

[输电系统]

高压直流输电系统中的换流阀技术

文/马林

山东山大电力技术股份有限公司

高压直流输电系统作为现代电力系统的重要组成部分，在长距离大功率电力传输中具有显著优势。换流阀技术是该系统的核心，其稳定性和效率直接影响系统性能。基于对高压直流输电系统的构成原理、换流阀工作特性及换流阀技术的深入研究，详细分析了晶闸管光控转换技术、换流阀冷却技术及电极结垢抑制技术。

高压直流输电系统在跨区域电力输送、能源远距离调配中起着关键作用。换流阀作为高压直流输电系统的核心部件，负责交流电与直流电的高效转换。其技术水平直接决定系统的输电能力、能量损耗及稳定性。随着现代电力需求的不断提升，对换流阀技术的研究不断深入，其中晶闸管光控转换技术、换流阀冷却技术及电极结垢抑制技术的优化成为提升系统性能的关键^[1]。

高压直流输电系统构成原理

如图1所示为高压直流（HVDC）输电系统整体框架，该系统主要由两个交流（AC）系统、换流器、HVDC电缆/架空线路（OHL）及电极组成，系统中各组件的协同作用构成了高效的电力传输链路。在实际应用中，HVDC输电系统采用的是双极配置，电流由高压直流电缆在两个交流电系统之间

传输，换流器负责将交流电转换为直流电并在另一端进行逆变^[2]。在交流系统1和交流系统2之间，两个换流站各自由一系列晶闸管构成换流阀。电极部分主要处理系统的电压平衡及接地，电极处的电压通常保持在 $\pm 500 \text{ kV} \sim \pm 800 \text{ kV}$ ，以保证系统高效稳定运行。

换流阀工作特性研究

图2所示为换流阀结构。换流阀在高压直流输电系统中负责将交流电（AC）转换为直流电（DC），并由精确控制整流和逆变过程实现电能的高效传输。图2中，三相交流源分别标记为 $\beta_a, \beta_b, \beta_c$ ，由电感 L_c 限制短路电流的冲击，并保证换流阀在导通期间电流的平滑变化。换流阀核心组件是晶闸管（ $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ ），它们触发脉冲的相位角调整来整流。在整流阶段，电流 i_a, i_b, i_c 分别通过对应的晶闸管进入系统，形成 $i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6$ 的电流路径。触发顺序的调整可以控制不同晶闸管的导通时间，从而实现交流电向直流电的转换^[3]。换流阀的工作频率和直流电流 I_d 的大小与系统的设计密切相关。系统的直流电压 U_d 可达到数百千伏，换流阀的设计电流则可高达数千安培。此处，典型的工作电压范围为 $\pm 500 \text{ kV}$ ，换流阀具备强大的耐压能力和快速响应的特性，可以应对电力系统的动态变化。

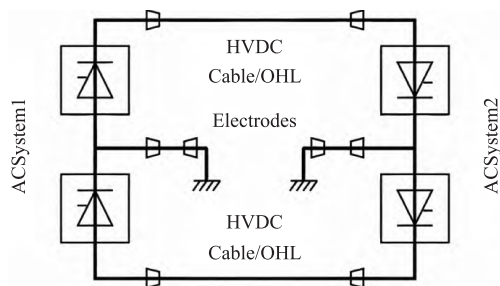


图1 高压直流输电系统整体框架

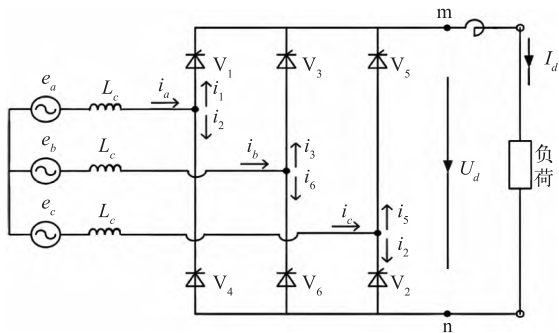


图2 换流阀结构

实际运行中，换流阀的工作特性还涉及电流波形的优化和损耗的减少。合理设计触发角度和控制系统可以减少换流阀在导通与关断过程中的能量损耗，提升系统效率^[4]。换流阀能量损耗公式为

$$P_{\text{loss}} = I_d V_d (1 - \cos \alpha) + R I_d^2 \quad (1)$$

式中， P_{loss} 为换流阀的能量损耗功率，W； I_d 为换流阀中的直流电流，A； V_d 为直流侧的电压，V； α 为换流阀的触发角，控制晶闸管的导通时刻，rad； R 为换流阀中晶闸管的等效电阻， Ω ； $\cos \alpha$ 为触发角影响换流阀的导通时间，直接影响能量损耗。

