

저속영역에서의 브러시리스 직류전동기의 센서리스 운전 성능 향상에 대한 연구

서문석, 배종표, 최재혁, 김종선, 유지윤, 여형기*
고려대학교, 두원공과대학*

A Study on Performance Improvement of Sensorless Operation of the Brushless DC Moter in Low Speed Region

Mun-Seok Seo, Jong-Pyo Bae, Jong-Sun Kim, Ji-Yoon Yoo, Hyeong-Gee Yeo*
Korea University, Doowon Technical College*

ABSTRACT

This Paper propose a novel sensorless drive system for the trapezoidal brushless DC motor in low speed region. The inverter DC input voltage is controlled by step-down converter for low speed operation. A indirect rotor position sensing technique based on a detailed analysis of the terminal voltage characteristics is proposed in this paper. A sensorless drive system is implemented using a TMS320F240 for the main process and IPM(Intelligent Power Module) for the inverter.

1. 서 론

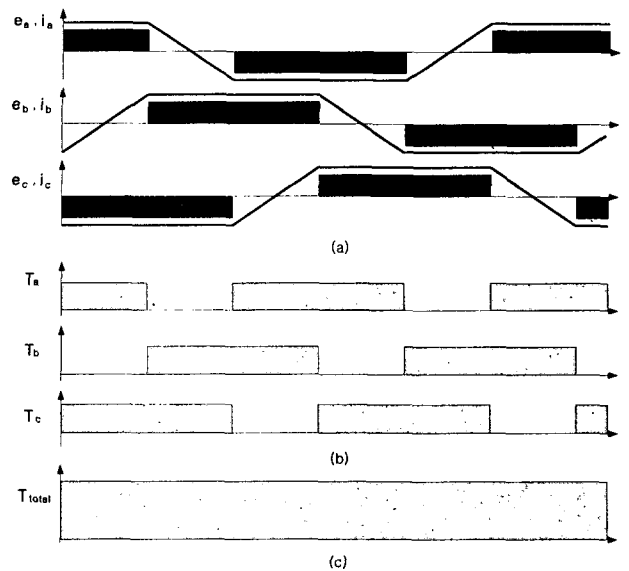
구형과 브러시리스 직류전동기 회전자 위치 검출을 위해서 일반적으로 사용되어지는 홀센서의 부착은 전동기 제조단가 및 부피증가 그리고 고온, 고압의 환경상의 제약을 받게 된다. 구형과 브러시리스 직류전동기를 센서 없이 구동시키기 위해서는 센서를 이용하지 않고 회전자 위치에 대한 정보를 얻는 것이 필요하다.^[1, 2]

본 연구에서는 센서리스 운전에서 있어 기존의 간접 센싱 방식들의 단점을 보완하고, 안정적인 센서리스 운전을 구현하기 위해 아날로그 필터를 이용한 간접 센싱 회로를 사용하여 센서리스 운전을 구현하였다. 그러나 아날로그 필터를 이용한 센서리스 운전은 넓은 속도 영역에서 운전이 가능하지만, 저속 영역에서 동작할 때에는 단자전압의 크기가 매우 작아서 이로부터 적절한 전환신호를 만들어 낼 수 없다.^[3] 그러므로 저속 영역에서 센서리스 모드 전환방식과 센서리스 모드로 운전을 하기 위한 개선된 방법을 제안한다. 제안한 방법은 750w급

전동기를 대상으로 실험을 통하여 타당성과 유효성을 입증한다.

