

브러시리스 전동기용 다기능 제어구동장치 개발

정대원
호남대학교 공과대학 전기공학과

Multi-purpose Digital Controller Development for Brushless DC Motors

Dae-Won Chung
Honam University, Electrical Engineering Department

Abstract - 브러시리스용 다기능 제어구동장치를 80C196KC 콘트롤러와 IPM으로 단순화하여 개발하여 기존의 TTL 소자 구성에 비하여 하드웨어를 가장 단순화시키고 표준화제품의 개발을 유도하였다. 대신에 대부분의 기능을 소프트웨어로 처리함으로써 설계의 융통성과 확장성을 높이고 고성능 저가격의 제품을 개발할 수 있었다. 특히, 속도 센서로 자극검출에 필요한 홀센서를 이용함으로써 기존 엔코드 센서에 비하여 속도 분해능은 다소 떨어지지만 이 센서를 없앨 수 있어 제품가격을 낮추고, 크기를 줄일 수 있는 장점을 갖는다. 제어 구동장치의 성능시험을 통하여 개발결과를 검증하였으며, 고정밀 속도제어를 실현할 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

직류전동기는 교류전동기에 비하여 가속력이 우수하고 큰 기동 토크와 토크 제어특성이 우수할 뿐만 아니라 속도제어특성이 우수하여 정밀속도제어가 요구되는 서보형 제어기에 주로 활용된다. 브러시리스 전동기(BLDC)는 기계적 마찰부인 브러시의 마모현상을 없애고 영구자석을 회전자로 채택하고 권선을 고정자로 사용함으로써 轉流작용을 하는 브러시를 정지형 스위칭 소자로 대체한 전동기이다. 이는 설계면에서 AC 전동기와 매우 비슷한 구조를 갖는다. BLDC 속도제어신호는 기본적으로 디지털 신호를 사용함으로써 원칩 콘트롤러의 채택이 용이하다. 원칩 콘트롤러는 제어구동 회로를 위해 필요한 하드웨어 구성을 최소한으로 줄이고, 이를 소프트웨어로 대체할 수 있다. 즉, BLDC는 사용목적과 기능별로 다양한 형태의 제어조건이 요구되지만 이를 미리 설계하여 EPROM형 메모리에 수용하여 다기능을 가진 제어구동장치의 구현이 가능하게 한다.

BLDC 속도와 위치측정을 위하여 엔코드, 리졸버, 타코미터 등이 주로 사용되어 왔다. 이로인해 제품가격을 상승시키고, 하드웨어 고장요소를 증가시켰다. 또한, 홀센서를 없앤 홀센서없는 BLDC의 연구와 개발이 많이 진행되어 상용화된 선 보이고 있으나, 모터의 역기전력 혹은 전류신호를 측정하여 속도를 추정하는 방법을 사용함으로써 시동초기의 회전자의 위치와 회전방향을 결정하기 어려운 점등이 있어 여전히 홀센서없는 BLDC 전동기의 문제점으로 지적되고 있다.

본 논문에서는 사용목적과 기능별로 다양한 운전조건이 요구되어 다양한 모델이 필요하였으나, 이 제어장치의 하드웨어를 가능한 단순화하여 표준화제품으로 유도하고 대신에 소프트웨어를 요구조건에 따라 다양하게 설계하여 제품의 생산성과 가격 경쟁력을 높이도록 하였다. 즉, 전동기 부하별 요구되는 구동장치의 용량은 사용자가 지능형 인버터인 IPM을 적절히 선정하고, 요구되는 제어요건은 필요한 소프트웨어를 미리 탑재하든지 추가답재가 가능하도록 하였다. 특히, 페루-프 속도제어를 위해 요구되는 속도센서를 자극 위치검출을 위한 홀센서를 겸용하여 고정밀의 속도제어가 가능하도록 하였

다. 하드웨어를 그 만큼 줄이고 가능한 소프트웨어로 처리하여 대체함으로써 확장성과 설계의 융통성을 높이고 대신에 제품가격은 낮출 수 있도록 하였다. 개발된 다목적 제어구동장치는 성능시험과 시험운전을 통하여 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 브러시리스 전동기

