

# BLDC 전동기를 이용한 전기자동차용 구동 Controller 개발(1)

송병문, 양해철, 송정민, 김은수, 오성철

한국전기연구소

## Development of Driving Controller for the Electric Vehicle using BLDC Motor

B.M.SONG, H.C.YANG, J.M.SONG, E.S.KIM, S.C.OH  
KERI

### Abstract

This paper presents a driving controller for the electric vehicle using BLDC motor. The system consists of a BLDC motor, an IGBT Inverter and digital controller. The special feature of the driving controller are discussed, with emphasis on the optimize the performance of the system.

Also, Some experimental verification of the drive performance is given.

### 1. 서론

미래의 도심교통수단으로써 적용될 전기자동차는 기존의 가솔린 자동차에서 발생하는 소음 및 공해문제가 도시환경 문제로 제기되고 있는 현실에서 또한 전기에너지 사용의 다양화 측면에서도 전기자동차 개발 수요가 급증하고 있다.

전기자동차는 크게 전지부, 구동용 제어장치, 주 전동기로 구성되며 특히 구동용 제어장치인 구동시스템은 전동기 형식에 따라 결정되기 때문에 주 전동기와 병행해서 검토되어야 한다. 또한 제어장치의 성능은 속도제어의 고성능화, 회생성능의 향상, 조향성능의 향상 등이 부가적으로 검토되어야 한다.

본 연구에서는 직류 부러쉬레스(BLDC)전동기를 이용하여 개발한 Proto type 형태의 제어장치에 대하여 설계특성을 중심으로 기술하고자 한다. 주 전동기인 BLDC 전동기는 기동특성이 직류전동기 정도이고 회전자에 보자력이 높은 회로류 자석을 이용하고 있기 때문에 교류 유도전동기와 같은 인버터에 의해서 회전자계를 만들어 공급함으로써 회전수를 높일 수 있고 부러쉬가 없기 때문에 보수성도 우수하다는 장점이 있다. 반면에 영구자석을 사용하고 있기 때문에 고가이고 자석의 기계적 강도측면에서 제약이 있다.

### 2. BLDC 전동기의 벡터 제어

BLDC 모터는 구조상으로 PMSM 모터와 유사하지만 역기전력이 구형파로 나타나는 특징이 있다. 그러나 해석의 편리성을 위해서는 역기전력이 정현파인 PMSM 모터를 기준으로 하는 제어개념을 도입하였으며 적용된 벡터 제어 방식에 대하여 설명한다. 벡터제어를 이용하기 위해서는 PMSM의 전압방정식으로 부터 회전자 기준 Frame의 값으로 변환시켜야 한다. 변환을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

(1) 파라미터의 변화는 고려할 수 있지만 포하는 무시한다.

(2) Eddy Current 및 Hysteresis 손실은 무시한다.

(3) 여자에 대한 전압 방정식은 무시한다.

(4) 회전자에 Cage가 없다.

이상의 가정에서 PMSM의 전압 방정식을 회전자 기준 Frame의 d,q 값으로 변환시키면 다음과 같다.

$$V_q = R i_q + \lambda \dot{q}_m + \omega_s \lambda d \dots \dots \dots (2.1)$$

$$V_d = R i_d + \lambda \dot{d} - \omega_s \lambda q \dots \dots \dots (2.2)$$

$$\text{여기서 } i_q = L_q \dot{q} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$i_d = L_d \dot{d} + \lambda_{af} \dots \dots \dots (2.4)$$

여기서  $V_d, V_q$ 는 d,q축 전압,  $i_d, i_q$ 는 d,q축 전류,  $L_d, L_q$ 는 d,q축 인덕턴스,  $\lambda_d, \lambda_q$ 는 d,q축 고정자 자속,  $\lambda_{af}$ 는 회전자 자속에 의한 고정자축의 자속,  $\omega_s$ 는 인버터 주파수이다.

$$\text{토크식은 } T_e = 3P [\lambda_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] / 2 \dots \dots (2.5)$$

$$\text{운동 방정식은 } T_e = T_L + B \omega_r + J P \omega_r \dots \dots \dots (2.6)$$