2. 본 론

2.1 구형과 브러시리스 직류 전동기의 구동원리^[4, 5]



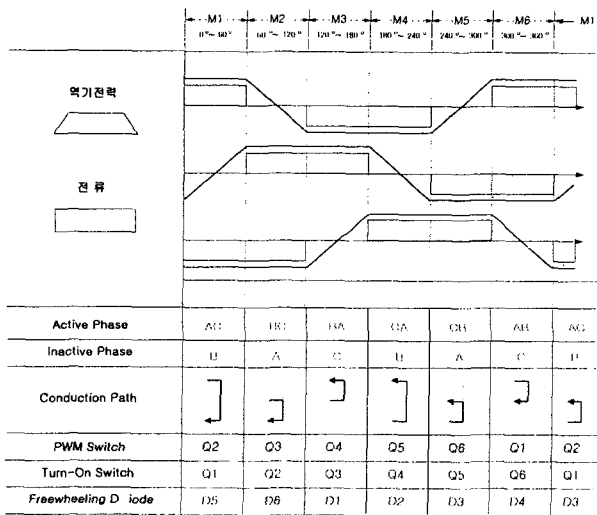
브러시리스 직류 전동기 구동시 a, b, c의 각 상에 그림 1의 (a)와 같은 역기전력이 각각 발생하며, 이때 역기전력이 평탄한 구간에 대해서 그림 1 (a)의 빗금친 것과 같은 전류를 해당 상에 흘려주면, 각 상에는 그림 1 (b)와 같은 토크가 발생하게 되고, 전동기의 출력 토크는 각 상의 토크를 합한 그림 1 (c)와 같은 토크가 발생하게 된다. 이와 같이 역기전력이 평탄한 구간에 전류를 흘려줌으로써 전동기의 토크는 모든 구간에서 그 크기가 일정하게 되고, 전류 대 토크가 선형성을 갖게 된다. 구형과 브러시리스 직류전동기는 위와 같은 원리에 의해서

구동이 되므로 역기전력의 평탄한 구간을 검출하는 것이 필요하다. 그림 1의 각 상에 유기되는 역기전력은 전동기의 회전자인 영구자석의 위치에 의해서 결정되어다. 따라서 회전자의 위치에 의한 역기전력의 평탄한 구간을 검출하여 전동기의 구동이 이루어지며, 이를 위하여 일반적으로 홀 센서(hall sensor)가 사용되어진다.

일반적인 브러시리스 직류 전동기의 구동 시스템은 크게 인버터, 전동기, 제어기로 구성되어 있다. 전동기 부분에 있는 홀 센서(Hall Sensor)가 회전자의 위치를 검출하고 이 신호로부터 회전자의 위치에 따라 각상에 적절한 전류가 흐르도록 인버터의 스위칭 소자를 스위칭 시켜 주게된다.

표1은 그림 2의 구동 시스템으로 3상 2여자, 선단부 유니폴라 PWM 방식으로 전동기를 구동시킬 경우 각 구간에서 회로 상태를 나타내고 있다.

표 1 3상 2여자, 선단부 유니폴라 PWM 방식으로 전동기를 구동시킬 경우의 각 구간에서의 회로 상태



2.2 구형파 브러시리스 직류 전동기의 모델링

임의상이 여자상인 경우 각 상의 단자전압은 스위치의 상태에 따라 V_s 와 $0[V]$ 의 두가지 경우를 가지게 된다. 표 1에 보인 각 구간에 대해 b상이 여자상인 구간의 b상의 단자전압을 표 2에 정리하였다.

구간 중 비여자상 전류 i_b 가 0으로 소호 되기이전 구간에서 b상의 단자전압 v_b 는 다음과 같다.

$$v_b = V_s(Q2 \text{ on}) \quad (1)$$

$$v_b = V_s(Q2 \text{ off}) \quad (2)$$

표 2 b상의 여자상인 M2, M3, M5, M6 구간에서의 b상의 단자전압

구 간	조 건	b상의 단자전압
	PWM Switch의 상태	
M2 (60~120°)	Q3 On	V_s
	Q3 Off	0
M3 (120~180°)	Q4 On	$-V_s$
	Q4 Off	V_s
M5 (240~300°)	Q6 On	0
	Q6 Off	V_s
M6 (300~360°)	Q1 On	0
	Q1 Off	0

또한 M1구간 중 비여자상 전류 i_b 가 0으로 소호 된 이후의 구간에서 PWM 스위치 Q2의 On, Off 상태에 따른 b상의 단자전압 v_b 는 다음과 같다.

$$v_b = v_m + e_b \quad (3)$$

이때 전동기 내부 중성점 전압 V_m 은 다음에 의해서 구해진다. KVL를 적용시키면,

$$v_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a + v_m \quad (4)$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c + v_m$$

을 얻을 수 있고 이 두 식을 합해서 v_m 에 대해서 정리를 하면,

$$v_m = \frac{1}{2}(v_a + v_c) - (e_a + e_c) - R(i_a + i_c) - L \frac{d(i_a + i_c)}{dt} \quad (5)$$

가 된다.

