

Доктор технических наук GAO ZHANCHENG

Advantages of High-Power Thyristors in Locomotive Rectifier Cabinets Replacing Series/Parallel Small-Power Thyristors with Fully Crimped High- Power Thyristors

Preface

Thyristors (also known as Silicon-Controlled Rectifiers, SCRs) are critical components in locomotive rectifier cabinets, particularly in traditional electric locomotives and modern diesel-electric traction systems. Early electric locomotives, lacking high-power thyristors, utilized series/parallel connections of small- and medium-power thyristors to meet system requirements. However, this approach imposed stringent demands on thyristor parameters, resulted in bulky systems, and reduced reliability. With technological advancements, replacing series/parallel small-power thyristors with fully crimped high-power thyristors offers significant advantages in retrofitting locomotive rectifier cabinets.

I. Historical Overview of Thyristor Development

1957: General Electric (GE) successfully developed the first thyristor, marking the entry of power electronics into the era of controlled rectification. Early thyristors were primarily used to replace bulky mechanical switches and inefficient vacuum tubes, offering high-power control capabilities.

1960s: The concept of fast thyristors emerged, with research focusing on improving switching speeds and reducing losses to accommodate high-frequency applications.

1970s: Reverse Conducting Thyristors (RCTs) were developed to simplify circuit design and reduce system costs by integrating reverse-conducting diodes. Thyristors also began to be applied in large-scale power systems such as High-Voltage Direct Current (HVDC) transmission.

1980s: Innovations in gate drive technology, including optocouplers and integrated driver circuits, improved response speed and stability. Derivatives such as bidirectional thyristors (TRIACs) expanded alternating current (AC) control capabilities.

1990s: Thyristor technology entered a phase of high-frequency operation and modular design, expanding into renewable energy applications (e.g., wind turbine inverters) and electric vehicle (EV) charging systems.

Post-2000: The introduction of digital drive technology and intelligent control algorithms, combined with wide-bandgap materials like silicon carbide (SiC), significantly enhanced voltage/temperature tolerance and switching efficiency, enabling

support for more complex power electronic systems.

Application Expansion: Thyristors have become core components in smart grids, high-speed rail traction converters, and industrial frequency converters. They continue to evolve toward ultra-high voltage (e.g., >10 kV) and miniaturization (e.g., chip-scale packaging), complementing IGBTs and MOSFETs in cost-sensitive, high-reliability systems such as renewable energy integration and energy storage.

The evolution of thyristors, from early single-function devices to key components in power electronic systems, has consistently focused on efficiency improvements, integration, and adaptability to diverse scenarios. Future advancements in materials and intelligent control will further solidify their irreplaceability in high-power applications.

II. Physical Model, Internal Structure, and Circuit Symbols of Thyristors

1. Physical Model (Fig. 1):

- a) Thyristor schematic symbol,
- b) Semiconductor structure,
- c) Equivalent circuit.

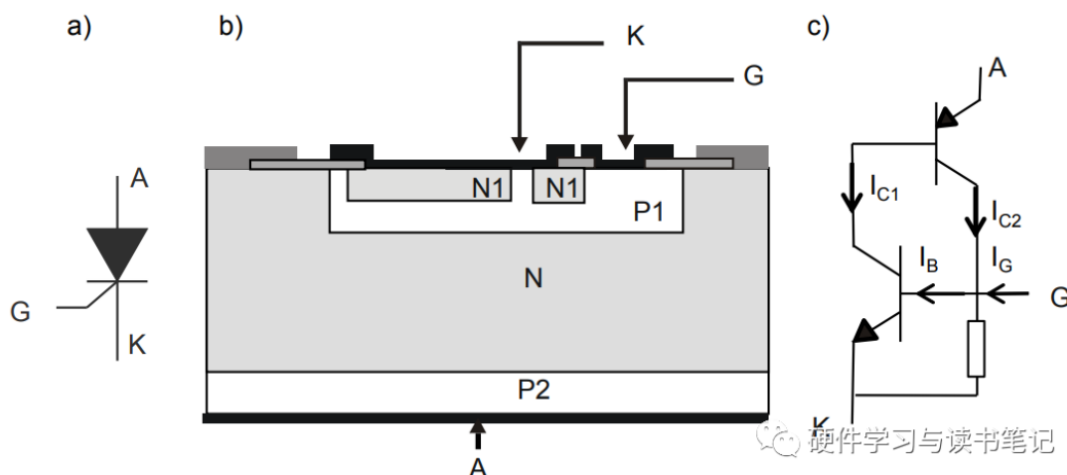


Figure 1 Physical model of a thyristor

A thyristor comprises four semiconductor layers (P-N-P-N) forming three PN junctions. In the blocking state, regardless of forward or reverse bias, at least one PN junction remains reverse-biased. Unlike diodes, thyristors are controllable; unlike transistors, their anode current does not scale proportionally with gate current. Conduction is triggered when the gate current reaches a threshold (typically tens of milliamperes). Once latched, the thyristor remains conducting (carrying currents from tens to thousands of amperes) until the anode current drops below a holding value or a reverse voltage is applied.