여기서 B: Damping 상수,  $\omega_r$ : 회전자속도, J: 관성 모멘트

$$P i_d = (V_d - R i_d + \omega_s L_q i_q) / L_d \dots \dots \dots (2.7)$$

$$P i_q = ((V_q - R i_q + \omega_s L_d i_d) - \omega_s \lambda_{af}) / L_q \dots \dots \dots (2.8)$$

$$P \omega_r = (T_e - T_L - B \omega_r) / J \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\text{만일 } i_d \text{가 } 0 \text{으로 되게 하면 } \lambda_d = \lambda_{af} \dots \dots \dots (2.10)$$

토크식은  $T_e = 3P \lambda_{af} i_q / 2$ 가 된다.  $\lambda_{af}$ 는 항상 일정하므로 토크는 q축의 전류  $i_q$ 에 비례하게 된다.

$$\text{즉, } T_e = K_t i_q \dots \dots \dots (2.11)$$

여기서  $K_t = 3P \lambda_{af} / 2$ 이다.

토크식은 타타자 직류 전동기의 식과 일치된다.  $i_d$  값을 음으로 하게 되면 공극자속을 약하게 하는 역할을 한다.

### 3. 구동 시스템의 구성

#### 3.1 제어계 구성

제안된 전기 자동차용 구동 시스템의 구성은 그림 3.1와 같다. 구동 시스템은 크게 제어 시스템, 구동용 인버터로 구성되어 있다. 구동 시스템의 입력은 전기 자동차용 시스템 콘트롤러의 명령에 따라서 속도 혹은 토크 명령을 절환할 수 있게 구성되어 있다. 인버터의 전류 제어를 제어한 모든 연산은 16 bit  $\mu$ -Processor 8797을 통하여 이루어진다. 8797을 통하여 이루어지는 주요 기능은 토크 연산, 감자 제어, 속도 연산, 2상-3상 변환 기능이다.

구동 시스템의 동작을 설명한다. 기준 속도와 실제 전류의 차이는 PI 연산기를 통하여 토크 명령치  $\tau^*$ 로 변환된다. 일정 공극 자속 mode에서 d축 전류 명령  $i_d^* = 0$ 이

된다. 토크 명령치는 토크 상수  $K_T$ 로 나누어서 q축 전류 명령  $i_q^*$ 로 변환된다. 이 값들은 2상-3상 변환을 통하여 고정자 기준 전류로 변환된다. 이 전류를 연산하기 위해서는 회전자 위치 궤환이 필요하다. 전류 제어형 인버터는 기준 전류와 모터의 전류를 일치 시키는 기능을 가지고 있는데 이를 위해서는 전류 궤환이 필요하다. 전류제어는 인버터의 주소자의 적절한 On-Off에 의해서 이루어진다. 속도, 위치 궤환은 Incremental Inccorder와 interface IC를 거쳐 CPU 내부에서 연산된다.

만일 정격 속도보다 큰 명령치가 입력되면 모터는 약계자 혹은 정전력 영역에서 동작하게 된다. 여기서는 공극 자속 회전자 자속과 역 방향이 되게 d축 전류를 제어한다. 약계자 제어에 대해서는 다음 절에서 자세히 설명한다.

인버터의 동작 특성 및 소음 저감을 위해서는 스위칭 주파수를 높여야 하는데 용량 및 동작 주파수 면에서 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)가 가장 적절하다고 판정된다.

### 3.2 전력회로의 구성

주회로의 구성은 입력측의 전지전압과 제어대상인 전동기에 따라 결정되지만 여기서는 Prototype으로 개발한 BLDC 3Hp급 전동기에 대한 Controller를 위해 설계된 결과들이며 실제상의 전기자동차용에 적합한 용량에 있어서는 특별히 주회로 및 구동회로분야가 개선되어야 한다. 본 연구에 적용된 주회로는 그림 3.2에 나타내고 있다.

주회로는 전지로 받은 입력전압을 고려하여 DC300V로 3상 인버터로 구성되었으며 스위칭 소자는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 사용하였다. 주 소자인 IGBT는 고속스위칭 소자로서 구동방식도 전압구동형이므로 구동회로가 간단하고 전력소모도 작을뿐만 아니라 스위칭 시간이 짧고 스위칭 손실도 작다는 장점을 가지고 있다. 주회로의 동작원리는 전동기의 U.V.W상에 받은 각 상의 상전류와 엔코더를 통하여 받은 속도와 위치를 연산제어된 기준명령치의 전류치와 비교하여 6개의 IGBT를 독립적으로 구동시킨

다. 6개의 IGBT는 T1-T6으로 각 표시되고 T1과 T4, T2와 T5, T3와 T6가 서로 고대로 스위칭을 하도록 설계되어 있다. 3상 인버터에 적용된 IGBT소자는 인덕턴스부하인 관계로 스위칭시 발생하는 스파이크 전압이 크고 또한 전동기의 역전압에 의해서 파괴될 수 있으므로 스너버회로를 접속하여야 한다.

