

스위칭 위상각의 최적화 단계에서는 역기전력을 기준으로 하여 스위칭 위상각도 변화에 따른 소비전류의 최소화로 진행한다. 최적화 목적함수는 식 (6)과 같이 소비전류의 식으로 정의하였으며 입력 조건에 따른 스위칭 각도는 식 (7)과 같이 제한한다.

$$\text{Minimize } F_{obj\_3rd} = I_{Input} [S_N] \tag{6}$$

$$[S_N] = \begin{bmatrix} \theta_{1on} + \Delta\theta & \theta_{1off} + \Delta\theta \\ \theta_{2on} + \Delta\theta & \theta_{2off} + \Delta\theta \\ \theta_{3on} + \Delta\theta & \theta_{3off} + \Delta\theta \\ \theta_{4on} + \Delta\theta & \theta_{4off} + \Delta\theta \\ \theta_{5on} + \Delta\theta & \theta_{5off} + \Delta\theta \\ \theta_{6on} + \Delta\theta & \theta_{6off} + \Delta\theta \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\text{subject to } -6 [M\_DEG] \leq \Delta\theta \leq 2 [M\_DEG] \tag{8}$$

여기서,  $I_{Input}$ 는 스위칭 제어 함수  $[S_N]$ 의 변화에 따른 입력 소비 전류의 평균값으로 입력전압과 그때의 임피던스의 비로 계산된다.  $[S_N]$ 는 코일에서 계산된 역기전력(Fig. 4)을 기준으로 제어된다. 각 스위치  $S_1 \sim S_6$ 의 스위칭각도에 설계 변수  $\Delta\theta$ 를 적용하여 스위칭 위상 변화에 따른 소비전류를 계산하고,  $\Delta\theta$ 의 입력 범위는 기계각으로는  $-6 \sim 2 [^\circ]$ 이나 이를 전기각으로 변환하면  $-30 \sim 10 [^\circ]$  범위를 갖고 있다. 최초 샘플링 포인트를 그 사이값 중 9개를 정하여 Fig. 8과 같이 정의하여 최적화 과정을 수행하였다.

1단계의 샘플링 포인트를 활용하여 RSM 최적화를 총 3단계의 반복계산으로 전류최소화를 진행하였다.

추가되는 샘플링 포인트를 적응(adaptive) 샘플링 포인트 기법<sup>[9]</sup>을 활용하였으며 그에 따른 RSM 곡선은 Fig. 9와 같이 각 단계별로 계산되었다. Fig. 9의 각 샘플링 포인트별로 설계함수를 설정하고 각 값에서 목적함수인 소비전류를 계산하고 최소점을 찾아간다. 최적화 과정에서 입력전류의 최저점을 계산 한 값은 Table 2와 Fig. 10에서 보여준 것과 같이 초기값 2.78 [A]에서 최저값 2.512 [A]로 수렴되었다. 이 최저점의 값은 약 9.5 %의 감소효과가 있는 것이며, 일반 전문 설계 프로그램(SpeedCad)을 이용하여 계산한 값과 거의 유사하다는 것을 보여 주고 있다. RSM값과 SpeedCad를 이용한 소비전류의 차이가 발생하는 이유는 RSM은 실제 측정된 포인트 부근에서는 발생하는 전동기의 구동회로와 누설자속의 문제가 있기 때문인 것으로 판단된다. 실제 업계에서 추가적인 연구를 수행하여 제작된 제품의 실험결과 전류량은 2.50 [A]에서 2.07 [A]로 17 % 절감되어 소비 전력이 크게 저감된 것으로 연구되었다.<sup>[10]</sup>

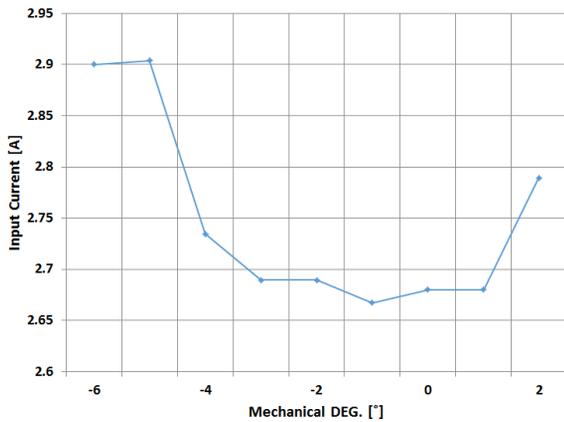


Fig. 8. Input current as function of the switching angle

Table 2. Optimization result for input current as function of iteration steps

구 분	Iteration step			
	0	1	2	3
Design Parameter $\Delta\theta$ [DEGMAC]	0	-0.91	-0.71	-0.53
RSM 최적화 전류 [A]	2.780	2.547	2.518	2.512
설계프로그램(SpeedCad) 계산 소비전류 [A]	2.780	2.668	2.548	2.531

