

锡盟—泰州±800 kV/6 250 A特高压直流输电换流阀优化设计及型式试验

董意锋¹, 常忠廷¹, 胡永雄¹, 毛文喜¹, 王 梁¹, 董新晓¹

(许继集团, 河南 许昌 461000)

摘要: 锡盟—泰州直流输电工程是世界上首个将±800 kV直流输电容量由8 000 MW提升到10 000 MW, 额定电流提升至6 250 A直流输电工程。介绍了该工程泰州站6 250 A换流阀组件主要技术参数, 并重点介绍6 250 A换流阀电抗器通流的优化设计, 阻尼回路优化设计, 光纤冗余触发系统优化设计, 组件水路优化设计。优化后的±800 kV/6 250 A换流阀通过型式试验, 满足工程应用要求。

关键词: 高压直流输电(HVDC); 晶闸管换流阀; 优化设计; 型式试验

Ximeng—Taizhou ±800 kV / 6 250 A UHVDC converter valve optimization design and type testing

DONG Yifeng¹, CHANG Zhongting¹, HU Yongxiong¹, MAO Wenxi¹, WANG Liang¹,
DONG Xinxiao¹

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Ximeng—Taizhou HVDC project is the first worldwide DC power transmission project whose maximum rated current and power is up to 6 250 A and 10 000 MW. The main technical parameters of the converter valve is explained. The optimization design of converter valve reactor for raising electric current, optimization design of damping circuit, optimization design of optical fiber redundancy triggering system and optimization design of component waterway are mainly introduced. Optimized ±800 kV/6 250 A converter valve has passed the type test and can satisfy the engineering requirements.

Key words: HVDC; converter valve; optimization design; type test

0 引言

直流输电利用其长距离、大容量和低损耗的特性, 为建设坚强的智能电网、实现我国大范围资源优化配置、推动能源高效开发利用、建设节约型社会、促进经济社会可持续发展和全面建设小康社会提供着重要保障, 换流阀作为直流输电的核心部件, 其可靠性和稳定性决定着直流输电的可靠性和稳定性, 进而决定着供电的可靠性和稳定性。2017年9月30日, 锡盟—泰州±800 kV特高压直流工程通过168 h试运行, 全面建成投产。该工程是世界上首个额定容量达到10 000 MW、

受端分层接入500/1 000 kV交流电网的±800 kV特高压直流工程。受端泰州换流站与泰州特高压交流站合建, 泰州换流站分层接入500/1 000 kV交流电网, 即低端换流变压器接入1 000 kV电网, 高端换流变压器接入500 kV电网。图1为锡盟—泰州±800 kV直流输电工程系统图^[1-6]。

本文主要介绍了锡盟—泰州工程泰州换流站±800 kV/6 250 A特高压直流换流阀的优化设计工作, 包括晶闸管选型、单阀晶闸管级数计算、电抗器通流的优化设计、大电流下阻尼回路优化、光纤冗余触发系统优化设计和组件水路优化。