换流阀总谐波失真 (THD) 优化公式为

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (2)$$

式中，THD为换流阀产生的总谐波失真，总量值为无量纲； I_n 为第 n 次谐波的电流分量，A； I_1 为基频（50 Hz）的电流分量，A； n 为谐波次数，是谐波频率和基频频率的倍数。

合理设计换流阀的触发角和控制算法，可以减

少高次谐波成分，从而降低总谐波失真（THD），优化电流波形，提升系统的传输效率。

高压直流输电系统中的换流阀技术研究

1. 晶闸管光控转换技术

图3所示是晶闸管光控转换技术原理图。晶闸管光控技术（Light Triggered Thyristor, LTT）是一种由光信号触发晶闸管导通的技术，在高压直流输电系统中能够有效提升换流阀的响应速度与控制准确度^[5]。晶闸管的导通由光信号控制，利用光纤传输实现高压电力系统的隔离与安全性。该结构由高压侧输入（220 V），经过整流与稳压电路（VD₂、VD₄、VD₆等）进行交流到直流的转换，形成稳定的低压直流供电。在具体的晶闸管触发模块中，关键元件是光敏二极管（VD₁₃、VD₁₄）及晶闸管（VT₁₃、VT₁₅）等。光信号由光敏二极管进行接收，随后触发晶闸管导通来实现交流电的整流。

控制系统中，电阻（ $R_1=1.2 \text{ k}\Omega$ ）和电容（ $C_2=200 \text{ }\mu\text{F}$ ，+25 V）提供稳定的信号处理与滤波功能，以确保光信号传输的稳定性和换流阀的触发灵敏度。在实际应用中，触发电压控制在50 V，触发电流为10 mA，这样能够在高压环境下保持稳定的响应能力。晶闸管光控技术具有高抗干扰性，适合于复杂的电力输送环境。在大规模高压直流输电系统中，光控晶闸管技术采用无接触式的触发方式，来减少传统触发方式中的电气干扰，提高系统的整体效率和安全性。

