

EtherCAT을 이용한 소프트 모터제어기 개발에 관한 연구

A study on Development of Soft-Motor Controller using EtherCAT

문용선, 이영필, 서동진*, 이성호**, 배영철***

Yong-Seon Moon, Young-pil Lee, Dong-Jin Seo*, Sung-Ho Lee**, Young-Chul Bae***

순천대학교 공과대학 정보통신공학부

* 레드원테크놀러지(주), **생산기술연구원광주연구소

*** 전남대학교 공학대학 전기·전자통신·컴퓨터공학부

요약

본 논문에서는 고속의 실시간 모션제어 네트워크인 EtherCAT을 사용하여, 모터제어를 수행할 수 있는 소프트모터제어(Soft-motor control) 방식을 새롭게 제시하고 실험을 통하여 해당 시스템의 성능을 평가하고 실제 시스템 적용 가능성 및 유효성을 검증하였다.

Abstract

In this paper, we proposed new method of soft-motor control which is control method allowing motor control within control stage by using EtherCAT which is real time motion control network of high speed. We also evaluated performance of the system and verified possibility and effectiveness of application into real system through experiments.

Key Words : Soft-motor control, Network, EtherCAT, PID Controller

1. 서론

자동화 시스템의 눈부신 발전에 힘입어 자동화 시스템의 핵심기술이라 할 수 있는 모터제어 기술 역시 많은 발전을 거듭해 왔다. 최근에는 IT 기술의 발전을 기반으로 모터시스템과 네트워크 기술을 접목한 네트워크 기반 모터 제어시스템에 대한 적용이 많은 발전을 보이고 있으며 이에 대한 대표적인 사례로 CANOpen[1], SERCOS[2], Profibus[3] 등이 있다. 현재 사용되는 네트워크 기반 제어시스템의 운용 방식은 상위제어기에서는 하위의 모터시스템을 가동하기 위한 지령신호나 지령신호의 동기화 기능만을 제공하고 실제 모터제어의 경우 대부분 하위의 모터드라이버 단에서 처리를 하고 있는 형태의 구조를 취하고 있다. 이와 같이 모터 제어루프들이 모터 드라이버 단에 고정으로 구성하는 이유는 상위 제어기 단에서 보다 빠른 처리가 가능하다는 것 이외에 실제 제어기 단에서 제어 루프를 구성하였을 때 제어기 단으로 재귀되어 처리되어야 하는 피드백 데이터들(위치, 속도, 전류)을 고속으로 전송할 수 있는 적절한 통신 네트워크가 없기 때문이다.

이러한 드라이버 단에서의 제어가 이루어지는 모터 제어 시스템은 고속 제어, 배선의 양을 줄일 수 있다는 장점이 있으나 다양한 제어 응용에 따른 모터제어의 방식을 바꾸기 어렵다는 문제점과 모터제어 루프들이 드라이버 단에 집중됨으로서 실제 모터 드라이버의 크기가 커진다는 문제점이 발생한다.[4, 5] 물론 자동화 시스템과 같이 고정된 영역에서 작업이 수행되는 경우에는 드라이버의 크기는 크게 문제가 되지 않을 수도 있으나 로봇시스템 및 소규모 제어시스템에서는 모터드라이버의 크기가 큰 문제가 될 수 있으므로 모터 드라이버 단에 고정된 제어방식은 여러 가지 면에서 개선되어야 한다.

본 논문에서는 이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 기존의 모터 드라이버 단에 고정되어 형성되었던 모터제어 루프들을 상위 제어기 단으로 이전하고, 제어기와 모터 드라이버 사이에는 고속의 실시간 모션제어 네트워크인 EtherCAT [6]을 사용하여, 제어데이터 및 피드백 데이터들을 고속의 실시간 전송을 통하여 상위제어기 단에서 모터제어를 가능하게 하는 제어방식인 소프트모터제어(Soft-motor control) 방식을 새롭게 제시하고 실험을 통하여 해당 시스템의 성능을 평가하고 실제 시스템 적용 가능성 및 유효성을 검증하고자 한다.

