移动式直流融冰装置晶闸管阀设计及工程应用

渠学景

（普世通（北京）电气有限公司，北京 102600）

摘要：晶闸管阀是移动式直流融冰装置的核心设备，介绍了应用于 110 kV/220 kV 架空线路融冰用 10 kV/2 000 A 晶闸管阀的主要参数、电气设计、散热设计、结构设计以及阀控系统设计等，该阀体性能优良，可靠性高，满足了工程应用需求。

关键词：移动式直流融冰；晶闸管阀；热管散热器

Design and engineering application of thyristor valve for mobile DC ice-melting device

QU Xuejing

(Pushon-electric Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: Thyristor rectifier valve is the core equipment of mobile DC ice-melting device. The main parameters, electrical design, heat dissipation design, structural design and valve control system design of 10 kV/2 000 A rectifier valve used for ice melting of 110 kV/220 kV overhead lines is imtroduced. The valve body has excellent performance and high reliability, which meets the engineering application requirements.

Key words: mobile DC ice-melting; thyristor rectifier valve; heat pipe radiator

0 引言

直流融冰是一种成熟可靠的线路除冰方法。高压输电线路导线采用多芯金属绞合导线，其单位电抗为单位直流电阻的 5～10 倍。由于电抗的存在，在导线流过相同的融冰电流时，交流电流在导线上形成的电压降远大于直流电流，因此直流融冰电源容量相对交流短路融冰需求较低。采用直流融冰装置可实现零起升压和升流，且快捷方便；通过控制晶闸管触发角，结合现场线路类型、覆冰状态和气象条件等因素控制直流融冰电流，达到线路最佳融冰状态，对于不同长度、不同类型的线路适应性较好。

直流融冰装置有多种分类方式，按照电气接线可以分为十二脉动融冰和六脉动融冰；按照冷却方式可以分为纯水冷却、热管冷却和型材散热器冷却；根据产品安装方式可分为固定式直流融冰、移动式直流融冰；按照产品功能可分为纯融冰装置、融冰兼无功补偿装置等。目前500 kV变电站多采用固定水冷式十二脉动融冰，而110 kV、220 kV变电站由于数量众多，因此采用多站共用移动式融冰装置，提高装置的利用率。移动式融冰装置采用六脉动电气接线、热管冷却，具有结构紧凑、功率密度高的优势，能够输出100～2 000 A的直流电流，满足常见的110 kV和220 kV架空线路冬季融冰需求。

本文介绍了应用于10 kV电压等级、直流侧输出电流达2 000 A的融冰六脉动晶闸管阀设计方案，包括主要参数、电气设计、散热设计、结构设计以及阀控系统设计。

1 主要参数

1.1 使用条件

移动式直流融冰装置（以下简称融冰装置）晶闸管阀为户内设备，装设于封闭环境（一般是集装箱内部），考虑融冰装置一般在冬季低温条件下使用，因此长期运行温度范围为－25～+25 ℃；长期最高运行湿度为80% RH；最高地震设防烈度为8度。

含晶闸管阀在内的整套装置安装在集装箱内，可根据线路融冰需求，实现站间快速移动，满足对多个站点的多条线路进行融冰。融冰装置外观如图1所示。

图 1 移动式直流融冰装置外观

Fig. 1 Appearance of mobile DC ice-melting device

1.2 设备组成

融冰装置由单套六脉动晶闸管阀体及其冷却设备、电压互感器、电流互感器、直流避雷器、阻容分压器（直流PT）、霍尔传感器（直流CT）、隔离开关及二次控制系统组成，全部安装于可移动的车载集装箱内，电气主接线如图2所示。

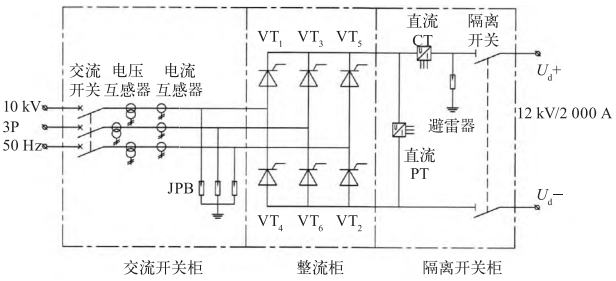

图 2 移动式直流融冰装置电气主接线图

Fig. 2 Electrical main wiring diagram of mobile DC ice-melting device

1.3 工作原理

晶闸管阀作为融冰装置的主要换流设备，为覆冰线路提供直流融冰电流。晶闸管阀控制系统在线路融冰过程中，通过改变晶闸管阀的触发角调节线路直流电流大小，满足不同线径、不同长度线路的融冰需求。不同触发角度时直流电压、电流波形如图3所示，晶闸管单阀电压、电流波形如图4所示。

