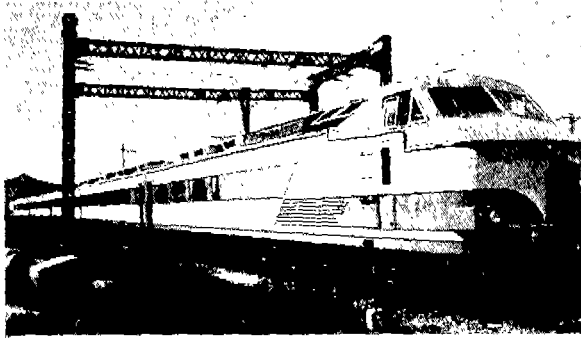


電鉄用 電力変換装置の 國産化에 對하여

A Study on the Development
of a Thyristor Converter
for Electric Locomotives



金光培

KAIST 電氣制御研究室長

I. 서론

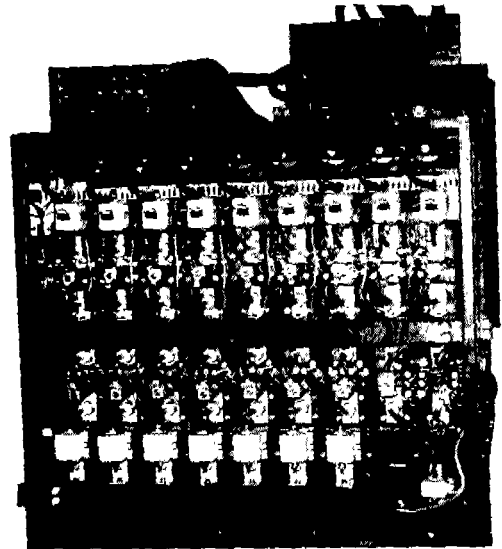
육상교통의 근간을 이루고 있는 철도는 격증하는 수송부하에 대응하여 더욱 고속화 및 성력화가 요구되고 있으며, 현재 선진 외국에서는 철도의 전철화로 보다 합리적이고 경제적인 수송체제를 확립시키는 추세에 있다.

우리나라의 경우 1980년대의 서울시 지하철 교통망의 확충계획과 전국 철도 수송 시스템의 전철화 추진정책으로 인하여 이 분야의 설계기술 개발 및 기자재의 국산화 문제가 시급한 과제로 대두되고 있다.

따라서 정부 및 산업계는 지금까지 막대한 외화를 지불하고 수입에만 의존하여 온 전동차와 전기기관차에 소요되는 각종 기기들을 점차 국산으로 대체할 계획을 추진중에 있다.

본 연구에서는 이와 같은 전철용 기자재의 국산화 방안의 일환으로 현재 청량리 → 북평간을 운행하는 전기기관차의 전인전동기용 전원공급장치인 Thyristor 제어 정류장치를 대상으로 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 1) 전기기관차 전인전동 기구동시스템 종합분석
- 2) 정류장치의 특성 및 주요부품의 재원파악
- 3) 정류기 시작품의 설계 및 부품규격 선정
- 4) 시작품 제작 및 시험방법 연구
- 5) 정류기 시작품의 시험 및 성능검사



(그림-1) Thyristor 제어정류장치 시작품의 외관

II. Thyristor 제어 정류장치의 설계특성

1. 직류전동기 속도제어

가. 기본식

$$n = \frac{V - I_a R_a}{K_1 \phi}$$

$$T = K_2 \phi I_a$$

K_1, K_2 : 비례상수

n : 회전수 (r. p. m)

T : 토크

V : 인가전압

I_a : 전기자 전류

R_a : 전기자 회로저항

ϕ : 자속

나. Traction Motor로서의 직권 Motor

$$n = \frac{V - I_a R}{K_3 I_a} \quad (\phi = \frac{K_2}{K_1} I_a, R = R_a + R_f)$$

$$T = K_4 I_a^2 \quad \left(K_4 = \frac{K_2 K_3}{K_1} \right)$$

위 식에서 $I_a R$ 를 무시하면 속도는 대략 V/I_a 에 비례하고 자속이 포화되지 않는 범위에서 토크는 전기자전류의 제곱에 비례한다. 따라서 Traction Motor가 가져야 할 큰 기동토크와 정상속도에서의 적은 토크가 직류직권 Motor로 만족된다.