교신저자 : 배영철

접수일자 : 2007년 10월 18일

완료일자 : 2007년 12월 3일

감사의 글 : 이 논문은 “광양 U-IT 연구사업, 2007” 프로젝트에 의해 지원받았음.

2. 소프트 모터제어 기술

그림 1은 일반적인 모터 제어 기술로서 제어 기법 및 제어

알고리즘에 따라 약간의 차이는 있을 수 있으나, 하드웨어 단에 존재하는 마이크로제어기 내부에 모터제어 루프 및 제어기를 구성하는 방법을 사용하고 있다. 이 경우 상위의 제어기는 각종 파라미터 정보의 다운로드 및 위치, 속도, 토크 등의 동작 기준(reference) 데이터들의 지령만을 담당하고 실제 모터에 대한 제어는 하위의 모터 드라이버에서 전담하여 수행을 하게 된다. 이 방식은 제어루프 및 구조가 하드웨어 적으로 고정되어 있어서 응용 사용자가 이러한 제어 루프의 변경하는 것이 불가능 하며 제어 파라미터 값들에 대한 동적 변경이 어렵다는 단점을 가진다.

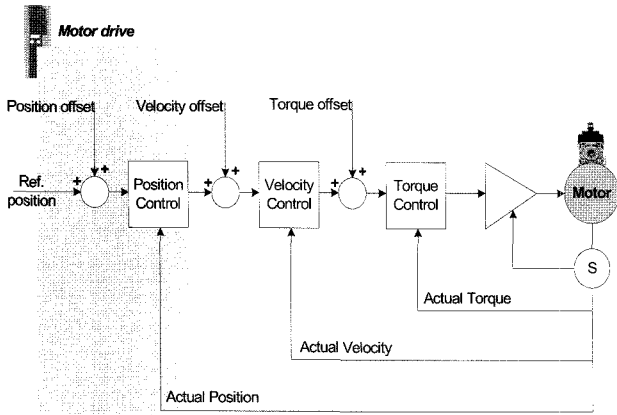


그림 1. 일반적인 모터제어의 루프 구조
Fig. 1 Loop structure of general motor control

그림 2와 같이 표시되는 소프트모터제어 기술은 고속 네트워크를 이용하여 일반적인 모터제어기 및 제어 루프의 구성을 상위 제어기단으로 옮겨 제어하는 새로운 개념의 모터 제어 방식으로서 기존의 하드웨어 고정적인 제어방식의 여러 가지 단점들을 해결할 수 있는 구조라 할 수 있다.

소프트 모터제어 시스템에서 하위의 모터 드라이버는 모터가 구동 할 때와 운전 중 모터에서 피드백 되는 데이터들(위치, 속도, 전류(토크))을 수집하여 고속의 네트워크를 통하여 전송하는 기능만을 담당하고, 모터에 대한 제어는 상위의 제어기 상에 구현된 제어 알고리즘을 통하여 제어하도록 하는데 주목적을 두고 있다. 소프트 모터제어를 사용하였을 경우 얻게 되는 장점으로는 상위 제어기의 소프트웨어(예: C++, Visual Basic, PLC 등) 상에서 직접 제어기 설계가 가능하므로 다양한 모터 제어기 구성 및 제어 알고리즘 적용이 가능하며, 소프트웨어적인 제어 구조로 인하여 모터 운전 중에도 쉽게 제어기의 변경이 가능하다는 장점이 있다. 또한 모터의 각종 제어 파라미터 및 제어기가 상위의 소프트웨어 단에 존재 하므로 모터 드라이버 단의 하드웨어 적인 크기를 감소할 수 있다는 장점을 가진다.

