

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.023

考虑并联冷却水路结构支路长度差异的阀组件晶闸管 结温计算

晋 科¹, 吕中宾², 张梦熹¹, 张少锋², 夏大伟², 李珍平², 丁国君²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052)

摘要: 结温是影响晶闸管长期运行可靠性的重要因素,快速准确地计算晶闸管结温对评估晶闸管长期运行的可靠性具有重要意义。为此,文中结合晶闸管换流阀的并联冷却水路结构,分析晶闸管结到冷却液热阻和水流量间关系,提出了一种考虑并联冷却水路结构支路长度差异的阀组件各级晶闸管结温计算方法。首先,基于对晶闸管及散热器结构的分析,获得晶闸管到冷却液的热阻与冷却水流量之间的关系。其次,考虑晶闸管冷却系统的并联水路结构,分析阀组件各级冷却水路的水流量,并结合热阻和水流量的分析结果构建晶闸管结温迭代计算模型。最后,通过实际换流站数据进行结温计算验证,并采用等效电路仿真和有限元仿真验证了文中方法的准确性。

关键词: 晶闸管; 并联水路; 热阻; 结温计算

Calculation of Thyristor Junction Temperature for Valve Module Considering Branch Length Difference in Parallel Cooling Water Circuit Structure

JIN Ke¹, LYU Zhongbin², ZHANG Mengxi¹, ZHANG Shaofeng², XIA Dawei²,
LI Zhenping², DING Guojun²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Junction temperature is a critical factor affecting the long-term operational reliability of thyristors, and its rapid and accurate calculation is essential for assessing such reliability. Therefore, in this paper the relationship between thermal resistance from the thyristor junction to coolant and water flow rate is analyzed based on the parallel cooling circuit structure of thyristor converter valves, and a junction temperature calculation method for thyristors at all levels of valve assemblies that accounts for branch length variations in parallel cooling circuits is proposed. First, the relationship between thermal resistance from thyristor to coolant and cooling water flow rate is obtained through structural analysis of thyristors and heat sinks. Then, considering the parallel cooling water circuit structure, water flow distribution across different valve assembly levels is analyzed. Moreover, an iterative junction temperature calculation model is developed in combination with thermal resistance and flow characteristics. Finally, the junction temperature calculation is validated using data from an actual converter station, and the accuracy of the proposed method is verified through both equivalent circuit simulation and finite-element simulation.

Key words: thyristor; parallel water circuit; thermal resistance; junction temperature calculation

0 引言

晶闸管换流阀作为高压直流输电系统的核心

设备,其性能直接影响到整个输电系统的电能转换效率、传输能力、稳定性和可靠性。它的存在使得高压直流输电技术能够在远距离、大容量输电以及

收稿日期:2026-04-21; 修回日期:2026-06-18

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5108-202218280A-2-332-XG)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5108-202218280A-2-332-XG).

不同类型电网互联等方面发挥巨大优势,为现代电力系统的发展和稳定运行提供了有力支撑^[1-5]。

随着中国高压直流输电网络的发展,晶闸管换流阀的使用量逐年增加,其正常运行时的结温计算也逐渐成为国内外学者所关注的领域^[6-10]。准确的晶闸管结温不仅是换流站运行效率评估的基础,也对换流阀冷却系统的设计^[11-12]和运行状态及晶闸管稳定运行^[13-17]有着重要的指导意义。

目前主流的晶闸管结温计算方法,主要是采用不同方法构建晶闸管的传热模型进行相关研究^[18]。文[19]针对采用串联冷却水路的晶闸管阀模块,通过有限元仿真得到阀模块稳态运行时的热应力特性和温度分布,但有限元方法建模过程繁杂,计算时间长,无法快速得到晶闸管结温。因此,现在许多学者开始采用热阻抗网络法进行晶闸管结温计算方面的研究,热阻抗网络法是将晶闸管的压接的各层结构看作由不同热阻和热容相连接的热阻网络,通过计算热阻网络得到晶闸管结温,相对有限元方法,热阻网络建模简单,计算快捷^[20]。文[21]结合晶闸管串联冷却回路构建热阻模型,该模型通过考虑水温差异得到了相较传统方法更准确的结温计算结果。同时,文[22]则分别采用热阻抗网络法,基于传热的晶闸管等效电路模型法和有限元仿真法对串联水冷系统的晶闸管换流阀的晶闸管结温进行计算分析,文中计算结果表明,3种方法结果趋势一致,且偏差较小。然而,目前的研究大多关注采用串联冷却水路的晶闸管换流阀的结温计算和结温不均匀现象,对于使用并联冷却水路的晶闸管换流阀研究较少。同时,传统热阻抗网络法不考虑并联冷却水路各支路间的差异,而在实际工程中,由于并联水路中各条支路的长度不同,会导致各支路上散热器中冷却液的水流量出现差异,这种差异会导致晶闸管结—冷却液热阻的变化,进而对阀组件的热阻网络和各级晶闸管结温产生影响。

综上所述,文中提出了一种考虑并联冷却水路支路长度差异的阀组件各级晶闸管结温计算方法,计算结果反映出阀组件内存在各级晶闸管结温不均匀的现象。首先,对并联冷却系统晶闸管换流阀的阀组件进行热阻分析,构建晶闸管结—冷却液热阻与冷却液水流量间关系。接着,结合并联冷却水路结构进行晶闸管散热器冷却水流量计算。其次,基于水路结构,热阻和水流量构建晶闸管级结温计算迭代模型,利用该模型求解晶闸管换流阀每一晶闸管结温。最后,将计算结果与等效电路仿真法及有限元仿真法进行对比分析,从而验证了文中方法

