

소형 BLDCM 드라이브의 최적 전류제어에 관한 연구

(A Study on Optimal Current Control Method for Small BLDC Motor Drive)

박창석* · 정태욱**

(Chang-Seok Park · Tae-Uk Jung)

Abstract

This paper proposed a optimal current control method to improve efficiency of BLDC motors.

The aim of the proposed method is to use the maximum torque operating method by increasing the effective voltage at the maximum torque point unlike existing SPM operating method. The proposed method is based on existing IPM maximum torque operating method grafting onto a square wave operating of SPM motors. As the method of increasing the effective output voltage from inverter using the maximum torque point, the proposed method is to improve efficiency of BLDC motors using the same amount of the existing current effectively. For this method, the maximum torque point is carried out by FEA and analysis of magnetic flux vector. In this paper, the prototype of general-purpose BLDC drive is manufactured and the performance characteristic and validity are verified.

Key Words : Brushless DC Motor, Optimal Current, Maximum Torque, Motor Drive

1. 서 론

BLDC 전동기는 높은 효율과 단위 체적당 토크가 크며 광범위한 속도 영역에서 정출력 운전이 가능하다. 또한 소형화가 가능하다는 장점을 가지고 있어 최근 하이브리드 자동차 전동기, 가전용 소형 전동기를 필두로 하여 다양한 용도로 주목받고 있다. 특히 에너지 문제와 환경오염 문제가 증가하고 있는 요즘 전동

기의 효율은 더욱 중요한 문제로 부각되고 있으며, BLDC 전동기를 최대 효율로 운전하는 것은 필수적인 기능이 되었다[1-5].

일반적으로 BLDC 전동기는 역기전력의 파형에 의해 PMSM과 BDCM으로 제어방식을 구분 지을 수 있다. PMSM은 역기전력이 정현파이며 전류를 정현파로 제어하기 위해 3상 3여자 운전을 하며 전동기의 안정적인 구동을 위해 연속적인 회전자 위치를 검출해야 한다. BDCM은 역기전력이 구형파이며 전류를 구형파로 제어하기 위해 3상 2여자 운전을 하며 회전자 위치는 전기각으로 60°마다 검출하여 제어하게 된다. BDCM은 3상 2여자 운전으로 PMSM에 비해 전동기 이용률이 66.7%로 3상 3여자 운전에 비해 작은 값을 갖는다[3]. 이 때문에 같은 토크 출력에서 3상 2여자

* Main author : Electrical Engineering at
Kyungnam Univ. Ph.D Candidate
** Corresponding author : Electrical Engineering at
Kyungnam Univ. Professor
Tel : 055-249-2628, Fax : 0505-999-2161
E-mail : chang8793@naver.com
Received : 2015. 2. 26
Accepted : 2015. 3. 31

운전은 3상 3여자 운전보다 더 많은 상전류를 필요로 하고, 그 결과 최대 출력이 작아지게 된다. 하지만 BDCM은 드라이브의 구조가 PMSM보다 간단하며 제어가 상대적으로 용이하여 소형 BLDC 전동기에 적합하기 때문에 널리 사용되어지고 있다[6-7].

본 논문에서는 BDCM 제어 방식을 이용하여 BLDC 전동기에서 발생하는 최대 토크 지점을 분석하고, 최적 전류제어를 통해 BLDC 전동기를 더 효율적으로 구동시키는 기법을 제안한다. 제안된 최적 전류제어 기법의 타당성 검증을 위하여 PSIM을 이용하여 시뮬레이션 하였으며 50W급 드라이브 시작기를 제작하여 실험을 수행하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 BLDC 전동기 최대 토크

제안된 최적 전류제어 기법은 BLDC 전동기의 기계적 최대 토크 지점을 기반으로 회전자가 최대 토크 지점에 위치해 있을 때, 인가되는 유효전압을 증가시켜 전류를 제어하는 방식이다. 이러한 최적 전류제어를 통하여 최대 토크가 발생하는 지점의 토크 활용률을 증가시킬 수 있다. 일반적으로 BLDC 전동기의 토크는 다음 수식 1과 같이 계산된다[8-9].

$$T = 3 \frac{V_t E_f}{\omega_s X_s} \sin\theta \quad [Nm] \quad (1)$$

여기서 V_t 는 인가전압, E_f 는 역기전력, ω_s 는 각속도, X_s 는 고정자 리액턴스, θ 는 토크 각이다.