표 1을 보면 M1 구간에서 a상의 역기전력과 c상의 역기전력은 크기는 같고 부호가 반대인 것을 알 수 있으므로 $e_a + e_c = 0$ 이 되고, 그림 4를 보면 a상의 전류와 c상의 전류 역시 크기는 같고 부호가 반대임을 알 수 있으므로 $i_a + i_c = 0$ 이 된다. 이 두 식을 식(5)에 대입하면 v_m 은,

$$v_m = \frac{1}{2}(v_a + v_c) \quad (6)$$

로 간략화 된다. 그리고 식(6)을 식(3)에 대입을 함으로써 v_b 는,

$$v_b = \frac{1}{2}(v_a + v_c) + e_b \quad (7)$$

로 정리된다. 그림 4로부터 v_a 는 Q2의 On, Off에 상관없이 항상 V_s 전압이, v_c 는 Q2 스위치의 On, Off에 따라서 각각 0와 V_s 전압이 인가되어 짐을 알 수 있다. 따라서 식(7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_b = \frac{V_s}{2} + e_b(Q2 \text{ on}) \quad (8)$$

$$v_b = V_s + e_b(Q2 \text{ off}) \quad (9)$$

또한, 식(9)을 보면 e_b 의 부호가 양이 되면 b상의 단자 전압 v_b 가 인버터의 직류 링크 전압보다 커지므로 Q3의 역병렬로 연결된 환류 다이오드 D3가 도통되어 v_b 는 직류 링크 전압 V_s 가 된다.

또 하나의 b상 비여자 구간인 M4 구간은 M1 구간의 분석 결과를 토대로 유추할 수 있으며, 표 3에 M1, M4 구간에서 b상의 단자전압을 분석하여 정리하였다.

표 3 b상이 비여자상인 M1, M4 구간에서 b상의 단자전압

구 간	조 건		b상의 단자전압
	비여자상의 전류 상태	PWM Switch 상태	
M1 (0~60°)	$i_b \neq 0$	Q2 On	V_s
		Q2 Off	V_s
	$i_b = 0$	Q2 On	$\frac{V_s}{2} + e_b$
		Q2 Off	$V_s + e_b$
M4 (120~180°)	$i_b \neq 0$	Q5 On	0
		Q5 Off	0
	$i_b = 0$	Q5 On	$\frac{V_s}{2} + e_b$
		Q5 On ($e_b < 0$)	0
		Q5 Off	e_b

표 2와 표 3을 정리하면 b상의 단자전압 파형은 그림 2와 같이 된다.

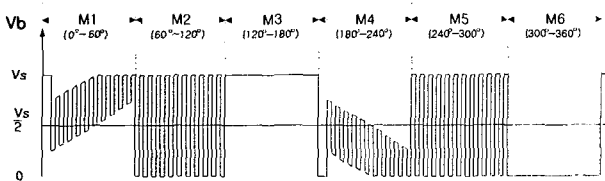


그림 2 b상의 단자전압 v_b 파형 (선단부 유니폴라 PWM)

위에서 분석을 수행한 b상의 단자전압에 대해서 a상의 단자전압은 120°앞서고, c상의 단자전압은 전기적으로 120°뒤진다.

2.3 저속에서의 센서리스 운전원리

그림 3은 역기전력 신호를 이용한 센서리스 운전의 구동회로를 나타내고 있다.

구형과 브러시리스 전동기의 구동을 위해서는 회전자의 위치에 따라 적절한 상에 전류가 흐를 수 있도록 상전류 전환을 시켜 주어야 한다.

