

### 견인전동기 구동을 위한 시험장치 제작

김길동\*, 조연옥\*, 박현준\*, 한영재\*, 이사영\*\*, 이미영\*\*\*  
\*한국철도기술연구원, \*\*명지전문대학, \*\*\*한양대학교

### The Manufacture of Test Equipment for Traction Motor Driving

Gil-Dong Kim\*, Yun-Ok Cho\*, Hyun-June Park\*,  
Young-Jae Han\*, Sa-young Lee\*\*, Mi-Young Lee\*\*\*

\*Korea Railroad Research Institute, \*\*Myung Ji Junior College, \*\*\*Han Yang University

**Abstract** - This study was carried out about the manufacture of test equipment for traction Motor Driving. The power converter is driven by two converter serially and keep a high power factor of power source. This system is haven all the characteristic of voltage source converter by having a processing ability of regenerating power. The traction motor is controlled by IGBT inverter. The test equipment is composed of traction motor, torque-meter, clutch, and inertia body of tubular type.

관성체를 정지시킬 수 있는 브레이크를 설치하였으며, 인버터를 구동하기 위한 Dual 전압형 PWM 컨버터와 극좌표 형식으로 연산된 변조율과 위상각으로 PWM 변조를 하는 방식을 사용하여 견인전동기의 구동에 적합한 인버터를 제작하였다. 견인전동기의 구동에 필요한 인버터는 광범위한 가변주파수의 기능을 가져야 하는데, 비동기, 동기모드를 가지며 과변조에서도 변조율이 조절과 소프트 온·오프가 가능한 PWM 변조방법에 대하여 서술한다.

#### 1. 서 론

견인전동기를 구동시키기 위해서는, 전동기 제어에 필요한 인버터와 인버터를 구동하기 위한 직류전원이 요구된다. AC를 DC로 변환해주는 전압형 PWM 컨버터(1,2)는 리액턴스를 사이에 두고 교류전원과 결합되는 구조이다. 이 구조를 갖는 컨버터는 고조파가 적게 포함된 정현파에 가까운 교류전류를 흐르게 하며 직류측전압이 변조율에 반비례하여 높아지는 특성을 가지게 된다. 무부하의 전압형 컨버터는 교류전원의 역률을 개선하는 무효전력 발생기의 기능을 가지며 무효전력의 보상을 필요로 하는 전력계통에 응용하여 전압조정 등의 수단(3,4)으로 사용하고 있다.

AC/DC 변환기로의 적용은 무효전력을 0으로 하는 고역율의 순변환과 역변환의 능력을 가진다. 높은 직류 출력전압을 얻기 위해서는 교류입력전압도 고전압이 되며 전력변환기는 고내압의 전력용 반도체소자를 사용하거나, 또 다른 방법으로는 멀티레벨의 변환기가 소개되어 있다. 그러나 실제 실험장치인 경우에는 입력전압의 조건에서 교류전압이 고전압이 되면 전기설비의 내용과 관리 및 운용에 많은 제약이 따르게 된다.

전동차의 견인 전동기를 구동하는 전력변환기의 경우에도 자기소호능력을 갖는 전력용반도체 소자를 이용한 대용량의 전압형 PWM 인버터를 응용하였다. 전력용반도체 소자로는 주로 GTO가 사용되어 왔으나, 근래에는 스위칭 주파수가 높은 IGBT로 대체되어 인버터의 기능을 향상시키고 있다. IGBT의 용량도 대용량의 것이 개발되고 있으며, 전력전자분야에 그 응용범위가 점점 넓어지고 있는 추세이다.

전동차에 사용하는 GTO인버터의 경우 2000kVA 정도의 인버터 1대로 4대의 견인전동기를 구동하는 방식(1C4M 방식)을 많이 사용해 왔으나 IGBT의 응용은 용량의 한계 때문에 3-레벨 변환방법을 사용하거나 견인전동기를 개별제어 하는 등의 방법을 사용해 왔다. 그러나, 최근에 와서 1C4M의 방식에 사용할 수 있는 용량의 IGBT가 개발되어 적용하고 있다.

본 연구에서는 견인전동기를 구동하기 위하여 전동차에 취부되어 있을 때와 등가인 등가관성체를 설계하여 전동기의 시험장치를 제작하였다. 이를 위해 시험장치에서 관성체의 동력을 차단할 수 있는 클러치와 시험도중

#### 2. 구동시스템

그림 1은 IGBT로 구성된 2대의 PWM 컨버터와 견인전동기를 제어해 주기 위한 인버터로 구성된 전력변환기의 구조이다. 전원장치의 경우에는 높은 직류전압을 얻기 위하여 직류측을 직렬로 연결하며 각 컨버터는 교류측과 각각 3개의 리액터를 사이에 두고 결합되어 있다. 교류측은 변압기에 의하여 2대의 컨버터가 교류전원에 대하여 절연된 구조를 가지며 직류측의 한쪽 극은 접지하여 실험에 있어서 안전을 도모한다. 전원에 흐르는 전류파형의 고조파성분이 적어지도록 각 컨버터의 변조 캐리어에 위상을 갖는 PWM 변조를 한다.

