

무접점 차단기용 GTO 소자 병렬 운전 연구

윤재학, 최세경, 정명길^O, 김종구
현대중공업(주) 중전기 개발부문 메카트로닉스 개발실

A STUDY ON GTO'S PARALLELING OPERATION FOR NON-CONTACT CIRCUIT BREAKER

J. H. Yun, S. K. Choi, M. K. Jung^O, J.K. Kim
HYUNDAI HEAVY INDUSTRY CO.,LTD. INDUSTRIAL AND POWER SYSTEMS

ABSTRACT

The use of Solid-State switches as interruption devices offers significant advantages in circuit breaker applications.

In this paper, we introduce a GTO DC circuit breaker using GTOs and ZnO varistors. And also, the result of the research work described in this paper allows to establish the rules for paralleling of GTO's

1. 서론

현재 전류를 개폐 및 차단하는 것으로서 기계적인 접촉부를 갖는 개폐장치가 널리 사용되고 있다. 그러나, 이것들은 어느것이나, 고빈도 개폐에 대한 접촉부의 마모문제 기계기구의 보수점검이 필요한 것등 몇가지 문제를 갖고 사용되는 실정이다.

한편, 개폐속도가 대단히 빠르고 또한 반영구적으로 사용할 수 있는 반도체는 종래의 개폐장치에 대치되는 이상적인 개폐장치로서 오래전부터 연구되어 왔다. 그러나 종래의 개폐장치에 비하여 대형이 되거나 가격이 비싸다는등 난관때문에 널리 보급되지 못하였고 그 고속성을 살린 제한된 용도에 한정되었다.

작금 반도체 및 그 주변기술의 현저한 진보로 가격, 치수 등 종래의 난관이 타개되고 있는 실정이다. 여기서는 직류전철, 편전소, 전기차량, 체결 및 전기화학 공장등에서 사용되는 DC용 고속도 직류차단기 (HSCB; High Speed Circuit Breaker)를 무접점화한 GTO 차단기에 대하여

첫째로, 기본 구성 및 동작특성을 살펴보고

둘째로, 무접점화, 대전류화에 필요한 GTO 소자의 병렬운전 특성에 대한 제반 고려 사항을 제시한다.

2. DC용 GTO 차단기 시스템 개요

2.1 GTO 차단기 기본구성 및 동작

GTO 차단기는 주접촉자로서 GTO 벨브를, 소호장치로서 산화아연 바리스터(ZnO)로 구성되는 차단기이다. 그림 2-1은 GTO 차단기의 기본구성을 보인 것이다.

그림 2-2는 GTO차단기의 사고전류 발생시 차단동작을 보인것이다.

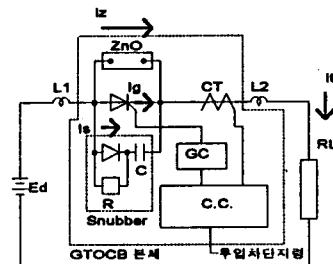


그림 2-1. GTO 차단기 기본구성

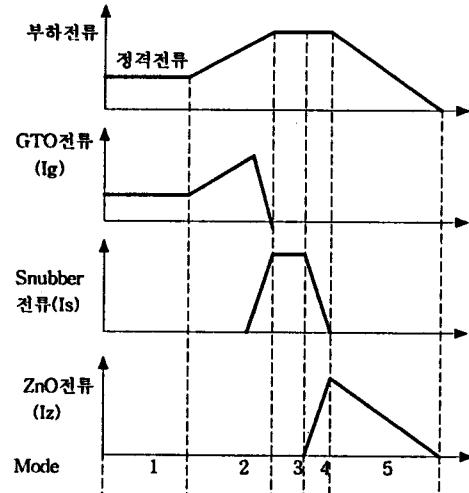


그림 2-2 GTO차단기 사고전류차단 동작

- Mode 1. 폐로, 통전상태.
- Mode 2. 사고전류 검출 차단
- Mode 3. 사고전류의 스누버 회로의 轉流.
- Mode 4. 사고 전류가 스누버 회로로부터 ZnO 쪽으로 轉流
- Mode 5. ZnO 전류의 감쇠

그림 2-3은 GTO 차단기의 동작 특성을 보인것으로, DC CT로 검출된 주회로 전류를 계속 연산하여 전류 절대치 및 di/dt 가 차단 영역에 들어오면 차단지령을 내린다.