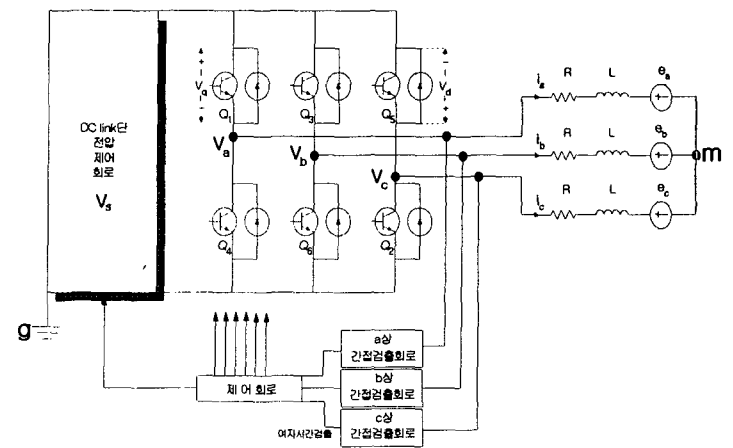


그림 3 회전자 위치 검출회로를 이용한 구형과 브러시리스 직류 전동기 구동 시스템

또한 센서리스 운전을 위해서는 단자전압의 역기전력을 분석하여 다음상의 여자 시점 검출이 필요하다. 이를 위해서는 단자전압에서 신뢰성있는 파형을 얻기위해 전동기를 일정속도 이상으로 회전시켜 주어야 한다.

이러한 문제 때문에 역기전력의 크기가 작은 저속에서 센서리스 운전의 효율성이 떨어지는데 본 논문에서는 dc 링크단의 전압을 제어함으로써 저속에서 센서리스 성능을 개선하고자 한다.

그림 4는 dc 링크단의 전압을 조정하여 인버터 입력 전압을 조절하는 강압형 컨버터의 구성이다.

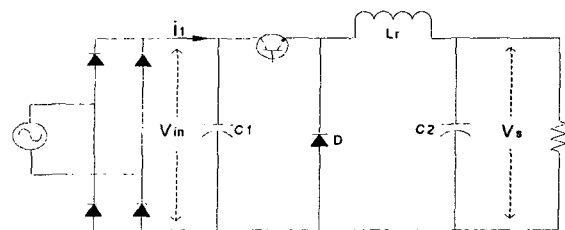


그림 4 입력 Capacitor형 강압형 컨버터

다이오드를 통한 정류기의 후단에 Capacitor C1이 병렬로 연결되어 있다. 입력 Capacitor C1은 입력 전류 I을 평활하는데 충분할 정도의 적은 용량으로 할 수 있다. 이것은 스위칭 주파수가 상용전원의 주파수보다 충분히 높기 때문이다.

스위치의 시비율(duty ratio, D)을 조절함으로써 출력전압의 크기를 조절할 수 있는데 그 크기는 다음과 같다.

$$V_s = D V_{dc}$$

그림 5는 본 논문에 사용한 회전자위치 간접검출을 통해 여자시점을 결정하는 회로이다. a,b,c상에 동일한 회로가 적용되므로 그중 한 가지만 분석해보면 다음과 같다.

