

# 개선된 12 스텝 제어를 고려한 브러시리스 DC 전동기의 성능 향상을 위한 최적화 설계

## Optimal Design for Performance Improvements of Brushless DC Motor considering Advanced Twelve Step Control

김 성 안\*, 조 윤 현\*

Sung-An Kim\*, Yun-Hyun Cho\*

### Abstract

This paper presents an optimal design of a brushless DC motor considering an advanced 165° 12 step control for a cost reduction. The advanced 12 step control that extends the conduction angle 150° can improve the output of the motor. The optimal design considering the improved output power of the motor is proposed by reducing the volume of rotor, stator and permanent magnet using response surface method. The proposed design satisfied the performance requirements and efficiency improvement of the conventional motor and reduced the volume about 3.5%. The feasibility of the optimal design is proved by the electromagnetic field analysis using the finite element method.

### 요 약

본 논문에서는 원가 절감을 위한 개선된 165° 12 스텝 제어를 고려한 브러시리스 DC 전동기의 최적화 설계에 대하여 논한다. 개선된 12 스텝 제어는 기존 제어의 도통각 150°을 확장시켜 전동기의 출력을 향상시킬 수 있다. 향상된 전동기 출력을 고려한 반응 표면법을 이용한 최적화 설계를 통해서 회전자, 고정자 및 영구자석의 부피를 감소시켜 원가절감이 가능한 설계를 제시한다. 제안된 설계는 기존 전동기의 요구 사양 및 효율 향상을 만족하고 기존 전동기 중량의 약 3.5%를 저감하였다. 유한요소법을 이용한 전자계 해석을 통해 최적화 설계의 타당성을 입증하였다.

*Key words : Brushless DC motor, Finite element method analysis, Response surface method, Sensorless control, Twelve step control*

### 1. 서론

저가형 전동기 구동 시스템에서 브러시리스 DC 전동기는 제어 구현이 쉽고 스위칭 손실이 적으며 시스템의 원가가 영구자석형 동기 전동기를 사용

하는 구동 시스템에 비해서 저렴한 장점이 있다[1]. 브러시리스 DC 전동기 구동 시스템의 원가 절감을 위해서는 전동기의 회전자 위치를 파악하기 위한 센서를 제거한 센서리스 제어 방식이 널리 사용된다. 브러시리스 DC 전동기의 센서리스 제어는 삼

\* Power Machinery Team, Korea Marine Equipment Research Institute

\* Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University

★ Corresponding author

E-mail : yhcho@dau.ac.kr, Tel : +81-51-200-7742

Manuscript received Mar. 7, 2019; revised Mar. 21, 2019; accepted Mar. 22, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상의 역기전력을 60° 간격으로 검출이 가능한 120° 제어(Six-step control)를 기반으로 한다[2]. 역기전력 검출이 불가능한 180° 제어에 비해 토크 상수가 작은 120° 제어의 단점을 보완하기 위해서 150° 제어가 제안되었다[3]. 150° 제어는 역기전력 검출이 가능하며 120° 제어에 비해 토크 상수가 약 12.5% 큰 장점을 가진다[4]. 120° 제어가 적용되는 전동기에 150° 제어를 고려한 최적화 설계를 통해 출력 및 효율 향상에 대한 연구와 150° 제어에 비해 토크 상수를 약 12% 향상시킨 150°를 165°까지 확장한 12 스텝 제어 제안되었다[5], [6]. 150° 제어가 적용되는 전동기에 165° 제어를 적용하면 동일 출력에서의 입력 에너지 감소로 인한 성능 향상과 전동기의 무게저감을 통해 원가절감이 가능하다. 그러므로 본 논문에서는 기존 전동기에 제어 방식에 따른 출력 특성 비교 결과 도출하고 성능향상을 위한 반응 표면법(Response surface method : RSM)을 이용한 설계안을 제시한다. 설계안의 타당성은 유한요소법(Finite element method analysis : FEA)을 이용한 전자계 해석 결과를 통해서 입증한다.