다. 직류직권 Motor 속도제어 방법

1) 제자제어법

가) 제자분류기의 병렬접속

나) 제자권선의 Tap절환

다) 2개 이상 제자권선의 직·병렬 접속

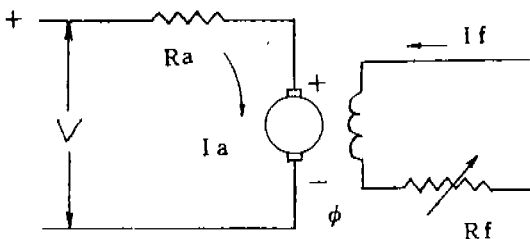
2) 전기자 저항 제어법

3) 전압제어법

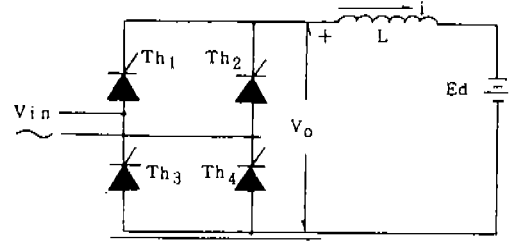
가) 직권 Motor의 직·병렬 접속

나) Thyristor 위상제어법

이상의 여러 방법중 효율 및 제어범위를 고려해 볼 때 교류전원을 사용하는 곳에서는 Thyristor 위



(그림-2) 직류전동기



(그림-3) 위상제어 정류회로 (4 SCR 단상 브리지)

상제어법에 의한 속도제어가 가장 바람직하다.

현재 전기기관차는 1)의 가)항과 3)의 나)항을 접하여 속도를 제어하고 있다.

2. 위상제어 정류회로

가. 4 SCR 단상 브리지

L 이 충분히 큰 경우 i 는 거의 일정하게 흐르고

V_o 는 그림5와 같이 된다.

V_o 의 평균치 즉 직류전압 E_d 는

$$E_d = \frac{2}{\pi} V_m \cos \alpha$$

로 된다.

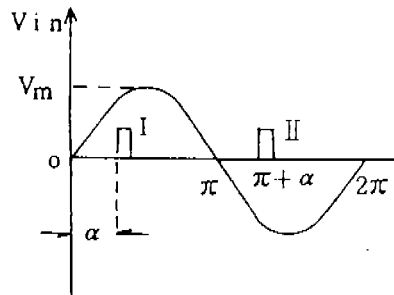
나. 2 SCR 단상 브리지

이때 V_o 의 평균치는

$$E_d = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

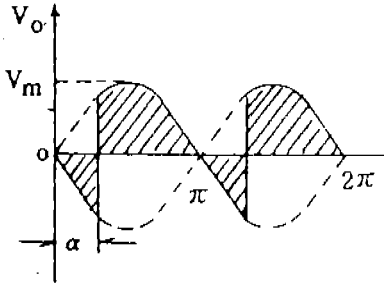
이고 $\omega t = n\pi \sim n\pi + \alpha$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 구간에서 다이오드는 Free Wheeling Diode로 된다.

현재 기관차의 정류회로는 2 SCR 단상 브리지로 되어 있다.

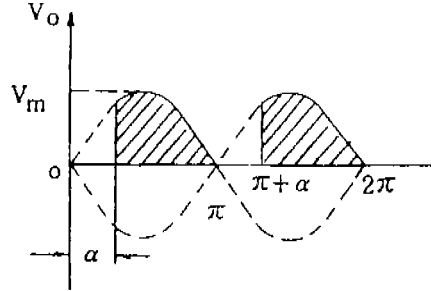


I : Thy. 1, 4의 Trigger Pulse
II : Thy. 2, 3의 Trigger Pulse
 α : 정호각

(그림-4) 입력 및 Trigger Pulse 파형



〈그림-5〉 출력파형



〈그림-7〉 출력파형

3. 전기기관차 견인전동기 구동시스템

가. 전기기관차 제원

현재 운행되고 있는 전기기관차는 급구배 (30%) 와 혼한 곡선로 (최소곡선반경 250m) 및 전철기로 인한 빈번한 속도제어 등을 감안하여 큰 견인력을 갖도록 제작된 유럽 50C/S 그룹의 제품이다.

