

선간 전압을 이용한 BLDC 모터의 센서리스 구동

Sensorless Drive of the BLDC Motor using a Line Voltage Difference

김 태 연, 유 준*

(Tae-Yeon Kim¹ and Joon Lyoo¹)

¹Dept. of Electronics Eng., Chungnam National University

Abstract: In recent years, sensorless drive schemes have been proposed widely and most of them are based on the ZCP (Zero Crossing Point) detection of the BEMF (Back Electro-Motive Force). These schemes have two main problems. One is that ZCP may not be detected at low speed and thus a forced drive is required. The other problem is that there is 30° phase difference between ZCP and the motor commutation instant and to ensure proper operation, this gap should be accounted for. To solve these problems a circuit is devised for detecting ZCP of the BEMF difference through the line voltage difference. Experimental results show that the output of this circuit is identical to that of the Hall sensor signal, and velocity control of a BLDC motor is possible without the sensor.

Keywords: BLDC motor, sensorless drive, zero-crossing, BEMF, line voltage difference

I. 서론

기존의 DC 모터와 달리 BLDC (Brushless DC) 모터는 구조적으로 영구자석인 회전자와 전자석인 고정자로 구성되어 정류자가 필요하지 않으므로 수명이 길고 유지보수가 간단하며 소형·경량화가 가능하다. 또한, 선형적인 토크 대 전류, 속도 대 전압 특성을 지니므로 가변속 운전 및 제어가 용이하고 토크 대 관성의 비가 높아 소형으로 고출력을 얻을 수 있으며 넓은 운전 영역에 걸쳐 높은 효율을 유지할 수 있는 장점이 있다. 이러한 BLDC 모터는 구동을 위해 반드시 회전자의 위치 정보가 요구되고 이를 위해 일반적으로 홀센서, 엔코더 및 레졸버와 같은 센서가 사용된다. 하지만 센서의 사용은 시스템의 가격을 상승시키고 부피를 증가시킬 뿐 만 아니라 신뢰성 저하 및 사용환경 제약과 같은 여러 가지 문제를 유발하게 된다. 이에 따라 최근 회전자 위치검출 센서 없이 BLDC 모터를 구동하는 센서리스 구동 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

센서리스 구동 방법은 크게 하드웨어 기반 방법[1]과 소프트웨어 기반 방법[2]으로 나눌 수 있다. 이 중 하드웨어 기반 방법은 대부분 BLDC 모터의 각 상(phase)에 포함되어 있는 역기전력 및 이의 영교차(zero crossing) 시점을 직접 혹은 간접적으로 추출하기 위한 회로를 이용한다. 이러한 방법은 소프트웨어 기반 방법에 비해 비교적 간단하지만 상 역기전력의 영교차 시점과 상 전류의 정류 시점(commutation instant) 사이의 위상 차이로 인한 문제가 발생한다.

본 논문에서는 BLDC 모터의 센서리스 구동을 위해 선간 전압을 이용한 방법을 제안한다. 상 역기전력과 달리 상

간 역기전력의 영교차 시점은 BLDC 모터의 정류 시점과 정확히 일치하므로 이를 검출하기 위한 회로를 구성하였고 실험을 통하여 제안된 회로의 출력이 홀 센서 출력과 일치하며 센서리스 구동을 위해 응용될 수 있음을 입증하였다.

II. 센서리스 구동을 위한 역기전력 영교차 시점

그림 1은 일반적인 Y-결선 3상 BLDC 모터 및 인버터 회로를 나타낸다. BLDC 모터는 인버터의 각 스위치에 의해 전기각 기준 60° 마다 상 전류가 전환되며 이에 따라 총 6번의 정류에 의해 전기각 기준 1회전 하게 된다. 또한, 항상 두 상이 여자되고 나머지 한 상은 여자되지 않으므로써 각 상은 전기각 기준 120° 구간동안 통전된다. 그림 2는 이러한 방식에 따라 구동되는 BLDC 모터의 상 역기전력 및 전류 파형을 나타낸다[3].