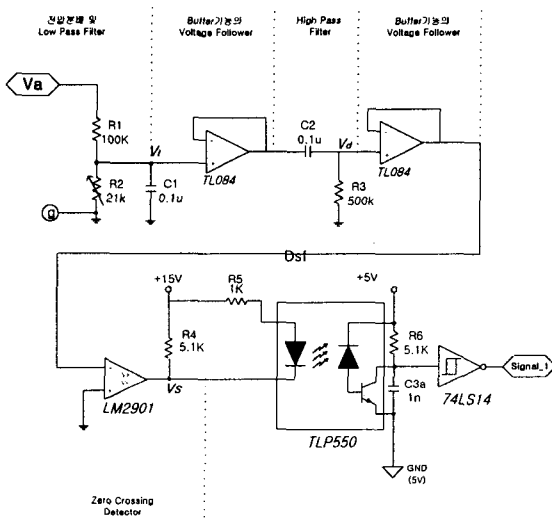


그림 5 제안한 회전자 위치 간접검출회로

우선 첫 번째 단계에서 저항을 이용한 전압분배기로 전동기의 단자전압을 op-amp 입력에 적절한 크기가 되도록 R1과 R2를 이용하여 전압강하를 시켰다. 여기에 캐패시터 C를 이용하여 저역통과 필터를 구현하여 PWM스위칭에 의한 고주파 성분을 제거한 삼각파를 만들었다. 이때 신뢰성있는 삼각파를 만들기위해 PWM의 시비율을 높게 설정하였다. 그에 따라 전동기의 속도가 올라가므로 여기에 dc 링크단의 전압을 충분히 낮추어서 저속에서도 신뢰성있는 파형 V_t 를 얻을 수 있었다.

두 번째 단계에서는 고역통과 필터를 이용하여 V_t 에서 dc성분을 제거한 파형 V_d 를 만들었다.

세 번째 단계에서는 op-amp를 이용하여 앞에서 만든 V_d 가 영전위를 지날 때 트리거되는 zero crossing detector 회로를 이용하여 V_s 를 만들었다.

이 V_s 의 트리거 시점을 계산하여 저속에서 전동기의 여자시점을 계산할 수 있었다.

마지막으로 포토커플러(Photo-Coupler)를 이용하

여 디지털 제어기와 아날로그 전동기 드라이브 회로와의 전원을 분리하였다. 이로써 아날로그회로단의 과전류나 오동작에 의해 디지털회로가 영향을 받는 것을 방지하였다.

필터 회로들간의 상호 간섭을 막기위해 중간에 버퍼기능을 하는 voltage follower를 삽입하였다. 속도 영역에 따라 필터의 영향으로 위상의 이동(phase shift)이 나타나나 트리거 시점간의 시간차이는 변동이 없으므로 저속뿐만 아니라 넓은 속도 영역에서 센서리스 운전이 가능하였다.

2.3 센서리스 저속운전 시스템 구성

센서리스 운전 알고리즘의 증명을 위해 구성한 실험 시스템은 다음과 같다.

주 제어 연산기로는 TI(Texas Instrument)社의 DSP controller TMS320F240을 사용하였으며, 인버터로는 Mitsubishi社의 600[V] 10[A] 용량을 갖는 IPM(Intelligent Power Modules)을 사용하였다. 실험에 사용된 전동기는 정격 750W 3000rpm의 대우중공업 6극 영구자석 회전자형 BLDC 전동기이다.

3. 실험 결과

그림 6은 각각 제안한 센서리스 운전 알고리즘으로 전동기를 저속으로 구동시켜 110[rpm]일때의 전동기의 단자전압중 하나를 dc 링크단을 기준으로 검출한 것이다. 저속에서의 운전 성능 검증을 위해 dc 링크단 강압 컨버터의 출력 전압은 6.7[V]이고 인버터의 시비율은 92%에서 운전하였다.

신뢰성있는 단자전압 검출을 위해 시비율을 높게 설정하였다. 또한 높은 시비율에서 저속 운전을 위해 dc 링크단 전압을 낮추었다. 그림 6의 (1)은 전동기의 단자전압의 파형을 나타낸 것이고 (2)는 단자전압에 포함되어있는 PWM에 의한 고주파 성분을 저역통과필터를 이용하여 제거한 파형이다. 세 번째 파형(c)는 고역통과필터링 후 dc성분이 사라졌음을 나타내고 있다.

