

브러시리스 직류전동기용 센서리스 드라이브의 토크 맥동 저감 방법

이광운, 김대경, 김태덕
삼성전자 DA연구소

Torque Ripple Reduction Method in a Sensorless Drive for BLDC Motor

Kwang-Woon Lee, Dae-Kyong Kim, Tae-Duk Kim

Abstract - This paper presents a method to reduce commutation torque ripple in a sensorless brushless DC motor drive without current sensors. To compensate the commutation torque ripple completely, the duration of commutation must be known. The proposed method measures the duration of commutation from terminal voltage waveforms, calculates a PWM duty ratio to suppress the commutation torque ripple from the output of speed controller, and applies the calculated PWM duty ratio only during the commutation. Experimental results show that vibrations are considerably reduced when the proposed method is applied to the sensorless brushless DC motor drive for air-conditioner compressor.

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(BLDCM, Brushless DC Motor)를 120도 통전 방식으로 구동하면 상 전류가 전환되는 시점에서 전류 맥동이 필연적으로 발생된다. BLDCM에서 발생하는 토크는 상 전류에 비례하므로 상 전환에 의한 전류 맥동은 토크 맥동을 발생시킨다. 토크 맥동은 소음 및 진동의 주 원인으로, 상 전환으로 인한 토크 맥동은 BLDCM 드라이브에서 토크 맥동의 가장 큰 요인이 된다.^[1]

상 전환에 의한 토크 맥동 저감과 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔으나, 대부분의 제안된 토크 맥동 저감 기법들은 전류 센서를 사용하지 않는 저가형 센서리스 드라이브에 적용하기에는 적합하지 못하다.^[2] 본 논문에서는 전류 센서를 사용하지 않는 저가형 BLDCM 센서리스 드라이브에서 상 전환으로 인한 토크 맥동을 저감시킬 수 있는 새로운 제어 방법에 대해 제안한다. 상 전환에 의한 토크 맥동을 저감시키기 위해서는 상 전환 기간 동안 인버터의 PWM 시비율을 적절히 조절해 주어야 한다.^[3] 본 논문에서 제안하는 방식은 전동기 단자 전압 파형에서 상 전환 기간을 측정하고, 속도 제어기의 출력으로부터 토크 맥동을 최소화하기 위한 제어 입력을 구하고, 상 전환 기간동안 인버터의 PWM 시비율을 계산된 제어 입력에 의해 인가함으로써 토크 맥동을 최소화한다.

2. 토크 맥동 저감 알고리즘

2.1 토크 맥동 저감 알고리즘의 구성^[4]

그림 1은 일반적인 BLDCM 센서리스 드라이브 구성도이다. 120도 통전 방식에서는 3상중에서 2상만을 여자하므로 항상 1개의 상은 비여자 상태, 즉 오픈 상태가 된다. 그림 1에서 단자 전압 검출부는 오픈된 상의 단자 전압으로부터 회전자 위치를 간접적으로 검출하고, 제어부에서는 검출된 위치 정보를 이용하여 인버터 스위칭 소자들의 온-오프 제어를 수행한다. 그림 2는 120도 통전 방식의 BLDCM 구동장치에 사용되는 PWM 패턴들 중에서 후단부 유니폴라 PWM 패턴을 나타낸 것으로, 통전되는 120도 구간에서 후단 60도 구간에 해당하는 스위칭 소자만 스위칭을 행한다. 후단부 유니폴라 PWM 방식은 스위칭으로

인한 손실을 인버터를 구성하는 6개의 스위칭 소자에 균등하게 분배하는 특성이 있다. 본 논문에서는 후단부 유니폴라 PWM 패턴을 사용하는 경우에 한하여 상 전환에 의한 토크 맥동을 저감시키는 방법에 대해서 제안한다.

후단부 유니폴라 PWM 방식으로 구동되는 BLDCM 드라이브에서, U-V상 통전에서 U-W상 통전으로 전환되는 구간에서 전동기 및 인버터의 등가회로는 그림 3과 같다. 그림 3의 U-V 상 통전 구간에서 통전 상태인 U상 및 V상에 각각 인가되는 평균 상 전압 V_{m1} 은 다음과 같다.

$$V_{m1} = (V_{dc} \cdot D_1) / 2 \tag{1}$$

식 (1)에서 V_{dc} 는 인버터 직류 단 전압의 크기이고, D_1 은 PWM 펄스의 시비율이다. U-V상 통전에서 U-W상 통전으로 전환되는 과도 구간에서 비전환 상인 U상에 인가되는 평균 전압 V_{m2} 는 다음과 같다.

$$V_{m2} = V_{dc} \cdot (2D_2 - 1) / 3 - (E_u + E_v + E_w) / 3 \tag{2}$$

식 (2)에서 D_2 는 Q1에 인가되는 PWM 펄스 시비율이고, E_u, E_v, E_w 는 각 상의 역기전력이다. 식 (1)과 식 (2)로부터 2상 통전구간 및 상 전환구간에서 PWM 펄스의 시비율 D_1 과 D_2 가 동일하다면 상 전환에 의해 비전환상에 인가되는 평균전압이 V_{m1} 에서 V_{m2} 로 순간적으로 변동됨을 알 수 있다. 상 전환에 의한 평균 전압의 변동은 비전환상 전류에 맥동을 발생시킨다. 상 전환 구간에서 BLDCM의 발생 토크는 비전환상 전류에 비례하므로, 상 전환 구간에서 발생하는 전류 맥동은 토크 맥동을 발생시킨다.

