

DSP Implementation of a Sinusoidal Encoder using linear Hall Sensor

황정호[†] · 정찬수^{*}
(Jung-Ho Hwang · Chan-Soo Chung)

Abstract - The linear encoder used in the BLAC driving circuit consists usually analog type sensor, and need signal transform from analog sinusoidal to digital one for application in the PWM algorithm that is used to control motor current. When the motor is driven in low speed, it is required many operations and higher quality DSP to convert the hole sensor signal to digital one with enough resolution. In this paper, the another method to convert that signal with enough resolution without calculation of sine function is proposed. This is very simple and have high resolution even if the motor is driving in low speed. To verify the proposed method, BLAC motor is used, and it is proved that the motor is tracking well the reference step signal in the low speed as well as in the high one.

Key Words : Sine encoder, BLDC, BLAC, PMSM, DSP

1. 서론

산업전반에 사용되는 프로세서는 다각화 되고 있는 산업 전반의 다양한 형태와 용도에 적응 하면서 생산되고 있다. 이중 로봇시스템과 서보시스템등 운동제어에 사용되는 모터 제어용 DSP(Digital signal processor)는 제어를 위한 케한 신호 검출용의 ADC(Analog digital converter)와 모터구동신호 출력에 적합한 PWM(pulse width modulation)신호 모듈, 그리고 엔코더 신호를 받아 처리할 수 있는 QEP(Quadrature Encoder Pulse) 회로등 다양한 주변장치와 다른 CPU 또는 컴퓨터와의 통신을 위한 장치, 이러한 시스템을 운영하기 위한 넉넉한 메모리를 포함하여 하나의 칩으로 되어있다. 이러한 다양한 구성은 제어시스템 구동 시 모터의 상황을 판단 및 제어, 그리고 구동하기에 충분한 기능을 가지고 있다.

최근 경제형 제어 시스템에 사용되는 BLDC(Brushless DC)모터는 영구자석형 회전자기 회전하는 구조로 직류모터에 비해 관성이 작게 되어 빠른 가감속과 순간적인 최대 토크 출력이 발생하는 장점이 있다. 하지만 저속운전시 역기전력에 많은 잡음이 포함되어 있어서, 이를 바탕으로 하는 홀 센서에 의한 속도 정보는 모터에 진동과 소음을 발생시킬 수 있다.[1] PMSM(permanent-magnet synchronous motor) 이라고 불리우는 BLAC(Brushless AC) 모터는 서보시스템에 주로 사용되며, 정현파 제어신호를 사용하면 정현파 역기전력을 발생하기 때문에 넓은 범위의 속도 영역에서 안정된

토크를 발생할 수 있다. 모터에 장착된 엔코더는 회전자기 초기값과 속도정보 획득을 목적으로 사용된다. 이 엔코더는 속도에 대한 정밀한 값을 추출하기 위한 고분해능을 요구하거나, 역기전력과 동기된 연속된 신호를 사용하는 엔코더나, 레졸버를 사용하기도 한다. 특히 레졸버를 사용하는 경우 매우 간단하고 견고한 구조로 되어 있어 속도에 관계없이 안정된 출력 신호를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 환경 영향에 대한 신뢰성 및 내구성이 여타의 센서보다 상대적으로 우수하지만, 고가의 RDC(Resolver to Digital converter) 칩을 추가로 사용해야 하는 단점을 가지고 있다. 최근 레졸버 신호를 DSP 신호처리에 의한 소프트웨어 RDC 방법이 레졸버 시스템의 대안으로 제시되고 있다. DSP를 사용하여 레졸버 시스템을 구동 할 경우 ADC를 활용하여 얻은 출력 값으로부터 회전자기 위치와 속도를 구하기 위한 연산을 주기적으로 고속반복 수행해야 하므로, CPU의 부하가 많이 증가하여 저가의 칩으로 구현할 경우 모터 출력 파형 연산에 필요한 프로세싱 시간과 리소스 확보가 어렵게 된다. [2][3][7]