현재 청량리 → 북평간 산업선을 운행하고 있는 전기기관차는 총량 132 Tons, 6 Shaft로 650kW 직류직권 Motor 6대에 의해 구동되어 최대출력 3,900 kW (5,300 HP), 전인최대부하 1,740 Tons (환산 40량)으로 되어 있다.

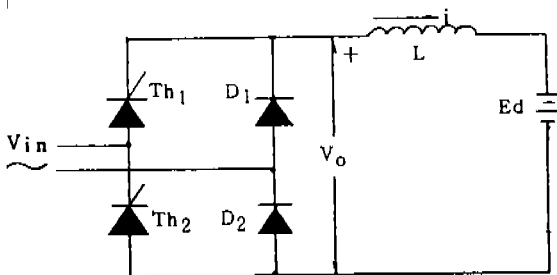
속도제어는 Thyristor 위상제어 방식을 사용하고 있으며 약제자 방식을 접하여 최고속도는 85km/hr 로 설계되어 있고 제동방식으로는 공기제동과 발전제동을 병용하고 있다.

전원공급방식은 1대의 정류기 (주정류기)가 견인전동기 3대를 담당하고 있으며 발전제동시에는 보조변압기 150V A.C 단자에서 제 1정류기를 거쳐 직렬로 접속된 6대의 견인전동기 제자에 직류전원이 공급된다.

제 1정류기 : 견인전동기 1, 3, 5

제 2정류기 : 견인전동기 2, 4, 6

주정류기와 같이 조립되어 있는 보조정류기는 기



〈그림-6〉 2 SCR단상 브리지회로

관차내 모든 직류 보조장비에 직류전원을 공급한다

나. 견인전동기 구동시스템

기관차 1대당 Thyristor 정류기 2대가 소요되며 각각 3대의 견인전동기 (650kW 직류직권 Motor)에 직류전원을 공급한다.

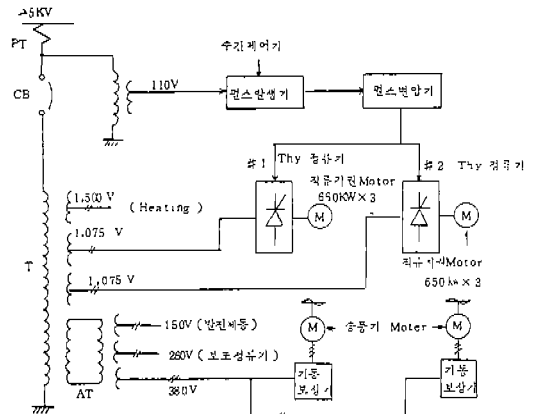
주변압기 1,075V 단자에서 교류전원을 공급받는 주정류기는 직류정격 900V, 2,550 A로 설계되어 있으며 Thyristor에 통전되는 전류량은 게이트 위상제어로 0~100%까지 제어시킬 수 있다.

즉 주간제어기 위치에 따라 Trigger Pulse가 이상(Shift)되어 점화각 α를 변화시킴으로써 출력전압이 0~900V 범위에서 제어된다.

