

브러쉬없는 직류전동기의 비선형 디지털 위치제어

홍기철 남광희
포항공과대학 전자전기공학과

Nonlinear Digital Position Control of Brushless DC Motors for Direct Drive Robot

Kichul Hong Kwanghee Nam

Dept. of Electronic and Electrical Engineering, POSTECH

Abstract

For the position control of BL-DC motors, 2 ϕ -3 ϕ conversion unit, hysteresis band device, and PWM pulse generation are required. By utilizing a single-chip processor INTEL 8097BH, we cover all required functions. As a result, no analogue device is employed in this control scheme, so that it makes BL-DC motor controller simple and flexible. Furthermore, the single-chip processor is utilized for the nonlinear coordinate transformation which is necessary for the linearization of the motor system.

1. 서론

직류전동기는 속도가 입력전압에 비례하고 또한 토오크가 전류에 비례하는 특성을 가지고 있으므로, 제어하기가 매우 용이하여서 지금까지도 널리 사용되고 있다. 그러나 직류전동기의 구조상, 기계적정류에 필요한 브러쉬(brush)와 정류자(commutator)의 보수유지문제, 또한 정류시 발생하는 기계적, 전기적 잡음이나 불꽃으로 인하여 매우 빠른 속도의 제어나 정밀한 위치제어가 어렵고 폭발위험성이 있는 작업장등에서 사용의 제한을 받아 왔다. 특히 직류전동기를 사용하여 로봇(robot)의 구동부(actuator)를 구성할 경우, 기존의 직류전동기에서는 로봇을 구동시킬만한 충분한 토오크가 나오지 못한 관계로 기어(gear)를 이용하여 구동부를 구성하게 된다. 이 때

기어의 백래쉬(backlash), 정지마찰(coulomb friction)등과 같은 여러가지 비선형요소로 인하여 전체시스템의 구조가 비선형적이어서 로봇의 역학제어(dynamic control)에 필요한 토오크계산제어(computed torque method), 힘 제어(force control)등의 제어가 불가능해진다.[1][4][6][7]

이에 반하여 브러쉬없는 직류전동기는 직류전동기에 서 쓰이는 기계적정류를 전기적 정류방식으로 대체함으로써 브러쉬나 정류자때문에 발생하는 보수 유지문제가 발생하지 않고, 직류전동기의 정류시 발생하는 전기적잡음이 제거됨에 따라서 고속화및 정밀제어에의 응용이 가능하다. 특히 브러쉬없는 직류전동기의 회전자는 강자성체인 회로류계 영구자석을 이용하여 만들어졌으므로 매우 큰 기동토오크를 얻을 수 있어서, 직접구동로봇(direct drive robot)에의 적용이 가능해지고, 토오크계산제어나 힘 제어와 같은 로봇의 역학제어가 가능하다.

브러쉬없는 직류전동기의 제어기 설계가 복잡해지고, 전동기의 자화특성, 회전자의 절대위치등을 알아야할 필요가 있다. 따라서 브러쉬없는 직류전동기의 제어기는 설계가 어렵고 복잡하다. 이러한 요구를 만족시키기위해서 제어기의 많은 부분에 아날로그장치(analogue device)가 들어가게되고, 따라서 제어시스템의 융통성, 적응성등이 떨어지게 되며 가격은 고가가 되는 단점이 있다.[2][4][7]

이 논문에서는 이러한 복잡하고 고가의 제어기대신에 마이크로프로세서(microprocessor)를 사용한 디지털제어

본 논문은 산업과학기술연구소의 순수기초
과제연구비에 의해서 수행중인 연구내용임

기를 구성함으로써 적응성과 융통성이 뛰어난 제어를 설계하고자 한다. 특히 기존의 디지털제어에서는 마이크로프로세서가 전체제어의 부분적인 역할을 담당하였던 것과는 달리 전력변환부를 제외한 모든 부분을 마이크로프로세서가 담당함으로써 전체제어의 구조가 대단히 간단해지는 장점이 있다. 또한 마이크로프로세서는 인텔사(Intel co)의 8097 Single_chip Microprocessor를 사용함으로써, 기존의 다른 마이크로프로세서를 사용했을 때보다 하드웨어의 구조가 간단하고 경량화되는 장점이 있다.[9][10]