## II. 본론

### 1. 제안된 제어의 동작 원리

그림 1은 150° 제어와 제안된 165° 제어의 동작 원리를 나타낸다. 150° 제어는 영 전압이 되는 지점 (Zero crossing point : ZCP)을 120° 제어와 동일하게 검출하고 전기각 15° 뒤진 지점에서 3상 여자한 후 30° 뒤진 지점에서 2상 여자를 전기각 30°간격으로 순차적으로 진행하여 일정한 방향으로 토크를 발생시킨다. 제안된 제어는 3상의 여자 구간을 Δθ만큼 증가시켜 2상 여자 구간을 최소화 하여 토크 상수를 증가시킬 수 있다. 150° 제어와 제안된 제어에서의 전동기의 평균 출력 토크는 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

$$T_{e(150)} = \frac{\left(6 \times 2 \frac{EI}{\omega_m} + 6 \times 2.5 \frac{EI}{\omega_m}\right)}{12} = 2.25 \frac{EI}{\omega_m} \quad (1)$$

$$T_{e(Proposed)} = \frac{\left(6 \times 2 \frac{EI}{\omega_m} + 6 \times (2.5 + 0.58) \frac{EI}{\omega_m}\right)}{12} = 2.54 \frac{EI}{\omega_m} \quad (2)$$

여기서,  $E$ 는 한상의 역기전력,  $I$ 는 상전류,  $\omega$ 는 기계 각속도를 나타낸다. 제안된 제어는 150° 제어

보다 12.8% 더 큰 출력 토크가 발생한다.

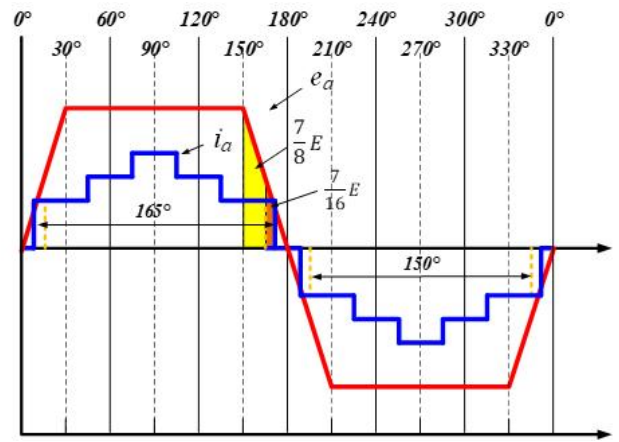


Fig. 1. Operating principles of 150° and proposed controls. 그림 1. 150° 제어와 제안된 제어의 동작 원리

### 2. 기존과 기본 설계된 전동기의 특성 비교

그림 2는 150° 제어를 고려하여 설계된 기존 전동기의 1/8 3D 모델을 나타낸다. 표 1은 150° 제어를 고려한 기존 전동기와 제어기의 사양을 나타낸다.

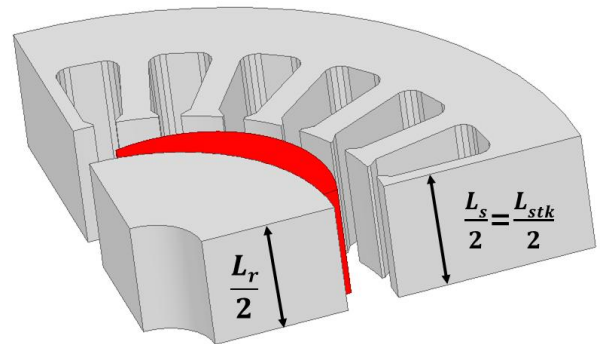


Fig. 2. 1/8 3D model of conventional motor.

그림 2. 기존 전동기의 1/8 3D 모델

Table 1. Specifications of conventional motor and controller.

표 1. 기존 전동기 및 제어기의 사양

Items	Value	Items	Value
Rated power [W]	364	Input voltage [V]	12
Rated speed [rpm]	1850	Max. current [A]	30
Rated torque [Nm]	1.88	Control method	150° control
Slot/Pole	24/4		

#### 가. 기존 전동기의 특성 비교

그림 3은 150° 제어와 제안된 제어에 따른 기존 전동기의 정격속도 1850rpm에서의 출력 특성 비교

를 나타낸다. 150° 제어에서 상전류는 15.57A이고 평균 출력 토크는 1.88Nm이다. 제안된 165° 제어에서는 35.78A이고 평균 출력 토크는 4.3Nm이다. 150° 제어와 비교하여 평균 출력 토크는 약 2.42Nm가 증가함을 확인할 수 있다.

