

보조 공기 압축기 내 BLDC전동기의 위치센서 오류 보상 제어

A Study on the Control to Compensate Position Sensor Error of the BLDC Motor in an Auxiliary Air Compressor

김 인 건* · 홍 현 석* · 이 주*
 (In-Gun Kim · Hyun-Seok Hong · Ju Lee)

Abstract - Auxiliary air compressor(ACM) applied to railroad cars is a device which controls amount of compressed air in order that pantographs can be mounted correctly on the roof of an electric train. Existing ACMs consist of dc motors and brushes wear out due to friction with a commutator. Therefore, continuous maintenance is required. However, three phase BLDC motors have higher power density compared to dc motors and the machine maintenance is not needed because electric commutation is possible. The three phase generally uses hall sensors to get position information and this enables the accurate control. This paper suggests an algorithm that compensates the errors occurred when the hall sensors have a breakdown for stable operation.

Key Words : Auxiliary air compressor, Hall sensor, Position error compensation

1. 서 론

철도차량 내의 시설에 안정된 교류전원이 지속적으로 공급되기 위해서는 팬터그래프가 전차선로에 정확히 밀착되도록 집전부가 구성되어야 한다. 이때 사용되는 기구가 보조 공기 압축기(Auxiliary air compressor, ACM)이다. ACM의 목적은 주 공기 압축기를 통해 만들어진 공기압이 부족한 경우 추가적으로 부족 압력을 보충해 주기 위한 기능과, 초기 차량기동 시에 팬터그래프를 전차선로 쪽으로 상승시키는 역할로 크게 구분된다[1]. ACM의 압축공기는 전동기를 회전시켜 생성하며 토출압력 대비 실 토출량이 일정하게 유지되도록 제어되어야 한다. 기존의 ACM은 전동기 외의 부가적인 장치 없이 전동기 단품만으로 신뢰성 확보가 가능한 기계적 구동(정류)이 필수적인 DC전동기를 사용하였다. DC전동기는 기능적으로 우수하지만 브러시와 정류자를 가지고 있어 구동 시 항상 이에 대한 마찰이 고려되어야 하며 마모도가 높아질수록 유지보수가 필수적이다. 유지보수가 제대로 이루어지지 않으면 통전오류가 발생하여 지속적인 일정방향 회전이 불가능하므로 정격토크를 만족시킬 수 없다. 따라서 전기적으로 통전이 가능하며 통전 시 기계적 마찰을 고려할 필요가 없는 브러시리스 DC전동기(BLDC)로 대체 연구가 진행 중이다. BLDC 전동기는 3상 회로구성이 가능하므로 동일 사이즈에서 DC전동기에 비해 출력밀도를 향상시킬 수 있고, 3상 인버터 스위치를 통

해 PWM제어가 용이하다. 하지만 DC전동기와는 달리 3상 인버터를 추가적으로 구성해야 통전이 가능하며 정확한 통전을 위해 위치센서가 필수적이다. 일반적으로 BLDC전동기는 사용조건 특성상 속도가변이 빈번하지 않는 정속운전이 많으며, 회전자의 절대위치를 측정하면서 구동할 필요가 없다. 따라서 엔코더나 레졸버에 비해 가격이 저렴하고 회전자의 극성 위치만 판별하면 구동이 가능한 홀(Hall) 타입의 위치센서를 이용한다. 위치센서가 필요 없는 센서리스(Sensorless) 구동방식을 채택할 수도 있지만, 센서타입에 비해 초기구동 및 속도가변 과도상태 영역에서의 위치 정확성을 확보할 수 없어 회전자 위치 신뢰성이 떨어지는 단점을 고려해야 한다. 본 논문에서는 홀 센서 타입의 위치센서를 갖는 3상 BLDC전동기의 제어 정확성을 확보하기 위해 홀 센서의 기구적인 위치 오차 및 오동작, 고장 검출 시 정상적으로 구동이 가능하도록 하는 알고리즘에 대해 제시한다. 그림 1은 기존의 DC전동기를 이용한 ACM 구조를 나타낸다.