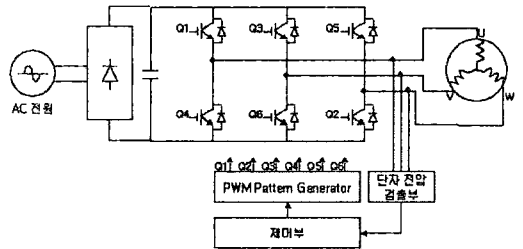


그림 1. BLDCM 센서리스 드라이브의 구성도

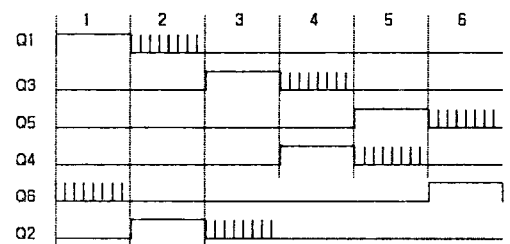


그림 2. 후단부 유니폴라 PWM 패턴

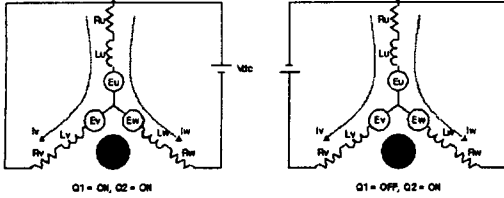


그림 3. U-V상에서 U-W상으로 전환될 때 등가 회로

상 전환에 의한 전류 맥동을 억제하기 위해서는 $V_{m1}=V_{m2}$ 가 되도록 상 전환구간에서 PWM 펄스의 시비율 D_2 를 다음과 같이 조절해 주어야 한다.

$$D_2 = 0.5 + 0.75 \cdot D_1 + (E_u + E_v + E_w) / 2 \cdot V_{dc} \quad (3)$$

BLDCM 드라이브에서 상 전환에 의한 토크 맥동을 저감하기 위한 제어기의 구성은 그림 4와 같다.

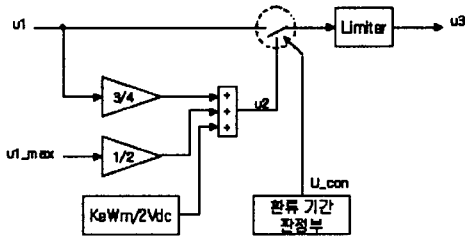


그림 4. 토크 맥동 저감 제어기의 구조

그림 4에서 u_1 은 속도 제어기의 출력이다. BLDCM 센서리스 드라이브에서는 제어 특성상 속도 제어기의 출력이 크게 변화하지 않기 때문에 전기각 60도 회전 구간동안 속도 제어기의 출력은 일정하다고 가정할 수 있다. 2상 통전 구간에서 인버터의 PWM 시비율은 u_1 에 의해 결정되고 상 전환이 시작되면 u_2 에 의해 결정된다. 상 전환 종료 시점 이전에 제어 입력 u_3 가 u_1 으로 변경되면 상 전환에 의한 전류 맥동을 완전히 보상할 수 없으며, 상 전환 종료 시점 이후에도 제어 입력 u_3 가 u_2 로 유지되면 과 보상에 의한 전류 맥동이 발생한다. 따라서 상 전환에 의한 토크 맥동을 저감시키기 위해서는 제어 입력 u_3 가 상 전환이 진행되는 기간에만 인버터에 인가 되도록 상 전환 시작 시점 및 종료 시점을 정확히 구해야 한다. 본 연구에서는 단자 전압 파형으로부터 상 전환 종료 시점을 검출하였다. 그림 5와 같은 단자 전압 검출 회로를 사용하고, 후단부 유니폴라 PWM 방식으로 BLDCM을 구동할 때 단자 전압 파형은 그림 6과 같다. 그림 6에서 상 전환 시작 이후 소호되는 상의 단자 전압은 소호 상전류가 환류하는 기간동안 V_{dc} 또는 0을 유지한다. 따라서 상 전환 시점 이후 단자 전압을 $V_{dc}/2$ 와 비교한 출력 파형(그림 6에서 붉은 색 파형)이 천이하는 시점을 측정하여 상 전환 구간을 구할 수 있다.

