

수치해석에 의한 고효율 BLDC 모터의 제어기 설계 및 성능평가에 관한 연구

論 文
55P-2-2

The Performance Evaluation and the Design of Controller for the Highly Efficient BLDC Motor using Numerical Analysis

禹天熙[†] · 朴健植^{*}
(Chun-Hee Woo · Gun-Sik Park)

Abstract - This thesis focuses on the design of control schemes for highly efficient BLDC motor drive applications using drives with output capacity of 1Hp. The control system was designed and implemented on a PIC micro-controller and applied to an electric vehicle as a viable replacement to the existing a high phase induction motor that is currently being used for these low cost, small traction drive applications. This paper for the brushless drive research has shown the optimization of the drive system for improved drive design and switching techniques that can improve the entire drive system efficiency for electric vehicle both large and small traction applications using sinusoidal PWM techniques for synthesizing the AC waveforms needed to control these traction drives. In addition, Numerical simulation was conducted to evaluate the performance of designed BLDC Motor using MotorPro simulator.

Key Words : BLDC Motor Drive, PIC Micro Controller, Numerical Simulation, MotorPro

1. 서 론

전기 부하의 대부분을 담당하는 교류전동기는 구조가 간단하고 가격이 저가이나, 기동 토크가 좋지 않으며 속도 가변도 어려운 단점이 있다. 직류전동기의 경우 교류전동기에 비해 우수한 속도 가변 성능과 우수한 기동 토크를 가지는 반면 브러쉬 정류자의 스파크에 의한 수명이 문제가 되고 소음이 발생하는 단점이 있다. 이러한 전동기들의 문제점을 개선하여 개발되어진 전동기가 Brushless DC Motor(BLDC)이다. 최근 전기자동차에 적용하는 전동기의 상품화 추세는 교류전동기의 장점을 채택하고 직류전동기의 단점을 보완한 BLDC 전동기를 선호하고 있다[1].

본 논문에서는 산업 현장에서 수요가 증가하고 있는 BLDC 모터의 특징과 제어 특성을 고찰하고 이를 최적화하는 설계 기술 연구에 중점을 두었으며, 기존의 BLDC 모터에 비하여 저속도에서도 높은 토크를, 고속도에서는 높은 출력을 내도록 다중위상(Multi-Phase) BLDC 모터용 제어기를 설계 제작하였다[2,3]. 특히 폭넓은 속도 범위에서 높은 효율을 유지하기 때문에, 모터의 크기를 최소화할 수 있으며 생산원가를 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

그리고 BLDC 모터 설계시 회전자 및 권선에 나타나는 전자장의 분포는 전동기의 출력 및 효율에 큰 영향을 미치는데, 이를 수학적으로 모델링하고 수치적으로 해석하는 것

은 쉽지 않다. 본 논문에서는 고효율 BLDC 모터의 특성을 파악하고 최적의 파라미터를 도출하기 위하여 BLDC 모터 설계를 위한 전용 시뮬레이터를 사용하였으며, 속도-출력 특성, 효율 등 다양한 전동기의 특성을 파악하였다.

2. BLDC 모터의 Controller 제작

2.1 BLDC 모터의 시제품 제작

BLDC 전동기는 회전자의 자속위치 검출이 필요하지만 소형화가 가능하고 효율이 좋은 이유로 산업 현장에서 많이 사용되고 있다. 구체적으로 BLDC 모터는 영구자석(PM : Permanent Magnet)의 위치와 회전자의 위치에 따라 분류한다. 영구자석의 위치에 따라 IPM (Interior Permanent Magnet), SPM(Surface Permanent Magnet)으로 분류하며 회전자의 위치에 따라 Outer Rotor Type 또는 Inner Rotor Type으로 분류한다[4].

표 1 IPM과 SPM형 BLDC 모터의 특성

Table 1 Characteristics of IPM and SPM BLDC

구분	IPM	SPM
특성	<ul style="list-style-type: none"> ●고회전시 영구자석 유지 유리. ●릴러턴스 토크 때문에 고효율이지만 동작점이 일정하지 않아 제어가 불리함. 	<ul style="list-style-type: none"> ●고속시 영구자석이 떨어질 수 있으므로, 접착구조 필요함. ●자속토크만 있기 때문에 IPM보다 제어가 유리.
장단점	<ul style="list-style-type: none"> ●중대형 용량. ●정출력 특성. ●가격 저렴. 	<ul style="list-style-type: none"> ●소용량. ●전류토크 직진성. ●순시 토크 제어성 유리.
용도	●산업용.	●서보용.