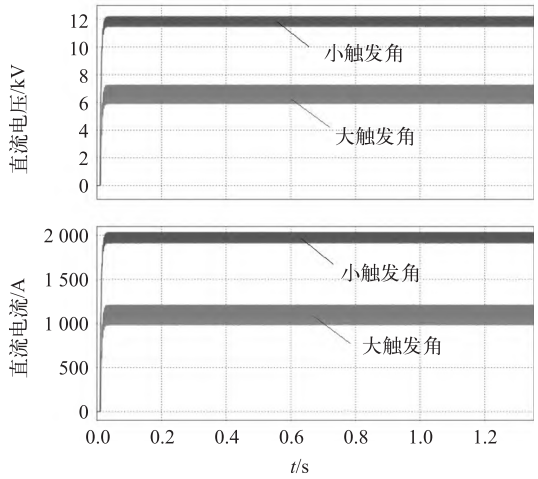

图 3 不同触发角度时直流电压、电流波形

Fig. 3 Waveforms of DC voltage and current at different trigger angles

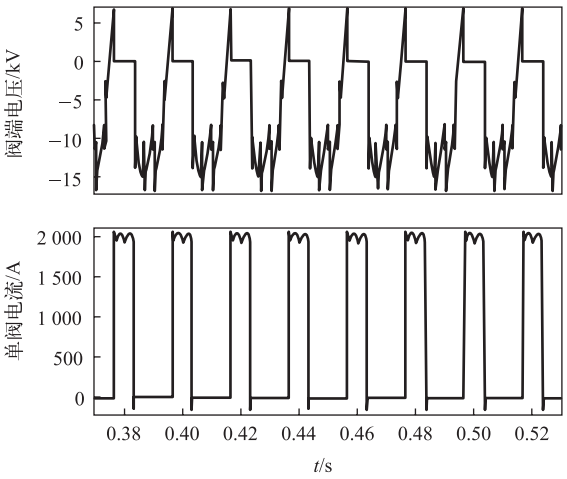

图 4 晶闸管单阀电压、电流波形

Fig. 4 Voltage and current waveforms of single thyristor valve

1.4 主要参数

融冰装置晶闸管阀组主要技术参数为：接入系统电压等级为10 kV；最高运行电压为11 kV；工作频率为50 Hz；额定直流电压为12 kV；额定直流电流为2 000 A；电流长期过载为1.2（pu）；

额定容量为24 MW；触发角度范围为5°～90°。

2 电气设计

电气设计考虑了融冰装置晶闸管阀在各种运行工况下的电气应力，包括在暂态和稳态下可能出现的最大电压应力、电流应力及热应力等。

2.1 晶闸管串联数设计

晶闸管串联级数主要根据系统电压等级、接地方式、过电压水平、阀串不均匀系数、试验安全系数和晶闸管耐压参数确定。

目前耐压水平5 600 V的高压晶闸管应用广泛，技术成熟，性价比较高，因此，本工程选用$U_{DRM/RRM}$=5 600 V的晶闸管。

根据GB/T 31487.2—2015《直流融冰装置第2部分：晶闸管阀》6.1.2.1.2条规定，在晶闸管承受各种过电压的情况下，不考虑冗余晶闸管级时，每级晶闸管平均承受的电压峰值应不大于晶闸管的可重复电压，且电压裕度应不小于200%，即阀串联层数应满足

$$N_t \geqslant \frac{2\sqrt{2}U_{max}}{U_{DRM/RRM}} + N_r \tag{1}$$

式中，N_t为串联晶闸管级总数；N_r为晶闸管冗余数，1层；U_{max}为阀端交流电压，11 kV；$U_{DRM/RRM}$为晶闸管重复耐压，5 600 V。

经计算，本融冰装置晶闸管阀层数应选择为7层，含1层冗余，当单阀有1层器件故障时，成套设备发出报警信息且继续运行，提高了可靠性和利用率；当单阀有1层以上器件故障时，成套设备退出，保证了设备安全性。

2.2 晶闸管选型

目前高压晶闸管主要分为焊接式和压接式两种结构，全压接式晶闸管具有芯片变形量小、耐压稳定性高、耐热疲劳能力强、使用寿命长和参数一致性好的优点，且具有更大的电流容量、更高的电压能力及更高的可靠性，方便器件串并联应用，因此，融冰装置晶闸管阀使用全压接式晶闸管。全压接式晶闸管结构如图5所示。

