

# 고속전철 견인용 전력변환장치에 관한연구

## A Study on Power Conversion System of the High Speed Train

이 병 송\*      박 성 혁\*      변 윤 섭\*      김 명 룡\*  
Lee, Byung-Song   Park, Sung-hyrk   Byun, Yeun-Sub   Kim, Myung-Yong  
이 수 길\*      박 현 준\*  
Lee, Soo-Gil      Park, Hyun-Jun

---

### 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.

---

#### 1. 서 론

현재 프랑스에서 도입된 TGV-K 고속전철 차량은 전류형 인버터로 구동되는 추진제어 장치가 탑재되어있고, 주파수 변조를 위한 스위칭 소자로는 대용량의 집중식 전력변환 장치의 적용에 유리하며, 스위칭시의 악조건에도 소자의 파손률이 낮은 싸이리스터를 채용하여 신뢰성이 있는 회로를 구성할 수 있는 우수한 특성을 가진다. 그러나, 실제 운전상황에 따르는 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 고찰하였다.

#### 2. 추진시스템 구성

TGV-K 추진제어시스템은 그림1. 과 같이 한 개의 주변압기에서 3그룹으로 나뉘어지며, 1그룹에 두 개의 싸이리스터 컨버터, 한 개의 평활리액터, 두 개의 인버터, 두 대의 3상 동기전동기, 한 대의 계자초퍼, 두 개의 역률보상(P.F.C) 회로로 구성된다.

---

\* 한국철도기술연구원 도시철도기술개발 사업단

- 주변압기는 가선으로부터 받은 25[kV]의 전압을 2차권선 각각에 대해 1800[V]로 변환한다.
- 두 대의 단상 브리지 정류기는 싸이리스터로 구성되며 서로 직렬로 연결되어있으며, 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 싸이리스터에 의해 수행되고. 자연전류모드에서(120Kph 이상의 속도에서) 전류는 전동기의 상간전압에 따라 동작된다.
- 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.

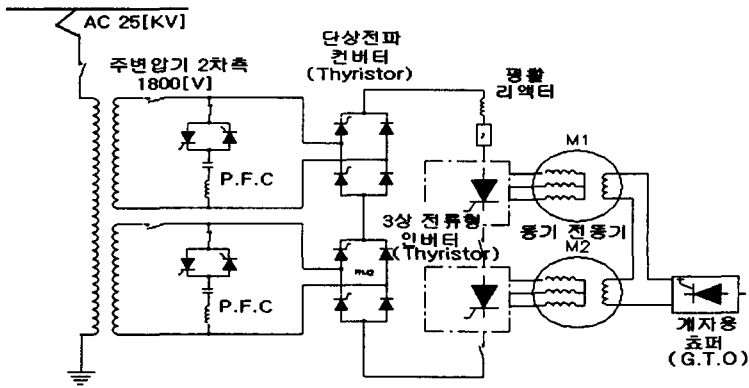


그림1. 추진시스템의 구성

## 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 2.와 같이 단상 컨버터 회로를 구성하였다.

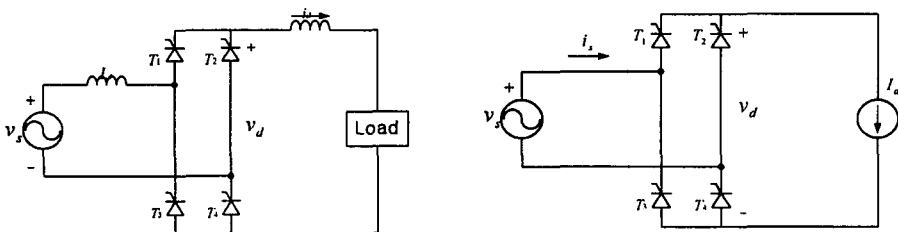


그림2. 단상 싸이리스터 컨버터

그림2.에서  $L_s = \infty$ 로 가정하면,  $i_d(t) = I_d$ 와 같이 볼 수 있고, 이때 전류  $i_d$ 는 상위 싸이리스터  $T_1, T_2$  중의 하나와 하위 싸이리스터  $T_3, T_4$  중의 하나를 거쳐 흐르게 된다. 만일 싸이리스터의 게이트전류가 연속적으로 가해지면 이 싸이리스터들은 다이오드처럼 동작하게 된다.