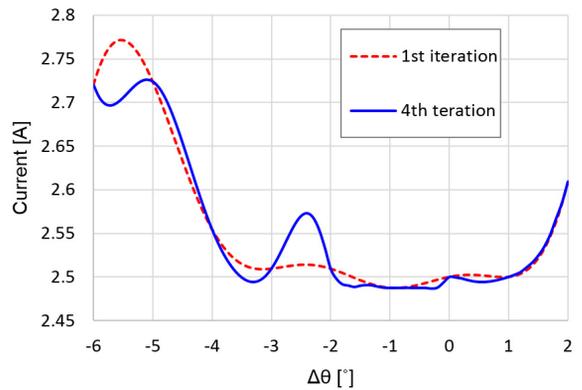


Fig. 9. RSM splines for design variables

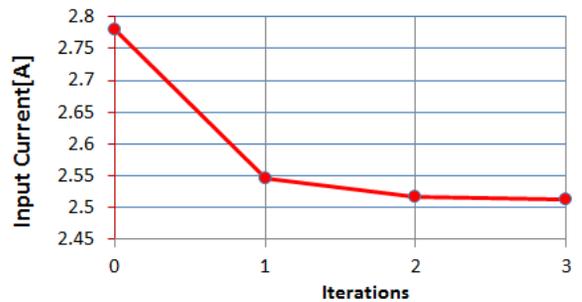


Fig. 10. Input current optimization results as function of iteration numbers

### 3. 결론

본 연구에서는 특수차량이나 전기자동차 또는 상업용 저전압 BLDC 전동기(24 V, 40 W BLDC)의 효율 향상을 위하여 소비전류를 최소화하는 기술을 적용하여 최적설계를 하는 연구를 수행한 것이다. 최적화 알고리즘은 수치해석기법인 민감도기법과 적응 샘플링 포인트 기법, RSM을 활용하였다. 해석모델은 3상 10극 BLDC 전동기로서 기기의 특성은 FLUX2D와 특성 해석 프로그램을 이용하여 계산하고 분석하였다. 본 연구에서 제안한 최적화 알고리즘을 이용하여 1200 [rpm]의 정격 구동 시 스위칭 위상각을 -2.65 [DEG] 이동할 경우 소비 전류는 2.78 [A]에서 2.51 [A]로 저감되는 결과를 도출하였고, 소비 전류의 최소화를 위하여 위상각 제어의 최적화를 통한 입력전류 저감의 가능성을 확인하였다. 향후에 BLDC 전동기 회전자의 슬롯형상이나 극수, 권선수 등 기계적 형상 최적화를

통하여 코아 및 코일손실의 저감, 소비전류 저감 등을 위한 연구를 병행한다면 더 효율적인 저전압 BLDC 전동기를 설계할 수 있게 될 것이다.

## 후 기

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

## References

- [1] H. Kim, S. Hwang, P. Shin, "A Study on the Current Minimization for a Low Voltage BLDC Motor Using Numerical Techniques," 2017 ICEMS Sydney Conference Proceeding, Paper No. 695, 2017. 8.
- [2] IEC 61000-3-2, Electromagnetic Compatibility(EMC) Part 3-2, 2014.
- [3] Han-Deul Kim, Sung-Rul Hwang, Pan Seok Shin, "A Study on the Current Minimization for a 24-Voltage Fan Motor," 2016 KIEE Summer Conference Proceeding, pp. 869-870, 2016. 7.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Piergiorgio Alotto, Marina Gaggero, Giorgio Molinari and Mario Nervi, "A "Design of Experiment" and Statistical Approach to Enhance the "Generalized Response Surface" Method in the Optimization of Multiminima Problems," IEEE Trans on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 1896-1899, March 1997.
- [7] 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.
- [8] P. S. Shin and H. U. Kim, "An Optimal Design of Notch Shape of IPM BLDC Motor Using the Differential Evolution Strategy Algorithm," The Transactions of the KIEE, Vol. 65, No. 2, pp. 239-245, 2016.
- [9] 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.
- [10] Han-Deul Kim, "A Study on the Current and Torque Ripple Minimization of Low Voltage BLDC Motor," Doctoral Thesis of Hongik University, 2018. 02.