

# KTX-1 고속전철의 병렬부하형 IGBT 제동초퍼장치 설계에 관한 연구

## A New Design on the Parallel Load Type IGBT Brake Chopper System for KTX-1 High Speed Train

윤 차 중\* · 노 명 규\*\* · 이 을 재†  
(Cha-Joong Youn · Myoung-Gyu Noh · Eul-Jae Lee)

**Abstract** - This paper presents a new design works for the braking chopper system which is included in the propulsion system of KTX high speed train. Due to the current fed type synchronous motors used in the propulsion system, some different behaviors are shown comparing to the voltage type other chopper systems. Specially this chopper system acts either braking controlling or regenerative power controlling system with a parallel resistive load in the propulsion system. In this paper, an improved simple high power IGBT brake chopper system has proposed which is able to be replaced with an existing complicated GTO chopper system. The analytical approaches to the parallel load type current chopper system and the proper snubber circuits calculation were explained in this paper to control new chopper system. In addition, the thermal resistance of the cooling system for power dissipation of IGBT modules was calculated also. Finally several PC simulations have been done to clarify its availability.

**Key Words** : GTO chopper, Regenerative power control, Parallel load control, IGBT chopper, KTX-1

### 1. 서 론

현재 운영중인 KTX-1 경부고속철도차량은 프랑스 알스톰사로부터 원천기술 및 제작기술을 이전 받아 국내에서 조립 및 제작이 되었으며 동력집중식의 동기식전동기방식 추진제어장치를 사용하고 있다. KTX-1의 추진제어장치는 철도차량에서 일반적으로 사용되는 전압형 컨버터/인버터를 사용한 방식이 아니라 대전력용 Thyristor 계열을 사용한 전류형 컨버터/인버터 방식이 운용된다[1]. 전류형 전력회로를 사용하는 경우 전동기에 공급되는 에너지원은 직류인덕터가 담당하며 역행시에는 컨버터로부터 공급된 에너지가 직류인덕터에 축적되고 반대로 회생시에는 전동기로부터 발생된 에너지가 직류인덕터에 중첩된다. 컨버터장치는 인버터 동작을 통해 축적된 전류에너지를 전차선 측으로 되돌리는 것이 가능하다. KTX-1 추진제어 시스템에서는 축적된 에너지를 크게 세 가지 방식으로 사용한다. 최상위 동작에서는 컨버터를 이용하여 전차선으로 전력을 회생하며, 차상위 동작에서는 내부의 송풍용 인버터의 공급전원으로 전력을 사용한다. 마지막으로 열차가 전원불공급구간(사구간 Dead section)을 지나거나 여하의 이유에 의하여 전차선으

로의 회생이 불가피한 경우에는 제동용 저항을 사용하여 열에너지로 발산시킴으로써 축적된 전력을 소모한다. 이 모든 동작에는 시스템 내부의 직렬루프에서 전류의 흐름을 제어하기 위한 전류형 초퍼시스템이 사용되며 이것이 KTX-1의 제동초퍼(Brake chopper) 시스템이다.

KTX-1 고속전철의 제동초퍼 시스템은 일반적인 초퍼시스템이 전압형으로 구성되고 부하가 초퍼에 직렬로 연결되어 강압 또는 승압된 전압이 공급되는 것과는 다르게 전류형으로 구성되어 있으며 부하가 초퍼와 병렬로 연결된 것이 특징이다. 즉 초퍼와 부하에 흐르는 전류의 도통비율을 제어함으로써 전체 직렬시스템에서의 평균 전류의 크기를 감소하거나 제어하는 방식을 취하고 있다. 따라서 초퍼의 양단에 가해지는 전압의 크기는 상시 변동이며 고정된 부하에 대하여 도통비율을 변경하여 평균전류를 제어하므로 전체적인 회로의 해석이 쉽지 않다. 한편 적용된 주회로 소자는 공급전압의 변동성 때문에 2 직렬회로 형태로 구성된 GTO-Diode 회로 구성이며 전형적인 L-R-C-D 스너버를 사용하여 소자를 보호한다.

GTO Thyristor의 경우 최대전력 제어용이 아닌 소용량 소자에 대해서는 대부분의 제작사에서 더 이상 새로운 소자를 제작하지 않고 있다. 이에 따라 KTX-1 고속전철의 경우에서도 주변환 장치에서 소자의 단종으로 인하여 고장수리에 어려움을 겪고 있다. 한편 방열을 위한 액체냉매 침적방식의 냉각장치 역시 유지보수성을 어렵게 하는 주요 요인이 되고 있다[1]. 냉각장치의 액체냉매는 프레온가스(FC-72)의 일종이며 수리를 위해서는 밀폐된 합체(CUBE)에서 냉매를 완전히 제거한 후 분해과정을 시행해야 한다. 한번 사용한 냉매는 폐기되므로 부가적인 환경오염 문제가 발생할 수 있

\* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Korea. Doctor's Course

\*\* Dept. of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Korea. Professor · Ph.D

† Corresponding Author : E-Kyoung Systems Co., Ltd · Ph.D

E-mail : euljae@e-kyoung.com

Received : January 3, 2013; Accepted : February 19, 2013

다. 또한 유지보수를 위해 냉매가 들어있는 초퍼장치를 추진제어시스템에서 분리 또는 장착하는 과정은 전적으로 작업자들의 수작업으로 이루어지므로 냉매를 채운 무거운 초퍼장치는 유지보수의 어려움을 가중시킨다.