설정에따라 자유로운 선택 특성을 갖게 할 수가 있다.

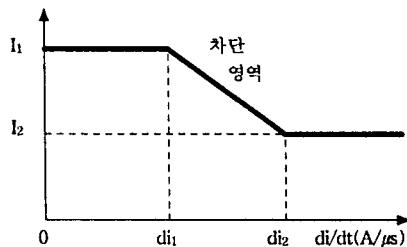


그림 2-3 차단기 동작특성

3. GTO 병렬접속 운전

소자 병렬접속은 전류용량에 한계가 있는 소자를 사용하여, 보다 큰 전류용량을 갖도록 하는 것이다. 이상적으로 n 개의 GTO를 사용하여 전류특성, 즉 Turn-off전류, 평균전류, 임계 ON 전류상승률 di/dt 등을 n 배로 증가시키는 것을 목적으로 한다.

일반적으로 다음과 같은 요소가 전류불평형을 갖게 되므로 대응책이 필요하다.

- i) GATE 회로를 포함한 GTO 스위칭 시간의 차이
- ii) GTO 스위칭 손실 차이
- iii) GTO ON 전압의 차이
- iv) 병렬회로내 배선 길이의 차이
- v) 타상과의 상호 인더턴스 차이

3. 1. 병렬 운전 기본 이론

3.1.1 Stationary State

SCR과 마찬가지로 GTO는 부온도 계수 특성을 갖고 있어서 온도가 상승함에따라 더 낮은 ON-state 전압 쪽으로 (V-I) curve가 이동한다.

병렬 운전중인 한 쪽의 GTO에 더 높은 전류가 흐르면 그것의 Junction온도가 올라가고, ON-state 전압이 감소하여 결국 한 쪽으로의 전류 집중 현상이 발생한다. 여기에서 계수 K_p 를 불평형 계수라고 하면

$$K_p = \frac{i_{TMAX} + i_{TMIN}}{2 \cdot i_{TN}}$$

여기서 i_{TN} = 총전류의 1/2 이다. 바람직한 병렬 운전을 위해서는 이 계수는 0.8 이상을 유지해야만 한다.

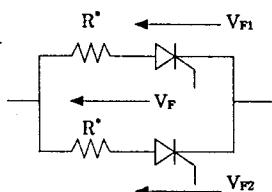


그림 3-1 (a) GTO 병렬 구조

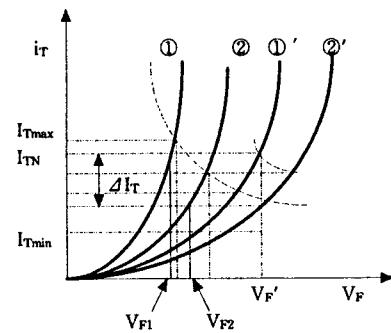


그림 3-1(b) GTO병렬접속 운전시(정상상태) V-I특성오차

전류 불평형을 줄이는 방법은 두가지가 제시되는데

첫째는, 병렬 소자들의 낮은 온도저항 값을 갖게하는 것이다 (동일 Heatsink에 내장)

$$\Delta T_J = R_{th} \cdot J_H \cdot V_F \cdot \Delta i_T$$

둘째는, 각 GTO에 직렬 저항을 사용하는 것이다.

$$V_F' = V_{F1(2)} + R^* \cdot i_{T1(2)}$$

$$\Rightarrow R^* \cdot \Delta i_T = -\Delta V_F$$

$$\text{그리고, } V_F' = (V_{F1} + V_{F2})/2 + R^* \cdot i_{TN} \cdot K_p$$

여기서 K_p 는 요구되는 병렬 계수값이다.