그림 7은 필터링된 신호로부터 비교기를 통해 영전위를 검출해 낸 파형이다. 전동기의 3개의 단자전압에서 각각을 검출하여서 그 트리거 시점을 계산하면 홀센서를 이용하지 않고 상전류전환시점 즉 회전자 위치를 간접 검출할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8은 비교기 출력 후 photo coupler를 거친 후 제어기의 capture단에 입력으로 들어가는 신호를 나타낸것이다. 각각 전기적으로 120°의 위상차를 가짐을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.R. Hendershot and T. J. E. Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", *Magna Physics Pub. and Oxford Univ. Press*, 1994.
- [2] James P. Johnson and M. Ehsani, "Sensorless Brushless DC Control Using A Current Waveform Anomaly", *Conf. Rec. of 1999 IEEE IAS*, pp. 151-158, 1999.
- [3] Hirokazu Izawa and Shinichi Hashimoto and Kyoichi Okada, "Slow Speed Control System with Voltage Drive for Brushless DC Motor", *Conf. Rec. of IEEE IAS*, pp. 419-423, 1992.
- [4] 여형기, "브러시리스 직류전동기용 센서리스 드라이브 시스템 개발에 관한 연구", *고려대학교 대학원 전기공학과 박사학위 논문*, pp. 25-29, pp. 49-50, 1998년 7월.
- [5] 장항제, "구형과 브러시리스 직류 전동기용 새로운 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구", *고려대학교 대학원 메카트로닉스 협동과정 석사학위 논문*, pp. 20-38, 2001년 2월.
- [6] 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.
- [7] C. French, et. al., "Sensorless Position Control of Permanent Magnet Drives", *Conf. Rec. of IEEE IAS*, pp. 61-68, 1995.

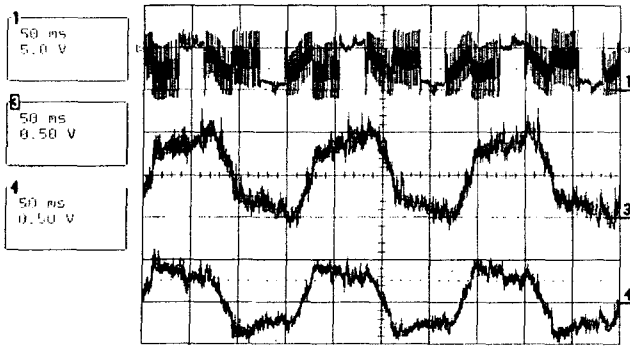


그림 6 전동기 단자전압, 동상 저역통과필터후 파형, 동상 고역통과필터후 파형

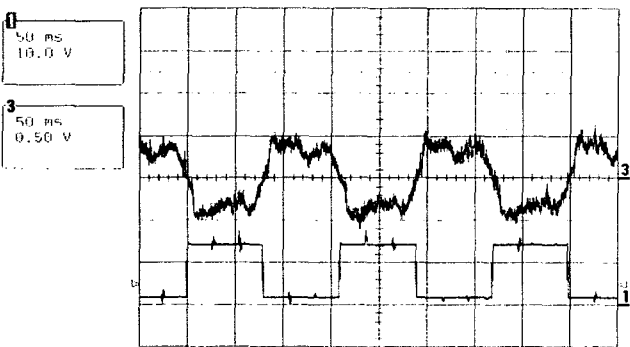


그림 7 필터후 파형, 동상 비교기 출력

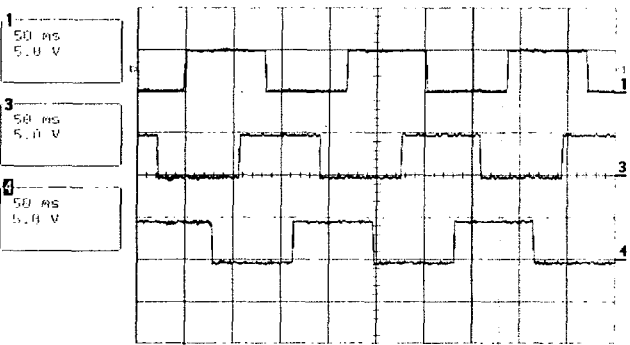


그림 8 각각의 단자전압으로부터 얻어진 최종출력

4. 결 론

본 논문은 구형과 브러시리스 직류 전동기의 저속 영역에서의 센서리스 운전을 위해 전동기 각상의 단자전압의 특성을 분석하고 이를 이용하여 회전자 위치를 간접적으로 검출하였다. 또한 dc 링크 단 전압을 강압형 컨버터를 사용하여 제어함으로써 저속영역에서 실제적으로 향상된 운전을 할 수 있었다.