이를 위해서는 제어기와 모터 드라이버 간의 고속 네트워크가 기반이 되어야 한다. 모터의 전류(토크)제어의 경우 100us 정도의 루프 주기를 가지며, 속도 및 위치 제어의 경우 ms 급의 주기를 가지고 제어를 하는 것이 일반적이다. 그러나 기존에는 이러한 루프의 주기를 만족할 만한 통신 네트워크가 없어 네트워크를 통한 제어 기술에 대한 적용이 어려웠으나 최근에는 다양한 형태의 고속 네트워크 프로토콜 [6-7]들이 개발되어 사용되고 있어 그림 2와 같은 시스템의 구현을 위한 가능성을 열어 주었다.

본 논문에서는 네트워크 기반 소프트 모터제어기의 구현

을 위하여 현존하는 최고속의 네트워크 프로토콜로 평가되어 지는 제어용 Ethernet 기반의 고속 모션제어 네트워크인 EtherCAT을 사용하여 소프트 모터제어기 및 시스템을 구현 하였다.

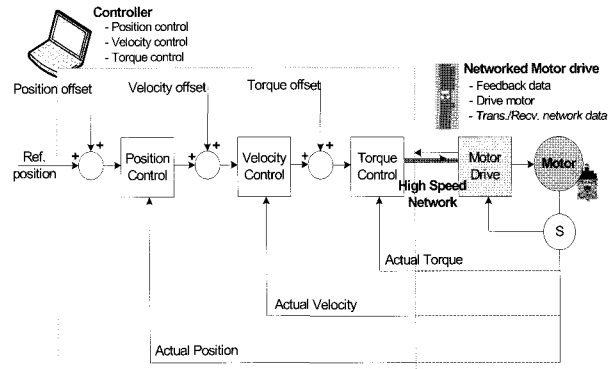


그림 2. 네트워크 기반 소프트 모터제어 구조
Fig. 2 Structure of soft-motor control based on network

3. 시스템 설계 및 구현

네트워크 기반의 소프트 모터제어기의 개발을 위하여 BLDC(Brushless Direct Current) 모터를 사용하였다. BLDC 모터는 속도 특성이 우수하여 속도제어 응용에 주로 사용되는 모터로서 비교적 구현이 간단하여 소프트 모터제어기 및 제어시스템의 성능을 평가하기 위한 적절한 모터로서 평가된다. 그림 3은 본 논문을 통하여 구현될 BLDC 모터의 소프트 모터제어기를 구조를 나타낸다.

BLDC 모터의 경우 도제어 특성은 우수하나, 홀센서의 신호를 수신하여 교번 전류를 흘려주는 형태로 동작하므로 위치 분해능은 뛰어나지 못하다는 문제점이 있다. 본 논문에서 BLDC 소프트 모터제어는 속도제어기에 중점을 두었으며, 위치제어는 고려하지 않았다. 그림 3의 구조를 가지는 시스템 구현을 위해 사용되는 시스템 구성 컴포넌트는 그림 4와 같이 구성된다.

네트워크 기반 소프트 모터제어 시스템의 설계 및 구현은 상위 제어기 부분에 대한 개발과 하위의 네트워크 기반 모터 드라이버의 개발로 구분된다. 상위 제어기 부분에서는 BLDC 모터를 제어하는 소프트 모터제어기가 구현되며, 하위의 네트워크 기반 모터 드라이버 부분에서는 고속의 EtherCAT 통신 인터페이스 모듈의 개발과 BLDC 모터 드라이버의 개발로 구분된다.

3.1. BLDC 모터 드라이버 설계

소프트 모터제어기가 적용되는 네트워크 기반 모터 제어 시스템에서 모터 드라이버의 역할은 네트워크를 통하여 전송된 제어신호를 수신하여 해당 제어 명령에 맞게 모터를 구동하거나 모터 기동 간 피드백 되는 값들을 수신 및 처리하여 네트워크로 전송하는 기능만을 담당한다. 그림 5는 본 논문에서 구현될 BLDC 모터드라이버의 내부 블록 구조를 나타낸다.