的准确性。

1 阀组件稳态热阻分析

电网特高压直流输电换流阀的阀组件由多个晶闸管组件串联而成,为了确保晶闸管的稳定运行,采用两面冷却方式。即晶闸管两侧都有一个铝制散热器对其进行散热。本章对晶闸管的结—壳热阻和壳—散热器冷却液热阻进行计算分析,为后续热阻网络模型构建奠定基础。

1.1 晶闸管热阻模型

应用于直流工程的晶闸管多采用平板压接技术,平板式的结构使晶闸管具有较大的散热面积,以保证晶闸管在高压,大功率工况下高效稳定地运行。晶闸管分为3层:半导体层以硅芯片为中心进行压接;金属层上下分别包含阴极(阳极)铜片及铜座,在保证电气连接可靠性的前提下提供高散热效率;绝缘层一般采用陶瓷材料,在有效隔离不同电位部件的同时具有较好的机械强度,见图1。

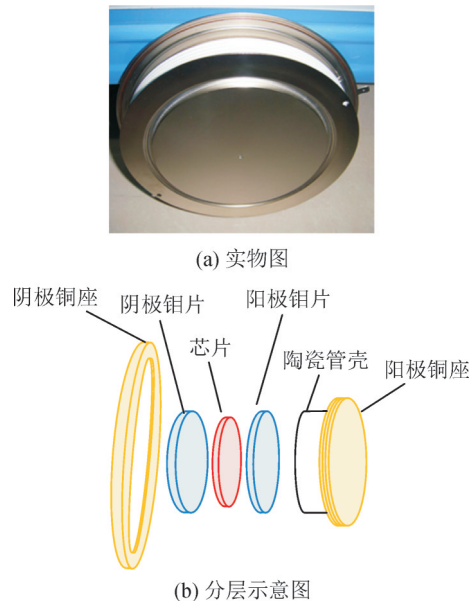


图1 晶闸管结构图

Fig. 1 Thyristor structure diagram

晶闸管换流阀稳定运行时,晶闸管内部达成热平衡,由于自身的对称结构,可以将晶闸管内部各部件间的热传导简化为热阻网络^[23],见图2。

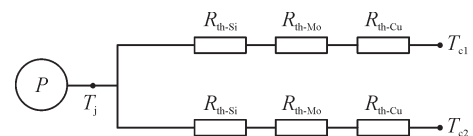


图2 晶闸管热阻示意图

Fig. 2 Thyristor thermal resistance schematic diagram

图2中:不同热阻的下标Si、Mo、Cu分别代表硅芯片、铜片、铜座的热阻; P 为晶闸管稳态时总的功

率损耗; T_j 为晶闸管的稳态结温; T_c 为晶闸管的稳态壳温。对于晶闸管的金属层, 若将其都视为均匀平板, 则可以根据傅里叶热传导定律^[24]得到金属层热阻计算公式。

$$R_{th} = \frac{L}{kA} \quad (1)$$

式(1)中: L 为金属层厚度; k 为材料热导率; A 为垂直于热流方向的截面积。由此可以累加得到晶闸管的结—壳热阻见式(2)

$$R_{thj-c} = R_{th-Si} + R_{th-Mo} + R_{th-Cu} \quad (2)$$

1.2 散热器热阻模型

换流阀晶闸管通常采用水冷散热, 通过晶闸管间散热器实现冷却, 冷却回路中的散热器的实物见图3。



图3 散热器实物图

Fig. 3 Heat sink physical diagram

该散热器设计方案包含在阀组件的晶闸管压装结构(thyristor clamped assembly, TCA)中。TCA 主要包括晶闸管、散热器和附属结构, 晶闸管通过特殊结构设计放置在两个铝制散热器中间的合适位置。TCA 的结构见图4。

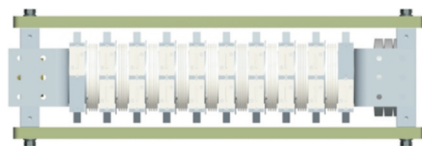


图4 TCA 结构图

Fig. 4 TCA structure diagram

TCA 中散热器的结构见图5, 该矩形散热器有一对进出水口, 散热器内部存在多个冷却水通道和散热片。图中散热器两边平板的长为 L , 高为 H , 宽为 W 。散热器内部圆柱体冷却水路直径为 d_1 , 圆柱体散热片直径 d_2 , 圆柱体散热片共13个。

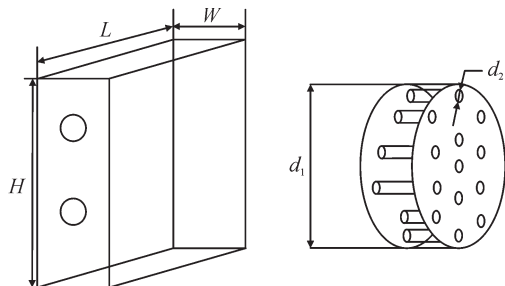


图5 散热器结构图

Fig. 5 Radiator structure diagram

散热器中冷却水会通过热传导和热对流两种方式进行热交换, 同时会分别在两处进行热交换, 一是通过铝制散热器的平板表面直接传递给冷却室, 二是通过散热器内部的散热片传递给冷却液。