[†] 교신저자, 正會員 : 明知專門大學 電氣科 副教授 工博
E-mail : chwoo@mail.mjc.ac.kr

^{*} 正會員 : (주)PKS 대표이사
接受日字 : 2006年 3月 28日
最終完了 : 2006年 5月 27日

종래의 분권(Shunt) 모터에서는 계자 코일이 적절한 수의 극을 가지기 위해 로터 상에 감겨져 있다. 브러시를 로터에 부착하는 코일은 로터가 회전함에 따라 전력을 발생하도록 감겨져 있는데, 이러한 방식은 먼지와 같은 이 물질이 정류기 또는 브러시 사이에 존재하게 되어 모터 내에서의 절연파괴 또는 마모를 발생시키는 단점이 있다.

본 연구에서는 영구자석을 내장하여 로터로 사용하였으며, 독립된 권선이 고정자에 감겨져 있다. 그리고 정류 인코더를 회전될 로터의 축 상에 고정하였으며, 정류간격을 제어하도록 포토센서를 구동회로와 접속하였다.

모터 내에서 고정자 권선이 랩권선(lap winding)이 아닌 웨이브 권선 형식으로 배치되도록 설계함으로써 함으로써 코일의 동손을 최소화시켰으며, 토크 리플을 개선하였다.

본 연구에 사용한 10Hp Proto-type BLDC 모터는 6개의 다중 위상(Multi Phase) BLDC 모터이므로, 기존의 모터에 비하여 저속에서도 높은 토크를 내며, 고속에서는 높은 출력을 내도록 설계되어 있다[5]. 특히 폭넓은 속도 범위에서 높은 효율을 유지하는 것이 특징이다. 또한 구조적으로 말굽형태가 아닌 막대형태의 자석을 회전자의 철심에 삽입하였기 때문에 초고속 회전 시 기계적으로 안정하며, 자석의 삽입 형태가 자속집중을 증가시켰기 때문에 같은 종류의 자석을 사용한 타 전동기에 비해 전동기의 크기를 작게 하는 구조를 가지고 있다.

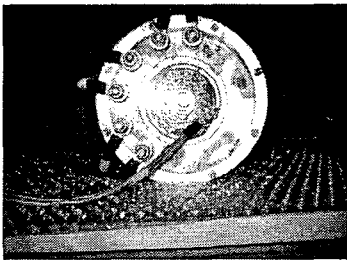


그림 1 Proto-type의 BLDC 모터 외형(전면)
Fig. 1 The front view of proto-type BLDC motor

2.2 BLDC 모터의 제어기 제작

개발되어진 Proto-type BLDC 모터를 가변속제어가 용이하도록 PWM 제어 알고리즘을 구현하였으며, 이 모터를 대용량 HVAC용으로 응용할 경우 정해진 온도를 유지하기 위

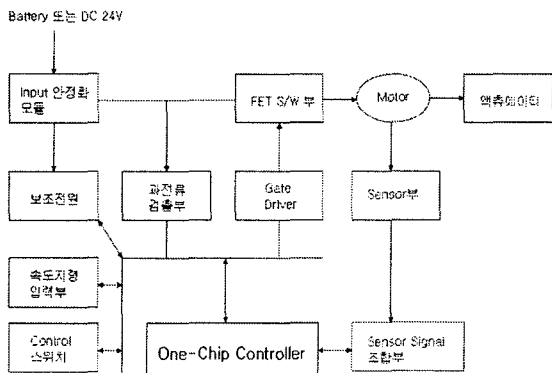


그림 2 개발된 BLDC 모터용 제어기의 블록도
Fig. 2 Block diagram of designed BLDC controller

한 빈번한 ON/OFF를 방지하고 가변속도를 적용하여 실내 온도의 변화를 최소화 할 수 있도록 프로그램 하였다[5-7].

또한 원칩 마이크로 컨트롤러를 사용함으로써 제어 보드의 크기를 최소화 시켰으며, 모니터링 시스템이 가능하도록 통신전용 포트를 제공하였다.

