

고속전철의 와전류제동을 위한 IGCT 초퍼장치 개발에 관한 연구

이을재^{*}, 최정수^{**}, 김영석^{***}
이경산전(주)^{*}, 경기공업대학^{**}, 인하대학교^{***}

A Study on the Development of IGCT Chopper System for the Eddy Current Brake Unit

Eul-jae Lee^{*}, Jung-soo Choi^{**}, Young-seok Kim^{***}
E-Kyoung Sys.^{*}, Kyounggi Institute of Tech.^{**}, Inha Univ.^{***}

Abstract - 고속전철의 새로운 제동개념인 와전류제어 제동방식에서는 출력 자화력의 제어를 위해서 전류제어 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 신개념의 전력제어 소자인 IGCT(Insulated Gate Commutated Thyristor)를 초퍼회로에 적용한 스너버회로가 없는 형태의 고속전철용 와전류 제어장치의 개발에 대하여 설명하였다. 회로의 성능을 파악하기 위하여 주회로 시뮬레이션을 실시하였으며 대상체인 부하 마그네트를 연결한 고전압 출력 시험을 통해 장치의 성능을 조사하였다.

1. 서 론

일반적으로 열차의 제동 시스템에서 제동력의 발생은 바퀴의 기계적 마찰에 의한 접촉력에 의존하게 되므로 기상조건이나 기타의 조건에 의하여 선로와 바퀴의 접촉 계수가 변화하는 경우 정확한 제동력의 제어가 어렵게 된다. 또한 고속철도의 경우에는 기존의 열차에 비하여 속도가 훨씬 빠르므로 제동요구 요청시에 기존의 기계적, 전기적(회생력)인 제동 외에 제동시간과 제동거리를 단축할 수 있는 직접적이며 효율적인 제동방식이 추가로 요청된다[1-2]. 와전류에 의한 비접촉식 제동방식은 고속철도에서 제동력의 증대를 목적으로 개발된 새로운 제동 방식이다. 와전류 제동 시스템은 전자석의 자화 기전력을 제어함으로써 선로에 직접적인 제동력이 작용하도록 하여 필요한 제동 감속력이 얻어지게 한다.

와전류 제동 시스템은 자화 기전력을 제어하여 열차를 감속시키므로 기계적 마찰에 의한 마모가 발생치 않아 유지/보수가 기계식 제동시스템에 비하여 매우 간단하다. 또한 마찰에 의한 소음과 분진 등이 발생하지 않으므로 환경 친화적이라 할 수 있으며 특히 제동시에는 인버터에서 발생된 회생 에너지를 자화 에너지로 변환하므로 제동에 별도의 에너지를 사용하지 않아 경제성이 매우 높다.

와전류 제동을 위해서는 자화 기전력의 제어를 위한 전류제어용 전원장치(전류제어 직류초퍼 장치)가 필수적으로 필요하다. 와전류 제동 시스템에 사용되는 직류 초퍼 시스템의 경우 기본적인 주회로의 구성은 일반적인 강압 초퍼의 형태를 갖고 있으나 입력측 전압의 범위가 기존의 열차에 적용된 시스템에 비하여 더 높게 설정되어 있다. 또한 직류 초퍼의 부하로는 대부분 직류모터가 사용되는 것에 비하여 와전류 제동용 초퍼에서는 대용량 자화력 발생을 위한 전자석으로 이루어져 있다. 이에 따라 자화 에너지의 효율적인 발생과 제동력 추종을 위한 안정적인 전류제어기의 개발이 필요하게 된다.

본 연구에서는 이러한 대용량 자화 에너지의 효율적인 제어에 주안점을 두고 최신탄의 전력 제어소자인 IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor)를 주회로 소자로 하는 와전류 제동용 직류 초퍼 시스템의 시작품을 개발하였다.