스너버회로의 설계에 있어서는 여러가지 방식이 있으나 인버터의 용량과 스위칭 주파수를 고려했을 때 RCD방식이 적합하여 RCD방식을 선택하였다. 이 RCD를 이용한 Snubber의 동작은 스너버용 다이오드에서 IGBT소자가 Turn-off시에 전동기의 역기전력에 의한 전류패스를 형성시키고 콘덴서는 전동기에 인가되고 있는 전압을 스위칭함으로써 발생하는 순간 피크전압을 줄인다. 또 저항은 스위칭에 의한 전동전류를 제한하기도 하고 스위칭 소자의 Turn-on, Turn-off시의 콘덴서에 유입되는 전류를 제한하며 여기서 제한된 전류는 열로써 발산한다.

또한 부하의 역기전력과 스위칭의 스파이크에 의한 서어지를 흡수하기 위하여 입력측에 서어지 흡수용 음저버를 삽입하였고 특히 고주파용 서어지를 흡수하며 저주파영역의 서어지와 출력측의 전압을 안정화시키기 위해서 입력측에 콘덴서뱅크도 설치하였다.

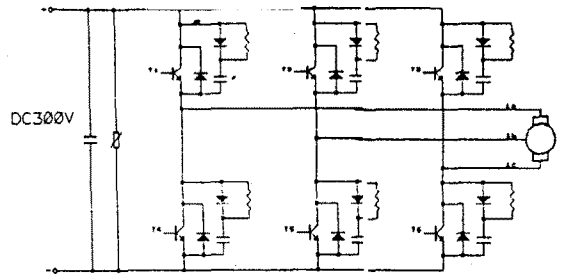


그림 3.2 주회로 구성

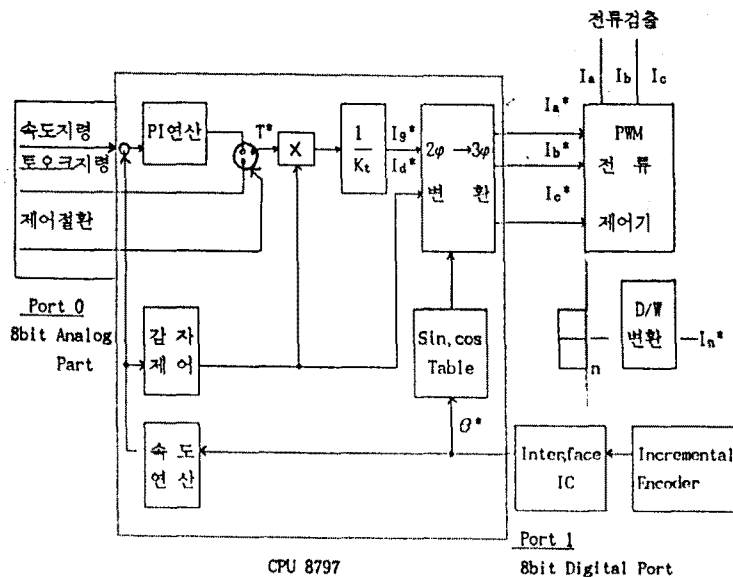


그림 3.1 제한된 구동 Controller

구동회로에 요구되는 기본기능은 주사자의 특성에 적합하도록 제어회로의 출력신호를 증폭시켜 안정하게 게이트전류를 공급하는 것이 목적이다. 설계시 주회로소자는 IGBT로써 1200V 100A급이고 스위칭 주파수가 10KHz로 설정하도록 되어 있다. 따라서 스위칭에 따른 소자양단간의 전압상승으로 진동전압이 발생되어 이에 대한 대책으로 구동회로 후단에 전압제한을 해 주는 회로가 필요하다. 또한 이영향으로 Photo coupler의 출력이 발전하여 오동작을 일으켜 게이트 전압이 불안하고 Noise가 발생하는 문제가 있게 된다. 따라서 회로 설계시에는 스위칭에 따른 진동전압을 저감하기 위해서 Noise내량이 우수한 Photo coupler의 적용과 더불어 구동회로의 동작 level를 높여서 Noise영역을 상대적으로 줄여야 한다.

