

# 고속 고효율 BLDC 전동기 드라이브 개발

\*김병섭\*, 송중환\*, 김현철\*\*, 공영경\*\*  
 (주)효성\*, 국방과학연구소\*\*

## The developement of BLDC motor drive with high speed and power

B.S.Kim\*, J.H.Song\*, H.C.Kim\*\*, Y.K.Kong\*\*  
 Hyosung Corp.\*, ADD\*\*

### ABSTRACT

군사용 전동기는 고속, 고효율, 고신뢰성, 저소음의 특징을 갖고있어야 하며 이러한 성능을 구현하기 위한 전동기/드라이브의 설계 및 제조, 시험은 일반적인 전동기, 인버터 구조와는 많이 상이하다.

우선 7상6극의 전동기 특성을 갖고 있어 같은 상전류에 대해 3상 전동기보다 높은 출력을 얻을 수 있어 동일 출력의 3상 제어반에 비해 적은 용량의 전력소자를 분산시킬 수 있으므로 조립이 용이하다. 또한, 전류 리플을 동일 용량의 3상 전동기에 비해 약 2배 가량 감소시킬 수 있다. 고속(25,000rpm) 회전을 통해 체적대비 출력을 극대화하여 3kW/Kg으로 세계적인 수준에 도달된 상태이다.

본 논문에서는 한정된 전원전압, 전류 범위, 공간등의 제한 하에서 목표 출력과 성능이 나올 수 있는 드라이브 구성 및 제어 알고리즘, 시험결과를 기술한다.

### 1. 서론

고속 고효율 BLDC 전동기 드라이브 개발이 국내 최초이기 때문에 많은 시행착오를 거쳐왔으며, 순수 시험만 현재까지 2년 6개월을 행해왔다. 전동기와 드라이브를 같이 개발해야 했기 때문에 상호간의 연동이 상당히 중요하며 발생하는 문제점을 빠르게 상호보완 해야 했다.

7상6극 전동기의 모델링 및 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제어가능성 및 알고리즘을 도출하였다.<sup>[3][7]</sup> 역기전력이 적을 경우 출력이 나오지 않게 되며 클 경우는 입력전압이 고정되어 있기 때문에 속도가 나오지 못하여 역기전력의 최적화 설계가 행해졌다.<sup>[3][4][6]</sup> 전동기 고정자 권선의 인덕턴스가 적을 경우 단위 시간당 전류상승이 크게되어 IGBT가 최대로 스위칭을 한다고 하여도 IGBT의 최대 전류이상의 전류가 흐를 수 있으며, 전류 리플이 커

지게 되어 출력감소의 원인이 된다. 이에 원하는 인덕턴스 설계가 또한 이루어졌다.<sup>[3][4][6]</sup> 전동기가 고속으로 회전할 때 자석표면에 생기는 와전류에 의한 온도상승에 대해 FEM해석을 했다.<sup>[3][4][6]</sup> 고속 회전 시 상전류의 di/dt가 작아지므로 역기전력에 대해 상전류가 뒤지게(lagging)되어 원하는 출력과 속도가 나오지 않게 되기 때문에 역기전력에 대한 상전류 leading angle의 영향 분석 및 실험등을 진행시켜 왔다.<sup>[5][7]</sup>

한편, 본 논문에서는 전동기 해석과 구조등을 제외한 드라이브 시스템 전체 구성, 제어기, 파워부 설계 결과, 엔코더부 원리, 기타 센서부에 관해 기술하였고 전체 제어방법, 특수 기능을 포함시켰다.

### 2. 시스템 구성

#### 2.1 전체 시스템 구성

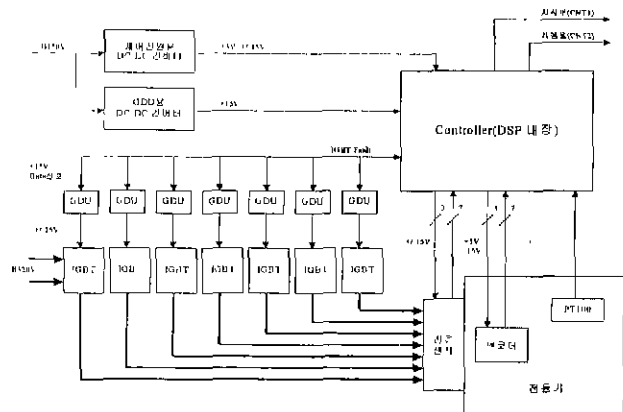


그림 1 드라이브 전체 구성도

그림 1은 드라이브 전체 구성도로써 크게 DC-DC 컨버터, 제어기, 파워부, 전류센서, 엔코더로 나눌 수 있다.