在热传导过程中, 根据傅里叶定律可以得到和式(1)相同的热阻计算公式, 并计算相应的热传导热阻 R_{cond} 。在热对流过程中, 散热器的热对流热阻可以通过式(3)计算

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_0} \quad (3)$$

式(3)中: h 为对流换热系数; A_0 为对流换热面积。对流换热面积 A_0 根据上图中散热器结构通过式(4)可以得到

$$A_0 = LH + \frac{1}{4}\pi d_1^2 + 13W\pi d_2 \quad (4)$$

对流换热系数 h 根据式(5)的 Dittus-Boelter 公式^[25]可以计算得到, 即

$$h = \frac{\lambda N_u}{d} \quad (5)$$

式(5)中: N_u 为努塞尔数; d 为散热器内圆柱形管内径; λ 为流体热导率。而当管内冷却液处于湍流时, 努塞尔数 N_u 又有

$$N_u = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (6)$$

各项参数通过式(7)进行计算

$$\begin{cases} Re = \frac{vd}{\nu_1} \\ Pr = \frac{c\mu}{\lambda} \\ v = \frac{Q}{A_c} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中: Re 为雷诺数, 当 $Re < 2300$ 时, 冷却液为层流, 当 $Re > 2300$ 时, 冷却液为湍流; Pr 为普朗特数, 当冷却液处在被加热状态时, $n=0.4$; v 为冷却液流速; d 为管内径; ν_1 为冷却液液体运动粘度; c 为液体比热容; μ 为液体的动力粘度; λ 为液体热导率; Q 为冷却液流量; A_c 为管道横截面积。

对于稳定运行下的冷却系统, Pr 、 ν_1 、 A_0 、 A_c 、 d 、 λ 都可视为常数, 热对流热阻和冷却液流量有直接关系, 即 $R_{conv} \propto 1/Q^{0.8}$ 。则散热器的总热阻即为热传导热阻和热对流热阻之和

$$R_{hs} = R_{cond} + R_{conv} \quad (8)$$

2 考虑并联水路支路差异的换流阀晶闸管结温计算方法

晶闸管换流阀的阀组件通常由多个晶闸管串联而成, 见图6。图6中, 冷却液从一端进入, 通过并联的支路流入各级晶闸管散热器, 并在出水端合流

后流出阀组件,因此该冷却水路通常被称为并联水冷回路。并联水冷回路相较于串联水冷回路,其并联的各支路保证了各级晶闸管散热器冷却水入水温度不受前级晶闸管影响,理论上可以使阀组件内每个晶闸管都能被充分冷却。

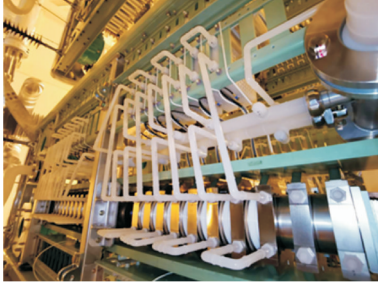


图6 实际阀组件冷却水路图

Fig. 6 Actual valve module cooling water circuit diagram

2.1 冷却支路水流量分析

由于各支路入口离总进水口距离存在差异,在沿程阻力的影响下,进水流量稳定时,各支路的冷却水流量会存在一定的差异,进而导致阀组件内各级晶闸管散热不均。根据达西—魏斯巴赫公式^[26-30]计算从总入口到每个支路出口的总沿程阻力。对于第*i*条支路,其总沿程阻力为

$$h_{fi} = \lambda_i \frac{L_i}{d} \frac{v_0^2}{2g} \quad (9)$$

式(9)中: λ_i 为沿程阻力系数; L_i 为从总入口到第*i*个支路出口的管段长度; d 为管径; v_0 为管内流体的平均流速; g 为重力加速度。如图6实际冷却水路图所示,在流量稳定时,由于各支路管的材料相同,管径相同,则对应的 λ_i 、 d 、 g 3个参数相同,所以总沿程阻力与 L_i 和 v_0^2 成正比。

同时,在正常稳定运行的并联管路系统中,各支路两端的压力差是相等的。根据能量守恒原理,流体从总进水口流到各支路出口,能量的损耗(表现为沿程阻力损失)只与两端的压力差有关。当各支路两端压力差相等时,意味着它们的总能量损耗相同。考虑到冷却水路每条支路弯头和散热器规格一致,忽略局部阻力等其他因素影响,此时沿程阻力也就相同。阀组件冷却水路图见图7。以图7中的并联冷却回路为例,因为各支路沿程阻力相等,可得

$$\lambda \frac{L_1}{d} \frac{v_1^2}{2g} = \lambda \frac{L_2}{d} \frac{v_2^2}{2g} = \lambda \frac{L_3}{d} \frac{v_3^2}{2g} = \lambda \frac{L_4}{d} \frac{v_4^2}{2g} \quad (10)$$

流量是指单位时间内通过某一截面的流体体积,即 $Q = \Delta V / \Delta t$,其中 $\Delta V = A \times v \Delta t$, A 为管道的横截面积, v 为冷却水的流速,则可以得到冷却水流量和流速间的关系,即

$$Q = Av \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)并化简可以得到

$$L_1 Q_1^2 = L_2 Q_2^2 = L_3 Q_3^2 = L_4 Q_4^2 \quad (12)$$

又已知总流量 Q 和各支路流量关系见式(13)

