

ADC 컨버터 내장형 고효율 BLDC 모터 개발 및 특성평가 연구

Study on the Developed BLDC Motor Built-in A/D Converter and its Characteristics Evaluation

한 상 보^{*}

Sang-Bo Han^{*}

Abstract

This paper discussed the research results on the development and output characteristics of single-phase direct drive 20W BLDC motor with ADC converter. It is designed to drive the rotor through PWM inverter switching and position the back electromotive force of the motor electrically 30° ahead of the hall sensor phase angle signal to ensure optimum switching time. As a major result of the characteristics evaluation, the maximum inverter efficiency was 92[%], the system efficiency was 53.34[%], and the motor efficiency was 57.85[%].

요 약

본 논문은 ADC 컨버터 내장 단상 직입구동 20W BLDC 모터 개발 및 출력 특성에 대한 연구결과를 논하였다. PWM 인버터 스위칭을 통해 회전자를 구동시키고, 모터의 역기전력을 홀센서 위상각 신호보다 전기적으로 30° 앞서도록 위치시켜 최적의 스위칭 타임을 확보하도록 제작하였다. 특성평가의 주요한 결과로서 인버터 효율 최대 92[%], 시스템 효율 53.34[%]를 보였으며, 모터 효율은 57.85[%] 보였다.

Key words : BLDC, BEMF, Efficiency, Hall sensor, Inverter, PWM

1. 서론

BLDC(Brushless Direct Current)는 소형이면서 전기·기계적 잡음이 적으며, 브러시의 마모가 없어 반영구적으로 고속회전에 사용할 수 있으며, 기계적 접점이 없으므로 신뢰성이 높을 뿐 만 아니라 자석을 사용함에 의하여 전력밀도 및 효율이 높은 특징을 가지고 있다. 이러한 높은 효율로 가전기기, 자동화기기, 공조시스템, 자동차를 비롯한 다양한

산업분야에 폭넓게 사용되고 있다. 이러한 BLDC 모터는 엔코더(Encoder) 또는 홀센서와 같은 회전자 검출용 센서를 갖춘 것과 갖추지 않은 것으로 나눌 수 있다.

최근, 역기전력 활용한 BLDC 모터 구동연구, 위치제어를 위한 부궤환 설계 및 PID 제어 연구, 시뮬링크를 이용한 BLDC 모터 제어연구, 퍼지 및 신경망을 이용한 속도 및 위치 제어연구 등 다양한 연구가 진행되고 있다[1]~[10].

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

★ Corresponding author

E-mail : hansangbo@uok.ac.kr, Tel : +82-55-249-2635

Manuscript received Nov. 14, 2019; revised Nov. 18, 2019; accepted Nov. 21, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

현재 사용되고 있는 대부분의 공조 및 송풍시스템용 모터는 직입기동으로 운전되는 유도전동기를 채용하고 있으며, 이들 모터에 대한 에너지 소비효율을 높이는 효율 고도화가 필요한 상황이다.

일부 고효율의 가전시스템은 인버터 내장 또는 BLDC 모터를 사용되고 있지만, ADC 컨버터를 분리한 DC 입력형 BLDC 모터가 주를 이루고 있다. 특히, 단상 직입기동 환풍용 BLDC 모터는 일반적으로 가정용 욕실 및 주방, 기타 전기기기 등 소형 환풍용에 주로 사용되며, 대부분 단상 콘덴서 기동형 유도전동기가 회로 및 기구가 간단하여 많이 사용되고 있다. 그러나 최근 고효율화 및 친환경적인 제품이 선호됨에 의하여 BLDC 모터로 변화되고 있다. 기존 제품과의 차별성으로 고급화되어 있는 환풍용 BLDC 모터는 교류입력 드라이버와 모터로 구성되어 있지만, 본 연구에서 개발한 BLDC 모터는 교류입력 드라이버와 모터로 구성되어 별도 외부의 ADC 컨버터가 필요없는 일체형 컨버터를 내장하여 가정의 단상 전원에 바로 연결하여 사용할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 공조 및 송풍용 팬 모터의 고효율화 및 전력변환용 ADC 컨버터 내장으로 고효율 20W BLDC 모터를 개발하고, 제작된 모터의 출력 특성 평가 및 분석결과에 대하여 논하였다.