우선, 150V를 입력받아 DC-DC컨버터를 통해 제

어전원(5V, ±15V), Gate Drive Unit(GDU) 전원(+15V)를 만들게 되며 제어기는 지시부(아날로그 지령이나 RS232통신)으로부터 속도 지령을 받아 파워부에 펄스를 인가하게 된다. 펄스를 받은 GDU와 IGBT는 300V를 스위칭하여 전동기에 전원을 공급한다. 전동기 입력전류는 전류센서를 통해, 속도와 위치는 엔코더를 통해 제어기로 귀환되어 전류제어와 속도제어가 행해진다.

## 2.2 제어기 구성

그림 2는 제어기의 구성을 도시한 것으로 크게 DSP부, EPLD부, 전류제어부, 입출력 신호부로 나눌 수 있다.

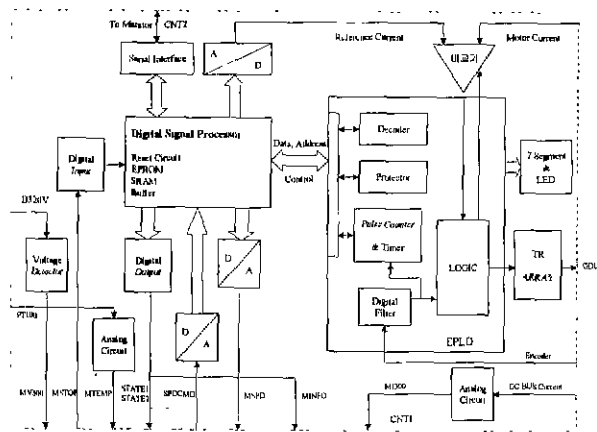


그림 2 제어기 구성도

DSP부에서는 TMS320C31 DSP를 사용하며, 초기 부팅을 위한 EPROM, 부팅 후 프로그램과 데이터를 저장하는 SRAM, 데이터와 어드레스 출력신호를 버퍼회로, 클럭으로 구성된다.

EPLD부는 많은 디지털회로를 수정 및 편배열을 용이하게 하기 위해 채택되었으며, 디코더, 엔코더 신호처리부, gate 출력신호 처리부, 각종 필터, 보호부등이 내장되어 있다. gate 출력신호 처리부에서는 땀땀전류제어의 펄스출력이 GDU와 IGBT의 스위칭한계를 넘을 수 있기 때문에 그 스위칭한계에 맞추어 재가공을 하는 기능을 수행하는 부분으로 short 펄스 제거, ON-OFF 펄스폭 보장회로가 내장되어 있다. 엔코더 신호처리부에서는 엔코더로부터 오는 신호를 4단 디지털필터를 통과시키고 전류제어의 select신호로 가공하는 등시에 edge를 카운트하여 저장한다.

전류제어부는 땀땀전류제어를 아날로그 회로로 구현하였으며, 전류지령은 DSP 프로그램에 의해 DA컨버터로 출력된다. 전류지령과 귀환전류와 비

교하여 gate 입력신호가 나오면, 이 신호를 EPLD가 최종 가공하여 GDU에 인가한다.

입출력 신호부는 RS232통신부, 유도제어부 IO부로 나뉜다. 유도제어부 IO에는 실제 속도지령입력인 SPDCMD, 실제 전동기 속도출력인 MSPD, 전동기 주전원전압인 MV300, 전동기 주전원전류인 MI300, 전동기 권선온도인 MTEMP등의 아날로그 신호와 전동기 정지신호인 MSTOP, 전동기 자체 이상유무 신호인 MINFO, 전동기 상태출력인 STATE1, STATE2등의 디지털 신호가 있다.

