

# 고속전철 추진시스템의 전력변환장치

## Power Conversion Unit for Propulsion System of the High Speed Train

이 병 송\*1, 변 윤 섭\*2, 백 광 선\*3

Lee Byung-Song, Byun Yeun-Sub, Baik Kwang-Sun

### ABSTRACT

This paper presents the current-fed inverter of a TGV-K traction system with thyristor switches using phase control and commutation techniques. The current-fed inverters have two modes of operation which consist of forced commutation and natural commutation. In forced commutation mode, at speed of less than 120km/h, commutation is forced by means of the commutation capacitors and the thyristors. Above 120km/h, the thyristors operate in natural commutation mode, according to the voltages between phases of the motors. In this paper, the power conversion theory of the TGV-K traction system and the control principle of the converter and current-fed inverter are discussed.

keywords : Inverter(인버터), thyristor(사이리스터), TGV-K(한국형고속전철), commutation(전류)

### 1. 서론

현재 프랑스에서 도입된 TGV-K 고속전철 차량은 전류형 인버터로 구동되는 추진제어 장치를 탑재하고 있다. 주파수 변조를 위한 스위칭 소자로는 대용량 집중식 전력변환 장치의 적용에 유리하며, 스위칭시의 악조건에도 소자의 파손률이 낮은 사이리스터를 채용하고 있다. 그러나, 실제 운전상황에 따라서 전력변환 회로의 동작특성에 이상이 발생할 수 있는 가능성이 있다. 그러므로, TGV-K 추진용 전력변환장치의 주요 구성품에 대한 기술적 배경 및 동작특성을 기술적으로 검토함으로써 각 모듈을 구성하고있는 회로의 동작특성을 파악하고, 적용된 소자의 고유한 동작모드 및 스위칭제어기법을 기술적으로 고찰함으로써 이상 발생시 적극적으로 대처할 수 있는 능력을 기르고자 한다.

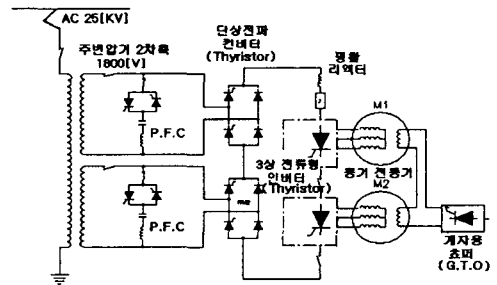


Fig 1. Propulsion system of TGV-K

### 2. 추진시스템 구성

TGV-K 추진제어시스템은 그림1. 과 같이 한 개의 주변압기에서 3그룹으로 나뉘어지며, 1그룹에 두 개의 사이리스터 컨버터, 한 개의 평활 리액터, 두 개의 인버터, 두 대의 3상 동기전동기, 한 대의 제자초피, 두 개의 역률보상[P.F.C] 회로로 구성된다.

- 주변압기는 가선으로부터 받은 25[kV]의 전압을 2차권선 각각에 대해 1800[V]로 변환한다.

\*1 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단 선임연구원  
 \*2 한국철도기술연구원 차량연구본부 주임연구원  
 \*3 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

- 두 대의 단상 브리지 정류기는 사이리스터로 구성되며 서로 직렬로 연결되어있고, 변압기 2차 권선으로부터의 전압을 스위칭각에 따라 가변적으로 정류한다. 정류된 D.C 전원의 전류는 평활리액터에 의해 평활화되고, 두 대의 동기전동기를 구동하기 위한 두 대의 인버터로 공급된다.
- 인버터는 강제전류(forced commutation)모드와 자연전류(natural commutation)모드를 갖는다. 강제전류모드에서(120Kph 이하의 속도에서) 전류(commutation)는 전류용 커패시터와 사이리스터에 의해 수행되고 자연전류모드에서(120Kph 이상의 속도에서) 전류는 동기전동기의 역기전력에 의한 상간전압에 의해 자연전류 된다.
- 두 3상 동기전동기의 계자권선은 직렬로 연결되고 계자초퍼는 이 계자전류를 제어한다.
- 두 대의 역률보상회로는 커패시터와 초퍼를 직렬로 연결하여 구성되고 이 회로는 두 대의 브리지 정류기에 병렬로 접속된다.