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (13)$$

联立式(12)、(13)可以解得各支路流量

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} + \sqrt{\frac{L_1}{L_3}} + \sqrt{\frac{L_1}{L_4}}} \\ Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \\ Q_3 = Q_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_3}} \\ Q_4 = Q_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_4}} \end{cases} \quad (14)$$

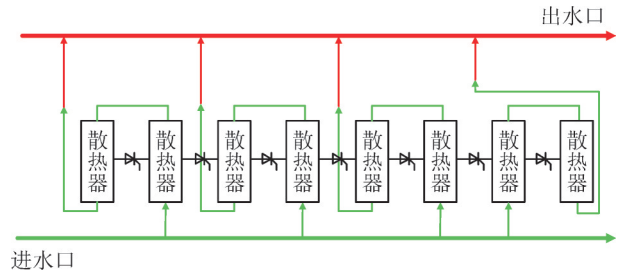


图7 阀组件冷却水路图

Fig. 7 Valve module cooling water circuit diagram

2.2 晶闸管结温计算

在图7所示的阀组件冷却水路中,每条冷却支路的进水温均相同,但基于2.1节中的分析可知,不同支路的水流量并不相同,进而导致晶闸管两侧的热阻抗网络不对称,使每一级的晶闸管结温出现差异。传统热阻抗网络方法不考虑并联水路的水流量不均现象,计算结果无法真实的反映晶闸管结温。本节结合前文对晶闸管结—冷却液热阻和并联冷却水路水流量的分析,对热阻网络和计算方法进行修正。通过并联水路图可以得到各支路的散热器进出水温和晶闸管损耗间的关系分为两种。

1) 当为第一条和最后一条支路时,以第一条支路为例,其冷却水路的示意图见图8。

该类型冷却水路通过两个晶闸管的共同一侧和其中一个晶闸管的单独一侧,分析晶闸管向两侧传递的功率损耗,可以得到该冷却支路各散热器的进出冷却水温见式(15)

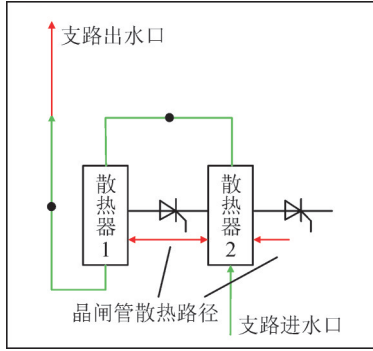


图8 冷却水路图1

Fig. 8 Cooling water circuit diagram 1

$$\begin{cases} T_{hs1-in} = T_{hs2-out} = T_{in} + \frac{(P_{T1-R} + P_{T2-L})}{C\rho Q_1} \\ T_{hs1-out} = T_{hs1-in} + \frac{P_{T1-L}}{C\rho Q_1} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: T_{hs1-in} 和 $T_{hs1-out}$ 分别为第1个散热器的进水温和出水温,由于图7并联支路的特性,散热器2、4、6、7的进水温等于冷却水的进水温; P_{Tk-L} 和 P_{Tk-R} 分别为第 k 级晶闸管向左传递的功率损耗和向右传递的功率损耗; C 为冷却液的比热容; ρ 为冷却液密度; Q_z 为第 z 条冷却回路中冷却液的流量。

2)同理,以第二条冷却水路为例,得到冷却水路图见图9。与两侧的冷却水路不同,阀组件中间晶闸管级的冷却水路通过的散热器会受到两侧晶闸管传递的功率损耗,可以得到此时各散热器的进出水温见式(16)

$$\begin{cases} T_{hs3-in} = T_{hs4-out} = T_{in} + \frac{(P_{T3-R} + P_{T4-L})}{C\rho Q_2} \\ T_{hs3-out} = T_{hs3-in} + \frac{(P_{T3-L} + P_{T2-R})}{C\rho Q_2} \end{cases} \quad (16)$$

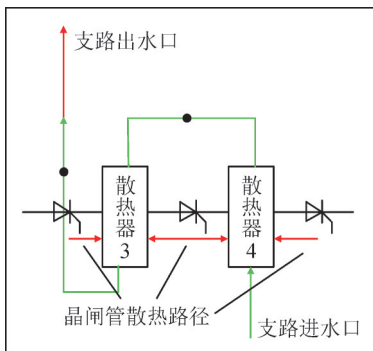


图9 冷却水路图2

Fig. 9 Cooling water circuit diagram 2

通过式(15)、(16)可以构建出阀组件中每一个散热器的进出水温的表达式并计算出相应的进出水温。则每一级散热器中冷却水的平均水温即为

$$T_{hsi-avg} = \frac{T_{hsi-in} + T_{hsi-out}}{2} \quad (17)$$

由于晶闸管壳到冷却液的热阻和散热器内冷却液的流量有着直接关系,那对于阀组件内不同的晶闸管级,晶闸管结温的计算方式见式(18),式(18)中 R_{hsi} 和 $R_{hs(i+1)}$ 分别为第 i 级晶闸管壳到两侧冷却液的单向热阻,该热阻受两侧散热器中冷却液的流量影响。

$$\frac{T_{ji} - T_{hsi-avg}}{R_{thj-c} + R_{hsi}} + \frac{T_{ji} - T_{hs(i+1)-avg}}{R_{thj-c} + R_{hs(i+1)}} = P_{Ti} \quad (18)$$