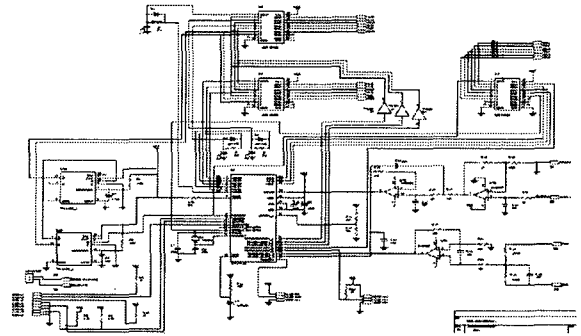


그림 3 BLDC 모터용 제어기의 회로도
Fig. 3 The schematic diagram of controller for BLDC

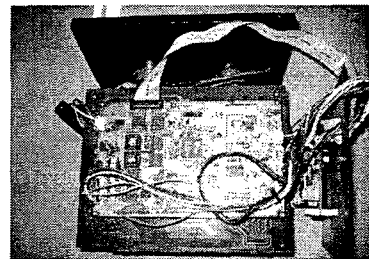


그림 4 개발된 BLDC 모터용 제어기
Fig. 4 The designed controller for BLDC motor

3상 BLDC 모터는 고정자를 구비하는 회전자를 포함하는데, 고정자는 3개의 위상 A, B, C로 구성되며 각 위상은 병렬로 접속된 4개의 권선을 갖는다. 각 위상은 직류 전원에서는 직접적으로 그리고 교류 전원의 경우 직류 정류기 통해서 전압 컨트롤러에 병렬로 접속됨으로서 모터가 효율적으로 구동 되도록 구성하였다.

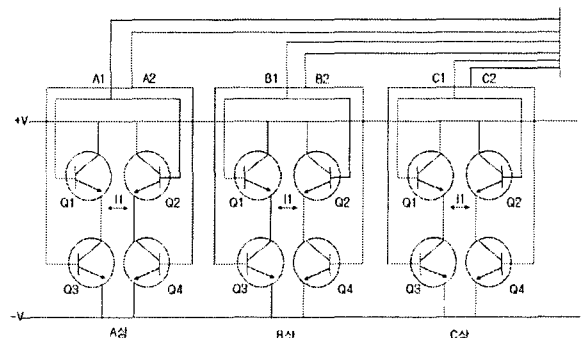


그림 5 개발된 BLDC 모터 구동 회로도
Fig. 5 The developed driving circuit for BLDC motor

모터 구동회로에는 전기 정류 인코더와 모터의 구동성과 회전성이 개선되도록 간결하고 안전하게 제작된 포토센서 및 전

자 정류자로 구성하였다.

전자 커뮤테이터는 4개의 전력 트랜지스터가 고정자 각상의 권선 코일 양단에 연결되는 방식이다. 각상의 권선 코일 양단에 연결된 트랜지스터 중 2개는 포토 센서중 하나의 포토 트랜지스터에 연결되므로 각 상은 2개의 포토 트랜지스터를 제공하며, 포토 트랜지스터의 동작에 따라 전류 방향을 결정할 수 있다.

그림 5에서 처럼 포토 센서는 6개의 포토 트랜지스터(PA1, PB1, PC1, PA2, PB2 및 PC2)로 구성되며, 각 상마다 2개의 포토 트랜지스터가 사용된다. A상, B상 및 C상을 가진 포토 트랜지스터의 배치 각도는 $2\pi / (\text{극수} \times \text{상수})$ 에 의해 계산되는데, 3상 4극 모터의 경우 30° 의 각도를 가지고 배열된다.