본 논문에서는 KTX-1 고속철도차량의 추진제어시스템 중에서 전력의 회생 및 제동을 위하여 필수적으로 사용되는 제동초퍼장치에 대하여 고전압 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 적용한 새로운 방식의 초퍼장치 설계에 대하여 제시하였다. 기존 시스템에 비하여 대폭 간소화된 주회로에 대하여 설명하고 부하와 병렬로 동작하는 시스템의 특성에 따라서 스너버회로의 동작방식을 새롭게 해석하였다. 냉각방식의 경우 친환경적이면서 유지보수의 편의성을 고려하여 강제공기냉각의 액체냉매 침적방식에서 히트파이프(Heat-pipe)방식으로 변경하여 설계하였다.

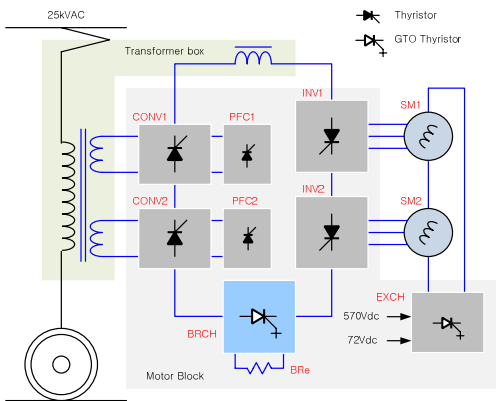


그림 1 KTX-1 고속철도차량 추진제어장치 구성도  
 Fig. 1 Block diagram of the propulsion system for KTX-1 high speed train

## 2. 병렬부하방식의 IGBT 제동초퍼 시스템 설계

### 2.1 기존시스템 고찰

그림 2는 현재 운용 중인 KTX-1 경부고속철도차량의 추진제어시스템 중에서 회생전력의 제어 및 열차의 제동제어에 사용되는 제동초퍼시스템의 구조를 나타낸 것이다. 설명한 바와 같이 초퍼의 입출력 단자와 부하저항이 병렬로 연결되어 있음을 볼 수 있다. 제동초퍼는 평상시에는 주회로 접촉기(K-TT-01)가 닫혀 있고 제동접촉기(K-BK-01, K-BK-02)가 열려 있어서 전류회로에서 분리되어 있지만 제동시에는 반대의 동작을 통하여 전류회로에 직렬로 투입된다. 이때 제동초퍼가 오프되어 있으면 제동저항(Bre)이 직렬로 연결된 형태가 되고 추진제어회로에 흐르는 모든 전류가 저항을 통과하게 되어서 전동기에서 발생된 대부분의 회생에너지가 저항을 통하여 발산하게 된다. 이 경우 차량은 급속한 속도의 저하가 발생하게 되므로 사고의 위험이 존재하며 이를 보완하기 위해서는 반드시 제동초퍼를 사용하여야 한다. 즉 제동초퍼의 도통비율을 연속적으로 제어하면 제동저항과 초퍼장치가 마치 가변피상저항처럼 보이게 되므로 필요한 제동량을 제어할 수 있게 되는 것이다(그림 3 및 4 참조). 한편 전차선측으로의 회생동작에서도 제동초퍼는 중요한 기능을 수행한다. 회생전류는 입력컨버터의 역

동작에 의하여 가선측으로 되돌려지게 되는데 컨버터의 제어속도가 60Hz로 고정되어 있어서 사실상 빠른 동특성은 얻어질 수 없다. 이에 따라 추진제어시스템 내에서 기본적인 회생제어는 입력컨버터가 담당하고 원활한 제어성능은 제동초퍼가 제공하는 복합적인 제어구조가 사용되고 있다.

스너버회로는 GTO 스위치에 많이 사용되는 L-R-C-D로 구성된 2 쌍의 오프스너버(Off-Snubber)가 각각의 GTO에 접속되어 있다. 스너버 다이오드와 고속캐패시터는 액체냉각용 함체 내부에 침적되어 있으며 부피가 큰 인덕터와 저항은 배선을 이용하여 외부에 장착되어 있다. 함체의 내부에는 10여개의 반도체 소자와 직병렬로 구성된 2조의 캐패시터가 내장되어 있으나 구조가 매우 복잡하고 발열이 많아서 유지보수의 관점에서 볼 때에 개선의 여지가 많다.