식 (1)에 의해 BLDC 전동기의 최대 토크가 발생하는 지점은 회전자 자속과 통전되는 두 상의 합성 자속이 $\sin 90^\circ$ 를 이루는 지점이고, 이 때의 회전자 위치각을 자속 벡터도와 FEA 유한요소 해석법으로 도출하였다.

2.2 자속 벡터도를 이용한 도출

그림 1은 BLDC 전동기의 회전자 자속과 고정자 자

속의 벡터도를 나타내며 회전자의 회전방향은 반시계 방향이다. BLDC 전동기 구동 시 최대 토크 지점은 회전자 자속 벡터 ϕ_R 과 A_s, B_s 의 합성 자속 벡터 ϕ_{AB} 가 90° 를 이루는 지점이 최대 토크 지점이며 이때의 회전자 자속 벡터의 위치각은 60° 이다[10-11].

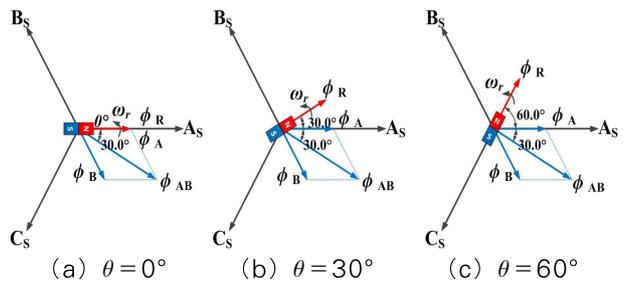


그림 1. 회전자 자속과 고정자 자속의 벡터도
Fig. 1. A vector of the electric flux and the stator flux

- A_s, B_s, C_s : A, B, C상 고정자 전류
- ϕ_R : 회전자 자속 $\phi_{A,B,C}$: A,B,C 상 자속
- ϕ_{AB} : A, B상 합성 자속 ω_r : 회전자 각속도

BDCM 제어방식의 경우 전동기 회전자 위치 정보는 홀센서를 이용하여 전기각으로 60° 마다 검출하게 된다. 따라서 6가지 구간으로 나누어 드라이브를 해석할 수 있고 각 구간별 회전자 자속 벡터각을 도출하였다[12].

그림 2은 각 구간별 BLDC 전동기의 회전자 자속과 고정자 자속의 벡터도를 나타내며 회전자의 회전방향은 반시계방향이다. BLDC 전동기 구동시 1구간에서의 최대 토크 지점은 회전자 자속 벡터 ϕ_R 와 A, B상 합성 자속 벡터 ϕ_{AB} 가 90° 를 이루는 지점이 최대 토크 지점이며 이때의 회전자 자속 벡터의 위치각은 60° 이다. 각 구간별 최대 토크 지점은 60° 간격으로 발생함을 알 수 있다.

