

가변 PWM 스위칭 주파수를 이용한 브러시리스 직류전동기의 센서리스구동 특성개선

우혁재\*·송명현\*·박규남\*·여형기\*\*·김경민\*\*\*  
 순천대학교\*·두원공업대학\*\*·여수대학교\*\*\*

An Improvement of Sensorless Driving Performance for Brushless DC Motor Using Variable PWM Switching Frequency

Hyuk J. Woo\*·Myung H. Song\*·Kyu N. Park\*·Hyeong G. Yeo\*\*·Kyoung M. Kim\*\*\*  
 Suncheon Nat'l Univ.\*·Doowon Technical College\*\*·Yosu Nat'l Univ.\*\*\*

**Abstract** - This paper suggested a new sensorless driving strategy for brushless dc motor which can improve the conventional degradation of highspeed operating performances, lowspeed operating performances and starting performances caused by applying general single pwm switching frequency. By varying PWM switching frequency during operating time, the proposed method can get some desired upper performances. For confirming the validity of the proposed method, the sensorless driving system is implemented with an IPM module and 87c196MC microcontroller.

이 적용되었다. 이 기법은 PWM이 on상태일 때만 가능하며 단자전압으로부터 개방된 상의 역기전력이 0으로 변화하는 ZCP를 순시 적으로 검출하는 것이 매우 중요하므로 정확한 ZCP검출을 위해서 하드웨어적으로 비교기를 꾸며 비여자상들의 단자전압이  $V_d/2$ 보다 커지거나 작아지는 시점으로부터 ZCP를 찾도록 구현하였다. 그림 2.1은  $0^\circ \sim 270^\circ$  구간동안에 비여자상들의 단자전압 파형에서의 ZCP시점을 보여주고 있다.

1. 서 론

브러시리스 직류전동기(BLDCM)는 유도기나 동기기에 비해 속도제어가 용이하며 회전자 손실이 적기 때문에 고속영역에서 장시간 운전이 가능하다.[1-2] 특히 특별한 기계적 배열이나 환경상의 영향으로 센서를 설치하기 곤란한 응용개소에서 저가화 및 소형화가 가능한 BLDCM의 센서리스 구동방식이 점차 주목을 받고 있다. 지금까지 다양한 센서리스 기법들이 소개되었으나,[3-8] 드라이브 구현이 용이하고 회전자의 위치검출 오차가 적은 역기전력기법이 가장 일반적으로 사용되고 있으며, 특히 단자전압으로부터 회전자의 위치를 간접 검출하는 센서리스 구동방식이 현재 실용화 단계에 이르고 있다[9,10]. 그러나 인버터의 스위칭 소자로서 일반적인 전력용 트랜지스터와 같은 낮은 PWM주파수를 사용하여 고속으로 운전할 경우 PWM 스위칭 주파수의 제약으로 인해 위치검출 오차가 심화되어 운전이 어렵게 되고, 반면에 고주파 PWM을 사용할 경우 고속에서의 특성은 개선될 수 있으나 기동구간이 길어지며 저속 운전범위가 제한된다. 따라서 본 논문에서는 저속에서 PWM 스위칭 주파수를 낮추어 기동 및 저속운전특성을 개선하고, 고속운전시 PWM 스위칭 주파수를 높여 고속운전특성을 개선하는, 이른바 가변 PWM 스위칭 주파수를 이용하여 고속, 저속, 기동특성을 개선할 수 있는 새로운 센서리스 구동 기법을 제시하고 실험을 통하여 제안된 방법의 유용성을 입증하였다.

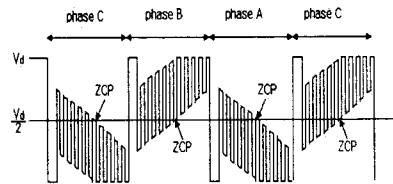


Fig. 2.1. Point of ZCP and commutation

단자전압으로부터 ZCP를 검출하기 위해 PWM이 on상태일 때 전압방정식을 고찰한다.

그림 2.2는 비여자 c상의 역기전력이 감소하는 구간 ( $30^\circ \leq \theta_e < 90^\circ$ )에서의 unipolar PWM이 on상태일 때 전류흐름을 나타낸다.

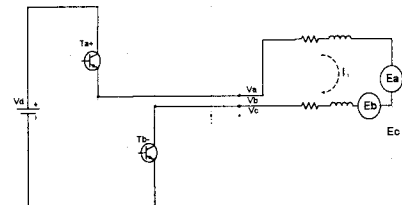


Fig. 2.2. Current path ( $T_a^+, T_b^-$ :on)

BLDCM은 역기전력 파형이 비정현적이므로 d-q변환이 불필요하므로 a, b, c상변수 모델을 사용한다. 여기서 스위칭 소자와 환류다이오드는 이상적인 것으로 간주하고 통전시 나타나는 전압강하는 무시한다.