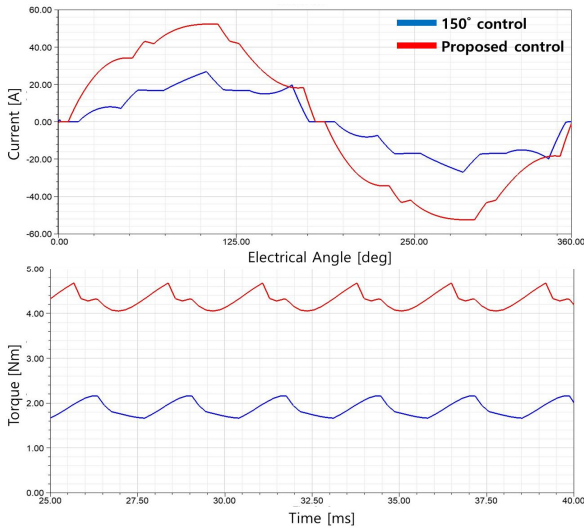


Fig. 3. FEA results of conventional motor according to 150° and proposed controls.

그림 3. 150° 및 제안된 제어에 따른 기존 전동기의 FEA 결과

#### 나. 기존 전동기 기본 설계 및 특성 분석

브러시리스 DC 전동기의 회전자 단위 부피당 출력 토크와 역기전력의 기본 수식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$TRV = \frac{T_e}{V_r} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} k_{w1} AB \quad (3)$$

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} k_{w1} T_{ph} \Phi_1 f = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \frac{k_{w1} T_{ph} B D L_{stk} f}{p} \quad (4)$$

여기서,  $V_r$ 은 회전자의 부피,  $k_{w1}$ 은 기본 고조파 권선 인자,  $A$ 는 전기장하,  $B$ 는 자기장하,  $\Phi$ 는 자속 밀도,  $f$ 는 주파수,  $T_{ph}$ 는 한상의 턴수,  $D$ 는 공극의 직경,  $L_{stk}$ 는 적층길이,  $p$ 는 극쌍수를 나타낸다. 전기장하와 자기장하의 요소인  $T_{ph}$ 와  $L_{stk}$ 를 수정하여 출력 사양을 만족하면서 무게 저감 설계가 가능하다. 전자계 해석 프로그램의 매개 변수 해석을 통해 최종 사양을 선정하였으며 기존 전동기와 비교하여 회전자와 고정자의 적층길이는 5mm, 6.5mm 각각 감소하였으며 총 무게는 0.06kg으로 감소하였

다. 적층 길이에 따른 역기전력 감소분은 권선 턴수를 증가시켜 확보하였다.

그림 4는 정격 토크에서의 기존과 기본 설계된 전동기의 출력 특성 비교를 나타낸다. 기본 설계된 전동기는 정격 출력에서 정격속도 1850rpm에서 상전류 14.28A이고 평균 출력 토크는 1.92Nm이다. 기존 전동기와 비교하여 정격 토크는 0.14Nm 증가하였으며 입력 전류는 1.29A 감소하였으며 효율이 증가하였음을 확인할 수 있다.

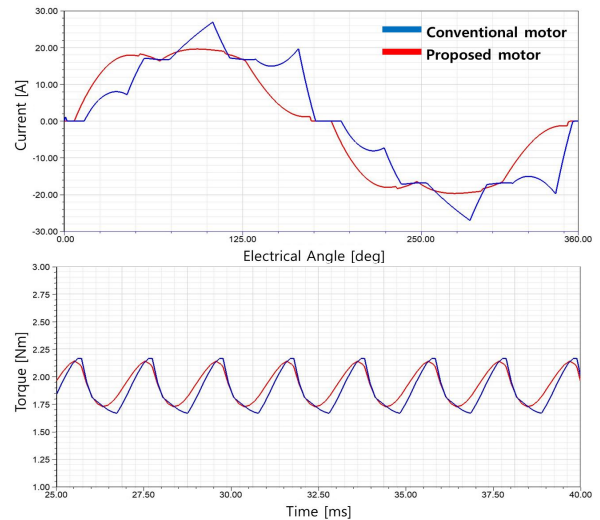


Fig. 4. FEA results of conventional and basic designed motors with proposed control.

그림 4. 제안된 제어를 적용한 기존 및 기본 설계된 전동기의 FEA 결과

### 3. 기본 설계된 전동기의 최적화 설계

그림 5와 6은 기본 설계된 전동기의 1/4 2D 형상과 4개의 설계 인자 및 반응 표면법 결과를 나타낸다. 최종적으로 표 2와 같이 설계 인자를 선정하였다.