브러시리스 전동기는 기본적으로 영구자석 회전자와 고정자 권선, 회전자 위치검출용 홀센서, 코일 전압 스위칭을 위한 인버터(IPM) 및 제어기로 구성된다. 특히, 전기자는 권선을 사용하여 다상교류 유도 전동기와 구조와 동작원리면에서 아주 비슷하고 회전자 위치 검출에 사용되는 홀센서는 전기적으로 120도 위상을 갖도록 고정자 주변에 위치한다. 홀센서는 회전하는 영구자석의 N극 (혹은 S극)을 검출하여 연속적인 회전동작을 위해 적절한 제어신호에 의해 해당 권선의 인버터를 스위칭할 수 있도록 제어신호를 발생한다. 한편, 회전 토크의 맥류를 줄이고 출력 효율을 높이기 위하여 다극의 회전자가 설계되고, 본 연구개발에서는 3상 8극형 BLDC를 기준으로 설계하였다. 그림 1에서 3상 8극형 BLDC 회전자의 자속분포를 나타내었다.



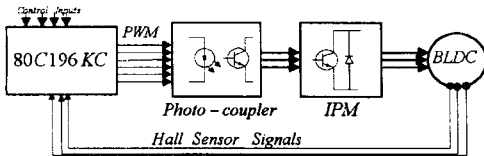
[그림 1] 8극형 회전자의 자속분포

2.2 제어구동장치 설계

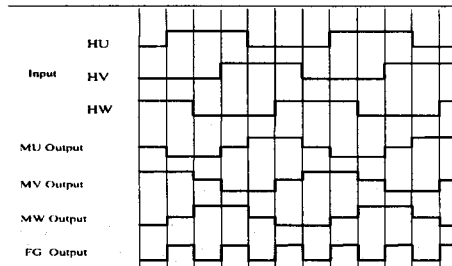
2.2.1 하드웨어 구성

본 시스템 제어구동장치의 하드웨어는 가능한 단순화하고 표준화를 유도하여 설계제작을 용이하도록 하였다. 디지털 제어신호는 80C196KC의 원칩 콘트롤러에서 IPM 스위칭신호와 속도가변을 위한 PWM 신호를 제어 운전 요건에 따라 발생한다. 또한, 전동기 권선의 스위칭 동작을 위해 요구되는 인버터 회로는 IPM 모듈의 IC회로(모델명, 미쓰비시 PS21353)로 대체함으로써 하드웨어의 설계를 매우 단순화시켰다. 과전류보호, 스위칭 데드타임 보상, 전압 록아웃, 노이즈 차단 등 모든

보회회로가 IPM 회로에서 내장되어 외부회로에서 특별한 고려를 하지 않아도 되는 장점을 갖는다. 전동기 토-크제어를 위해서 전류피드백제어가 요구되어 이를 위해서 고정자 전류를 알아야 한다. 그러므로 정밀한 저항이나 전류검출회로와 전류증폭회로가 필요한 등 전체적으로 복잡하게 만든다. 서보제어에서 전류제어에 의한 제어토크량을 제어하지 않고 속도 혹은 위치에서에서는 특별히 요구되지도 않으므로 구하여 복잡한 제어루-프를 구성할 필요가 없다. 따라서, 본 연구에서는 속도 피드백제어에 의한 페루-프만을 구성하였고, [그림 2에서 본 제어 구동장치의 구성도를 보인다. 한편, 페루-프 속도 제어를 위해 필요한 속도센서는 스위칭 동작을 위해 전동기에 설치되는 3개의 홀센서의 각 신호를 EXNOR 논리연산을 통해서 FG 센서신호를 얻을 수 있다. 이는 1개 홀센서 신호는 속도검출의 분해능이 낮으므로 이를 3채배하여 연속속도펄스신호를 만들기 위함이다. 각 홀센서의 전기각 360도 회전시 1주기당 3개의 FG 파형 신호를 만들 수 있으며, 8극 모터인 경우 모터가 1회전하는 동안 $3 \times (8/2) = 12$ 개의 펄스 신호를 얻어 기계각 30도 간격으로 자극 위치 정보를 얻고, 전기각 360도 회전은 기계각으로 30도 회전함을 뜻한다. 그림 3에서 홀센서 신호에 따른 각 권선의 스위칭 신호와 FG 신호를 보인다. 따라서, 홀센서는 BLDC 회전자의 자극위치 검출과 속도센서의 역할을 동시에 수행하여 속도 센서를 없앨 수 있는 장점을 갖도록 하였다. 광전소자는 제어신호와 전력회로간 전기적인 격리를 위해서 사용되었으며, 각상당 2개의 스위칭 트랜지스터 신호입력에 사용된다.