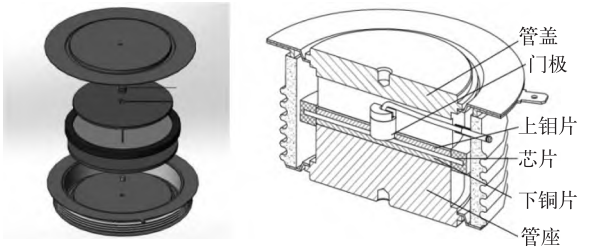

图 5 全压接式晶闸管结构

Fig. 5 Structure of all-crimp thyristor

融冰装置晶闸管阀直流电流2 400 A（考虑1.2 pu过载需求），根据融冰装置最大直流电流计算，流过晶闸管的半波电流有效值为

$$I_{RMS} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} = 1\,387.8\ \text{A} \tag{2}$$

选用晶闸管的半波电流平均值I_{TAV}，应满足下式要求

$$I_{TAV} = \frac{2}{\pi} \times I_{RMS} = 882.04\ \text{A} \tag{3}$$

式中，I_d为融冰装置额定直流电流。

根据GB/T 31487.2—2015 《直流融冰装置第2部分：晶闸管阀》6.1.3.1条规定，电流安全裕度系数k_i为2.5～4.0。

晶闸管选用KP_C 2800-65（中车），通态平均电流$I_{T(AV)}$为2 800 A，电流裕度为

$$k_i = \frac{I_{T(AV)}}{I_{TAV}} = \frac{2\,800}{882.04} = 3.17 \tag{4}$$

经校核，选择KP_C 2800-65晶闸管，满足电流裕度2.5～4.0倍的要求。

此款晶闸管主要技术参数见表1。

表 1 晶闸管技术参数

Tab. 1 Technical parameter table of thyristor

符号	参数名称	数值
U_{DSM}/V	断态不重复峰值电压	6 500
U_{RSM}/V	反向不重复峰值电压	6 500
U_{DRM}/V	断态重复峰值电压	5 600
U_{RRM}/V	反向重复峰值电压	5 600
$I_{T(AV)}$/A	通态平均电流	2 800
$I_{T(RMS)}$/A	通态方均根电流	4 400
V_{TO}/V	通态压降	1.18
r_T/mΩ	斜率电阻	0.274
Q_{rr}/μC	反向恢复电荷	3 000±200
R_{thJC}/（K/kW）	结壳热阻	5.7
R_{thCH}/（K/kW）	接触热阻	1.5

通过晶闸管的反向恢复电荷、关断时间和通态压降等关键参数的一致性测试与筛选，保证了单相阀内串联器件的运行协调性和一致性。

2.3 阻尼、均压电路设计

融冰装置晶闸管阀采用多只晶闸管串联，由于器件参数（反向恢复电荷、关断时间、通态压降和断态漏电流）不一致，各晶闸管承受电压不一致，承受电压高的晶闸管器件将损坏。

为了实现静态、动态均压，在每组反并联晶闸管阀串上同时并联了静态均压回路（R_{dc}）和动态RC阻尼回路（R_s和C_s串联），其中阻尼电容的电容值C按下式计算

$$C=\frac{\Delta Q_{rr}\left(n-1\right)}{E\left(1/k_{u_1}-1\right)} \tag{5}$$

式中，ΔQ_{rr}为反向恢复电荷差，单位为μC；n为阀层数；E为阀端电压峰值，单位为V；k_{u1}为动态均压系数，取0.9。

均压电阻值R_{dc}按下式计算

$$R_{dc}\leqslant(\frac{1}{k_{u_2}}-1)\frac{U_{DRM/RRM}}{\Delta I_{DRM/RRM}} \tag{6}$$

式中，$\Delta I_{DRM/RRM}$为最大漏电流差值，单位为mA；$U_{DRM/RRM}$为晶闸管重复耐压，单位为V；k_{u2}为直流分量均压系数，取0.9。

