

선루프용 BLDC 전동기 홀센서 위치 오차 보상 기법

Position Error Compensation Method of Hall Sensors for Sunroof System using BLDC Motor

안 정 열*
(Jeong-Yeol An)

Abstract - This papers propose a Hall-effect sensors position error compensation method in a sunroof system using a BLDC motor with a low-cost MCU. If the BLDC motor is controlled with this wrong position, the torque ripple and operating current can be increased and the average torque also decreases. Generally, sunroof system has characteristics that operate at constant load for several seconds. It is possible to find the minimum operating current value while changing the position of the Hall-effect sensor during the sunroof operation by using these characteristics. Therefore, propose a method to change the Hall-effect sensor position and find the minimum current value. The validity of the proposed algorithm is verified through experiments..

Key Words : Sunroof system, BLDC motor, Hall-effect sensor

1. 서 론

차량의 선루프 시스템은 내부 환기 및 개방감 등 여러 가지 이유로 적용률이 매년 증가 하고 있는 추세이다. 종류로는 크게 일반선루프와 파노라마 선루프로 나눌 수 있다. 이러한 선루프 시스템의 구동원으로 DC 전동기가 사용되고 있는데, 이유는 기계적 구조로 인해 최대 토크 운전이 용이하고 별도의 제어회로가 필요 없어 경제적이기 때문이다. 하지만 브러쉬와 정류자간의 마찰에 의한 기계적/전기적 소음에 의해 작동감과 내구성이 떨어지고 전자파 발생에 의한 EMC에 취약한 문제점이 있다. 또한, 차량의 고급화에 따라 내부로 유입되는 소음이 적고 선루프 전동기의 위치가 운전자 및 탑승자 머리위에 있기 때문에 DC 전동기의 동작 소음은 더욱더 문제가 되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 BLDC(Brush-Less DC) 전동기를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. BLDC 전동기는 브러쉬를 삭제해 브러쉬와 정류자의 마모로 인한 단점을 보완한 전동기이다[1, 2].

BLDC 전동기의 구동을 위해서는 회전자 위치 센서가 반드시 필요하다. 하지만 선루프 전동기의 구조로 인해 홀센서와 전동기가 결합되는 과정 및 제조과정에서 홀센서 장착위치 오차가 발생해 BLDC전동기의 역기전력과 상전류의 위상차에 의한 전류리플과 토크리플을 발생시켜, 결과적으로 진동과 소음에 악영향을 끼치게 된다[3-8].

또한 선루프시스템에서는 각 상간의 홀센서 위치 틀어짐

보다는 장착과정에서 구조적인 문제로 인해 전체상의 위치 틀어짐 문제가 많이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 여러 가지 방법이 제안되었으나 계산이 복잡해 저가형 MCU를 사용한 선루프시스템에는 부적합하다. 또한, 선루프 시스템은 전동기의 정/역 운전을 동시에 요하는 특성 때문에 전동기의 방향전환에 빠르게 대응할 수 있는 기법이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 홀센서 위치 오차에 따른 전류가 증가하는 현상과 동작부하가 일정한 선루프 시스템의 특성을 이용하여 선루프가 최초 6초~8초의 초기화 모드로 동작 시 BLDC 전동기 PWM인가 시점을 순차적으로 변경하여 전류값이 최소인 지점을 찾아 운전하는 저가형 MCU에 적용 가능한 최적의 홀센서 위치오차 보상기법을 제안하고 실험을 통해 검증한다.

2. BLDC 전동기 모델링 및 위치오차 영향

2.1 BLDC 전동기 모델링

BLDC 전동기의 상변수를 사용한 3상 고정자 권선의 전압 방정식은 다음 식과 같이 표현할 수 있다[9].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, R_s : 고정자의 상저항

L_s : 자기 인덕턴스

M : 상호 인덕턴스

e_a, e_b, e_c : 역기전력

$i_a + i_b + i_c = 0$, $M(i_a + i_b) = -M \cdot i_c$ 라 하면 식 (2)와 같이 나

* Corresponding Author : Dept. Electrical and Electronic Engineering, Ulsan College, Korea

E-mail : jyan@uc.ac.kr

접수일자 : 2017년 3월 2일

수정일자 : 2017년 5월 19일

최종완료 : 2017년 5월 26일

타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_S \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_S \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

또한 BLDC 전동기에서 발생하는 토크식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (3)$$

여기서, ω_m 은 BLDC 전동기의 기계적인 속도이다.

그림 1은 PWM 인버터 및 BLDC 전동기의 등가회로를 나타낸 것이다.