## 2.3 파워부 구성

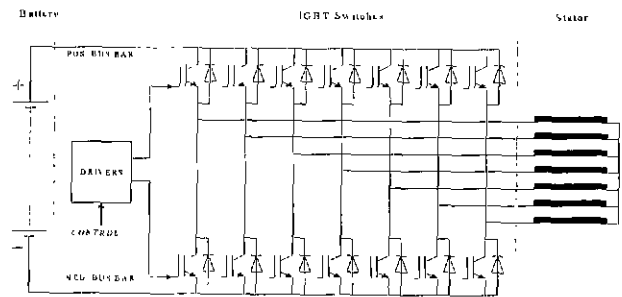


그림 3 파워부 구성도

전동기 파워부가 그림 3에 도시되어 있다. 7상6극 전동기이기 때문에 IGBT가 상당 2개 합계 14개가 있으며, 각각에 GDU가 부착되어 있다. IGBT와 GDU는 독일 SEMIKRON사 제품으로 IGBT는 200A급이고, GDU는 자체 DC-DC컨버터를 내장하여 제어기 신호와 GDU전원을 IGBT신호와 절연하고 있기 때문에 단일전원 사용이 가능하여 구조가 간단해진다. GDU 전원 15V를 모니터링하여 범위의 전원이 인가될 경우 에러 신호와 함께 펄스출력을 자체적으로 차단하는 기능을 내장하고 있다.

파워부가 전동기 표면에 부착되어야 하기 때문에 IGBT와 GDU PCB의 크기와 배치가 전동기의 성능에 매우 중요한 요소로 작용을 한다. IGBT는 기존의 200A급보다 폭과 길이가 작은 것을 사용하였고, GDU PCB는 크기에 맞게 설계하여 적용하였다.

IGBT에 연결되는 +, - 전원단에는 IGBT전용 필터콘덴서를 부착하여야 하지만, 높이에한으로 인해 부착할 수 없으므로 +, - 부스바를 전동기 내에서 최대한 겹쳐서 배선할 수 있도록 설계했으며, 부스바에 필터콘덴서를 연결할 수 있게 리드선을 내었다. 또한 0.2T인 구리판을 절연하고 3장을 겹쳐 만들어 표피효과에 따른 전류 감쇠를 최대한 감소시켰다.

GDU와 IGBT사이의 거리는 안정된 스위칭과 밀접한 관계가 있기 때문에 최대한 가깝게 배치하도록 하였다.

### 2.4 엔코더 구성

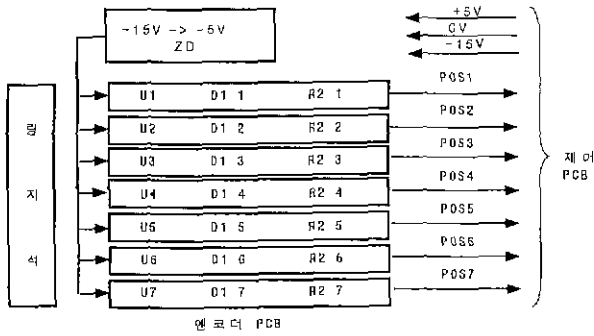


그림 4 엔코더 구성도

전동기의 회전자 자석 위치와 회전속도를 센싱하기 위한 엔코더는 고속인 관계로 일반 엔코더를 사용할 수 없었기 때문에 홀소자 방식의 엔코더를 자체 설계하여 사용하였다. 그림 4는 설계된 엔코더의 전체 구성을 보여준다.

우선, 6극인 센싱용 링자석을 별도 설계하여 회전자 축 끝단에 고정하고 링자석과 Imm간격을 두고 홀소자가 붙은 엔코더 PCB를 고정한다. 회전자가 회전할 때 센싱용 링자석도 같이 회전하여 홀소자가 자석의 극이 변화할 때마다 ON, OFF출력신호를 제어기로 출력하는 구조로 되어있다.

초기에는 정현파 신호 출력을 내는 홀소자를 사용해서 증폭기와 비교기가 엔코더에 내장되어 복잡하고 신뢰성이 떨어질 뿐만 아니라 고속회전시 유기되는 자기장으로 인해 일부 소자가 파손되기도 하였으나 사각파 신호 출력을 내는 홀IC로 재 설계한 후 노이즈, 신뢰성 문제가 해결되었다.