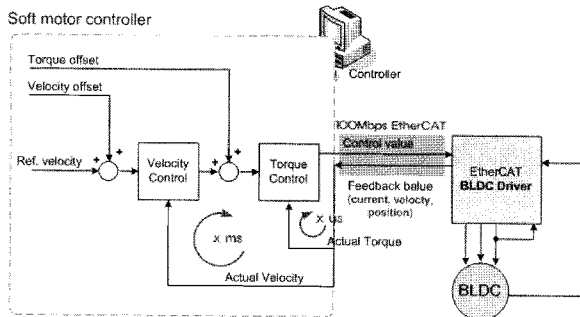


그림 3. BLDC 모터 소프트 제어기의 루프 구조
Fig. 3 Loop structure of BLDC motor soft controller

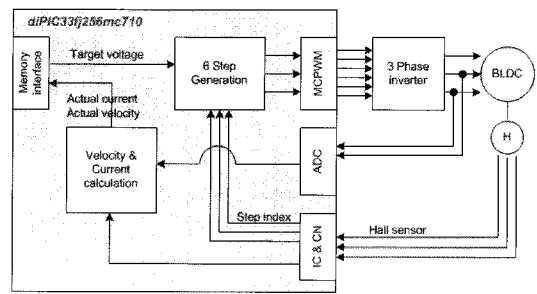


그림 5. BLDC 모터 드라이버 블록 구조
Fig. 5 Block diagram of BLDC motor driver.

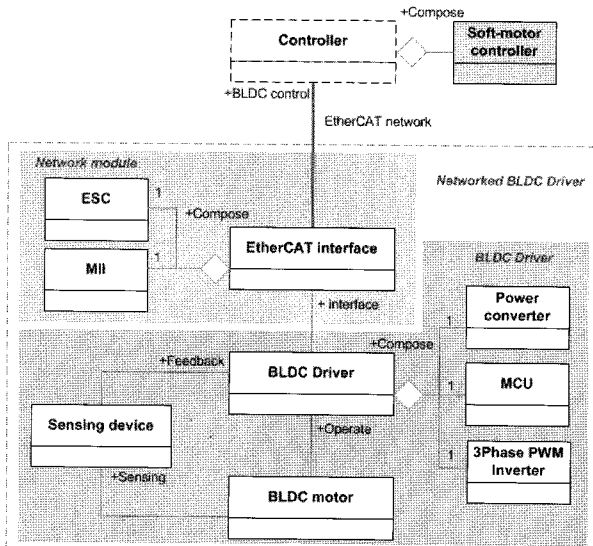


그림 4. 네트워크 기반 소프트 모터시스템 구성 클래스 모델
Fig. 4. Class model of soft motor system based on network

그림 5의 BLDC 모터 드라이버는 소프트 모터제어기 적용을 위하여 설계된 드라이버로서 기존의 모터 드라이버에 포함되는 속도, 전류 제어기 부분은 상위 제어기 단으로 구성되어 있어 포함되어 있지 않다. 그리고 기본적인 구동 연산 역시 복잡하지 않고, 플로팅 포인트 연산이 거의 필요 없으므로 DSP를 사용하지 않고 범용의 16비트 마이크로컨트롤러인 DSPIC33FJ 마이크로컨트롤러 시리즈를 사용하여 구현하였다.

그림 5의 BLDC 모터 드라이버의 기본적인 동작은 EtherCAT 네트워크로부터 전송되는 지령 전압을 기반으로 이루어지며 인가되는 전압 지령은 BLDC 모터의 PWM 듀티비를 조정하며, 모터 위상 전압에 대한 인가는 BLDC 모터에 부착된 홀 센서의 신호를 수신하여 해당 위상전압을 인가하는 구조로 되었다. 그리고 기동 간 전류제어를 위한 전류 센싱 부분과 홀신호를 이용한 속도계산 부분이 추가적으로 이루어진다.