2. Internal Structure and Circuit Symbols (Fig. 2):

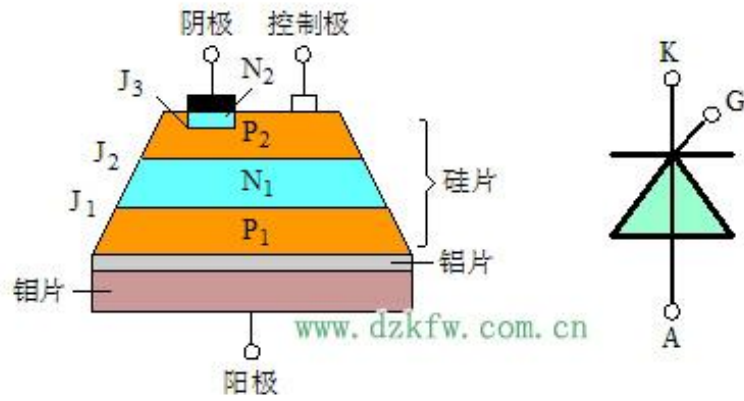


Figure 2 Internal structure and circuit symbols of a thyristor

3. Cross-Sectional Views of Alloy-Type and Fully Crimped Thyristor Packaging

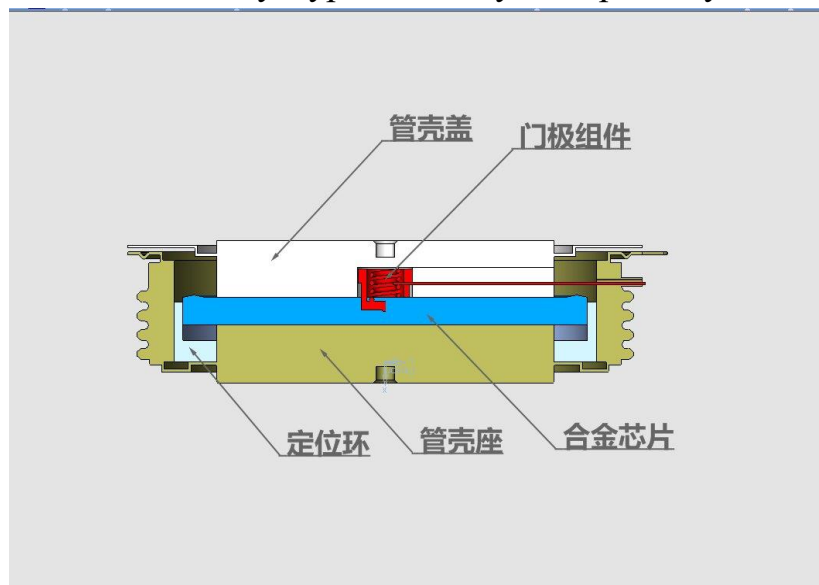


Figure 3 Cross-sectional view of alloy-type thyristor packaging

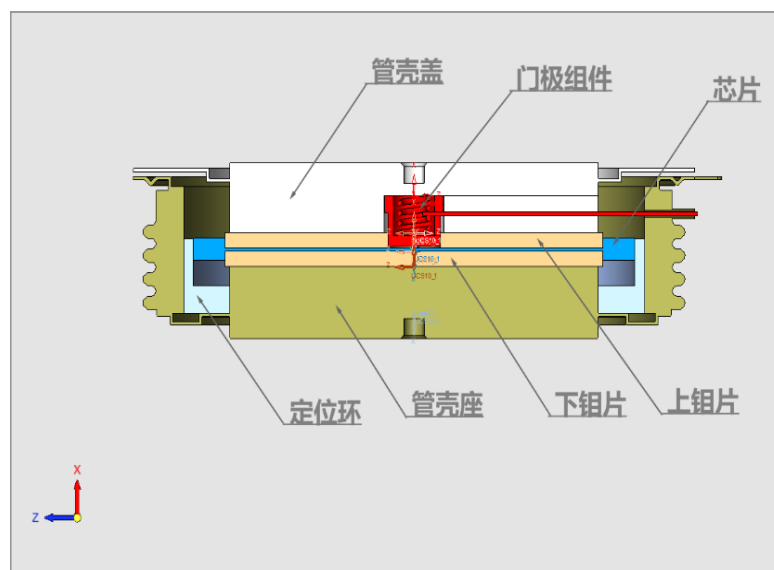


Figure 4 Cross-sectional view of fully crimped thyristor packaging

III. Specific Applications and Roles of Thyristors in Locomotive Rectifier Cabinets

1. Primary Functions of Thyristors in Locomotive Rectifier Cabinets

Thyristors are semiconductor power devices capable of controlled conduction under high voltage and current conditions. In locomotive rectifier cabinets, thyristors are primarily used for AC-to-DC conversion (rectification) and precise DC output control.

1.1 Rectification: A three-phase bridge rectifier circuit composed of thyristors converts alternating current (AC) from the locomotive's main generator into direct current (DC) for traction motors.

1.2 Voltage Regulation: By adjusting the thyristor firing angle (phase control), the DC output voltage can be modulated to control traction motor speed and locomotive velocity.

2. Application Scenarios for Thyristor Rectifier Cabinets

Thyristor rectifier cabinets are widely used in:

2.1 DC Traction Electric Locomotives: Examples include early Chinese models such as the SS3B and SS4 series, which utilize thyristor rectifier cabinets as primary conversion devices.

2.2 DC Traction Diesel-Electric Locomotives: Some diesel-electric locomotives employ diesel generator sets to supply power, with thyristor rectifier cabinets providing DC power to traction motors.

2.3 Transitional AC Traction Locomotives: Early AC traction locomotives used thyristor rectifier cabinets as intermediate stages before mature main inverter technology became available.

3. Technical Characteristics of Thyristor Rectifier Cabinets

3.1 High Power Handling: Thyristors withstand high voltages and currents, making them suitable for high-power locomotive applications.

3.2 Controllability: Output voltage can be flexibly adjusted via firing angle control to meet varying operational demands.

3.3 Reliability: Simple structure and long service life ensure stable operation in harsh environments.

3.4 High Cooling Requirements: Thyristors generate significant heat during operation, necessitating efficient cooling systems (e.g., forced air or water cooling).

4. Advantages and Disadvantages of Thyristor Rectifier Cabinets

Advantages:

4.1 Relatively simple structure and low cost.

4.2 Flexible control enabling smooth voltage regulation.

4.3 Mature technology with easy maintenance.

Disadvantages:

4.4 Relatively low efficiency and high energy losses.

4.5 Potential harmonic pollution to the grid, requiring additional filtering.

4.6 Unsuitable for high-frequency switching, limiting use in modern high-performance AC traction systems.

5. Modern Developments and Replacement Trends

With advancements in power electronics—particularly the emergence of Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) and Gate Turn-Off Thyristors (GTOs)—traditional thyristor rectifier cabinets are gradually being superseded by advanced converter technologies.

Modern AC traction electric locomotives predominantly employ IGBT-based Pulse Width Modulation (PWM) inverters, which offer higher efficiency and superior dynamic performance.

Nevertheless, thyristor rectifier cabinets remain relevant for retrofitting older locomotives or specific applications.

6. Case Studies

Examples from China's early SS-series electric locomotives:

6.1 SS3B Locomotive: Utilizes a three-phase fully controlled bridge rectifier circuit, where thyristors rectify AC from the traction transformer to drive DC traction motors.

6.2 SS4 Locomotive: Features optimized thyristor rectifier cabinet designs for improved reliability and efficiency.

In summary, thyristors played a pivotal role in the evolution of electric locomotive traction systems. While modern technologies have largely replaced their dominance, their contributions to locomotive traction development remain irreplaceable.

IV. Technical Requirements for Series-Connected Thyristors in Locomotive Rectifier Cabinets

1. Voltage Balancing

1.1 Issue: Manufacturing variations in static blocking characteristics (e.g., reverse leakage current, forward recovery charge) can cause uneven voltage distribution among series-connected thyristors.

Solutions:

1.1.1 Voltage-balancing resistors: Parallel resistors across each thyristor to equalize static voltage distribution.

1.1.2 RC snubbers: Parallel resistor-capacitor networks to suppress dynamic voltage imbalances (e.g., surge voltages or excessive dv/dt).

1.1.3 Zener diode protection: Parallel Zener diodes to clamp maximum voltage.

2. Trigger Synchronization

2.1 Issue: Trigger sensitivity differences may cause staggered turn-on of series-connected thyristors, leading to voltage imbalance.

Solutions:

2.1.1 High-quality gate driver circuits ensure simultaneous trigger pulse delivery.

2.1.2 Balancing inductors or capacitors in the trigger circuit compensate for delays.

3. Thermal Design

3.1 Issue: Harsher operating conditions for series-connected thyristors require uniform thermal management.

Solutions:

Implement efficient cooling systems (e.g., forced air/water cooling) to ensure uniform temperature distribution.

V. Technical Requirements for Parallel-Connected Thyristors in Locomotive Rectifier Cabinets

1. Current Sharing

1.1 Issue: Forward voltage-current characteristic mismatches may cause uneven current distribution among parallel-connected thyristors, leading to overloading.

Solutions:

1.1.1 Current-balancing inductors: Small inductors in series with each thyristor's anode circuit.

1.1.2 Current-balancing resistors: Resistors in series with each thyristor's anode circuit.

1.1.3 Device matching: Select thyristors with closely matched characteristics.

2. Trigger Synchronization

2.1 Issue: Non-simultaneous triggering may cause early-triggered thyristors to carry excessive current.

Solutions:

2.1.1 Precision gate drivers ensure synchronized trigger pulses.

2.1.2 Balancing capacitors in the trigger circuit compensate for delays.

3. Thermal Design

3.1 Issue: Higher total power dissipation in parallel configurations demands effective thermal management.

Solutions:

3.1.1 High-efficiency heat sinks or cooling systems.

3.1.2 Regular inspection of heat sink contact surfaces to minimize thermal resistance.

VI. Comprehensive Considerations for Series/Parallel Thyristors in Rectifier Cabinets

1. Device Selection:

1.1 Prioritize thyristors from the same manufacturer and batch for parameter consistency.

1.2 Ensure voltage/current ratings include sufficient margins to avoid operating near limits.

2. Protection Measures:

2.1 Overvoltage protection: Add RC snubbers in series configurations.

2.2 Overcurrent protection: Install fast-acting fuses or current sensors in parallel configurations.

2.3 Short-circuit protection: Implement rapid protection devices in the main circuit.

3. Installation and Maintenance:

3.1 Ensure environmental compliance (temperature, humidity, vibration).

3.2 Regularly inspect thyristor conditions and replace aged/damaged devices.

VII. Case Study: Replacing Series/Parallel Small-Power Thyristors with Fully Crimped High-Power Thyristors

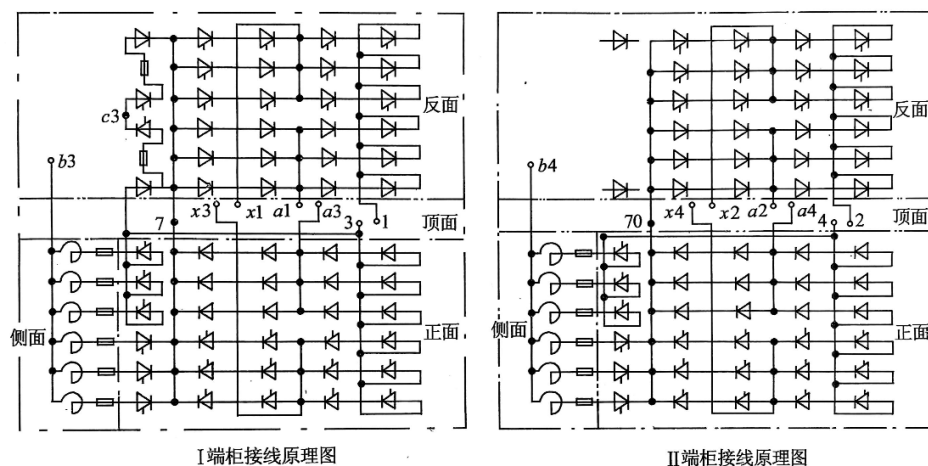


图 4-68 整流柜接线原理图

Figure 5 Circuit diagram of SS3B Locomotive's Cabinet I & II



Figure 6 Physical photo of SS3B rectifier cabinet

1. Original Design of SS3B Locomotive Rectifier Cabinets:

- Cabinet I: 32 thyristors (KP600A/2800V) + 26 diodes (ZP800A/3000V).
- Cabinet II: 30 thyristors + 24 diodes.
- Total: 112 semiconductor devices (62 thyristors + 50 diodes), 800 kg per cabinet.



Figure 7 Retrofitted thyristors and diodes with heat sinks

2. Retrofitted Design with Fully Crimped High-Power Thyristors:

- Cabinet I: 12 thyristors (KP3600A/3000V) + 8 diodes (ZP4600A/3000V).
- Cabinet II: 10 thyristors + 8 diodes.
- Total: 38 semiconductor devices (22 thyristors + 16 diodes), 380 kg per cabinet.



Figure 8 Retrofitted thyristors and diodes with heat sinks

VIII. Summary

Series/parallel thyristor configurations impose high technical demands, requiring careful attention to voltage/current balancing, trigger synchronization, and thermal management. Proper circuit design and protection strategies ensure stable operation under high-voltage/high-current conditions.

Replacing series/parallel small-power thyristors with fully crimped high-power thyristors in locomotive rectifier cabinets—demonstrated in the SS3B retrofit—offers the following advantages:

1. Enhanced Reliability: Eliminates voltage/current balancing issues and reduces failure points.
2. Simplified Design: Fewer components, no auxiliary circuits (e.g., snubbers).
3. Higher Efficiency: Reduced losses from balancing elements.
4. Space and Cost Savings: Compact footprint, lower maintenance, and production costs.
5. Improved Dynamics: Faster switching and consistent parameters.
6. Retrofit-Friendly: Ideal for modernizing legacy systems.

Conclusion

The adoption of fully crimped high-power thyristors in lieu of series/parallel small-power thyristors delivers transformative benefits in reliability, efficiency, space utilization, and cost-effectiveness. This approach is particularly advantageous for retrofitting aging locomotive rectifier cabinets, as exemplified by the SS3B case. With ongoing advancements in power electronics, high-power thyristors remain indispensable in high-voltage, high-current applications.

在机车整流柜用全压接大功率晶闸管替代小功率晶闸管串并联的优势

前言：晶闸管（也叫可控硅，SCR）在机车整流柜中的应用是非常重要的，尤其是在传统电力机车和一些现代内燃机车的电传动系统中，然而早期的电力机车，因为没有大功率晶闸管，采用了中小功率晶闸管串并联来满足要求，对晶闸管参数要求及其严苛，体积大，可靠性低，随着科技的发展，用全压接大功率晶闸管替代中小功率晶闸管，减少串并联、改造电力机车整流柜具有非常明显的优势。

一、简单回顾晶闸管发展历史

- **1957年**：美国通用电气（General Electric）成功开发出第一只晶闸管，标志着可控整流时代的到来
- **1960年代**：提出快速晶闸管（Fast Thyristor）的概念，重点在于提高开关速度和降低损耗，适应高频应用
- **1970年代**：为满足工业自动化需求，研发逆导晶闸管（RCT），集成反向导电二极管以简化电路设计、降低成本；晶闸管开始应用于高压直流输电（HVDC）等大型系统
- **1980年代**：驱动技术革新（采用光耦合器和集成驱动电路），提升响应速度与稳定性，发展出双向晶闸管（TRIAC），扩展交流控制能力
- **1990年代**：进入高频化与模块化阶段，应用领域扩展到可再生能源（风力发电逆变器）、电动汽车充电系统等
- **2000年后**：引入数字驱动技术与智能控制算法，结合宽禁带材料（如SiC），显著提升耐压、耐温及开关效率，支持更复杂的电力电子系统
- **应用拓展**：晶闸管在智能电网、高速铁路牵引变流器、工业变频器等场景中成为核心元件，并向超高压（如10kV以上）和微型化（如芯片级封装）方向发展，与IGBT、MOSFET等器件互补，在新能源并网和储能系统中发挥低成本、高可靠性的优势
- **总结**：晶闸管技术演进始终围绕效率提升、集成化及多场景适应性展开，未来材料创新与智能控制将进一步推动其在高功率领域的不可替代性

二、晶闸管的物理模型、内部结构示意图及电路符号

- 1. 物理模型（如图 1）
- • a) 晶闸管元件符号
- • b) 半导体结构
- • c) 等效电路

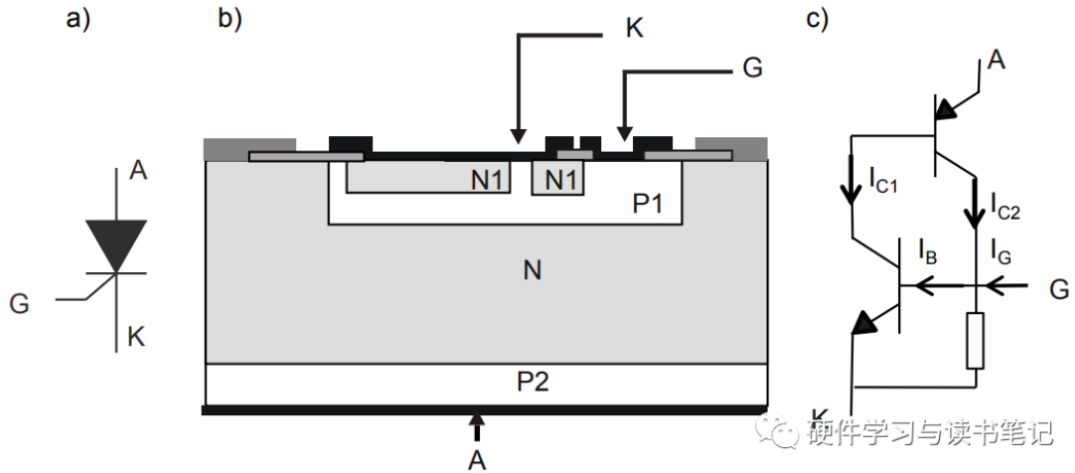


图 1：晶闸管的物理模型

- 说明：晶闸管由四层、三个 PN 结组成；在阻断状态下，无论正向还是反向加电压，至少有一个 PN 结处于反偏；与二极管和三极管比较，晶闸管具有可控性和独特的导通特性，一旦导通后除非降低阳极电流或施加反向电压，否则保持导通状态