**2.1 단상 컨버터**

일반적으로 컨버터는 교류전력을 직류전력으로 변환하는 장치를 지칭한다. T.G.V-K 추진 시스템은 단상 컨버터회로 2개를 직렬로 연결하여 구성되어 있고, 역률보상[P.F.C]회로를 통하여 역률을 향상시키고 L,C의 공진회로를 구성함으로써 제3고조파 함유율을 감소시킬 수 있다. 회로의 특성을 고찰하기 위하여 그림 2와 같이 단상 컨버터 회로를 구성하였다.

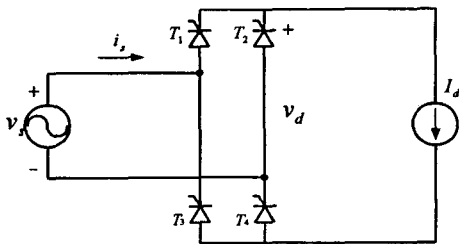


Fig 2. Single phase thyristor converter

그림2.에서 전류  $I_d$ 는 상위 사이리스터  $T_1, T_2$  중의 하나와 하위 사이리스터  $T_3, T_4$  중의 하나를 거쳐 흐르게 된다. 만일 사이리스터의 게이

트전류가 연속적으로 가해지면 이 사이리스터들은 다이오드처럼 동작하게 된다. 이에 대한 전압과 전류파형은 그림3.과 같다.

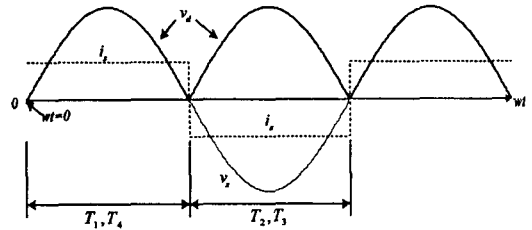


Fig 3.  $\alpha = 0^\circ$

사이리스터  $T_1, T_4$ 는  $\omega t = 0$  인 순간 도통하고  $T_2, T_3$ 는  $\omega t = \pi$  인 순간 도통하게 된다. 또한, 점호각 지연  $\alpha$ 를 고려한 전압, 전류파형은 그림4.와 같다.

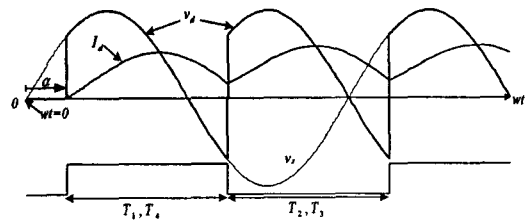


Fig 4.  $\alpha = 45^\circ$

게이트 펄스가 가해지는  $\omega t = \alpha$  에서 사이리스터는 점호되어  $\omega t = \alpha$  인 순간부터  $T_1, T_4$ 는 도통구간을 유지하게 되고,  $T_2, T_3$ 가 점호되는  $\pi + \alpha$  에서  $T_1, T_4$ 는  $T_2, T_3$ 의 점호에 의한 역저지 전압에 의하여 소호되고,  $T_2, T_3$ 는 도통상태를 유지하게 된다. 같은 방식으로 다음주기에  $T_2, T_3$ 에서  $T_1, T_4$ 로 전류(Commutation)현상이 반복되어 직류전압을 발생하게 되고, 직류전압의 평균값  $V_d$ 는 점호각에 의해 제어될 수 있으므로  $V_d$ 는 점호각  $\alpha$ 의 함수로 다음 식(1), (2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{da} &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} V_s \sin \omega t \, d(\omega t) \\
 &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos \alpha \\
 &= 0.9 V_s \cos \alpha
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$V_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_s \sin \omega t \, d(\omega t) = 0.9 V_s
 \tag{2}$$

여기서,  $\sqrt{2} V_s$ 는  $v_s$ 의 피크전압이다.

그림3.의 정류모드에서는 점호각  $\alpha$ 를 최대  $90^\circ$  까지 지연시킬 수 있으며,  $\alpha=0^\circ$  일 때 회로는 다이오드 전파정류기로 동작하고, 부하에 역기전력이 존재하면  $\alpha \geq 90^\circ$  조건에서 그림5.에서와 같이 출력전압이  $-$ (negative)로 되어 전력은 반대로 공급되므로 인버터 모드로 동작하는 특성을 이용하여 점호각  $\alpha$ 를 제어하면 회생 제동이 가능하게 된다.