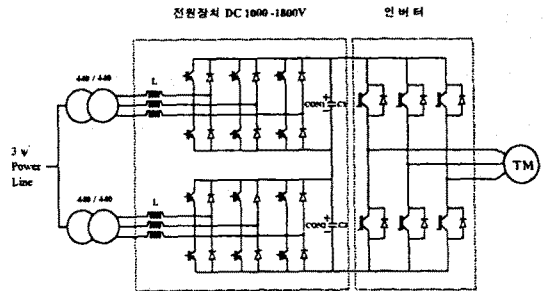


그림 1. PWM Dual 컨버터와 인버터

#### 3. 컨버터의 제어

전원장치 컨버터 제어블럭도는 그림 2와 같다. 그림 2에서 무효전류  $i_{qe}^*$ 는 0이므로 제어기의 수를 줄이기 위하여 무효전류의 제어에는 필터를 사용하였다. 이 방법은 무효전류가 완전하게 0이 되지는 않지만, 실제의 역률에는 거의 영향을 주지 않을 정도의 크기를 갖게 된다. PI 제어기의 출력은 리액턴스전압을 조절하게 하였고, 컨버터의 출력전압을 제어하는 주 제어루프로 구동된다. 그림 2에서와 같이 전류의 진동을 억제하는 보조 제어루프에서 유효전류의 설정값은 리액턴스전압인 PI 출력을  $\omega L$ 로 나눈 값이 된다. 이와같이 전류제어루프를 설치함으로써 PI제어기의 게인조절범위가 넓어지고 우수한 응답을 기대할 수 있으며, PI 제어기의 출력은 리

액터전압의 최대 크기로 제한해 안정된 컨버터의 운전이 가능하다.

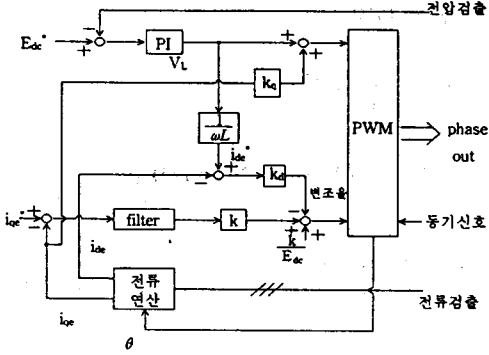


그림 2. 컨버터의 제어블럭도

#### 4. 인버터

견인전동기의 제어는 일정 토크를 얻는 일정 자속제어의 영역과 특성 운전을 하기 위한 자속 가변영역의 두 가지의 제어영역을 가지고 광범위한 속도 가변범위를 갖는 특성이 요구된다. 따라서 인버터는 전동기의 정격보다 높은 주파수에서도 운전되어야 하고, 전압은 인버터가 출력할 수 있는 최대전압까지 가변되어야 한다. 또 최근 전동차에 적용되기 시작한 벡터제어는 변조율을 가변할 수 있는 일정 자속영역에서는 제어가 용이하지만, 자속을 가변하는 영역은 인버터가 최대전압을 출력하여야 하므로 그 제어가 용이하지 않다.

여기서는 극좌표 형식으로 연산된 변조율과 위상각으로 PWM변조를 하는 방식을 사용하여 견인전동기의 구동에 적용하기 위한 광범위한 속도 가변범위를 갖는 인버터의 변조방식을 사용하였다. 극좌표에 의한 변조방식을 사용함으로써 인버터가 최대전압을 출력하는 영역(자속 제어영역)을 포함한 전 영역에서 주파수와 전압을 연속적으로 가변할 수 있다. 최대전압을 출력할 때는 변조율이 가변되지 않는 구간이므로 전압의 주파수와 위상을 조절할 수 있는 기능을 갖도록 한다. 또 견인 전동기의 구동은 인버터를 노치신호에 의하여 on-off 를 자주 반복하게 되므로 소프트 스타트의 기능을 가져야 한다. 기동과 제동시의 V/f의 비가 같지 않으므로 변조방법에는 전체 운전영역에서 변조율을 원활하게 변화시킬 수 있는 기능을 추가한다. 전동기의 저속운전때 나타나는 데드타임에 의한 영향은 스위칭 주파수를 낮추어 그 영향을 감소시킨다.

