
동기 전동기의 절대 위치 검출을 위한 엔코더 복합 신호의 분석

주재훈* · 김동현* · 최중경**

Analysis of the Encoder Composite Signal for a Absolute Position Detection of the
Synchronous Motor

Jae Hun Joo* · Dong Hyun Kim* · Jung Keyng Choi**

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음.

요 약

최대 토크를 발휘하도록 정현파형 영구자석형 동기전동기를 구동하기 위해서는 회전자 절대위치에 동기화된 120도 위상차를 갖는 3상 정현파 전류 입력이 고정자 코일에 요구된다. 그러므로 회전자 절대위치 검출이 필연적이다. 그리고 고정자 자계와 회전자 자계 사이의 90도 위상 관계가 정류 동작에 의해 유지되어야 한다. 정류를 위한 절대 위치 검출은 일반적으로 모터 축에 부착된 엔코더 출력 신호의 분석에 의해 이루어진다. 본 연구는 현대의 엔코더 시스템을 부착한 모터의 절대위치를 검출 할 수 있는 신호처리 논리회로 설계를 목적으로 하며, 고정자 코일에 정현파 전류 입력을 만들어주기 위한 삼상 기준파형을 발생시킨다.

ABSTRACT

For the driving of the sinusoidal type permanent magnet synchronous motor with a maximum continuous torque, the 120° delayed three phase sinusoidal current inputs which matched with the absolute rotor position are needed at the stator coil. Therefore, the detection of a absolute rotor position is required inevitably. And the right angle relationship between stator magnetic field and rotor magnetic field has to be preserved at a stator by this commutation action. The detection of a absolute position for the commutation can be made generally by the output signal analysis of the encoder attached at a motor shaft. The purposes of this study are to design signal processing logic circuits which could detect the absolute position of motor with a modern encoder system and generate the three reference wave for making sinusoidal current input at a stator coil.

키워드

영구자석형 동기전동기, 절대위치 검출, 정류

Key word

commutation, encoder, synchronous motor, absolute rotor position

* 정회원 : 창원대학교 공과대학 전자공학과
** 준회원 : 창원대학교 공과대학 전자공학과
*** 정회원 : 창원대학교 (교신저자, cjk@changwon.ac.kr)

접수일자 : 2011. 02. 08
심사완료일자 : 2011. 03. 04

I. 서 론

영구자석형 동기전동기의 한 종류인 BLDC (Brushless Direct Current) 전동기는 직류전동기의 정류부(commutation part)가 기계적 정류에서 전자적인 정류로 바뀌면서 불꽃, 잡음의 발생과 브러시의 보수 등 결점을 제거한 점에서 직류 전동기와 다르며, 역기전력 파형 모습에 따라 정현파(Sinusoidal)형과 구형파(Trapezoidal)형 BLDC 전동기로 구분되어진다. 구형파형은 회전자의 절대위치 구간마다 직류 입력에 대하여 일정한 상수 토크 특성을 보여주므로 절대위치 센서 및 정류회로가 간단히 구성될 수 있지만 토크리플이 발생한다. 반면에 정현파형 BLDC 전동기는 직류 입력에 대하여 절대위치에 따라 정현파 모양의 토크특성을 보여주므로 회전자의 위치 변화에 따른 토크를 일정하게 유지하기 위해 회전자 절대 위치에 따른 정현파 전류입력을 인가해야 한다. 이러한 이유로 절대 위치 검출 및 정류회로가 필요하지만 토크리플은 발생하지 않는다[1].

본 논문은 상용화된 새로운 형태의 복합형 엔코더가 부착된 정현파형 BLDC 전동기의 구동을 위한 정류회로 설계법을 제안한다. 그리고 회전자의 절대위치 검출을 위해 새로운 형태의 엔코더 출력 신호를 분석하고 이를 토대로 정류회로에 적합한 신호를 얻기 위한 신호처리 회로를 설계한다.