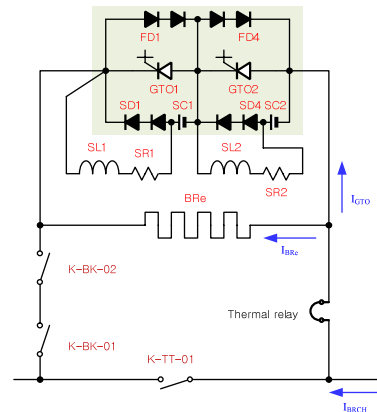


그림 2 KTX-1 GTO 제동초퍼의 구조  
 Fig. 2 GTO Brake chopper system in KTX-1

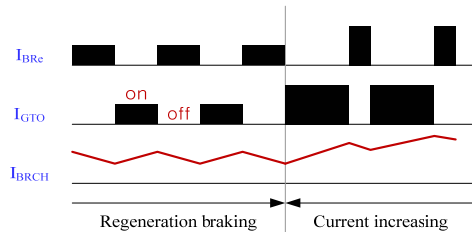


그림 3 제동초퍼장치의 동작전류형태  
 Fig. 3 Current waveform of the brake chopper system

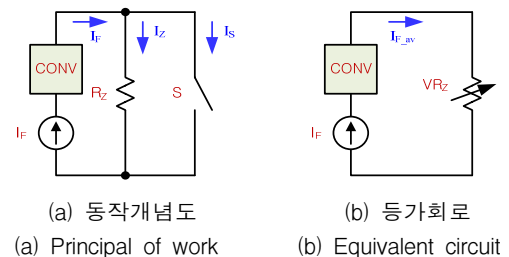


그림 4 제동초퍼장치의 동작개념  
 Fig. 4 Principal of brake chopper system

### 2.2 새로운 IGBT 제동초퍼의 설계사양

표 1에 제동초퍼시스템의 설계목표에 대하여 나타내었다.

새로운 초퍼장치는 기존장치와 마찬가지로 부하저항(제동저항)과 병렬로 동작하며 주회로 소자는 GTO를 대신하여 IGBT가 사용된다.

표 1 IGBT 제동초퍼시스템 설계목표

Table 1 Design specification of IGBT chopper system

항 목	내 용
입력전압	0-3000V 가변
출력전류	0-800A 가변
스너버회로	R-C-D 오프 스너버
전력용 반도체	IGBT 4.5kV/600A 2P
부하저항	3.63Ω
회로방식	전류형 부하병렬 초퍼회로
냉각방식	Heat-pipe 강제공기냉각
동작주파수	300Hz

한편 현재까지 출시된 전력용 IGBT에서는 허용전압이 높을수록 손실이 급속히 커지는 경향이 있다. 따라서 충분한 전압 마진을 고려한다면 6500V급 IGBT를 사용할 수도 있으나 전류가 600A 정도 되면 VCE(SAT)가 5.3V(125℃에서)에 달해 도통손실이 매우 크므로 실용성이 낮다. 액체침적방식이 아닌 강제풍냉식을 적용한 본 개발에서는 냉각성능을 최우선으로 고려하였다. 이에 따라 미쓰비시사의 4500V/600A급 IGBT(CM600HG-90H)를 2 병렬로 사용하여 반도체와 냉각장치의 접촉범위가 가능한 넓어지도록 하였다. 초퍼의 최대출력은 순간성능 2.2MW급으로 매우 크며 기존장치와의 호환성을 유지하기 위해 300Hz로 스위칭 동작을 수행한다. 그림 5는 제안된 새로운 제동초퍼시스템의 구조이다.

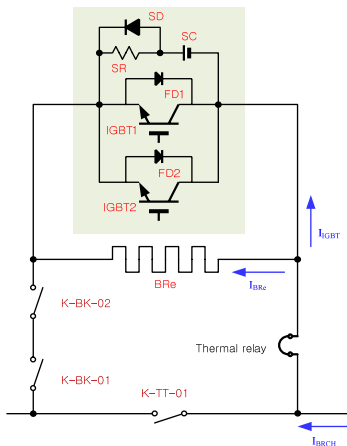


그림 5 새로운 IGBT 제동초퍼의 구조  
Fig. 5 New designed IGBT brake chopper system

2.3 부하병렬초퍼의 등가회로 해석

제동초퍼회로는 전류원으로 동작하는 부하병렬형 초퍼장치이므로 전압원을 사용하는 일반적인 초퍼방식과는 해석조건이 다르다. 전기적인 해석을 위해 그림 6에 스너버 회로를 포함한 제동초퍼의 등가회로를 표시하였다. 등가회로에 적용한 기호는 표 2와 같다. 회로의 특성을 고려하여 아래와 같이 해석조건을 제한하였다.

- 스너버 회로는 R-C-D로 구성된 오프 스너버를 적용한다.
- 제동저항  $R_Z$ 는 항상 IGBT와 병렬로 연결된다.
- IGBT 내부의 기생회로는 실제회로에 기생하는 컴포넌트들에 비하여 매우 작은 값이므로 무시한다.
- 주회로에 흐르는 전류  $I_F$ 는 초퍼회로가 동작 중에는 항상 연속으로 가정한다. 따라서 초퍼 IGBT가 Off 되어도 전류는 부하저항  $R_V$  및 제동저항  $R_Z$ 를 통해 계속 흐른다.
- IGBT 내부의 환류 다이오드로 흐르는 환류 전류는 회로의 구성상 발생하지 않는다.