2. IGCT 제동초퍼의 설계

2.1 주회로소자의 선정

전력회로에서 가장 중요한 설계요소는 회로의 동작에 알맞은 적절한 사용소자의 선정이다. 개발하고자 하는 와전류 제동용 전원장치는 입력전압의 범위가 일반 철도 차량에 비하여 더 높은 2500V~3250V 정도이고 적용부하는 자화력 발생을 위한 인덕턴스로 구성되어 있어서 일반적인 모터제어용 전력기기와는 다른 입출력 특성이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 대용량 전력회로의 On-Off 제어를 목적으로 최근에 개발된 IGCT를 주회로 스위치 소자로 사용하여 초퍼회로를 구성하였다. IGCT는 새로운 형태의 전력 스위칭 소자로 동급의 IGBT에 비하여 유사한 속도의 스위칭 주파수를 제공하지만 상대적으로 낮은 On 상태 저항을 가지고 있어서 대전력 대전류 스위칭의 경우 소자에서 소모되는 손실 및 발열을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 소자내부에 역방향 클램프 다이오드가 내장되어 있어서 고압회로의 구성에 있어서도 GTO 사이리스터에 비하여 간단히 구성할 수 있다. 가장 큰 특징은 GTO와는 달리 게이트의 구조가 매우 낮은 인덕턴스를 갖도록 구성되어 있어서 마치 바이폴라 트랜지스터의 Turn-off에서처럼 캐소드와 애노드간에 즉시 차단이 가능하다. 소자의 구동방식에 있어서도 게이트 구동부가 일체형으로 제공되므로 외부에서 게이트 구동회로를 구성하는 경우보다 신뢰성을 향상시킬 수 있으므로 결과적으로 전체 시스템의 신뢰성 향상에 도움이 된다.

표 1 적용 IGCT(5SHX06F6004)의 전기적 특성

V _{DRM}	V _{DC}	I _{TQM}	I _{TAVM} T _C =85°C	I _{TSM} I _{ms} I _{10ms}	V _{TO}	r _T	di/dt (diode)	T _{VJM}	R _{thJC}	V _{GIN}
V	V	A	A	kA	V	mΩ	A/μs	°C	K ² /k ² W	V
5500	3300	520	220	8.0 4.0	2.1 2.3	220	115	40	20	

2.2 제동초퍼 시스템의 구성

그림 2는 와전류 제동용 초퍼 전원장치의 주회로 구성을 나타낸 것이다. 전원장치는 초기충전 회로 및 주접속기, 입력 LC 필터, 방전회로, IGCT 초퍼회로, 고속 한류용 퓨즈 및 제어회로로 구성되어 있다. IGCT에는 고속 R-C-D 스너버 회로가 없는 대신에 소자에 인가되는 di/dt를 제한하기 위한 리액터가 전류패스에 연결되었다.

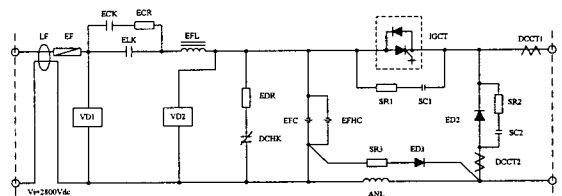


그림 2 와전류 제동용 초퍼 전원장치의 주회로 구성

표 2 주회로 정수

입력 필터 리액터	2[mH]
입력 필터 캐패시터	1000[μF]
IGCT 애노드 리액터	3[μH]
스위칭 주파수	360[Hz]
부하 저항	17.4[ohm]
부하 인덕턴스	2.58[H]

표 3 와전류 제동 초퍼장치 사양

항 목	내 용
주회로 구성	Step-down DC 초퍼 시스템
주회로 소자	IGCT
냉각 방식	자연냉각
정격 입력 전압	2800Vdc
정격 출력 전압	2000Vdc
정격 출력 전류	120A
정격 출력 전력	240kW
제어 방식	PWM, 디지털 PI 제어
입력 제어 전압	72Vdc
입력전압 변동범위	2500 ~ 3250Vdc
제어전압 변동범위	50 ~ 100Vdc
fan 모터용 전원	3상 440Vac 60Hz
제한 크기[mm]	1850(W) x 570(H) x 900(D)

2.3 제어부의 구성

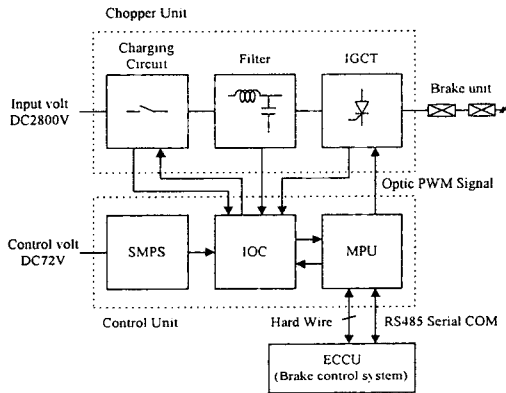


그림 3 와전류 제동초퍼의 제어구성도

개발된 초퍼시스템은 그림 2와 같은 제어구조를 갖는다. 제어회로는 Intel사의 단일칩 마이크로컨트롤러인 80C196KC를 기반으로 하는 디지털 제어기로 구성되며 CPU 및 전원장치로 구성되었다.