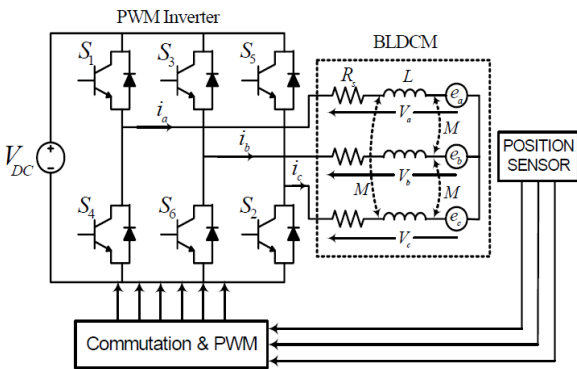


그림 1 PWM 인버터 및 BLDC 전동기 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of inverter and BLDC motor

2.2 홀센서 위치오차 영향

BLDC전동기는 식 (3)과 같이 각상의 전류 및 각상의 역기전력의 위상차가 없을 때 최소 전류로 최대 토크가 발생하게 된다. 따라서, 홀센서를 사용한 BLDC 전동기형 선루프시스템에서 홀센서의 위치오차는 정확한 시점에 정류신호를 인가하지 못하게 하여 전류와 역기전력의 위상차가 발생하게 된다. 따라서 평균 토크 출력 감소 및 평균 백동이 증가하여 소음이 증가하게 되고 전체 시스템 효율이 감소하게 된다. 홀센서의 전기적 각도 θ_e 로 인하여 발행하게 되는 효율의 감소는 식 (4)와 같이 나타 낼 수 있다[10].

$$\eta = \frac{2ei + (\frac{3}{\pi})ei\theta_e^2}{2ei} \times 100[\%] \quad (4)$$

3. 제안한 홀센서 위치오차 보상 기법

3.1 BLDC형 선루프 전동기 홀센서 위치값 변경 방법

BLDC 전동기를 구동하기 위해 각상에 해당하는 3개의 홀센서가 필요하며 60° 간격으로 6개의 섹터로 나뉘게 된다. 홀센서의 출력신호에 의해 MCU는 각상에 해당하는 정

류신호를 인가해 BLDC 전동기를 구동하게 된다.

BLDC 전동기형 선루프가 초기기동 시 홀센서의 위치오차가 정상적인 위치에서 위상이 앞서는지 뒤지는지 알 수 없다. 따라서 현재위치에서 획득하는 홀센서의 위치정보를 앞당기거나 지연시키는 방법이 필요하다. 그림 2는 홀센서 위치 정보를 지연시키는 방법을 나타낸 것이다.

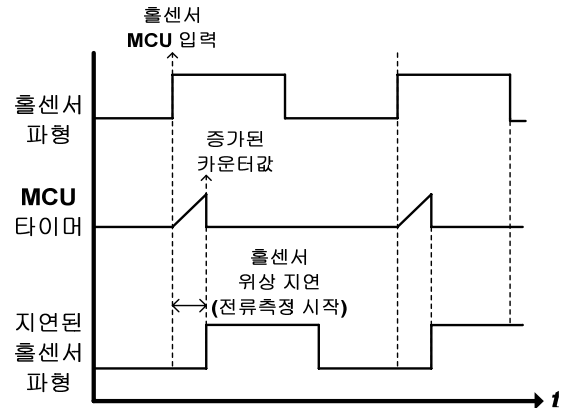


그림 2 홀센서 위치정보 지연 방법(-Delay)
Fig. 2 -Delay method of position sensor information

홀센서 출력신호가 MCU로 입력되면 바로 정류신호를 출력하지 않고 위상지연에 해당하는 내부 타이머 카운터값을 증가시키면서 입력된 홀센서 정보를 지연시키게 된다. 지연된 홀센서 정보를 이용해 BLDC 전동기를 구동한다.

홀센서의 위치정보를 앞당기는 방법은 MCU가 홀센서의 출력신호를 획득하기 전에 정류신호 인가시점을 결정하여야 하므로 6개의 섹터를 각각 60°를 앞당겨 인가하여 구현한다. 표 1은 홀센서 입력정보를 앞당기는 방법을 표로 나타낸 것이다.