3.2 EtherCAT 인터페이스 설계

EtherCAT 인터페이스 부분은 상위 제어기와 고속의 EtherCAT 통신을 통하여 통신을 실시하며 제어기로부터 수신된 제어 데이터를 BLDC 모터 드라이버로 전송하거나 BLDC 모터 드라이버로부터 모터 피드백 데이터들인 속도, 전류 측정값을 수신 받아 고속의 EtherCAT 통신상에 업데이트하여 상위 제어기로 전송하는 기능을 담당한다. 그림 6은 EtherCAT 인터페이스 모듈의 내부 블록 구조를 나타낸다.

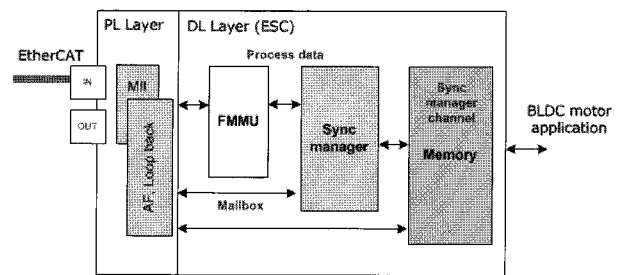


그림 6. EtherCAT 인터페이스 모듈 구조
Fig. 6 EtherCAT interface module structure

제어용 표준 통신 프로토콜의 대부분은 통신 OSI 7 계층 중에서 1, 2, 7 계층 혹은 1, 2, 3, 7 계층으로만 구현된다. 본 논문에 사용되는 EtherCAT 통신은 1, 2, 7 계층을 만족하고 있다. 그림 6의 EtherCAT 인터페이스 모듈은 통신 OSI 7 계층 중에서 1, 2 계층을 구현하고 있으며, 제 7 계층인 Application 계층은 BLDC 모터 드라이버 상에서 추가적으로 구현하였다.

3.3 Slave XML DD 파일 설계

BLDC 모터 드라이버의 개발이 완료되면, 개발된 BLDC 모터 드라이버에 대한 정보를 기술하는 Device Description (DD) 파일이 최종적으로 설계되어 상위 제어기에 추가되어야 한다. 이는 네트워크 기반 시스템에서는 상위 제어기는 DD 정보를 기반으로 네트워크 상에 분산된 디바이스들을 인식하기 때문이다. 그림 7은 EtherCAT 네트워크 시스템 상에서의 디바이스 인식 및 통신에 대한 개념적인 구조를 나타낸다.

상위제어기는 그림 7의 구조에서와 같이 작성된 DD 정보를 파싱하여 해당 디바이스와의 통신을 위한 텔레그램을 생성하며, 데이터 교환을 위한 Process data map을 생성한 후 디바이스와의 통신 및 실시하는 구조를 가진다.

본 논문에서 EtherCAT 네트워크는 DD 파일의 형태를 XML 언어를 기반으로 사용하고 있으며, Slave XML DD 파일이라고 부르고 있다. 그림 8은 개발된 BLDC 드라이버에 대한 Slave XML DD 파일을 나타내고 있다. Slave XML DD 파일의 기본적인 구조는 EtherCAT 표준 상에서 제시하고 있는 Slave XML Schema 구조를 이용하여 구현하였다.