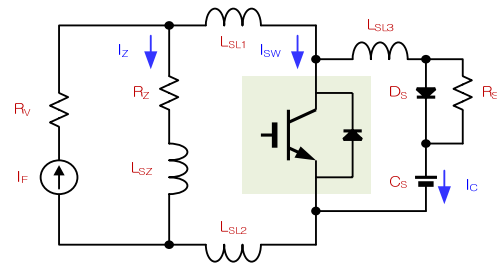


그림 6 제동초퍼의 등가회로  
Fig. 6 Equivalent circuits for brake chopper

표 2 등가회로 기호설명

Table 2 Notations for equivalent circuits

기호	설 명	초기값
$I_F$	제동전류	680A
$L_F$	DC Link 인덕터	40mH
$R_V$	인버터 부하(전동기부하)	3Ω
$R_Z$	제동저항	3.6Ω
$L_{SZ}$	제동저항 기생인덕턴스	10μH
$L_{S1}, L_{S2}$	제동저항-IGBT간 기생인덕턴스	2μH
$L_{S3}$	스너버회로 기생인덕턴스	10nH
$R_S$	스너버 저항	10Ω
$C_S$	스너버 캐패시턴스	2μF
$D_S$	스너버 다이오드	-

등가회로를 대상으로 동작을 분석하면 다음과 같이 해석된다. 해석은 초기에 스위치가 On 되어 있어서 부하저항 측으로 전류가 흐르지 않는 조건으로부터 시작한다. 서지(Surge) 전압의 크기를 확인하기 위하여 스너버회로는 해석에서 무시한다.

동작-1) 스위치가 On에서 Off로 전이 시작  
스위치가 On에서 Off로 전이할 때 스위치 양단의 전압 V<sub>CE</sub>는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{CE} = I_Z R_Z + L_{SZ} \frac{di_Z}{dt} - L_{\sigma} \frac{di_C}{dt}, L_{\sigma} = L_{SL1} + L_{SL2} + \dots \quad (1)$$

제동초퍼장치의 입력전류  $I_F$ 는 연속이므로 IGBT가 Off 동작으로 전류가 감소하는 만큼 제동저항 쪽으로 전류가 증가한다. 따라서 IGBT의 콜렉터에서의 전압변동분은 콜렉터 전류의 변화에 의하여 아래와 같이 표시된다.

$$dV_C = L_{SZ} \frac{d(I_F - i_C)}{dt} - L_\sigma \frac{di_C}{dt} \quad (2)$$

IGBT가 Off되는 순간 대부분의 전류는 아직 IGBT의 콜렉터로 흐른다. 즉,  $I_F = i_C$ 이므로 식 (2)의 우측 첫번째 항은 0이 된다. 따라서 식 (1)에서 우측 첫째 항과 둘째 항은 0이 되므로 IGBT 양단전압  $V_{CE}$ 는,

$$V_{CE} = -L_\sigma \frac{di_C}{dt} \quad (3)$$

가 되므로 제동저항과 IGBT 사이에 존재하는 기생인덕턴스 값에 의존하게 됨을 알 수 있다. 하지만  $di_C$ 의 변화량이 크지 않으므로 이 순간의  $V_{CE}$ 의 크기는 크지 않다.

동작-2) 50%의 Off로 전이 진행

IGBT의 Off가 50% 가량 진행된 순간에 대하여 살펴보면, 전류  $I_F$ 가 갑자기 변화할 수 없으므로 제동저항 전류와 IGBT 전류를 각각  $I_F/2$ 로 가정할 수 있다. 이 경우 식 (1)의 조건에 의하여  $V_{CE}$ 는 주로 제동저항 내부의 인덕턴스 성분에 의해서 전압이 증가하게 된다. 예를 들어  $L_{SZ}=10\mu H$ ,  $L_\sigma=2\mu H$ ,  $dt=t_{off}=1.5\mu s$ ,  $di_z=340A$ ,  $di_c=-340A$  라고 가정하면  $V_{CE}$ 의 최대값은,

$$V_{CE} = \frac{680A}{2} \cdot 3.6\Omega + 10\mu H \frac{340A}{1.5\mu s} - 2\mu H \frac{-340A}{1.5\mu s} = 3944V \quad (4)$$

가 되어 상당히 높은  $V_{CE}$  전압이 발생한다.