II. 본론

2.1 BLDC 모터 설계 시뮬레이션

그림 1은 모터의 전자계 해석 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로서, 자속밀도의 분포가 고정자와 회전자 사이와 고정자 턴과 턴 사이에 균일하게 분포되고 있음을 알 수 있다. 이 때 고정자 철심의 최대 자속밀도는 통상적으로 1.7[T] 미만에서 사용되

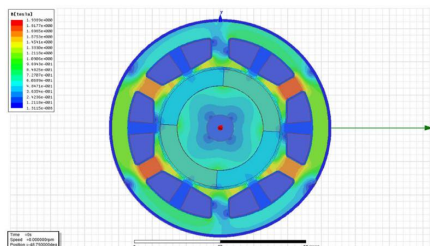


Fig. 1. Electromagnetic simulation result on the magnetic flux density.

그림 1. 자속밀도에 대한 전자계 해석 시뮬레이션 결과

로 0.5[T] 구소강판의 최대 포화자속밀도인 1.69[T]를 보이고 있다. 본 해석과 관련된 주요 제원은 표 1, 2에 나타내었다.

그림 2는 1,000[rpm]에서의 3상 역기전력(Back ElectroMotive Force, BEMF) 분포특성을 보인 것으로서, 3상 역기전력이 120° 위상으로 최대 14[V]까지 균일하게 발생됨을 알 수 있다. 이때, 고정자에서 회전 자기장을 만들어 낼 수 있도록 외부제어가 필요하며, 최대 토크가 되도록 고정자 코일에 전류를 공급하기 위하여 홀센서를 이용하여 회전자의 위치정보를 파악하도록 구성하였다.

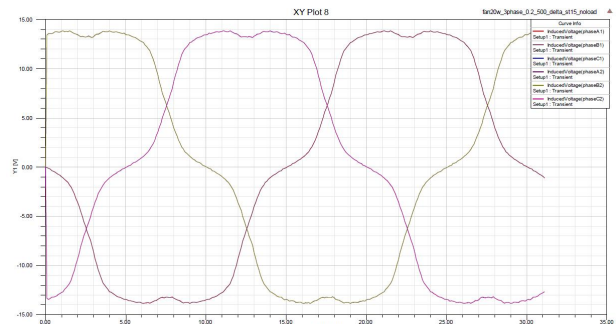


Fig. 2. The change of BEMF under no-load conditions.

그림 2. 무부하 상태에서의 역기전력 변화

Table 1. Specification of designed BLDC motor.

표 1. BLDC 모터의 제원

출력 [W]	회전수 [rpm]	토크 [N · m]	전압 [V]	상전류 [A]	효율 [%]	Core 재질
20	2,400	0.08	310	0.14	87	S18 0.5t

Table 2. Specification of the used permanent magnet.

표 2. 영구자석의 제원

극[pole]	공극[mm]	영구자석 재료	착자 타입	극호각
4	0.5	ND-Bonded 0.6 [T]	Radial	180°

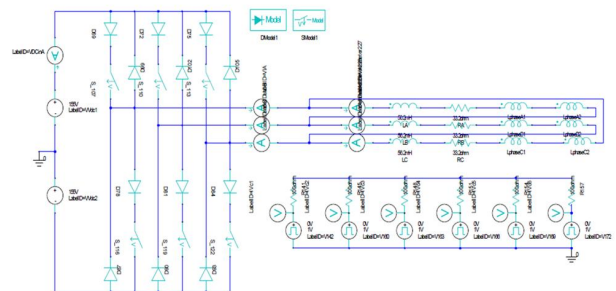


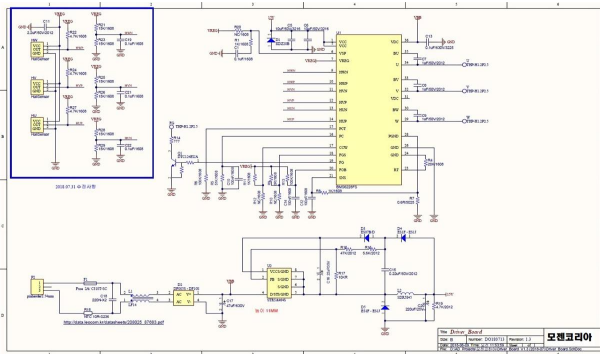
Fig. 3. The external circuit diagram.