II. 정현파형 BLDC 전동기의 회전 원리

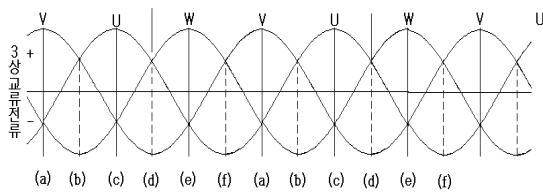


그림 1. 정현파형 BLDC 전동기에 인가되는 3상 교류 전류

Fig 1. Three phase AC current for sinusoidal type BLDC motor

정현파형 3상 8극 BLDC 전동기와 같은 AC 동기 전동기는 일반적으로 전기자를 고정자로, 계자를 영구자석

형 회전자로 하며 전기자인 고정자에 회전자계를 형성시켜 모터를 구동할 때 모터의 회전속도가 회전자계 속도와 일치한다. 즉 모터를 회전시키기 위해서는 회전자를 계속적으로 당길 수 있는 회전자계를 고정자에 만들어 주어야 한다. 그림2는 본 연구에서 사용한 정현파형 BLDC 전동기의 3상의 각 권선에 3상의 교류 전류를 흘렸을 때의 고정자에 형성되는 회전자계와 영구자석 회전자의 회전상태를 나타낸 것이다.

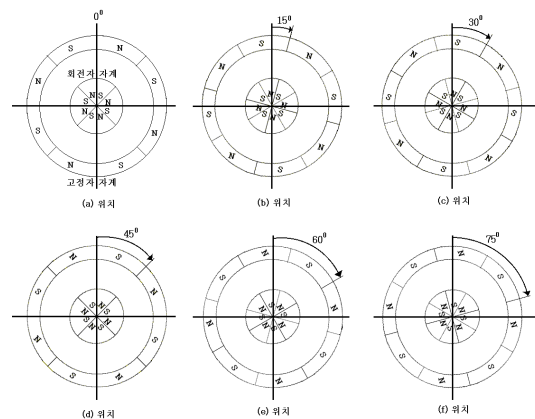


그림 2. 3상 전류에 의한 고정자 자계
Fig 2. Stator magnetic field by three phase current

그림2에 나타난 것과 같이 (a)~(f)의 6개의 특정 전류 상태를 DC 형태로 3상의 각 권선 U, V, W에 가함으로써 실제로 권선에 흘려야 할 교류전류의 형태를 파악해 낼 수 있다.

표 1. 각 절대위치에 따른 3상 전류 흐름
Table 1. Three phase current flow for motor rotating

시퀀스	위치	전류 흐름	실제 회전각
1	(a)	V → U, W	0°
2	(b)	V, U → W	15°
3	(c)	U → V, W	30°
4	(d)	U, W → V	45°
5	(e)	W → U, V	60°
6	(f)	W, V → U	75°
7	(a)	V → U, W	90°

(a)~(f)의 지점들은 실제 상전류가 흐르는 방향과 그

비율을 정확히 알 수 있는 지점들이다. 즉 전체 전류의 양에 비례하여 고정자에 형성되는 자계의 크기는 변화할 수 있으나 형성되는 자계의 방향은 교류 전류의 형태를 인가했을 시와 동일하게 나타나는 점들이다. 이렇게 함으로써 각 특정 지점 사이의 교류전류의 형태와 그에 따른 회전자의 위치를 파악할 수 있다. 그림에 나타나듯 (a)~(f)의 6번의 특정 DC 전류인가로, 실제 교류입력전류의 한 주기 당 회전자가 실제적으로 90° 회전함을 알 수 있다. 즉 1 바퀴를 회전시키기 위해서는 24번의 DC 형태의 전류 입력이 필요하며 이 말은 3상 각 권선에 4 주기의 교류입력이 필요함을 의미하며 8극의 전동기임을 알려준다[2].

III. 회전자의 절대 위치 검출을 위한 엔코더 신호 분석

연속적으로 정현파형 BLDC 전동기를 구동할 시에는 3상의 교류 전류 형태의 입력이 필요하며, 연속적인 전동기의 회전을 유도하고자 할 때에는 각상 교류 전류 형태를 회전자 자계방향에 따라서 동기화시켜 주어야 한다. 결국 회전자 자계의 방향, 즉 회전자의 절대 위치를 판별하여 고정자에 흘러야 할 전류의 형태를 결정해야만 한다. 이러한 정보는 회전자의 축 상에 부착되어 회전자와 함께 회전하는 엔코더의 출력 또는 자극센서인 홀센서의 출력으로 파악할 수 있다. 현대의 정현파형 BLDC 전동기에서는 엔코더의 특징적인 출력으로 이러한 회전자의 절대 위치를 알 수 있으며 이렇게 파악한 정보를 이용하여 고정자에 적절한 전류를 흘려서 회전자(영구자석)를 밀고, 끌어당기는 회전자계를 형성시킨다[3].