- 2. 晶闸管的内部结构示意图及电路符号

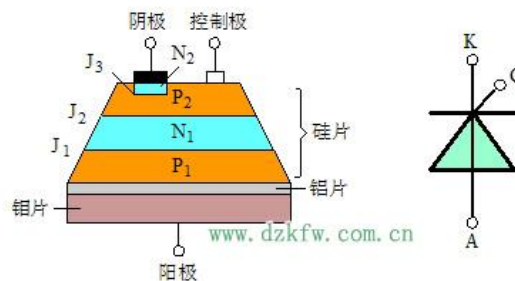


图 2：晶闸管的内部结构示意图及电路符号

- 3. 封装结构剖面图

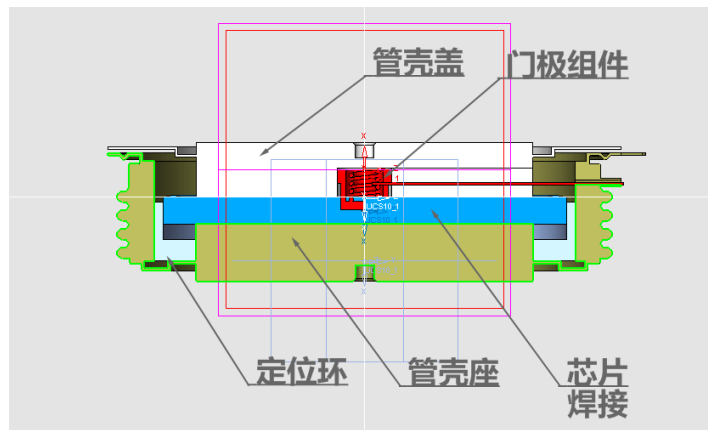


图 3：合金芯片晶闸管封装结构剖面图

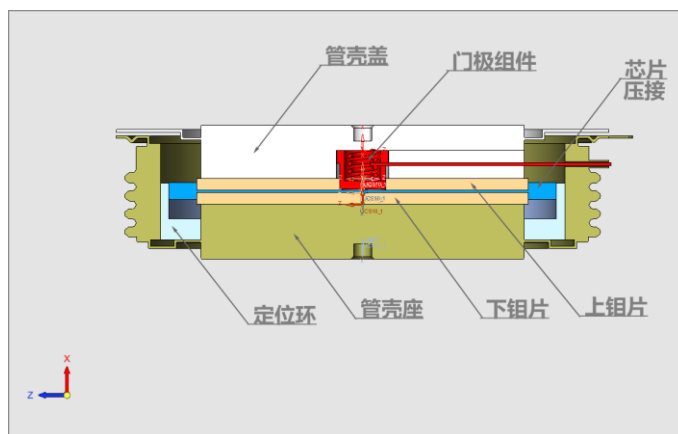


图 4：全压接芯片晶闸管封装结构剖面图

三、晶闸管在机车整流柜中的具体应用情况及作用

- 1. 晶闸管在机车整流柜中的主要功能
 - 晶闸管作为半导体功率器件，主要用于：
 - 1.1 整流功能：通过三相桥式整流电路将机车主发电机输出的交流电转换为直流电，供牵引电动机使用
 - 1.2 调压功能：通过调节触发角（相位控制）改变输出直流电压，实现对牵引电动机转速和机车运行速度的控制
- 2. 晶闸管整流柜的应用场景
 - 2.1 直流传动电力机车：例如国产韶山系列（如 SS3B、SS4 等），采用晶闸管整流柜作为主变流装置
 - 2.2 直流传动内燃机车：部分内燃机车使用柴油发电机组供电，晶闸管整流柜为牵引电动机提供直流电源
 - 2.3 过渡型交流传动机车：在主逆变器技术不成熟时，仍采用晶闸管整流柜作为中间环节
- 3. 晶闸管整流柜的技术特点
 - 3.1 高功率处理能力：能承受高电压和大电流
 - 3.2 可控性：通过调节触发脉冲相位，灵活调整输出电压
 - 3.3 可靠性：结构简单、使用寿命长，适应恶劣环境
 - 3.4 散热要求高：工作中产生大量热量，需配备高效冷却系统（如强迫风冷或水冷）
- 4. 晶闸管整流柜的优缺点
 - 优点：
 - 4.1 结构相对简单，成本较低
 - 4.2 控制灵活，实现平滑电压调节
 - 4.3 技术成熟，维修方便
 - 缺点：
 - 4.4 效率较低，能量损耗大
 - 4.5 可能产生谐波污染，需要额外滤波装置
 - 4.6 不适用于高频开关场合，限制了在现代高性能交流传动系统中的应用

- 5. 现代发展与替代趋势
 - 随着 IGBT、GTO 等新型功率器件的出现，传统晶闸管整流柜逐步被先进变流技术取代
 - 现代交流传动电力机车多采用基于 IGBT 模块的 PWM 逆变器，实现更高效率与更好动态性能
 - 在老旧机车改造或特定应用中，晶闸管整流柜仍发挥重要作用
- 6. 实际案例
 - 6.1 SS3B 型机车：采用三相桥式全控整流电路，通过晶闸管将牵引变压器输出的交流电整流为直流电，驱动直流牵引电动机
 - 6.2 韶山 4 型机车：优化了晶闸管整流柜设计，提高可靠性与效率
 - 总结：晶闸管在机车整流柜中的应用虽逐渐被新技术取代，但在电传动技术发展中具有不可替代的作用

四、在机车整流柜中的应用晶闸管串联技术要求

- 1. 均压问题
 - 1.1 问题描述：制造工艺差异导致各晶闸管静态阻断特性（反向漏电流、正向恢复电荷等）不一致，串联时电压分布不均
 - 解决方案：
 - 1.1.1 均压电阻：每个晶闸管两端并联均压电阻，平衡静态电压分配
 - 1.1.2 RC 缓冲电路：并联由电阻和电容组成的 RC 网络，抑制动态电压不平衡（如浪涌电压或 dv/dt 过快）
 - 1.1.3 稳压二极管保护：并联稳压二极管，限制最高电压
- 2. 触发一致性
 - 2.1 问题描述：触发灵敏度不同可能导致串联晶闸管部分先导通，造成电压分布不均
 - 解决方案：
 - 2.1.1 使用高质量触发驱动电路，确保所有晶闸管同时接收触发脉冲
 - 2.1.2 在触发回路中加入均衡电抗器或电容，补偿触发延迟
- 3. 散热设计
 - 3.1 问题描述：串联晶闸管工作条件苛刻，需确保良好散热
 - 解决方案：采用高效冷却系统（如强迫风冷或水冷），确保各晶闸管温度分布均匀

五、在机车整流柜中的应用晶闸管并联技术要求

- 1. 均流问题
 - 1.1 问题描述：晶闸管正向伏安特性差异导致并联时电流分配不均，可能出现过载
 - 解决方案：
 - 1.1.1 均流电抗器：在每个晶闸管阳极回路中串联小电感，平衡动态电流
 - 1.1.2 均流电阻：在每个晶闸管阳极回路中串联均流电阻，平衡静态电流
 - 1.1.3 匹配选型：选择伏安特性尽可能一致的晶闸管
- 2. 触发一致性
 - 2.1 问题描述：并联晶闸管需要同时导通，否则先导通者会承担大部分电流，导致过载
 - 解决方案：

