제형파 역기전력을 갖는 브러시리스 DC모터의 센서리스 운전특성 향상

우혁재* · 송명현* · 박규남* · 김경민** · 정회범***

An Improvement of Sensorless Driving Performance for Brushless DC Motor with Trapezoidal Back EMF

Hyeok-jae Woo* · Myung-hyun Song* · Kyu-nam Park* · Kyung-min Kim** · Hoi-bum chung***

본 논문은 과학기술부 · 한국과학재단 지정 여수대학교 설비 자동화 및 정보시스템 연구개발 센터 연구비 지원에 의한 것임.

요 약

본 연구에서는 브러시리스 직류 전동기(BLDCM)에 대한 효율적인 센서리스 운전 기법을 제시한다. 제시된 기법은 인버터 스위칭 주파수(4KHz, 6KHz, 8KHz)를 회전속도에 따라 적절히 가변함으로서 넓은 속도 범위에서 운전성능과 효율을 향상시킬 수 있다.

실험결과들은 제시된 기법이 제형파 역기전력을 갖는 BLDCM의 센서리스 운전특성을 효율적으로 개선할 수 있음을 보여주고 있다.

ABSTRACT

This paper presents a efficient sensorless driving strategy for brushless dc motor(BLDCM). By varying PWM switching frequency(4KHz, 6KHz, 8KHz) properly according to the rotating speed, the improvement of the efficiency and the operating characteristics through the wide speed are obtained..

The experimental results show that the proposed method can efficiently improve the sensorless driving performance for BLDCM with trapezoidal back emf.

키워드

Sensorless Driving, BLDCM, Variable Switching Frequency, Trapezoidal Back EMF

Ⅰ. 서 론

브러시리스 DC 모터(BLDCM)는 유도기에 비해 효율이 높고 토크-속도 특성이 선형적이며 광범위한 속도 제어가 가능하다[1-2]. 특히 동일한 출력에 대해 소형화 및 경량화가 가능하므로 BLDCM의 센서리스 운전은 특별한 기계적 배열이나 환경상의 제약으로 센서를 설치하기 곤란한 응용개소에 가장 적합하다. 지금까지 다양한 센서리스 기법들이 소개되었으나[3-9], 제형파 역기전력이 0이 되는 시점, ZCP

* 순천대학교 정보통신공학부

** 여수대학교 전자통신 및 전기공학부

***순천대학교 기계자동차공학부

접수일자 : 2002. 6. 18

(zero-crossing point)를 실시간으로 검출하여 전류시점을 계산하는 역기전력을 이용한 회전자 위치 간접 센싱 기법은 위치검출오차가 적고 구현이 용이하며 고정자 인덕턴스가 변화하는 경우에도 실제 적용 가능한 장점이 있다[10]. 그러나 기동시 역기전력 검출을 위해 개루프 가속이 필요하므로 이 구간동안 전력소모가 크다. 또한 고속영역에서 인버터의 스위칭 주파수를 낮게 인가하여 운전할 경우 PWM 주파수의 제약으로 위치검출 오차 및 검출에러 횟수가 심화되어 운전이 어렵게 되고, 반면에 높은 스위칭 주파수를 사용하여 운전할 경우 고속에서의 구동특성과 운전범위는 개선될 수 있으나 저속영역에서 위치분해능의 포화로 기동구간이 길어지며 운전범위가 제한된다. 따라서 본 논문에서는 운전속도에 따라 적절한 가변 스위칭 주파수를 인가하여 폭넓은 운전범위에서 안정된 센서리스 운전성능과 효율을 동시에 개선시킬 수 있는 방법을 제시한다.

II. BLDCM의 센서리스 운전기법

i) BLDCM의 센서리스 운전 기법

제형파 역기전력을 갖는 BLDCM의 이상적인 역기전력 및 전류파형은 그림 1과 같다. 일정한 토크를 발생하기 위해서 역기전력이 편평한 120° 구간에서만 구형파 형태의 상전류를 흘려주어야 하며 전기각으로 60° 간격으로 전류(commutation)를 행하는 3상 2여자 방식이 사용된다. 항상 2상을 여자 시킴으로서 일정한 합성 토크를 얻을 수 있고 토크가 전류에 선형적으로 비례한다.