그림 3은 본 연구에서 사용한 BLDC 전동기의 엔코더에서 출력되는 신호들이다. A, B 상은 회전자의 회전에 따라 90도의 위상차가 나는 펄스이며 1 회전 시 2048개의 펄스가 각각 출력된다. 그리고 C 상의 정보 형태는 A, B상과 같이 1 회전 시 2048개의 펄스가 출력되지만 A, B 상의 논리조합으로 이루어져 있으며, 6개의 각기 다른 펄스열이 1 회전에 4번 반복 출력되도록 구성되어 있다. 즉 이러한 정보는 회전자(영구자석)의 위치 정보를 24등분하여 사용자에게 알려주게 된다.

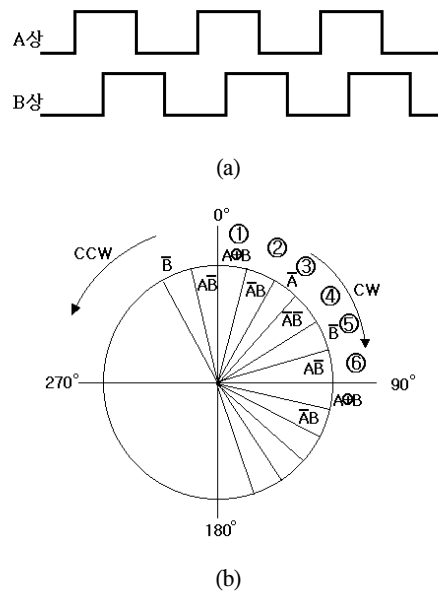


그림 3. 모터의 엔코더 A, B 상과 C 상의 출력
(a) 엔코더 A, B 상 출력 (b) 엔코더 C 상의 출력
Fig 3. Output of motor encoder phase A, B, C
(a) Encoder A, B phase output
(b) Encoder C phase output

따라서 이 엔코더의 출력과 앞에서 살펴본 영구자석 회전자의 회전 특성과 관련을 지어 파악하면 엔코더의 출력으로써 회전자의 자계 방향을 판별할 수 있다. 본 연구에서는 표1에서 서술한 DC 전류 시퀀스에 의해 전동기를 회전시켜 엔코더의 출력을 파악한 결과, DC 전류 시퀀스에 의해 BLDC 전동기의 회전이 이루어질 때 엔코더의 C 상 출력이 6번의 DC 시퀀스가 바뀔 때마다 그 구간이 바뀔 수 있었다. 따라서 그림4에서와 같이 제안하는 회로를 구성하여 연구한 결과 회전자의 자속의 방향, 즉 절대 위치를 판별할 수 있는 정보를 얻을 수 있었다.

그림4의 회로는 엔코더의 A, B, C 상을 입력받는 디코더회로이며 Y0~Y6(Y3제외)까지의 6 개의 출력이 그림5와 같이 출력되도록 본 연구에서 제안 설계된 회로이다.

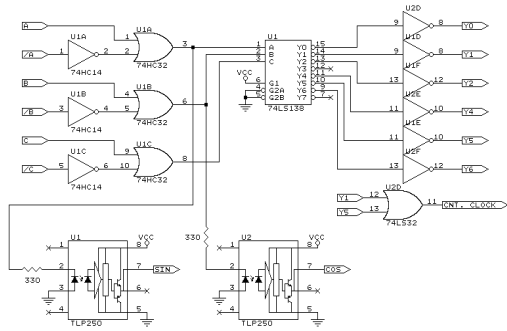


그림 4. C 상 출력 디코더 회로
Fig 4. Decoder circuit for phase C

그림5는 회전자를 계속적으로 잡아당기도록 3상 교류 전류를 인가할 때 디코더 회로에서 출력되는 절대위치 판별 신호와 그 때의 3상에 흐르는 전류 흐름 상태를 분석하여 나타낸 것이다. 실제 기계 각속 전동기가 실제로 회전하는 각이 90도로 나타나 있으며 이러한 회전시에 엔코더에서는 6 구간의 다른 펄스열이 나오고 있음을 보여주고 있다. 즉 이러한 정보는 사용자에게 전동기의 90도 회전시의 회전자 위치를 약 15도 간격별로 알려줌을 의미한다.