그림 1 도시철도차량에 적용된 보조 공기 압축기(ACM)

Fig. 1 The auxiliary air compressor(ACM) applied to the railway vehicles

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

Received : September 24, 2015; Accepted : October 20, 2015

2. 본 론

2.1 ACM내의 DC전동기 대체용 BLDC전동기 설계

기존의 ACM(MH99-AK19)은 현재 서울 지하철 9호선 내에 설치되어 사용되고 있으며, DC전동기의 회전을 통해 일정한 토출 압력을 유지하여 압축 공기를 생성한다. DC전동기는 일반적으로 브러시와 정류자를 가지고 있어 구동 시 두 구조의 접촉으로 인해 정류가 되므로 일정방향으로 회전이 가능하지만, 구조적으로 마찰이 발생하므로 이에 따른 마모도가 높아질수록 유지보수가 절대적으로 필요하다. 그에 비해 BLDC전동기는 인버터 구조를 이용하여 전기적으로 통전이 가능하므로 DC전동기처럼 기계적 마찰을 고려할 필요가 없다. 표 1은 기존의 DC전동기 및 새로 설계한 BLDC전동기의 사양이다.

표 1 DC전동기 사양(MH99-AK19)

Table 1 DC Motor Specification(MH99-AK19)

파라미터	값	단위	
전동기 종류	DC Motor	-	
소비전력	400	W	
극수	4극	-	
정격속도	1700	RPM	
코어	-	-	
영구자석	B_r	-	T
	μ_r	-	-
DC 입력전압	80	V	
절연종별	F	-	
상전류	5	Arms	
평균토크	2.2	Nm	

BLDC전동기 사양

BLDC Motor Specification

파라미터	값	단위	
전동기 종류	IPMSM	-	
소비전력	400	W	
극수/슬롯수	4/6	-	
정격속도	1700	RPM	
코어	20PNF1500	-	
영구자석 (N38UH)	B_r	1.18	T
	μ_r	1.06	-
DC 입력전압	80	V	
절연종별	F	-	
상전류	4.71	Arms	
평균토크	2.23	Nm	

DC전동기의 제공된 정격사양을 바탕으로 BLDC전동기에서 동일한 출력 및 평균토크를 얻을 수 있도록 설계를 진행하였다. 유한요소해석을 통해 전동기의 모델링을 진행하였으며, 극수는 기존 DC전동기의 4극과 동일하게 구성하고, 슬롯수는 제작성을 고려하여 극수/슬롯수 조합(2/3)이 되도록 4극6슬롯으로 선정하였다. 고정자 권선의 동손에 의해 전동기 내부적으로 열이 발생되

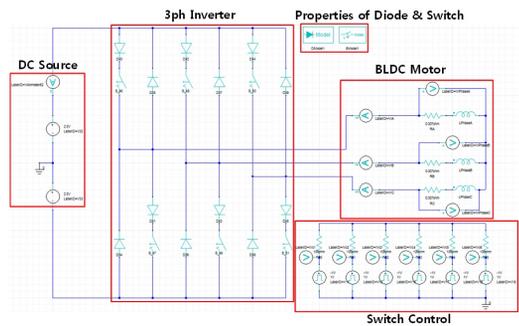
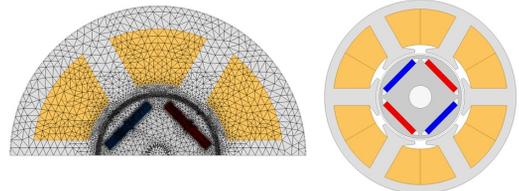