주어진 Δi_T 와 K_p 로 측정된 Curve에서 R^* 를 구할 수 있다.

물론, 저항을 통한 손실도 감수해야 한다.

3.1.2 Commutation

GTO 병렬운전시, 먼저 turn on된 GTO는 Turn off 동작이 늦게 되는 경향이 있다.

이 GTO에는 Turn off 손실의 증가로 병렬운전 불가능 상태를 유발할 수 있다.

양호한 전류 분담을 위하여 각 GTO에 직렬로 reactane 성분(전류 배런사)을 연결한다.

Turn off시의 over shoot Voltage에 대한 배려가 필요하다.

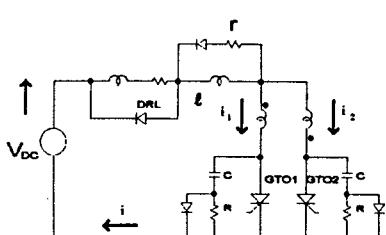


그림 3-2 전류배런사가 사용된 GTO병렬접속 회로

A. Turn On

그림 3-2를 참조로

ℓ : di/dt 억제용 인더턴스

L : self inductance of current balancer

1st STEP

GTO_1 이 GTO_2 보다 Δt_{on} 만큼 Turn on이 빠를 때
 $t < L : \frac{di}{dt} < V_{dc}/2L ; \frac{di}{dt} < V_{dc}(1/4L + 1/4L)$
 $\Rightarrow \Delta i_{12} = V_{dc} \cdot \Delta t_{on}/2L$
 $t > L : \frac{di}{dt} = V_{dc}/(L + L) = \frac{di}{dt}$

2nd STEP

GTO_1, GTO_2 통전중, 그러나 전류 i는 아직 부하전류와 같지 않은 상태 (DRL이 동작중)
 $\cdot \frac{di}{dt} < V_{dc}/L$
 $\cdot \frac{d(i_1 - i_2)}{dt} = -(V_{F1} - V_{F2})/2L$

3rd STEP

정상상태 : $i = \text{const.}$
 $\cdot \frac{d(i_1 - i_2)}{dt} = -(V_{F1} - V_{F2})/2L$

전류 배린사는 Turn-on, 운전중에 포화되지 않도록 한다.
(여기서, 직렬연결 배린스 resistor는 없는것으로 가정하였다.)

B. Turn Off

GTO_2 가 GTO_1 보다 Δt_s 만큼 빨리 off 한다고 가정할 때 ($t_{s2} < t_{s1}$), GTO_1 이 cut off 할 수 있는 전류 크기는 얼마나 산정할 필요가 있다.

$$\Delta i_2 < -i_{20} \cdot (\Delta t_s)^2 / (8 \cdot L \cdot C) ; \Delta i_1 = -\Delta i_2 \\ \Rightarrow i_{IM} = i_{IO} + \Delta i_1$$

여기서 i_{IO}, i_{20} 는 GTO 에 걸리는 초기전류이고, C 는 스누비 캐페시터이다.

스누비 캐페시터는 전류 배린사(L)와 마찬가지로 turn off 동안 불평형 전류를 제한하는 것을 알 수 있다. 실제로, turn off가 turn on 상태보다 훨씬 어렵다. 때때로 일정 전류를 turn off 하기 위하여 제조사에서 권장하는 CAPACITOR 값보다 크게 할 필요가 있다.

큰 L 값의 사용은 GTO에 Overvoltage를 야기할 수 있다.

3.2 GTO 병렬운전 특성 파악

3. 2. 1 Static Characteristics (conduction)

GTO 소자의 특성에 기인한 전류 불평형에 대하여 알아본다.

그림 3-3과 같이 병렬로 연결된 GTO_1, GTO_2 가 동일한 Voltage Drop 값을 가질지라도, 전류값이 다르게 되는 경우가 있다. 이런 순방향 전압 특성의 차이가 크면 풀수록 GTO_1 과 GTO_2 에 흐르는 전류 I_1, I_2 의 겹도 넓어지게 된다.