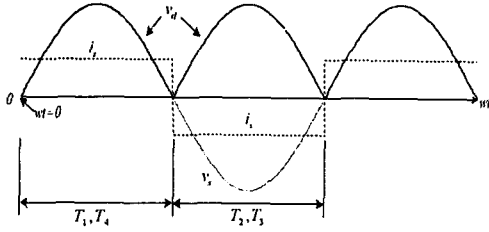


그림3.  $\alpha = 0^\circ$

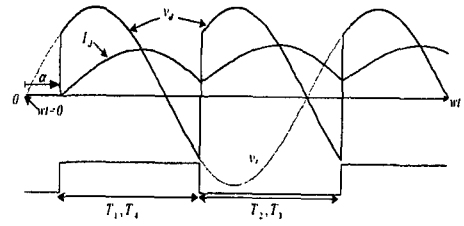


그림4.  $\alpha = 45^\circ$

다. 이에대한 전압과 전류파형은 다음과 같다. 싸이리스터  $T_1, T_4$ 는  $\omega t = 0$  인 순간 도통하고  $T_2, T_3$ 는  $\omega t = \pi$  인 순간 도통하게된다. 또한, 점호각 지연  $\alpha$ 를 고려한 전압, 전류파형은 그림4.와 같으며, 게이트 펄스가 가해지는  $\omega t = \alpha$  에서 싸이리스터는 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.

$$V_{d0} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}V_s \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos \alpha = 0.9V_s \cos \alpha \quad (1)$$

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

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

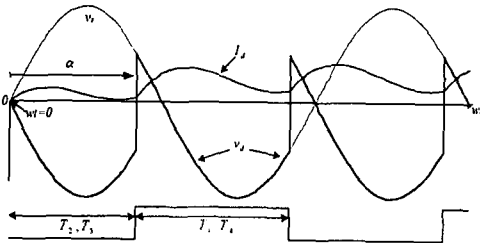


그림5.  $\alpha = 150^\circ$

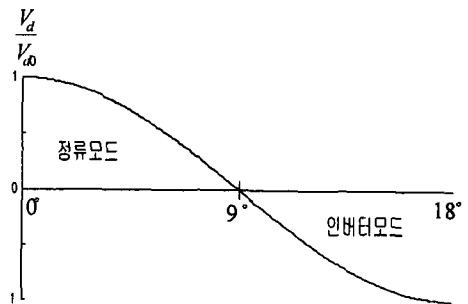


그림6. 단상컨버터의 동작모드

### 2.2 3상 인버터

일반적으로 인버터는 직류전력을 교류전력으로 변환하는 장치를 지칭하는데 크게 전압형과 전류형으로 분류된다. 본장에서는 T.G.V-K.에 적용되고 있는 전류형 인버터에 대하여 기술하며, T.G.V-K 추진시스템은 3상 사아리스터 전류형 인버터회로 2개를 직렬로 연결하여 구성되어 있다. 인버터는 전동차의 속도에 따라 강제전류(forced commutation)모드와 자연전

류(natural commutation) 모드로 동작하며, 이들의 전환점은 속도 기전력의 크기 및 스위칭 제어각으로 결정된다.

(1) 전류형 인버터의 동작

전류형 인버터는 그림7.과 같이 역기전력  $V_a, V_b, V_c$  와 전동기의 등가 인덕턴스  $L_a, L_b, L_c$ , 그리고, 싸이리스터 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 싸이리스터  $Q_A$ 를 점호하고, 하위 스위치  $Q_2, Q_4, Q_6$ 의 소호시에는 하위의 보조 싸이리스터  $Q_B$ 를 점호하여 강제전류용 커패시터 C의 전압으로 스위칭 소자를 소호시

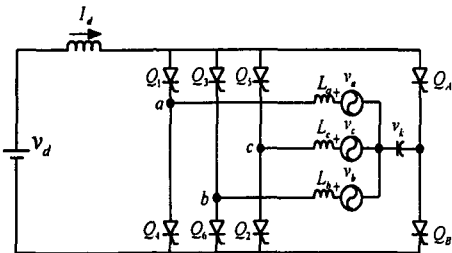


그림7. 전류형 인버터

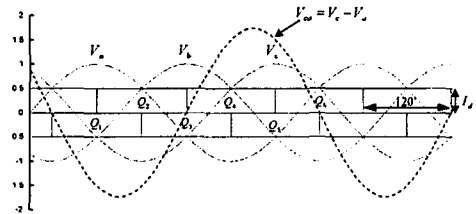


그림8. 전류형 인버터 동작모드

키게 된다. 반면, 자연전류(natural commutation)모드로 동작할 경우, 역기전력  $V_a, V_b, V_c$  의 상간전압을 이용하며, 그림8.의 한상의 상간 전압  $V_{\omega}$ 를 기준으로 0점과 교차하는 점에서 스위칭을 위한 게이트를 인가하면, 각상의 점호 및 소호를 보조 싸이리스터 및 커패시터를 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