모터구동용 전류제어를 위한 PWM방식은 이전에는 히스테리시스 전류제어방식과 삼각파 비교방식이 많이 사용되었으나 최근에는 SVPWM(Space Vector PWM) 방식을 주로 사용하고 있다. SVPWM의 경우 방법이 복잡하여 많은 연산을 수행해야 하나 지금까지 방법 중 상대적으로 만족스런 성능을 보여준다.[4][5]만약 SVPWM 방법을 고가의 고속의 DSP를 적용 할 경우 구현이 가능 할 것으로 생각된다. 하지만 현재 산업현장에서 사용 할 것을 고려한다면 일반적으로 저가의 DSP를 사용하기 때문에 비교적 간단하고 높은 신뢰성 있는 방법을 적용해야 할 것이다.[6]

본 연구에서는 저속운전의 안정성 확보와 정밀한 속도제어를 위한 정현파 엔코더 시스템을 사용하는 BLAC 제어방법을 제안한다. 제안된 방법은 BLAC 모터 구동을 위해 Min-Max방식의 PWM 전류제어 방법을 사용하였으며, 가

* 시니어회원 : 숭실대학교 전기공학과 교수
† 교신저자, 정회원 : 숭실대학교 전기공학과 박사과정
E-mail : hwjuh@naver.com
접수일자 : 2011년 7월 29일
최종완료 : 2011년 12월 23일

장 보편적인 PI 제어방식을 적용하여 속도를 제어 할 수 있도록 한다. 정현파와 엔코더는 회전자에 동기된 선형홀센서에서 속도정보를 나타내므로, DSP에서 회전자의 회전속도를 검출하고, 제어기에 연속된 신호정보를 제공한다. 이로 인해 부하 변동량이 심한 경우 일반 홀센서로는 불안했던 저속운전이 안정된 운전이 가능하다.

2. 정현파 엔코더 기법

2.1 최근 정현파를 이용한 각도 추출 방법

정현파와 엔코더는 회전자 축에 동기로 장착된 영구자석와 선형 홀센서에서 발생하는 출력신호를 이용하여 회전자의 위치에 따른 자속의 변화량을 나타내는 정현파형태의 아날로그센서로, 식(1)과 (2)와 같은 출력신호를 가진다.

$$y_1 = u_0 \sin \omega t \tag{1}$$

$$y_2 = u_0 \cos \omega t \tag{2}$$

일 여기서 y_1, y_2 는 $\sin \theta$ 출력, $\cos \theta$ 출력, u_0 는 진폭, ωt 는 주파수이다. 역기전력과 동기된 엔코더신호 출력신호로부터 회전자 위치각을 얻기 위해 복조를 이용하는 방법과 삼각함수(atan)를 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다.

대표적인 복조방법을 이용하는 레졸버는 기준입력신호와 회전자의 위치로 변조된 출력신호를 갖는 회전변압기 형태의 신호를 발생하며, 식(3)과 같은 기준입력 입력 신호에 대해 식(4)와 식(5)와 같은 출력신호를 발생한다.[2]

$$V_{ref} = \sin \varepsilon \tag{3}$$

$$y_3 = u_0 V_{ref} \sin \omega t = u_0 \sin \varepsilon \sin \omega t \tag{4}$$

$$y_4 = u_0 V_{ref} \cos \omega t = u_0 \sin \varepsilon \cos \omega t \tag{5}$$

V_{ref} 는 레졸버의 캐리어 기준신호이고, ε 는 레졸버에서 발생하는 각도이다.

그림 1과 같이 복조를 이용하는 방법은 주로 레졸버에서 사용된다. 레졸버의 캐리어 출력 신호를 입력되는 신호에서 얻어지는 $\sin \theta \cos \theta$ 에 케한 신호와 곱하여 PI제어기를 이용해 회전자 위치각을 구하는 방법이다.[2]

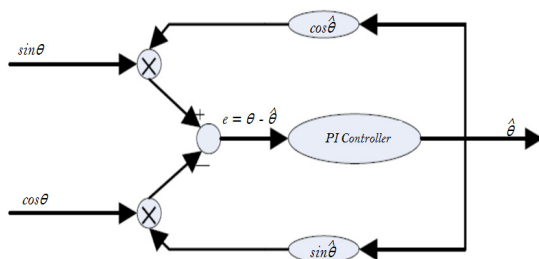


그림 1 레졸버를 이용한 복조신호 처리
Fig. 1 The demodulation signal processing Using Resolver

2.2 개선된 정현파 엔코더 위치추출방법

만일반적인 atan 삼각함수를 이용한 방법은 결국 삼각함수를 연산하기 위해서 많은 계산을 요구하므로 부동소수점 연산이 하드웨어로 지원되지 않는 경제형 프로세서를 사용하게 되면 삼각 함수 연산에 많은 시간이 소모되어 임베디드 제어기의 구현에 많은 어려움이 있다.