여자되지 않은 개방된 상에서 역기전력의 극성이 바뀌게 되므로 ZCP는 회전속도와 상관없이 항상 일정하게 된다. 그러나 역기전력의 직접검출이 어렵기 때문에 인가된 PWM 스위칭 방법에 따른 단자전압 파형의 영향분석으로부터 순시적인 ZCP 검출할 수 있다.

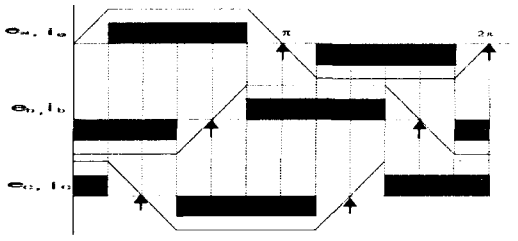


그림 1. BLDCM의 이상적인 전압과 전류 파형
Fig. 1 Ideal motor Voltage and current for BLDCM

본 연구에서는 limited unipolar PWM을 인가하였으며 단자전압으로부터 ZCP를 검출하기 위해 PWM이 on상태일 때 전압방정식을 고찰한다. 그림 2는 비여자 c상의 역기전력이 감소하는 구간(30° ≤ θe< 90°)에서의 unipolar PWM이 on 상태일 때 전류흐름을 나타낸다.

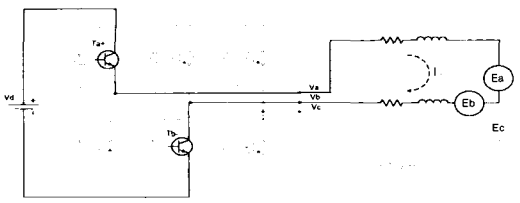


그림 2. 전류경로 (T_a^+, T_b^-:on)
Fig. 2 Current path (T_a^+, T_b^-:on)

BLDCM은 역기전력 파형이 비 정현적으므로 d-q변환이 불필요하여 a, b, c 상변수 모델을 사용한다. 여기서 스위칭 소자와 환류 다이오드는 이상적인 것으로 간주하고 통전시 나타나는 전압강하는 무시한다.

전류 후 30°≤θe<90° 구간에서의 역기전력이 0보다 크고 T_a^+ 가 턴-온일 때의 루프 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_d = R\,i_a + L\frac{d\,i_a}{dt} + e_a - e_b + L\frac{d\,i_a}{dt} + R\,i_a \quad (1)$$

$$\frac{V_d}{2} = V_n \quad (2)$$

$$e_a = -\,e_b = E \quad (3)$$

$$v_n = -\,v_b = Ri_a + L\frac{di_a}{dt} + E \quad (4)$$

또한 c상에는 전류가 흐르지 않으므로 c상 단자전압은 중성점 전압과 역기전력의 합으로 표현되어질 수 있다.

$$v_c = v_n + e_c \tag{5}$$

위 식에 정의한 것처럼 중성전압은 단자전압의 2배와 같다. 따라서가 턴-온일 때 비여자된 c상의 단자전압은 다음과 같다.

$$v_c = \frac{V_d}{2} + e_c, \ (\ T_a^+ \ on) \tag{6}$$

이 구간동안 ZCP검출 회로는 단자 전압이 보다 적어지는 순간을 검출하여 전류시점을 결정한다.

ii) 가변 PWM을 이용한 센서리스 운전 기법

그림 3은 C상의 단자전압 파형 및 ZCP시점을 보여주고 있다. 저주파 스위칭으로 센서리스 구동할 경우 고속으로 갈수록 비여자상의 단자전압에 나타나는 PWM 펄스수가 줄어들기 때문에 ZCP 검출구간이 일정하지 않고 검출실패 빈도가 증가한다. 또한 PWM주파수를 8Khz로 향상시킬 경우 고속영역에서는 원활한 운전특성을 보이나 저속영역에서 제한이 따른다. 또한 개루프 가속상태에서 실제 센서리스 모드전환이 늦어져 소비전력이 크다.