2.3 유한요소 해석법을 이용한 도출

자속 벡터도를 이용한 해석을 기반으로 BLDC 전동기의 2D 모델링을 통하여 FEA 유한요소 해석을

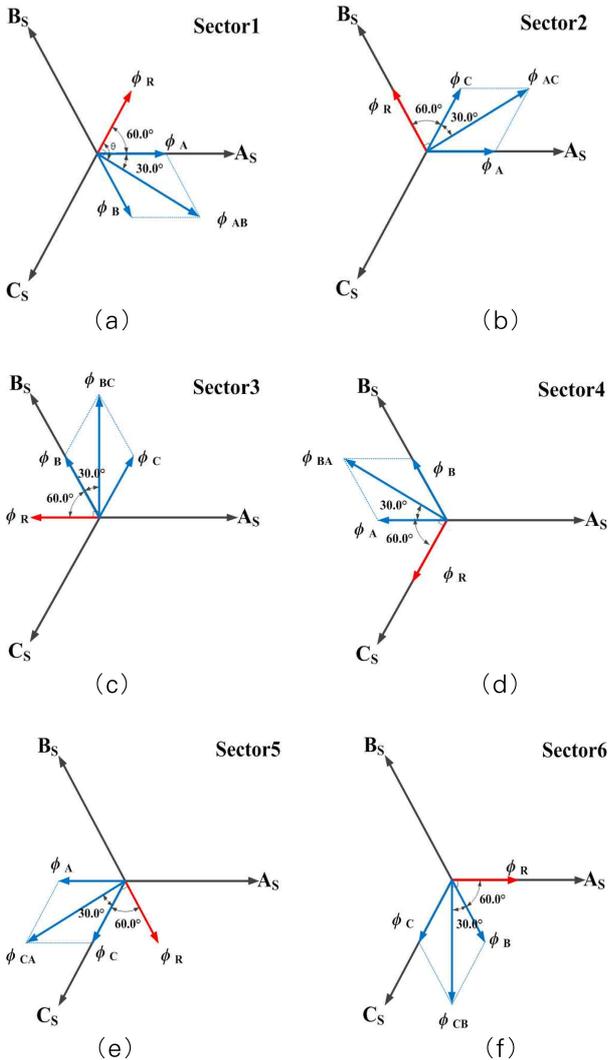


그림 2. 각 구간별 최대 토크 벡터도
Fig. 2. Maximum torque vector position of each sector

수행하였다. 그림 3은 제안된 기법에 사용된 BLDC 전동기의 FEA 모델이며, 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

BLDC 전동기의 유한요소 해석법을 통하여 각 구간의 최대 토크 지점을 도출하였고, 각 구간별 토크 특성을 해석하기 위하여 BLDC 전동기의 일반적인 6구간으로 나누어 구간별로 도통되는 전류를 인가한 후 토크의 변화를 해석하였다.

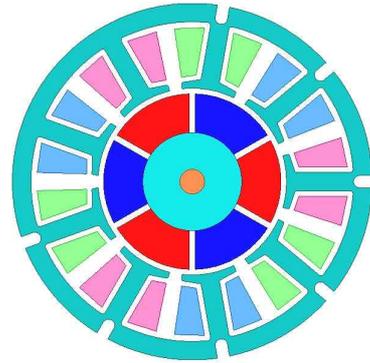


그림 3. BLDC 전동기의 유한요소 해석 모델
Fig. 3. FEM model of BLDC motor

표 1. BLDC 전동기의 파라미터
Table 1. Parameter of BLDC Motor

Parameter	Rating
DC_Link(V)	320
Phase resistance(Ω)	13.2
Number of Pole	6
Number of Slot	9
Rated Speed(rpm)	3,500
Outer Diameter(mm)	60
Depth(mm)	15

해석 결과 Sector_1에서 기계각으로 약 21°, 전기각으로는 약 63°지점에서 최대 토크가 발생함을 도출하였다. 비 선형성을 고려하여 도출한 유한요소 해석 결과와 자속 벡터도 도출 결과와의 오차율은 약 4%로 나타났다. 또한 나머지 구간에서도 각 구간별로 60° 간격으로 최대 토크가 발생함을 알 수 있다.

2.4 BLDC 전동기 정상상태 해석

그림 5는 BDCM 제어의 6개 구간 중 1구간의 등가 회로를 나타내었고, 그림 6은 BDCM 제어를 할 때, 일반적인 전류파형을 보여준다. PhaseA를 기준으로 분석하였고, Sector1을 다시 1-1, 1-2, 1-3의 세 구간으로 나누어 해석하였다.