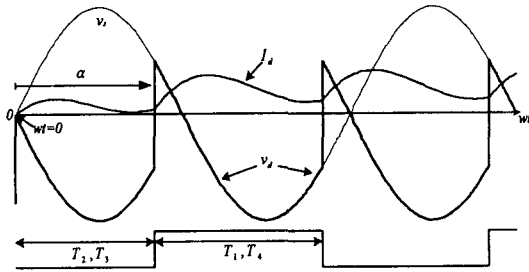


Fig 5.  $\alpha = 150^\circ$

그림6.은 앞서 기술한 점호각  $\alpha$ 에 따른 동작 모드를 콘버터의 측면에서 도시한 것이다.

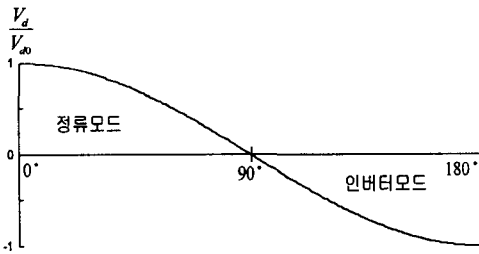


Fig 6. Operation modes of single phase converter

### 2.2 3상 인버터

일반적으로 인버터는 직류전력을 교류전력으로 변환하는 장치를 지칭하는데 크게 전압형과 전류형으로 분류된다. 본 절에서는 T.G.V-K에 적용되고 있는 전류형 인버터에 대하여 기술한다. T.G.V-K 추진시스템은 3상 사이리스터 전류형 인버터회로 2개를 직렬로 연결하여 구성되어 있다. 인버터는 전동차의 속도에 따라 강제전류(forced commutation)모드와 자연전류(natural commutation) 모드로 동작하며, 이들의 전환점은 속도 기전력의 크기 및 스위칭 제어각으로 결정된다.

### (1) 전류형 인버터의 동작

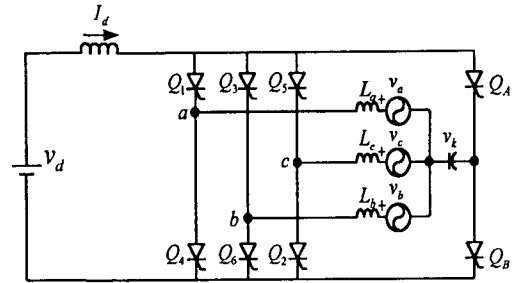


Fig 7. Current-fed inverter with fourth leg commutation

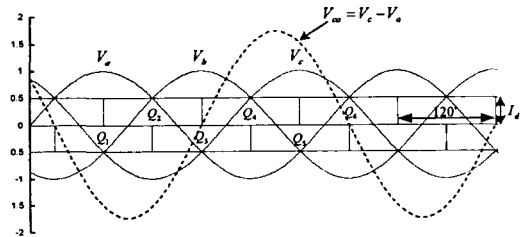


Fig 8. Voltage and current waves

전류형 인버터는 그림7.과 같이 역기전력  $V_a, V_b, V_c$  와 전동기의 등가 인덕턴스  $L_a, L_b, L_c$ , 그리고, 사이리스터 스위칭 소자  $Q_1 \sim Q_6$ 로 간략하게 도시할 수 있다. 강제전류(forced commutation)모드에서는 그림8.의 소자에 따른 스위치의 점호각을 기준으로 스위칭 소자  $Q_1 \sim Q_6$ 의 게이트 신호를 인가하여 스위치를 점호하며, 상위 스위치  $Q_1, Q_3, Q_5$ 의 소호시에는 상위의 보조 사이리스터  $Q_A$ 를 점호하고, 하위 스위치  $Q_2, Q_4, Q_6$ 의 소호시에는 하위의 보조 사이리스터  $Q_B$ 를 점호하여 강제전류용 캐패시터 C의 전압으로 스위칭 소자를 소호시키게 된다. 반면, 자연전류(natural commutation)모드로 동작할 경우, 역기전력  $V_a, V_b, V_c$ 의 상간전압을 이용하며, 그림8.의 한상의 상간 전압  $V_{sc}$ 를 기준으로 0점과 교차하는 점에서 스위칭을 위한 게이트를 인가하면, 각상의 점호 및 소호를 보조 사이리스터 및 캐패시터를 이용할 필요없이 전류(Commutation)가 가능하다. 그러나, 이러한 자연전류모드는 전동기의 속도기전력이 확보된 상태에서 가능하므로 TGV-K의 추진 시스템에서는 120kph 이상의 속도에서 적용한다.