[그림 2] 제어 구동장치 하드웨어 구성도



[그림 3] 홀소자, 권선전압 및 FG 신호파형

2.2.2 소프트웨어 설계

다기능 속도제어를 위한 운전유형은 크게 3가지로 구분하였다. 즉, 속도 가변이 불필요한 정속도 운전의 경우(모드 1)와, 속도제어는 가능하나 개루-프 속도제어로 소프트한 기동과 소프트한 정지가 요구되는 경우(모드 2)와 속도 피드백 신호에 의한 페루-프 속도제어(모드 3)로 구분하였다. 각 운전모드별 운전형태와 요건이 각기 다르므로 각 경우별 제어 알고리즘을 80C196KC의 EPROM에 내장하여 사용목적과 용도별로 사용자가 적절히 선택할 수 있도록 설계하였다. 또한, PWM 출력신호와 각 권선의 출력신호를 GAL에 의한 AND 게이트로 처리함으로써 불필요한 데이터의 충돌을 피하도록 하였다.

모드 1과 2는 개루-프 속도 제어으로써 별도의 속도측

정신호가 불필요하므로, 모드 1은 최대 정속운전이 가능하도록 처리하고, 모드 2는 가변저항에 의한 속도명령 신호에 따라 가변속이 가능하고, 기동 및 정지시에는 소프트한 출발과 정지가 가능하도록 하였다. 한편, 모드 3은 페루-프 제어를 위한 PI 제어 알고리즘으로 다음 이산신호를 따른다.

$$\text{속도편차} : \epsilon = w_{ref} - w \quad (1)$$

$$\text{초당평균회전수 (rps)} : w = \frac{\sum w_{GF}}{12} \quad (2)$$

(단, w_{GF} : FG의 펄스카운터 수)

$$\text{PWM 출력} : D_{new} = D_{old} + \Delta D \quad (3)$$

디지털 PI 제어알고리즘 :

$$G_D(z) = K_p + \frac{K_I}{1-z^{-1}} \quad (4)$$

$$\text{혹은 } D(kT) = D((k-1)T) + K_p[w((k-1)T) - w(kT)] + K_I[w_{ref}(kT) - w(kT)] \quad (5)$$

(단, k 는 임의 시간을, T 는 샘플링시간을 뜻함)

Ziegler-Nichols의 동조법[7]에 따라 연속시간 PI 제어기의 이득상수는 $K_p = 0.6K_m$, $K_I = \frac{K_p w_m}{\pi}$ 의 선정기준에 따라 본 논문에서는 $K_p = 1.6$, $K_I = 33$ 으로 선정하였다.

제어동작은 개루-프 속도제어, 페루-프 속도제어, 정·역회전, 정지·운전 및 속도조절 기능을 갖는다. 또한, 부하전류 페루-프 제어에 의한 부하토크 제어는 고려하지 않았다. 한편, 홀소자 신호별 IPM 각상별 스위칭은 표 1에 따른다. 80C196KC 콘트롤러의 프로그램은 C언어로 작성되었으며, 각 명령어 및 하드웨어의 상세한 내용은 참고문헌[3]을 참조한다.

Truth Table									
Input			MU		MV		MW		
HU	HV	HW	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	
H	L	H	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
H	L	L	OFF	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF
H	H	L	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
L	H	L	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
L	H	H	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
L	L	H	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON
L	L	L	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
H	H	H	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

[표 1] 홀신호와 전원소자 스위칭 진리표

2.3 성능시험 및 결과

개발된 BLDC 제어구동장치의 성능시험을 위해 고려된 모터 사양은 다음과 같다: 24VDC, 3상 8극, 1250rpm, 30Watt 출력, 10Kgf-cm 토-크를 갖는다. 그림 4, 5에서는 홀센서 신호와 고장자권선에 인가되는 전압을 오실로스코프로 관측한 파형을 각각 보인다. 그림을 통해서 원하는 파형을 얻을 수 있었다. 그림 6, 7에서 계단형 함수 인가에 따른 시뮬레이션 결과와 실제 시험을 통한 실험결과를 보인다. 전동기 속도는 큰 오버슈트 발생하지 않고 지정된 속도 설정치에 잘 수렴함을 보이고 있다. 그림 8에서 0.5Kgf-cm 정도의 부하토크를 급격히 인가(즉, 외란) 하였을 경우 속도변동을 보인다. 페루-프 제어인 경우 속도 변동율이 매우 낮아 정밀한 속도제어가 가능함을 확인시킨다.