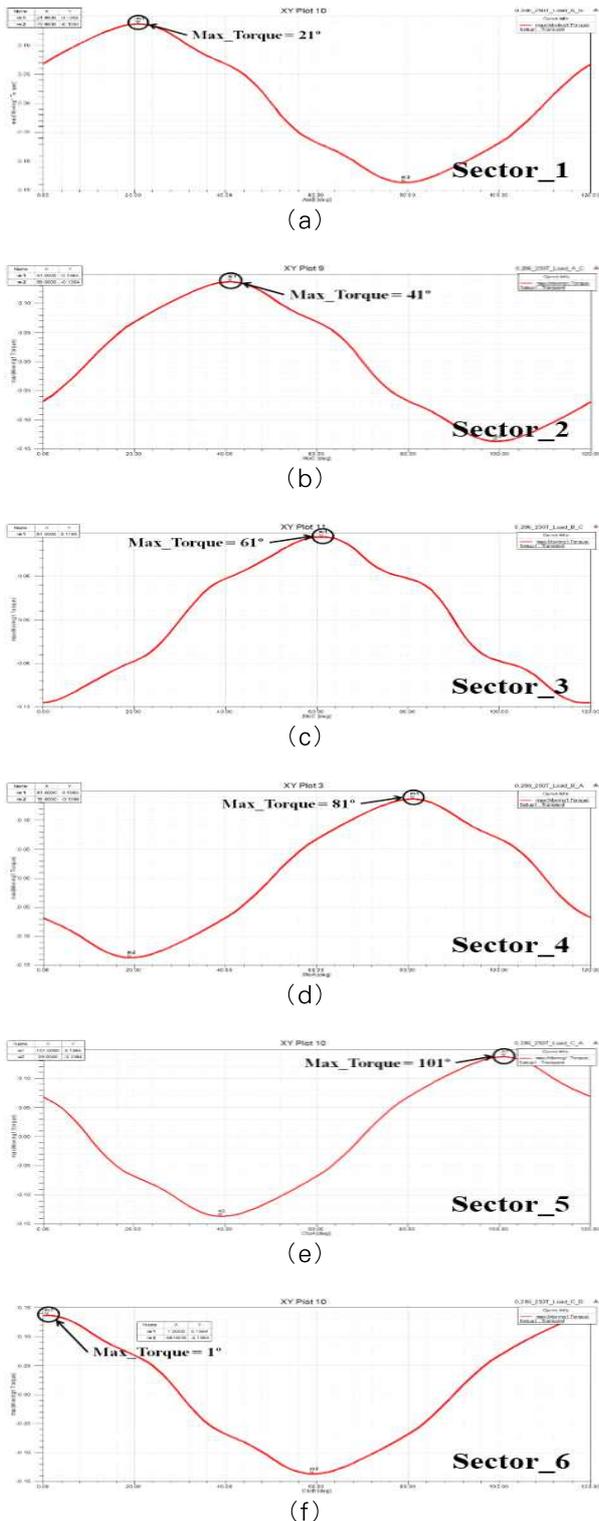


그림 4. 모드 별 최대 토크지점
Fig. 4. Each mode of maximum torque point

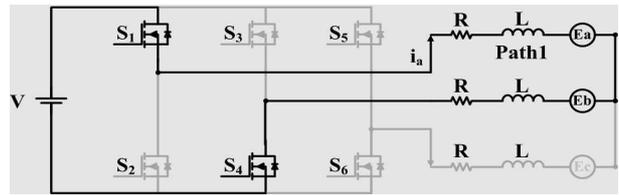


그림 5. BLDC 전동기의 정상구간 회로
Fig. 5. Normal sector of the BLDC motor circuit

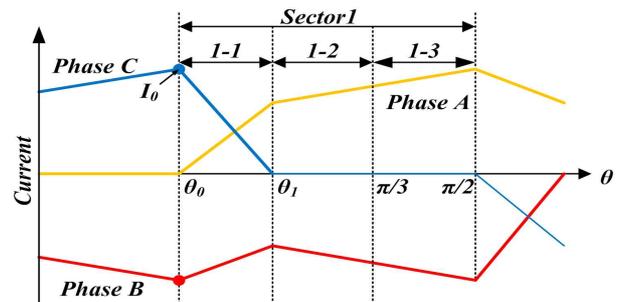


그림 6. BLDC 전동기의 전류파형
Fig. 6. Current waveform of the BLDC motor

그림 6에서 PhaseA의 전류 i_a 는 다음 식 (2)와 같이 계산되어진다.