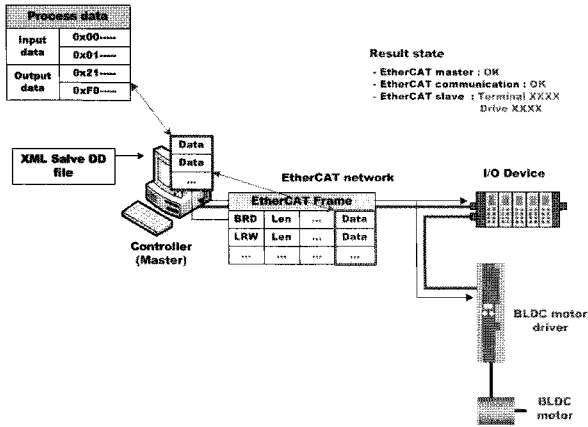


그림 7. XML Slave DD 파일 동작 개념도
Fig. 7 Operation diagram of XML slave DD file

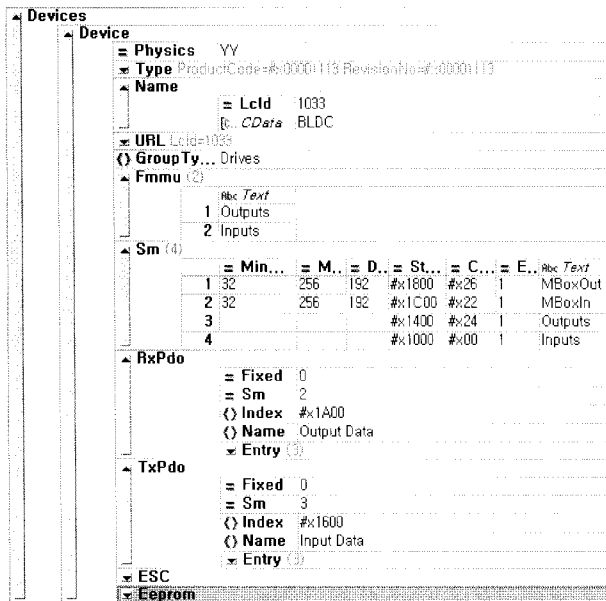


그림 8. BLDC 모터 XML DD 프로파일
Fig. 8 BLDC motor XML DD profile

3.4 소프트 모터제어기 설계

소프트 모터제어기의 설계는 상위의 제어기 단에서 구현이 되며, 개발 환경에 따라 C++, Basic 또는 PLC(Programmable Logical Controller) 환경 상에서 구현될 수 있다. 본 논문에서는 상위 제어기를 PC로 선정하였으며 소프트 모터제어기 구현을 위한 프로그래밍 환경은 Visual C++를 사용하여 개발하였다.

소프트 모터제어기에서는 BLDC 모터의 속도 및 전류를 위한 PID 제어기를 설계하였다. PID 제어기 설계 방법은 기존에는 아날로그 방식으로 구현된 PID 제어기를 많이 하였으나, 최근에는 마이크로프로세서를 이용한 디지털 제어기술의 발달하여 PID 제어기 역시 디지털 방식의 소프트웨어적인 제어기를 많이 사용하고 있다. 그림 9는 BLDC 모터의 속도 및 전류 제어를 위해 사용할 디지털 PID 제어기를 나타낸다.

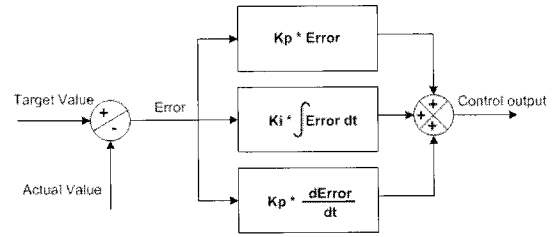


그림 9. 속도 및 전류 PID 제어기 구조
Fig. 9 Speed and current PID controller structure

PID 제어기는 입력 지령 값과 실제 측정된 값 사이의 오차에 대한 증폭, 적분, 미분 과정을 통하여 제어 출력 값을 만들어 내는 형태의 구조를 가진다. 다음은 PID 제어기의 수식 모델을 나타낸다.

$$K_p * Error + K_i * \int Error dt + K_d * \frac{dError}{dt} \quad (1)$$

3.5 시스템 구현

그림 10은 소프트 모터제어기 적용한 구현된 네트워크 기반 BLDC 모터 드라이버를 나타낸다.

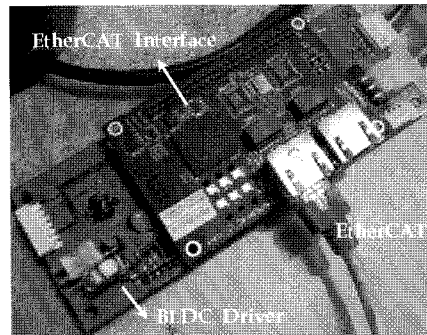


그림 10. 네트워크 기반 BLDC 모터 드라이버 모듈
Fig. 10 Network based BLDC motor drive module

그림 11은 PC 상에 구현된 소프트 모터제어기를 포함한 네트워크 기반 BLDC 모터의 소프트 제어 시스템의 구성을 나타낸다.