또 IGBT 구동시 Gate-Emitter간에 존재하는 정전용량에 주의하여야 하며 (약 1nF)이 정전용량에 따른 영향을 줄이기 위해 이 정전용량의 전하를 빠른 시간에 충전방이 가능한 폐회로로 설계할 것인가 고속구동시의 중요한 점 이므로 이에 대해서도 검토되어야 한다.

### 3.3 전류제어기

전류제어를 하기 위해서는 Analog Controller가 필요한데 이를 어떻게 H/W상으로 구현하느냐가 중요하다. 제어대상을 고려하여 여러가지 방식들에 대하여 검토한 결과 PI(Proportional-Integral)제어기가 제작성과 응답성면에서 우수하고 편리하여 적용하였으며 PI제어기에서도 본 실험에서는 Series PI Controller방식을 채택했다.

제어기의 동작원리는 전동기의 상전류로 받은 실속전류  $I_{of}$ 와 전류명령치  $I_a^*$ 를 비교하여 그 차이(error)를 보상하도록 하는데 이 차이분을 Series PI controller로 보상의 방식이다.

### 3.4 위치검출회로

BLDC전동기로부터 위치를 검출하기 위한 방법은 크게 출력펄스의 형식에 따라 펄스수를 이용하는 인크리멘탈(Incremental)형과 부호(절대값)으로 표현되는 absolute형이 있다. 본 시험장치에서는 prototype으로 선정된 BLDC전동기 (3HP급)가 인크리멘탈형 엔코더를 내장하고 있기 때문에 인크리멘탈형 엔코더의 특성에 대하여 고찰하였다. 표 3.1은 내장된 Incremental형 엔코더의 특성을 나타내고 있다. 내장된 Incremental형 로터리 엔코더(SSM-2220)는 1회전마다 2상 펄스를 출력시키며 또한 전기자동차의 특성상 위치결정 동작시 정·역회전을 필요로 하기 때문에 정회전, 역회전을 검출시 90도 위상차를 갖는 A상과 B상의 펄스를 이용한다. A상, B상의 동작으로 up/down펄스를 만들어 내어 필요한 자리수의 up/down카운터에 입력하여 카운터의 내용을 판독함으로써 회전량을 알 수 있다. 로터리 엔코더의 성능은 분해능에 따라 결정되는데 내장된 엔코더는 1회전당 2000펄스를 출력시키고 있어서 일반적인 100-1000펄스 정도 보다 매우 우수하다. 또한 분해능을 높이기 위해서 펄스 배를 4배하고 있으며 CW(정회전)방향에서 상승, 하강을 검출하여 플립플롭과 AND, OR회로를 이용하여 펄스변별/제배회로를 통과시킨 후 회전방향을 결정한다. 특히 실험장치에서는 Motion Control IC HCTL-2020을 이용하여 직접 CPU 8797에 인터페이스시켜서 속도제어를 하고 있다.

기본설계 개념은 그림 3.4와 같은 원리로서 행한다.

HCTL-2020 IC는 내부에 16bit counter를 내장하고 있으며 Microprocessor에 인크리멘탈 엔코더를 직접 인터페이스화시킬 수 있다. Incremental엔코더의 출력 A상과 B상을

HCTL-2020 IC의 8,9핀에 입력시키면 내부에서 Digital Noise필터와 Quadrature엔코더를 통과한 후 카운터와 Latch 및 buffer를 통하여 최종적으로 Data가  $D_0-D_7$ 까지 출력되어 CPU 8797의 8bit의 Port에 입력된다. 데이터 라인  $D_0-D_7$ 은 8797 bus port에 연결되고 port의 비트가 0과 1일 때 각각 HCTL-2020의 SEL과 OE입력을 제어하도록 설계되어 있다. 또한 HCTL-2020의 입력중 CLK, AEL, OE는 CPU8797로 부터 연결되며 RST는 리셋하기 위해서 설정되어진다.