2. 브러쉬없는 직류전동기의 수학적 모델

브러쉬없는 직류전동기를 미분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_{abc} = r_s i_{abc} + p \lambda_{abc} \quad \text{식 (1)}$$

$$\text{여기서 } (f_{abc})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad \text{식 (2)}$$

$$r_s = \text{diag} [r_s \quad r_s \quad r_s] \quad \text{식 (3)}$$

여기서 p는 미분연산자 d/dt 이고, λ_{abc} 는 각 상의 코일에 유기되는 자속이다.[1] 식(1)을 회전자기준축(rotor-reference frame)에 의한 d-q 변환을 취한 전압 상태 방정식 형태는 식(4)과 같다.

$$V_{qd0s} = r_s i_{qd0s} + \omega_r \lambda_{dq0s} + p \lambda_{dq0s} \quad \text{식 (4)}$$

그리고 토오크 방정식은 다음과 같다.

$$J \frac{d}{dt} \omega_r = T(i_{qs}, i_{ds}, \theta_r) - T_L$$

$$T(i_{qs}, i_{ds}, \theta_r) = \frac{3n}{2} \{ \lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds} \} \quad \text{식 (5)}$$

위의 토오크방정식에서 $L_d = L_q$ 이든지 $i_{ds} = 0$ 이면 토오크방정식은 직류전동기의 토오크방정식과 일치하게 된다. 브러쉬없는 직류전동기의 비선형 상태 방정식(nonlinear state equation)을 세우고 여기에 좌표변환을 이용한 비선형변환을 가하면 브러쉬없는 직류전동기의 토오크방정식은 직류전동기의 토오크방정식과 일치하게 된다.

3. 전력변환부 설계 및 제작

전력변환부는 6개의 MOSFET와 그에 역병렬로 연결된 6개의 환류다이오우드(Freewheeling diode)로 이루어진 전류제어방식의 전압원 인버터(Current Controlled Voltage Source Inverter)와 직류전압을 공급하기 위한 전파정류회로로 이루어져 있다. 전력변환기는 역활은 원하는 크기와 주파수의 전류를 고정자에 흐르게 하기 위해 입력 직류 전압을 펄스폭변조(Current Regulated Pulse Width Modulation : CRPWM)를 한다. CRPWM의 원리는 그림 1.에서 보는 바와 같이 각 상의 전류를 홀전류센서(Hall Current Transformer)를 이용하여 측정한다. 이를 아날로그 대 디지털변환(Analogue-to-Digital Conversion)하여서, 이 값을 마이크로프로세서(micro-processor)에서 읽고 각 상 전류의 값과 각 상의 전류 명령치를 비교하여 전류의 크기가 작으면 전류를 더 공급하고 전류의 크기가 명령치보다 크면 전류를 환류(Freewheeling)시키도록 스위칭제어기(Switching Logic)를 작동시킨다. 전류제어시 잡음에 의한 오동작을 방지하고 전력용소자를 보호하기 위해서 보통 히스테리시스 루프(Hysteresis Loop)를 형성한다. 이 때 히스테리시스 밴드 폭(Hysteresis band width)을 스위칭소자와 전동기의 시정수(time constant)를 고려하여서 히스테리시스 밴드 폭(Hysteresis band width)을 결정한다. 그러나 제어루프(control loop)상의 히스테리시스 밴드는 제어기의 성능을 저하시키는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해서 그림 2.에서 보는 바와 같이 주파수제한기 개념을 도입하였다. 이는 그림 1.에서 보는 바와 같이 스위칭제어기(Switching Logic)에서 각 전력용소자의 On-Off Decision을 하게 된다. 이러한 On-Off Decision의 주파수는 마이크로프로세서의 인터럽트시간에 의해서 결정된 주파수로 결정된다. 이렇게 하였을 경우 히스테리시스밴드 폭을 구하기 위한 수고가 덜어지며 이로 인하여 발생하는 잡음이나 전류맥동(Current ripple)등이 줄어들게 되며 따라서 전체시스템의 구조가 간단해지고 속응성이 개선된다.[7][8]