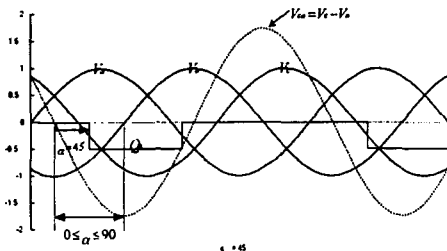


그림9. 점호각  $\alpha = 45^\circ$

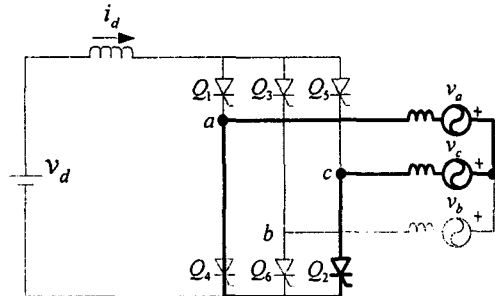


그림10. 인버터의 동작상태

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 싸이리스터  $Q_3$ 를 통하여 부하를 거쳐 하위 싸이리스터  $Q_2$ 로 도통하고 있는 조건에서 싸이리스터  $Q_4$ 를 점호하면 그 순간 싸이리스터  $Q_2$ 는 그림10.과 같은 조건으로 바이어스 된다.

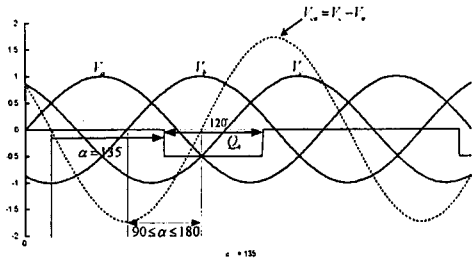


그림11. 점호각  $\alpha=135^\circ$

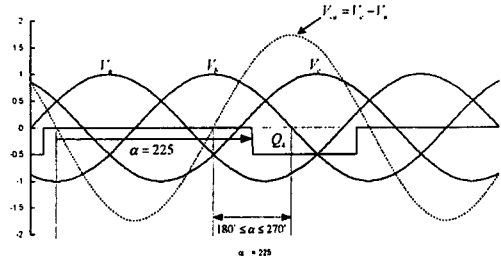


그림12. 점호각  $\alpha=225^\circ$

즉 사이리스터  $Q_2$ 에는  $V_{\omega} = V_c - V_a$  가 바이어스된다. 그림9.와 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. 그림 10.은 인버터의 동작상태를 회로적으로 나타낸 것이다.

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.

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

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 불가능한 영역이다. 이 영역에서 동작시키려면 강제전류방법을 적용하여 사이리스터를 제어하여야 한다.

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

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.

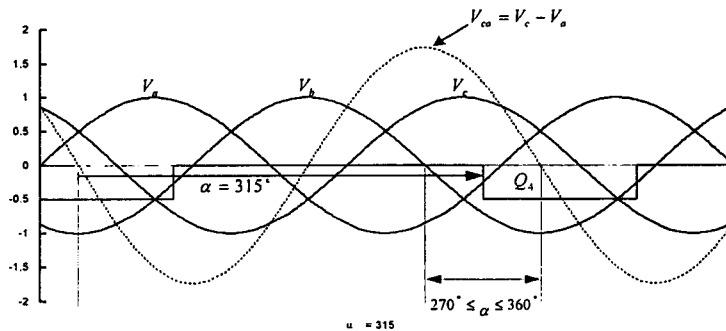


그림13. 점호각  $\alpha=315^\circ$

### 3. 자연전류방식 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 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 인

버터의 회생모드(컨버터모드) 및 전류(Commutation)를 위해 추가되었다.