2.2 동기 전환^[4]

상 전환 시점에서 PWM 반송파와 새로 점호되는 스위치의 턴-온 시점이 비동기되는 경우 비전환상 평균 전압에 맥동을 발생시켜 전류 맥동을 발생시킨다. 이러한 전류 맥동을 저감시키기 위해서는 그림 7과 같이 PWM 반송파와 새로 점호되는 스위치의 턴-온 시점을 동기시켜야 한다. 본 논문에서는 상 전환 직전에 PWM 반송파의 주파수를 변경하여 새로 점호되는 스위치의 턴-온 시점을 PWM 반송파에 동기시켰다.

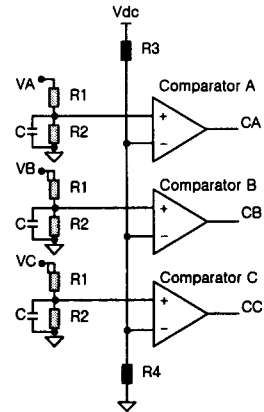


그림 5. 단자 전압 검출 회로의 구성

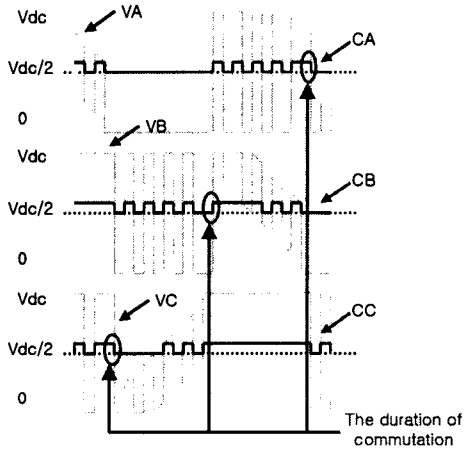


그림 6. 단자 전압 파형

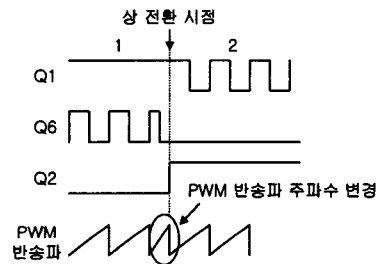


그림 7. 동기 전환

3. 실험 결과

에어컨 압축기 구동용 1.5kW급 4극 BLDCM 센서리스 드라이브에 본 논문에서 제안한 토크 맥동 저감 알고리즘을 적용하여 실험을 진행하였다. 인버터 PWM 주파수는 4kHz로 설정하였고, 220V 교류 전원을 정류하여 인버터 직류 전원으로 사용하였다.

그림 8은 토크 맥동 저감 알고리즘을 적용하지 않은 상태에서 BLDCM을 28Hz(기계각 주파수)로 운전하였을 때 단자 전압 및 상전류 파형이다. 상 전환으로 인해 전류 파형에 맥동이 발생됨을 알 수 있다. 그림 9는 제안한 토크 맥동 저감 알고리즘을 적용하였을 때의 단자 전압 및 상전류 파형으로, 그림 8의 경우에 비해 상 전환에 의한 전류 맥동이 크게 저감되었음을 확인할 수 있

다.

전동기에서 발생하는 토크 맥동은 진동 및 소음을 발생시키는 주된 요인으로, 특히 저속 운전 영역에서 큰 진동을 발생시킨다. 본 실험에서 사용한 압축기는 싱글로타리 타입으로 기계각 1회전당 압축과 흡입 행정을 수행하기 때문에 부하 변동이 심하여 저속에서 진동이 크게 발생한다. 본 연구에서 제안한 토크 맥동 저감 알고리즘의 진동 저감 특성을 확인하기 위하여 그림 10과 같이 압축기에 가속도 센서를 부착하여 압축기 운전시 발생하는 진동 가속도 파형을 측정하였다. 그림 11은 (a) 토크 맥동 저감 알고리즘을 사용하지 않고 비동기 전환을 적용한 경우, (b) 토크 맥동 저감 알고리즘을 사용하지 않고 동기 전환을 적용한 경우, (c) 토크 맥동 저감 알고리즘을 적용한 경우 30Hz의 속도로 압축기를 운전할 때 발생하는 진동 가속도를 측정한 결과 파형이다. (a)의 경우 3.89kHz 대역에서 22.93[m/s²]의 진동 가속도가 발생하였고, (b)의 경우 3.78kHz에서 20.46[m/s²]의 진동 가속도가 발생하였다. (b)의 경우 진동 가속도의 주파수 스펙트럼이 (a)의 경우와 서로 다르고, 진동 가속도의 최대값도 다소 줄었다. 상전환 직전에 PWM 반송파 주파수를 조절하여 동기 전환을 수행하므로 PWM 주파수가 4kHz로 고정되지 않고, 이로 인해 진동 가속도의 발생 주파수 영역이 (a)의 경우에 비해 넓게 분산된 것으로 사료된다. (c)의 경우 3.78kHz에서 6.11[m/s²]의 진동 가속도가 발생하였다. 토크 맥동 저감 알고리즘을 적용한 경우 진동 가속도가 크게 줄어들었음을 확인할 수 있다. 표 1은 22Hz에서 30Hz 운전 주파수 대역에서 측정한 진동 가속도의 최대값을 정리한 것이다.