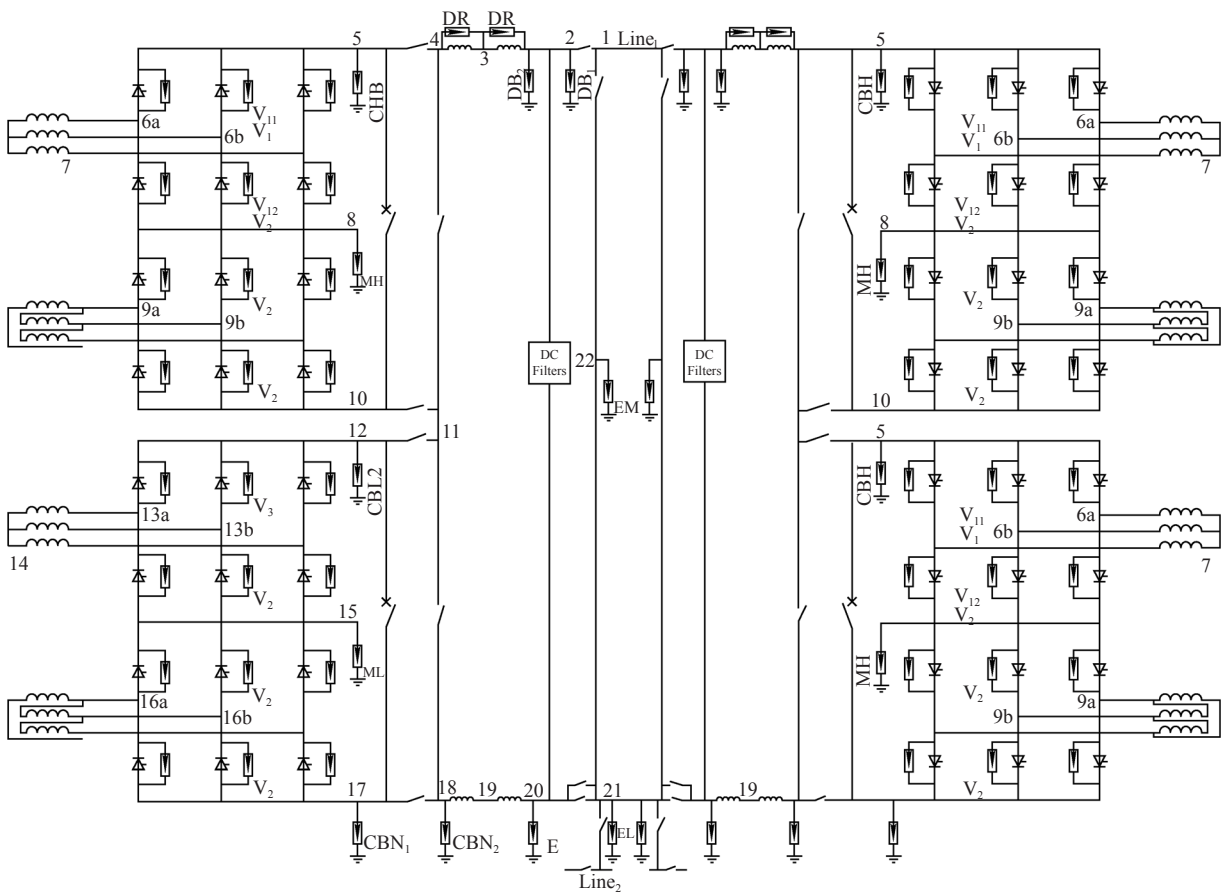


图1 锡盟—泰州±800 kV直流输电工程系统图
Fig.1 Ximeng—Taizhou ±800 kV HVDC project system diagram

1 换流阀主要技术参数

锡盟—泰州±800 kV直流输电工程，每个换流站包括4个12脉动换流器。额定电压为800 kV，最高运行电压为816 kV，额定电流为6 250 A。锡盟通常为整流运行，泰州通常为逆变运行。泰州站换流阀主要参数如表1所示。

表1 换流阀主要参数
Table 1 Main parameters of converter valve

项目	数量
双重阀数量	24
单阀的数量	48
每个单阀中组件的数量	6
每个组件中晶闸管数量	12/11
每个单阀内电抗器数量	12
每个单阀中晶闸管级的数量	70
每个单阀中冗余晶闸管级数	3

锡盟—泰州工程中采用6英寸电控晶闸管^[7]，其主要参数为：短路电流为63 kA， $V_{RRM}=7\ 500\text{ V}$ ；额定电流为6 250 A。换流阀采用模块设计，晶闸管组件是换流阀设计的最基本单元。每个晶闸管组件包含12/11个串联的晶闸管级。每个晶闸管配备有阻尼和均压回路，以及控制和保护晶闸管的控制电子设备（TCE）。每个晶闸管组件串联有两台饱和电抗器。图2为晶闸管组件的等效电路图。

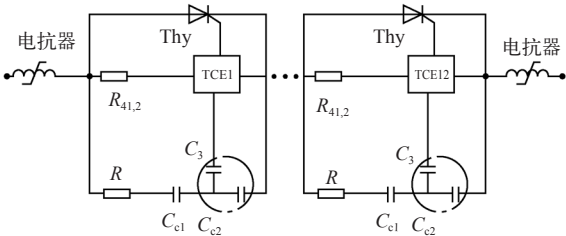


图2 晶闸管组件的等效电路图
Fig.2 Electrical schematic diagram of vavle module

触发系统同时为各个晶闸管提供了正向的保护触发功能。反向时, 阀避雷器与均压回路相配合, 保护晶闸管免受过高电压的损坏。在任何运行条件下, 每个晶闸管上的电压应力小于其本身的电压能力, 晶闸管上的电压平均值等于整阀电压的最大值除以串联晶闸管数 n_t 。因此最小晶闸管串联数为

$$n_{\min} = V_{\text{SPL}} k_s k_{\text{ims}} / V_{\text{RSM}} \quad (1)$$

式中, V_{SPL} 为阀避雷器操作冲击保护水平; k_{ims} 为绝缘裕量, 取1.10; k_s 为操作冲击时的不均压系数, 取1.07; V_{RSM} 为晶闸管复反向电压峰值, 7 500, 泰州站, 取 $n_{\min}=67$; 泰州站一个单阀的串联晶闸管数 n_t 为70, 其中冗余晶闸管数为3。