静态均压回路、动态RC阻尼回路实现了阀串内部电压的均匀分布，保证了正常和非正常工况下，每个晶闸管级间的电压分布在容许范围内。

2.4 电气主接线图

增加阻尼、均压回路后的融冰装置晶闸管阀电气接线如图6所示。

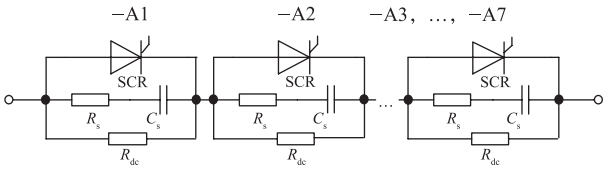

图 6 移动式直流融冰装置晶闸管阀电气接线

Fig. 6 Electrical wiring of thyristor valve of mobile DC ice-melting device

3 散热设计

3.1 设计原则

为了保障晶闸管阀的长期安全可靠运行，冷却系统的容量必须能够确保晶闸管阀各器件在最恶劣工况下产生的热量能被及时散出。因此，冷却系统的容量必须按晶闸管阀极端最大损耗来设计，并留有一定裕度。

3.2 散热设备选型

高压电力电子设备目前主要有风冷、水冷和热管三种方式。水冷系统复杂，损耗高、噪声大；风冷方式效率低，同样存在损耗、噪声问题；热管散热器充分体现了散热技术的发展趋势，散热效果好，噪声低，使用寿命长，不存在水冷散热器漏水问题以及庞大的水循环系统。热管传热速度是铜的100多倍，可满足大功率电子元器件运行的散热要求，启动速度快，在十多秒的时间内很快就能把热量带出去。热管散热器如图7所示。

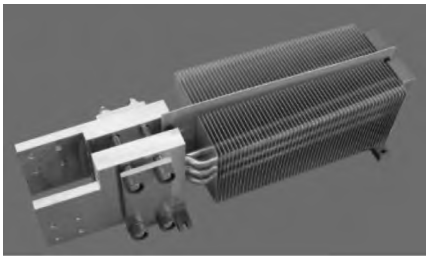

图 7 热管散热器

Fig. 7 Heat pipe radiator

经上述三种散热方案的比较，本工程采用热管散热方案。

3.3 损耗（发热量）计算

晶闸管损耗P_Σ由通态损耗P_T和开关损耗P_S两部分组成。

晶闸管通态损耗计算公式为

$$P_T=\frac{I_d}{3}(U_{TO}+r_TI_d) \tag{7}$$

式中，U_{TO}为晶闸管转折电压，1.18 V；r_T为晶闸管斜率电阻，0.274 mΩ；I_d为直流电流，2 400 A。

经计算，单只晶闸管通态损耗为1 470 W。

晶闸管的开关损耗P_S按通态损耗的20%考虑，则晶闸管总损耗为

$$P_\Sigma = P_T + P_S = 1.2P_T = 1\,764\ \text{W} \tag{8}$$

3.4 晶闸管与散热器的连接方式

将晶闸管和热管散热器交替压接，形成阀串，每个阀串包括7个晶闸管和8个热管散热器单元，如图8所示。

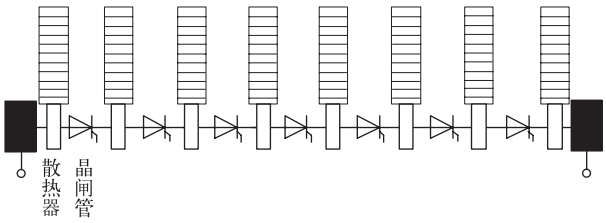

图 8 晶闸管与散热器压接方式

Fig. 8 Crimping mode of thyristor and radiator

3.5 晶闸管结温计算

按最高环境温度25 ℃、发热量1.764 kW、热管散热器温升45 K和晶闸管热阻（5.7 K/kW+1.5 K/kW）计算晶闸管温升

$$\begin{aligned}\vartheta_j &= T_{环境} + \Delta T + P_T R_{th} \\ &= 25 + 45 + 1.764 \times (5.7 + 1.5) \\ &= 82.70\ ℃\end{aligned} \tag{9}$$

最大融冰电流下，晶闸管结温低于90 ℃，能够长期安全稳定运行。

根据晶闸管阀热流状态，建立热管散热器模型，并仿真得出散热器基板的最高温度和温度分布，如图9所示。

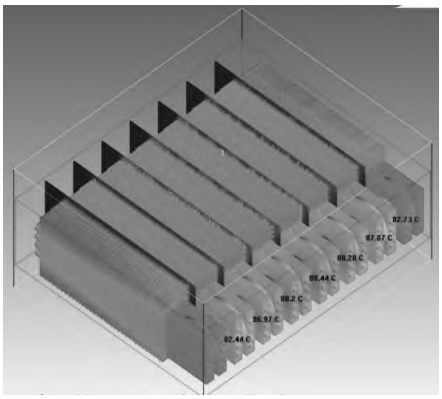

图 9 热管散热器温升仿真结果

Fig. 9 Simulation results of heat pipe radiator temperature rise

从热仿真结果可以看出，边缘散热器温度为82.73 ℃，与理论计算结果一致。另外，中间位置热流不易散出，散热器表面的温度比边缘散热器高5～6 ℃，与理论分析结论吻合。整个单阀最热点温度低于90 ℃，满足设计要求。