$$V = 2Ri_a + 2L \frac{d}{dt} i_a + 2E \quad (2)$$

$$i_a(\theta) = \frac{2(V-E)}{3R} (1 - e^{-\frac{R}{L}\theta})$$

따라서 식 (2)를 $T(\theta)$ 로 정리하면 식 (3)과 같다.

$$T(\theta) = -\frac{i_a(\theta) \cdot \lambda_r}{2} L_m \cdot \sin(\theta + 30^\circ) \quad (3)$$

BDCM 제어에서 초기 위치각은 30° 이다. 또한 θ 는 다음 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\theta = \frac{L}{R} \ln \left\{ \frac{3RI_0}{(V+2E)} + 1 \right\} \quad (4)$$

2.5 제안한 최적 전류제어 기법

제안한 최적 전류제어 기법은 최대 토크 지점을 기반으로 최대 토크 지점에 인가되는 유효 전압을 증가

시키는 방식이다. 이러한 최적 전류제어를 통하여 최대 토크가 발생하는 지점의 토크 활용률을 증가할 수 있다. 그림 7은 최대 토크 운전 구간을 분석한 그림이며, 운전 구간을 A, B 두 구간으로 나누어 제어하였다.

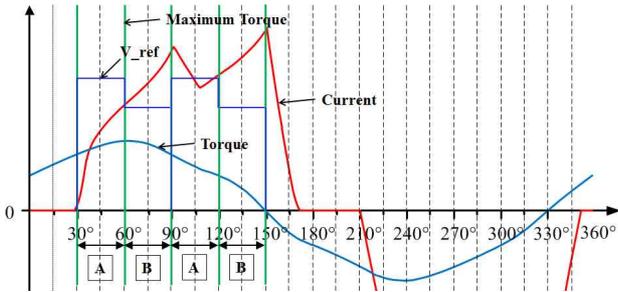


그림 7. 최대 토크 구간 분석
Fig. 7. Maximum torque sector analysis

A구간에는 각 상의 도통 시작점부터 최대 토크 지점 까지 전동기에 인가되는 유효 전압을 상승시키는 최대 토크운전을 한다. 유효 전압의 레퍼런스는 V_{ref} 와 같다.

A구간의 V_{ref} 를 V_A , B구간의 V_{ref} 를 V_B 로 두고 PhaseA의 $i_a(\theta)$ 를 계산하면 식 (4)로부터 식 (5)와 같다.

$$i_a(\theta) = \frac{2(V_A - E)}{3R} (1 - e^{-\frac{R}{L}\theta}) \quad (5)$$

$$i_a(\pi/3) = i_a(\theta_1) e^{-\frac{R}{L}\theta_1} + \frac{V_A - E}{3R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(\theta_1 - \pi/3)})$$

$$i_a(\pi/2) = i_a(\pi/3) e^{-\frac{R}{L}(\theta_1 - \pi/3)} + \frac{V_B - E}{3R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(\pi/3 - T/2)})$$

따라서 식 (5)를 V_A 로 정리하면 전동기에 인가하는 증가된 유효 전압 V_{ref} 를 설정할 수 있다.

$$V_A = \frac{(1 - e^{-\frac{R\pi}{3L}})}{4E(e^{\frac{R\pi}{3L}} - 1) + (E - 2)e^{\frac{R}{L}(T/2 - \pi/3)} - 6R} \quad (6)$$

3. 실험 시스템 구성 및 결과

3.1 실험 시스템 구성

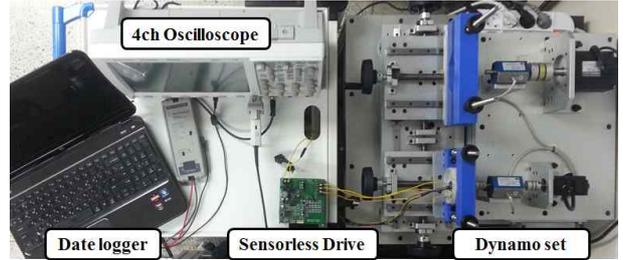


그림 8. BLDC 전동기 드라이브의 실험 시스템 구성
Fig. 8. Experiment system composition of BLDC motor drive

본 논문에서 제안된 BLDC 드라이브의 효율성과 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 8과 같은 실험 환경을 구성하여 실험을 수행하였고, 실험장치의 구성은 표 2와 같다. 기본구성은 제안된 BLDC 전동기 드라이브 시작기를 제작하였고, Dynamo set, Data logger, 4ch_Oscilloscope로 구성되었다. 드라이브에 인가되는 전원은 단상 220V/60Hz를 입력하였고 Dynamo set과 Data logger를 통하여 BLDC 전동기 드라이브의 부하테스트 및 기타 특성 실험을 실시하였다.