### 2.5 기타 센싱부

전류제어할 때 전류 귀환신호를 센싱하기 위한 CT와 전동기 고정자 권선 온도를 측정하기 위한 RTD가 있다. CT는 전류형이며, 자체 귀환을 통해 bias 조정이 필요없는 정확한 신호를 출력한다. 전류형이기 때문에 노이즈에도 강인한 특성을 갖는다. RTD는 온도에 따라 저항이 변하는 특성을 갖는 재료로 고정자 권선 중 고온발생부에 부착되어 제어기와 연결된다.

## 3. 제어 알고리즘

### 3.1 제어 블록도

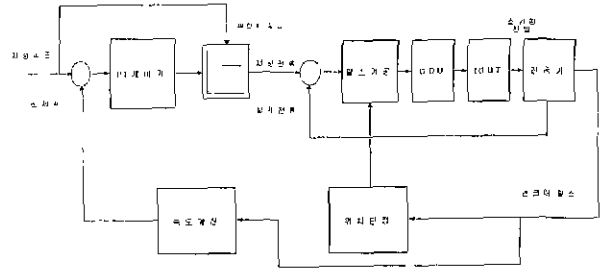


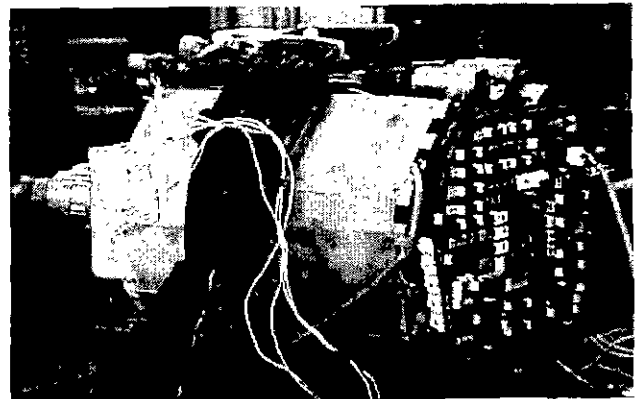
그림 5 제어 블록도

그림 5는 전체 제어 블록도를 나타내고 있다. 유도제어부로부터 속도지령을 받게 되면, DSP는 EPLD의 정보를 읽어 속도를 MT method로 찾게 된다. 이 지령속도에서 실제속도를 뺀 값은 PI제어기로 입력되어 전류제어기의 입력지령을 만들게 된다. 이 전류지령은 제한치 설정부에서 지령속도가 가변되는 최대값으로 제한된 후 최종 전류지령으로 사용된다. 이 전류지령에 귀환되는 전류가 비교기를 통해 펄스신호로 출력되고 그 출력신호는 EPLD내부에서 IGBT 스위칭 주파수 한계에 맞는 펄스로 가공되어 GDU, IGBT로 신호가 전달되며 전동기에는 300V의 스위칭 전압이 인가된다.

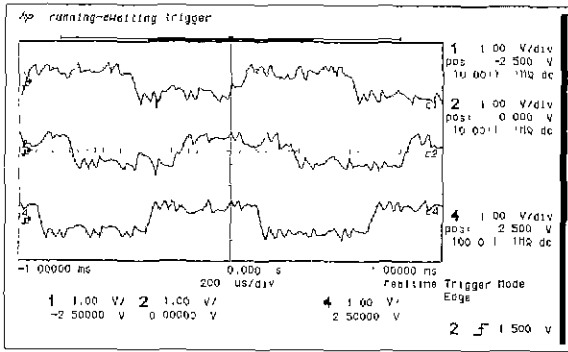
### 3.2 특수 기능

군사용 전동기의 특징으로 인해 전동기 제어에 있어서 특수기능이 내장되어 있다. MSTOP과 SPDCMD가 동시에 만족을 하고, 300V전원이 일정 전압 이상이 되어야 전동기 운전이 되도록 프로그램 되었다. 또한 특정 속도이상 도달한 후 MSTOP이나 SPDCMD OFF신호가 체크되었을 때는 다시 기동하지 못하도록 차단하는 알고리즘이 내장되어 있다.