따라서 본 연구에서는 이러한 운전특성을 개선하기 위해 가변 PWM스위칭 주파수 방법을 제안하였다. 일반적인 전력용 트랜지스터로 생성되는 4kHz와 동일조건에서 정격속도 이상에서도 센서리스 운전가능한 8kHz의 스위칭 주파수에 대해 운전가능 속도범위 및 ZCP 검출상태, 운전시 나타나는 전류리플에 따른 영향을 분석하여 각각의 주파수에 대한 운전영역을 설정하였으며 적절한 주파수전환 시점을 결정하였다. 기동전류를 줄이기 위해 낮은 PWM주파수를 인가하여 센서리스 모드 전환 후 8kHz 주파수를 인가하면 4kHz의 낮은 PWM 주파수보다 보다 소비전력을 줄일 수 있는 장점이 있으나 8kHz의 센서리스 운전가능한 속도범위가 1300~4500 rpm이었으며 실제 2000rpm 이상에서 모드전환이 이루어야 위치오차에 따른 전류리플을 줄일 수 있었다. 따라서 고주파 PWM으로 운전할 경우 소비전력 및 전류리플을 줄일수 있는 장점이 있지만 운전중 2배 이상의 고주파 PWM으로 전환할 경우 변환시점이 고속에서 이뤄져야 하며 전류리플 및 급속한 속도변화시 불안정한 동작상태 등의 문제가 발생한다. 이를 개선하기 위해 900~3700rpm의 속도범위를 갖는 6kHz 스위칭주파수 동작모드를 저속구간에 삽입하여 스위칭 소자의 부담을 줄이고 안정된 전환이 이뤄지게 하였으며 저속구간에서의 전류리플 및 소비전력를 줄였다.

그림 4는 본 연구에 적용된 BLDCM의 센서리스 드라이브의 소프트웨어 구성을 나타낸다. 4kHz로 개루프 가속시켜 센서리스 모드전환을 거치면 지령속도에 따라 적절한 PWM 스위칭 주파수를 인가하여 안정된 센서리스 운전을 수행하도록 하였으며 전처리를 소프트웨어적으로 구현하였으므로 추가비용부담이 없이 폭넓은 운전범위에서 안정된 센서리스 운전성능과 효율을 동시에 개선시킬 수 있다.

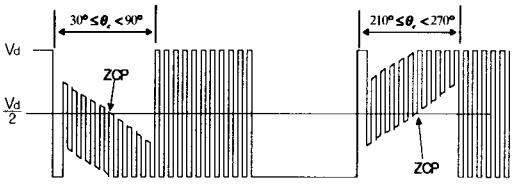


그림 3. 개방된 C상의 단자전압과 ZCP
Fig. 3 Terminal voltage of C phase and ZCP

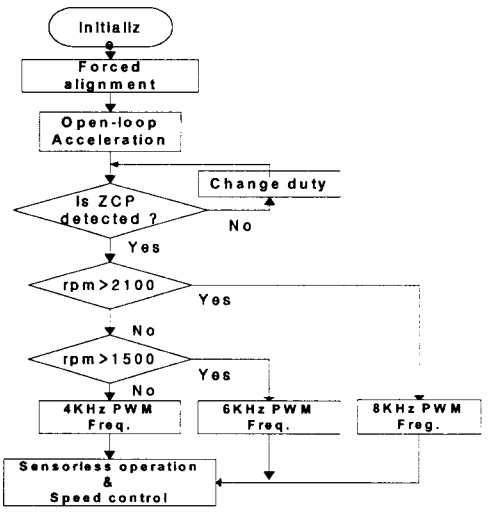


그림 4. 주 프로그램 흐름도
Fig. 4 Flowchart of main program

III. 실험결과 및 고찰

i) 시스템의 구성

그림 5는 본 연구에서 사용한 하드웨어의 전체적인 구성을 보여주고 있다. 제어부에 사용된 마이크로로 프로세서로는 Intel사에서 제공하는 모터 제어용 16bit one-chip 마이크로 제어기인 87C196MC을 사용하였으며 인버터의 스위칭 소자는 PWM 주파수의 영향을 분석하기 위해 IPM(intelligent power module)을 사용하였다. ZCP검출을 위해서 D플립플롭을 이용하여 PWM이 on상태에서 단자전압 파형이 검출 가능하도록 검출회로를 구성하였으며 내장된 파형 발생기로부터 PWM펄스를 발생시킨다. 실험에 사용한 모터의 사양은 표1과 같다.