기존 연구에서 주로 이용되었던 상 역기전력의 영교차 시점은 그림 2와 같이 정류 시점에 비해 전기각 기준 30° 앞서 있다. 하지만 그림 3과 같이 상간 역기전력의 영교차 시점은 전류 전환 시점과 정확히 일치하게 되므로 본 논문에서는 이를 검출하기 위한 방법 및 회로를 구성하였다.

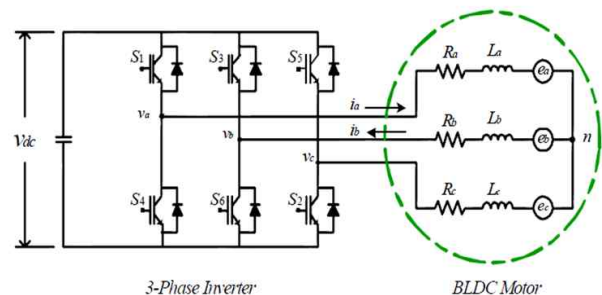


그림 1. 3상 BLDC 모터 및 인버터 회로.
Fig. 1. 3-phase BLDC motor and inverter.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received March 8, 2013 / revised April 1, 2013 / accepted April 23, 2013

김태연, 유 준: 충남대학교 전자공학과
(lst676@cnu.ac.kr/jlyou@cnu.ac.kr)

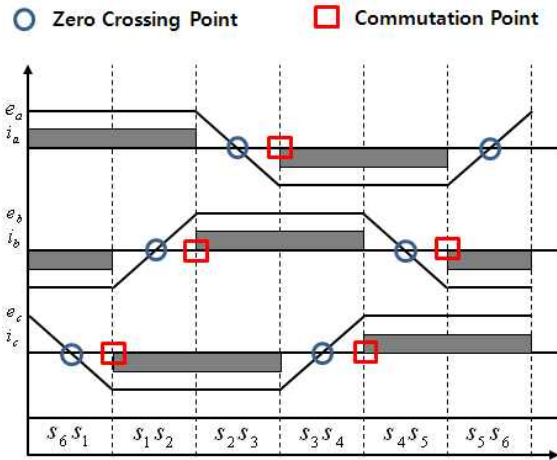


그림 2. 상 역기전력 및 전류 파형.
Fig. 2. BEMF and current waveform of each phase.

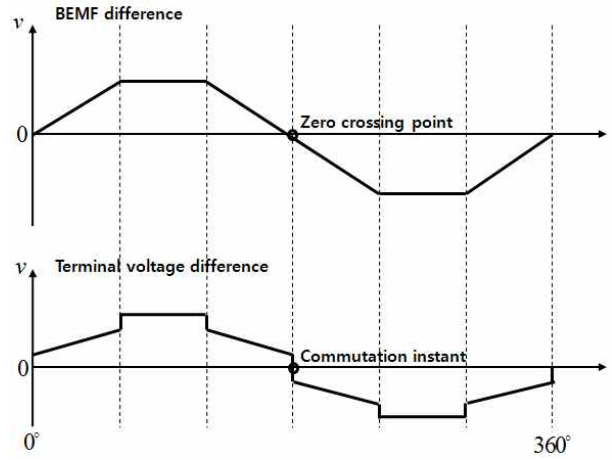


그림 4. 상간 역기전력 및 선간 전압 파형.
Fig. 4. BEMF difference and line voltage difference.