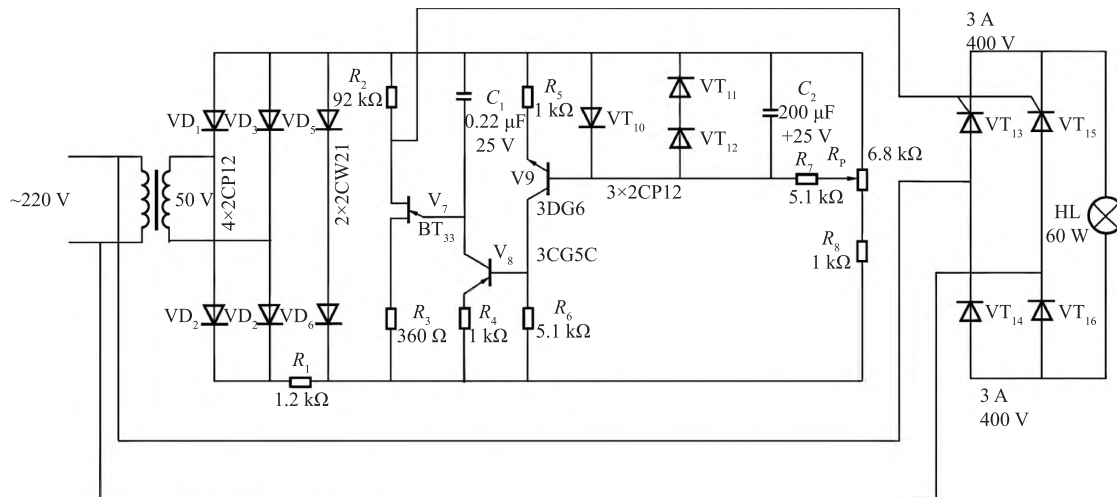


图3 晶闸管光控转换技术原理

2. 换流阀冷却技术

换流阀冷却系统的主要功能是维持换流阀组件的温度稳定，防止过热导致的设备损坏，确保系统的高效运行^[6]。图4为换流阀冷却系统一次回路图。换流阀冷却系统中，冷却由冷却塔和热交换器实现温度调节。首先，冷却水在冷却塔中初步降温，流经蝶阀后进入系统。图4中的压差表用于监测冷却水在系统中的流动阻力，确保流量维持在设定范围内。冷却水进入过滤器进行初步净化，去除杂质后由传感器测量水温 and 水量，进而输送到水处理机以保持冷却水的纯净度和导电性。

该系统中，热交换器的传热过程能够将换流阀工作时产生的热量转移到冷却水中。为防止系统过热，冷却水的温度通常维持在25~30℃之间，而流

量则根据系统需求调整，流量传感器会实时监控水流来保证供水充足。高压直流输电系统的换流阀采用电导率传感器实时检测水的电导率水平，确保不会因为水质问题而影响冷却效果。冷却水的电导率需要低于10 μs/cm来避免因水中离子浓度过高造成电气设备的漏电问题。

整个冷却系统还设有多个球阀、隔离阀和检验阀，来控制水流的路径和检修时的隔离操作。泵机组则是冷却水循环的动力核心，其额定功率在5~10 kW之间来保证冷却水的稳定供应。在实际工程应用中，冷却系统由PLC（可编程逻辑控制器）进行全自动化控制，来保证换流阀在不同工况下的温度保持在安全范围内。

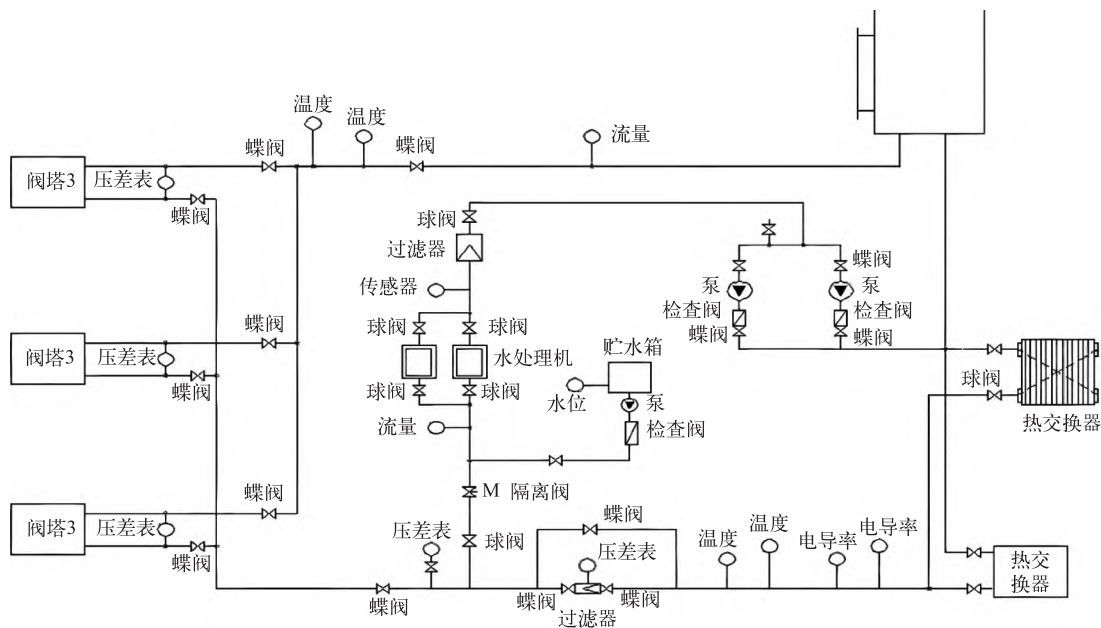


图4 换流阀冷却系统一次回路图

3. 电极结垢抑制技术

(1) 电极结垢规律分析

在高压直流输电系统中，电极主要承担着能量传输与电场均匀分布的任务。然而在长期运行过程中，电极表面会出现不同程度的结垢现象。电极分为阴极侧电极、T型三通处电极、S型处电极以及阳极侧电极。阴极侧电极的结垢现象是由局部阴极反应引起的，具体表现为氢气析出过程中，由于电解质中的离子浓度变化，阴极表面逐渐形成碳酸盐或硫酸盐沉积层。这类沉积层的厚度会随时间推移逐