다. 견인전동기 및 정류기의 정격

1) 견인전동기

종 류	직류직권 Motor
연속정격전압	900V (신형 820V)
연속정격전류	850 A



#1, #2 : Thyristor 정류기

〈그림-8〉 견인전동기 구동시스템 블록선도

연속정격출력 655 kW
 연속정격회전수 1,190 RPM
 최대회전수 2,400 RPM
 과속회전수 3,000 RPM

기관차의 속도

$$v = 60 \times \text{RPM} \times R \times \pi \times D \times 10^{-6} \text{ (KPH)}$$

R : 치차비 = 15 / 96

D : 기관차 바퀴의 지름 = 1,250 mm

Motor 회전수 (RPM)	기관차속도 (KPH)
1,190	43
2,400	88
3,000	110

2) 주정류기

정류방식 Semi-controlled Single Phase Bridge

교류공급전압 1,075 V

교류공급전류 2,800 A

교류공급주파수 60Hz

직류정격전압 900V

직류정격전류 2,550 A

5분간전류 3,240 A

직, 병렬소자수

Thyristor : 2 직 9 병렬 / arm, 총 36개
 Diode : 2 직 7 병렬 / arm, 총 28개

3) 보조정류기

정류방식 Single Phase Bridge

직류정격전압 230V

직류정격전류 500 A

10sec간 전류 1,000 A

소자수 Diode 4개

4) 정류기 냉각장치

냉각방식 강제통풍공냉식

송풍기 Motor 3 φ 유도전동기 × 2

송풍기정격출력 0.85 kW

송풍기정격속도 1,130 RPM

송풍기정격전압 380 V

송풍기정격주파수 60 Hz

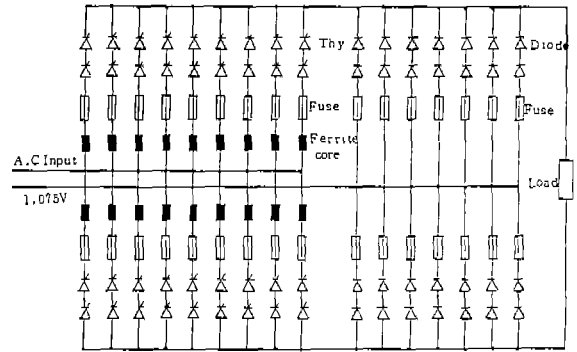
송풍기정격전류 3.2 A

송풍기송풍용량 4,900 m³/h

송풍기송풍압력 35mm W.G

III. 주정류기의 설계, 제작 및 시험

1. 주정류기 및 보호장치



〈그림-9〉 주정류기 결선도

가. 주정류기 회로

주정류기 회로는 주행 및 제동시에 견인전동기에 직류전원을 공급하는 Semi-controlled Single-Phase Bridge 회로로 구성된다. Bridge 회로에 필요한 반도체 소자는 Thyristor가 Arm 당 2 직 9 병렬 18개씩 36개, Diode는 Arm 당 2 직 7 병렬 14개씩 28개가 소요된다.

반도체 소자의 선정기준은 Bridge의 Arm 당 흐르는 전류치 및 병렬소자의 지로전류 불평형 등을 고려한 전류정격과 각 소자에 걸릴 수 있는 최고전압을 고려한 전압정격에 따라 Thyristor는 일본 Mitsubishi 제품을 사용하였다.

나. 반도체 소자 보호장치

1) Fuse

반도체 소자 보호장치로 Thyristor와 Diode 각 열에 Fuse가 있으며 각 Fuse에는 Fuse 용단을 검출하는 Microswitch가 부착되어 있다.

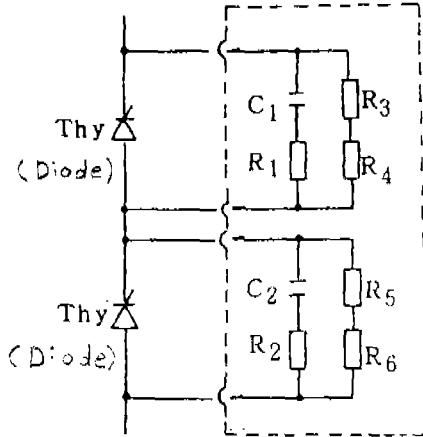
주정류기의 Thyristor 및 Diode 용으로 사용되는 Fuse는 과전류로 부터 소자를 보호하는 목적보다는 파괴된 반도체 소자를 회로로부터 차단시켜 파괴소자에 의한 고장파급을 방지하는데 목적이 있다.