이런 상황은 다음과 같은 3종류의 현상에 기인한다.

- The Operating Temperature
- The Manufacturing Batches
- The Gating Current

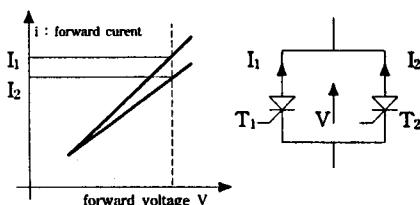


그림 3-3 GTO 순방향 특성

A. Junction Temperature

일반적으로 Junction temperature의 상승은 다음과 같은 결과를 초래한다.

- Threshold 전압의 감소
- Dynamic resistance의 증가

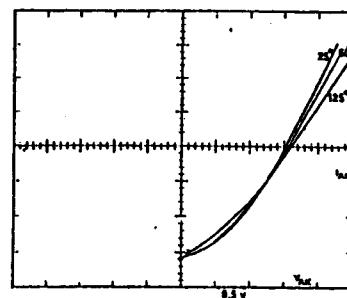


그림 3-4 온도 변화에 따른 순전압 특성

저전류 영역 : Junction 온도가 상승함에 따라 Voltage Drop 감소.

대전류 영역 : Junction 온도가 상승함에 따라 Voltage Drop 증가

병렬운전을 위한 이의 대책으로서 동일 방열판에 탑재하여 동일한 Junction temperature를 유지토록 하여야 한다.

B. Manufacturing Batch

Power 소자 제조기술이 폐 발전되었다고는 하지만, 제조 lot별 특성이 다를수도 있고, 업체마다 특성 관리 기준이 다르기 때문에, 주문시 동일 lot 내의 순전압 특성이 낮고 동일한 것으로 구입 선택 하여야 한다.

C. Gating Current

Gate 전류가 커지면, 순방향 전압 강하가 줄어드는데 이 현상은 낮은 Anode 전류 값에서 현저하다.

병렬운전시 GATE전류가 전류 분담에 미치는 영향은 적지만, 각 GTO Drive unit의 'delay time'을 최소로하고, 각 GTO의 GATE 전류를 일정한 값으로 유지할 수 있어야 한다.

3. 2. 2 Commutation (turn off)

양호한 turn off 동작을 위해서는 모든 소자는 거의 동일한 시간에 turn off 되어야 한다.

가장 늦게 turn off 하는 소자에 High current가 유발되고 심할 경우에는 파손되는 수가 있다.

병렬운전중인 소자의 turn off시 전류 배린상에 영향을 미치는 것은 다음과 같다.

- 운전중인 각 소자가 다른 Anode 전류 값을 보일때
- Gate Drive 임피던스
- Temperature
- 개별 Snubber

A. 운전중인 각 소자가 다른 Anode 전류값을 보일때.

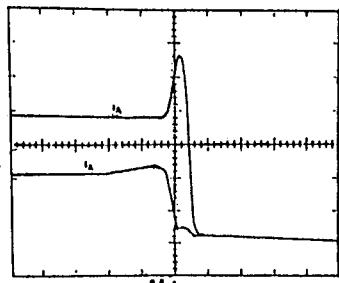


그림 3-5 Anode current (conduction \rightarrow turn off)

낮은 Anode 전류 값을 가진 GTO가 먼저 turn off하고, 높은 Anode 전류 값을 가진 GTO가 높은 overlead 상태에서 늦게 turn off하게 된다.

두 GTO Anode 전류비가 크면 충수록 turn off time delay가 커진다.

Anode 전류가 큰 쪽이 늦게 turn off 하는 이유는 charge된 전하가 크므로 방전하는 데에도 시간이 오래 걸리기 때문이다.

B. Gate Circuit Impedance

turn off 시의 양호한 전류 분담을 위한 Gate Circuit의 영향에 대해서 알아본다.