그림 3. 외부 회로 구성도

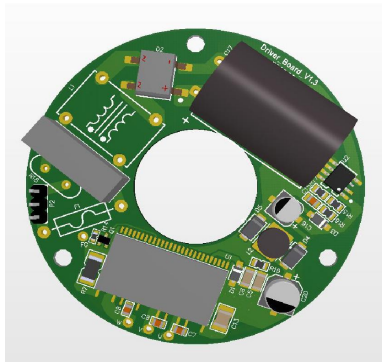
그림 3은 모터를 동작시키기 위한 BLDC 모터 구동 회로도를 나타낸 것으로서, 인버터 스위칭에 의하여 고정자로 전류를 공급하여 구동하도록 구성하였다.

2.2 BLDC 모터 제작 및 특성평가

그림 4(a)는 220VAC 직입구동 310VDC-LINK 20W 센서부착 모터 드라이버 회로도를 나타내었다. 본 회로는 PWM 방식 인버터 스위칭을 통해 고정자로 전류를 흘림으로서 회전자를 구동시키고, 모터의 역기전력을 홀센서 위상각 신호보다 전기적으로 30° 앞서도록 위치시켜 최적의 스위칭 타이밍을 확보하도록 하였다.



(a) 모터 드라이버 회로



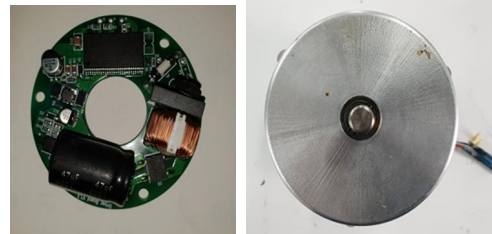
(b) 보드 모델링 결과

Fig. 4. Motor driver circuit and result of board modeling.
그림 4. 모터 드라이버 회로 및 보드 모델링

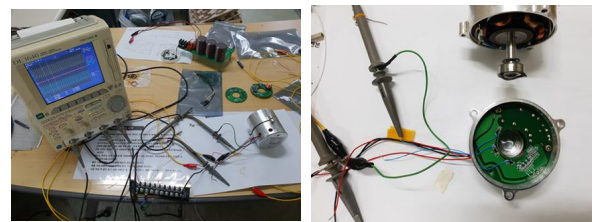
그림 4(b)는 실제 제작 전 모델링한 결과를 보인 것으로서, 모터 내 드라이버가 내장되는 빌트인 타입으로 기구적 제한사항과 베어링 축계의 제한사항, 드라이버를 고정하기 위한 고정부 검토 등을 통하여 부품의 재배치와 라우팅 데이터를 확보하도록 구성하였다.

2.3 개발 모터의 출력특성 분석

본 연구에서 제작한 빌트인 ADC 컨버터 BLDC 모터의 특성평가 외관을 그림 5에 나타내었다.



(a) 제작 완성된 드라이버 및 모터의 외형

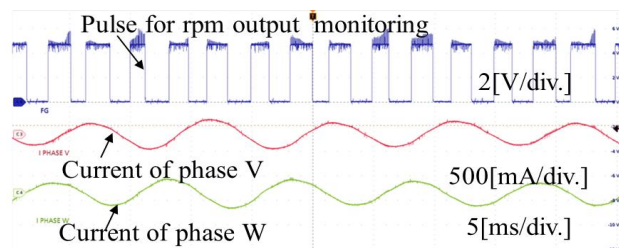


(b) 특성평가 사진

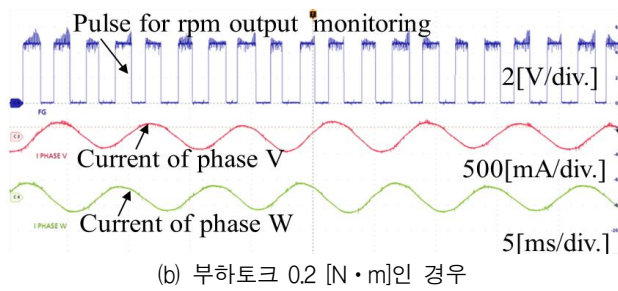
Fig. 5. The manufactured driver and motor, and photograph of characteristics evaluation.