그림 2 설계된 BLDC전동기의 모델링과 외부연동회로도

Fig. 2 The external circuit and the designed BLDC motor model

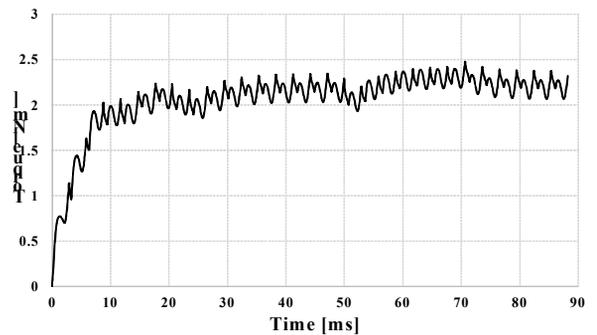
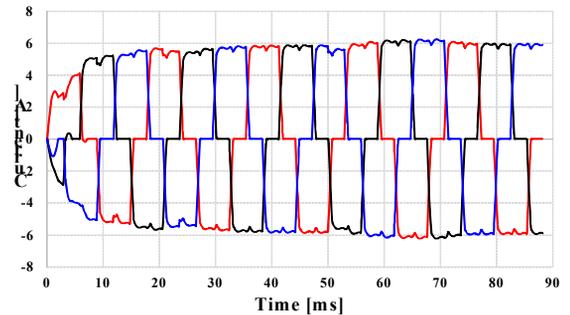


그림 3 설계된 BLDC전동기의 상전류 및 토크파형

Fig. 3 The phase current and torque waveform of the designed BLDC motor

므로 내부 슬롯의 면적이 많이 확보될수록 방열에 유리하다. 따라서 권선법은 접적률을 높여 슬롯의 면적을 최대한 확보하도록 치집중권 방식을 적용하였다. 그림 2는 DC전동기를 대체하는 BLDC전동기의 유한요소 해석을 위한 모델링 및 외부연동회로도이다. 그림 3은 정상적인 120° 2상 통전 방식으로 유한요소 해석을 진행한 전동기 권선의 상전류와 토크 파형이다.

2.2 홀 센서의 3상 불평형 상태에서의 기구적인 위치 오차 보상 알고리즘

일반적으로 홀 센서를 갖는 BLDC전동기는 3상 인버터와 함께 그림 4와 같이 구성된다. 홀 센서는 전기각으로 120° 위상차를 두고 위치하며 회전자에 회전함에 따라 N극 검출 시 디지털 신호 1로, S극은 0으로 검출한다.(반대의 경우도 있다.) 극의 검출에 따라 2상 통전 방식으로 구동되며 60° 간격으로 스위칭 된다. 스위칭 방식은 그림 5와 같다.

정상적인 홀 신호에 따라 통전구간이 결정되므로 홀 센서 신호의 기구적인 각도의 정확성이 높아야 하나, 극수가 증가될수록 기계각에 극쌍수를 곱한 만큼 전기각이 증가되므로 실제 센서의 전기각 120° 위상차이는 더욱 커질 수 있다. 즉 기구적으로 홀 센서의 위치 오차가 존재하면 그에 대한 전기각의 오차는 배수로 증가되기 때문에 통전방식에 영향을 받게 된다. 홀 신호는 그림 6과 같이 전동기 제작 이후 역기전력과 홀 신호를 미리 측정하여 각의 틀어짐을 확인한다[2]. 이때 측정된 데이터를 바탕으로

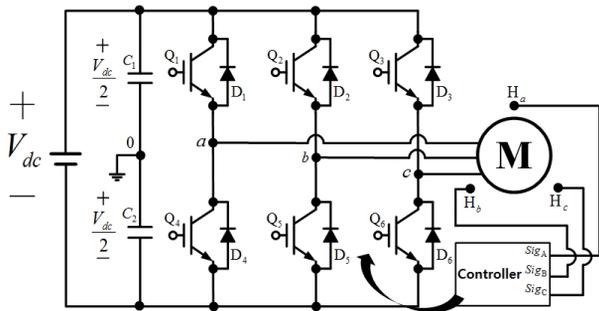


그림 4 ACM내의 BLDC전동기 및 인버터 구조
Fig. 4 Inverter circuit and the BLDC motor in the ACM