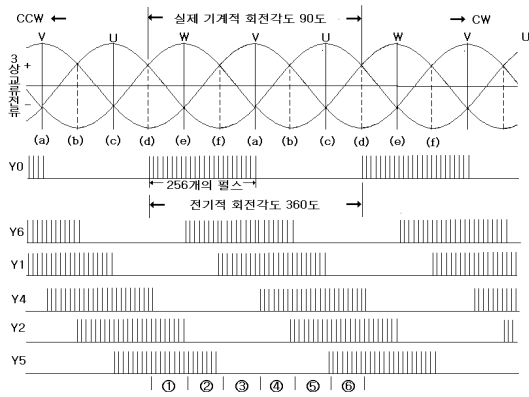


그림 5. 디코더 회로의 출력 파형 형태와 3상 교류 전류의 상태
Fig 5. Output waveforms of decoder circuits

그림5에 나타나 있듯이 (a)~(f)까지의 구간은 그림1에 나타난 회전자 회전 특성을 나타내는 DC 전류 시퀀스에 해당하는 위치이고, 디코더의 출력파형 아래에 나타난 있는 숫자들은 그림3에서 나타난 회전자 회

전에 따르는 엔코더 C 상 신호의 구간을 의미한다. 즉 회전자 절대위치의 정보를 엔코더 출력의 신호치리를 통해 알 수 있음을 의미한다. 일반적인 정현파형 BLDC 전동기의 회전을 유도하는 방법을 살펴보면 그림6과 같다.

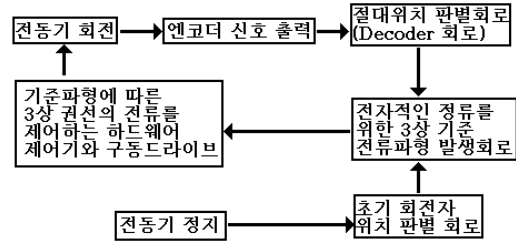


그림 6. BLDC 전동기의 정류과정 순서도
Fig 6. Flowchart of BLDC motor commutation

초기 전원 투입 시 엔코더의 출력으로 회전자 위치를 파악하여 먼저 3상 권선에 초기 정지상태에서 회전자를 회전시킬 수 있는 자계 형성을 위한 전류를 가한다. 이렇게 전동기를 기동시킨 뒤 전동기의 회전에 따라 엔코더에서의 출력 신호가 바뀌게 되므로 그때 그때의 절대위치 신호를 파악하여 3상 권선에 흘려야 할 전류의 형태를 결정할 수 있게 된다. 그러나 그림5에 나타나 있는 교류전류의 형태와 엔코더의 출력 신호를 살펴보면 이 절대위치 판별 신호에 맞추어서 그림1에 제시된 형태의 3상 전류를 각 상에 흘려준다면 회전자는 회전을 하지 않는다. 그 이유는 그림5의 절대위치 및 인가전류의 관계는 고정자에 흘려준 전류를 순차적으로 가해 회전자 자계가 흡입력에 의해 고정자에 끌려오는 관계이기 때문이다. 즉 인가전류에 의해 만들어진 자계와 회전자자계가 일치하는 관계이므로 디코더 출력을 기준으로 그림 5와 같은 상전류를 흘리면 회전자는 홀딩이 된다.

그러므로 3상 교류를 엔코더에서 출력되는 절대위치 정보에 따라 적절히 동기화하여 흘려줄 필요성이 있다. 일반적으로 직류전동기와 같이 BLDC 전동기에서도 고정자에 형성되는 자계방향과 회전자 자계방향이 전기 각 90도를 유지하면 회전 시에 최대 토크를 형성하며 회전할 수 있다.

그림7에서 보이듯 엔코더에서 출력되는 회전자 위치에 따라 3상의 교류전류가 입력단으로 흐르다면

회전자의 자계와 고정자를 통해 인가되는 합성자계는 90도의 전기 각을 형성할 수 있다. 이러한 형태의 교류 전류가 3상 권선에 흐를 수 있도록 구동 드라이버(인버터)를 스위칭 해준다면 정현파형 전동기는 최대의 토크를 유지하며 회전할 수 있다.

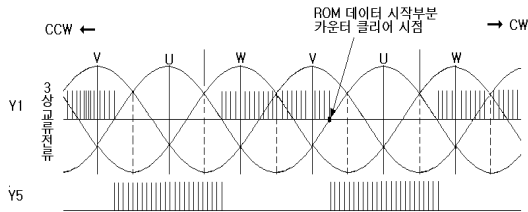


그림 7. 정류동작을 위한 3상 교류전류의 형태
Fig 7. Three phase current for commutation

그림8은 고정자에 회전자계를 형성했을 시 3상 8극 정현파형 BLDC 전동기의 회전자가 받는 토크의 크기와 전동기의 회전 특성을 도식화 한 것이다.