#### 4.1 운전특성

견인전동기를 구동하는 인버터를 설계하기 위해서는 전동기의 제어특성과 구동을 위한 전기적 환경을 알아야 한다. 견인전동기는 일반 산업용에 비하여 소형이며 고출력으로 광범위한 속도 가변특성이 요구된다. 이에 따라 구조적으로는 고속에서 견디는 베어링 등의 사용과 기계적으로 안정되어야 한다. 전동기는 가속과 감속을 할 때만 구동하므로 기동력을 크게 할 수 있다. 실제 기동 전인력은 연속정격의 150~170(%)로 하고 있으며 소형이므로 큰 토크를 발생하기 위하여 자속은 포화점에 가깝게 운전하고 있다. 슬립은 산업용에 비하여 크게 설계되어 있다.

그림 3의 자속을 제어하는 영역에서 전동기의 단자 전압이 일정해지면 최대토크는 주파수의 제곱에 반비례하여 감소하므로 그림 3을 고찰하면 견인전동기는 전 운전영역에 걸쳐서 최대능력에 가깝게 사용을 알 수 있으며, 이를 적절하게 제어하는 전력변환기가 필요하게 된다.

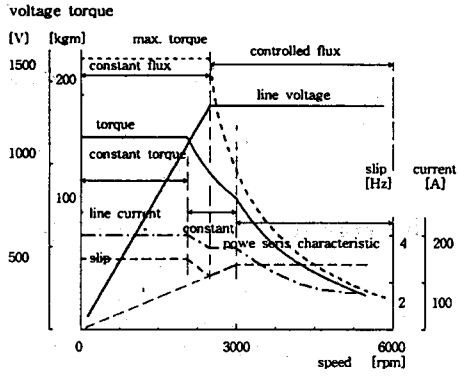


그림 3. 견인특성

#### 4.2 PWM 변조

펄스폭 변조의 인터럽트는 요구되는 인버터의 출력 주파수범위에서 그림 4에 제한한 것처럼 각 구간에 따른 주파수를 갖도록 한다. 그림 4에서 I, II, III 구간은 변조파와 캐리어파가 비동기로 변조되며 IV, V, VI 구간은 동기되어 변조를 하도록 한다. 동기구간에서 인터럽트의 주파수는 변조파형과 캐리어파형의 관계가 출력 파형 주파수의 9배, 15배, 21배가 되어야 한다.

변조파형과 캐리어파형의 관계가 비동기로 변조하는 구간 I, 구간 II, 구간 III의 경우와 동기되어 변조하는 구간 IV, 구간 V, 구간 VI의 변조모드 전환은 변조각과 캐리어 파형이 일치하는 순간에만 가능하다. 또 동기변조되는 구간 IV, 구간 V, 구간 VI의 상호간의 변조모드의 전환도 변조각이 일치하는 경우에만 가능하다. 따라서 모든 변조모드의 전환은 전기각 60°의 정수배인 점에서만 전환이 가능한 순간이 된다.

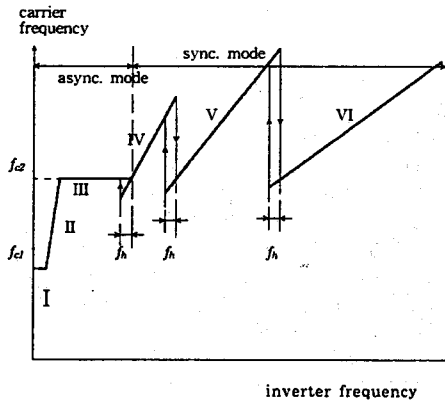


그림 4. 모드전환때의 히스테리시스특성

#### 5. 관성부하 시험장치

원통형의 관성체에 토크메타와 클러치를 직결하여 그림 5와 같은 시험장치를 제작하였다. 관성부하장치는 단시간의 운전이며 기동과 제동을 빈번하게 하여야 하므로 클러치는 관성체를 정지시키기 위한 브레이크를 갖도록 하였다.



그림 5. 전동차의 등가시험장치

## 6. 실험

그림 6은 컨버터에 100kW의 저항부하를 연결하고 온·오프하였을 때 교류전류파형이다. 컨버터의 최대용량에 대하여 1/3부하에 해당된다.

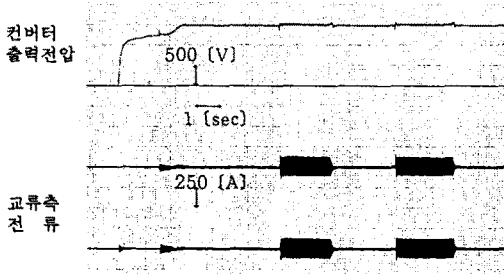


그림 6. 부하가변에 따르는 컨버터의 응답

그림 7과 그림 8은 판성부하의 견인전동기를 시험한 결과이다. 그림 7은 회전중에 있는 전동기를 가속시켰을 때의 응답이며, 그림 8은 감속(회생제동)때의 응답이다.