그림 5. 제작된 드라이버 및 모터의 외형과 특성평가 사진

그림 6은 부하 토크 0.1 및 0.2[N·m]일 때 모터 회전속도에 대한 펄스 출력신호 및 상전압 변화를 보인 것이다. 그림 6(a)에서, 모터의 회전속도 정보 모니터링을 위한 펄스출력은 출력 단자(FG)에서 5[V] ~ 15[V](<5[mA]) 사이의 논리 레벨 펄스로 출력되도록 되어 있으며, FG 출력 주파수는 전원 주파수의 3 배로 설정되도록 구성하였다. 모터의 실제 회전속도는 FG 출력 주파수를 사용하여 rpm = FG[Hz]×5로 계산할 수 있다. 그림 6(a)에서 FG 출력 주파수가 300[Hz]로서 모터의 회전속도는 1500[rpm]에 해당되며, 이 때 동일 크기의 V상 및 W상 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 11(b)에서 FG 출력 주파수 400[Hz]일 때 회전속도는 2,000[rpm]에 해당됨을 알 수 있다.



(a) 부하토크 0.2 [N·m]인 경우



(b) 부하토크 0.2 [N·m]인 경우

Fig. 6. The variation of pulse output signal and phase voltage according to the change of motor speed.

그림 6. 모터의 회전속도에 대한 펄스 출력신호 및 상전압의 변화

그림 7은 부하 토크 0.1 [N·m]일 때의 파워 MOSFET의 스위칭 주파수 및 V상에 대한 상전류, 게이트 드라이브의 Low 스위칭신호, 드레인-소스 간의 스위칭 신호를 순서적으로 나타내었다. PWM 신호는 하이 및 로우측을 제어하는 INH핀과 INL핀으로 구성되어 있으며, 각 핀의 전압신호를 그림 내부에 표기하였다. 가장 하단의 신호는 MOSFET 드레인-소스간의 전압을 나타내었다. V상의 전류에 있어서 양의 부분에 PWM 제어에 의한 부분적 노이즈가 혼재되어 있지만, 그 크기가 매우 작으므로 실제 동작에는 큰 영향이 없었다. PWM 신호의 INH핀과 INL핀의 출력 특성은 매우 짧은 시간에 하이와 로우 신호를 반복되고 있음을 알 수 있다.

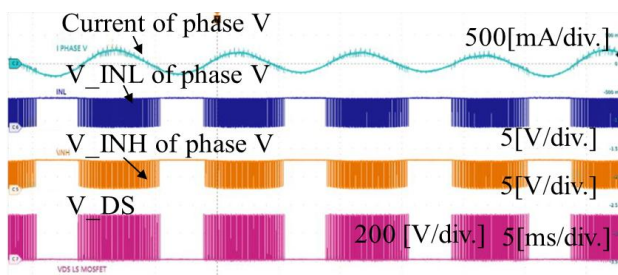


Fig. 7. Steady-state waveform at load torque of 0.1 [N·m] (1500 rpm)

그림 7. 부하 토크 0.1 [N·m](1500rpm)에서의 정상상태 파형

위의 실험을 통하여 부하 토크 0.1 [N·m]일 때, 속도를 가변시킴에 따른 시스템 출력 및 시스템 효율을 표 3에 나타내었다.

동일 입력전압에 대하여 속도를 증가시킴에 따라서 시스템 출력이 증가됨과 동시에 인버터 효율이 92[%]까지 증가됨을 알 수 있었다.

그러나 시스템 효율 53.34[%]이며, 모터 효율 57.85

[%]로서 목표치 87[%]에 미흡함을 보였다. 주요한 원인으로서는 시뮬레이션 해석 데이터와 실제 시제품 제작과정의 권선방법 및 연구자석(네오디움) 재료의 불균일성 및 마그네트의 착자 특성이 효율에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

결론적으로, 단상 교류 220[V]를 정류하여 직류 310[V]를 드라이버 DC-LINK단에 입력하고, PWM 제어를 통하여 최대속도 2400 [rpm], 부하토크 0.1[N·m]에서 정격출력 25.14[W], 모터효율 57.85[%], 시스템 효율 53.34[%] BLDC 드라이버 일체형 모터를 제작 및 평가하였다.