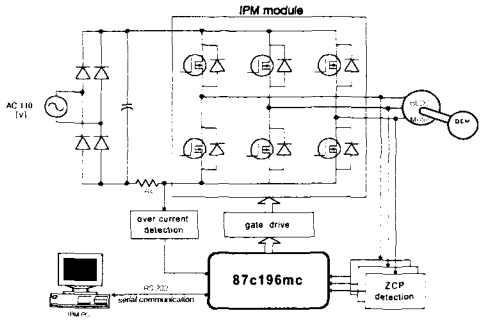


그림 5. 전체 시스템 구성
Fig. 5 Overall system configuration

표 1. BLDCM의 사양
Table. 1 Specification of BLDCM

모터	Trapezoidal 형 3상 BLDCM
정격	300 W, 0.95 Nm, 3000
상/극 수	3상/6극
입력전압	110 V
저항 (R)	1.5Ω
인덕턴스 (L)	3.15 mH
토크 상수	0.29 Nm/A
역기전력 상수	0.29 V/rad/sec
관성 모멘트	8.2614×10^{-5} Kg · m^2

ii) 결과 및 고찰

그림 6과 7은 8 kHz의 고주파 PWM을 인가하였을 경우 회전속도에 따른 운전특성을 보여주고 있다. 그림 6에서는 2200rpm으로 정속 운전시 상전류 파형이 비교적 편평하고 ZCP검출기 파형이 균일한 모습을 보여주고 있어 고속영역에서 안정된 운전특성을 확인할 수 있다. 그러나 그림 7과 같이 1600rpm의 저속영역에서는 단자전압(b)이 증가하는 구간동안 ZCP검출(c)이 일어나지 않고 있기 때문에 검출오류에 따른 강제 전류로 인해 상전류(a) 파형에 왜곡이 심하게 일어나며 운전 속도를 더 낮출 경우 운전은 더 이상 어려워졌다.

반면에 4kHz의 저주파 스위칭으로 가속하여 2000rpm 이하의 저속 및 중속 운전범위에서 동작특성을 확인한 결과 저속 범위에서는 양호한 운전특성이 나타났으나 1500 rpm 이상으로 가속할 경우 불안정한 운전특성이 나타났다. 그림 8과 같이 1600rpm으로 정속 운전시 비여자상의 단자전압(b)이 감소하는 구간에서 ZCP 검출주기(c)가 일정하지 않고 전류시점이 맞지 않아 상전류 파형(a)에 리플이 증가하며 운전이 불안정해지기 시작했다.

그림 9에서는 6kHz의 PWM 주파수를 인가하여 1600 rpm으로 정속 운전하였을 경우 운전특성을 보여주고 있다. 4kHz의 PWM 주파수를 인가하였을 때에 비해 상전압 및 ZCP검출 상태 그리고 상전류 파형의 전류리플의 크기로부터 운전특성이 개선되었음을 보여주고 있다. 따라서 1500~2000rpm의 중속 영역에서 안정된 운전특성을 갖는 6kHz 동작모드를 삽입하여 운전성능을 향상시킬 수 있었다. 그림 10에서는 일정시간동안 1600rpm으로 6kHz의 PWM 주파수를 인가하여 정속 운전을 수행하였을 때 출력 파형을 4kHz의 PWM 주파수를 인가하였을 때와 비교하여 보여주고 있으며 결과로부터 소비전력이 감소하였음을 확인하였다.