본 논문에서 atan 삼각함수 연산을 사용하지 않기 위해 측정된 $\sin \theta, \cos \theta$ 출력 값을 바로 적용하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 식(7), (8)과 같이 정주기 시간 Δt 에, 측정된 $\Delta \sin \theta, \Delta \cos \theta$ 값으로 속도(ω)와 $\sin \theta, \cos \theta$ 출력을 미분으로 구현이 가능하다.

$$x_1 \equiv \frac{\Delta \sin \theta}{\Delta t} = \frac{\Delta \sin \theta}{\Delta \theta} \cdot \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \cos \theta \cdot \omega \tag{7}$$

$$x_2 \equiv \frac{\Delta \cos \theta}{\Delta t} = \frac{\Delta \cos \theta}{\Delta \theta} \cdot \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = -\sin \theta \cdot \omega \tag{8}$$

따라서 식(7)과 (8)을 각각 $\cos \theta, -\sin \theta$ 로 나누어주면 속도를 구할 수 있다. 단, $\sin \theta$ 와 $\cos \theta$ 가 '0' 일 경우가 존재하므로 구간에 따른 조건이 필요하다. 회전에 따른 조건은 세가지 경우로 나누어 적용하였다.

Case 1 : $\cos \theta$ 와 $\sin \theta$ 모두가 '0'이 아닌 경우

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{x_1}{\cos \theta} - \frac{x_2}{\sin \theta} \right) \tag{8}$$

Case 2 : $\cos \theta$ 가 '0'일 경우

$$\omega = -\frac{x_2}{\sin \theta} \tag{9}$$

Case 3 : $\sin \theta$ 가 '0'일 경우

$$\omega = \frac{x_1}{\cos \theta} \tag{10}$$

3. One-chip DSP 를 이용한 BLAC 모터제어기

3.1 Hardware 구성

본 논문에서 제안한 개선된 정현파 엔코더 방법을 적용한 One-chip DSP 제어기를 구현하기 위해 시험에 사용된 제어시스템은 그림 2와 같이 구성하였으며, 초기 회전자의 위치 설정을 위해 $\sin \theta$ 와 고정자의 U상을 그림 3와 같이 동기시켰다.

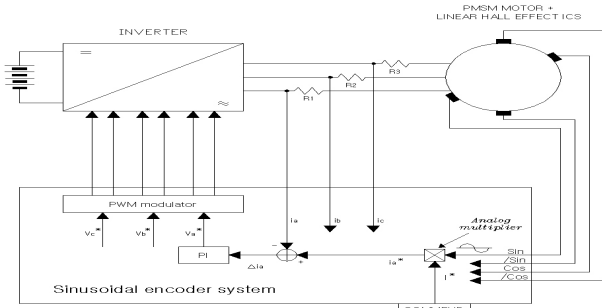


그림 2 BLAC 구동을 위한 전류제어 구조
Fig. 2 The current control structure for BLAC driving

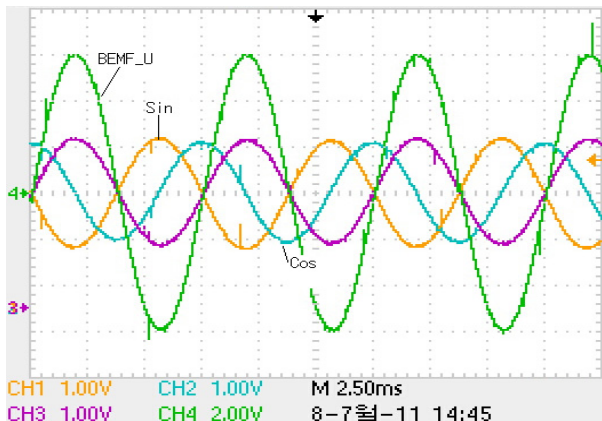


그림 3 고정자와 sinθ 센서사이 초기각 설정
Fig. 3 Initial angle setting between stator and sensor

3.1.1 DSP

DSPIC30F4011은 마이크로칩사에서 경제형으로 개발한 모터 제어 전용 DSP이다. 연산처리속도 30MIPS의 고속 연산이 가능한 고정소수점 연산방식의 프로세서로 PWM 출력과 9채널의 10bit ADC를 내장하고 있으며 다양한 형태의 인터페이스가 가능하다.