Fuse 선정기준은 주정류기 입력전압이 1,075V 교류이고 Thyristor 및 Diode의 실효전류 정격이 630 A이므로 630 A, 1,250V 정격의 Fuse를 선정하였다.

2) Snubber 회로 및 전압분배기

반도체 소자에 갑자기 켜지 (Surge)가 인가되었을 때 그 충격전압을 흡수하는 회로로 R-C Snubber 회로가 소자에 병렬로 접속되어 있다.

R-C Snubber 회로는 Thyristor에 가해지는 전압의 상승율 (du/dt)이 과대하여 Thyristor가 잘못



〈그림-10〉 Snubber 회로 및 전압분배기

Trigger되는 것을 방지하고 Thyristor 직렬접속시 직렬소자의 Turn On 특성을 균일하게 하여 준다.

전압분배기는 소자의 전류차단시 각 반도체 소자의 전압분배를 균등하게 한다.

3) Ferrite Core Reactor

각 Thyristor 지로(Branch)에 직렬접속되어 Thyristor에 흐르는 전류의 상승율(di/dt)을 제한하여 Thyristor를 열적파괴로부터 보호하고 병렬접속된 각 지로에 부하전류를 균등하게 분양시키는 역할을 한다.

2. 정류기 특성시험

본 시험은 정류기 시작품의 특성관정을 위한 시험으로 시험내용 및 방법은 JEC-188, 1977에 의거하여 수행하였다.

가. 절연저항 측정

나. 절연내력 시험

상용주파 교류전압을 1분간 인가

※ 시험전압 결정식

$$E_T = 1000 + 1.5E_{P1} = 3280 [V]$$

E_{P1} : Thyristor 역전압의 피크치 ($1075\sqrt{2}$ [V])

다. 저전압 경부하 시험

Pulse Transformer를 포함한 정류기의 결선상태 및 점호각 $0 \sim \pi$ 까지의 Thyristor 점호상태를 확인한다.

라. 경부하 전압시험

경부하로 정격의 110% 전압 인가

마. 저전압 통전시험

저전압 정격전류 인가시험

바. 기관차 경부하 운전

사. 기관차 현차운행 시험

기관차의 견인부하를 변화시켜 가며 (최대견인부하 1,740 Tons) 정류기의 동작상태를 관찰하고 구배에 따른 전류통전상태, 점호각 조절에 따른 전압 및 속도특성 등을 파악한다. 또한 운행시간 및 거리에 따른 정류기의 구조적 열화상태 및 온도변화 등을 점검한다.

3. 시험결과

일련의 시험과정을 거친 시작품 정류기는 시험기관차에 취부되어 열차운행 시간표에 따라 청량리 ← 제천 ← 북평간을 약 1개월 동안 10,000km를 주행하였고 그에 따른 종합결과는 다음과 같다.

가. 구조적 강도

10,000km를 주행하는 동안 구조적 열화상태는 발견되지 않았으므로 강도 면에서는 일단 양호한 것으로 판정된다.

나. 온도상승

Thyristor의 케이스 사용온도가 56°C로 규정되어 있어 50°C에서 변색하는 Thermolabel을 Heat Sink에 부착하여 온도상승을 관찰하였으나 변화가 없었다. 따라서 운행중 Thyristor 케이스 온도는 50°C 이하인 것으로 추정되며 열적인 문제는 없는 것으로 판정된다.

다. Thyristor 내압, 전류용량 및 Snubber 회로상태

기관차 운행중 Catenary Voltage가 구간마다 변

〈표-1〉 전기자전압 계산치와 실측치

No.	점호지연각 (Degree)	Catenary 전압 (kV)	전기자전압	
			계산치 (V)	실측치 (V)
1	9.6	25	959	950
2	18	24	906	850
3	45	25	826	750
4	66.6	25	676	600

※ 전기자전압 계산식 (그림 6, 그림 7 참조).