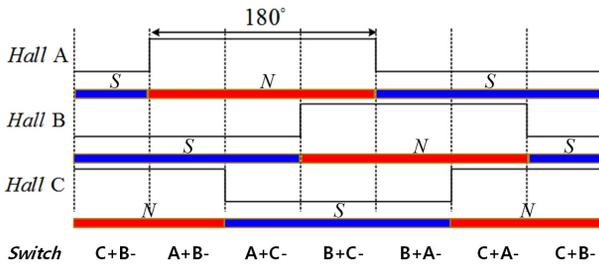


그림 5 홀 센서를 이용한 BLDC전동기의 2상 통전 방식
Fig. 5 A 2 phase commutation method with the hall sensor in the BLDC motor

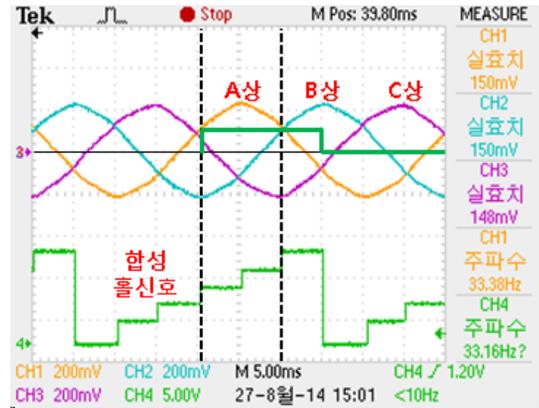


그림 6 1000rpm에서의 합성홀신호 및 BLDC전동기의 3상역기 전력 파형
Fig. 6 A 3 phase back-EMF waveform and the hall sensor signal combining of the BLDC motor at 1000 RPM

각의 틀어짐에 따라 보상 알고리즘을 적용하면 된다. 그림 6의 '합성홀신호'는 전기각 60° 간격으로 홀 신호의 변화를 계단과 형태로 나타내었다.

각이 틀어짐에 따라 스위칭 한 번의 유지가 요구되는 60° 2상 통전 구간에서, 스위칭이 두 번 진행되며 그에 대한 비전환 상의 환류(Freewheeling)전류 시간이 60°마다 차이를 보이게 된다. 센서 위치 오차의 모식도는 그림 7과 같으며 이때의 상전류 및 토크 파형은 그림 8과 같다. Hall A를 기계각으로 5°(전기각 10°) 틀어서 위치하도록 조정하였고, 이에 따라 상전류 불균형이 발생하였다[3, 4].

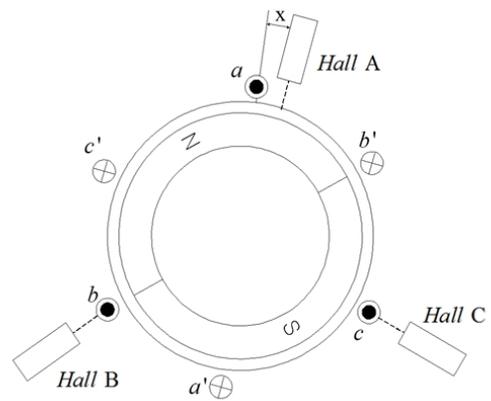


그림 7 BLDC전동기의 홀 센서 위치 오차
Fig. 7 The position error of the hall sensor in the BLDC motor

3개의 홀 신호 중에 하나의 신호(그림 7의 Hall A)가 위치 오류(변위각 x)가 발생한 경우, 기구적으로는 그대로 유지하면서 제어 알고리즘을 통해 전기각을 원래의 위치만큼 이동시킨다. 그림 9의 방법은 홀 신호의 펄스파 한 주기(360°)를 기준으로 1μs씩