(1) 위상제어각  $135^\circ$

그림14는 자연전류(Commutation)시 인버터모드( $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ )에서의 인버터 입력단 Link 전압이다. 그림15는 각 상전압 파형이다.

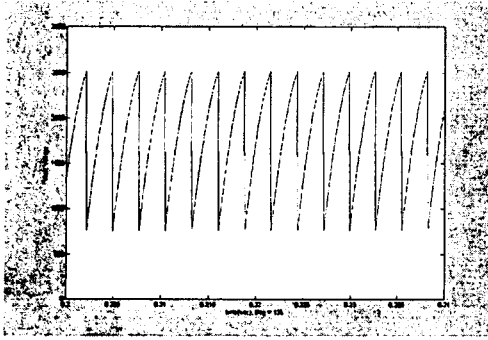


그림14.인버터 입력단 전압

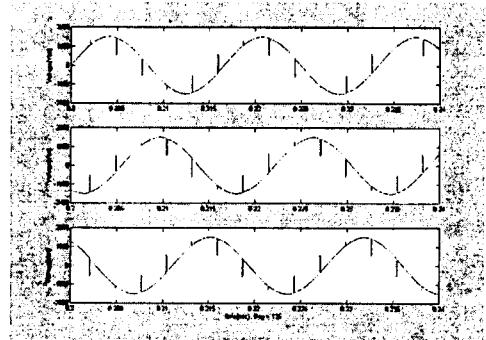


그림15.입력단 상전압 파형

그림16은 인버터에 의해 만들어진 각 상전류 파형이다. 그림17은 사이리스터  $T_1 \sim T_6$ 의 게이트펄스 파형이다.

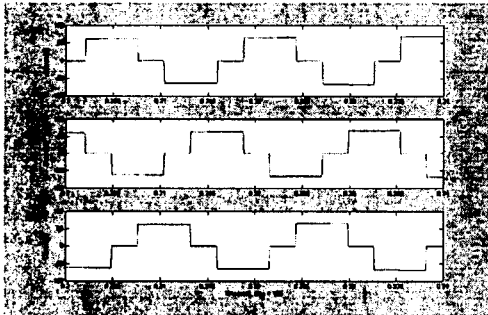


그림16. 출력단 상전류 파형

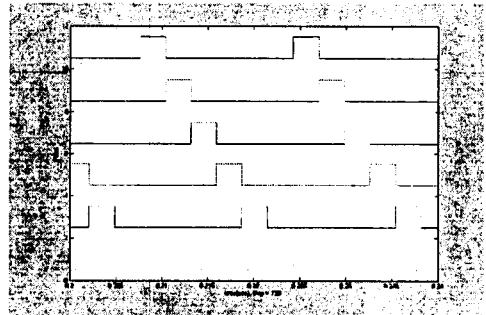


그림17.게이트 펄스파형

(2) 위상제어각  $45^\circ$

그림18은 자연전류(Commutation)시 컨버터모드( $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ )에서의 인버터 입력단 Link 전압이다. 그림19는 각 상전압 파형이다.

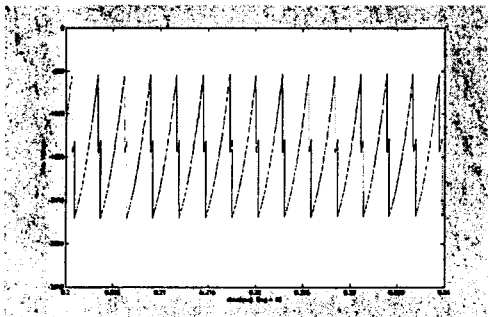


그림18. 인버터 입력단 전압

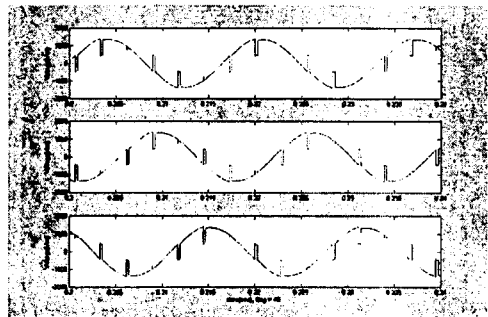


그림19.입력단 상전압 파형

그림20.은 인버터에 의해 만들어진 각 상전류 파형이다. 그림21.은 사이리스터  $T_1 \sim T_6$ 의 게이트펄스 파형이다.