표 2. 실험 시스템 주요 파라미터
Table 2. Main parameter of experiment system

Torque transducer		Servo motor	
Parameter	Rating	Parameter	Rating
Rated Torque(Nm)	0.5	Rated Torque(Nm)	0.16
Max Speed(rpm)	8,000	Max Torque(Nm)	0.48
Torsional Stiffness (Nm/rad)	1.1*1,000	Max Speed(rpm)	5,000
Max Axial load(N)	30	Rated Power(W)	50

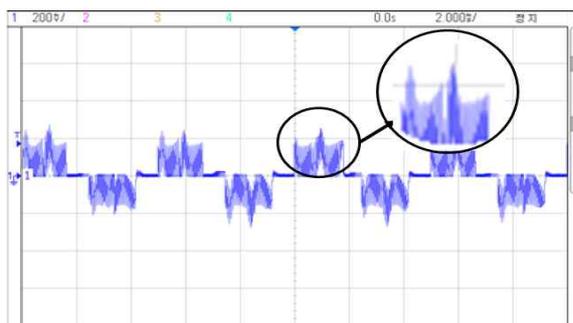
3.2 실험 결과

그림 9는 기존 구동방식과 제안된 방식의 무부하 구동 상전류 파형이며, 그림 10은 기존 구동방식과 제안된 구동방식이 적용된 30W 부하 구동 상전류 파형이다.

그림 9 (a)는 일반적인 구형과 모양의 입력 전류를 보여주고 있으며, 피크 전류 값은 200mA를 나타내었다. 그림 9 (b)는 A구간과 B구간으로 나누었을 때 A구간의 앞단 피크 전류 값은 210mA이고 후단 전류 값은 190mA로 제안한 기법이 정상적으로 적용되고 있음을 나타내고 있고, 한 구간의 평균 전류는 동일함을 보여주고 있다.



(a) 기존방식

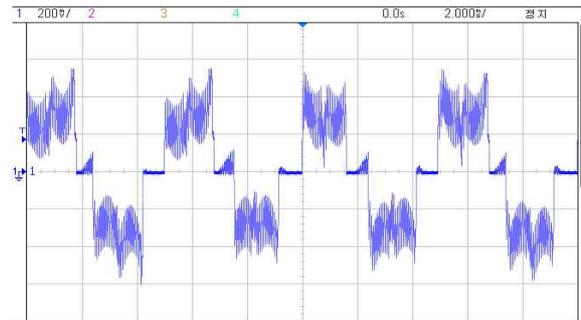


(b) 제안된 방식

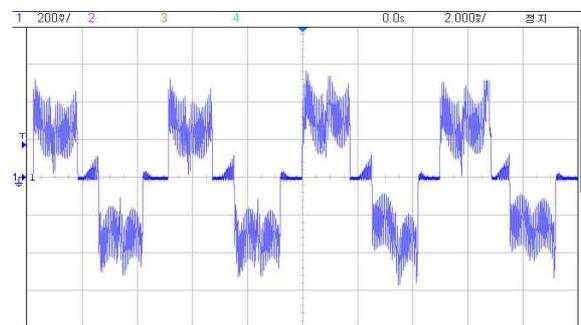
그림 9. 무부하 구동 시 상전류 파형
Fig. 9. Phase current waveform of no-load

그림 10 (a)는 무부하 전류 파형과 동일한 일반적인 구형과 모양의 입력 전류를 보여주고 있으며, 피크 전류 값은 430mA를 나타내었다. 그림 10 (b)는 A구간과 B구간으로 나누었을 때 A구간의 앞단 피크 전류 값은

460mA이고 후단 전류 값은 400mA로 나타내고 있고, 한 구간의 평균 전류 또한 동일하게 인가되고 있다.