4 结构设计

融冰装置晶闸管阀采用空气绝缘、热管自然冷却、支撑式和二重阀结构。融冰装置晶闸管阀的结构设计以电气设计为基础，综合考虑了机械结构的强度、过电压绝缘配合、关键器件的合理布局、散热器特性以及防火要求等。

4.1 阀串压装施力结构

由于晶闸管器件内部的构造特殊，需要在晶闸管两个端面施加足够的压力来降低接触电阻，因此晶闸管的施力结构设计尤为重要，其中施力结构如何实现安全可靠性至关重要。

在设计时要考虑施力后能保证整个晶闸管器件中心对齐，还要考虑在后期器件更换的方便性，以及整个结构的强度。经过强度校核，碟簧最适合用在这种施力结构中。设计时按照晶闸管受力要求，选取合适碟簧，根据碟簧受力前后的变形量，再设计合适的碟簧顶杆与碟簧轴套。装配时，叠好晶闸管后，使用专用支撑件卡入夹具特制的卡槽内，将液压千斤顶放置在夹具下面开始加压。压力达到设计值后拧紧螺母，加压即完成。检修维护时，倒序操作，对碟簧组件泄压，即可更换晶闸管。

4.2 阀基座

阀基座是由底座、支柱绝缘子和安装板组成，底座由一定强度的结构钢焊接而成，其强度足以支撑整个阀组的重量，在槽钢底座下表面焊接了用于安装固定的结构件，并且在底座的适当位置焊接了阀基座接地螺钉。支柱绝缘子采用新型的复合绝缘子，具有质量轻、强度高和寿命长等优点，绝缘子安装在底座和安装板之间，作用是保证阀基座对地的绝缘水平，本工程支柱绝缘子的绝缘水平选取为10 kV电压等级。

4.3 阀体结构图

融冰装置晶闸管阀外形结构如图10所示。

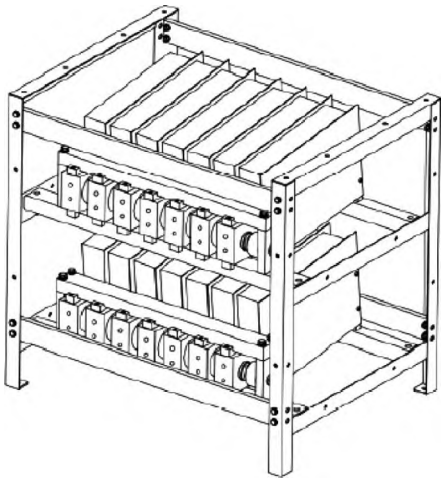

图 10　移动式直流融冰装置晶闸管阀外形结构

Fig. 10 Outline structure of thyristor valve of mobile DC ice-melting device

整套晶闸管阀由6个单阀组成，为了节省空间且便于交直流侧接线，将6个单阀分成三组布置，如图11所示。

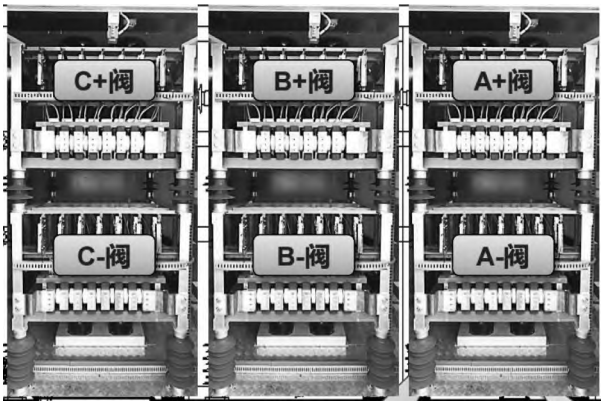

图 11　移动式直流融冰装置晶闸管阀整体布局

Fig. 11 Overall layout of thyristor valve of mobile DC ice-melting device

5　阀控系统设计

融冰装置晶闸管阀控系统主要由主控制器、阀基电子设备（Valve Base Electronics，VBE）和晶闸管控制单元（Thyristor Control Unit，TCU）组成，其结构如图12所示。