동작-3) 100%의 Off 전이 완료

마지막으로 IGBT의 Off가 100% 진행되었을 때의 조건에 대하여 살펴보면,  $I_C=0$ ,  $I_F=I_z$ 이므로 식 (1)의 결과는 아래와 같다.

$$V_{CE} = 680A \cdot 3.6\Omega + 10\mu H \frac{340A}{1.5\mu s} - 0 = 4714.7V \quad (5)$$

이상의 증가회로 분석에 의하면 스위치 Off시에 발생하는 서지 전압을 줄이기 위해서는 무엇보다도 제동저항 내부에 포함된 인덕턴스가 최소화되도록 설계하는 것이 매우 중요하며 다음으로 제동저항과 IGBT 사이의 길이를 짧게 하여 인덕턴스 성분을 작게 하는 것이 필요하다. 한편 스너버회로는 주회로에서 발생하는 서지 에너지를 흡수하여  $dv/dt$ ,  $di/dt$ 를 작게 할 수 있으므로 다음 절에서 적절한 스너버 회로의 설계에 대하여 알아본다.

### 2.4 R-C-D 스너버회로의 설계

과전압제한 스너버회로의 변수값은 다음과 같이 구해진다. 먼저 스위치 양단에 발생하는 변동전압의 크기를  $\Delta V_{CE}$ 라 하고 스위치가 오프되었을 때 스너버 캐패시터의 전압  $\Delta V_C = \Delta V_{CE}$ 라고 가정하면 에너지보존법칙에 의하여 기생인덕턴스에 저장되는 에너지는 다음과 같이 표시가 가능하다.

$$\frac{L_\sigma I_C^2}{2} = \frac{C_S \Delta V_{CE(max)}^2}{2} = \frac{C_S \Delta V_C^2}{2} \quad (6)$$

$$kV_d = \frac{L_\sigma I_C}{t_f} \quad (7)$$

식 (6)은 적절한 스너버 캐패시터를 사용하여 스위치전압  $\Delta V_{CE}$ 의 크기를 제어할 수 있음을 의미한다. 스너버회로가 없을 때 기생인덕턴스에 의하여 발생하는 전압의 크기는 식 (7)과 같다.

여기서  $V_d$ 는 정상상태에서 입력전압의 크기를 의미한다. 변동전압의 크기를 정상상태의 10% 이하로 제한하기 위한 스너버 캐패시터의 크기는 식 (6)으로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_{CE(max)} = I_C \sqrt{\frac{L_\sigma}{C_S}} \quad (8)$$

$$C_S \geq \left( \frac{I_C}{V_d + \Delta V_{CE(max)}} \right)^2 L_\sigma \quad (9)$$

$$C_S \geq \left( \frac{680A}{2400V + 240V} \right)^2 10\mu H = 0.67\mu F$$

식 (9)의 계산에서  $0.67\mu F$  이상의 캐패시터를 사용하면 조건에 만족하나 여유율을 충분히 갖으며 시판되는 제품 중 쉽게 구할 수 있는  $2.2\mu F$ 의 캐패시터를 적용값으로 선정한다. 한편 스너버 캐패시터에 저장된 에너지는 스너버 저항  $R_S$ 를 통해 스위치의 온 구간 내에서 다시 방전되어야 한다. 10% 이하의 온 구간에서도 충분한 방전을 보장하기 위하여 방전시간  $T_C$ 는 다음과 같이 구한다.

$$T_C = R_S C_S = \frac{1}{f_s} (1 - 0.9) \quad (10)$$

IGBT의 특성을 고려하여 1kHz의 스위치 동작에서도 적용할 수 있는 적절한 스너버 저항값은 식 (10)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$R_S = \frac{0.1}{f_s C_S} = 45.5\Omega \quad (11)$$

### 2.5 강제공기냉각시스템 설계

등가회로 해석에서와 마찬가지로 전류원으로 동작하는 부하병렬형 초퍼장치에 대하여 주회로소자의 손실을 해석하였다. 계산의 편의를 위해 초퍼 회로 내부의 기생 L과 C에서 유도되는 2차 손실은 무시하였다. IGBT는 앞서 설명한 바와 같이 4500V/600A급 IGBT(CM600HG-90H)를 2 병렬로 적용하였고 설계조건은 아래와 같다.

- 초퍼장치와 부하는 전류원에 병렬로 연결된다.
- 초퍼회로는 추진제어장치의 제동 및 회생시에만 연결되고 그 외에는 주회로에서 분리된다.
- 정적손실(Static losses)은 도통손실(PC)로만 이루어지며 스위칭손실(Switching losses)은 턴온손실(PON)과 턴오프손실(POFF)로 이루어진다.

- 반도체 접합부의 온도  $T_j=125^\circ\text{C}$ 를 초과하지 않도록 설계한다.