GTO에 충전된 전하를 빨리 소모시키기 위하여 Gate circuit의 Inductance 성분을 줄이고, 각 Drive Unit의 역 Gate 전류 증가율을 일정하게 유지 시킨다.

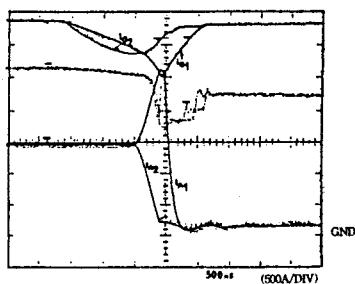


그림 3-6 Inductance 성분이 다를 때 ($L_{g2} < L_{g1}$)

turn off 시킬 때의 과정을 보인 것으로 $L_{g2} < L_{g1}$ 경우이다.

윗쪽 부분의 i_{g1}, i_{g2} 가 역 Gate 전류를 보인 것이고, 아래쪽 부분이 빙렬운전 중인 GTO₁, GTO₂가 turn off 되는 것을 보인 것이다.

충전전하를 소모하기 위한 역 Gate 전류 증가율이 $dig_2/dt > dig_1/dt$ 가 되므로 GTO₂가 먼저 OFF 된 후에 GTO₁이 off 된다.

C. Junction Temperature

일반적으로 운전 중인 GTO의 온도가 올라가면, Charge 된 전하량이 많아지므로 turn off 시간이 길어지게 된다.

그림 3-7은 온도가 다를 때의 turn off 과정을 보인 것으로 온도가 높아짐에 따라, Turn off 부담전류가 크게 되는 것을 알 수 있다.

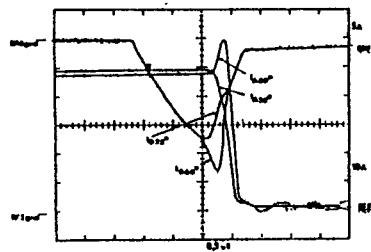


그림 3-7 Junction Temperature가 다를 때의 turn off 과정.

D. 개별 Snubber의 사용

Snubber의 역할은 turn off 시 GTO에 흐르는 전류를 스누버 회로로 轉流시켜서, 회복전압 dv/dt 를 억제하여 GTO를 보호하는데 있다.

더우기, Static-Circuit Breaking type의 application에서 스위치단자에 나타나는 overvoltage를 제한하여야 한다.

GTO 병렬운전의 스누버 적용 시에 일괄 스누버 및 개별 스누버의 사용이 가능하지만 turn off 시의 효율적인 전류 분담을 위해서는 개별 스누버의 사용이 바람직하다.

개별 스누버의 사용이 turn off 되는 current level을 올릴 수 있다.

4. 결 론

차단기를 무접점화 하는데 가장 중요한 역할을 하는 GTO 소자의 특성 파악 및 병렬운전 시 고려되어야 할 세부 문제점 및 해결 방안을 제시하였다. 이 연구 결과를 토대로 대용량 DC GTO 차단기의 개발에 적용이 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] HIROSI FUKUI, PARALLELING OF GATE TURN OFF THYRISTORS IEE Ind. Appl. Soc. Meet. 1982, pp741-746
- [2] 전기철도 지상설비의 POWER ELECTRONICS 용·용장치 후지시보 Vol 61, No.5 1988
- [3] Toshimasa Jinzenji, "Circuit Configuration Interrupting performance of Bi-direction DC thyristor Circuit Breaker", Electrical Engineering in Japan, Vol.PAS-102, No.5, May, 1983
- [4] John G. Kassakian et al, "Principle of Power electronics", Addison Wesley Publishing Company, Inc 1991

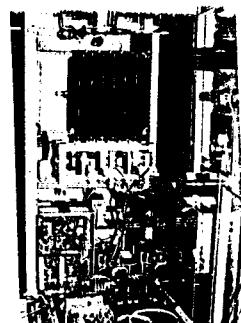


사진 1. GTO 차단기 내부구조