为了增强融冰装置晶闸管阀控系统的抗干扰能力，图12中主控制器和VBE以及VBE和TCU之间全部采用光电隔离，光缆允许最大长度可达180 m。

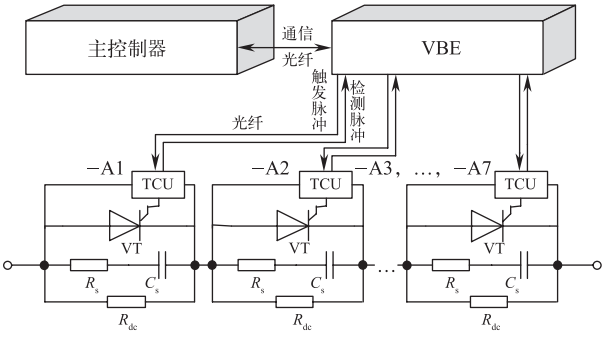

图 12　移动式直流融冰装置晶闸管阀控保系统

Fig. 12 Control and protection system of thyristor valve of DC ice-melting device

TCU根据接受的触发命令完成对本级晶闸管触发。VBE接受融冰装置主控制器下发的触发命令，编码后发送给TCU，具体信号为：以AB线电压为同步信号，在该信号的60° 开始计数，经过触发角α电角度时，向VT1发送双脉冲信号；再经60° 电角度时，向VT2发送双脉冲，依次类推。TCU收到双脉冲信号后向晶闸管发送触发命令，对应的单阀导通。

从每个单阀的双脉冲信号发出后开始计数，达到120°电角度时，VBE向对应单阀的TCU发送单脉冲信号。双脉冲和单脉冲之间TCU具有“重触发”功能，即如果晶闸管阳极和阴极之间产生电压，则TCU向晶闸管补发触发脉冲信号。由于六脉动晶闸管阀必须有两个单阀同时导通才能形成电流通路，因此，“重触发”是阀组正常工作的必要条件。另外，如果晶闸管在通流区间意外关断，“重触发”功能能够保证电流尽快恢复。

TCU收到单脉冲信号后，如果晶闸管两端存在电压（代表晶闸管没有击穿，仍具有电压阻断能力），则向VBE返回一个单脉冲，表示晶闸管正常。若晶闸管阀出现异常，VBE没有收到TCU返回的晶闸管状态信息，将采取相应的报警、请求跳闸等措施。