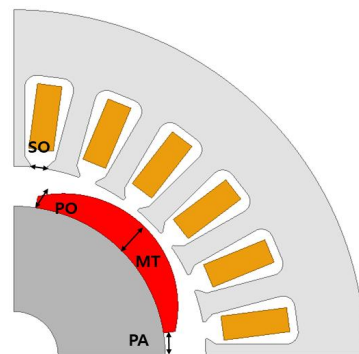


Fig. 5. Motor shape and design factors.

그림 5. 전동기 형상, 설계 인자

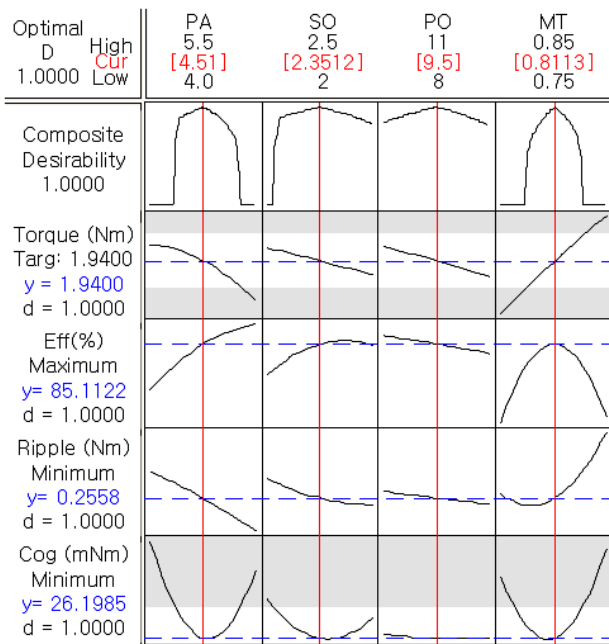


Fig. 6. Response surface method results.  
 그림 6. 반응 표면법 결과

Table 2. Optimum candidates values using RSM.

표 2. 반응 표면법을 이용한 설계 인자 값

Parameters	Value		Parameters	Value	
SO (mm)	Pro.	Opt.	MT (mm)	Pro.	Opt.
	2.4	2.35		0.8	0.81
PO (mm)	Pro.	Opt.	PA (mm)	Pro.	Opt.
	10	9.5		5	4.5

그림 7은 정격 토크에서의 기본 설계된 전동기와 최적화 설계된 전동기의 무부하와 부하에서의 출력 특성을 나타낸다. 코깅 토크는 침두 대 침두값으로 각각 29mNm, 26mNm이며 정격속도 1850rpm에서 상전류는 14.27A이고 평균 출력 토크는 1.94 Nm이다. 기본 설계된 전동기와 비교하여 최적화 전동기의 코깅 토크는 약 3mNm, 정격출력에서 상전류는 약 1.3A 감소하였으며 출력 토크는 0.06Nm 증가하였다.

표 3은 기존 전동기, 제안 전동기, 최적화 전동기의 출력 특성, 효율, 무게 비교를 나타낸다. 기존 전동기와 비교하여 정격 토크는 약 3.1% 증가, 정격 출력에서의 상전류는 9.1% 감소하였으며 효율은 약 0.5% 향상되었으며 전동기의 무게는 약 3.5% 감소하였다.

