

브러시리스 직류 전동기용 새로운 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구

박정배*, 장항제*, 이용순*, 유지윤*, 이광운*, 여형기**
*고려대학교, **두원 공과대학교

A study on the development of a new sensorless drive system for the brushless DC motors

Jung-Bae Park*, Hang-Jea Chang*, Yong-Soon Lee*, Ji-Yoon Yoo*,
Kwang-Woon*, Lee, Hyeong-Gee Yeo**
*Korea University, **Doowon Technical College

ABSTRACT

In this paper, we proposed a new sensorless drive system for the trapezoidal type brushless DC motor, which does not use any mechanical position or speed sensor and applicable to the systems requiring a constant speed and torque such as Fan.

For this, a novel indirect rotor position sensing technique based on a detailed analysis of the terminal voltage characteristics is proposed in this paper. And a sensorless drive system for the brushless DC motor is implemented using a 87c196mc for the main microprocessor, and a power FET for the inverter.

The experimental results will show the validity of the proposed indirect sensing method and the practical use of the sensorless drive.

1. 서론

일반적으로 구형파 형태의 역기전력을 가지는 브러시리스 직류 전동기(trapezoidal type brushless DC motor)의 드라이브 시스템에서는, 기계적인 브러시와 정류자를 대신하여 전자적으로 상전류를 전환시키기 위하여 회전자 위치 검출이 필수적이며, 이를 위해 엔코더나 홀센서와 같은 위치 검출용 센서가 사용된다. 즉, 이들 센서를 이용하여 전동기의 역기전력의 크기가 일정한 구간을 검출하고, 이 구간에서 일정한 크기의 전류가 흐르게 함으로써 일정 토크 제어를 수행한다.

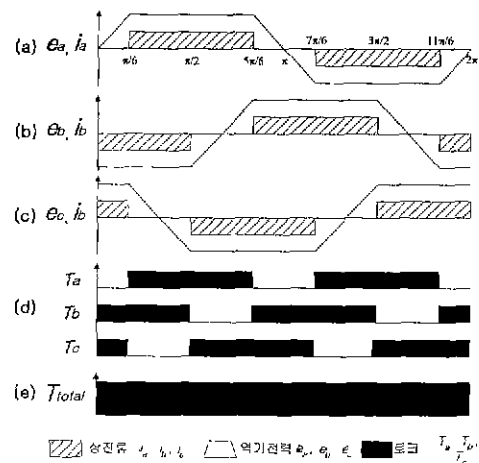
그러나 이러한 회전자 위치 검출용 센서의 부착은 전동기의 부피를 증가시키고, 전동기의 사용 환

경에 제약을 가져오며, 전동기 드라이브 시스템의 가격 경쟁력을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 최근에는 구형파 브러시리스 직류 전동기에 대한 센서리스 드라이브 시스템의 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 구형파 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 드라이브를 위한 새로운 회전자 위치 검출 방식을 제안하고, 이를 환풍기나 팬과 같이 일정 부하 및 일정 속도가 요구되는 응용 분야에 적용하기 위한 센서리스 드라이브 시스템의 개발에 대한 연구를 수행하였다.

2. 본론

2.1 구형파 브러시리스 직류 전동기의 동작원리



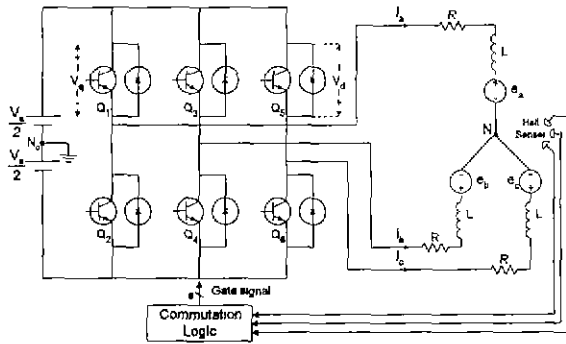
(그림 1) 구형파 브러시리스 직류 전동기의 역기전력과 상전류 및 토크 파형

(그림 1)에 보인 바와 같이, 구형파 브러시리스 직류 전동기에서는 전동기의 회전자 위치에 따라

각 상에 구형파 형태의 역기전력이 발생한다. 전동기에서 발생하는 토크는 각 상의 역기전력과 상 전류의 곱에 비례하므로, 역기전력이 평탄한 구간에서 일정한 크기의 전류를 인가하게 되면 전동기의 일정 토크 제어가 가능하다.