融冰装置晶闸管阀触发/回报信号如图13所示。

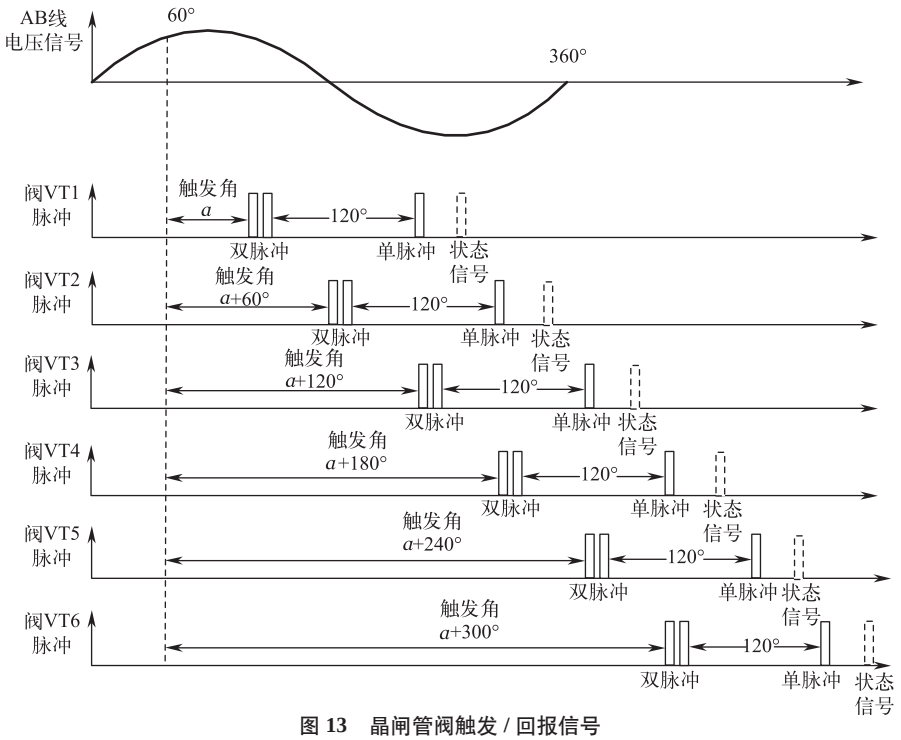

图 13　晶闸管阀触发 / 回报信号

Fig. 13 Trigger/return signal of thyristor valve

6　试验验证及现场应用

6.1　型式试验

为了验证10 kV/2 000 A融冰装置晶闸管阀的整体性能，开展了型式试验，包括低压触发试验、高压绝缘试验、运行试验和温升试验四大类，试验项目见表2。

表 2　试验项目

Tab. 2　Test items

试验类型	序号	试验名称
低压试验	1	均压电阻值、电容值测量
	2	低压静态均压试验
	3	低压触发及回报试验
高压绝缘试验	4	阀支架直流电压试验
	5	阀支架交流电压试验
	6	阀支架雷电冲击试验
	7	阀直流电压试验
	8	阀交流电压试验
	9	阀操作冲击试验
运行试验	10	高压运行试验
温升试验	11	2 400 A 直流电流 2 h 运行

本套晶闸管阀通过了全部型式试验项目，说明阀设计合理，满足工程应用需求。

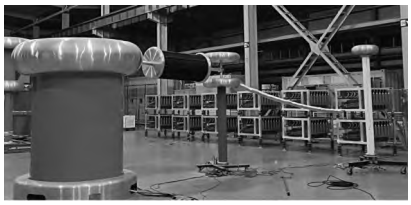

图 14　阀体试验

Fig. 14 Thyristor valve test

6.2　现场试验

在融冰装置运抵现场并安装完毕后，需对融冰装置带电后的设备性能和控制保护功能进行现场调试，以确保融冰装置在冰灾来临时能够正常投入运行。

试验项目包括：①开关和刀开关不带电传动试验；②阀组低压触发回报试验；③空载升压试验；④大电流零功率及温升试验。

6.3　现场应用

2022年11月22日14:00，对贵州某220 kV变电站110 kV线路（线型LGJ-185/30，线路长度59 km）进行融冰装置实际融冰应用。融冰采用A相去，B相、C相回的方式，融冰装置经重量较小、轻便的非铠装高压电缆与线路连接，图15为

电缆与待融冰线路连接点。

图 15　融冰装置通过电缆与线路连接

Fig. 15 The ice-melting device is connected to the line by cable.

为保证整个融冰过程安全进行，对线路实行阶梯增流。电流从0升至200 A，持续10 min；200 A升至400 A，持续10 min；400 A升至600 A，持续30 min，最后输出直流电流850 A。融冰装置晶闸管阀触发角39.8°，热管散热器表面温度25 ℃（环境温度5 ℃）。持续运行120 min，全过程晶闸管阀运行稳定，噪声及电压、电流波形正常，导线温度由4 ℃升至33 ℃，融冰装置运行状况正常，监控后台数据如图16所示，融冰装置录波波形如图17所示。