在初始进行计算时,考虑到晶闸管的对称结构,稳态下假设晶闸管向两侧传递的功率损耗相同,可得到

$$P_{Ti-R} = P_{Ti-L} = \frac{1}{2} P_{Ti} \quad (19)$$

通过换流阀冷却系统可以得到冷却水的总进出水温和总的水流量,结合式(14)-(19)可以计算出阀组件中每个晶闸管的初始结温,并结合式(20)计算出晶闸管向两侧传递的功率损耗,更新后的晶闸管向两侧传递的功率损耗与晶闸管结到两侧冷却液的热阻相关,即与冷却液流量直接相关。

$$\begin{cases} P_{Ti-R} = \frac{T_{ji} - T_{hs(i+1)-avg}}{R_{thj-c} + R_{hs(i+1)}} \\ P_{Ti-L} = \frac{T_{ji} - T_{hsi-avg}}{R_{thj-c} + R_{hsi}} \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)的结果代入式(15)、(16)重新计算散热器中冷却水温度,再代入式(19)计算新一轮结温,并重复进行迭代计算,直到结果稳定后即可得到晶闸管结温计算结果。

3 结合换流站实际数据的晶闸管结温计算分析

文中结合某换流站±800 kV特高压直流输电工程换流阀的实际负荷和冷却系统进出水温数据进行晶闸管结温计算,并分别采用文中方法,不考虑并联冷却水流量差异的直接计算方法和文[22]中的等效电路仿真法和有限元仿真方法验证本方法计算的准确性。

3.1 晶闸管换流阀组件结构及运行数据

该换流站额定电压为±800 kV,额定负荷8 000 MW,采用双极直流系统,系统包括两个完整单极,每个完整单极由2个12脉动换流单元串联组成。每个12脉动桥由两个串联的6脉动桥组成,每个6脉动桥换流阀为二重阀结构,二重阀悬吊于阀厅顶部,二重阀为两个单阀串联而成,见图10。

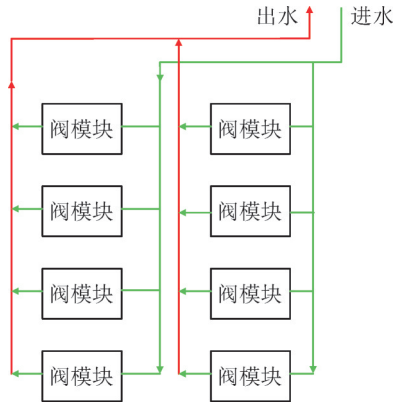


图10 二重阀冷却水路

Fig. 10 Double valve cooling water circuit

图10中,每个单阀包括4个阀模块,每个二重阀共8个阀模块,结构上形成一个阀塔。每个阀模块由两个阀组件构成,每个阀组件由7-8级晶闸管串联而成,采用图7中的并联冷却支路。

通过晶闸管换流阀控制系统的监测单元可以实时得到换流变运行数据见表1,换流站一天内的负荷的变化较为稳定,双极负荷保持在额定负荷的50%。同时可以通过阀冷系统得到晶闸管的冷却水流量和进出水温。采用表1中的水流量平均值5 464 L/min和换流阀冷却系统的进水温均值32.5 °C,出水温平均值为37.3 °C作为晶闸管损耗的计算数据,考虑到空气散热量,阀损耗按水冷功率的102%进行计算,可以得到50%负荷下每个晶闸管损耗为2.5 kW。

表1 换流站运行数据

Table 1 Converter station operation data

参数	最大值	最小值	平均值
双极功率/MW	4 002.56	3 997.51	4 000.01
单极冷却水流量/(L·min ⁻¹)	5 530.00	5 417.00	5 464.41
单极进水温/°C	37.00	27.40	32.50
单极出水温/°C	41.90	32.50	37.30

3.2 不同计算方法结果对比分析

为了验证文中方法结温计算结果的准确性,通过文[22]中的两种方法和不考虑并联冷却水路热阻网络差异的传统方法进行晶闸管结温计算,将这3种方法的计算结果与文中方法的计算结果进行对比验证,这4种计算方法均采用3.1节中相同的换流站数据,以保证不同方法计算结果的可比性。

文[22]中的第1种方法为等效电路仿真法,其原理是将热路中的热传播等效成电路中的电流传播,利用Simulink进行仿真求解,文[22]中已对等效电路仿真方法的有效性进行了验证,与该论文的实际测量结果相近。传热等效电路建模参考文[22],具体电路模型见图11。图11中: I_{thi} 为表示晶闸管

损耗的恒流源; R_{thj-c} 、 R_{hs} 为晶闸管两侧的结—壳热阻及壳—冷却液热阻; U_{di} 为冷却液入口温度用电压源。

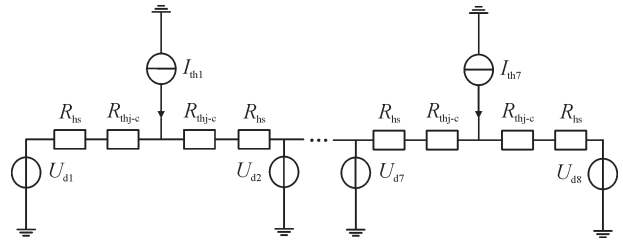


图11 阀组件传热等效电路模型

Fig. 11 Valve module heat transfer equivalent circuit model

文[22]中第2种方法采用有限元仿真法,使用有限元仿真软件对晶闸管阀组件进行仿真建模,文[22]中已对有限元仿真方法的有效性进行了验证,与该论文的实际测量结果偏差较小。有限元仿真阀组件的有限元模型见图12,此时有限元仿真的各项数据均采用实际换流站数据,进水温为32.5 °C;并设置硅芯片作为内部热源,功率为2.5 kW;冷却水流量同样采用表1数据。