均压回路包括与晶闸管并联的RC阻尼回路、直流(DC)均压电阻, 以及与晶闸管组件串联的饱和电抗器。均压回路的作用是保护晶闸管免受暂态电压的损坏, 在各种电压条件下, 实现阀内电压的均匀分布。RC阻尼回路主要使晶闸管间的电压分布均匀, 为TCE提供电源, 限制阀关断时的换相过冲, 尽量使整个单阀内电压分布均匀。电容选取时, 在吸收晶闸管阀换相过电压的前提下, 使换流阀的损耗最小。阀内的换相过冲是由于一个6脉动阀内其他阀关断而产生的。选取的电容量, 一定要确保能够阻尼换相过冲。阀阻尼电阻的计算公式为

$$R_1 = k_{\text{RI}} \sqrt{\frac{L_X}{n_t C_1}} \quad (2)$$

式中, L_X 为换相电感; k_{RI} 为比例系数; n_t 为每阀中晶闸管数量; C_1 为阻尼电容, 锡泰工程按照 $R_1=30 \Omega$, $C_1=1.8 \mu\text{F}$ 选取。

2 换流阀设计优化

(1) 阻尼回路和均压回路优化

RC阻尼电路主要考虑以下方面。

阻尼电阻插在散热器中, 能够获取充分的冷却并节省空间, 提高了电阻的效率和可靠性, 降低了损耗。

DC均压电阻主要为TCE提供运行和保护信息, 低频电压下, 实现晶闸管间的均压, 电阻的

选取比较简单, 电阻值取决于晶闸管两端所允许的最高电压和TCE测量装置的电流限值, 按照 $R_{\text{DC}} \geq V_{\text{DSM}} / I_{\text{max}}$ 选取, V_{DSM} 为晶闸管两端的最高电压; I_{max} 为晶闸管两端最大漏电流; R_{DC} 为直流均压电阻, 72 k Ω 。直流均压电阻采用成对设计, 分别固定散热器表面, 采用水冷散热, 相比采用空气冷却的直流均压电阻, 消除发热隐患。

(2) 饱和电抗器优化: 由于特殊的运行环境性对电器部件的可靠性要求极高。饱和电抗器的脉冲特性、匝间绝缘、承受浪涌电流能力以及温升等都有极高的要求, 为此在设计中采用了高绝缘强度的水冷线圈, 高导磁超薄取向冷轧硅钢片, 具有高机械强度和绝缘强度的外壳, 加上全密闭灌封树脂结构, 有效地降低了噪声, 提高了承受浪涌电流的能力, 整个造型美观, 结构简洁合理。气隙铁心式电抗器在工作中噪声较大, 是换流阀运行中的主要噪声源。在设计饱和电抗器时充分考虑到这一点, 采用了专用的弹性体材料, 将电抗器的线圈和铁心浇注为一体, 既起到把线圈和铁心的相对位置固定的作用, 又能起到降低噪声的作用。图3为饱和电抗器内部结构。

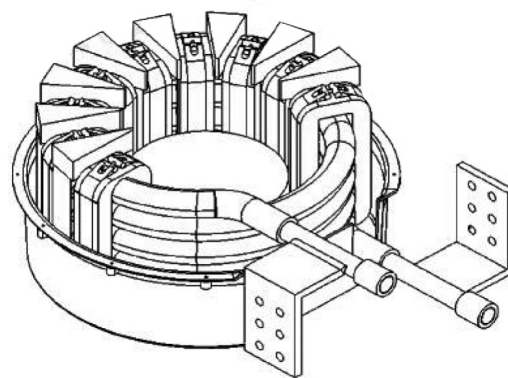


图3 饱和电抗器内部结构

Fig.3 Inner structure of saturable reactor

饱和电抗器是换流阀设计的核心设备^[8-13], 主要为晶闸管承受陡波冲击电压时, 限制晶闸管上产生的电压应力, 限制 du/dt 开通电流, 使阀内的电压分布均匀。饱和电抗器在运行过程中, 吸收换流阀开通或关断时承受的冲击电压, 在几毫秒和数十毫秒间完成磁不饱和与磁饱和状态的转化, 电流也在几十安培到额定几千安培之间转

化。电抗器的饱和特性是最关键的电气参数之一，根据现有晶闸管制造工艺，饱和时间要求大于 $2\text{ }\mu\text{s}$ ，从而避免晶闸管因 di/dt 过高而损坏，设计时应考虑一定的设计裕度。

电压时间面积是饱和电抗器的关键参数，对换流阀的安全运行起着关键作用，采用冲击装置接电抗器负载测试其电压电流来得到其伏秒特性。计算电压时间面积 $\int_0^T U dt$ 。时间零点为电压波形最后一次过零点的时刻， T 为电流从0开始至电流拐点之间时间。饱和电抗器由于铁心具有饱和特性，即激励电流大到一定程度后，电抗器提供的磁链数就不再线性增长，而是增长非常缓慢，进入到饱和状态直至铁心全饱和，必须对伏秒数特性进行有效测试。