표 1 홀센서 위치정보 변경 테이블(+Delay)

Table 1 +Delay table of position sensor information

기본 섹터순서			
섹터	Hall A	Hall B	Hall C
1	0	0	1
2	0	1	1
3	0	1	0
4	1	1	0
5	1	0	0
6	1	0	1
변경된 섹터순서			
섹터	Hall A	Hall B	Hall C
2	0	1	1
3	0	1	0
4	1	1	0
5	1	0	0
6	1	0	1
1	0	0	1

3.2 전류값을 이용한 홀센서 위치오차 보상 기법

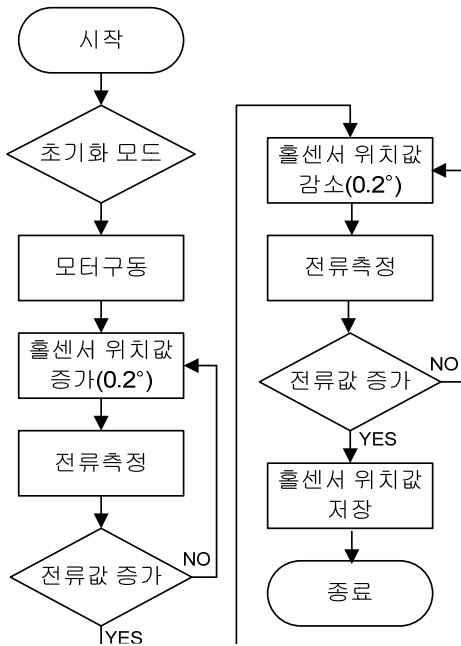


그림 3 홀센서 위치오차 보상기법 순서도

Fig. 3 Flow chart of position error compensation method of hall sensors

선루프시스템은 제조과정에서 발생하는 기구적인 오차로 인해 제품마다 열림 및 닫힘 스트로크값에 편차가 존재하며, 계절에 따른 외부온도변화로 인해 전체 스트로크값이 변하게 된다. 따라서 초기화 동작을 통해 이러한 오차를 보상하게 된다. 본 논문에서 사용하는 선루프의 최대 열림 스트로크는 300[mm]이며 입력전압이 12[V]일 때 닫힘 상태에서 완전히 열리는데 6초의 시간이 소비된다. 따라서 외부 스위치 박스에서 선루프시스템 제어기로 열림신호가 입력되면 12[V]의 전압이 BLDC전동기에 인가되고 6초 이내에 홀센서의 위상을 기준위치에서 0.2°씩 변경해 최소 전류값을 찾아 홀센서의 위치 오차를 보상하게 된다. 그림 3은 최소 전류값을 이용한 홀센서 위치오차 보상기법의 순서도를 나타낸 것이다.

초기화 모드 진입조건은 제품마다 다르나 본 논문에서 사용하는 선루프시스템은 닫힘 버튼을 5초 이상 인가하면 초기화 모드로 진입한다. 홀센서의 위치값을 0° 기준으로 0.2°씩 변화시키면서 전류값을 측정한다. 이때 전류값이 증가하게 되면 홀센서의 위치값을 감소시키고 전류값이 감소하면 홀센서의 위치값을 계속 증가시킨다. 다시 전류값이 증가하게 되면 측정을 종료하고 최종 홀센서의 위치값인 타이머/카운터값을 MCU내부 ROM에 저장한다.

4. 실험결과

위치오차를 갖는 홀센서가 설치된 선루프용 3상 BLDC 전동기에 대해 본 논문에서 제안한 오차 보상 알고리즘을 그림 4와 같이 구성하여 적용하였다. 홀센서의 위치오차는 +20°이며 0.2°씩 홀센서 위치를 변경하였다. BLDC 전동기

의 동작은 외부 스위치 박스 신호에 의해 결정된다. 제안한 홀센서 위치 오차 보상 알고리즘은 8비트 MCU를 사용하여 구현하였으며 BLDC 전동기 상수는 표 2와 같다.

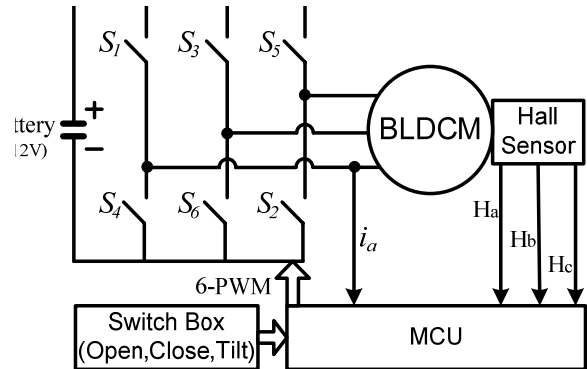


그림 4 전체 시스템 구성도

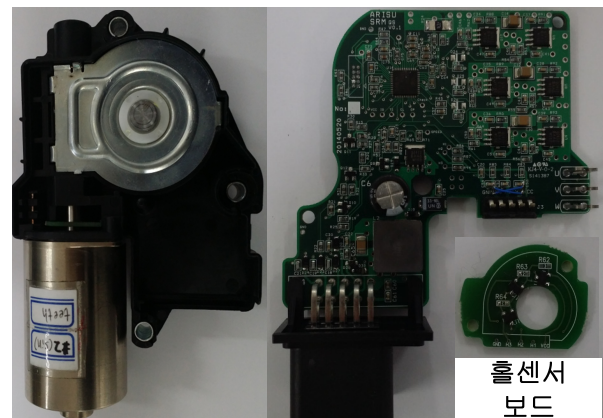
Fig. 4 Configuration of system block diagram