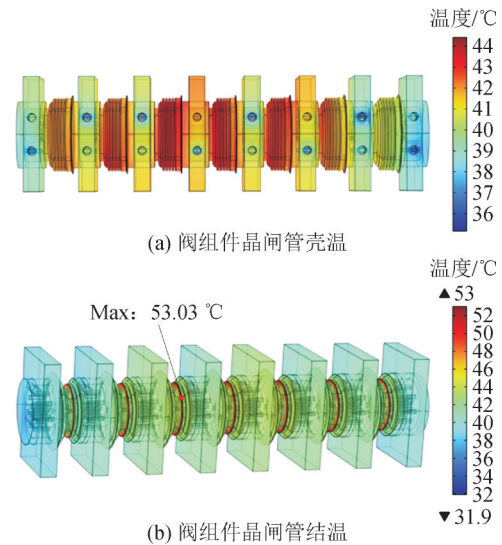


图12 阀组件有限元仿真结果

Fig. 12 Finite element simulation results of valve module

图12中,图12(a)为散热器和晶闸管外壳的温度分布,根据图12中结果可以看到阀组件内出现散热不均现象,与文中分析相符,且第5级晶闸管壳温最高。图12(b)为晶闸管结温的仿真结果(为方便查看对晶闸管外壳作隐藏处理),可以看到此时图中标点处第5级晶闸管结温温度最高,显示为53 °C,与图12(a)不均匀散热结果相符。

为了验证文中计算方法的准确性,取3组不同进水温(T_{in})的数据,采用上述4种方法进行晶闸管结温计算,并作对比分析。

1) 进水温为平均值 32.5 °C 时, 得到 4 种方法的晶闸管结温计算结果见图 13。

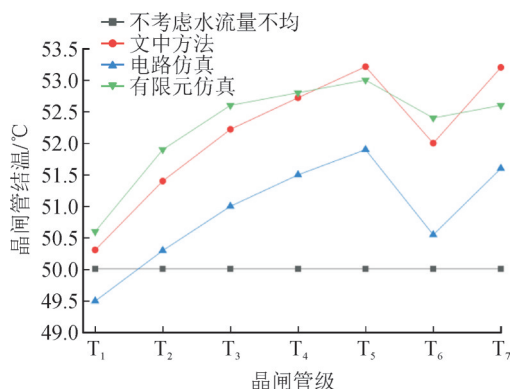


图 13 各方法结温计算结果对比($T_m=32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 13 Comparison of junction temperature calculation results by different methods($T_m=32.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

根据图 13 中结果, 传统方法相较其他 3 种方法, 结果偏差较大, 最大温差可达 3.2 °C。文中方法和有限元方法计算结果的最大绝对偏差为 0.6 °C, 平均偏差为 0.35 °C; 电路仿真方法和有限元方法结果的最大绝对偏差为 1.85 °C, 平均偏差为 1.32 °C, 文中方法计算结果相较电路仿真方法和传统方法更接近有限元仿真方法计算结果。

2) 进水温为最小值 27.4 °C 时, 得到 4 种方法的晶闸管结温计算结果见图 14。

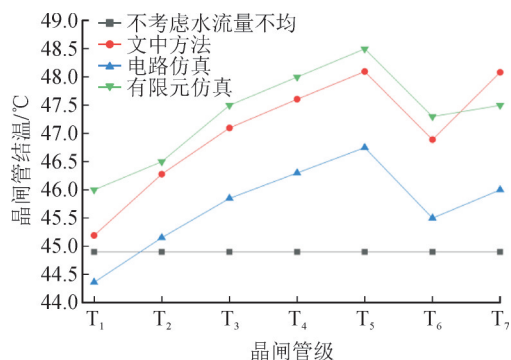


图 14 各方法结温计算结果对比($T_m=27.4\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 14 Comparison of junction temperature calculation results by different methods($T_m=27.4\text{ }^{\circ}\text{C}$)

图 14 中, 文中方法和有限元方法计算结果的最大绝对偏差为 0.58 °C, 平均偏差为 0.46 °C; 电路仿真方法和有限元方法结果的最大绝对偏差为 1.8 °C, 平均偏差为 1.63 °C。

3) 进水温为最大值 37.0 °C 时, 得到 4 种方法的晶闸管结温计算结果见图 15。

文中方法和有限元方法计算结果的最大绝对偏差为 0.4 °C, 平均偏差为 0.18 °C; 电路仿真方法和有限元方法结果的最大绝对偏差为 1.4 °C, 平均偏差为 0.95 °C。