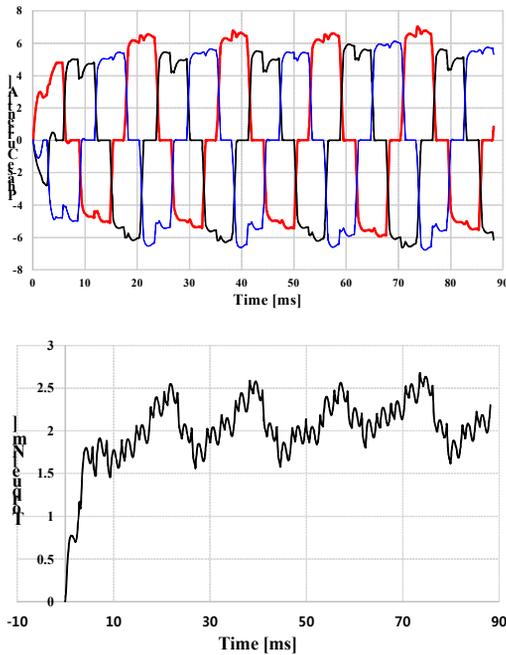


그림 8 기구적인 홀 센서 위치 오차에 따른 BLDC전동기의 상 전류 및 토크 파형

Fig. 8 The phase current and torque waveform according to mechanical position error of the hall sensor

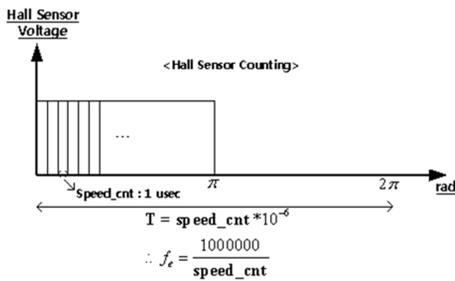


그림 9 홀 센서 위치 보상을 위한 방법

Fig. 9 The method to compensate hall sensor position

신호를 카운트한다[5]. 1μs를 카운트 수로 선정 한 이유는 사용된 제어기 DSP(TI社TMS320F28335)의 분해능을 고려한 최소 주기를 이용하였다. 정격속도 1700rpm에서 4극 기준 전기각 주파수는 56.66Hz, 주기는 그 역수인 17647μs이 된다. 즉 1700rpm에서 한 주기당 17647번 카운트되고 이를 360° 간격으로 나눠 생각하면 1°당 약 49회 카운트 펄스가 인가됨을 알 수 있다. 이 수치는 1°를 제어하는데 높은 정확성을 확보한다.

$$\theta_E = \theta_c + 2\pi f_e t \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 θ_E 를 구할 수 있고 식 (2)와 같이 통전 방식을 홀 신호 1과 0의 디지털 신호 대신, 6구간을 60° 간격으로 나누어 θ_E 를 위치시키는 알고리즘을 통해 제어한다[6]. $\theta_{err1} \sim$

θ_{err6} 은 틀어진 각에 대한 보상을 위한 전기각이며 모든 상의 불균형을 바로잡을 수 있다. 만약 A상이 기계각으로 5° 틀어진 상황이라면 A상 통전에 관여하는 $\theta_{err1}, \theta_{err2}, \theta_{err4}, \theta_{err5}$ 를 필요한 전기각 만큼 위치를 변경시키면 된다. 기구적인 오차를 전기각으로 변형하여 보상이 가능하다.

$$Hall(101) \rightarrow 0 - \theta_{err1} \leq \theta_E < 60 - \theta_{err1}, \quad A+B- \quad (2)$$

$$Hall(100) \rightarrow 60 - \theta_{err2} \leq \theta_E < 120 - \theta_{err2}, \quad A+C-$$

$$Hall(110) \rightarrow 120 - \theta_{err3} \leq \theta_E < 180 - \theta_{err3}, \quad B+C-$$

$$Hall(010) \rightarrow 180 - \theta_{err4} \leq \theta_E < 240 - \theta_{err4}, \quad B+A-$$

$$Hall(011) \rightarrow 240 - \theta_{err5} \leq \theta_E < 300 - \theta_{err5}, \quad C+A-$$

$$Hall(001) \rightarrow 300 - \theta_{err6} \leq \theta_E < 360 - \theta_{err6}, \quad C+B-$$