(2) 제어각에 따른 인버터의 동작모드

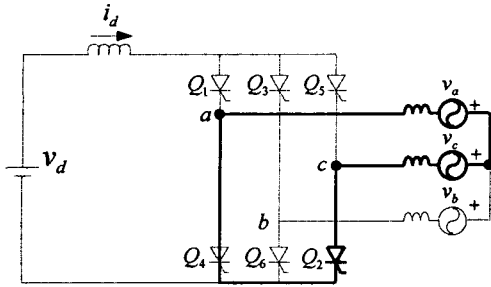


Fig 9. Operation states of inverter

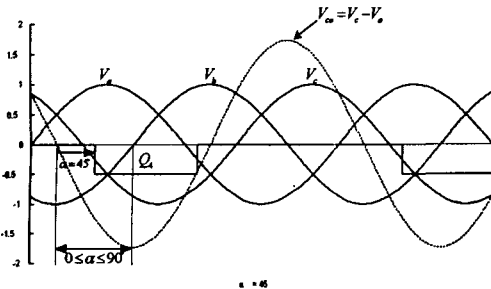


Fig 10. Firing angle  $\alpha = 45^\circ$

가) 제어각  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$

이 범위에서 인버터는 부하전류 컨버터모드로 동작한다. 이 영역에서는 부하의 역기전력에 의해 전류(Commutation)를 행할 수 있으며, 그림7.에서 전류  $I_d$ 가 상위 사이리스터  $Q_3$ 통하여 부하를 거쳐 하위 사이리스터  $Q_2$ 로 도통하고 있는 조건에서 사이리스터  $Q_4$ 를 점호하면 그 순간 사이리스터  $Q_2$ 는 그림9.와 같은 조건으로 바이어스 된다. 즉 사이리스터  $Q_2$ 에는  $V_{\omega} = V_c - V_a$ 가 바이어스된다. 그림10.과 같이  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  영역에서  $V_{\omega}$ 는 -(negative) 전압구간 임으로 사이리스터  $Q_2$ 에 역바이어스를 가하여 소호시킬 수 있다. 그 이외의 다른 상전압하에서도 이와같은 조건을 만족한다.

나) 제어각  $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$

이 범위에서 인버터는 부하전류 인버터모드로 동작한다. 제어각  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$  에서 기술한 바와 같이 사이리스터 도통 조건하에서 사이리스터  $Q_2$ 에는 그림11.에 나타난 바와 같이 역기전력

$V_{\omega}$ 에 의해 역바이어스가 가해져 소호동작이 가능하다.

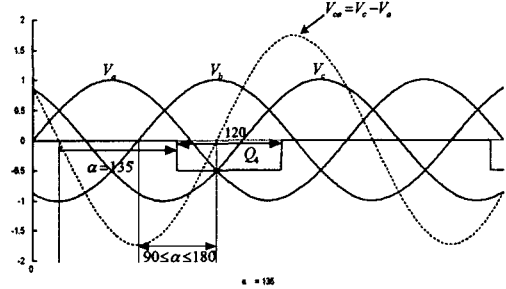


Fig 11. Firing angle  $\alpha = 135^\circ$

다) 제어각  $180^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$

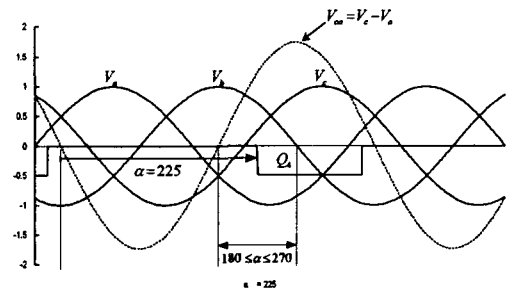


Fig 12. Firing angle  $\alpha = 225^\circ$

이 범위에서 인버터는 강제전류 인버터모드로 동작한다. 그림12.에서 나타난 바와 같이 인버터의 제어각이  $180^\circ$  이상 지연되면 사이리스터  $Q_2$ 에 가해진 전압  $V_{\omega}$ 가 + (positive)가 되어 사이리스터의 자연전류가 불가능해진다. 이 영역에서 동작시키려면 강제전류방법을 적용하여 사이리스터를 제어하여야 한다.