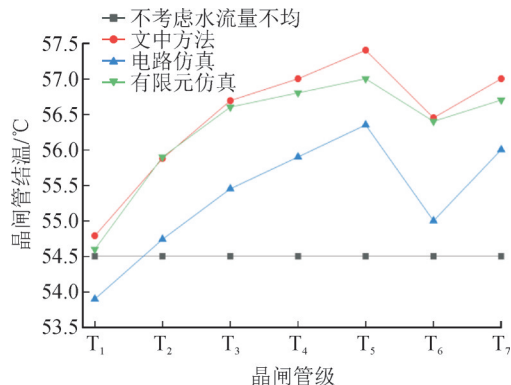


图 15 各方法晶闸管结温计算结果对比($T_m=37\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 15 Comparison of junction temperature calculation results by different methods($T_m=37\text{ }^{\circ}\text{C}$)

对比各方法可以发现, 文中提出的计算方法与电路仿真计算方法及有限元计算方法计算得到的阀组件结温整体变化趋势相同。且文中结果相对传统方法和电路仿真方法更接近有限元仿真法计算结果, 与有限元方法计算结果误差较小, 能够体现出阀组件中晶闸管散热不均的情况, 反映阀组件中晶闸管的真实结温。同时文中方法在多组不同进水温下的计算结果都与有限元仿真方法相近, 受环境温度的影响较小, 而且相较有限元方法, 文中方法计算更加简单便捷, 更适合工程实际应用。

同时根据文中计算结果分析, 在换流站额定负荷的 50% 运行情况下, 采用并联水路的晶闸管阀组件中, 因水路水流量分布不均导致各晶闸管级存在的结温差异可达 2.9 °C, 对晶闸管长期运行可靠性存在一定影响。

4 结语

文中提出了一种考虑并联冷却水路支路长度差异的阀组件各级晶闸管结温计算方法。该方法考虑了并联冷却水路各支路水流量不均匀对晶闸管热阻的影响, 通过构建水流量和晶闸管热阻间的关系, 得到晶闸管结温的迭代模型。并通过该迭代模型进行晶闸管结温计算得到并联冷却系统的晶闸管阀组件中每一级晶闸管的结温。文中使用实际换流站数据, 采用等效电路仿真、有限元仿真和未考虑水流量不均匀的传统热阻抗网络方法作为对比验证。所提出方法与传统方法和电路仿真方法相比, 更接近有限元仿真结果, 且能很好地反映阀组件中晶闸管散热不均导致的晶闸管结温不均现象, 相较于有限元仿真方法, 文中方法计算快捷简单, 更适用于工程实际。

晶闸管结温是衡量晶闸管性能、可靠性及寿命

的核心参数,长期处在高结温运行下的晶闸管会降低其电气性能,对晶闸管的寿命和可靠性造成影响,如何快捷有效地对晶闸管结温进行计算和监测值得进一步的研究和探讨。

参考文献:

- [1] Chan-kikim C. 高压直流输电一功率变换在电力系统中的应用[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
Chan-kikim C. HVDC transmission: power conversion applications in power systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [2] 娄彦涛, 马元社, 刘飞, 等. 锦屏—苏南±800 kV 特高压直流工程晶闸管换流阀[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 42-45.
Lou Yantao, Ma Yuanshe, Liu Fei, et al. Thyristor valves in Jinping-Sunan ±800 kV UHVDC project[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 42-45.
- [3] 关晓羽, 汪娟娟, 何启皓. 高压直流稳态工况无功调节能力[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 100-107.
Guan Xiaoyu, Wang Juanjuan, He Qihao. Reactive power adjustable ability of HVDC under steady state condition[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 100-107.
- [4] 张学友, 董翔宇, 葛健, 等. 基于模拟退火算法的特高压直流VDCOL控制环节优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 53-60.
Zhang Xueyou, Dong Xiangyu, Ge Jian, et al. Optimization for VDCOL of high-voltage DC transmission system based on simulated annealing algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 53-60.
- [5] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
Li Kang, Huang Meng, Zha Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [6] Meng Hui, Zhu Ankang, Zuo Luwei, et al. Online junction temperature extraction with gate voltage under nontrigger current for high-voltage thyristor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 10574-10578.
- [7] 赵静波, 钟文梁, 安海云, 等. 光伏接入下高压直流输电系统后续换相失败抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(9): 38-48.
Zhao Jingbo, Zhong Wenliang, An Haiyun, et al. Study on suppression strategy for subsequent commutation failure in HVDC transmission systems with photovoltaic integration[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9): 38-48.
- [8] Toulon G, Bourennane A, Isoird K. Analysis and optimization of a thyristor structure using backside schottky contacts suited for the high temperature[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(11): 3814-3820.
- [9] 张星汝, 冯冰洋, 刘俊, 等. 高电压大电流晶闸管组件的热特性[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(2): 88-92.
Zhang Xingru, Feng Bingyang, Liu Jun, et al. Thermal characteristics of high voltage and high current thyristor assembly[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(2): 88-92.
- [10] 蒋冠前, 傅亚光, 刘威鹏, 等. 一种高压直流输电保护与控制国产化硬件平台的功能研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 154-165.
Jiang Guanjian, Fu Yaguang, Liu Weipeng, et al. Research and implementation of domestic hardware platform functionality for protection and control in HVDC transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 154-165.
- [11] Wang Tao, Yuan Tianqi, Xiao Jiangwen. Simulation research on thyristor's water cooling technique based on fluent[C]//Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, 2011: 5737-5742.
- [12] 伍珣, 刘嘉文, 李红佗, 等. 一种SH-ResNet模型的换流阀外冷却系统最优化选型方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(9): 83-92.
Wu Xun, Liu Jiawen, Li Hongtuo, et al. Optimal selection method for external cooling system of converter valves based on SH-ResNet[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(9): 83-92.
- [13] 李武华, 陈玉香, 罗皓泽, 等. 大容量电力电子器件结温提取原理综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3546-3557.
Li Wuhua, Chen Yuxiang, Luo Haoze, et al. Review and prospect of junction temperature extraction principle of high power semiconductor devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3546-3557.
- [14] 李宽, 黄强, 吕学宾, 等. 抑制高压直流系统后续换相失败的定关断角控制改进方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 109-119.
Li Kuan, Huang Qiang, Lyu Xuebin, et al. Enhanced extinction angle control for subsequent commutation failure mitigation in HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 109-119.
- [15] 刘子琛, 王黎明, 尹芳辉, 等. 积污对光触发晶闸管换流阀电压监测板的影响及其对策研究[J]. 高压电器, 2025, 61(2): 141-150.
Liu Zichen, Wang Liming, Yin Fanghui, et al. Influence of contamination on voltage monitoring board for light triggered thyristor converter valve and the corresponding countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(2): 141-150.
- [16] 张建坡, 柴欣茹, 辛光明, 等. 换相失败场景下构网型风机对送端暂态过电压影响因素分析及抑制策略研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(9): 1-8.
Zhang Jianpo, Chai Xinru, Xin Guangming, et al. Influencing factors of GFM-PMSG on sending-end transient overvoltage under commutation failure & its suppression strategies[J]. Smart Power, 2024, 52(9): 1-8.
- [17] 李侠, 马振军. 贵—广Ⅱ宝安站极2Y3阀因无回报信号导致极2跳闸的故障分析及相关反措的建议[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 110-113.
Li Xia, Ma Zhenjun. Analysis and suggestions on Pole 2 strip caused by no check back signal from Y3 valve of GGH Baoan station[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 110-113.
- [18] 胡永银, 李兴源, 李宽. 晶闸管结温计算方法综述[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1881-1886.
Hu Yongyin, Li Xingyuan, Li Kuan. Review of thyristor junction temperature calculation methods[J]. East China Electric Power, 2013, 41(9): 1881-1886.