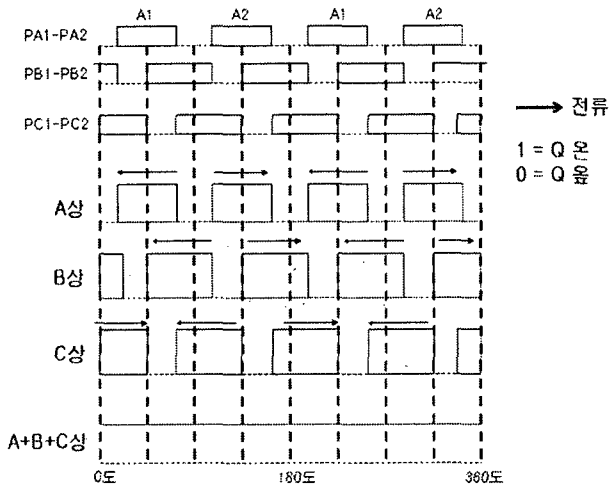


그림 6 3상 4극 모터의 출력 타이밍 도
Fig. 6 The timing diagram of output signal

3. 수치해석에 의한 BLDC 모터의 특성 시뮬레이션

3.1 모터의 성능 Simulation을 위한 MotorPro

BLDC 모터는 PMDC 모터에서 기계적으로 브러시와 정류자에서 행해지던 정류작용을 반도체 스위치를 이용하여 전기적으로 대체한 것으로 미래형 고효율 모터라 말할 수 있다. 본 논문에서는 설계된 BLDC 모터의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이터로 MotorPro를 사용하였다.

MotorPro 프로그램을 실행시킨 후 File 메뉴에서 New 메뉴를 선택하고, BLDC interior를 선택한다. 메인 화면은 다음과 같이 표시된다.

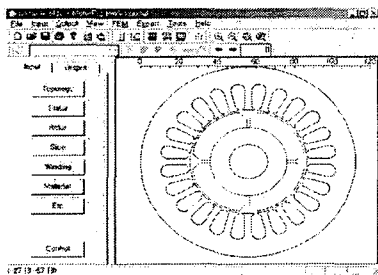


그림 7 MotorPro 실행 초기 화면
Fig. 7 The main display of MotorPro

MotorPro는 BLDC, PMDC, SRM의 3가지 형식을 지원하지만 BLDC 모터에 중점적으로 라이브러리를 제공하고 있다. MotorPro에서 시뮬레이션 가능한 3가지 형태의 BLDC 모터는 다음과 같다.

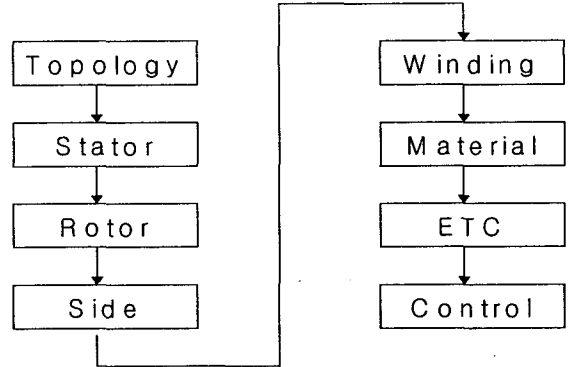


그림 8 BLDC 모터 설계 순서도
Fig. 8 The flowchart of design of BLDC motor

MotorPro를 사용하여 BLDC 모터를 설계하기 위해서는 프로그램에 설계 변수들과 형상 치수와 같은 물리적인 수치를 형식에 따라 입력하여야 하는데, 변수의 입력은 그림 8의 순서로 진행한다.

3.2 BLDC 모터의 특성 시뮬레이션

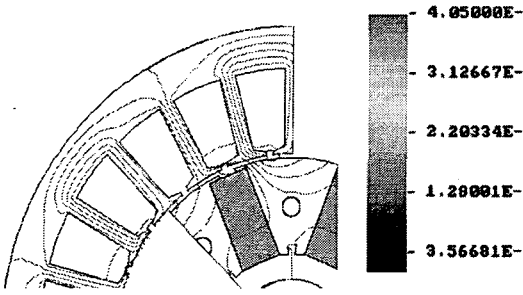
본 연구에서는 수치해석 결과를 활용하여 최적화된 BLDC 모터를 설계함으로써 모터 실제 제작시 모터의 크기를 최소화할 수 있으며, 양산시 생산원가를 충분히 낮추는데 연구목적이 있다. BLDC 모터의 속도-출력 특성, 효율 등 전동기 성능과 관련된 특성을 파악하고 전동기의 출력 및 효율에 큰 영향을 미치는 회전자 및 권선에 나타나는 전자장의 분포를 해석하였다.

