

第 2 章 7：閘流體與 SCR

閘流體（Thyristor）家族是「latching（門鎖式）」開關的代表，本章專門整理。

一、閘流體家族

Thyristor [?][?][?]

- SCR [?] Silicon Controlled Rectifier [?][?][?][?][?][?][?][?]
- TRIAC [?][?][?][?][?][?][?][?]
- DIAC [?][?][?][?][?][?][?][?]
- GTO [?] Gate Turn-Off Thyristor [?][?][?][?][?][?]
- IGCT [?] Integrated Gate-Commutated Thyristor [?]
- PUT [?] Programmable Unijunction Transistor [?]

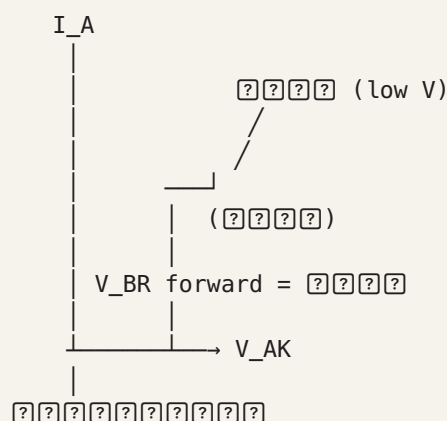
二、SCR 工作原理回顧

4 層 PNP

可分解為「PNP + NPN 互鎖」：

$$\beta_{NPN} \cdot \beta_{PNP} > 1 \Rightarrow \text{門鎖}$$

V-I 特性



動作過程

1. 順向阻塞（OFF）： $V_{AK} > 0$ 但 Gate 無觸發 → 不導通
2. 觸發：Gate 加正電流脈衝（5–50 mA）→ 進入導通

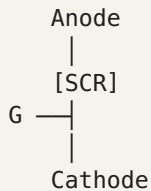
3. 導通 (ON)：A-K 電壓 $\approx 1.5V$ ，可流過大電流
4. 關斷：A-K 電流降到「保持電流」以下（一般 AC 自然過零）

關鍵參數

- V_{DRM} (Repetitive Peak Off-State Voltage)：可重複承受的最大斷態電壓
- $I_T(AV)$ ：平均通態電流
- I_{TSM} ：非重複峰值通態電流（考慮事故）
- I_{GT} ：觸發電流（典型 mA 級）
- V_{GT} ：觸發電壓
- I_H (Holding Current)：維持導通的最低電流
- dV/dt ：靜態 dV/dt 容受度（過大會誤觸發）
- dI/dt ：動態電流上升率上限

三、SCR 觸發方式

1. Gate 觸發（最常用）



Gate 加正脈衝（持續 μs 級）即觸發。

2. Light 觸發 (LASCR / LSC)

光纖傳輸觸發信號，用於高壓 HVDC 站。

3. 過 dV/dt 觸發（不希望！）

雜訊或快速電壓變化可能誤觸發。解方：snubber (RC 阻尼)。

4. 過電壓擊穿觸發

V_{AK} 超過 V_{BR} 強制導通。有破壞性，正常使用不允許。

5. 過溫觸發

漏電流足夠引發 βNPN 。 $\beta NPN > 1$ 。

四、TRIAC（雙向 SCR）

結構

兩個反向並聯的 SCR 整合成一顆元件，5 層複雜結構。

端點命名

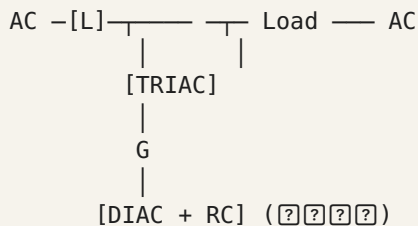
- MT1 / MT2 (Main Terminal 1, 2)：主端子
- G (Gate)：觸發

雙向觸發

四個觸發象限：-I+：MT2 +, G + -I-：MT2 +, G - -III+：MT2 -, G + -III-：MT2 -, G -

不同象限觸發靈敏度不同，「I+ 與 III-」最靈敏。

應用：AC 相位控制



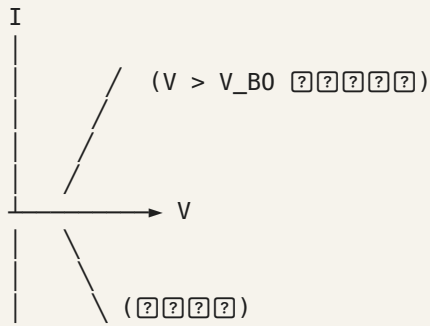
經典型號

- BT136：4A，600V，TO-220
- BTA16：16A，600V/800V
- MAC97A6：0.6A 小型，TO-92

五、DIAC（雙向觸發二極體）

特性

對稱「負電阻」特性：



用途

主要與 TRIAC 搭配做穩定觸發脈衝。RC 充電到 V_{BO} (約 32V) 後 DIAC 導通，提供觸發脈衝。

經典：DB3, DB4

六、GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

特性

可由 Gate 主動關斷的 SCR：- 開：正 Gate 電流 (mA) - 關：大反向 Gate 電流 (達 1/4 主電流！)

缺點

- 關斷需要大反向 Gate 電流 (驅動複雜)
- 切換速度慢 (< 1 kHz)
- 已被 IGBT 大量取代

仍在用的場景

- 大功率 HVDC (kV 級)
- 老的工業驅動系統

七、IGCT (IGCT)