$$\left[E_d = \frac{V_m}{\pi} \cdot (1 + \cos a) \right]$$

〈표-2〉 Thyristor 지로전류 분포도

구 간	지 로 전 류 [A]									구 배 %	부 하 환 산 량	전 동 기 전 류 A	최 대 비 소 비
	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9				
예미 → 추진	80	80	80	70	70	60	50	50	50	30	12	400	1.6
황지 → 추진	130	130	130	110	105	100	90	90	90	30	34.5	700	1.44
구학 → 실험	60	60	55	55	55	50	50	50	50	11	-	400	1.2
도농 → 망우	70	70	65	65	60	60	50	50	50	11	-	400	1.4

※(전동기 전류는 운전실 전류계에서 읽은 것이며 지로전류는 Hook-metter로 측정된 것임)

동이 심한 것으로 관측되었다(정격 25kV에서 23~27kV 정도로 $\pm 8\%$ 의 전압변동이 있었음). 한편 전기자 전압은 0~950V까지 제어되고 있었고 부하에 따라 전기자 전류는 0~2,550A가 흘렀다. 이 상태에서 반도체 소자의 동작상태를 점검한 결과 양호하였으며 Snubber 회로 및 Fuse 등 보호소자에도 이상이 없었다.

라. 점호상태 및 병렬회로의 전류분배

주간제어기의 위치에 따라 점호펄스가 이상(Shift)되는 것을 Oscilloscope로 관측하고 점호각 변화에 따른 전압의 계산치와 실제 전압치를 비교, 검토하였다.

표 1에 Sampling한 점호각 α 에 따른 전기자 전압의 계산치와 실측치를 나타내었다.

위의 결과에서 D.C-Reactor 및 제자회로의 저항에 의한 전압강하, 교류전압의 왜형, 직류측 전압·전류의 맥동성분 등에 의한 오차와 계기오차, 측정오차를 감안하면 비교적 계산치와 실측치는 잘 맞는 것으로 볼 수 있다.

표 2는 Thyristor 병렬접속에 있어서 각 지로의 전류분포를 보여 주는데 비교적 균일하게 흐르는 것을 알 수 있다.

(최대전류/최소전류=1.2~1.6)

이상으로서 Thyristor는 점호펄스에 의해 정상적으로 점호되고 있으며 병렬회로의 지로전류 분포도 양호하다고 판정되었다.

IV. 결론 및 건의사항

본 연구를 통하여 전기기관차용 Thyristor 제어 정류장치의 시작품은 품질 및 성능면에서 일단 만족스럽다고 볼 수 있으나 앞으로 제품의 성숙화를 위해서는 다음과 같은 측면에서 장기적이고도 세

심한 검토가 필요하다.

첫째 신뢰성 및 수명에 관한 검토

전기기관차는 대량의 화물 및 여객의 고속 대규모 운송시스템이란 점을 감안할 때 안전성이 무엇보다 중요하며 따라서 일순간의 고장도 허용할 수 없으므로 이에 사용되는 기기의 신뢰도가 특히 문제가 된다.

금번 연구의 결과는 일차로 10,000km의 주행시험을 통하여 도달한 종합의견으로 추후 주행거리를 점차 증가시켜 부품고장에 따른 원인규명 및 MTBF 등을 산정하여 신뢰성이 낮은 부품의 설계개선, 제작기술의 향상을 위해 노력을 경주할 필요가 있다. 정류기의 수명을 판정한다는 것은 아주 어려운 일이나 제작에 소요된 부품의 수명, 운전상태, 부하상태, 기관차내의 온도, 습도 및 분진등에 의해 결정된다고 말할 수 있다. 따라서 주위환경 및 사용상태를 충분히 고려하여 사용조건의 적정화 및 보수 점검의 철저를 기하여 수명의 극대화를 위해 노력해야 할 것이다.

둘째 국산화율의 제고

본 시작품을 부품의 국산화면에서 보면 대용량 Thyristor 등의 해외 도입품과 Pulse Converter 등의 국산제품의 혼합형태로 구성되어 있다. 일반적으로 부품면에서의 국산화율 제고는 품질의 저하를 초래할 수도 있으므로 가능한 한 국산화율의 제고라는 명제에 접근시키되 기술적인 면에서 신중하게 검토되어야 할 것이다.