손실의 계산은 아래의 방법으로 구하였다. 먼저 IGBT의 도통손실을 구한다. 동작특성상 듀티 D는 1로부터 점차 감소하면서 0으로 근접하므로 평균듀티를 0.5로 가정하면 IGBT의 도통손실은 아래와 같다.

$$P_C = \frac{1}{T} \int_0^t i_C(t) V_{CE}(t) dt = I_{C(avg)} \times V_{CE(sat)} \times D \quad (12)$$

제동회로의 특성상 다이오드측으로 환류되는 전류는 발생하지 않으므로 도통손실은 IGBT에서만 발생한다.

$$P_{C(IGBT)} = 680(A) \times 3.0(V) \times 0.5(D) = 1020(W) \quad (13)$$

IGBT의 데이터시트의 스위칭손실 곡선을 참조하여 턴온 및 턴-오프 손실을 구하면 아래와 같다.

$$P_{ON(IGBT)} = E_{ON} f_S = 2 \times 1.7(J) \times 300 = 1020(W) \quad (14)$$

$$P_{OFF(IGBT)} = E_{OFF} f_S = 2 \times 1.1(J) \times 300 = 660(W) \quad (15)$$

다이오드에 의한 환류손실은 발생하지 않으나 전압의 극성이 바뀌는 순간 역회복손실은 다음과 같이 발생한다.

$$P_{rr(Diode)} = 2E_{rr} f_S = 2 \times 0.55(J) \times 300 = 330(W) \quad (16)$$

이상에서 구해진 손실을 종합하면 IGBT의 시간평균적인 총손실이 구해진다.

$$P_{TOT} = P_{C(IGBT)} + P_{ON(IGBT)} + P_{OFF(IGBT)} + P_{rr(Diode)} = 3030(W) \quad (17)$$

초퍼장치에 사용될 적절한 방열기구의 설계를 수행하기 위해서는 병렬 IGBT의 모듈접합부 온도를 계산하는 것이 필요하다. 그림 7은 제동초퍼장치에 적용된 열적 등가회로를 나타낸 것이다. 주변온도를 최대  $45^\circ\text{C}$ 로 가정하고 모듈 내부의 IGBT Junction 온도를  $125^\circ\text{C}$  이하로 유지하기 위한 방열판의 열저항 계수  $Z_{thha}$ 를 구하면 다음과 같다.

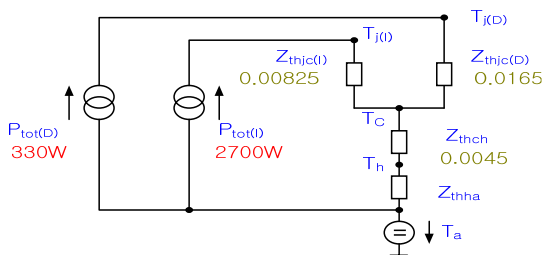


그림 7 제동초퍼의 열저항 등가회로  
Fig. 7 Thermal equivalent circuits for brake chopper

$$T_{j(t)} = T_a + Z_{thha} \times P_{TOT(I)} + Z_{thch} \times (P_{TOT(I)} + P_{TOT(D)}) + Z_{thjc(I)} \times P_{TOT(I)} \quad (18)$$

식 (18)로부터 방열장치의 열저항 계수를 구하면,

$$Z_{thha} = (125 - 45 - 27.27/2 - 44.55/2)/2700 = 0.01633\text{K/W} @125^\circ\text{C} \quad (19)$$

가 된다. 통상적인 강제공랭방식의 히트싱크의 경우 열저항 계수가  $0.04\text{K/W}$  이하로 되지 못한다. 따라서 식 (19)에 의하면 강제 공랭의 경우에도 히트싱크보다는 히트파이프와 같은 고성능 냉각장치가 필요함을 알 수 있다.

표 3 열저항 등가회로 기호설명

Table 3 Notations for thermal equivalent circuits

기호	설명	초기값
$P_{TOT(I)}$	IGBT 총손실	2700W
$P_{TOT(D)}$	Diode 총손실	330W
$Z_{thjc(I)}$	IGBT 접합부-케이스간 열저항(max)	16.5K/KW
$Z_{thjc(D)}$	Diode 접합부-케이스간 열저항(max)	33.0K/KW
$Z_{thch}$	케이스-방열판간 열저항	9.0K/KW
$Z_{thha}$	방열판-주위온도간 열저항	-
$T_c$	케이스온도	-
$T_h$	방열판온도	-
$T_a$	주위온도	-

3. 시뮬레이션에 의한 설계검증

3.1 시뮬레이션 회로의 구성

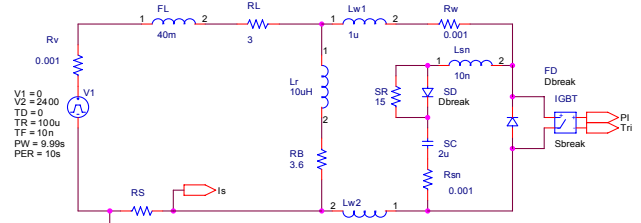


그림 8 스너버회로를 포함한 제동초퍼 시뮬레이션회로  
Fig. 8 Simulation circuits for brake chopper system including snubber circuits

그림 6의 등가 회로와 표 2의 설계값을 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 툴은 전기전자회로의 분석에서 일반적으로 이용되는 PSpice를 사용하였다. 스너버 회로를 포함한 전류형 초퍼의 동작을 검증하기 위하여 스너버 회로가 없을 때와 있을 때를 비교분석하였다. 회로에 흐르는 전류의 크기는 초기동작 조건인 680A로 레플레이션이 되도록 피드백제어를 수행하였다. 스위칭 주파수는 기존과 동일한 300Hz이다.