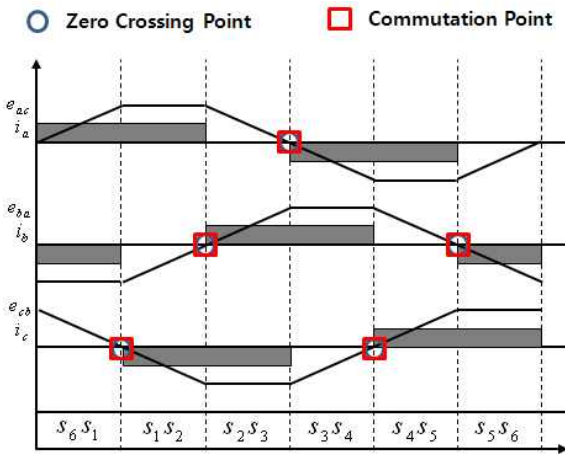


그림 3. 상간 역기전력 및 전류 파형.
Fig. 3. BEMF difference and current waveform.

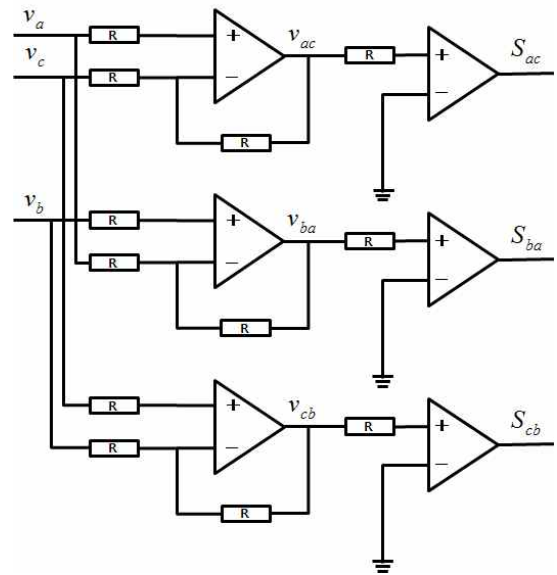


그림 5. 제안된 상간 역기전력 영교차점 검출 회로.
Fig. 5. Proposed ZCP of the BEMF difference detection circuit.

III. 제안된 역기전력 검출 방법 및 속도 제어

1. 선간 전압을 이용한 검출 방법

3상 BLDC 모터의 전압 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다. 여기서 v_a, v_b, v_c 는 단자 전압, i_a, i_b, i_c 는 상 전류, e_a, e_b, e_c 는 상 역기전력을 나타내며 R 은 전기자 저항, L 은 전기자 인덕턴스, v_n 은 중성점 전압이다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)로부터 선간 전압 방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 v_{ba}, v_{cb}, v_{ac} 는 선간 전압, i_{ba}, i_{cb}, i_{ac} 는 상간 전류, e_{ac}, e_{ba}, e_{cb} 는 상간 역기전력이고 각 첨자는 두 상의 차이를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} v_{ac} \\ v_{ba} \\ v_{cb} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{ac} \\ i_{ba} \\ i_{cb} \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ac} \\ i_{ba} \\ i_{cb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ac} \\ e_{ba} \\ e_{cb} \end{bmatrix} \quad (2)$$

한편, BLDC 모터의 정류 방법에 의하여 각 상은 a, c, b 상 순서로 여자되지 않으며 이 때 선간 전압 v_{ac} 는 연속된 비여자 구간에서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{ac} = \begin{cases} -Ri_c + e_{ac} & (a \text{ is floating}) \\ Ri_a + e_{ac} & (c \text{ is floating}) \end{cases} \quad (3)$$

위 식에서 선간 전압은 비여자 구간에서 영 교차되는 상간 역기전력을 포함하고 있으며 이러한 상간 역기전력과 선간 전압의 파형은 그림 4와 같다.

그리고 BLDC 모터의 정류 시점과 일치하는 상간 역기전력의 영교차 시점은 선간 전압의 영교차 시점과 일치하므로 그림 5와 같은 회로를 이용하여 검출할 수 있다.