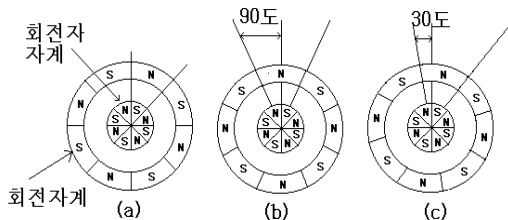


그림 8. 고정자 자계에 따른 회전자의 토크 특성
Fig 8. Torque characteristics with stator magnetic field

그림8에서 (a)는 8극 전동기의 정지 시 고정자의 회전자계와 회전자의 자계의 형태를 보인 것이고, (b)는 회전자 자계보다 90 위상차 나는 고정자자계 형성 시에 최대 토크가 발생할 수 있음을 보인 것이며, (c)는 회전자 자계보다 30도의 위상차 나는 고정자 자계 형성시를 보인 것이다. (c)의 경우는 전동기가 회전을 하나 최대 토크가 형성되지 않는다.

IV. 시스템의 구현

실제로 전동기를 회전시키기 위해서는 복잡한 전류 제어기와 하드웨어 구동 드라이버가 필요하다. 그림9,

그림10, 그림11은 전동기의 엔코더 출력으로 절대위치를 판별한 뒤에 권선에 흘려줄 전류의 3상 기준 파형을 롬데이터베이스(ROM Table)에서 호출하는 회로를 나타낸 것이다.

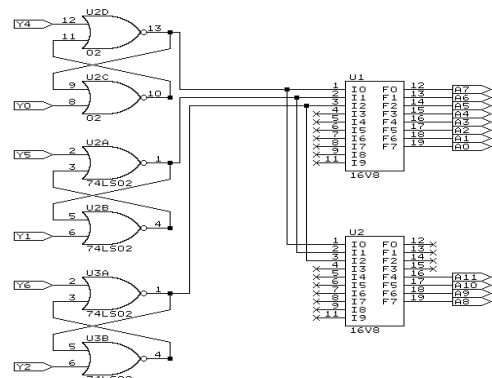


그림 9. 초기 회전자 위치 판별 회로
Fig 9. Detection circuit for initial rotor position

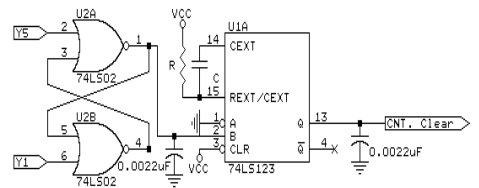


그림 10. RS F/F를 이용한 ROM 카운터 클리어 회로
Fig 10. ROM counter clear circuit using R-S F/F

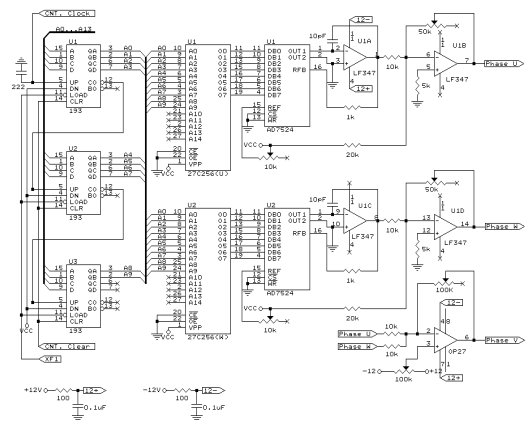


그림 11. 3상 기준 정현파 발생회로
Fig 11. Three phase reference sine wave generator

V. 신호처리 실험 결과

그림12는 A, B상 펄스 외에 출력되는 C 상 출력의 일부 모양을 보여주고 있다. 그림13은 90도 회전할 때 마다 출력되는 C 상 펄스를 6개의 펄스 그룹으로 분석하고 그 펄스 형태를 A, B 상의 논리 연산으로 분석된 모습을 도시한다.