라) 제어각  $270^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$

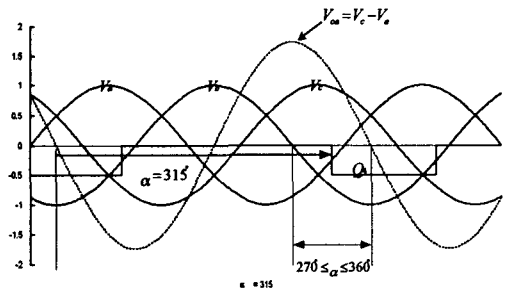


Fig 13. Firing angle  $\alpha = 315^\circ$

이 범위에서 인버터는 강제전류 컨버터로 동작한다. 그림13.에 나타난 것과 같이 이 영역에서도 역기전력에 의한 전류가 불가능한 영역임으로 이 영역에서 동작시키기 위해서는 강제전류방식을 적용해야 한다.

### 3. 자연전류방식 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 MATLAB/SIMULINK를 사용 그림7.을 모델로 하여 3상 인버터블록과 입력전원, 역기전력을 고려한 3상 전원, 인버터 위상제어를 위한 게이트펄스 발생기 등으로 구성된다. 여기에 중성점에서 각 상전압 검출 및 상전류 검출을 위한 부가회로를 추가하였다. 부하 측에 3상 역기전력은 인버터의 회생모드(컨버터모드) 및 전류(Commutation)를 위해 추가되었다.

#### (1) 위상제어각 135°

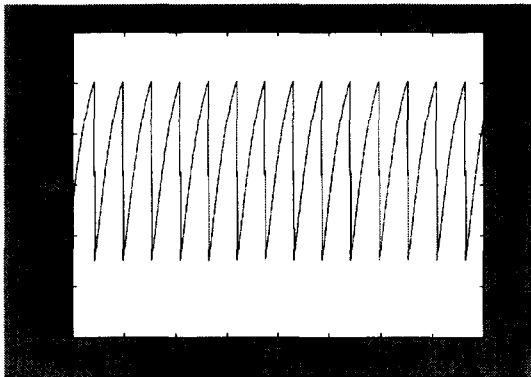


Fig 14. Inverter DC link voltage

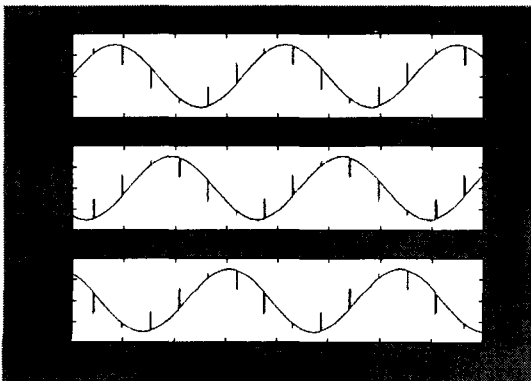


Fig 15. Phase voltage waves

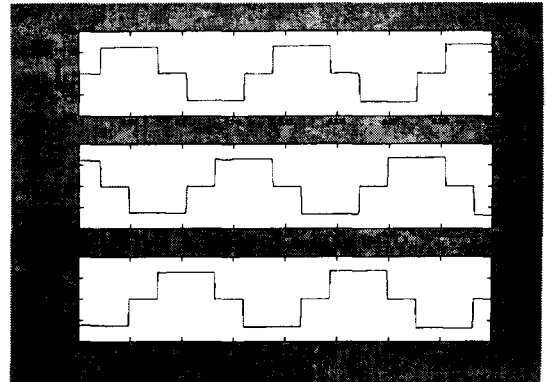


Fig 16. Output current waves

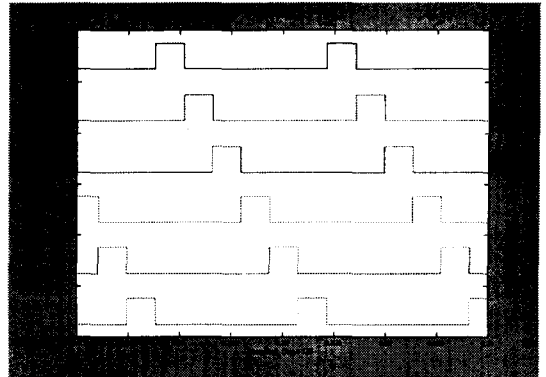


Fig 17. Gate pulse waves

그림14.는 자연전류(Commutation)시 인버터 모드( $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ )에서의 인버터 입력단 Link 전압이다. 그림15.는 각 상전압 파형이다. 그림16.은 인버터에 의해 만들어진 각 상전류 파형이다. 그림17.은 사이리스터  $T_1 \sim T_6$ 의 게이트펄스 파형이다.