2. 센서리스 속도 제어

BLDC 모터의 속도 제어는 전자적인 정류를 수행해야 한다는 점을 제외하고 DC 모터의 속도 제어와 같으므로

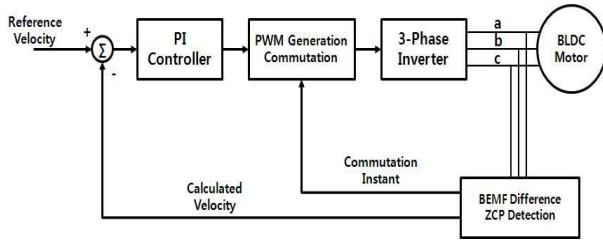


그림 6. BLDC 모터 센서리스 속도 제어시스템.
Fig. 6. BLDC motor sensorless velocity control system.

식 (1)의 전압 방정식과 다음 식 (4)의 회전운동 방정식을 바탕으로 제어를 설계할 수 있다.

$$T_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega \quad (4)$$

여기서 T_m 는 토크, J 는 관성모멘트, B 는 점성마찰계수, ω 는 회전 속도를 나타낸다. 그리고 식 (1)의 역기전력과 식 (4)의 토크는 역기전력 상수 k_e 와 토크 상수 k_t 를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e = k_e \omega, \quad T_m = k_t i \quad (5)$$

이와 같은 모델을 기반으로 본 논문에서는 PI (Proportional Integral) 제어를 설계하였으며 전체 센서리스 속도 제어 시스템은 그림 6과 같이 구성하였다.

IV. 실험 방법 및 결과 분석

1. 실험장치 구성

제안된 선간 전압을 이용한 BLDC 모터의 센서리스 구동 기법의 성능을 검증하기 위해 그림 7과 같은 장치를 구성하였다.

위 장치는 정류 시점 비교를 위해 제안된 회로와 기존 역기전력 검출 회로를 포함하고 있다. 그리고 3상 인버터로 ST Micro사의 L6234 IC를 이용하였으며 센서리스 구동 및 속도 제어를 위해 ST Micro사의 STM32F103R8 ARM Cortex-M3 마이크로프로세서를 이용하였다.

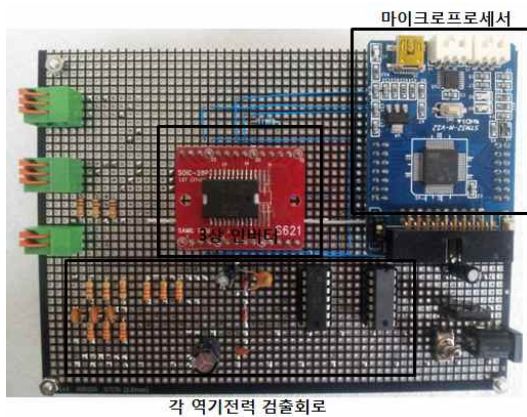
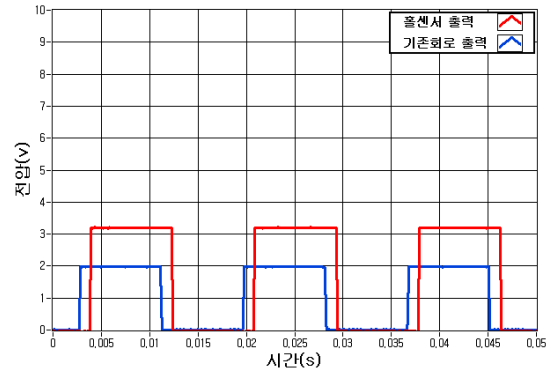
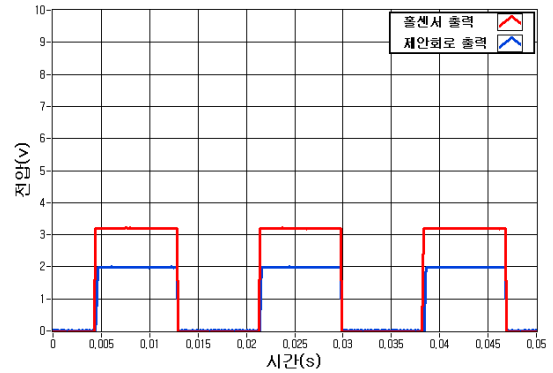


그림 7. 센서리스 구동 및 속도 제어 실험 장치.
Fig. 7. Experimental setup for sensorless drive and velocity control.