표 2 BLDC 전동기 상수

Table 2 Parameters of BLDC motor

극수	4극
정격출력	60[W]
정격전압	12[V]
최대속도	3000[RPM]
고정자 저항	0.115[Ω]
고정자 인덕턴스	0.109[mH]
역기전력 상수	1.3[V/kRPM]

그림 5는 본 논문에서 사용한 BLDC 전동기와 제어기 사진을 나타내었다. 홀센서 보드는 전동기와 제어기 결합시 커넥터에 의해 체결된다.



(a) BLDC전동기

(b) 제어기

그림 5 BLDC전동기 및 제어기사진

(a) BLDC motor (b) Controller

Fig. 5 Photo of BLDC motor and controller



(a) 파노라마 선루프 (b) BLDC 전동기/제어기

그림 6 파노라마 선루프 및 BLDC 전동기/제어기 장착사진
(a) Panorama sunroof (b)BLDC motor/controller

Fig. 6 Photo of panorama sunroof and BLDC motor/controller

그림 6은 본 논문에서 사용된 파노라마 선루프와 장착된 BLDC전동기/제어기 사진이다. 파노라마 선루프는 폴블라인드와 글라스를 동작하기 위해 2개의 전동기와 제어기가 장착되는데 본 논문에서는 글라스를 움직이는 전동기와 제어기에 알고리즘을 적용하였다.

그림 7은 홀센서가 20° 앞서 입력되는 경우 알고리즘 적용시 입력 DC전압을 포함한 A상 역기전력 및 A상전류 파형이다. 실제 홀센서 출력신호에서 -20° 지연 후에 정류신호가 인가되어 역기전력과 전류가 동상이 되는 것을 확인 할 수 있다.

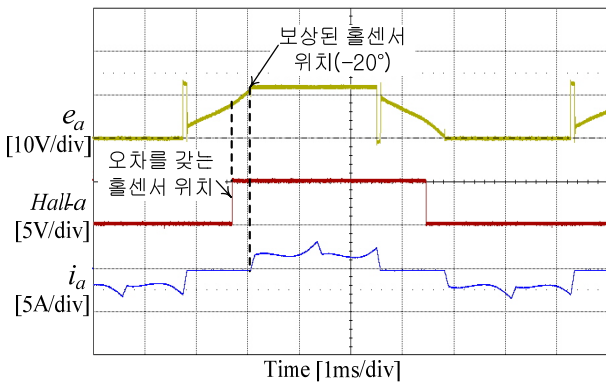


그림 7 -Delay 위치오차 보상 파형
Fig. 7 Waveform of -delay position error compensation

그림 8은 홀센서가 20° 뒤에 입력되는 경우 알고리즘 적용시 입력 DC전압을 포함한 A상 역기전력 및 A상전류 파형이다. 실제 홀센서 출력신호에서 +20° 앞에 정류신호가 인가되어 역기전력과 전류가 동상이 되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 9는 홀센서 위치오차가 20° 인 선루프가 완전히 닫힘 상태에서 초기화 모드로 진입 후 제시한 알고리즘을 적용하여 완전히 열릴 때 까지 BLDC 전동기의 A상 전류를 나타낸 파형이다. 알고리즘 적용시점부터 전류는 감소하다가 최소 전류시점을 지나면 다시 증가한다. 그 후 최소 전류 시점에서 전류가 증가하기 전의 홀센서 위치값을 MCU의 ROM