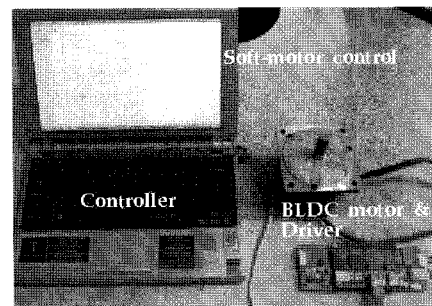


그림 11 네트워크 기반 BLDC 모터 소프트 제어 시스템
Fig. 11 Network based BLDC motor soft control system

4. 실험 및 고찰

네트워크 기반 소프트 모터제어의 성능을 평가하기 위하여 BLDC 모터의 PID 속도 응답에 대한 실험을 실시해 보았다. 실험을 위한 기본적인 시스템의 구성 및 사양은 표 1과 같다.

표 1. 소프트 모터제어기 평가 시스템

Table 1. Evaluation system of soft motor controller

Item	Specification
Controller	Pentium 3. Notebook (PC based control)
OS	Windows OS
Network	EtherCAT - Cycle time : 50us - Update time : 7us per 1 node - Max. node number : 65535 - Max. data size : 1514byte per frame - Max. node distance : 100m
Soft-motor controller	1. Speed PID controller - Loop cycle : 1ms 2. Current PI controller - Loop cycle : 200us
Motor	BLDC motor - Max. rpm : 3000 rpm - Rated power : 200 W
Networked BLDC driver	1. Input voltate : 24VDC 2. Rated Output Current : 8Arms 3. Peak Output Current : 12Arms 4. Speed Range : 200~3000 rpm 4. Operating Method : 3-Phase PWM

입력 속도 1000 rpm, P 이득 0.04, I 이득 0.03, D 이득 0.02의 값을 가지고 PID 제어를 적용하였을 때 BLDC 모터의 속도 응답은 그림 12와 같이 나왔다.

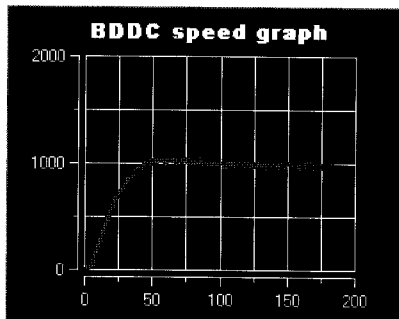


그림 12. PID 이득 적용 후 모터 속도 응답

Fig. 12 Motor speed response after applied PID gain

BLDC 모터 구동 후 측정되는 선간 전압 파형을 그림 13에 나타내었다.