(a) Conventional circuit.



(b) Suggested circuit.

그림 8. 출력.

Fig. 8. Outputs.

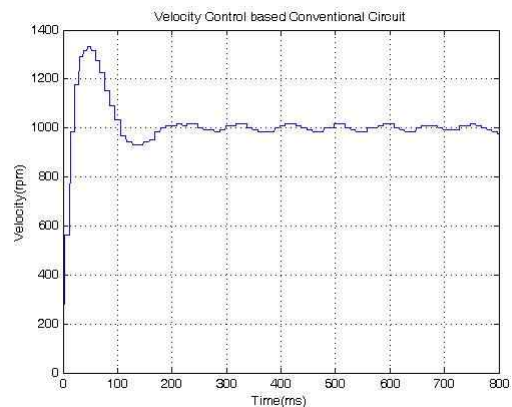
2. 정류 시점 비교 결과

먼저 정류 시점 비교를 위해 기존 회로와 제안된 회로를 이용하여 BLDC 모터의 센서리스 구동을 수행하고 각 회로의 출력을 기준이 되는 홀센서 출력과 비교하였다.

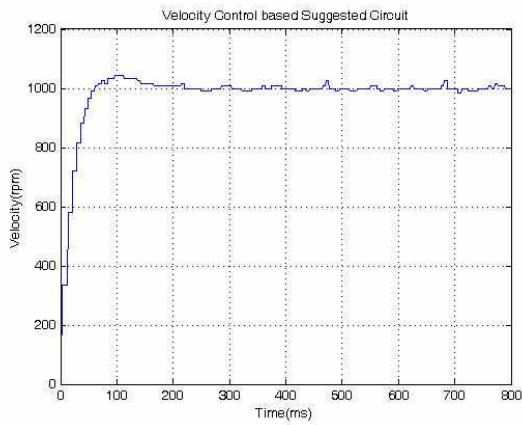
위 그림 8에서 보듯이, 기존 회로의 출력은 홀센서 출력에 비하여 전기각 기준 30° 앞서 있지만 제안된 회로의 출력은 정확히 일치함을 보인다.

3. 속도 제어 성능 비교 결과

다음으로 각각의 회로를 이용하여 BLDC 모터의 센서리스 구동을 기반으로 동일한 PI 제어를 설계하였고 기준 속도 1000rpm에 대한 속도 제어 성능을 비교하였다.



(a) Conventional circuit.



(b) Suggested circuit.

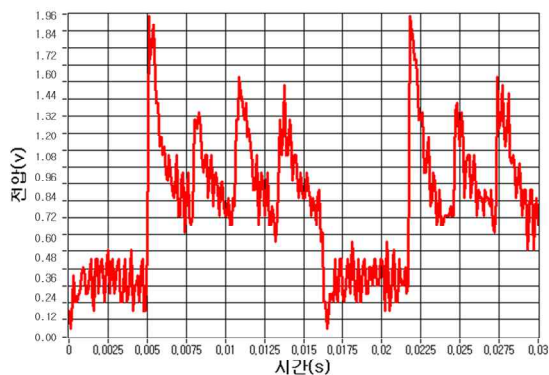
그림 9. 속도 계단응답.

Fig. 9. Velocity step responses.