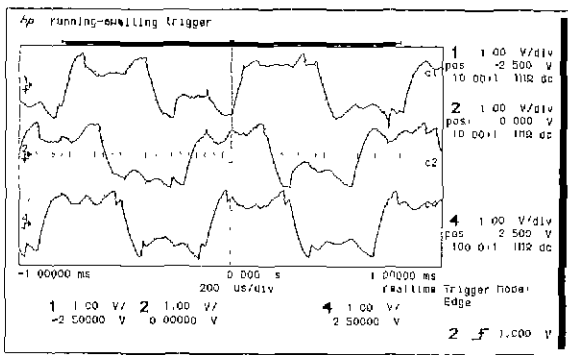
소프트스타트 방식을 채택하여 기동시 초기 전류 상승을 억제하고 일정한 가속도를 유지하였다.



#### 4. 시험결과



a) 19000rpm, 1, 2, 6상, 43kW



b) 25000rpm, 1, 5, 3상, 106kW

그림 6 전류센서 출력

그림 6은 제어기의 전류센서 출력을 오실로스코프로 측정된 결과로 단위는 167A/div이다. 노이즈가 보이지 않고 깔끔한 파형임을 알 수 있다. 팬부하이기 때문에 토크가 속도의 제곱에 비례하게 되어 저속에서는 토크가 작다가 속도가 증가하면 기하급수적으로 토크가 증가한다. 고속으로 갈수록 다른 상 스위칭할 때 전류가 떨어지는 경향이 심해지며 최대속도에 도달하면 전류모양이 심하게 일그러짐을 알 수 있다. 최대속도에서 전류는 220A로 제한되어 있다.

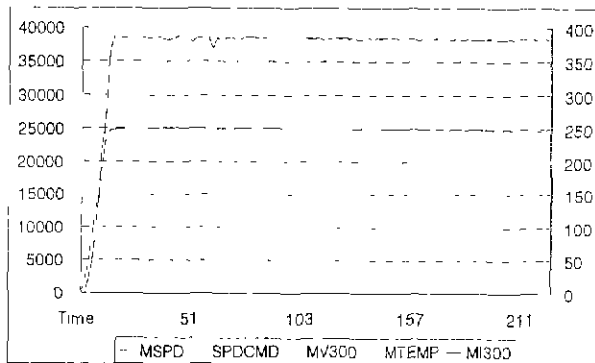


그림 7 유도제어부와의 입출력 신호

그림 7은 최대속도 4분시험할 때 저장한 입출력 신호 그림이다. 지령속도 25097rpm에 대해 실제속도가 그려져 있고, 그때의 입력전압 약 330V, 입력전류 약 380A, 전동기 최대 온도 약 150°C의 결과가 나왔다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 고속 고효율 BLDC 전동기를 구동하기 위한 드라이브 시스템의 구조와 각 구성품의 상세 설명을 아래와 같이 하였다.

- 1) 전체 시스템 구성도를 통한 기본 원리, 구성품의 개요, 전원 구조
- 2) 제어기 내부 구성 및 역할
- 3) 파워부의 전동기 표면 부착에 따른 고려사항
- 4) 자체 설계한 엔코더 원리 및 동작특성
- 5) 기타 센싱부의 종류
- 6) 제어원리 및 제어 특수기능 설명

위의 드라이브 시스템을 이용하여 시험한 결과를 보임으로써 시스템 동작을 검증하였고 최대 목표 출력 달성 및 우수한 성능을 입증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] Peter Mongeu, "High Torque/High Power Density Permanent Magnet Motors", *Naval Symposium on Electric Machines, proceedings*, July 28-31, 1997, The Hotel Viking, Newport, RI, U.S.A.
- [2] S.K.Safi, P.P.Acarney, A.G.Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives"
- [3] 송중환 외 6명, "단시간 고효율 BLDC 전동기 개발", *전기학회 추계학술대회 논문집*, pp 43-45, 1998. 11
- [4] 송중환 외 8명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발", *전기학회 하계학술대회 논문집*, pp 394-396, 1999. 7
- [5] 송중환 외 8명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발 (II)", *전기학회 추계학술대회 논문집 A권*, pp 67-69, 1999. 11
- [6] 송중환 외 4명, "7상6극 BLDC 전동기의 유한요소 해석", *제3회 해상무기체계 발전 세미나 논문집*, pp 245-250, 2000. 6
- [7] 송중환 외 3명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발에 관한 연구", *전기학회 논문지 Vol. 49, No. 5*, pp 297-304, 2000. 5