#### (2) 위상제어각 45°

그림18.은 자연전류(Commutation)시 컨버터 모드( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )에서의 인버터 입력단 Link 전압이다. 그림19.는 각 상전압 파형이다. 그림 20.은 인버터에 의해 만들어진 각 상전류 파형이다. 그림21.은 사이리스터  $T_1 \sim T_6$ 의 게이트펄스 파형이다.

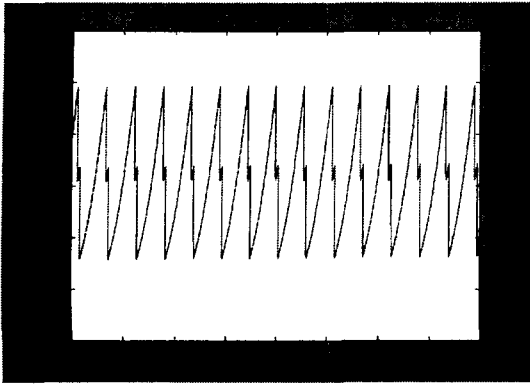


Fig 18. Inverter DC link voltage

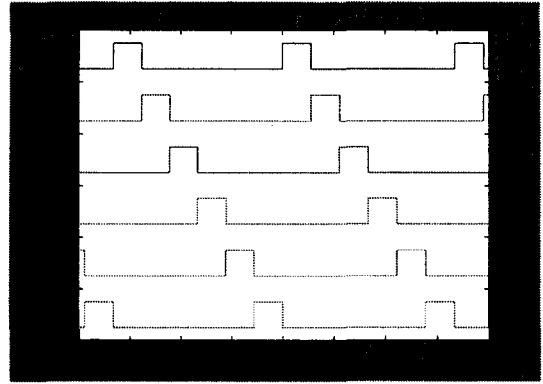


Fig 1. Gate pulse waves

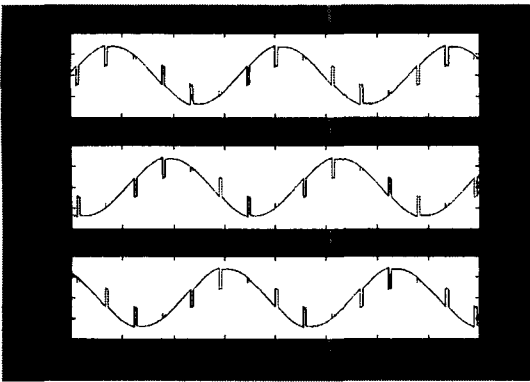


Fig 19. Phase Voltage waves

(3) 위상제어각  $135^\circ \rightarrow 45^\circ$  (0.24sec)