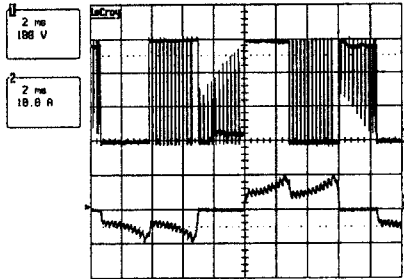


그림 8. 단자전압(1)과 상전류(2) 파형

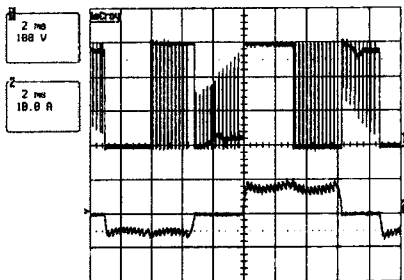


그림 9. 단자전압(1)과 상전류(2) 파형

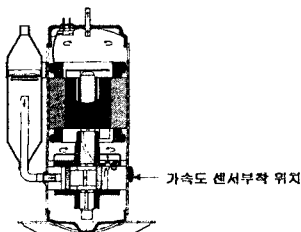


그림 10. BLDCM 구동 압축기

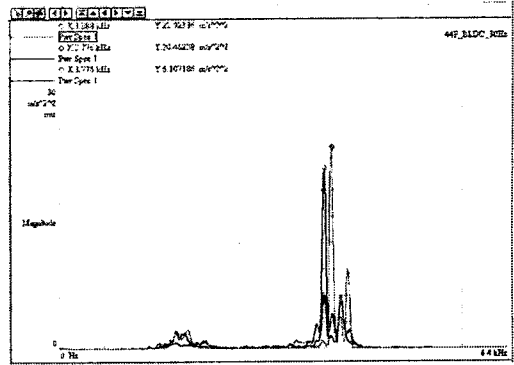


그림 11. 진동 가속도 측정 파형

- (a) 토크 맥동 저감 기법 비적용, 비동기 전환(Green)
- (b) 토크 맥동 저감 기법 비적용, 동기 전환(Blue)
- (c) 토크 맥동 저감 기법 적용(Red)

표 1. 진동 가속도 측정 결과

주파수 [Hz]	가속도 [m/s ²]			Dominant Frequency [kHz] Normal / Torque Con.	Torque Control / Normal [%]
	Normal	Synchronous	Torque Control		
22	13.39	10.05	4.97	3.92 / 3.82	37.12
24	15.38	7.73	4.35	3.90 / 4.01	28.28
26	25.65	8.08	4.71	3.90 / 3.84	18.36
28	20.49	5.00	3.26	3.89 / 3.98	15.91
30	22.93	20.46	6.11	3.89 / 3.78	26.65

4. 결 론

본 논문에서는 전류 센서를 사용하지 않는 저가형 센서리스 BLDCM 구동 장치에 적용할 수 있는 새로운 토크 맥동 저감 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방식은 속도 제어기의 출력으로부터 상전환으로 인한 전류 맥동을 최소화 할 수 있는 제어 입력을 구하고, 단자 전압 파형으로부터 상전환 기간을 측정하여 상전환 기간에만 계산된 제어 입력을 인버터에 인가한다. 제안된 토크 맥동 저감 알고리즘을 에어컨 압축기 구동용 BLDCM 구동 장치에 적용하여 실험을 진행하였고, 상전환으로 인한 전류 맥동 및 압축기에서 발생하는 진동이 크게 저감되었음을 실험을 통하여 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Carlson, et. al., "Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless DC Machines", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 28, no. 3, pp. 632-638, May/June 1992.
- [2] Thomas M. Jahns, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives - A Review". IEEE Trans. on Ind. Elec., vol. 48, no. 2, pp. 321-330, April 1996.
- [3] 이광운, "구형파 전류 여자 브러시리스 직류전동기의 토크 맥동 저감에 관한 연구", 고려대학교 공학박사 학위논문, 1999년 7월.
- [4] 여형기, "브러시리스 직류전동기용 센서리스 드라이브 시스템 개발에 관한 연구", 고려대학교 공학박사 학위논문, 1998년 7월.