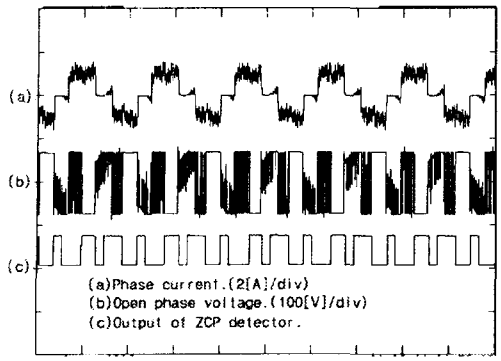


그림 6. 8kHz PWM 주파수, 2200[rpm]에서의 출력파형
Fig. 6 Waveform with 8kHz PWM freq. at 2200[rpm]

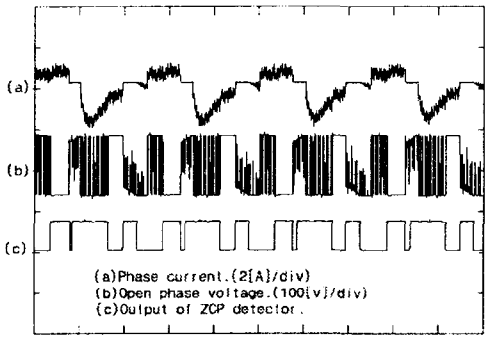


그림 7. 8kHz PWM 주파수, 1600[rpm]에서의 출력파형
Fig. 7 Waveform with 8kHz PWM freq. at 1600[rpm]

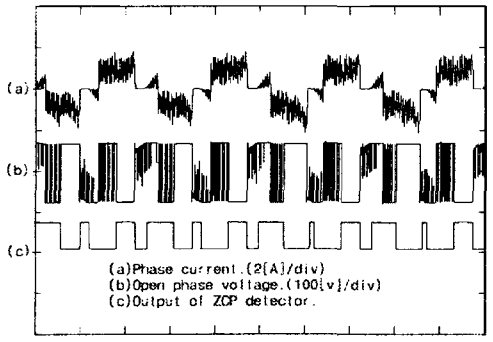


그림 8. 4kHz PWM 주파수, 1600[rpm]에서의 출력파형
Fig. 8 Waveform with 4khz PWM freq. at 1600[rpm]

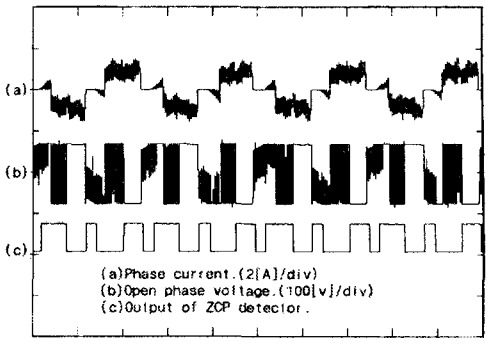


그림 9. 6kHz PWM 주파수, 1600[rpm]에서의 출력파형
Fig. 9 Waveform with 6kHz PWM freq. at 1600[rpm]

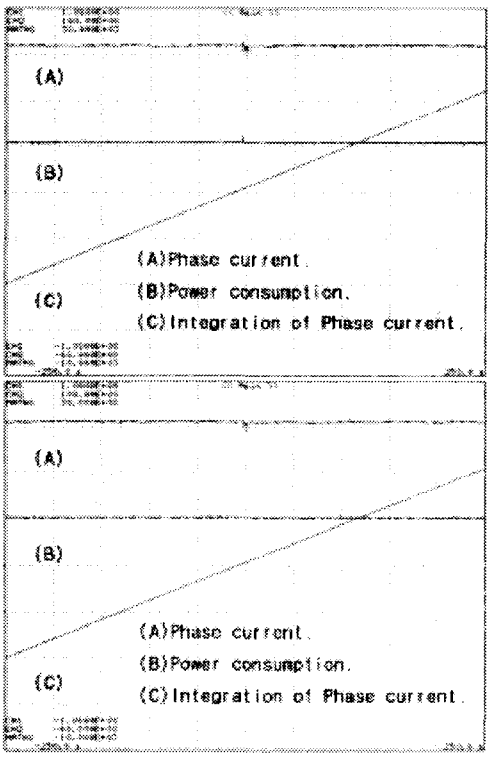


그림 10. 4kHz(위)와 6kHz(아래) PWM 주파수, 1600[rpm]에서의 출력파형(250[s]/div)
Fig. 10 Waveform With 4kHz(up), 6kHz(down) freq. at 1600[rpm], (250[s]/div)