(그림 2)는 일반적인 구형파 브러시리스 직류 전동기의 드라이브 시스템을 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 각 상의 역기전력이 평탄한 구간에서 일정한 크기의 전류를 흘려주기 위해서는, 위치 센서를 사용하여 회전자의 위치를 검출하고 전기각으로 60° 마다 상전류의 전환을 수행한다.

본 논문에서는 3상 중 2개의 상만을 통전시키는 3상 2여자 방식으로 전동기를 구동하였으며, 특히 여자 되어있는 두개의 상중에서 새롭게 여자된 상에 대하여 PWM 제어를 수행하는 선단부 유니폴라 PWM 방식을 채택하였다.



(그림 2) 구형파 브러시리스 전동기용 드라이브 시스템

다음에 보인 (표 1)은 선단부 유니폴라·PWM 방식을 적용하여, 3상 2여자 방식으로 구형파 브러시리스 직류 전동기를 구동하는 경우, 전기각으로 매 60° 구간에서의 여자, 비여자상과 상전류의 경로 및 인버터의 스위치와 다이오드의 상태를 나타낸다.

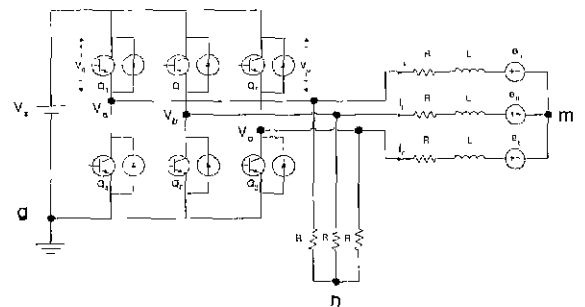
(표 1) 3상 2여자, 선단부 유니폴라 PWM 방식 적용시 각 구간에서의 회로 상태

	M1	M 2	M 3	M 4	M 5	M 6	M1
active phase	CB	AB	AC	BC	BA	CA	CB
inactive phase	A	C	B	A	C	B	A
conduction path	←	←	←	←	←	←	←
PWM	Q6	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
ON	Q5	Q6	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Freewheeling (at PWM off)	D3	D4	D5	D6	D1	D2	D3

2.2 제안한 구형파 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 시스템의 구동 원리

본 논문에서 구형파 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 시스템을 구현하기 위해서, 3상의 단자를 저항으로 Y결선하여 새로운 중성점을 만들고, 선단부 유니폴라 PWM 방식으로 전동기를 구동시 이 중성점 전압에 대한 분석을 통하여 전동기의 센서리스 구동을 위한 새로운 회전자 위치 간접 검출 방법을 제안하였다.

[1] Y결선 중성점 전압에 대한 분석



(그림 3) 저항을 이용한 각 상의 Y결선 회로

(그림 3)은 전동기의 3상 단자를 동일한 값을 갖는 저항으로 Y결선을 한 회로이다. 이 Y결선의 중성점 단자 n과 전동기 내부의 중성점 m간의 전압 V_{nm} 을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$V_{nm} = -\frac{1}{3} (V_{ma} + V_{mb} + V_{mc}) \quad (1)$$

(식 1)을 이용하여 Y결선에 의해 만들어진 중성점 단자 n과 전동기의 구동 전원 V_s 의 접지 단자인 g간의 전압 V_{ng} 를 유도하면 다음과 같다.