3.1.2 모터

실험에 사용된 모터는 외전형 BLAC모터로 수·전동 휠체어 구동목적으로 (주)코모텍에서 제작된 제품이며 사양은 표 1와 같다. 엔코더 입력센서는 Allegro MicroSystem, Inc의 A1301KUA-T를 사용했다. 일반적인 PMSM 운전은 고속운전에서 일정한 토크를 발생하지만, 저속운전 시 위치신호의 불균형으로 토크가 균일하지 못한 특성이 있다. 이 특성은 서보시스템의 입력 센서와 모터고유 성질에 따른 것으로, 정현파 엔코더에 따른 균일한 전류제어가 가능하면 저속운전도 가능하다. 정현파 엔코더의 성능을 확인하기 위해서 ADC로 받은 입력신호를 알고리즘에 적용하여 12bit DAC로 출력하였다. 사용된 ADC는 10bit 해상도로 샘플링 한다.

표 1 실험 대상 모터의 사양
Table 1 The specifications of test Motor

모터 종류	BLDC in linear hall sensor
극수	16 pol
최대속도	1500 rpm
정격 전류	8.2 [A]
정격 출력	150 [W]
정격 토크	0.919 [Nm]
모터 효율	98[%]
홀센서 종류	Linear Hall Sensor(A1301)
홀센서 구동전압	4.5 ~ 5.5 [Vdc]
홀센서 온도특성	-40 ~150℃
홀센서 출력 범위	2.4 ~ 2.6[V]
홀센서 출력 오류	2.5[%] in 25℃
자속 감도 범위	2.0 ~ 3.0[mV/G]
위상각 비틀림	30°

3.1.3 정현파 발생위한 구조

그림 4는 DSP 제어기와 sinθ, cosθ, nsinθ, ncosθ 신호 발생을 위한 선형 홀센서 사이의 인터페이스회로 이다. 전기각 90°를 가지는 4개의 정현파 신호를 생성하기 위해 회전자와 동기된 16극 영구자석을 기준으로 78.45°, 75.75° 배치하였다.

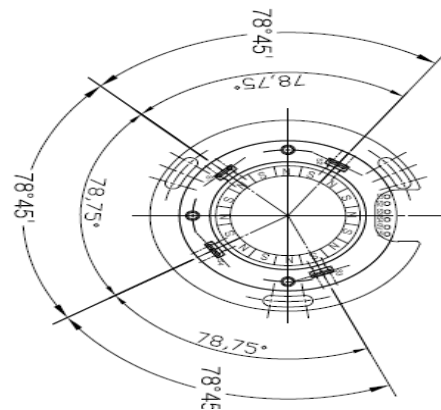


그림 4 홀센서의 위치 설정
Fig. 4 Set of Hall sensor Position

선형 홀센서는 주변온도 및 검출용 자석사이 간격 변경등으로 외력에 의한 출력 값이 변경되는 특징을 가지고 있다.[8] 따라서 각기 다른 4개의 정현파 신호는 그림 5와 같이 DSP제어기의 ADC 입력으로 사용하기 위해 필요한 조정과정을 거쳐 제어신호로 사용한다. 저역통과 필터를 통과한 신호는 고주파 잡음을 제거 하고, $D_{sin\theta} = 0$, $D_{cos\theta} = 0$ 인 경우의 측정값을 엔코더 신호로 사용한다.

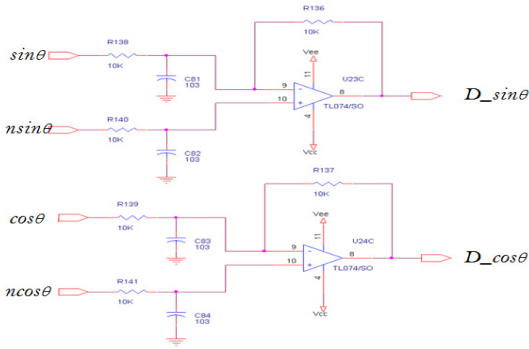


그림 5 정현파 엔코더 신호 입력 회로
Fig. 5 Sinusoidal encoder signal input circuit

3.2 Software 구성

정현파 엔코더에서 입력된 파형을 DSP의 Timer의 이벤트와 비교하여 ADC를 수행하고, 해당하는 θ 를 위한 전류 발생을 위해 PWM을 수행한다. 연산이 수행되지 않는 동안에 속도와 제어 LOOP를 계산하도록 그림 6과 같이 프로그램 하였다. 정현파 엔코더와 BLAC 모터속도제어를 포함한 전체 프로그램의 흐름도는 그림 7과 같다.