2.3 홀 신호의 순간적인 오동작 및 고장 시 검출 알고리즘

상기에 따른 홀 센서의 기구적인 각의 오차가 있는 상태는 알고리즘을 통해 전기각을 보상하도록 하는 방법을 제시하였으나, 이는 홀 신호가 정상적으로 동작하고 있다는 전제 조건이 따른다. 하지만 센서의 내구성의 문제가 발생하여 완전히 소손된 경우에는 교체는 필요하지만 소손 단계에 이르기 전까지는 신뢰성을 확보할 필요가 있다[7-9] 신호 검출에 오류가 발생하는 경우에는 통전 방식의 오류로 인해 암 쇼트(Arm Short)와 같은 인버터 소손에 이를 수 있으므로 이에 대한 대비책이 필요하다. 그림 10은 홀 신호(Hall A)에서 신호 오류가 발생하여 N, S극을 정상적으로 피드백 받지 못하는 상황이다. 이와 같은 경우 60°간격 2상 통전이 유지되지 않으며 역방향으로 통전이 되어 역토크가 발생(Case 1)할 수 있고, 홀 신호 모두 같은 극성(111, 000)을 갖게 되어(Case 2) 통전방식에 위배되는 현상이 발생하게 된다.

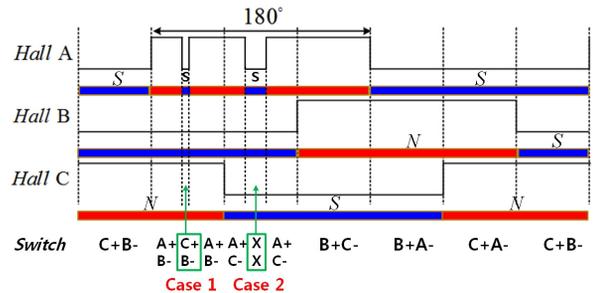


그림 10 BLDC전동기의 홀 센서 고장(Hall A) 시 상황
Fig. 10 BLDC motor hall sensor failure situation

그림 10과 같은 문제가 발생되지 않도록 하기 위해 Noise Cancel 알고리즘이 필요하다. Case 1, 2의 경우에는 홀 센서의 주기가 기본 주파수보다 항상 크게 되므로 홀 신호 기준 180°간격 펄스 방식을 유지할 수 없다. 따라서 그림 11과 같이 홀 신호를 0에서 1로 증가하는 시점(T1,T3), 1에서 0으로 감소하는 시점(T2,T4)를 카운트하여 전동기 구동 중에 지속적인 주파수 센싱을

한다. 이 방식은 식 (3)과 같고 T_E 는 오작동을 포함한 홀 센서 신호 반주기(180°)를 나타낸다.

$$T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 = T_E \quad (3)$$

if, $T_2 + T_3 + T_4 + T_5 = 0 \rightarrow T_1 = T_E$ (Normal)

$T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \neq 0 \rightarrow T_1 < T_E$ (Err)

정상적으로 동작하는 다른 센서(Hall B 혹은 Hall C)를 이용하여 현재 속도를 계산하고 이를 데이터화하여 모니터링 한다. 그리고 그 주파수보다 큰 주파수의 이벤트($T_1 < T_E$)가 발생하면 그 주기는 무시하도록 알고리즘을 구성한다. $T_1 < T_E$ 가 되면 그 값을 오류로 감지하고 조건문을 사용하여 인터럽트 내의 데이터를 연산에 이용하지 않는 무시 조건이 되도록 한다. 또한 이벤트 발생 직전의 주파수는 데이터화 되어 있으므로 무시 조건이 발생하면 바로 직전의 데이터를 이용하여 통전한다. 오동작 구간이 $T_1 \sim T_5$ 보다 더 많을 경우도 직전 신호를 그대로 이용하는 방식을 유지하면 된다. 하지만 오류 검출의 빈도가 높아질수록 검출되는 시간만큼 주 제어 알고리즘의 수행시간이 지연되므로 상황에 따라서는 센서의 교체가 바람직하다. 이 알고리즘을 적용하면 신호의 오동작 시 문제를 해결할 수 있다.