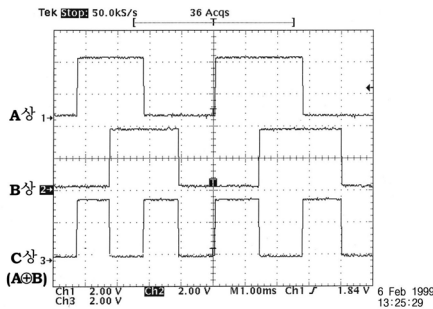


그림 12. 초기 1구간의 A, B상 및 C상 출력 비교
Fig 12. Output comparing of A, B, C phase

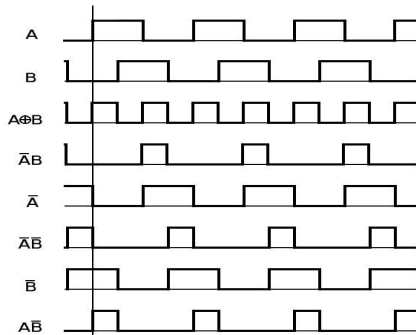


그림 13. A, B, C상 펄스의 6 구간별 비교
Fig 13. Comparing of A, B, C phase pulse

그림 14는 자체 설계한 디코더 회로에 의해 디코딩된 C 상 펄스를 보여준다.

그림15는 디코딩된 펄스들을 이용하여 정류동작에 필요한 3상 기준 정현파를 생성한 모습을 보여준다. 이 기준파형에 속도제어를 위한 전류 지령치를 진폭으로 서 부가하면 상 전류 지령치가 완성된다.

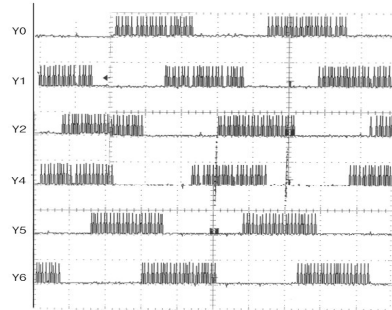


그림 14. 디코더 각 단자의 출력 파형
Fig 14. Output waveforms of each decoder

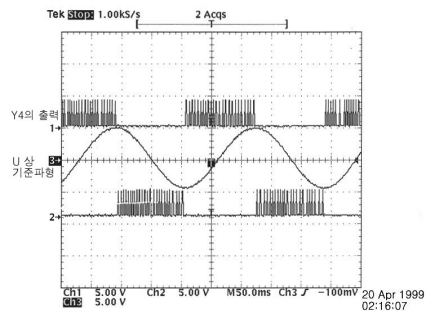


그림 15. U상 기준정현파형의 생성
Fig 15. Generation of U phase reference sinewave

VI. 결론

본 연구는 정현파형 BLDC 전동기를 구동하기 위해 서 필수적인 회전자의 위치를 검출하고 그 위치에서의 전자적인 정류를 수행할 수 있는 정보를 추출하는 하드웨어적인 회로를 구현함에 목적을 두었다. 이러한 정보는 전동기 축 상에 붙어 함께 동기 되어 회전하는 엔코더의 출력 정보로써 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한 엔코더의 출력형태는 예전에 사용하던 전동기와 많이 상이함을 보였지만 이것은 현대 전동기 엔코더 출력의 추세라 할 수 있다.

즉 현대의 BLDC 전동기를 구동하기 위해서는 필수적으로 먼저 엔코더의 출력 신호를 의미 있는 사용자 신호로 바꾸어 내는 일이 상당히 중요함을 의미한다. 그리고 현대의 집적 기술(ASIC, FPGA, VHDL)로써 부피를 작게 하는 작업 또한 매우 중요한 일이 될 것이다.

참고문헌

- [1] Yasuhico Dote, Sakan Kinoshita "Brushless Servomotors", Clarendon Press Oxford, 1990.
- [2] "DC Motors, Speed Controls, Servo Systems", Electro-craft Corp. 1977.
- [3] Takashi Kenjo, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", Sogo Electronics Publishing Company, 1984.

저자소개



주재훈(Jae-hun Joo)

2004. 2. 창원대학교 전자공학과
공학사

2008. 2. 창원대학교 전자공학과
공학석사

2010. 2. 창원대학교 전자공학과 박사과정수료

현재 창원대학교 전자공학과 박사과정

※ 관심분야: 서보기기제어, DSP응용



김동현(Dong-hyun Kim)

2010. 2. 창원대학교 전자공학과
공학사

현재 창원대학교 전자공학과
석사과정

※ 관심분야: 마이크로프로세응용, 센서응용회로



최중경(Jung-keyng Choi)

1986. 2. 고려대학교 전기공학과
공학사

1988. 2. 고려대학교 전기공학과
공학석사

1992. 3. 고려대학교 전기공학과 공학박사

1992년 ~ 현재 창원대학교 전자공학과 정교수

※ 관심분야: 서보기기제어, 자동동조PID제어, 마이크로프로세서응용, DSP응용, 영상제어.