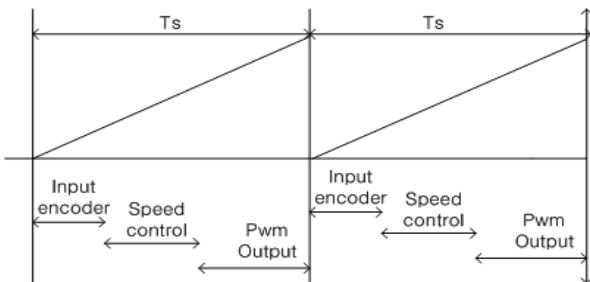


그림 6 프로그램 구조
Fig. 6 Program Structure

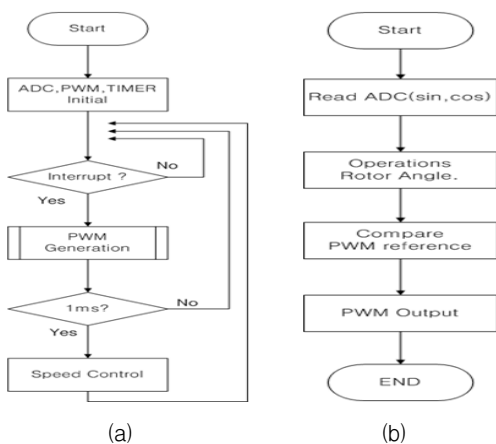


그림 7 프로그램 흐름도 (a) 메인, (b) 서브루틴
Fig. 7 Program flowchart (a) Main, (b) Subroutine

4. 실험결과

그림 8은 BLAC 모터로 고가의 RDC 대신에 DSP를 사용하여 정현파 엔코더를 구현한 제안된 방법을 설명한다. 위의 신호는 전동기의 전류파형이고 밑에 있는 신호는 이를 바탕으로 본 논문에서 제안하는 정현파 엔코더를 사용하여 제어 입력으로 사용할 정현파 신호이다. 제어 입력신호는 진상으로서 PI제어기를 통해 약 1ms 후에 전류를 제어한다.

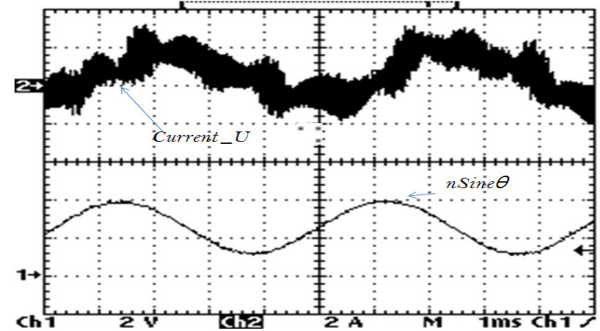


그림 8 정현파 입력신호와 전류 출력
Fig. 8 Sinusoidal input signal and the current output

이와 같이 만들어진 정현파 신호를 이용하여 속도제어를 실험한 결과 그림 9와 같이 무부하에서 속도를 저속운전상태인 250 rpm, 가속시간 250ms, 감속시간 150ms으로 설정된 기준속도를 잘 추종하는 결과를 얻을 수 있었다. 초기상태 가속시간이 속도제어기에서 설정된 값으로 가속구간을 통과하고 설정 속도와 오차를 줄이면서 정상속도를 유지하고 있다.

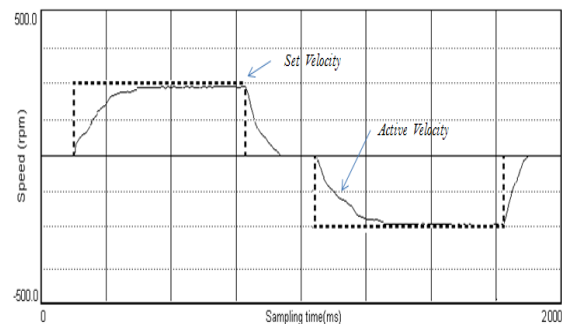


그림 9 BLAC모터의 정현파 엔코더에 의한 저속운전
Fig. 9 BLAC motor low speed operation due to a sinusoidal encoder

표 2은 BLAC 모터제어를 위한 전체 프로그램 중 정현파 엔코더를 DSP에서 구현 했을 때 사용된 연산량을 기존의 방법들과 비교하여 나타내었다. 기존방법은 연산이 복잡한 삼각함수 연산이 필요하지만, 제안된 방법은 연산중에 삼각함수가 연산이 없어서 비교적 적은 리소스를 차지하는 것을 알 수 있다.