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 가변 PWM스위칭 주파수를 인가하여 제형파 역기전력을 갖는 BLDCM의 센서리스 운전특성을 향상시키는 방법을 제시하였다. 각각의 스위칭 주파수(4KHz, 6KHz, 8KHz)에 따른 동작특성을 분석하여 운전속도에 따라 적절한 시점에서 스위칭 모드를 가변하여 저속과 고속 운전범위를 확대시킬 수 있으며 운전특성 및 효율을 향상시킬 수 있었다. 제안된 방법은 소프트웨어적으로 구현되므로 무단변속 및 다단변속이 필요한 속도제어에 유용할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Patrick J. McCleer, "Electric Drives for Pump, Fan, and Compressor Loads in Automotive Application", Proc. of IEEE ISIE'95, pp.80-85, 1995

[2] Electric Power Research Institute, Electric Motors ; Markets, Trends, and Applications, 1992

[3] K. Iizuka et al., "Microcomputer Control for Sensorless Brushless Motor", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-21, No. 4, pp595-601, MAY/JUN 1985

[4] T. J. E.Miller, "Design of PM Synchronous and Brushless DC Motors", IEEE IECON'93, pp.731-738 1993

[5] R. C. Becerra, T. M. Jahns, M. Ehsani, "Four-Quadrant Sensorless Brushless ECM Drive", Conf. Rec. of APEC'-91, pp.202-209, 1991.

[6] J. C. Moreira,"Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating in a Wide Speed Range", Conf. Rec. of IEEE IAS'94, pp401-406, 1994.

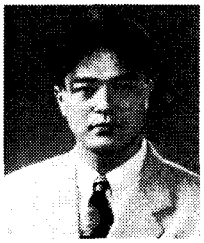
[7] S.Ogasawara, H.Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors", Conf.Rec.of IEEE IAS'90, pp443-447, 1990.

[8] T. Endo, F. Tajima. et al., "Microcomputer Controlled Brushless Motor Without a Shaft Mounted Position Sensor", International Power Electronics Conference, Tokyo, pp. 1477-1486, 1983.

[9] P. Ferrais, A. Vagati, and F. Villata, "P.M. Brushless Motor Drives: A Self Commutation System Without Rotor Position Sensors", Proceedings of the Ninth Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. 305-312, June 1980.

[10] 여형기 외, "영구자석 매입형 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 개발에 과한 연구", 전력전자학회 논문지. 제2권, 3호 1997.

저 자 소 개



우혁재(Hyeok-jae Woo)

1996, 1998 순천대 전기공학과 학사 석사

2001～현재 순천대학교 정보통신공학부 박사과정

※관심분야 : 고장진단, 퍼지 및 신경회로망

송명현(Myum-hyun Song)

고려대 전기공학과 학사 석사 박사.

1988년～현재 순천대학교 정보통신공학부 교수

※관심분야 : 제어 시스템. 퍼지 및 신경회로망, 제어 시스템 설계

박규남(Kyu-Nam Park)
1979, 1982, 1996 전남대 전기공학과 학사 석사 박사.
1987년~현재 순천대학교 정보통신공학부 교수
※관심분야 : 신경회로망, 컴퓨터구조, 병렬처리

김경민(Kyoung-min Kim)
1988, 1991, 1996년 고려대 전기공학과 졸업, 석사, 박사
1997년~현재 여수대학교 전자통신전기공학부 조교수
※관심분야 : 신호처리 및 컴퓨터비젼, 퍼지 및 신경회로망 응용

정회범(Hoi-Bum Chung)
1981, 1984, 1990, 고려대 전기공학과 학사, 석사, 박사
미국 텍사스 A&M 대학 연수
현재 순천대학교 기계자동차공학부 부교수
※관심분야 : 적응 및 비서형 제어, 유·공압 시스템 설계 및 제어, 로봇 제어