- 2.1.1 使用精密触发驱动电路，确保所有晶闸管同时接收触发脉冲
- 2.1.2 在触发回路中加入均衡电容，补偿触发延迟
- 3. 散热设计
 - 3.1 问题描述：并联晶闸管整体功耗较高，需确保散热性能
 - 3.2 解决方案：采用高效散热器或冷却系统，确保各晶闸管温升控制在允许范围
 - 3.3 附加措施：定期检查散热器接触面，防止因热阻过大而影响散热效果

六、整流柜中晶闸管串并联综合注意事项

- 1. 器件选型
 - 1.1 优先选择同一厂家、同一批次的晶闸管，确保参数一致性
 - 1.2 考虑晶闸管额定电压与电流裕量，避免工作点接近极限
- 2. 保护措施
 - 2.1 过压保护：在串联电路中增加过压吸收电路（如 RC 缓冲电路）
 - 2.2 过流保护：在并联电路中增加快速熔断器或过流检测装置
 - 2.3 短路保护：在主电路中设置快速保护装置，防止短路对晶闸管造成损害
- 3. 安装与维护
 - 3.1 确保安装环境符合要求（温度、湿度、振动等）
 - 3.2 定期检查晶闸管运行状态，及时更换老化或损坏器件

七、用全压接大功率晶闸管替代小功率晶闸管串并联的案例

- 1. 案例展示

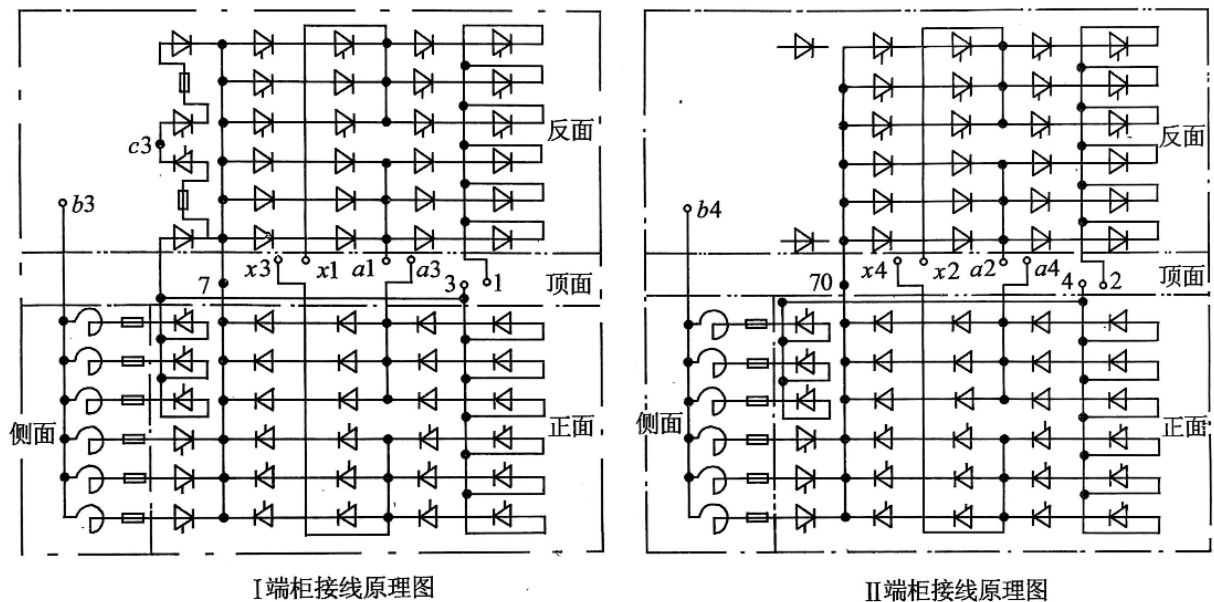


图 4-68 整流柜接线原理图

图 5: SS3B 电力机车 I 号和 II 号整流柜电路原理图



图 6: SS3B 电力机车整流柜实物照片

• 2. 改造前情况

- I号柜: 晶闸管 32 只, 整流管 26 只
- II号柜: 晶闸管 30 只, 整流管 24 支
- 总计: 晶闸管 62 只, 整流管 50 只, 共 112 只, 每柜重 800 公斤
- 产品型号:
 - 晶闸管型号: KP600A/2800V
 - 整流管型号: ZP800A/3000V



图 7: 改造前各元件加散热器的外形图

- 3. 改造后情况（用全压接大功率晶闸管替代）
 - I号柜：晶闸管 12 只，整流管 8 只
 - II号柜：晶闸管 10 只，整流管 8 支
 - 总计：晶闸管 22 只，整流管 16 只，共 38 只，每柜重 380 公斤
 - 产品型号：
 - 晶闸管型号：KP3600A/3000V
 - 整流管型号：ZP4600A/3000V



图 8：改造后各元件加散热器的外形图

八、总结

- 概述晶闸管串联和并联技术要求较高，必须充分考虑均压、均流、触发一致性问题
- 通过合理的电路设计和保护策略，可确保晶闸管在高电压、大电流条件下稳定运行
- 用全压接高压大电流晶闸管替代小功率晶闸管串并联结构是优化设计的常见思路
- 具体优势包括：
 - **提高可靠性**：减少均压/均流问题，降低故障风险
 - **简化电路设计**：减少外部补偿元件及触发控制复杂性
 - **提高效率**：降低损耗、优化散热设计
 - **节省空间**：减少器件数量，简化机械结构
 - **降低成本**：减少外围元件和维护成本，提高生产效率
 - **改善动态性能**：响应速度更快，参数一致性更好
 - **适用于老旧机车改造**：是老旧机车整流柜现代化升级的最佳选择

Преимущества замены маломощных тиристорov, соединённых последовательно и параллельно, на полностью обжатые высокомошностные тиристоры в выпрямительных шкафах локомотивов

Аннотация: Применение тиристорov (также известных как кремниевые управляемые выпрямители, SCR) в силовых шкафах локомотивов имеет особое значение, особенно в традиционных электровозах и некоторых современных дизель-электрических локомотивах. Ранние электровозы, из-за отсутствия мощных тиристорov, использовали маломощные и среднемощные тиристоры, соединенные последовательно и параллельно, чтобы удовлетворить требования. Этот подход накладывал строгие требования к параметрам тиристорov, что приводило к большим объемам и низкой надежности. С развитием технологий замена маломощных и среднемощных тиристорov на мощные тиристоры с полным давлением для уменьшения последовательных и параллельных соединений и модернизации силовых шкафов локомотивов предлагает значительные преимущества.

1. Краткая история развития тиристорov

1957: General Electric (GE) успешно разработала первый тиристорный продукт, что ознаменовало вступление силовой электроники в эру управляемого выпрямления. Ранние тиристоры в основном использовались для замены громоздких механических переключателей и неэффективных вакуумных ламп, предлагая возможности управления высокой мощностью.

1960-е годы: Была введена концепция быстрых тиристорov, с исследованиями, сосредоточенными на улучшении скорости переключения и снижении потерь для адаптации к высокочастотным приложениям.

1970-е годы: Для удовлетворения потребностей промышленной автоматизации были разработаны тиристоры с обратной проводимостью (RCT), интегрирующие диоды с обратной проводимостью для упрощения конструкции схем и снижения системных затрат. Тиристоры также начали использоваться в крупномасштабных энергетических системах, таких как высоковольтная передача постоянного тока (HVDC).

1980-е годы: Инновации в технологии управления, такие как оптопары и интегрированные схемы управления, улучшили скорость реакции и стабильность. Производные устройства, такие как двунаправленные тиристоры (TRIAC), расширили возможности управления переменным током.

1990-е годы: Технология тиристорov вошла в фазу высокочастотного и модульного развития, расширяясь на новые рынки, такие как возобновляемая энергетика (например, инверторы для ветровой энергии) и системы зарядки электромобилей.