표 2 DSP로 정현파 입력신호를 적용한 연산방법 비교
Table 2 To compare DSP operations using Sinusoidal input signal

연산종류 \ 속도계산방법	복조연산법	atanθ 법	Sinusoidal encoder 법
덧셈, 뺄셈	2	4	2
곱셈, 나눗셈	1	3	2
삼각함수	4	4	0
PI	1	1	2
적분	1	1	0

5. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 BLAC 모터제어를 위해 정현파 엔코더를 이용한 One-chip DSP 제어기를 구현 및 모터 구동 방법을 제안하였다. 실험결과를 통해 개선된 정현파 엔코더 방법은 기존 복조 방법과 atanθ에서 사용한 방법과 달리, 삼각함수 연산을 직접사용하지 않는다. 따라서 고정소수점 방식의 경제형 DSP인 DSPIC30F4011에서도 복잡한 연산 과정 없이 충분한 리소스를 확보할 수 있었다. 또한 BLAC 모터에 고가의 RDC 대신에 정현파 엔코더를 적용하여, 기존 홀센서를 사용했을 때 불안정했던 저속운전도 안전한 상태로 운전이 가능하였다. 이러한 제어시스템을 소프트웨어로 구현함으로써 One-chip DSP 제어가 가능함을 확인하였다.

향후 제안된 정현파엔코더 방법을 적용하였을 경우 홀센서의 온도에 따른 변화량에 적응하도록 보정방법 구현에 관한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20114010203110)을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참 고 문 헌

[1] 임선경, 임준영, 박태영, "부하 토크 보상을 통한 에어컨용 Single Rotary Compressor의 저진동 저속제어," 전력전자학회 2010년도 전력전자학술대회 논문집, 2010.7, page 1-650

[2] Santanu Sarma, V. K. Agrawal, Subramanya Udupa, "Software-Based Resolver-to-Digital Conversion Using a DSP," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 1, JANUARY 2008 Pages:369 - 378

[3] Choong-Hyuk Yim, In-Joong Ha, Myoung-Sam Ko, "A Resolver to Digital Conversion Method for Fast Tracking," IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 39, NO. 5, October 1992 Pages:369 - 378

[4] Attaianese, C., Tomasso, G., De Bonis, D., "A low

cost resolver-to-digital converter," Electric Machines and Drives Conference, IEEE, 2001 Pages:917 - 921

[5] Martin Staebler, "TMS320F240 DSP Solution for Obtaining Resolver Angular Position and Speed," Texas Instrument Application Note, SPRA 605 February 2000.

[6] Erwan Simon, "Implementation of a Speed Field Oriented Control of 3-phase PMSM Motor using TMS320F240" Texas Instrument Application Note, SPRA 588 February 1999.

[7] 김양배, 황정호, 정찬수, "저속 킥 스타트에서 brushless DC Motor 제어", 대한전기학회, 2010 대한전기학회 제 41회 하계학술대회 2010.7, page: 1764-1765

[8] 황정호, 김양배, 정찬수, "BLDC모터를 위한 사인 엔코더 신호의 자동 보정", CICS 2010 정보 및 제어 학술대회 논문집, 2010.10, page(s): 3-425

저 자 소 개



황 정 호 (黃 炆 浩)

1972년 10월 22일생. 2000년 경기대학교 전자공학과 졸업(학사). 2003년 숭실대학교 전기공학과 졸업(석사). 2002년~2004년 (주)어플라이비전텍 개발팀장. 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2004~현재(주)이모선택기술연구소 하드웨어실장.



정 찬 수 (鄭 讚 壽)

1949년 8월10일생. 1972년/1980년/1987년 서울대학교 학/석/박사, 대한전기학회 기획/총무이사, 현재 숭실대학교 전기 공학부 교수