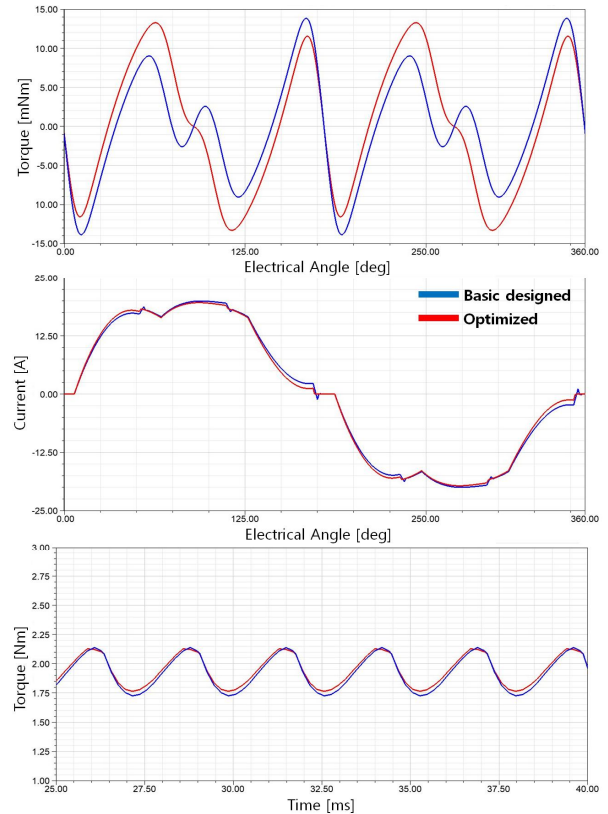


Fig. 7. FEA results of optimized motor with proposed control.  
 그림 7. 제안된 제어가 적용된 최적화된 전동기의 FEA 결과

Table 3. Performances comparison of motors.

표 3. 전동기별 출력 성능 비교

Items	Value		
	Con.		Opt.
	150°	Pro.	Pro.
Rated power	364	832	375
Rate speed	1850	1850	1850
Rated torque	1.88	4.3	1.94
Rated current	15.57	35.78	14.27
Efficiency	84.45	74.57	84.97
Weight	1.77		1.71

### III. 결론

본 논문에서는 150° 제어가 적용된 브리시리스 DC 전동기를 제안된 165° 제어를 고려하여 최적화 설계안을 제시하였다. 결과적으로 무게가 3.5% 저감되어 전동기의 원가절감 가능성을 검토하였으며 설계안의 타당성은 전자계 해석을 통해 입증하였다.

## References

- [1] S. A. Kim, S. K. Park and Y. H. Cho, "Design of Brushless DC Motor with Weight Reduction and Performance Improvements considering Twelve Step Control," *Inter. Jour. of Appl. Electro. and Mech.*, Preprint, 2018.  
DOI: 10.3233/JAE-171002
- [2] Ogasawara, Satoshi, and H. Akagi. "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors," *IEEE Trans. on Ind. Appl.* vol. 27, no. 5, pp. 928-933, 1991. DOI: 10.1109/28.90349
- [3] S. Saha, T. Tazawa, K. Narazaki, H. Murakami and Y. Honda, "A Novel Sensorless Control Drive for an Interior Permanent Magnet Motor," In *Proc of the 27th Annual Con. of the IEEE Ind. Elec. Society*, Vol. 3 pp. 1655-1660, 2001.  
DOI: 10.1109/IECON.2001.975536
- [4] T. H. Lee, S. H. Kim, C. Y. Cho, C. H. Park and Jae-Ho Kim. "A Verification of a Sensorless BLDC Motor Drive System to Control 4-axis Fins for a Guided Artillery Munition by HILS," *Trans. of Korean Ins. of Power Electronics*, Vol. 20, No. 6, pp. 580-586, 2015.  
DOI: 10.6113/TKPE.2015.20.6.580
- [5] S. A. Kim and Y. H. Cho, "Output Characteristic Comparison of BLDC Motor for Water Circulation System According to Sensorless Control Methods," *The Trans. of The Korean Ins. of Elec. Engineers*, vol. 66, no. 9, pp. 1325-1333, 2017.  
DOI: 10.5370/KIEE.2017.66.9.1325
- [6] C. M. Wang, S. J. Wang, S. K. Lin, and , H. Y. Lin, "A Novel Twelve-Step Sensorless Drive Scheme for a Brushless DC Motor," *IEEE trans. on magnetics*, vol. 43, no. 6, pp. 2555-2557, 2007.  
DOI: 10.1109/TMAG.2007.892327

## BIOGRAPHY

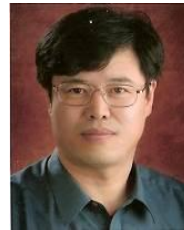
### Sung-An Kim (Member)



2011 : BS degree in Electrical Engineering, Dong-A University.  
2013 : MS degree in Electrical Engineering, Dong-A University.  
2018 : PhD degree in Electrical Engineering, Dong-A University.

2018~ : Senior Researcher, Korea Marine Equipment Research Institute

### Yun-Hyun Cho (Member)



1984 : BS degree in Electrical Engineering, Han-Yang University.  
1986 : MS degree in Han-Yang Electrical Engineering, Han-Yang University.

1991 : PhD degree in Electrical Engineering, Han-Yang University.

1995~ : Professor, Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University