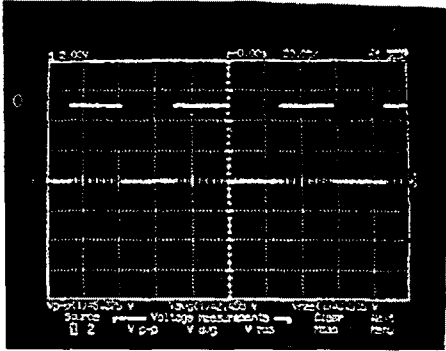
3. 결 론

기존 TTL 소자로 구현되던 BLDC 제어구동장치를 80C196KC 전용 콘트롤러 및 IPM 전용칩으로 구성하여 단순화한 하드웨어로 대체함으로써 다기능을 갖는 제어구동장치의 개발이 가능하였다. 이는 관련설계를 단순화 시키고 표준화를 유도할 수 있고, 다기능 운전요건은 소프트웨어로 처리함으로써 설계의 융통성과 확장성을 높였다. 특히, 전용칩인 80C196KC와 IPM의 가격이 점점 낮아지고 있는 가운데 다기능 저가격의 제어구동장치를 개발함으로써 BLDC의 장점을 살려서 기존 직류 전동기 및 교류전동기에 비해 현안 문제점을 해결함과 동시에 고성능의 정밀 속도제어가 가능하였다. 개발된 BLDC용 다목적 제어구동장치의 성능시험을 통하여 제어 성능을 검증하였다. 이러한 기술은 관련 산업발전에 크게 이바지할 것으로 믿는다.

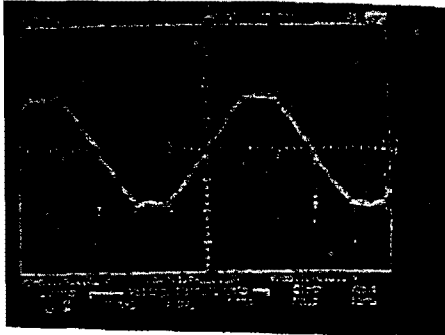
(참 고 문 헌)

- [1] Takashi Kenjo, Permanent Magnetic and Brushless DC Motors, Sogo Electronics Publishing Company, Tokyo, 1984
- [2] 임영철 외 3인, "브러시리스 전동기와 제어회로" 전남대학교 전기공학과, 자동제어연구실
- [3] 전달복, C에 의한 80C196KC/KD, 양서각, 1998
- [4] S.P. Natarajan, et al "Implementation of a Novel Digital Controller for a Permanent Magnet Brusless DC Motor," Int. Conf. on Power Electronics and Drive Syst, PEDS'99, Hong Kong, pp.708-713, 1999
- [5] Jong-Bae Lee, et al, "A Study on the Digital Controller of Brushless DC motor Using Fuzzy Logic" ICEE'99, Hong Kong, pp.243-246, 1999
- [6] "Dual-In-Line Package Intelligent Power Modules" Mitsubishi Semiconductors
- [7] Bahram Shaian, Michael Hassul, Control System Design using MATLAB, Prentice Hall, pp284-287, 1993

본 과제는 (재) 광주·전남 테크노파크의 지원과제로 수행되었습니다.



[그림 4] 홀센서 신호의 파형



[그림 5] 각 권선에 인가된 전압파형

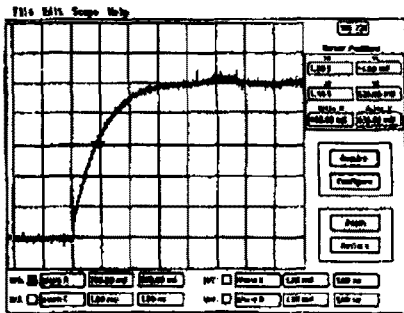
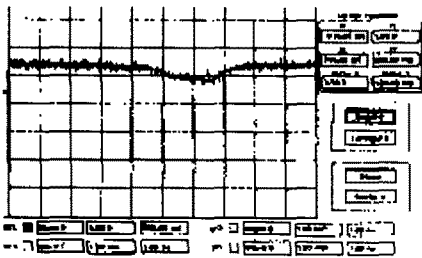


Fig. 10 Experimental result of speed response

[그림 6] 스텝함수로 속도 설정시 출력응답



[그림 7] 부하토크 외란 인가시 속도 응답