표 3.1 Incremental엔코더의 특성

항 목	특 성
출력 펄스수/1회전	2,000p/rev
펄스위치결정범위	+1 - +-9999(4체배)
펄스지명 형태	F/R, sign/pulse, A/B
펄스지명 주파수	0- 400KPPS

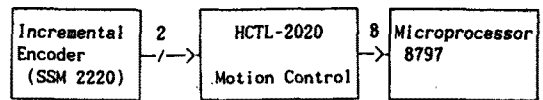


그림 3.4 Digital Motion엔코딩의 원리

### 3.5 Digital Controller의 구성

Digital Controller는 16bit M-Processor 8797BH를 기본으로 하여 주변장치로 이루어져 있다. 8096은 16bit CPU와 프로그래머블 I/O부분으로 구성되고 각 부분들을 여러가지 기능 블록으로 세분된다.

- H/W 구성

제어기는 CPU 및 I/O부분, 연산 출력을 위한 LATCH부, Analog출력을 위한 D/A부로서 나뉘어진다. 속도명령의 부분은 Volume으로 구성되어 있으며 PORT 0의 Analog 입력 부분에 입력된다. 속도 연산은 Interface IC HCTL-2020의 출력(8bit)이 PORT 1로 입력된다. 또한 회전자의 위치 연산을 위해서는 HSI에 Encoder의 출력이 연결된다. ADDR / DATA BUS는 전류 명령 연산 결과가 출력되는 PORT이며, LATCH 및 Chip Select를 거쳐 D/A를 통하여 Analog부분과 Interface 된다.

- S/W 구성

\* Torque 명령 연산

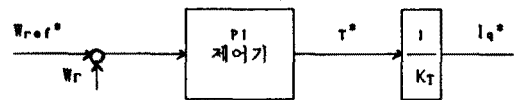


그림 3.5 Torque 명령 연산

토오크본의 전류치 명령을 계산하는 Routine이다. 속도 제어에는 PI제어기가 쓰였다. PI제어기는 속도 명령치에 Motor 회전 속도가 일치시키게 하는 제어기로 가장 널리 쓰이고 있다. PI제어기는 Analog 및 Digital 방식으로 구현될 수 있는데 Digital 방식에 의한 구현은 다음 식으로 표시된다.

$$T^*(n) = T^*(n-1) + (K_p + K_i T_s) (W_{ref}(n) - W_r(n)) - K_p (W_{ref}(n-1) - W_r(n-1))$$

PI제어기의 구현에 있어서는  $K_p$ ,  $K_i$  상수 결정이 가장 중요한데 일반적으로 실험을 통하여 최적값을 찾을 수 있다. 여기서 구한  $T^*$ 은 전동기의 Torque 상수  $K_t$ 로 나누어서 Torque 성분의 전류명령치  $I_a^*$ 로 연산된다.

**\* 감자 제어**

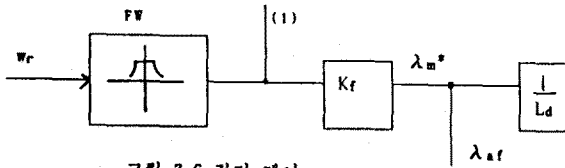


그림 3.6 감자 제어

BLDC 전동기는 회전자속이 영구자석으로 이루어져 있으므로 전동기 속도가 기준 속도 이상으로 되어 있을 때 행하는 감자 제어는 고정자속에서 행하게 되어 있다. FW는 전동기의 속도-토크 특성곡선에서 구할 수 있으며 (1)의 실제 출력은 1 이하이다. 즉  $W_r \leq W_b$  일 때는 (1) = 1,  $W_r > W_b$  일 때는 (1)은 1 이하를 출력한다.

(1)은 토크 연산부에 입력되어 기준속도 이상일 때 감자 제어를 한다. (1)의 출력은 Kf를 곱하여 회전자의 자속 명령으로 되며 영구자석의 자속과의 차이 및 회전자의 d축 인덕턴스 Ld에 의해서 전류의 d축 명령 Id 가 연산된다. 감자 제어시는 Id는 음의 값으로 된다.

**다) 속도 연산**

Optical 엔코더는 회전기의 위치검출에 널리 쓰이고 있다. 엔코더는 회전당 2~4000번의 pulse train을 출력한다. Optical 엔코더의 구성 및 출력은 그림 3.7과 같다.