- [19] 李 凯, 韩 坤, 黄永瑞, 等. 高压直流换流阀模块散热及温度分布研究[J]. 电工技术, 2020(9): 126-129.
Li Kai, Han Kun, Huang Yongrui, et al. Research on heat dissipation and temperature distribution of HVDC converter valve module[J]. Electric Engineering, 2020(9): 126-129.
- [20] 熊诗成, 鲁军勇, 郑宇锋, 等. 基于各层材料传热特性的晶闸管结温 计算等效电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1157-1164.
Xiong Shicheng, Lu Junyong, Zheng Yufeng, et al. Equivalent circuit model based on the heat transfer characteristics of each layer for pulsed power thyristor junction temperature calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1157-1164.
- [21] 蒋张威, 廖彦铭, 傅孝韬, 等. 考虑水冷回路的晶闸管换流阀热阻模型建模[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 38-45.
Jiang Zhangwei, Liao Yanming, Fu Xiaotao, et al. Modeling of thermal resistance of thyristor converter valve considering water-cooling circuit[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 38-45.
- [22] 李 凯, 廖卉莲, 汪 涛, 等. 特高压直流输电换流阀晶闸管温度分布预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(11): 216-224.
Li Kai, Liao Huilian, Wang Tao, et al. Research on prediction method of temperature distribution in thyristor of UHVDC converter valve[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11): 216-224.
- [23] 杨 俊, 查鲲鹏, 高 冲, 等. 直流换流阀晶闸管热阻抗端口特性分析与建模[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 196-204.
Yang Jun, Zha Kunpeng, Gao Chong, et al. Study on external characteristics and modelling for thermal impedance of thyristor in HVDC converter valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 196-204.
- [24] 贾 力, 方肇洪. 高等传热学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
Jia Li, Fang Zhaohong. Advanced heat transfer[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [25] 方贤德. 高等两相流与传热[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2021.
Fang Xiande. Advanced two - phase flow and heat transfer[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2021.
- [26] Von B R D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1990, 116(2): 294-298.
- [27] 黄卫星, 陈文梅. 工程流体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
Huang Weixing, Chen Wenmei. Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [28] Valiantzas J D. Explicit power formula for the darcy-weisbach pipe flow equation: application in optimal pipeline design[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2008, 134(4): 454-461.
- [29] 刘忠德, 周 强, 雷和林, 等. 基于多传热模型数值仿真的风电机组叶片气热防除冰性能强化[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 160-168.
Liu Zhongde, Zhou Qiang, Lei Helin, et al. Performance enhancement of gas heat prevention and deicing of wind turbine blades based on numerical simulation of multiheat transfer model [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 160-168.
- [30] 张文龙, 朱培毅, 朱宪然, 等. 基于CNN-BiGRU-AT的凝汽器传热系数预测[J]. 浙江电力, 2024, 43(9): 117-124.
Zhang Wenlong, Zhu Peiyi, Zhu Xianran, et al. Research on heat transfer coefficients of condensers based on CNN - BiGRU - AT[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(9): 117-124.
- 晋 科(1999—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力电子器件可靠性(E-mail: 790065658@qq.com)。
- 吕中宾(1974—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为输电线路舞动防治(通信作者)(E-mail: jl716586336@gmail.com)。