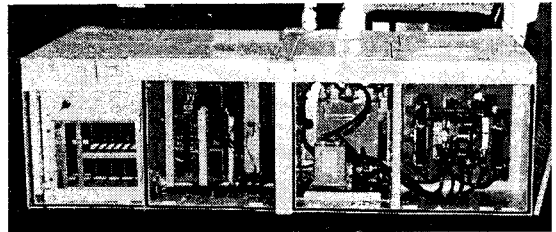
CPU Card는 MPU(micro processor unit)와 IOC(input output control) 부분으로 구분되며 MPU에서는 출력 전류 제어를 위한 디지털 PI 제어를 실행하고 IGCT 구동을 위한 펄스 PWM(pulse width modulation) 신호를 발생시킨다. 또한 내부 시킨스에 따라 각각의 접촉기를 동작시키며 제동제어기(ECCU)와 통신을 함으로써 제동에 필요한 정보를 처리할 수 있도록 하였다. IOC에서는 주회로에 설치된 센서로부터 신호를 입력하여 과전압, 과전류 등 동작의 이상유무를 판별하여 MPU에 알려주는 기능을 갖는다. 이와 함께 각 컨택터를 동작시키기 위한 릴레이 회로가 구성되어 있으며 컨택터 및 퓨즈의 정상 동작 여부를 판단하는 회로가 내장되어 있다. 초퍼의 동작 상태를 나타내기 위하여 표시장치를 부착하였으며 5

개의 7-세그먼트 LED를 사용하여 전압, 전류 및 고장상태 등을 표시하도록 하였고 8개의 LED를 사용하여 초퍼의 동작상태를 순시적으로 보여줄 수 있도록 하였다.

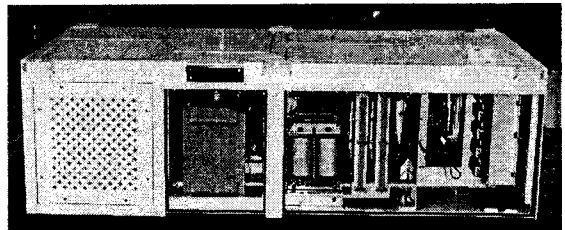
IGCT 스위칭 주파수는 소자의 동작속도를 고려하는 한편 가선에 미치는 고주파의 영향을 최소화 하기 위하여 가선 주파수의 6배(360Hz)에 해당되는 PWM 주파수가 발생되도록 하였다.

2.4 전력부의 구성

그림 4는 제작된 와전류 제동초퍼장치의 전면과 후면을 나타낸 것이다. 전력부는 외함내에서 3부분으로 나누어지며 충방전에 관련된 접촉기회로, 필터회로 및 IGCT 스택으로 구성된다. IGCT 스택은 히트파이프 형태의 자연냉각방식으로 설계되었다.



(a)



(b)

그림 4 와전류 제동초퍼 시스템 (a) 전면부, (b) 후면부

3. 시험결과 및 검토

3.1 저전압-대전류 시험

IGCT의 전류 능력을 시험하기 위하여 저전압상태에서 부하전류의 약 2배를 인가하였다. 시험입력전압은 직류 150V이고 0.75[ohm]의 부하저항에 100usec의 펄스를 인가하여 200A의 출력전류가 흐르도록 하였다. di/dt 제한을 위한 애노드 리액터는 사용전선을 2회 감아 약 3uH의 인덕턴스를 갖도록 하였고 방전용 저항은 10[ohm]의 무유도 콘선저항을 사용하였다.

그림 5-(a)는 부하전류의 파형을 나타낸 것으로 100usec 기간동안 200A가 인가되었음을 나타내고 있다. 그림 5-(b)는 IGCT 애노드와 캐소드간의 전압파형이다. 그림에서 보면 IGCT의 Off시에 스파이크성 전압이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이것은 애노드 리액터에 저장된 에너지가 리액터 저항으로 방전하면서 발생하는 전압이다. 파형을 조사한 결과 부하전류 200A에서 약 700V의 스파이크성 전압이 발생하였고 dv/dt는 약 800V/uscc 정도로 관측되었다. 따라서 입력전압이 허용최고 전압인 3250V이고 허용 과부하상태(200%)에서 IGCT의 피크전압은 약 4050V가 되어 전압 제한값에는 충분한 여유를 갖을 수 있으며 dv/dt 제한을 위한 별도의 스너버는 필요하지 않음을 확인하였다.