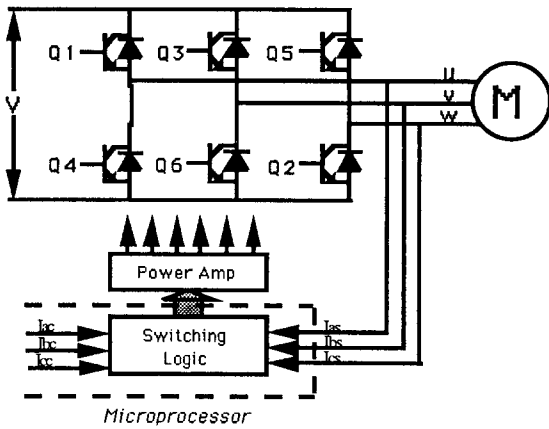


그림 1. 전력변환회로

Fig 1. Power Conversion Circuit

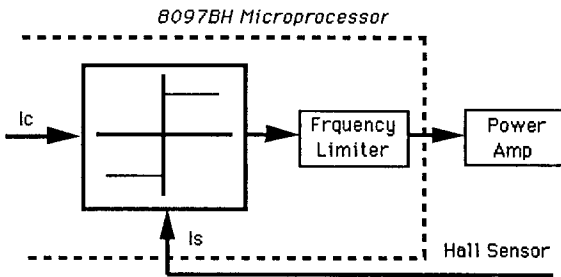


그림 2. 주파수제한기

Fig 2. Frequency limiter

4. 위치 검출부

검출부는 위치센서부와 전류검출부로 이루어진다. 위치센서부는 레졸바(Resolver)와 레졸바를 여자시키기 위한 여자신호(4.0KHz) 및 레졸바의 출력 신호로부터 회전자의 절대위치를 디지털 값으로 변환시키는 레졸바/디지털 변환기(RDC)로 이루어진다. 본 논문에서 사용된 레졸바는 위상변조형(phase modulation type)으로 전기적으로 90도의 위상차를 갖는 고정자 2상과 회전자축에 연결되어 회전자와 같이 회전하는 회전자 1상으로 이루어지며, 여자신호와 출력신호와의 관계는 다음과 같다.

$$E_{S12} = E \sin \omega_0 t \quad : \text{여자신호}$$

$$E_{S24} = E \cos \omega_0 t$$

$$E_{R13} = KE_{S13} \cos \theta + KE_{S24} \sin \theta = KE \sin(\omega_0 t + \theta)$$

: 출력신호

레졸바/디지털 변환기는 위 식에서 여자신호와 출력신호의 위상차를 계수화함으로써 회전자의 위치정보를 디지털값으로 계산한다. 본 논문에서는 사용된 마이크로프로세서의 사양에 맞도록 레졸바/디지털 변환기를 실제로 제작하였다. 따라서 마이크로프로세서에서는 언제나 실시간(real time)으로 절대위치(absolute position)정보를 얻어낼 수 있다. 그 성능은 전동기 1회전당 6144 PULSE의 출력이 나오도록 구성되어 있으며 이 출력은 약 0.06도까지의 위치제어를 수행할 수 있는 분해능이고 직접구동로봇에 적용시 충분한 양의 분해능이라고 할 수 있다. 그림 3.은 레졸바/디지털 변환기에 대한 개략도이다.

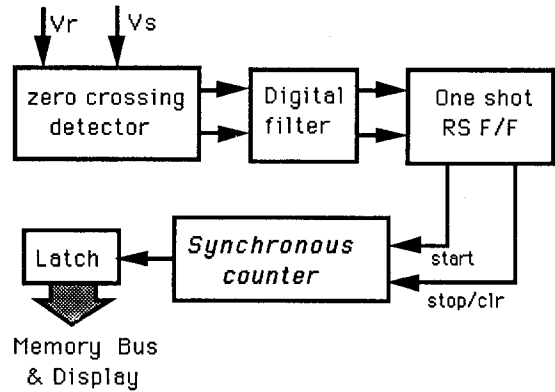


그림 3. 레졸바/디지털 변환기

Fig 3. Resolver-to-Digital converter Block Diagram

5. 전류검출부

홀 소자는 자장(magnetic field)에 비례하는 직류전압을 출력하는 특성이 있으므로 이를 이용하여 각 상에 흐르는 전류에 비례하는 직류전압을 끌어낸 후 이를 8097BH 마이크로프로세서의 입력사양에 맞도록 0(V) ~ 5(V)의 범위로 조정한다. 홀 소자를 이용한 전류검출기는 기존에 널리 쓰이고 있는 장치를 사용하였다.