После 2000 года: Внедрение цифровых технологий управления и интеллектуальных алгоритмов управления, в сочетании с материалами с широкой запрещенной зоной, такими как карбид кремния (SiC), значительно улучшило устойчивость к напряжению, температурную устойчивость и эффективность переключения, поддерживая более сложные силовые электронные системы.

Расширение применения: Тиристоры стали ключевыми компонентами в интеллектуальных сетях, тяговых преобразователях для высокоскоростных поездов и промышленных частотных преобразователях. Они также развивались в направлении сверхвысокого напряжения (например, выше 10 кВ) и миниатюризации (например, корпуса на уровне чипов).

Дополняя устройства, такие как IGBT и MOSFET, тиристоры продолжают предлагать экономически эффективные и надежные решения в интеграции возобновляемой энергии в сеть и системах хранения энергии.

От ранних устройств с одной функцией до ключевых компонентов в силовых электронных системах, технология тиристоров развивалась вокруг повышения эффективности, интеграции и адаптации к множеству сценариев. Будущие инновации в материалах и интеллектуальное управление еще больше укрепят их незаменимость в высокомоощных приложениях.

2. Физическая модель, внутренняя структура и условные обозначения тиристоров

1. Физическая модель (Рисунок 1):

а) Условное обозначение тиристора, б) Полупроводниковая структура, с) Эквивалентная схема.

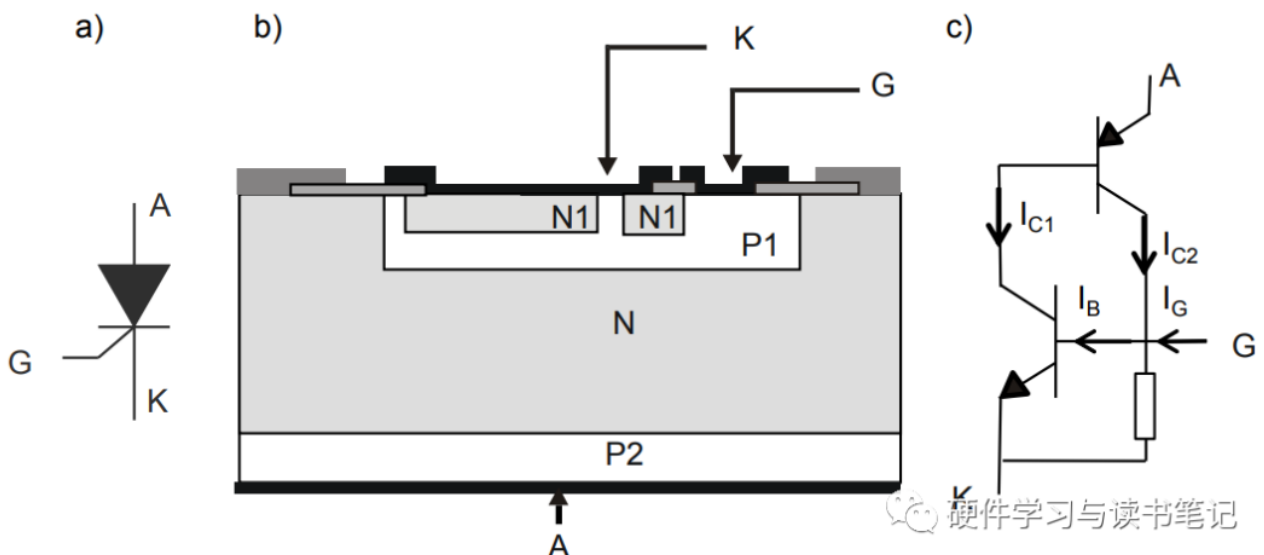


Рисунок 1: Физическая модель тиристора

Тиристор состоит из четырех слоев и трех PN-переходов. P-легированный анодный слой находится внизу, за ним следует N-базовая область, P-базовая область и N+ катодный слой. В блокирующем состоянии, независимо от того,

приложено ли прямое или обратное напряжение, PN-переход остается обратносмещенным. Тиристоры являются симметричными блокирующими устройствами. По сравнению с диодами, они предлагают управляемость; по сравнению с транзисторами, они не демонстрируют пропорционального увеличения анодного тока с увеличением тока управления. Только когда ток управления достигает определенного порога (обычно десятки миллиампер), анод-катод переходит из блокирующего состояния в проводящее. После начала проводимости тиристор может выдерживать токи от десятков до тысяч ампер, и управляющий электрод, как правило, теряет контроль, поддерживая состояние проводимости. Чтобы выключить его, анодный ток должен быть уменьшен ниже определенного уровня или приложено обратное напряжение. После выключения способность к управлению восстанавливается.

2. Внутренняя структура и условные обозначения:

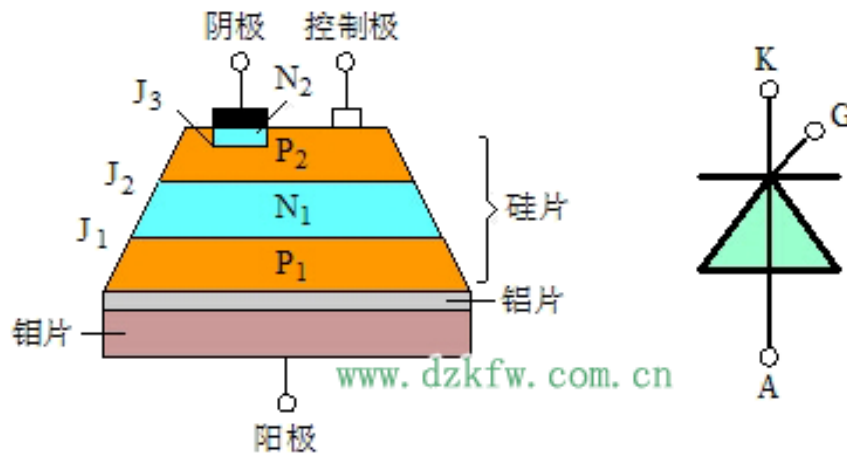


Рисунок 2: Внутренняя структура и условные обозначения тиристора

3. Поперечное сечение структуры корпуса тиристора с полным давлением:

3. Конкретные применения и роли тиристорov в силовых шкафах локомотивов

1. Основные функции тиристорov в силовых шкафах локомотивов:

Тиристоры являются полупроводниковыми силовыми устройствами с управляемой проводимостью, способными работать при высоком напряжении и большом токе. В силовых шкафах локомотивов тиристоры в основном используются для преобразования переменного тока в постоянный (выпрямление) или для точного управления выходным постоянным током.

1.1 Функция выпрямления: Через трехфазную мостовую схему выпрямления, состоящую из тиристорov, переменный ток, генерируемый главным генератором локомотива, преобразуется в постоянный для использования тяговыми двигателями.

1.2 Функция регулирования напряжения: Путем регулирования угла включения тиристора (фазовое управление) можно изменять выходное постоянное

напряжение, что позволяет управлять скоростью тяговых двигателей и движением локомотива.

2. Сценарии применения тиристорных силовых шкафов:

Тиристорные силовые шкафы широко используются в следующих типах локомотивов:

2.1 Электровозы с постоянным током: Например, ранние отечественные электровозы серии Шаосань (например, SS3B, SS4), которые используют тиристорные силовые шкафы в качестве основных преобразовательных устройств.

2.2 Дизель-электрические локомотивы с постоянным током: Некоторые дизельные локомотивы используют дизельные генераторные установки для подачи питания, а тиристорные силовые шкафы обеспечивают постоянный ток для тяговых двигателей.

2.3 Переходные локомотивы с переменным током: Некоторые ранние локомотивы с переменным током, до полного развития технологии главных инверторов, все еще использовали тиристорные силовые шкафы в качестве промежуточных этапов.