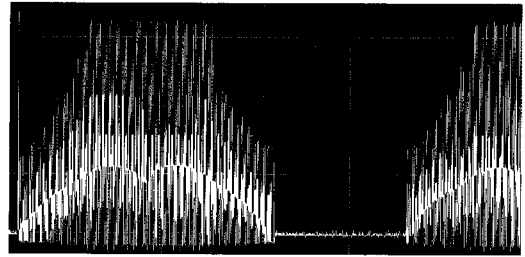


그림 13. BLDC 모터 구동 후 측정되는 선간 전압 파형
 Fig. 13 Line voltage after driving BLDC motor

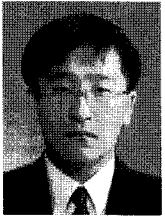
본 논문에서는 기존의 저레벨 모터제어 방식의 구조에서 발생하는 문제점을 해결하기 위하여 상위 제어기 단에서의 소프트웨어 적인 모터제어 방식인 소프트 모터제어 기술을 적용한 제어기 및 모터 제어시스템의 구현 기법을 제시하였다. 소프트 모터제어기 개발 및 시스템 적용을 위하여 비교적 구현이 간단한 BLDC 모터를 대상으로 하는 소프트 모터제어기 및 네트워크 기반 모터 드라이버를 구현하여 해당 시스템을 성능을 평가하였다. BLDC 모터의 속도제어를 기반으로 하는 소프트 모터제어기를 통한 BLDC 모터의 속도 특성을 평가하였다. 실험 결과 디지털 PID 제어기를 적용하였을 속도응답 및 속도 오차, 정상상태 도달 시간 등 여러 가지 경우에서 상당히 만족할 만한 성능이 도출되어 적용 가능성이 검증되었다. 또한 PID 제어기 외에도 다양한 제어기법을 기반으로 하는 소프트 모터제어기의 성능을 더 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문서 제시된 방법은 전류제어에 있어서 처리 속도가 늦어지는 문제점이 발생하였다. 전류제어의 경우 100us 이내의 고속 루프 사이클이 요구되나 소프트 모터제어기 상에서의 제어 성능이 기존의 로우 레벨 기반의 전류 제어 방식에 비해 성능이 떨어지는 것을 파악할 수 있었다. 특히 AC 서보 모터와 같이 전류제어가 핵심이 되는 제어시스템과 비교했을 때 제어 기법의 보완이 과제로 남는다.

참 고 문 헌

- [1] CiA, "DS V4.0.2: CANopen application layer and communication profile", *CAN in Automation*, 2006.
- [2] IEC, "CEI/IEC61491 Second edition : Sercos Specification", *International standard*, 2002.
- [3] PNO, "PROFIBUS Specification", *according to the European Standard*, EN 50170 Volume 2, 1998.
- [4] 정동화, "실무와 연구활용을 위한 전력전자 및 전동기 제어", 인터비전, 2006.
- [5] 김민희, 정장식, "영구자석 동기전동기 서보시스템 제어와 실습", 보성각.
- [6] Beckhoff GmbH, "EtherCAT Communication Specification V1.0", EtherCAT technology Group, 2004.
- [7] 정재교, "Ethernet 기반의 필드버스 기술동향", 기획특집: 차세대를 이끄는 산업용 이더넷과 필드버스 기술, 2007.

저 자 소 개



문용선
1983년 조선대학교 전자공학과 졸업.
1989년 동 대학원 석·박사.
1992년~현재 순천대학교 정보통신공학부
교수

관심분야 : 산업통신망 및 로봇



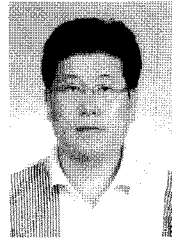
이영필
2006년 순천대학교 전자공학과 졸업.
2006년~현재 동 대학원 석사 재학

관심분야 : 로봇 제어, 모터 제어, 산업용통신망



서동진
2000년 조선대학교 제어계측공학과 졸업
2002년 동 대학원 석사
2004년 미국 카네기 멜론 대학 로보틱스
연구소 교환 연구원
2006년 동 대학원 박사
2006년 (주)한국에센 연구원
2007년~현재 (주)레드윈테크놀로지 부설
로봇연구소 책임연구원

관심분야 : 충돌회피, 위치추정, 로봇 시뮬레이션, 패스플래
닝, 다중로봇 동작조정



이성호
1997년 충남대학교 전기공학과 졸업
1997년 동 대학원 석사
2003년 동 대학원 박사
2003~2007 LG 전자
2007~현재 생산기술연구원 광주연구센터



배영철
1984년 광운대 전기공학과 졸업.
1986년 동 대학원 석사
1997년 동 대학원 박사
1986년~1991년 한국전력공사
1991년~1997년 한국과학기술정보연구원
1997년~2006년 여수대학교 교수
2001년~2002년 Brigham Young
University 방문교수

2006년~현재 전남대학교 공학대학 전기·전자통신·컴퓨터
공학부 교수

관심분야 : 로봇 제어, 카오스 제어 및 동기화, 비선형 제어