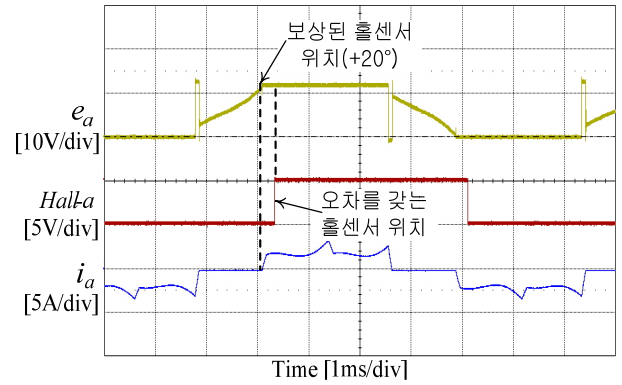


그림 8 +Delay 위치오차 보상 파형
Fig. 8 Waveform of +delay position error compensation

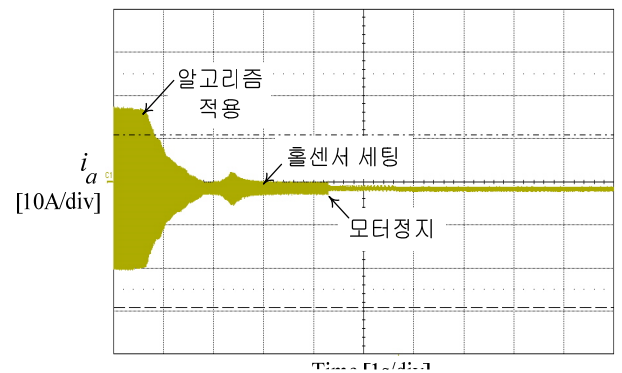


그림 9 알고리즘 적용시 A상 전류파형
Fig. 9 Current wave form of using algorithm

에 저장하게 되고 그 값을 이용해 선루프가 완전히 열려 멈출 때 까지 최소 전류로 동작하는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 3상 BLDC전동기를 사용한 파노라마 선루프시스템에서 저가형 MCU에 적용이 가능한 홀센서 위치오차 보상 알고리즘을 제안하였다. 홀센서 설치 오차로 인해 정확한 위치에서 정류신호가 인가되지 않으면 토크의 맥동 및 전류가 증가하여 효율이 감소하고 소음을 증가시킨다. 제안한 알고리즘은 기준위치에서 홀센서의 위치정보를 0.2° 씩 변경해 최소전류 동작점을 찾아 위치오차를 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 구현이 간단하고 위치 오차 보상을 위한 추가적인 하드웨어가 요구되지 않으므로 팬전동기와 같이 일정한 부하로 동작하는 저가형 시스템 적용에 용이하다. 제안한 알고리즘은 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

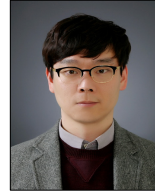
감사의 글

이 논문은 2015년도 울산과학대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

- [1] J. R. Hendershot Jr and TJE Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Oxford Univ. Press, 1994.
- [2] T. J. E Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives", Clarendon Press, Oxford 1989.
- [3] Alaeinovin P., Chiniforoosh S. and Jatskevich J., "Evaluating Misalignment of Hall Sensors in Brushless DC Motors," *IEEE Electric Power Conference*, pp. 1-6, 2008.
- [4] Alaeinovin P., and Jatskevich J., "Filtering of Hall-Sensor Signal for Improved Operation of Brushless DC Motors," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 27, issue 2, pp. 547-549, 2012.
- [5] Alaeinovin P., and Jatskevich J., "Hall-Sensor Signals Filtering for Improved Operation of Brushless DC Motor," *IEEE ISIE*, pp. 613-618, 2011.
- [6] Samoylenko N., Qiang Han, and Jatskevich J., "Dynamic Performance of Brushless DC Motors with Unbalance Hall Sensors," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 23, issue 3, pp. 752-763, 2008.
- [7] Sam-young kim, Chinchul Choi, Kyeonjin Lee, and Wootaik Lee, "An Improved Rotor Position Estimation with Vestor Tracking Observer in PMSM Drives with Low Resolution Hall-Effect Sensors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 53, issue 9, pp. 4078-4086, 2011.
- [8] F. Giulii Capponi, G. De Donato, L. Delferraro, O. Honorati, M. C. Harke, and R. D. Lorenz, "AC Brushless Drive with Low-Resolution Hall-Effect Sensors for Surface-Mounted PM Machines," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 42, no. 2, pp. 526-535, 2006.
- [9] P Pillay and R Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part I The brushless dc motor drive", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol 25, no 2, pp. 274-279, March/April 1989.
- [10] Tae Hyung Kim, Ehsani M, "An error analysis of the sensorless position estimation for BLDC motors," *Industry Applications Conference*, vol 1, pp. 611-617, 2003.

저 자 소 개



안 정 열 (Jeong-Yeol An)

1976년 11월 8일 생. 2002년 원광대 전기 전자공학부 졸업. 2004년 울산대 대학원 전기전자정보시스템공학부 졸업(석사). 2009년 동 대학원 졸업(공박). 2009년~2015년 동희홀딩스 전장사업실 책임연구원. 2015년~현재 울산과학대학교 전기전자공학부 조교수