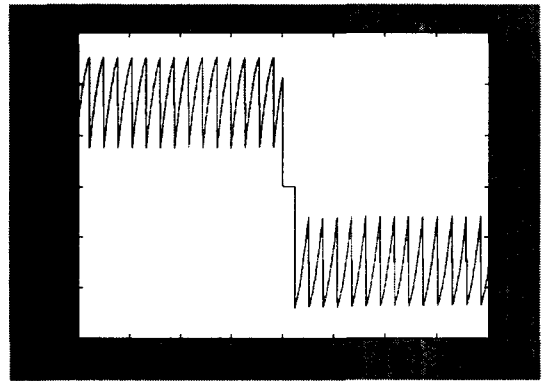


Fig 22. Inverter DC link voltage

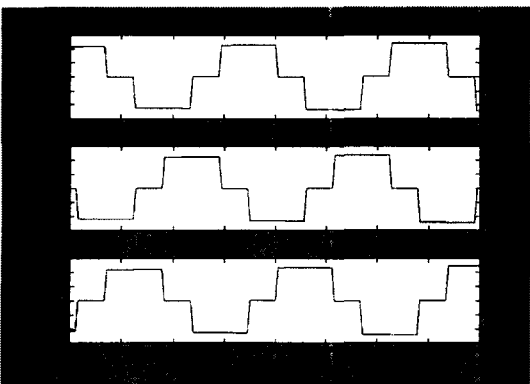


Fig 20. Output current waves

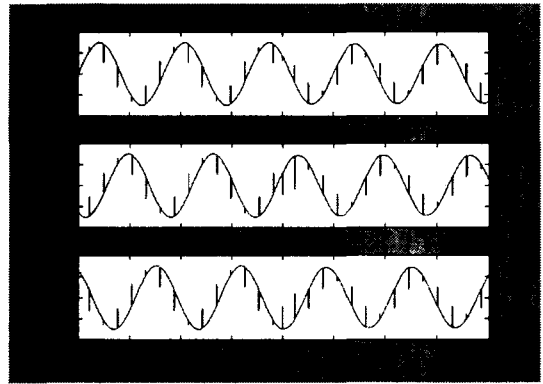


Fig 23. Phase voltage waves

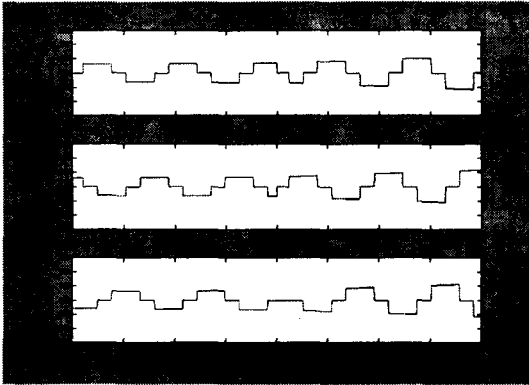


Fig 24. Output current waves

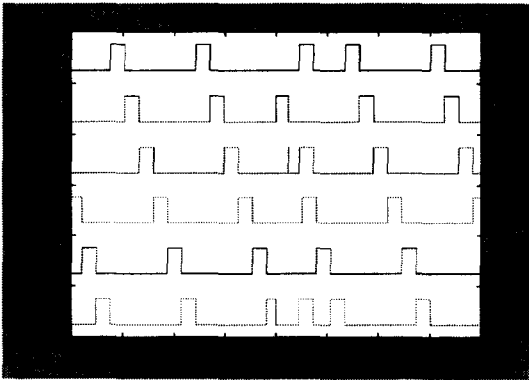


Fig 25. Gate pulse waves

위상제어를 통해 인버터모드로 동작중 0.24초에서 컨버터모드로 동작시킨 파형이다. 그림22.은 입력단 Link 전압, 그림23.은 상전압 파형이다. 그림24.는 인버터에 의해 만들어진 각 상전류 파형이다. 그림25.는 사이리스터  $T_1 \sim T_6$ 의 게이트펄스 파형이다.

#### 4. 결 론

이상과 같이 TGV-K 고속전철 차량의 추진 장치의 구성에 대한 전체적인 내용 및 주요기능의 모듈별회로 특성과 전류형 인버터의 전력변환에 적용되는 방법에 대하여 기술하였다. TGV-K에 적용된 사이리스터를 적용한 전력변환 장치는 최근에 개발되어 적용되고 있는 IGBT나 IGCT, MCT등의 스위칭 소자로 구성된 전력변환 장치와 비교하여 자기소호 기능이

없으므로 강제전류 및 자연전류 등의 방법을 적용하는 어려움이 있으나, 대용량의 전력변환에 유리하고, 스위칭시 스파이크 등의 악조건에서도 소자의 파손률이 낮은 장점을 가지고 있다. 그러나, 실제 운전상황에 따르는 전력변환 회로의 동작특성에 이상이 발생할 수 있는 가능성을 고려하여 영업운전에 투입된 추진장치의 유지, 보수 등의 측면에서 TGV-K 추진용 전력변환 장치에 대한 운전모드 및 동작특성을 기술적으로 검토하였다.

#### 참고문헌

- [1].B. K. Bose, 1986, "POWER ELECTRONICS AND AC DRIVES"
- [2].Venkatachari 1987, Rajagopalan, "Computer-Aided Analysis of Power Electronic Systems"
- [3]. "The SIMULINK User's Guide" in Mathworks Handbook. Math Works. 1994.