3.2 결과고찰

시뮬레이션은 세 가지 경우로 나누어 실시하였다. 먼저 Case-1의 경우 보호회로 없이 전류형 초퍼만으로 구성된 경

우를 가정한 것으로 앞서 살펴본 바와 같이 약 4.5kV 정도의 피크전압이 IGBT의 양단에 발생하여 소자의 파괴를 유발할 수 있다. Case-2에서는 부적절한 설계를 가정하여 0.5  $\mu$ F과 150 $\Omega$ 의 스너버 값을 적용한 경우로 스위치 오프시 발생하는 기생인덕턴스의 에너지를 전부 흡수하지 못하여 여전히 높은 피크전압이 발생한다. 마지막으로 Case-3의 경우는 각각 2.2 $\mu$ F과 15 $\Omega$ 의 적절한 스너버 캐패시터와 저항값을 적용한 예이다. 스너버 캐패시터에 흐르는 피크전류는 550A 정도이며 짧은 시간 동안 큰 전류가 흐르므로 내부저항과 인덕턴스가 매우 적은 고성능 캐패시터를 선정하는 것이 중요함을 알 수 있다. 스너버 저항의 방전시간은 약 70 $\mu$ s 이

표 3 기존 초퍼장치와 설계장치의 차이점

Table 3 Comparison between existing(GTO) and new(IGBT) chopper system

항목	GTO Chopper	IGBT Chopper
입력전압	0-2800Vdc	좌 동
출력전류	0-800A/Pulse	좌 동
최대출력	2.2MW/Pulse power	좌 동
회로구성	전류형, 2직렬 GTO	전류형, 2병렬 IGBT
스너버	L-C-R-D 턴-오프	R-C-D 턴-오프
냉각방식	프레온 액체 침적냉각	히트파이프
주파수	300Hz	1kHz(최대)
무게	114kg	68kg
외관		

내로 3.33ms 주기의 2.1%에 해당하므로 PWM 주기는 98% 이내에서 사용하는 것이 필요하다. 결론적으로 초퍼에 흐르는 전류는 단속적으로 발생하지만 주회로에 흐르는 전류는 그림 (f)에서처럼 일정하게 유지되므로 제동이나 회생동작에서 전류형 초퍼가 유효함을 알 수 있다.