Integrated Gate-Commutated Thyristor

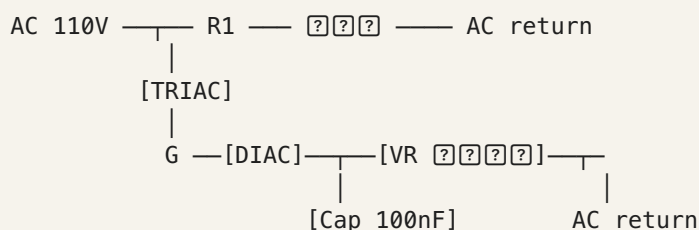
GTO 的改良：把 Gate 驅動電路整合到元件本體，反向電流路徑短，關斷快。

特性

- 大功率（4500V/4000A 級）
- 較 GTO 快
- 用於：HVDC 換流站、大型風機、軌道交通牽引

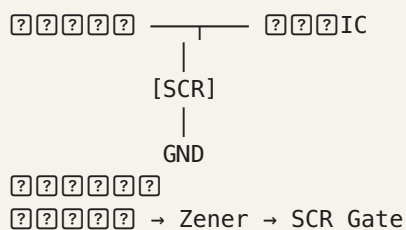
八、SCR 應用範例

例 1：簡易調光器（Light Dimmer）



工作：1. AC 半週開始，C 透過 VR 充電 2. C 電壓達 DIAC 觸發點 → DIAC 導通 → TRIAC 觸發 3. TRIAC 導通直到 AC 過零自動關閉 4. VR 大 → 充電慢 → 觸發角延遲 → 燈暗 5. VR 小 → 充電快 → 觸發角早 → 燈亮

例 2：過壓保護（Crowbar）



當電源異常升高超過 Zener 電壓 → Zener 擊穿 → 電流流入 SCR Gate → SCR 觸發 → 短路電源 → 保險絲熔斷 → 下游 IC 安全。

例 3：軟啟動（Soft Start）

馬達啟動瞬間需要避免大電流：

用 SCR 控制觸發角從 180°（無功率）漸漸調到 0°（全功率），數秒內平滑啟動。

例 4：固態繼電器（SSR）

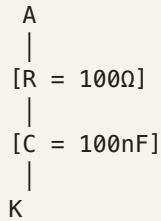
內部結構：- 隔離（光耦）- 過零檢測 - TRIAC 觸發

從 DC 控制信號 → 觸發 TRIAC → 控制 AC 負載。

九、SCR 設計注意事項

1. dV/dt 保護

快速電壓上升會誤觸發。標準 snubber：



2. dI/dt 限制

啟動瞬間電流上升太快，僅元件局部導通，造成局部過熱燒毀。解方：串聯小電感限制 dI/dt 。

3. 散熱

$V_T(on) \approx 1.5V$ ， $I_T = 10A \rightarrow P = 15W$ ，必須散熱。

4. RFI / EMI

相位控制會產生大量諧波與 EMI： - 加 EMI 濾波器（線圈 + X/Y 電容） - 過零觸發優於相位觸發（高 EMI）

5. 反並聯飛輪二極體（電感負載）

電感負載需要二極體續流，否則 SCR 關斷時電壓尖峰可能擊穿。

十、SCR vs 其他元件選擇

應用	推薦
AC 相位控制 (< kW)	TRIAC
大功率 AC 開關	反並聯 SCR 對
DC 鎖存 (過壓保護)	SCR
高速 DC 切換	MOSFET / IGBT
中等功率 AC 馬達控制	TRIAC 或 SSR
大型工業驅動	IGBT 或 IGCT
HVDC 輸電	IGCT 或 SiC IGBT
焊接機	SCR (大電流、低頻)

十一、本章總結

✔ 您應該理解：

- [x] SCR 的 4 層 PNP 結構與門鎖機制
- [x] SCR 的觸發方式
- [x] 關鍵參數： V_{DRM} , I_T , I_{GT} , I_H , dV/dt
- [x] TRIAC 雙向特性與四象限觸發
- [x] DIAC 用於穩定觸發
- [x] GTO/IGCT 可關斷的閘流體
- [x] 常見應用：相位控制、過壓保護、SSR
- [x] 設計時的 dV/dt 、 dI/dt 保護

自我檢測

1. SCR 觸發後如何關閉？
2. TRIAC 與兩顆反並聯 SCR 有什麼差別？
3. dV/dt 過大為什麼會誤觸發 SCR？
4. SCR 用於 DC 開關有什麼挑戰？
5. 為什麼相位控制會產生 EMI？

解答

1. 必須讓 A-K 電流降到 I_H 以下 (AC 自然過零, DC 需強制斷流)
 2. TRIAC 是單一封裝 (成本低、體積小), 但靈敏度不對稱; 雙 SCR 反並聯可獨立觸發、控制更精確
 3. SCR 內部有寄生電容, dV/dt 大時 $i = C \cdot dV/dt$ 流入 Gate 區域, 可能達到觸發電流
 4. DC 不會自然過零, 需強制換流 (commutation circuit) 才能關閉, 複雜
 5. 觸發瞬間電壓不連續變化, 產生豐富諧波, 傳導與輻射 EMI 嚴重
-

下一章

08-???.md — LED、光電二極體、太陽能電池。