轉流후  $30^\circ \leq \theta_e < 90^\circ$  구간에서의 역기전력이 0보다 크고  $T_a^+$ 가 턴-온일때의 루프 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_d = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a - e_b + L \frac{di_a}{dt} + Ri_a \quad (2.1)$$

$$\frac{V_d}{2} = V_n$$

$$e_a = -e_b = E, \quad v_n = -v_b = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + E \quad (2.2)$$

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

2. BLDCM의 센서리스 운전기법

2.2 BLDCM의 센서리스 운전 기법

본 연구에서 적용된 센서리스 기법은 스위칭 손실이 적은 unipolar PWM방식을 적용하여 인버터의 스위칭이 on상태일 때 비여자상의 단자전압이 인버터의 전원 전압의 1/2배 ( $V_d/2$ )가 되는 시점, 즉 역기전력이 0이 되는 시점(ZCP)을 검출한 후 이전 ZCP와 비교하여 다음 ZCP와의 중간시점(ZCP검출 후 전기각으로  $30^\circ$  지어진 시점)에서 轉流를 행하는 역기전력 간접 검출기법

$$v_c = v_n + e_c \quad (2.3)$$

위 식에 정의한 것처럼 증성전압은 단자전압의 2배와 같다. 따라서  $T_n^+$ 가 턴-온일 때 비여자선 c상의 단자전압은 다음과 같다.

$$v_c = \frac{V_d}{2} + e_c. \quad (T_n^+ \text{ on}) \quad (2.4)$$

따라서 이 구간동안 ZCP검출회로는 단자전압이  $V_d/2$ 보다 적어지는 순간을 검출하여 轉流시점을 결정한다. 그러나 적용된 센서리스 기법이 기존 기법들에 비해 위치분해능이 우수하고 저가화 및 구현이 용이한 장점이 있지만 인버터의 스위칭 주파수에 따라 회전자 위치검출 분해능이 다르게 되며 일반적인 전력용 트랜지스터를 이용해 구동할 경우 고속으로 갈수록 인가된 PWM펄스가 감소하게 되어 위치분해능 저하로 인한 고속운전범위의 제한을 가져오게 된다. 또한 이를 개선하기 위해 고주파 PWM을 인가할 경우 저속에서 인버터 스위치의 on구간이 짧아지므로 ZCP검출이 어렵게 되고 기동구간이 길어져 저속운전특성이 저해된다. 이러한 운전특성상의 제약은 BLDCM이 넓은 속도범위에서 가변속 운전과 토크 제어가 용이한 장점을 가짐에도 불구하고 적용범위의 제한을 가져오는 요인이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 두 개의 PWM스위칭 주파수(4KHz, 8KHz)를 적절한 시점에서 가변하여 기동 및 저속운전특성뿐 아니라 고속운전 특성을 동시에 개선하는 방법을 제시한다. 본 방법은 운전특성에 따라 적절한 스위칭주파수 변환시점을 결정하고 가변속 운전시 속도에 따라 두 개의 스위칭 주파수를 적절히 가변시켜 넓은 속도 영역에서 양호한 운전특성을 제공한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 시스템의 구성

본 연구에서 사용한 BLDCM 센서리스 드라이브의 제어부에 사용된 마이크로 프로세서로는 Intel사에서 제공하는 모터 제어용 16bit One-Chip Micro controller인 87C196MC를 사용하였으며 인버터의 스위칭 소자로는 PWM 주파수의 영향을 분석하기 위해 IPM(intelligent power module)으로 구성하였다. 또한 ZCP검출을 위해서 D플립플롭을 이용 PWM이 on상태에서 단자전압 파형이 검출 가능하도록 검출회로를 구성하였다. 본 연구에 적용된 BLDCM의 센서리스 드라이브의 구동순서는 먼저 회전자의 위치를 알 수 있는 위치에 놓이도록 하기 위해 임의의 2상을 강제정렬시킨다. 강제정렬후 센서리스 모드로 전환하기 위해서는 역기전력이 충분히 커서 단자전압으로부터 회전자 위치검출이 가능한 속도(가속 지령 속도)까지 각상에 적분제어를 통한 개루프가속을 행한다. 그 후 역기전력이 충분히 커서 단자전압으로부터 회전자 위치결정이 가능할 정도로 가속 지령속도에 진입하면 가속을 중단하고 정속운전을 행하며 ZCP를 검출한다. ZCP검출이 이루어지면 마이크로 컨트롤러로부터 동기 가속 모드로부터 센서리스 운전모드로의 모드전환이 지시된다. 센서리스 모드전환이 되면 바로 속도제어를 행하게 되는데 속도제어는 일반적으로 속도에 대한 비례 적분 제어를 사용하나, 센서리스 드라이브의 경우 속도는 ZCP간에 걸리는 시간으로부터 간접적으로 계산되고 속도변화에 따라 두 개의 PWM 스위칭 주파수를 가변시켜 안정된 센서리스 운전을 수행한다.