(a) 기존방식



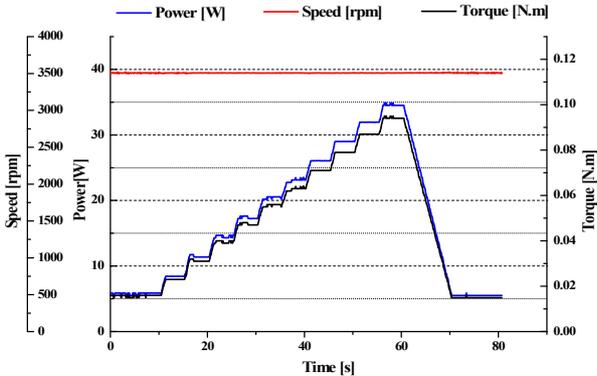
(b) 제안된 방식

그림 10. 부하 구동시 상전류 파형
Fig. 10. Phase current waveform of load

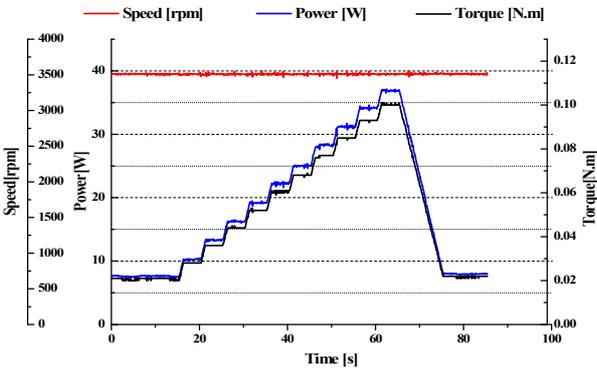
그림 11 (a)는 기존 구동방식의 S-T특성 곡선이며, 그림 11 (b)는 제안된 방식이 적용된 구동방식의 S-T 특성 곡선이다. 부하토크를 단계별로 증가시켜 가며 S-T곡선과 출력을 측정하였다. 측정결과 출력 특성은 약 5W 향상된 결과를 나타내었지만 그림 10 (b)와 같이 후단 전류뿐만 아니라 앞단 전류도 변화하여 속도 변동률은 기존 대비 약 2% 증가한 결과를 보였다.

그림 13은 기존 구동방식과 제안된 구동방식의 효율 곡선이다. Eff1은 기존의 구동방식의 효율 곡선이며, Eff2는 제안된 구동방식의 효율 곡선이다.

실험결과 Eff1은 최대 출력 시 61%의 효율을 나타내며, Eff2는 최대 출력 시 66%의 효율을 나타낸다. 기존 구동방식에 비해 5%의 향상된 결과를 보임을 알 수 있다.



(a) 기존 구동 방식의 S-T 특성 곡선



(b) 제안된 구동 방식의 S-T 특성 곡선

그림 11. S-T 특성 곡선
Fig. 11. Speed-Torque curve

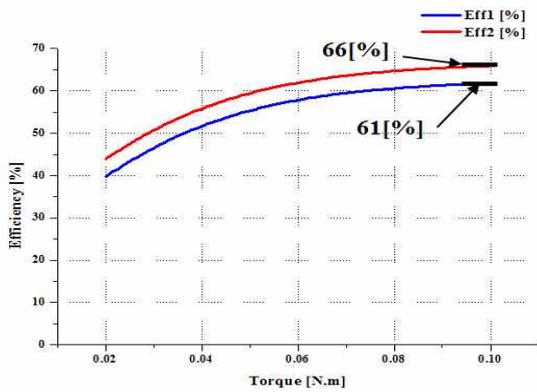


그림 12. 효율 곡선
Fig. 12. Efficiency curve

4. 결 론

본 논문에서는 최대 토크지점을 활용한 BLDC 전동

기의 최적 전류 제어기법을 제안한다. BLDC 전동기의 최대 토크지점을 도출하기 위하여 유한요소 해석법과 자속 벡터도를 분석하여 최대 토크 지점을 도출하였다. BLDC 전동기 회전자의 위치 정보를 가지고 있는 역기전력을 입력받아 회전자의 위치각을 실시간으로 계산하여 최대 토크 운전구간과 정상 운전구간을 나누어 제어를 하였다. 최대 토크 운전구간에는 인버터에서 출력되는 유효 전압을 증가시키고, 정상 운전구간에서는 일반적인 BLDC 전동기 운전을 하였다.