$$V_{ng} = \frac{1}{3} (V_{ag} + V_{bg} + V_{cg}) \quad (2)$$

(식 2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

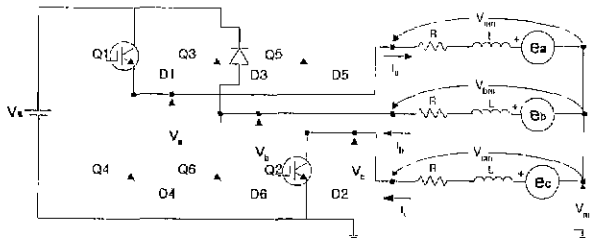
$$V_n = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (3)$$

(식 3)에서 알 수 있듯이 중성점 전압 V_n 에 대한 분석을 수행하기 위해서는 각 3상의 단자 전압 V_a, V_b, V_c 에 대한 분석이 선행되어야 한다.

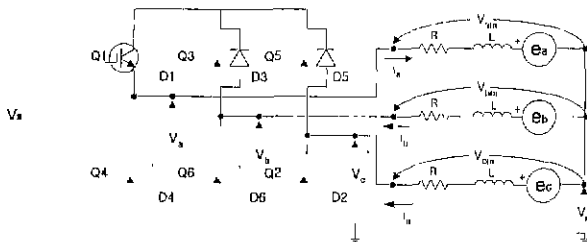
앞서 보인 (그림 1)과 (표 2)를 보면, 선단부 유니폴라 PWM 방식을 적용하여 3상 2여자 방식으로 전동기를 구동하는 경우, M1~M6 구간 중에 한 상이 비여자상이 되는 구간은 두 번이며 여자되는 구간은 네 번이 됨을 알 수 있다.

한 상이 여자상인 경우에는 해당상의 인버터의 스위치 쌍의 턴-온, 턴-오프 상태에 따라 V_s 또는 0 전압이 단자 전압으로 나타나지만, 비여자상으로 동작하는 구간에서의 단자 전압은 회로 상태에 따라 다르게 나타나게 된다.

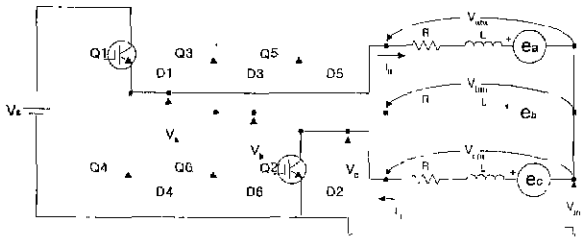
(그림 4)는 b상이 비여자 상이 되는 전기각으로 $90^\circ \leq \theta_e < 150^\circ$ 사이에서 각 조건에 따른 등가 회로를 나타낸다. 이때의 비여자상인 b상의 단자 전압을 (표 2)에서 정리하여 나타내었다.



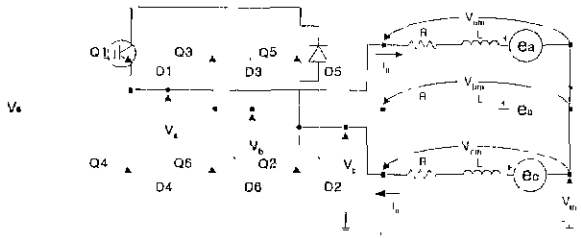
(a)



(b)



(c)



(d)

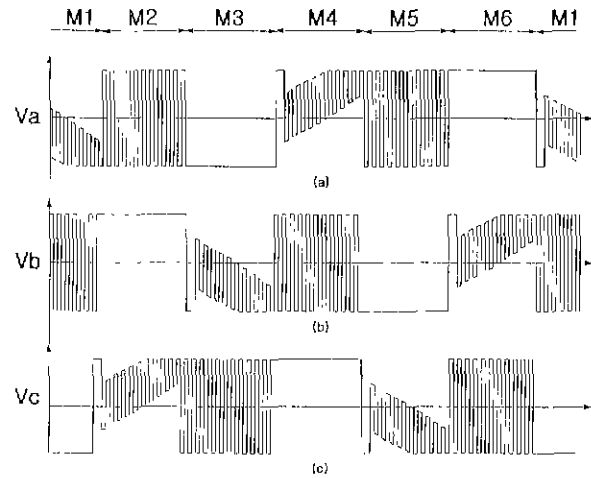
(그림 4) $90^\circ \leq \theta_e < 150^\circ$ 구간에서 조건에 따른 전동기 드라이브 시스템의 등가 회로