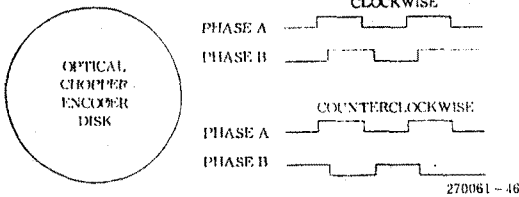


그림 3.7 Optical 엔코더의 구성 및 출력

그림 3.7와 같이 두 파형이 위치 및 방향을 결정할 수 있다. 또 u-processor를 이용하여 위치 및 시간 정보로부터 속도 및 가속도도 결정할 수 있다. 엔코더를 인터페이스하는 문제는 기계적으로 발생된 전기 신호를 HSI Unit와 연결시켜야 한다. 엔코더 신호에 대하여 8096 외부에서 Digital filtering을 행하여야 한다.

속도연산을 위한 모드는 2개로 나뉜다.

모 드	동 작
0	HSI가 Phase A만 검지
1	HSI 대신 Timer 2 이용

모드 1에서는 Timer 2가 입력신호의 edge의 갯수를 연산한다. Software timer routine은 HSO 0를 통하여 이루어지며 Timer 2값을 이용하여 edge의 갯수를 연산한다. 저속시를 제외한 일반적인 속도 연산은 모드 1을 통하여 행해진다. HSO routine은 매 500us에 수행한다.

모드 0에서는 저속시의 속도 연산을 주 목적으로 하며 HSI Interrupt를 이용하여 매 Interrupt의 발생시간 차를 이용하여 속도를 연산한다.

**라) 상 변환기**

속도 및 토크 제어기의 출력명령 iq, id는 2상 - 3상 변환을 통하여 3상의 전류 명령을 출력한다. 2상 - 3상 변환은 Analog회로 혹은 Digital로 처리할 수 있는 데 제어기

Time between edge < Min - HSI



Timer 2 count difference < 2

그림 3.8 Mode의 변환

의 연산량이 많지 않고 Memory Space가 많으므로 S/W로 처리하였다.

2상 - 3상 변환을 위해서는 회전자 위치에 따른 sine, cosine 값을 연산해야 하는 데 Look-up table을 구성하여 회전자 위치에 따른 sine, cosine 값을 찾은 후 연산을 걸쳐서 3상 기준 전류 ia, ib, ic를 출력하도록 구성되어 있다. 실제의 coding은 PLM Language로 하였다.

**4. 구동 Controller의 특성**

본 장에서는 Prototype으로 개발한 Controller의 개발 결과를 제시하고 있다. 실험에 있어서는 주 전동기가 BLDC 전동기 3HP급이기 때문에 구동용 전동기의 축에 직류 전동기를 연결하여 부하로 활용하였다. 구동 Controller의 개발 특성은 전기자동차로서의 기능을 충분히 발휘할 수 있도록 여러가지의 조건에 대해서 실험을 행해야 한다.

본 연구에서는 주로 Controller의 기능 구현에 중점을 두고 실험장치를 개발하였으며 향후에는 이들에 대한 적합한 설계와 충분한 실험이 이루어질 것이다. 사진 1은 개발된 구동 Controller를 실험하기 위한 실험장치를 나타내고 있다.

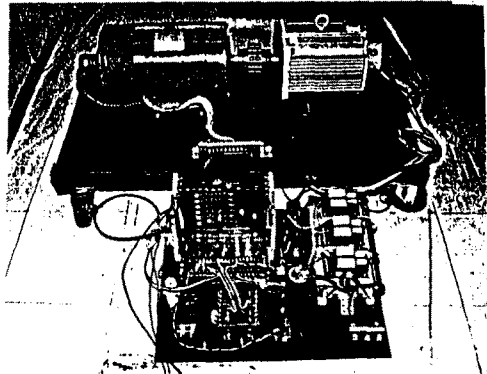


사진 1. 구동 시험을 위한 시험장치

BLDC 전동기의 출력을 직류전동기와 축 연결시켜 부하로서 이용하는 방식으로 행하였으며 부하의 변동은 직류전동기의 입력에 저항을 삽입하여 부하조건을 바꾸었다. 또한 직류전동기이므로 계자전압은 직류 96V를 인가하였다.

전기자동차 구동을 위한 Torque 명령 연산, 감자제어, 속도연산 및 상변환을 Digital로써 수행하게 된다.

표 4.1은 Prototype으로 개발한 주요 특성을 나타내고 있다.