#### 3.2 결과 및 고찰

그림3.1과 그림3.2는 고속영역에서의 운전특성을 보여주고 있다. 그림3.1은 4KHz의 낮은 PWM 스위칭 주파수를 인가하여 2600rpm으로 정속운전시 나타나는 상전류와 개방 상의 단자전압 및 ZCP검출회로의 출력 파형이다. 위와 같이 저주파 PWM을 인가하여 센서리스

운전을 수행할 경우 비여자상의 단자전압에 나타나는 PWM 펄스 개수가 적으므로 ZCP검출구간이 일정하지 않고 검출실패 구간도 발생한다 그러므로 전류파형상도 심한 왜곡이 발생하며 이로 인해 역기전력과 동상이 이뤄지지 않으므로 전동기의 운전상태는 불안해 지며 가속할 경우 운전이 어렵게 되므로 고속에서 속도상의 제약이 따른다. 이를 개선하기 위해 PWM주파수를 8KHz로 향상시켜 운전을 수행할 경우 나타나는 출력 파형은 그림3.2와 같다. 이 경우 비여자상의 단자전압에 PWM펄스가 균일하여 ZCP도 일정하게 검출되므로 4KHz일 때에 비해 전류시점이 잘 일치하며 전류리플이 저감된 일정합성 토크를 얻을 수 있었고 소음 및 진동이 개선된 양호한 운전특성을 보였다.

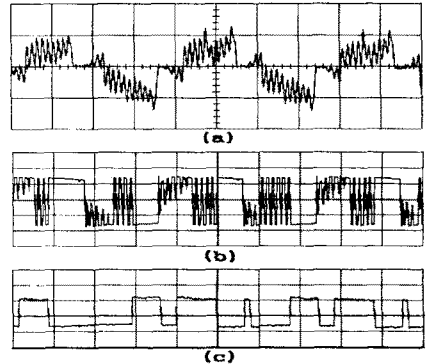


그림 3.1. Waveform with 4KHz PWM  
freq. at 2600(rpm), (2(ms)/div)  
(a)Phase current.(1(A)/div)  
(b)Open phase voltage.(50(V)/div)  
(c)Output of ZCP detector.(2(V)/div)

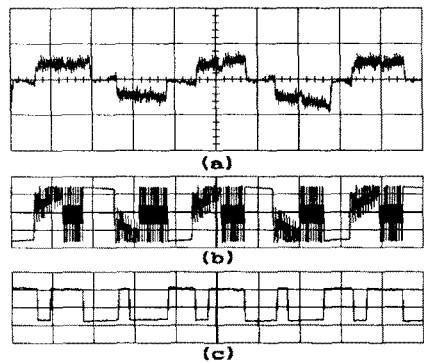


그림 3.2. Waveform with 8KHz PWM  
freq. at 2600(rpm), (2(ms)/div)  
(a)Phase current.(1(A)/div)  
(b)Open phase voltage.(50(V)/div)  
(c)Output of ZCP detector.(2(V)/div)

그러나 고주파 PWM을 인가할 경우 비여자상의 단자전압 파형에 나타나는 펄스 수는 증가하나 on상태구간이 짧아 ZCP검출이 오히려 어렵게 되므로 기동특성이 나빠져 저속운전범위의 제한을 가져온다. 그림3.3과 그림3.4는 1250rpm으로 정속운전시 나타나는 센서리스 운전특성을 보여주고 있다. 그림3.3과 같이 4KHz의 PWM 스위칭 주파수를 인가하였을 경우 ZCP검출이 일정하며 원활한 동작을 보여주고 있다. 그러나 8KHz로 운전을 수행할 경우 그림3.4처럼 ZCP검출실패 구간이 생기며 운전상태가 불안하기 때문에 더 낮은 속도에서는 운전이 어렵게 된다. 또한 실제 센서리스 모드전환도 이 구간에서 이뤄지게 되므로 기동구간이 길어지게 된다.