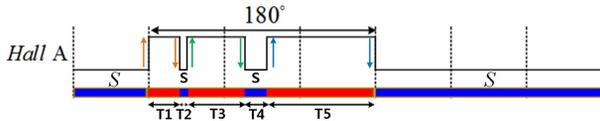


그림 11 홀 신호 변경 시점 체크 방법
 Fig. 11 The method of detecting the changing point of the hall sensor

3. 결 론

철도차량 내에 장착되는 ACM은 팬터그래프와 전차선로의 밀착을 위해 공기압력을 이용하여 상하 이동을 시키는 장치이다. 차량내로 안정된 전원이 공급될 수 있도록 공기압력을 일정하게 유지시킬 필요가 있으며 이를 위해서 ACM내에 들어가는 전동기의 신뢰성이 요구된다. 기존에는 기계적인 접촉 방식에 의해 정류가 이루어지는 DC전동기를 사용하였으나 유지보수에 대한 문제가 항상 존재하므로 이를 해결하기 위해, 전기적 정류가 가능한 BLDC전동기로 대체연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 보다 높은 회전자 위치 신뢰성을 확보하기 위해, 홀 센서의 기구적인 위치의 오차가 발생한 경우와 순간 오동작이 발생하는 경우로 나누어 이를 해결하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 기구적 위치를 보상하면 동일속도 제어를 위한 인가전류가 현저히 줄어들게 되어 전동기 효율을 높일 수 있으며, 순간 오동작의 경우는 발생 시 인버터 소손과 직결되므로 하드웨어적으로 보호회로를 추가적

으로 설치해야하나, 이를 소프트웨어만으로 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 두 방식을 적용하면 ACM용 BLDC전동기의 신뢰성을 보다 향상시킬 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2013R1A1A1061048)

References

- [1] N. U. Baeg, S. J. Lee, "Railroad Technology," gbbook, pp. 132, 2004
- [2] S. I. Byun, S. G. Lee, S. A. Kim, Y. H. Cho, "Hall Effect Sensor Based Space Vector PWM Control of Permanent Magnet Synchronous Machine" conference of KIEE, pp.304-306, April 2012
- [3] E. Balaban, A. Saxena, P. Bansal, K. Goebel, and S. Curran, "Modeling, detection, and disambiguation of sensor faults for aerospace applications," IEEE Sensors Journal, vol. 9, no. 12, pp. 1907 - 1917, 2009
- [4] H. C. Kim, J. H. Cho, S. T. Lee, S. G. Song, Y. C. Lim, H. J. Kim, "A study on single phase BLDC motor according to the location of the Hall sensor to minimizing peak current," conference journal of KIEE, pp. 283-286, April 2012
- [5] J. S. Lim, I. G. Kim, J. H. Won, S. Y. Cho, J. Lee, "Studies on the BLDC motor control method and application using the minimum Hall sensors," conference journal of KIEE, pp. 874-875, July 2015
- [6] S. J. Lee, Y. H. Yoon, M. S. Woo, C. Y. Won, Y. Y. Choe, "Speed Control of Three Phase Slotless PM BLDC Motor Using Single Sensor", Annual conference of Power Electronics, pp. 33-37, 2004
- [7] A. Tashakori and M. Ektesabi, "Stability analysis of sensorless bldc motor drive using digital pwm technique for electric vehicles," in Proceeding of 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2012, pp. 4898 - 4903, October 2012.
- [8] Tsotoulidis, S, Safacas, A. "Side-effects of Hall sensors misplacement on BLDC motor drive operation," Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on, pp.

1825-1830, 2014

- [9] M. H. Jang, K. W. Lee, "Hall Sensor Fault Detection and Fault-Tolerant control of High-Speed PMSM Drive System", KIEP of the transaction, vol. 3, no. 18, pp. 205-210, June 2013

저 자 소 개



김 인 건 (In-Gun Kim)

1984년 8월 9일생. 2011년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2013년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 박사과정.



홍 현 석 (Hyun-Seok Hong)

1986년 3월 21일생. 2012년 단국대학교 전기공학과 졸업. 2014년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 박사과정.



이 주 (Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.