Table 3. Results of system output and efficiency measurement.

표 3. 시스템 출력 및 효율측정 결과

입력 DC 전압 [V]	속도 [rpm]	직류입력 전류 [A]	시스템 입력 [W]	인버터 출력 [W]	인버터 효율 [%]	기계 출력 [W]	모터 효율 [%]	시스템 효율 [%]
311	1500	0.1457	45.31	40.55	89.5	15.71	38.74	34.67
311	2000	0.1556	48.40	44.19	91.3	20.95	47.41	43.28
311	2250	0.1599	49.72	45.69	91.9	23.57	51.58	47.40
311	2400	0.1624	47.13	43.45	92.2	25.14	57.85	53.34

III. 결론

본 논문은 공조 및 송풍용 ADC 컨버터 내장 단상 직입구동 20W BLDC 모터 개발 및 특성 평가에 대하여 논하였다.

PWM 인버터 스위칭에 의하여 회전자를 구동시키고, 홀센서를 활용하여 최적의 스위칭을 실시하였으며, 최대속도 2400[rpm], 부하토크 0.1[N·m]에서 인버터 효율이 92[%]까지 증가되었지만, 시스템 효율은 53.34[%]를 보였으며, 모터 효율은 57.85[%]를 보였다.

References

[1] T. Sebastian, G. Slemon, and M. Rahman, "Modelling of permanent magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.22, pp.1069-1071, 1986. DOI: 10.1109/TMAG.1986.1064466

[2] Y. Wang, K. T. Chau, C. C. Chan, and J. Z. Jiang, "Design and analysis of a new multiphase polygonal-winding permanent-magnet brushless DC machine," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.38, No.5,

pp.3258–3260, 2002.

DOI: 10.1109/TMAG.2002.802128

[3] Jang, K. B., Won, S. H., Kim, T. H., Lee, J., “Starting and high-speed driving of single-phase flux-reversal motor for vacuum cleaner,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol.41, pp.3967–3969, 2005.

DOI: 10.1109/TMAG.2005.855181

[4] C. Cavallaro et. al, “Efficiency enhancement of permanent-magnet synchronous motor drives by online loss minimization approaches.” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.52, No.4, pp.1153–1160, 2005. DOI: 10.1109/TIE.2005.851595

[5] C. Silva, G. M. Asher, and M. Sumner, “Hybrid rotor position observer for wide speed-range sensorless PM motor drives including zero speed,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.53, No.2, pp.373–378, 2006. DOI: 10.1109/TIE.2006.870867

[6] T. Pajchrowski and K. Zawirski, “Application of artificial neural network to robust speed control of servodrive,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.54, No.1, pp.200–207, 2007.

DOI: 10.1109/TIE.2006.888782

[7] K. T. Chau et. al, “Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Elec.*, Vol.55, No.6, pp.2246–2257, 2008.

DOI: 10.1109/TIE.2008.918403

[8] Chiu, C. L. et. al, “Optimal driving efficiency design for the single-phase brushless DC fan motor,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol.46, pp.1123–1130, 2010. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2035051

[9] Zhiwei Wang et. al, “Research on Control System of Three - phase Brushless DC Motor for Electric Vehicle,” *IOP Conf. Series : Mate. Sci. and Eng.*, Vol.274, pp.012–016, 2017.

DOI: 10.1088/1757-899X/274/1/012016

[10] Hongsik Hwang et. al, “Design of a Single-Phase BLDC Motor for a Cordless Vacuum Cleaner Considering the Efficiency of Airflow,” *Energies*, Vol.12, No.3 pp.1–13, 2019.

DOI: 10.3390/en12030465

BIOGRAPHY

Sang-Bo Han (Member)



1998 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
2000 : MS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
2004 : PhD degree in Electronic Engineering, University of Tokyo.

2015.2~2016.2 : Visiting scholar, University of California at San Diego, USA