그림 3.5는 정지상태에서 4200rpm까지 가속하였을 때, 기동특성의 저해와 저속구간의 제한 없이 고속특성을 개선하기 위해 제안된 방식의 출력 파형을 8KHz일 때와 비교하여 보여주고 있다. 제안된 방법에 따라 2000rpm에서 스위칭 주파수 변환이 이뤄지게 하여 운전 수행한 결과 8KHz를 인가할 경우에 비해 기동특성 및 저속특성이 개선되었으며 700rpm~4500rpm의 속도 범위에서 운전이 원활하였다.

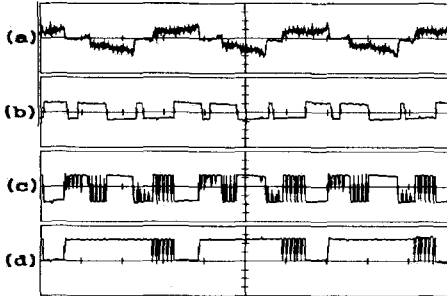


그림 3.3. Waveform with 4KHz PWM freq. at 1250(rpm), (5ms/div)  
 (a)Phase current.(0.5(A)/div)  
 (b)Output of ZCP detector.(2[V]/div)  
 (c)Open phase voltage.(50[V]/div)  
 (d)input with unipolar PWM.(2[V]/div)

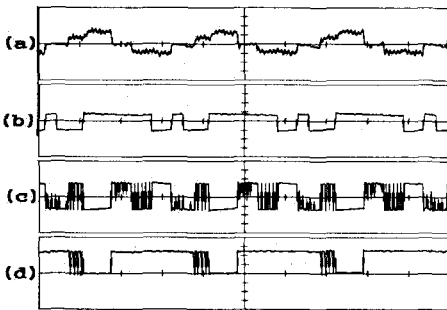


그림 3.4. Waveform with 8KHz PWM freq. at 1250(rpm), (5ms/div)  
 (a)Phase current.(0.5(A)/div)  
 (b)Output of ZCP detector.(2[V]/div)  
 (c)Open phase voltage.(50[V]/div)  
 (d)input with unipolar PWM.(2[V]/div)

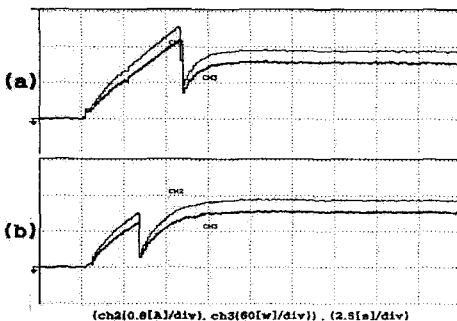


그림 3.5. Comparison of starting current(ch2) and power consumption(ch3).  
 (a) 8KHz PWM freq.  
 (b) 4KHz + 8KHz PWM freq.

그림 3.6은 제안된 방법(4KHz+8KHz)으로 가속속운전을 수행하였을 때 지령속도에 원활하게 추종되고 있음을 보여주고 있다.

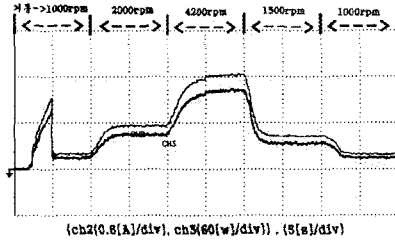


그림 3.6. Current response for variable speed commands.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 단자전압으로부터 회전자 위치를 간접 검출하여 구동되는 센서리스 드라이브에 대해 PWM 인버터 스위칭 주파수에 따른 동작특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고속에서 높은 PWM 스위칭 주파수를 사용함으로써 위치분해능을 향상시켜 고속운전 범위가 확대되고 전류리플이 개선되어 소음과 진동이 줄었다.
2. 저속에서 낮은 PWM 스위칭 주파수를 사용하여 기동구간을 단축함으로써 소비전류가 줄었으며 저속운전 특성이 개선되었다.
3. 소프트웨어적으로 구현이 가능하므로 추가비용이 필요 없으며 PWM 스위칭 주파수 조절이 용이하다.

#### (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, pp.595-601, MAY/JUN 1985.
- [4] R. C. Becerra, T. M. Jahns, M. Ehsani, "Four-Quadrant Sensorless Magnet ECM Drive", Conf. Rec. of APEC' -91, pp.202-209, 1991.
- [5] 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.
- [6] S.Ogasawara, H.Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors", Conf.Rec.of IEEE IAS'90, pp443-447, 1990.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 여형기 외, "영구자석 매입형 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구", 전력전자학회 논문지. 제 2권, 3호 1997.
- [10] 우혁재, 송명현, 박규남, "An Improvement of Sensorless Highspeed Performance for Brushless DC Motor", 순천대학교 논문집, 제 17권, pp. 163-173, 1998.