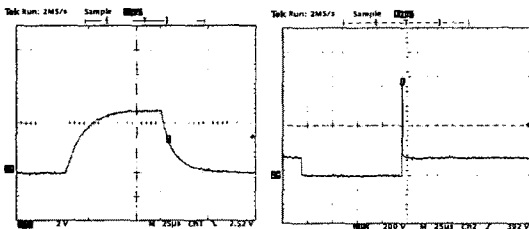
3.2 고전압-정격전류 시험

정상상태의 동작시험을 위하여 제동용 마그네트를 부하로 연결하고 고전압 상태에서 시험을 실시하였다. 그림 6은 실험회로의 구성을 나타낸 것이다. 부하 마그네트의 인덕턴스는 38mH이고 부하저항은 13ohm이다. 입력전압은 차량의 조건과 동일하게 2500, 2800, 3150Vdc로 하였으며 각각의 전압에서 정격전류(120A)까지 순차적으로 전류를 증가시키면서 동작을 조사하였다. 그림 7-(a)는 제동초퍼의 입력으로 2500Vdc를 인가하고 100% 부하로 운전시 출력의 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 스너버 회로가 없는 상황에서 소자의 On-Off시에 발생하는 스파이크 전압의 크기가 매우 적음을 알 수 있다. 그림 7-(b)와 7-(c)는 각각 2800V 및 3150Vdc에서 정격전류를 출력하였을 때의 파형이다.

3. 결 론

고속철도의 제동 시스템에 사용될 와전류 제동용 초퍼 전원장치의 시제품을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고속철도용 와전류 제동시스템의 전원장치를 강압 직류 초퍼(Buck type DC chopper)의 형태로 설계하였다.
2. 주회로 소자로는 기존의 대용량 전력제어장치에 사용되었던 GTO 사이리스터가 아닌 IGCT를 사용하였으며 스너버회로가 생략되어 주회로의 구성이 GTO 스택에 비하여 간단하게 구성되었다.
3. 제어부는 One chip 마이크로컨트롤러를 사용하여 가능한 회로의 구성을 단순화할 수 있도록 구성하였으며 대부분의 제어는 소프트웨어를 통해 이루어지도록 구성하여 시스템의 안정성과 확장성이 최대한이 되도록 구성하였다.
4. 초퍼의 동작중에 내부 시스템의 상태를 모니터링 할 수 있도록 통신을 통한 On-line 기능을 내장하도록 설계하였다.
5. 기본적인 시스템의 구성 및 전력시험이 완료되었으므로 차년도 연구에서는 C/I의 전원단에 제동초퍼를 연결하고 실제 부하를 연결하여 시스템의 동특성과 제동효과를 파악하는 과정이 차기과제로 남았다.



(a) 출력전류(100A/2.5V) (b) Anode-cathod 양단전압

그림 5 저전압-대전류 시험파형

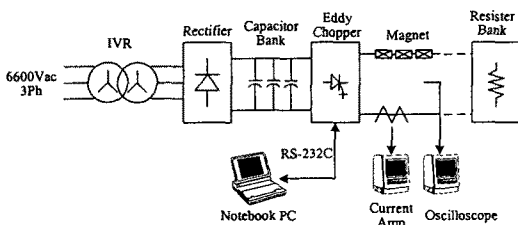
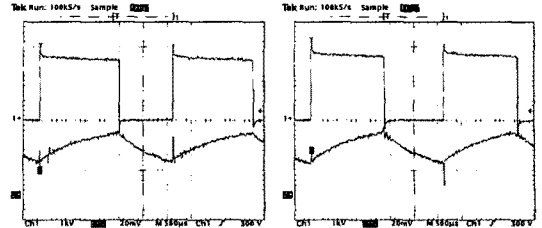


그림 6 고전압 실험회로의 구성도

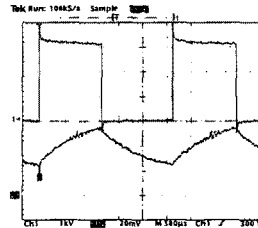


1. 출력전압 1,000V/div
2. 출력전류 50A/div

(a) 2,500V, 120A 출력시

1. 출력전압 1,000V/div
2. 출력전류 50A/div

(b) 2,800V, 120A 출력시



1. 출력전압 1,000V/div
2. 출력전류 50A/div

(c) 3,150V, 120A 출력시

그림 7 고전압-정격전류 시험파형

[참 고 문 헌]

- [1] Mohan, Undeland, and Robbins, "Power Electronics", John Wiley & sons, 1995.
- [2] 하경호 외, "위치변화에 따른 영구자석을 이용한 와전류 제동기의 제동특성", 대한전기학회 하계학술대회, pp.305-307, 1999.
- [3] 강도현 외, "고속전철 추진 Simulator용 와전류 제동장치 설계", 대한전기학회 하계학술대회, pp.390-392, 1998.
- [4] 이윤재 외, "G7 고속전철기술개발사업 2단계 1차년도 연구성과보고서", pp.325-328, 2000.
- [5] Eric Carroll, Sven Klaka, and Stefan Linder, "Integrated Gate Commutated Thyristors : A New Approach to High Power Electronics", ABB Semiconductors AG, IGCT Press Conference, 1997.