3. Технические характеристики тиристорных силовых шкафов:

3.1 Высокая мощность обработки: Тиристоры могут выдерживать высокие напряжения и большие токи, что подходит для передачи высокой мощности в локомотивах.

3.2 Управляемость: Путем регулирования угла включения импульсов управления можно гибко регулировать выходное напряжение для удовлетворения различных условий эксплуатации.

3.3 Надежность: Тиристоры имеют простую конструкцию, длительный срок службы и могут стабильно работать в суровых условиях.

3.4 Высокие требования к охлаждению: Из-за значительного выделения тепла во время работы силовые шкафы обычно оснащены эффективными системами охлаждения (например, принудительное воздушное или водяное охлаждение).

4. Преимущества и недостатки тиристорных силовых шкафов:

Преимущества:

4.1 Относительно простая конструкция и низкая стоимость.

4.2 Гибкое управление, позволяющее плавно регулировать напряжение.

4.3 Зрелая технология, простота обслуживания.

Недостатки:

4.4 Относительно низкая эффективность, значительные потери энергии.

4.5 Возможное гармоническое загрязнение сети, требующее дополнительных фильтрующих устройств.

4.6 Не подходят для высокочастотных переключающих приложений, что ограничивает их использование в современных высокопроизводительных системах с переменным током.

5. Современное развитие и тенденции замены:

С развитием силовой электроники, особенно с появлением новых силовых устройств, таких как IGBT (биполярные транзисторы с изолированным затвором) и GTO (тиристоры с управляемым выключением), традиционные тиристорные силовые шкафы постепенно заменяются более передовыми технологиями преобразования.

В современных электровозах с переменным током главные преобразователи обычно используют IGBT-модули в инверторах с широтно-импульсной модуляцией (PWM), предлагая более высокую эффективность и лучшую динамическую производительность.

Однако тиристорные силовые шкафы все еще играют важную роль в модернизации старых локомотивов или в определенных сценариях применения.

6. Практические примеры:

В качестве примеров можно привести ранние отечественные электровозы серии Шаосань:

6.1 Локомотив SS3B: Использует трехфазную полностью управляемую мостовую схему выпрямления, применяя тиристоры для выпрямления переменного тока от тягового трансформатора в постоянный, приводя в действие тяговые двигатели постоянного тока.

6.2 Локомотив SS4: Дальнейшая оптимизация конструкции тиристорного силового шкафа, повышение надежности и эффективности.

В заключении, применение тиристоров в силовых шкафах локомотивов представляет собой важный этап в развитии электровозов. Хотя современные технологии постепенно заменяют их доминирующую позицию, тиристоры сыграли незаменимую роль в эволюции технологии электрической тяги локомотивов.

4. Технические требования для последовательного соединения тиристоров в силовых шкафах локомотивов

1. Проблемы распределения напряжения:

1.1 Проблема: Из-за производственных вариаций статические блокирующие характеристики (обратный ток утечки, заряд восстановления и т.д.) каждого тиристора могут отличаться, что приводит к неравномерному распределению напряжения при последовательном соединении.

Решения:

1.1.1 Резисторы для выравнивания напряжения: Параллельные резисторы для выравнивания напряжения на каждом тиристоре для балансировки статического распределения напряжения.

1.1.2 RC-снабберные цепи: Параллельные RC-цепи (резистор и конденсатор) на каждом тиристоре для подавления динамического дисбаланса напряжения (например, скачки напряжения или чрезмерное dv/dt).

1.1.3 Защита стабилитронами: В некоторых случаях стабилитроны могут быть подключены параллельно тиристорам для ограничения максимального напряжения.

2. Согласованность включения:

2.1 Проблема: Последовательно соединенные тиристоры должны включаться одновременно, но различия в чувствительности включения могут привести к тому, что некоторые тиристоры включатся раньше, вызывая неравномерное распределение напряжения.

Решения:

2.1.1 Высококачественные схемы управления включением: Обеспечивают одновременное получение импульсов включения всеми тиристорами.

2.1.2 Балансировочные индуктивности или конденсаторы: Добавление балансировочных индуктивностей или конденсаторов в цепь включения для компенсации задержек включения.

3. Тепловой расчет:

3.1 Проблема: Последовательно соединенные тиристоры могут работать в более жестких условиях, требуя эффективного управления теплом.

Решения:

Использование эффективных систем охлаждения (например, принудительное воздушное или водяное охлаждение) для обеспечения равномерного распределения температуры на каждом тиристоре.

5. Технические требования для параллельного соединения тиристоров в силовых шкафах локомотивов

1. Проблемы распределения тока:

1.1 Проблема: Из-за различий в вольт-амперных характеристиках параллельно соединенные тиристоры могут испытывать неравномерное распределение тока, что приводит к перегрузке некоторых тиристоров. Решения:

1.1.1 Индуктивности для выравнивания тока: Последовательные индуктивности (индуктивности для выравнивания тока) в анодной цепи каждого тиристора для балансировки динамического распределения тока.

1.1.2 Резисторы для выравнивания тока: Последовательные резисторы в анодной цепи каждого тиристора для балансировки статического распределения тока.

1.1.3 Подбор по параметрам: Выбор тиристоров с максимально схожими вольт-амперными характеристиками для параллельного соединения.

2. Согласованность включения:

2.1 Проблема: Параллельно соединенные тиристоры должны включаться одновременно; в противном случае первый включившийся тиристор будет нести большую часть тока, что приведет к перегрузке.

Решения:

2.1.1 Прецизионные схемы управления включением: Обеспечивают одновременное получение импульсов включения всеми тиристорами.

2.1.2 Балансировочные конденсаторы: Добавление балансировочных конденсаторов в цепь включения для компенсации задержек включения.

3. Тепловой расчет:

3.1 Проблема: Параллельно соединенные тиристоры имеют более высокие общие потери мощности, требуя эффективного управления теплом.

Решения:

Использование эффективных радиаторов или систем охлаждения для обеспечения того, чтобы повышение температуры каждого тиристора оставалось в допустимых пределах.

3.2 Регулярная проверка: Регулярная проверка контактных поверхностей радиаторов для избежания чрезмерного теплового сопротивления.

6. Комплексные соображения для последовательного и параллельного соединения тиристоров в силовых шкафах

1. Выбор устройств:

1.1 Предпочтение тиристорам от одного производителя и партии для обеспечения согласованности параметров.

1.2 Учет номинального напряжения и тока тиристоров с достаточным запасом, чтобы избежать работы на пределе.

2. Меры защиты:

2.1 Защита от перенапряжения: Добавление цепей поглощения перенапряжения (например, RC-снабберных цепей) в последовательных цепях.

2.2 Защита от перегрузки по току: Добавление быстродействующих предохранителей или устройств обнаружения перегрузки по току в параллельных цепях.

2.3 Защита от короткого замыкания: Установка быстродействующих защитных устройств в главной цепи для предотвращения повреждения тиристоров от короткого замыкания.

3. Установка и обслуживание:

3.1 Обеспечение соответствия условий установки требованиям (например, температура, влажность, вибрация).

3.2 Регулярная проверка рабочих условий тиристоров и своевременная замена старых или поврежденных устройств.

7. Пример: Замена маломощных тиристоров, соединенных последовательно и параллельно, на мощные тиристоры с полным давлением.