이와 같은 분석을 통하여 선단부 유니폴라 PWM 방식을 적용하여 3상 2여자 방식으로 전동

기를 구동하는 경우, 전기각으로 360도 구간 내에서 b상의 단자전압 V_b 의 파형을 (그림 5-b)와 같이 예측해 낼 수 있다. a상과 c상의 단자 전압 파형 V_a, V_c 는 위상차를 고려하여 (그림 5-a) 및 (그림 5-c)와 같이 예측할 수 있다.

(표 2) b상이 비여자상일 경우의 단자전압

모드 / 전기적 각도	조건 / 등가회로	단자 전압
M3 $90^\circ \leq \theta_e < 150^\circ$	$i_b < 0$ (전환구간) 그림4-(a)	V_s
	Q2 on, $i_b = 0$ 그림4-(b)	$V_s/2 + e_b$
	Q2 off, $e_b < 0$ 그림4-(c)	$V_s + e_b$
	Q2 off, $e_b > 0$ 그림4-(d)	V_s
	Q2 on, $i_b < 0$ 그림4-(a)	V_s
M5 $270^\circ \leq \theta_e < 330^\circ$	$i_b > 0$ (전환 구간)	0
	Q5 on, $i_b = 0$	$V_s/2 + e_b$
	Q5 off, $e_b > 0$	e_b
	Q5 off, $e_b < 0$	0
	Q5 on, $i_b > 0$	0



(그림 5) 선단부 유니폴라 PWM 적용시 3상의 단자 전압 파형

[2] 제안된 회전자 위치 간접 검출 방식

(그림 5)에서 예측한 3상의 단자 전압 V_a, V_b, V_c 를 앞서 구한 (식 3)에 대입하면, Y결선의 중성점 전압 V_n 은 (그림 6-b)와 같이 예측할 수 있다.

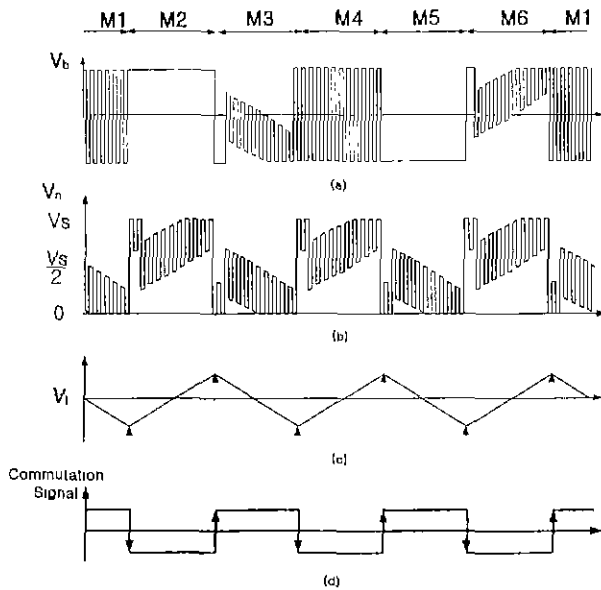
그림에서 알 수 있듯이, 이 중성점 전압 V_n 에는 PWM 스위칭에 의한 고주파 성분이 포함되어 있으

며, 직류 링크단 전압의 반에 해당하는 $V_s/2$ 의 전압이 직류 오프셋으로 포함되어 있다.

본 논문에서는 먼저 중성점 전압 V_n 에 포함되어 있는 PWM 스위칭에 의한 고주파 성분을 제거하기 위하여 저역통과 필터링(low pass filtering)을 수행한다.

(그림 6-c)에 보인 바와 같이 저역통과 필터링을 통해 얻어진 파형 V_i 는 PWM 스위칭에 의한 고주파 성분이 제거된 삼각파 형태로 나타나는데, 이때 삼각파의 피크치가 되는 시점은 중성점 전압 V_n 이 $V_s/2$ 와 같아지는 시점이며, 전동기의 상전류 전환 시점과 일치한다. 이는 (그림 6-a)와 (그림 6-c)를 비교해 봄으로써 확인할 수 있다.