6. 디지털 제어부

디지털 제어부는 검출부에서 들어온 정보를 이용하여 제어명령을 계산하고 이를 바탕으로 전력변환부에 전력용소자의 ON-OFF를 결정하게 된다. 이러한 모든 작업은 실제로 8097BH 마이크로프로세서 내에서 어셈블리어로 구현된다. 기존의 디지털 위치제어 장치는 2

ϕ -3 ϕ 변환장치와 CRPWM을 위한 히스테리시스장치를 제외하고 순수한 제어부만으로 구성되었으나, 본 논문에서 제안된 디지털 제어기는 이러한 부분까지 모두 어셈블리어를 통한 프로그래밍으로 구현하여서 전체 시스템이 대단히 간단해졌다. 실제 알고리즘에 대하여 설명하면 다음과 같다.

첫째, 입력위치 명령을 받는다. 입력위치명령은 8097BH의 포트1에 있는 Analogue-to-Digital conversion port를 통하여 직접 받을 수도 있고, ROM에 미리 프로그램된 입력명령을 통하여 받을 수도 있도록 구성되어 있다. 또한 호스트 컴퓨터(Host computer)로 부터 직렬 포트(serial port)로 부터 입력명령을 받을 수도 있다. 이와 동시에 전동기의 각 상의 전류를 아날로그 대 디지털 변환을 위한 인터럽트 명령을 내린다.

둘째, 일단 위치명령을 받으면 위치명령으로부터 기준이 되는 위치 프로파일(Profile)을 내부에서 계산한다. 이 값은 8097BH 프로세서가 매 가로채기시각(Interrupt time)마다 실제 입력명령으로 읽어오게 된다. 셋째, 레졸바/디지털 변환기(RDC)를 통하여 들어온 전동기의 절대위치와 비교하여서 오차를 구하고, 이 값을 선형 PID제어기의 입력으로 이용하여 전동기의 토크 값을 계산한다.

넷째, 토크 값에 토크 상수를 곱하여서 전동기의 Q-축 전류값을 구한다. 다음에는 이미 얻어진 전동기의 절대위치를 이용하여 Park's Inverse Transform을 하고 여기에 Q-축전류를 곱하여서 각 상의 전류명령치를 구하게 된다. 여기서는 현재의 위치값을 룩업테