Case-2) 부적절한 회로설계의 경우

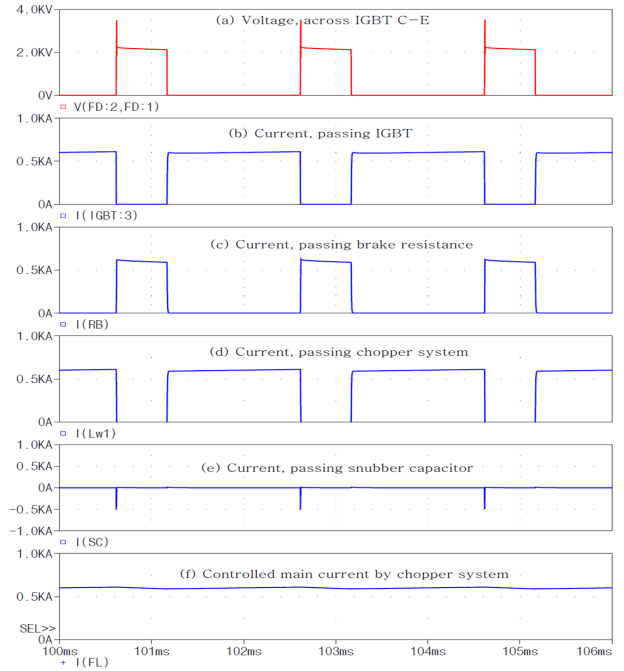


그림 10 부적절한 회로설계의 경우

Fig. 10 Results waveform of unproper circuit design

Case-1) 전류형 초퍼만으로 동작하는 경우

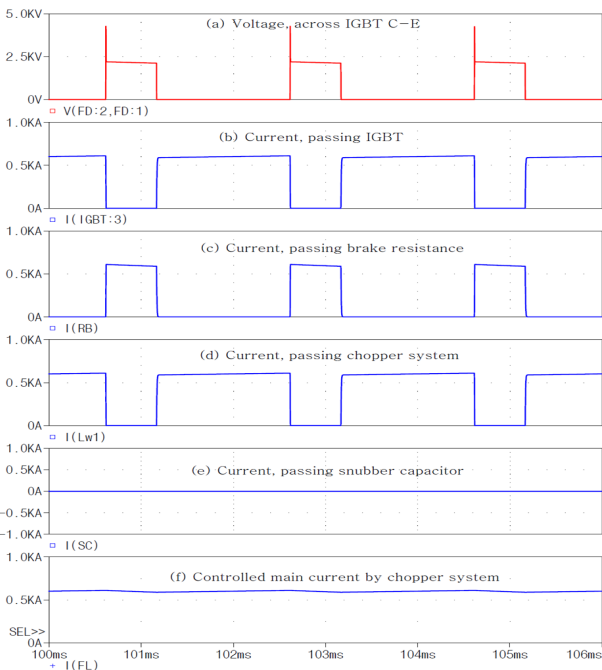


그림 9 전류형초퍼만으로 동작하는 경우의 결과파형

Fig. 9 Results waveform without protection circuits

Case-3) 제안된 설계회로 적용

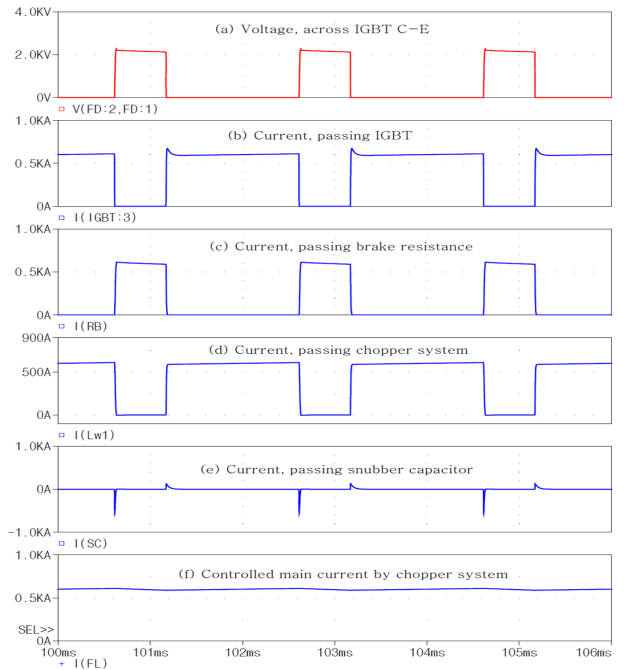


그림 11 제안된 설계회로의 사용

Fig. 11 Results waveform with proposed circuits

#### 4. 결 론

본 논문에서는 KTX 고속철도차량의 추진제어시스템에 적용되는 제동초퍼 시스템에 대하여 IGBT를 사용하고 강제 공기냉각방식을 적용한 새로운 제동초퍼시스템의 설계에 대하여 설명하였다. 병렬부하방식의 진류형 초퍼시스템의 해석 방법에 대하여 논하였으며 도출된 결과에 따른 스너버 회로를 설계하였다. 한편 기존장치 최대 약점으로 파악되고 있는 프레임방식의 액체침적 냉각방식을 히트파이프를 적용한 강제냉각방식으로 변경하기 위하여 장치의 손실과 그에 따른 방열기의 열저항을 계산하였다. 표 3에 기존 초퍼장치와 제안된 초퍼장치에 대해 정리하였다. 현재 IGBT를 적용한 제안된 제동초퍼가 제작되어 있으며, 향후 현차 시운전을 토대로 지속적인 보안을 통해 KTX-1에 적용할 예정이다.

#### 감사의 글

이 논문은 한국건설교통기술평가원의 미래철도기술 개발사업으로부터 지원을 받아 수행한 연구임을 밝힙니다.

#### References

- [1] Gil-hyun Kang, Maintenance of High Speed Rail Vehicles : Theory and Practice, Samsungbooks, 2009.
- [2] E. J. Lee, B. H. Rhee, C. J. Youn, "A New Design on the Brake Chopper System for Propulsion System of KTX High Speed Train", 2010 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway.
- [3] KORAI, "Propulsion control technical development Using the newest semiconductor element for High Speed Railway vehicle", Annual Report(3th), MLTM /KICTEP.
- [4] M. H . RASHID, Power Electronic Circuits, Devices, and Applications (3rd Edition), Prentice Hall, 2004.
- [5] B. K. Bose, Mordern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, 2002.
- [6] MITSUBISHI HVIGBT MODULES, 'CM600HG-90H', IGBT Datasheet, 2009.

### 저 자 소 개



#### 윤 차 중 (尹 次 重)

2007년 한밭대 전자공학과 졸업. 2009년 충남대 대학원 기계시스템공학과 졸업(석사), 1995년~현재 한국철도공사 차장(책임연구원), 충남대 메카트로닉스공학과 박사과정

Tel : 042-615-4701

Fax : 02-361-8542

E-mail : korea@korail.com



#### 노 명 규 (魯 明 圭)

1986년 서울대 기계설계공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 미국 버지니아주립대학교 졸업(공학박사). 1996년 9월~1999년 8월 미국 아이오와주립대 대학병원 연구원. 1999년 9월~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수.

Tel : 042-821-6877

Fax : 042-823-4919

E-mail : mnoh@cnu.ac.kr



#### 이 을 재 (李 乙 宰)

1989년 호서대 전자공학과 졸업. 2001년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1997년~현재 이경산전주식회사 대표이사.

Tel : 032-234-1730

Fax : 032-234-1737

E-mail : euljae@e-kyoung.com