따라서 삼각파의 피크치가 되는 시점을 하드웨어적으로 찾아내면 이를 통해 회전자 위치를 간접 검출해 낼 수 있으며, 이를 이용하여 전동기를 센서리스로 구동할 수 있다.



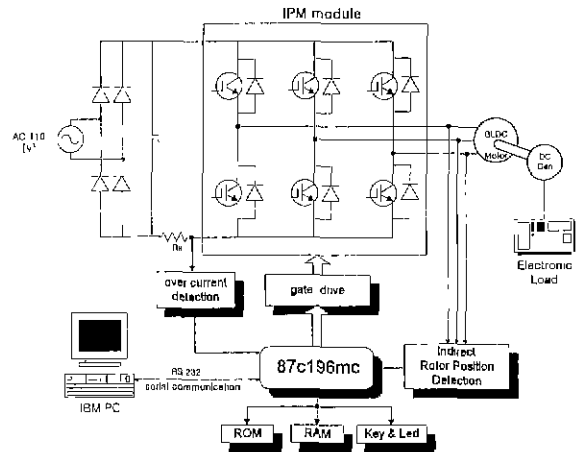
(그림 6) 제안된 회전자 위치 간접 검출 방식

3. 실험 결과

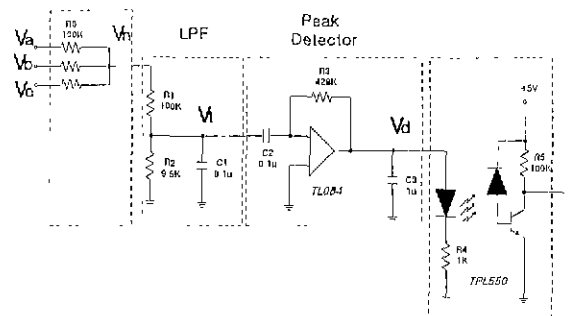
[1] 센서리스 드라이브 시스템의 구현

본 논문에서 제작한 센서리스 드라이브 시스템은 구형과 전류 여자 브러시리스 직류 전동기를 위치 센서 없이 구동함과 동시에 속도 제어를 수행하기 위한 것으로, 실용화를 최대 목표로 개발하였다. 이를 위해 상용화가 가능한 인텔사의 전동기 제어용 단일칩 마이크로프로세서 87c196mc를 주연산 및 제어기로 사용하였고, 제안한 회전자 위치 간접 검출 방식을 적용하여 하드웨어적으로 직접 상전류의 전환 시점을 찾아냄으로써, 프로세서의 소프트웨어

적인 부담을 줄일 수 있는 회전자 위치 간접 검출 회로를 개발하였다. 또한 전체 시스템을 완전 디지털화 하므로써 전동기 구동 시스템의 신뢰성을 향상시켰다. (그림 7)에 본 논문에서 개발한 구형과 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 시스템을 나타내었으며, (그림 8)에는 앞서 제안한 회전자 위치 간접 검출 방식을 적용한 회전자 위치 간접 검출 회로를 나타내었다.



(그림 7) 전동기 및 구동부의 시스템 구성도



(그림 8) 구현된 회전자 위치 간접 검출 회로

[2] 센서리스 운전에 대한 실험 결과

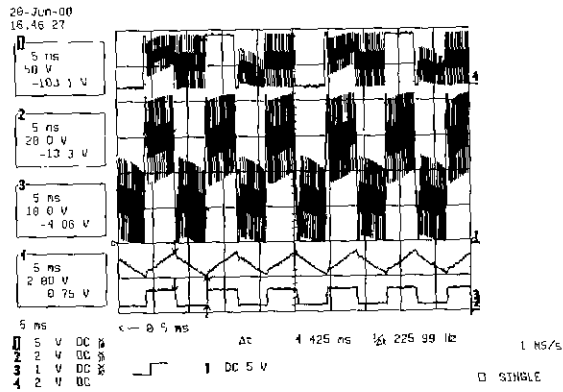
본 논문에서는 다음과 같은 사양을 가지는 구형과 브러시리스 직류 전동기에 대하여 제안한 센서리스 구동 방식으로 센서리스 운전을 수행하였다.