渐增加，从而导致电极电阻增大，电场分布不均，进而影响换流阀的正常工作。实际工程中这类结垢层的厚度在0.1~0.5 mm之间；T型三通处电极和S型处电极则由于所处结构复杂，流体速度在这些位置往往较低，导致局部流体中离子浓度的累积，从而加剧了电化学反应的发生。这些部位结垢物质主要为氧化物和金属氢氧化物，且结垢的速率与流体的电导率、温度密切相关；阳极侧电极的结垢现象多为氧化反应造成的金属氧化物层，该层较为坚硬且难以清除，对电极的导电性能造成明显影响。

随着结垢增加，阳极电流密度升高，电极表面温度就会超出安全范围，进一步引发局部热失控和电极损坏。

(2) 低电导率微酸性冲刷抑制技术

低电导率微酸性冲刷抑制技术是一种由调节冷却液电导率及酸碱度（pH值）来降低电极结垢速率的方法。为验证低电导率微酸性冲刷抑制技术的有效性，本研究设计无操作（对照组）与低电导率微酸性冲刷（实验组）的对比实验。实验持续30天。

首先，在实验组选择纯净水作为冷却液的基础

溶液，利用高准确度电导率控制设备将冷却液的电导率调整到小于 $10\text{ }\mu\text{S/cm}$ ，以确保冷却液中的离子浓度保持较低水平。接着，加入适量酸性缓冲剂（磷酸盐缓冲液），使冷却液的pH值控制在6.7左右，并且将温度控制在 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ 之间。最后，在高压直流输电系统中，采用此冷却液循环对换流阀的电极进行冲刷。冷却液由水泵（额定流量 50 L/min ）持续流经电极表面，液流速度保持在 $2.5\sim 3.0\text{ m/s}$ 之间。实验结果见表1。

表1 实验结果

电极结垢厚度/mm	第1天	第5天	第10天	第15天	第20天	第25天	第30天
无操作组	0.02	0.06	0.11	0.18	0.25	0.31	0.37
微酸性冲刷组	0.02	0.04	0.06	0.09	0.12	0.14	0.16

从实验数据可以看出，在无操作组中，电极结垢厚度逐渐增加，30天内结垢厚度从 0.02 mm 增长至 0.37 mm ；而在低电导率微酸性冲刷组中，电极结垢增长显著减少，30天后仅增长到 0.16 mm 。证明采用低电导率的冷却液能够有效减少导电性杂质的沉积，而微酸性（ $\text{pH}=6.5\sim 6.9$ ）的水流可溶解部分沉积物，从而起到抑制结垢的作用。

结束语

综上所述，换流阀技术作为高压直流输电系统中的核心部分，已成为提升系统运行效率、降低能量损耗的重点研究方向。通过本文对晶闸管光控转换技术、换流阀冷却技术及电极结垢抑制技术的分析与实验验证，低电导率微酸性冲刷技术在电极结垢抑制中的应用取得了显著效果。**EA**

（收稿日期：2024-10-15）

参考文献：

[1] 蓝元良，刘伟麟，兰天，等．特高压直流输电

换流阀设备数字化思考与实践[J]．电力信息与通信技术，2024，22(8)：1-9．

[2] 郑艺欣，李晓华，李昊．基于阀电流实时计算的故障录波分析方法[J]．电气自动化，2024，46(4)：106-108．

[3] 贺之渊，高冲，丁晓，等．多馈入高压直流输电系统换相失败防御技术研究综述[J]．高电压技术，2024，50(7)：2735-2746．

[4] 饶宏，周月宾，陈煜坤，等．高压大容量柔性直流换流阀关键设计和发展趋势[J]．电源学报，2024，22(3)：1-14．

[5] 赵曜，李超，张瑞，等．高压直流输电换流阀阻尼电容器故障机理分析和防范对策研究[J]．电气应用，2024，43(5)：86-92．

[6] 杨晨，谢晔源，段军，等．基于混频电源运行的模块化多电平矩阵式换流器阀段试验系统[J]．电力系统自动化，2024，48(14)：167-175．