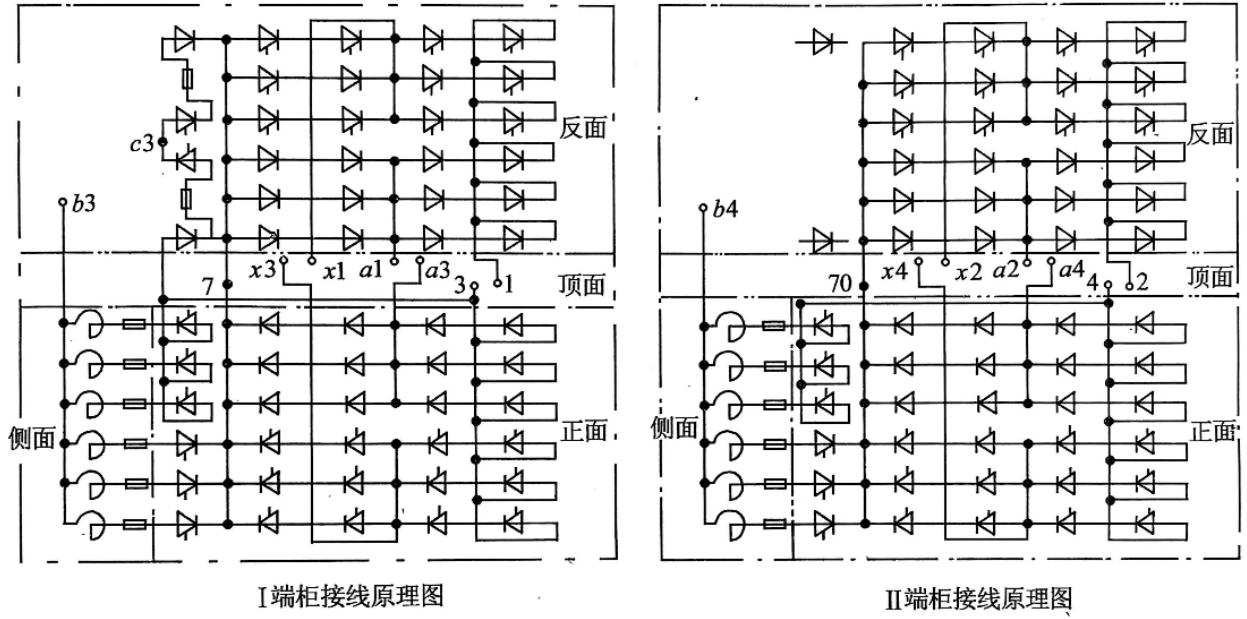


图 4-68 整流柜接线原理图

Рисунок 3: Схема силовых шкафов № I и № II в электровозе SS3B.



Рисунок 4: Фотография силового шкафа электровоза SS3B.

3. Количество и модели тиристоров и выпрямителей, используемых в силовых шкафах до модернизации:

- Шкаф № I: 32 тиристора, 26 выпрямителей.
- Шкаф № II: 30 тиристоров, 24 выпрямителя.
- Общее количество полупроводниковых компонентов: 62 тиристора, 50 выпрямителей, всего 112 компонентов. Каждый шкаф весил 800 кг.
- Модель тиристора: КР600А/2800V
- Модель выпрямителя: ZP800А/3000V



Рисунок 5: Общий чертеж электронных компонентов и радиатора в сборе

4. После замены маломощных тиристоров, соединенных последовательно и параллельно, на мощные тиристоры с полным давлением:

- Шкаф № I: 12 тиристоров, 8 выпрямителей.
- Шкаф № II: 10 тиристоров, 8 выпрямителей.
- Общее количество полупроводниковых компонентов: 22 тиристора, 16 выпрямителей, всего 38 компонентов. Каждый шкаф весил 380 кг.
- Модель тиристора: КР3600А/3000V
- Модель выпрямителя: ZP4600А/3000V



Рисунок 6: Общий чертеж электронных компонентов и радиатора в сборе

5. Резюме:

Технические требования для последовательного и параллельного соединения тиристоры высоки, что требует тщательного рассмотрения вопросов распределения напряжения, тока и согласованности включения, а также соответствующих решений. Благодаря разумной конструкции схем и стратегиям защиты тиристоры могут стабильно и надежно работать при высоком напряжении и большом токе.

Замена маломощных тиристоры, соединенных последовательно и параллельно, на мощные тиристоры с полным давлением в силовых шкафах локомотивов является распространенным подходом к оптимизации конструкции, успешно примененным в модернизации SS3B. Конкретные преимущества и выгоды заключаются в следующем:

1. Повышенная надежность:

1.1 Уменьшение проблем распределения напряжения/тока: Маломощные тиристоры, соединенные последовательно и параллельно, требуют решений для распределения напряжения и тока, что может привести к перегрузке или повреждению. Мощные тиристоры могут выдерживать требуемое напряжение и ток с одним устройством, избегая этих сложностей.

1.2 Снижение риска отказов: В последовательных и параллельных конфигурациях отказ любого тиристора может повлиять на всю цепь. Мощные тиристоры уменьшают количество устройств, тем самым снижая вероятность отказа.

2. Упрощенная конструкция схемы:

2.1 Меньше внешних компонентов: Маломощные тиристоры, соединенные последовательно и параллельно, часто требуют дополнительных компонентов, таких как резисторы для выравнивания напряжения, индуктивности для выравнивания тока и RC-снабберные цепи, что увеличивает сложность схемы. Мощные тиристоры могут использоваться напрямую без дополнительных компенсирующих компонентов.

2.2 Упрощенное управление включением: Мощные тиристоры требуют только одного сигнала включения, тогда как последовательные и параллельные конфигурации требуют точной синхронизации нескольких сигналов включения, что усложняет конструкцию.

3. Повышенная эффективность:

3.1 Снижение потерь: Резисторы для выравнивания напряжения и индуктивности для выравнивания тока в последовательных и параллельных конфигурациях генерируют дополнительные потери мощности. Мощные тиристоры устраняют эти дополнительные компоненты, повышая общую эффективность.

3.2 Оптимизированное управление теплом: Мощные тиристоры концентрируют плотность мощности, облегчая проектирование эффективных систем охлаждения. В то время как несколько маломощных тиристоров в последовательных и параллельных конфигурациях сложнее управлять теплом.

4. Экономия места:

4.1 Меньше компонентов: Мощные тиристоры заменяют несколько маломощных тиристоров, значительно уменьшая количество компонентов и экономя место для установки.

4.2 Упрощенная механическая конструкция: Последовательные и параллельные конфигурации требуют сложных соединений и креплений, тогда как мощные тиристоры упрощают механическую конструкцию.

5. Снижение затрат:

Хотя мощные тиристоры могут иметь более высокую стоимость за единицу, их общие системные преимущества очевидны:

5.1 Снижение затрат на периферийные компоненты: Нет необходимости в резисторах для выравнивания напряжения, индуктивностях для выравнивания тока или других дополнительных компонентах.

5.2 Снижение затрат на обслуживание: Меньше компонентов означает снижение усилий по обслуживанию и более низкие долгосрочные эксплуатационные затраты.

5.3 Повышение эффективности производства: Упрощенные процессы проектирования и сборки могут ускорить производственные циклы.

6. Улучшенная динамическая производительность:

6.1 Более высокая скорость реакции: Мощные тиристоры обычно предлагают лучшие динамические характеристики (например, скорость переключения и устойчивость к dv/dt), адаптируясь к более сложным условиям эксплуатации.

6.2 Согласованность параметров: Согласованность параметров одного мощного тиристора превосходит согласованность нескольких маломощных тиристоров, соединенных вместе, улучшая динамическую производительность системы.

7. Лучше подходит для модернизации старых силовых шкафов локомотивов:

С развитием силовой электроники процессы производства мощных тиристоров постоянно улучшаются, что позволяет им удовлетворять большинство требований высокого напряжения и большого тока. В силовых шкафах локомотивов мощные тиристоры могут достигать более высокой плотности мощности и надежности.

Заключение:

Замена маломощных тиристоров, соединенных последовательно и параллельно, на мощные тиристоры с полным давлением предлагает значительные преимущества в надежности, эффективности, затратах и экономии места, что делает их лучшим выбором для модернизации старых силовых шкафов локомотивов.