(표 3) 실험에 사용한 전동기 사양

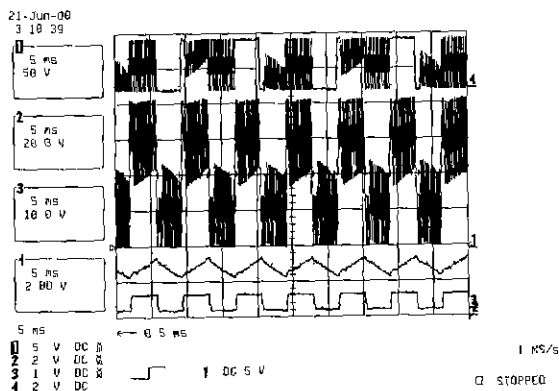
정격 속도	1000rpm
극 수	3상 8극
정격 전압	311V
선간 저항	367 Ω

(그림 9)는 제안한 센서리스 운전 방식을 적용하여, 구형과 브러시리스 직류 전동기를 800[rpm]으

로 센서리스 운전시의 실험 파형으로, 한 상의 단자 전압과 중성점 전압 V_n 및 V_i 와 상전류 전환 신호를 나타내고 있다. 실험 파형에서 알 수 있듯이, 간접 검출 회로에 의한 상전류 전환 신호가 정확하게 얻어지고 있음을 알 수 있다. (그림 10)은 1000[rpm]에서 전동기를 센서리스로 운전시의 실험 파형이다.



(그림 9) 센서리스 운전시 한상의 단자 전압과 중성점 전압 및 V_i 와 상전류, 전환 신호 [800rpm]



(그림 10) 센서리스 운전시 한상의 단자 전압과 중성점 전압 및 V_i 와 상전류, 전환 신호 [1000rpm]

4. 결론

본 논문에서는 구형파 전류 여자 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 드라이브의 개발에 관한 것으로, 실용적인 드라이브의 개발을 위하여 전동기의 단자 전압 특성을 분석하고, 이를 이용하여 회전자 위치를 실시간으로 간접 검출하는 방법을 제안하였다.

또한 제안한 회전자 위치 간접 검출 방식을 적용한 센서리스 드라이브를 구현하였으며, 일정 부하, 일정 속도를 요구하는 환풍기(fan)를 대상으로 개발된 구형파 브러시리스 직류 전동기에 대한 실험

을 통하여 제안한 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 운전 기법의 타당성과 실용성을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] R. Wu and G. R. Slemon, "A Permanent Magnet Motor Drive without a Shaft Sensor", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 27, no. 5, pp. 1005-1011 Sep./Oct. 1991.
- [2] N. Ertugul and P. Acarnly, "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 30, no. 1, pp. 126- 133, Jan./Feb. 1994.
- [3] N. Matsui and M. Shigyo, "Brushless DC Motor Control without Position and Speed Sensors", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 28, no. 1, pp. 120-127, Jan./Feb. 1992.
- [4] H. Watanabe, *et. al.*, "An Improved Measuring System of Rotor Position Angles of the Sensorless Direct Drive Servomotor", Proc. of IEEE IECON, pp. 165-170, 1991.
- [5] N. Matsui and T. Takeshita, "A Novel Starting Method of Sensorless Salient-Pole Brushless Motor", Conf. Rec. of IEEE IAS, pp. 386-392, 1994.
- [6] M. Schoedl, "An Improved Position Estimator for Sensorless Controlled Permanent Magnet Synchronous Motors", EPE Conf. Rec., vol. 3, pp. 418-423, 1991.
- [7] C. French, *et. al.*, "Sensorless Position Control of Permanent Magnet Drives", Conf. Rec. of IEEE IAS, pp. 61-68, 1995.