8097BH Single_chip Microprocessor

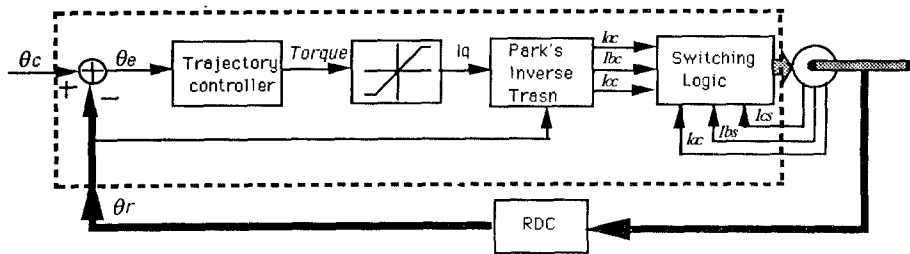


그림 4. 선형제어기모델

Fig 4. Linear controller Model

8097BH Single_chip Microprocessor

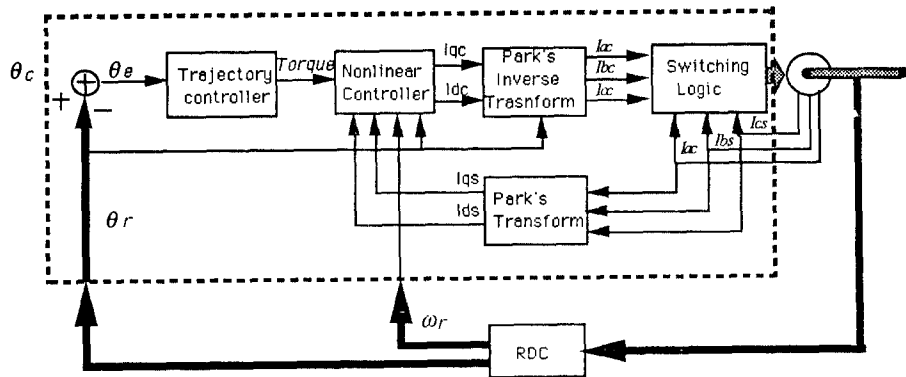


그림 5. 비선형제어기모델

Fig 5. Nonlinear controller Model

이블서치에 바로 이용하여서 $\cos(\phi), \cos(\phi+2\pi/3), \cos(\phi-2\pi/3)$ 값을 구한다. 메모리가 충분할 경우는 록업 테이블을 각 상에 대해서 구성하여 인터럽트속도를 높이는 것이 효율적이나, 메모리의 부족으로 그렇지 못할 경우는 \cos 파의 1/4구간으로 전체의 cosine 테이블을 복구할 수 있다. 그러나 이렇게 할 경우 명령어(instruction) 수의 증가로 속도가 느려지는 단점이 있다.

다섯째, 모든 인터럽트 작업이 끝나면 Main-Routine으로 돌아간다.

이 모든 계산 및 작업은 인텔 8097BH Single-Chip 마이크로프로세서의 내부에서 수행된다. 또한 직렬 포트(serial port)를 이용하여 PC나 다른 컴퓨터에서 명령을 Download, 또는 Upload할 수 있어서 여러가지 정보를 프로세서에서 읽어내거나 쓸 수 있어서 따라서 호스트 컴퓨터를 이용한 전체시스템 제어가 가능하다. 8097BH 마이크로프로세서의 전체개략도는 그림 4과 그림 5에 있다. [10] 그리고 8097BH를 이용한 제어알고리즘은 그림 6에 있다.