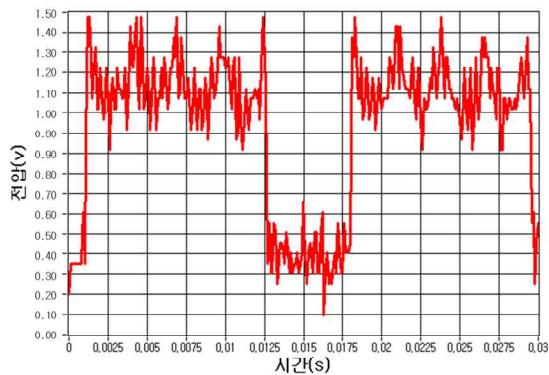
위 그림에서 보듯이 기존 회로에 기반한 제어의 경우 정상상태 오차가 $\pm 50\text{rpm}$ 정도였으나 제안된 회로에 기반한 제어의 경우 정상상태 오차가 $\pm 20\text{rpm}$ 정도였으며 이는 정류 시점의 위상 차이에 의해 발생한 결과이다. 또한, 기존 회로는 일정속도까지 강제적으로 구동해야 하므로 과도상태의 오차가 비교적 크다.

4. 상 전류 변화 비교 결과

다음으로 각각의 회로를 이용하여 속도 제어 시 발생하



(a) Conventional circuit.



(b) Suggested circuit.

그림 10. 상전류.

Fig. 10. Phase currents.

는 상 전류의 변화를 비교하였다. 3상 인버터 각 상의 하단 트랜지스터에 1Ω 저항을 삽입하고 인가되는 전압을 측정함으로써 상 전류를 계산하였다.

위 그림에서 보듯이 기존 회로를 이용한 모터의 상 전류는 전류 전환 시 약 1.96A의 돌입전류가 발생하였고 통전 구간에서 $\pm 0.3\text{A}$ 의 전류 맥동이 발생하였다. 그러나 제안된 회로를 이용한 모터의 상 전류는 전류 전환 시 약 1.5A의 돌입전류가 발생하였고 통전 구간에서 $\pm 0.2\text{A}$ 의 전류 맥동이 발생하였다. 이 역시 정류 시점의 위상 차이의 의해 발생한 결과이며 이러한 전류의 변화는 곧 토크의 변화와 같다고 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 BLDC 모터의 센서리스 구동을 위해 선간 전압을 이용한 방법을 제안하였다. 상 역기전력과 달리 상간 역기전력의 영교차 시점은 BLDC 모터의 정류 시점과 정확히 일치하므로 이를 검출하기 위해 차동증폭기와 비교기로 구성된 회로를 구성하였고 실험을 통하여 제안된 회로의 출력이 기준인 홀센서 출력과 같음을 입증하였다. 그리고 BLDC 모터의 센서리스 구동 시 정류 시점이 미치는 영향을 보이기 위해 기존의 역기전력 검출 회로와 제안된 회로를 기반으로 각각 속도 제어 시스템을 구성하였고 제어 성능과 상 전류 변화를 비교하였으며 결과적으로 정류 시점의 위상 차이가 속도 제어 시 정상상태 오차를 유발시키고 정류 전환 시 돌입 전류를 크게 할 뿐 만 아니라 맥동을 발생시킴을 확인하였다. 추후 제안된 기법 및 장치를 무인항공기에 적용하여 실험을 수행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] T. H. Kim and M. Ehasani, "Sensorless control of the BLDC motors from near-zero to high speeds," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 6, pp. 1635-1645, 2004.
- [2] T. S. Kim, B. G. Park, D. M. Lee, J. S. Ryu, and D. S. Hyun, "A new approach to sensorless control method for brushless DC motors," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 477-487, Oct. 2008.
- [3] J. H. Song, J. S. Jang, and B. T. Kim, "Reduction of torque ripple in a BLDC motor using an improved voltage control," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 2, pp. 145-150, Feb. 2010.



김 태 연

2006년 충남대 전자공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 석·박사 통합과정 재학. 관심분야는 쿼드콥터헬리콥터 비행 제어, 관성센서신호처리.

**유준**

1978년 서울대 전자공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사. 1984년 동 대학원 박사. 1984년~현재 충남대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 산업공정제어, 센서 신호처리, IT기반로봇, 항법시스템.