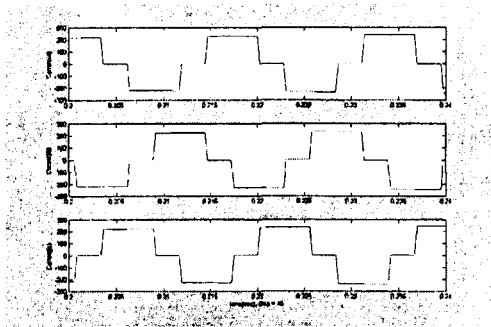


그림20. 출력단 상전류 파형

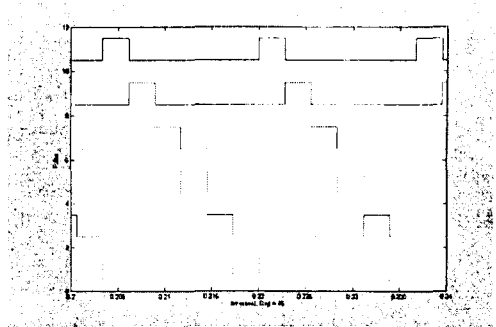


그림21. 게이트 펄스파형

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

위상제어를 통해 인버터모드로 동작중 0.24초에서 컨버터모드로 동작시킨 파형이다. 그림 22.은 입력단 Link 전압, 그림23.은 상전압 파형이다.

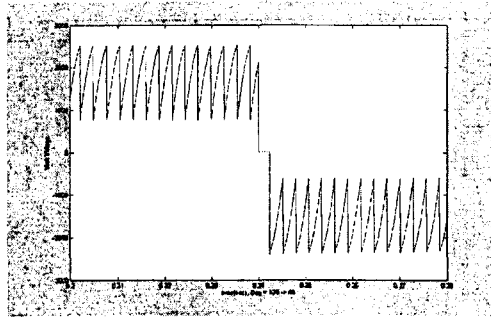


그림22. 입력단 Link 전압

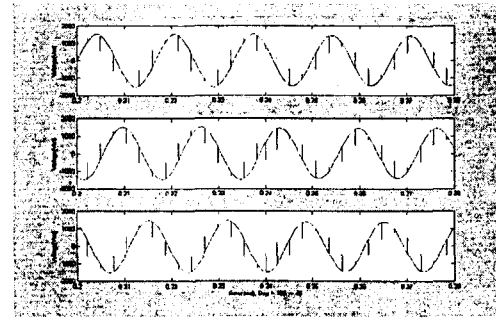


그림23. 상전압 파형

그림24.는 인버터에 의해 만들어진 각 상전류 파형이다. 그림30은 사이리스터  $T_1 \sim T_6$ 의 게이트펄스 파형이다.

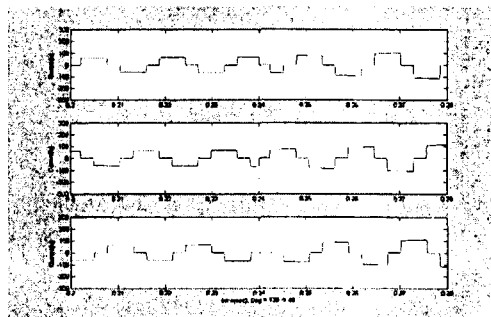


그림24. 상전류 파형

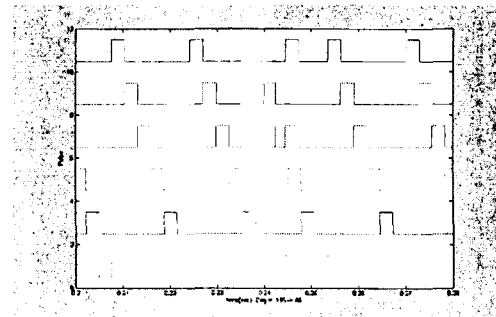


그림25. 게이트 펄스파형

#### 4. 결 론

이상과 같이 TGV-K 고속전철 차량의 추진장치의 구성에 대한 전체적인 내용 및 주요 기능의 모듈별회로 특성과 전류형 인버터의 전력변환에 적용되는 방법에 대하여 기술하였다. TGV-K에 적용된 싸이리스터를 적용한 전력변환 장치는 최근에 개발되어 적용되고 있는 IGBT나 IGCT, MCT 등의 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.