그림 7은 전동기의 속도가 상승할수록 컨버터의 전류가 증가하고 있지만 전동기는 정토크의 운전으로 일정한 전류가 흐르고 있다.

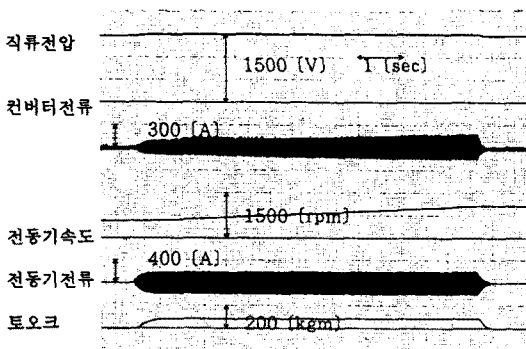


그림 7. 가속때의 파형

그림 8에서는 전동기의 속도가 감소하면 회생전력이 함께 감소하므로 컨버터의 교류전류도 감소함을 볼 수 있다. 두 경우 500~1000rpm 정도의 운전이며 소프트 온·오프의 동작이 매우 잘 동작하고 있다. 제어기가 슬립제어에 의하여 동작하고 있으나 토크의 제어가 매우

안정되어 있다.

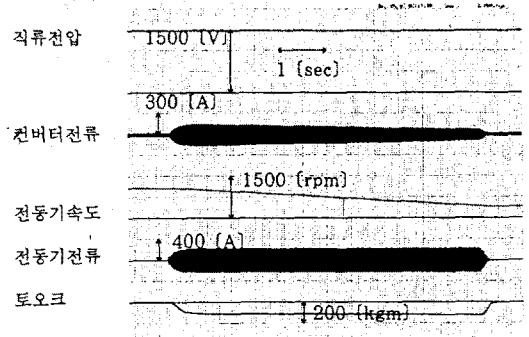


그림 8. 제동때의 파형

## 7. 결론

견인전동기는 구동주파수가 정격주파수의 대략 3배의 범위까지 적용하는 운전범위가 넓은 전동기인데, 여기에 적용하기 위한 PWM변조방법을 개발하였다. 정격속도 이상의 범위에서는 최대의 일정한전압으로 자속을 제어하게 되므로 과변조의 기능이 있어야 하고, 운전방법이 온·오프를 자주 반복하게 되므로 소프트 스타트의 기능이 있어야 한다. 결국 인버터는 어떠한 상태이던 전압의 조절이 자유로워야 하며 연속적인 주파수의 가변특성이 요구된다. 이를 16비트의 DSP 마이크로프로세서를 사용하고 비동기의 변조구간과 동기변조구간을 두었으며 인터럽트의 기능으로 변조를 수행하였다. 저속때에는 캐리어의 주파수를 낮추어 상대적인 데드타임의 영향을 감소시키고 각 변조모드의 전환시 2(Hz)의 히스테리시스 폭을 주어 모드변화점에서의 불안정을 해결하였다. 비동기변조에서 동기변조로의 전환은 동기진입의 시점이 정해진 크기의 오차 보다 작으면 강제로 동기변조모드로 진입시키고 이 오차를 변조주기에 보상하였다. 따라서 본 연구는 전압과 위상으로 변조를 하는 방법으로 견인전동기의 구동과 같이 과변조를 필요로 하고 전압의 조절이 자유로운 인버터의 변조방법을 고안하였다.

견인전동기를 구동하는 인버터의 기능은 견인과 제동 시험 이외에 정차제어에 관한 연구가 진행되어야 하며, 본 연구에서 제작된 전동차와 등가인 판성부하의 견인전동기 실험장치에서 클러치의 제어로 증가적인 전동차의 미끄러짐을 제어할 수 있다면 정차제어에 대한 연구도 가능한 실험장치로도 이용할 수 있으며, 이에 관해서도 지속적인 연구가 진행되어야 한다.

### (참고 문헌)

- [1] J. K. Steinke, "Switching Frequency Optimal PWM Control of a Three-Level Inverter.", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 7, no.3, pp. 487-496, 1992.
- [2] G. Carrara et al., "Optimal PWM for The Control of Multilevel Voltage Source Inverter.", Proc. EPE, pp. 255-259, 1993.
- [3] C. Hochgraf, R. Lasseter, D. Divan, and T. A. Lipo, "Comparison of multilevel inverters for static var compensation," IEEE/IAS Annual Meeting, pp. 921-928, 1994.
- [4] Fang Zheng Peng, Jih-Sheng Lai, "Dynamic Performance and Control of a Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverters" IEEE 1st Annual Meeting pp.1009-1015, 1996.