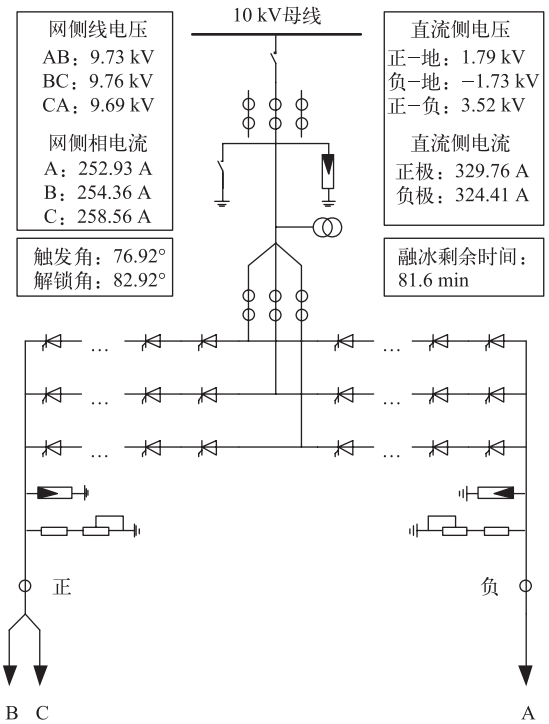

图 16　融冰装置监控后台数据

Fig. 16 Monitoring background data of ice-melting device

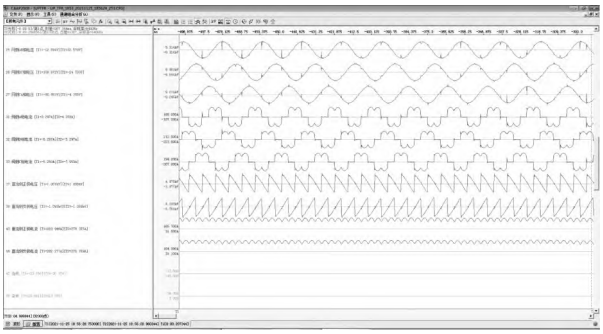

图 17　融冰装置工作时录波波形

Fig. 17 Waveform of wave recording when the ice-melting device works

图18为交流电流的谐波分量，可见六脉动融冰装置谐波电流发生量较高，以5次、7次、11次、13次等6k ± 1次特征谐波为主，使10 kV母线电压畸变率超标（7.61%，对应限值4%）。若增加滤波装置，成套装置体积将会成倍增加，便捷性降低，且变电站10 kV侧主要为无功补偿设备，不直接对用户供电，另外无功补偿设备均加装了串补避免谐波侵入，保证了设备的安全性。因此，融冰装置直接并网是安全可行的。

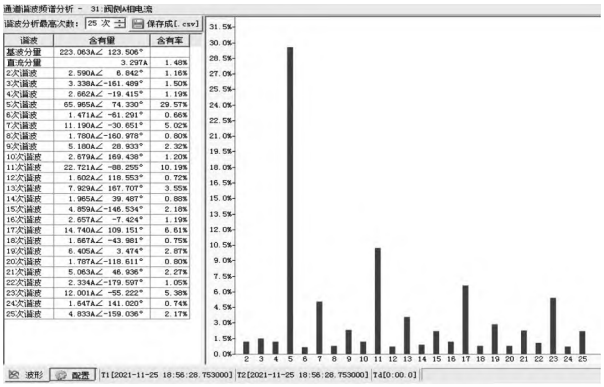

图 18　融冰装置交流侧工作电流谐波频谱

Fig. 18 Harmonic spectrum of AC side working current of ice-melting device

导线融冰完毕后，导线弧垂恢复正常，并于当日18: 00恢复送电。

7　结束语

结合融冰装置晶闸管阀需求，通过如下优化方案，设计出满足10 kV/2 000 A电气应力的晶闸管阀。

1）从融冰装置晶闸管阀系统优化角度触发，提出了晶闸管器件电压、电流等关键参数设计指标，具备充足、合理的电气裕度。

2）采用热管冷却方案，满足了最大通流条件下晶闸管的散热及结温控制要求。

3）采用空气绝缘、热管自然冷却、支撑式和二重阀结构，布局合理，结构紧凑。

4）采用光电隔离，脉冲编码模式，抗干扰能力强。

5）通过了低压触发、高压绝缘、运行试验和温升试验等全部型式试验项目。

6）通过工程现场应用证明了阀体的电气、触发、散热和监控系统全部正常，顺利完成了线路融冰。

综上所述，本方案设计的10 kV/2 000 A移动式直流融冰装置晶闸管阀性能优良，可靠性高，满足工程应用需求。

参考文献

[1] 温林海．直流融冰工作原理及接线模式探讨[J]．江西电力职业技术学院学报，2021，34(1)：7-8，11．

[2] 马晓红，赵立进，李巍，等．直流融冰技术在贵州电网的应用[J]．南方电网技术，2009，3(5)：107-110．

[3] 许树楷，杨煜，傅闯．南方电网直流融冰方案仿真研究[J]．南方电网技术，2008，4(2)：31-36．

[4] 许树楷，黎小林，饶宏，等．南方电网500 kW直流融冰装置样机的研制和试验[J]．南方电网技术，2008，6(4)：32-36．

[5] 李再华，白晓民，周子冠，等．电网覆冰防治方法和研究进展[J]．电网技术，2008，32(4)：7-13．

[6] 蒋兴良，马俊，王少华，等．输电线路冰害事故及原因分析[J]．中国电力，2005，38(11)：27-30．

[7] 蒋兴良，易辉．输电线路覆冰及防护[M]．北京：中国电力出版社，2001．

[8] 蒋兴良，张丽华．输电线路除冰防冰技术综述[J]．高电压技术，1997，23(1)：73-77．

[9] 李成榕，吕玉珍，崔翔，等．冰雪灾害条件下我国电网安全运行面临的问题[J]．电网技术，2008，32(4)：14-22．

[10] 苑吉河，蒋兴良，易辉，等．输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]．高电压技术，2003，30(1)：6-10．

作者简介

渠学景（1981—），男，工程师，主要研究方向为电能质量治理、电力电子装置研发等。

（收稿日期：2023-01-13）