표 2 시뮬레이션에 사용한 모터 사양
Table 2 The parameters of motor for simulation

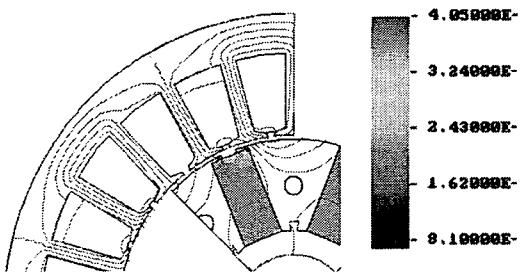
Stator [inch]		Rotor [inch]	
Pole number	8	Rotor Outer Dia.	3.403
Phase number	3	Magnet length axis	2.362
Stator Outer Dia.	5.827	Magnet width	0.1378
Stator Inner Dia.	3.482	Magnet height	0.6327
Stator stack length	2.3622	Conductor	
Air-gap length	0.03937	Current density	4.5[A/mm ²]
Teeth width	0.086614	Turn numbers	40 Turn
Slot height	0.751	Fill factor	30 [%]
Slot opening width	0.07874	Conductor Dia.	0.07618

본 연구에 사용한 BLDC 모터는 Spoke Type이며, 시뮬레이션에 사용한 권선은 AWG 16, 슬롯내의 총 권선 수는 40[턴] 그리고 각 상 및 슬롯당 도체수는 20[EA]이다.

② 상전류 230[A]를 인가한 경우.



③ 상전류 270[A]를 인가한 경우.



4. 결 론

본 연구에서는 10Hp BLDC 모터용 컨트롤러를 제작하였으며, 무부하시 나타나는 역기전력의 크기 및 토크 특성을 수치해석에 의하여 진행하였다.

시뮬레이션 결과를 활용하면 모터의 크기를 최소화 할뿐만 아니라, 고속에서도 높은 출력을 내도록 최적화된 BLDC 모터 설계가 가능할 것으로 사료된다. 연구 결과의 기대 효과 및 활용계획을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 산학 협력 체제를 구축하고 있는 (주)PKS 사와 공동 연구결과, 현재 중국에 수출추진 중인 전기자전거용 250[W] BLDC 전동기 개발에 활용 예정이다.
- 2) 3.5Hp HVAC용 BLDC Motor 설계시 유한요소법에 의한 수치해석을 적용하여 모터의 성능을 검증한다.
- 3) 현재 미국에서 전기 자동차 및 냉난방용 컴프레서 분야에서 시장을 확보하고 있는 UMC를 통하여 BLDC 전동기의 미국시장에 참여할 예정이다.

This work was supported in part by the Post-doctoral Fellowship Program of Ministry of Commerce, Industry & Energy(MOCIE).

참 고 문 헌

[1] C. chan and K.Chau, "An advanced permanent magnet motor drive system for battery powered

electric vehicle", IEEE Transactions on vehicular Technology, vol 45, pp. 180-188, 1996.

[2] F. Bernot, L. Gonthier, and S. Elbaroun, "High efficiency drive for electrical vehicles, permanent magnet wheel motor fed by two stage converter", proceedings of the 7th European Conference on Power electronics and Applications, EPE '97, vol. 1, pp. 554-559, 1997

[3] N. van der Duijn Schouten, B. gordon, and R. McMahon, "Multiphase induction motors for intergrated drives", Conference record of the IEE International Conference on Electrical Machines and Drives, EMD '99, pp. 6-11, Sep. 1999

[4] HCEM, BLDC전동기설계고급, 2004

[5] N. van der Duijin Schouten, "Multiphase induction motor drives", Master's thesis, Cambridge University, 1999

[6] Ushendibada. C.Mupambireyi, "High phase number induction motors for battery applications", Master's thesis, Cambridge University, Aug. 2000

[7] Ochije, N.Kenneth, "Simple torque control schemes for low voltage traction drives", Master's thesis, Cambridge University, Aug. 2001

저 자 소 개



우 천 희 (禹天熙)

1961년 6월 5일생. 1985년 연세대 전기과 졸업. 동대학원 석사(1993). 동대학원 전기 컴퓨터 공학박사(2000). 1985-1995 현대중공업 중앙연구소 선임연구원. 영국 케임브리지대학 박사후 연구원(2005). 1995-현재 명지전문대학 전기과 부교수. 관심분야: 디지털형 제어시스템, 실시간 제어

Tel : 02-300-1266
 Fax : 02-300-1093
 E-mail : chwoo@mail.mjc.ac.kr



박 건 식 (朴建植)

1947년 11월 13일생. 1971년 서강대 생물학과 졸업. 1986 Northrop Univ. Computer Science 수학. 2001년 현민시스템부사장, 2003년-현재: (주)PKS 대표이사. 관심분야: BLDC 모터 및 제어기 제작

Tel : 02-703-4323
 Fax : 02-858-1952
 E-mail : ks1113@hanmail.net