논문의 타당성을 검증하기 위해 BLDC 전동기 드라이브를 제작 및 실험을 수행하여 증명하였다. 실험 결과 기존 구동방식의 효율은 61%, 제안된 방식이 적용된 구동방식의 효율은 66%로 5%의 효율을 증가시키는 결과를 보였다. 본 논문에서 제안한 최적 전류제어 기법은 유사한 입·출력 사양을 갖는 여러 응용분야에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.
(NRF-2013H1B8A2028789)

References

- [1] Seun-Gun Lee, Dae-kyong Kim, Seung-Hak Yang, Young-Cheol Lim, "A Study on Low-Cost Sensorless Drive of Brushless DC Motor for Compressor Using Random PWM", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.22, No.10, pp.97~103, October 2008.
- [2] Yuen-Chung Kim, Yong-Ho Yoon, Hack-Seong Kim, Byuong-Kuk Lee, Chung-Yuen Won, Jang-Sung Chun, "Sensorless Precision Speed Control of PM BLDC Motor", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.20, No.1, pp.48~56, January 2006.
- [3] Sun-Ki Hong, "A Study on Starting Characteristics Improvement of Sensorless BLDC Motor", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.19, No.5, pp.54~59, July 2005.
- [4] A.H.Niasar, H.Moghbeli, E.B.Kashani, "A Low-Cost Sensorless BLDC Motor Drive using One-Cycle Current Control Strategy," Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp.659~664, May. 2014.
- [5] Jung-Hyo Lee, Taek-Ki Lee, Young-Ryul Kim, Chung-Yuen Won, "Control Algorithm for PMSM using Rectangular Two Hall Sensors Compensated by Sensorless

- Control Method”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.26, No.5, pp.40~47, May 2012.
- [6] Mei Ying, Pan Zaiping, “A Novel Starting Method of Sensorless BLDC Motor for Electric Vehicles,” International Conference on Electrical and Control Engineering, pp. 3212-3215, Jul. 2010.
- [7] Pillai, N.S, Vipin, A.M, Radhakrishnan, R, “Analysis and simulation studies for position sensorless BLDC motor drive with initial rotor position estimation,” International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE), pp. 1-6, Jan. 2015.
- [8] Yuen-Chung Kim, Yong-Ho Yoon, Byoung-Kuk Lee, Hack-Seong Kim, Chung-Yuen Won, Jang-Sung Chun, “Rotor Position Estimation of 3-Phase PM BLDC Motor by 2Hall-IC, 1Hall-IC”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.20, No.4, pp.56~64, May 2006.
- [9] Ming Lu, Yaohua Li, “New Design for Sensorless BLDC Motor Using Half-Bridge Driver Circuit,” International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE), pp. 1-4, Nov. 2010.
- [10] Jianwen Shao, Nolan, D, Hopkins, T, “Improved direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives,” Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol. 1, pp. 300-305, Feb. 2003.
- [11] Hyun-Hun Shin, Ju Lee, “(Driving Characteristic Analysis of Brushless DC Motor Considering PWM Mode”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.19, No.4, pp.98~107, June 2005.
- [12] Tao Yu, Sung-Geun Song, Se-Min Kim, Kwang-Heon Kim, Sung-Jun Park, “BLDC Motor Control System using ASK DC-link PLC Technology”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.23, No.3, pp.45~52, March 2009.

◇ 저자소개 ◇



박창석 (朴昶錫)

1987년 9월 3일생. 2012년 2월 경남대 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 대학원 석사(졸업). 현재 동 대학원 박사과정.



정태욱 (鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대공대 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2005년 LG전자(주) 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 경남대 전기공학과 부교수. 본 학회 편수위원.