**5. 결론**

전기자동차용 컨트롤러는 대상 모터에 따라 결정된다. 전기 자동차용 컨트롤러가 갖춰야 할 특성으로서는 성능상으로 주어진 속도 혹은 Torque 명령에 따라 명령치에 빨리 접근하도록 해야 한다. Controller는 구동 방식에 따라 직접 구동 (D-D) 방식 및 간접 구동 방식으로 나뉠 수 있다. 종

태에는 기존의 가솔린 차의 엔진부분을 Motor-Controllre로 대체한 One-Motor Type의 전기 자동차의 개발이 주로 이루어졌고 사용 모터도 직류 모터가 주로 쓰였다. 그러나 제어 기술의 발달에 의하여 교류 모터가 각광을 받고 있으며 직접 구동방식이 널리 쓰이고 있다.

본 연구에 있어서는 제어 대상의 Motor를 출력밀도가 높고 제어 특성이 좋은 BLDC 모터로 채택하였으며 이에 따른 컨트롤러의 설계 및 Controller의 특성 평가를 위하여 소형 Prototype (3HP)이 개발 되었다. 특히 직접 구동 방식에의 적용을 위해서 토크 제어기능이 첨가 되었다.

앞으로의 연구는 기본적인 연구결과를 토대로 실 차량에의 적용을 위한 사양 설계가 이루어 질 것이며 특성 시험을 통하여 성능 보강이 이루어 질 것이다.

< 참고 문헌 >

1. "전기자동차의 성능 향상을 위한 조사 연구", 1983. 3. 재단법인 일본 전동차 협회

2. Krause, "Analysis of Electric Machinery", Macgraw Hill, 1986.  
 3. Intel, "16-bit Embedded Controllers", 1991.  
 4. Intel, "Embedded Applicatns Handbook", 1990.  
 5. P. Pillay, & R. Krishnaan, "Application Chacteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors for Servo Dirve", Ploc. of IAS, 1987.  
 6. P.Pillay & R. Krishnan, "Modelling, Simulation and Analysis of a Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive", Proc of IAS, 1987.  
 7. P. Pillay & R. Krishnan, "Modelling, Analysis and Simulaton of an High Performance Vector Controller Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", Proc. of IAS, 1987.  
 8. C. CHAN, "Control Strategy of PWM Inverter Drive System for Electric Vehicles", Trans. on Industrial Electronics, NOV, 1987.

표 4.1 주요 개발 특성

항 목	특 성
1. 일반 특성 - 주회도 - 제어방식 - 용 량 - 주전동기	3상 IGBT 인버터 PWM 전류 제어 방식 3HP BLDC 전동기
2. 전기적 특성 ○ 입력 전압 ○ 출력 - 스위칭 주파수 - 출력 주파수 - 최대 공급 전류 - 최대 출력 전압 ○ 개환 방식 ○ Interface IC ○ 연산 방식 ○ 보호회로	300V DC 10KHz 0 ~ 100Hz 100A 220V AC Incremental Encoder HCTL-2020 16 bit $\mu$ -Processor 8797BH 과전압, 저전압, 전류제한 회로 암단락방지회로, Soft Start회로

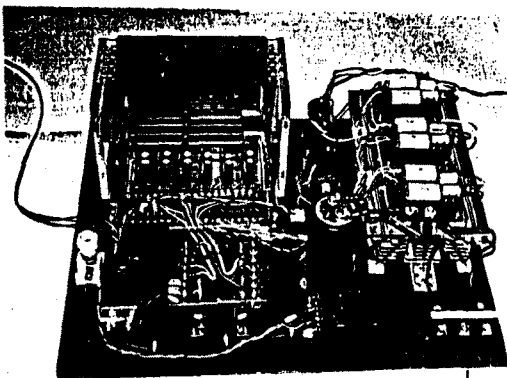


사진 2. 개발된 Controller

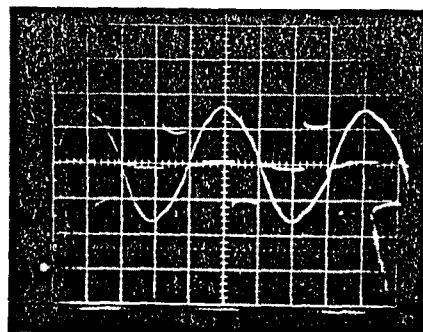


그림 4.2 출력 전류 전압 파형 (rpm = 1540)