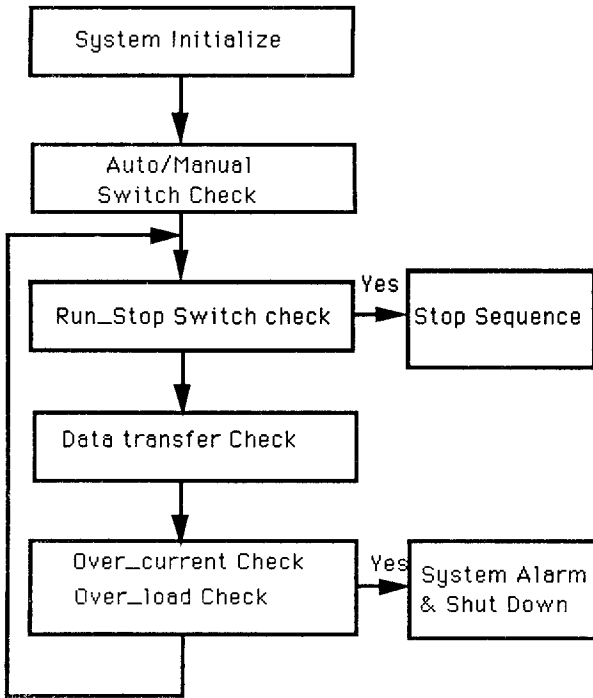


그림 6.1 주 흐름도
Fig 6.1 Main-routine

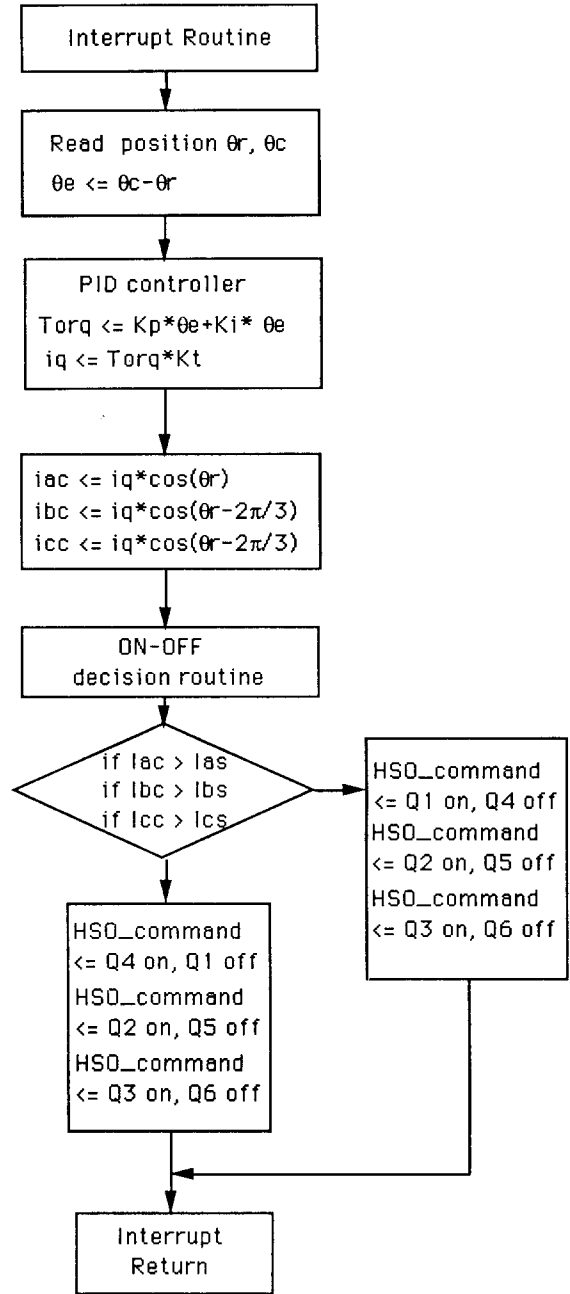


그림 6.2 CRPWM 인터럽트 흐름도
Fig 6.2 CRPWM-interrupt Routine

7. 비선형제어기의 설계 및 제작

그림 4는 전동기의 특성이 선형적이라고 볼 때 구현할 수 있는 선형제어기모델의 개략도이다. 실제로 브러쉬없는 직류전동기의 경우 전동기를 제작할 때 가능한 비선형요소를 제거할 수 있도록 제작을 하기 때문에 사실 그림 4의 제어기 구조를 가지고도 만족할만한 성능을 낼 수가 있다. 현재까지 나오거나 제안된 브러쉬없는 직류전동기의 제어구조는 대부분 그림 4와 비슷한 구조로 되어 있다. 그림 5는 비선형제어기 개략도로써 전동기가 가지고 있는 비선형요소를 고려한 비선형상태궤환(nonlinear state feedback)을 함으로써 완전한 선형제어가 가능한 구조이다.

8. 결 론

그림 6.2에서 나타낸 CRPWM 인터럽트의 주파수가 전동기의 스위칭주파수를 결정하게 된다. 브러쉬 없는 직류전동기의 경우 전기적시상수(electrical time constant)는 대체로 약 1msec-order이다. 따라서 CRPWM 인터럽트의 주파수가 약 5Khz~10Khz정도는 나와주어야 위치제어에 충분하다고 하겠다. 이를 위해서는 우선 프로세서의 속도가 빨라야 하겠으나, 효율적인 어셈블리 프로그래밍을 통하여도 어느정도 달성이 가능하리라 예상된다. 현재는 충분한 스위칭주파수가 나오지 못하여서, 이 점이 위치제어를 하는 데 있어서의 가장 큰 문제점이 되고 있다.

8. 참 고 문 헌

- [1] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", 1986.
- [2] J.M.D Murphy & F.G.Trumbull, "Power Electronic Control of AC Motors", 1986.
- [3] W. Leonhard, "Control of Electrical Drivers", 1985.
- [4] Richard D. Kjafter & Thomas A. Chmielewski & Michael Negin, "Robotic Engineering an Integrated Approach", 1989.
- [5] T. Kenjo & S. Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", 1984.

[6] Neyram Hemati, & Ming C. Leu, "Nonlinear Tracking Control of Brushless DC Motors for High-Performance Applications", The 28th Conference of Decision and Control, pp527~530, December, 1989.

[7] 조관열, 신취범, 한재원, 윤명중, "자속기준제어에 의한 브러쉬없는 직류전동기의 위치제어", 전기학회지, 제37권, 제9호, pp600~608, 1988.

[8] 홍성수, 권봉환, 윤명중, "리졸버를 사용한 브러쉬없는 직류전동기의 운전특성과 주파수 제한기를 가진 'ON-OFF' 전류제어방식", 전기학회지, 제35권, 제9호, pp396-402, 1986.

[9] 차한주. "Single-Chip 마이크로프로세서로 제어되는 PWM 인버터", 포항공대 석사학위논문, 1990.

[10] Intel 8096 Microcontroller Handbook