随着直流电流逐步提升到 $6\text{ }250\text{ A}$ ，通流器件的设计裕度越来越小，阀组件的通流母排发热问题也随之出现，依据国家电网运检部发布的数据，2014年入夏以来，因接头发热导致特高压直流临时停运9次，对输电可靠性造成了严重影响。

国内部分采用大组件结构换流阀接头发热部位集中在电抗器接头处，自2014年6月以来，因电抗器接头发热导致4次停运，根据现场红外测温发现，电抗器载流接头过热至 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，有的甚至达到 $138\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，停运后检查接头表面导电膏有干结、粉化现象，如图4所示。发热接头电阻在 $13\text{ }\mu\Omega$ 以上（最高为 $30.5\text{ }\mu\Omega$ ）。



图4 电抗器连接铜排表面干结示意图

Fig.4 Conducting paste dry knot schematic diagram of reactor connection busbar

在锡盟—泰州工程泰州站换流阀设计中充分考虑了主通流回路的接头发热情况，通过对结构

材质、表面粗糙度、表面压紧力及表面处理形式等多方面进行深入研究和试验，确保换流阀在额定负荷下接头温度处于正常范围。换流阀载流接头具有下述设计优化：各载流接头之间采用双铝排软连接，如图5所示，而传统技术换流阀采用单排连接。双铝排能够大大降低接触面的载流密度，有效避免过热。泰州站 $6\text{ }250\text{ A}$ 换流阀电抗器连接铝排接触面积为 $100\times 160\times 2\text{ mm}^2$ ，去除螺栓固定孔面积后，载流密度为 0.12 A/mm^2 ，低于其他换流阀厂家的载流密度。传统的电控大组件 $5\text{ }000\text{ A}$ 电抗器此处的载流密度则高达 $0.4\sim 0.5\text{ A/mm}^2$ 。泰州站 $6\text{ }250\text{ A}$ 换流阀其他通流主回路的载流密度为 0.072 A/mm^2 ，均小于技术规范要求的铝—铝接触面电流密度控制在 0.078 A/mm^2 以内的技术指标。

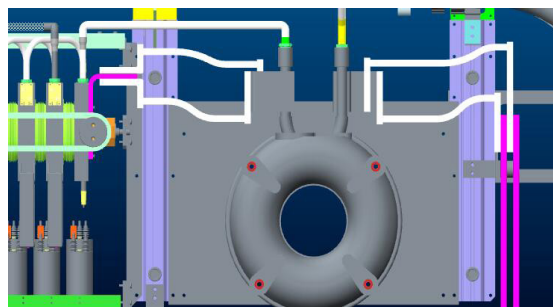


图5 电抗器与阀塔主载阀组件及阀组件通流母排连接
Fig.5 Reactor busbar with vavle tower current-carrying busbar and vavle module connection schematic diagram

(3) 光纤冗余触发系统设计

阀控电子设备VCE与晶闸管级的触发通道采取了冗余触发通道。锡泰工程结合其他直流工程设计，组件触发光纤采用一个光分配器MSC，如图6所示；阀控电子设备VCE同时发送两路激光信号至光触发分配器，正常情况下，只要一路激光信号正常就可实现对晶闸管控制电子设备TCE的可靠控制，实现了触发系统的冗余，光触发分配器接收到激光信号，混合均匀后分配给晶闸管组件的各级晶闸管，每个单阀上TCE到阀控电子设备之间的触发光纤数量减少了82.8%，只需相应增加从TCE到VCE光纤 $0.8\sim 2\text{ m}$ 短光纤，大大降低了光纤长度和光通道衰减，增加了触发光纤的可靠性。

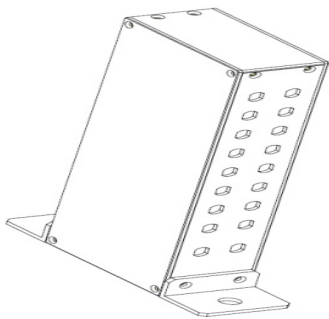


图6 光触发分配器

Fig.6 Multi star coupler

(4) 组件水路优化设计

采用的是串并联水路，水管接头的数量少；管路直径大，不易堵塞；散热器交叉串联，电位差小，漏电流小；所有的冷却水管的接头都在组件的外侧，与各个散热器相连的分支水管带有法兰，易于阀的维护；散热器水管接头内置不锈钢电极，可以避免电解电流流经散热器的表面对其造成腐蚀。串并联水路设计克服了并联水路结垢和串联水路散热效果差的缺点。图7给出了组件中冷却水的流动情况。

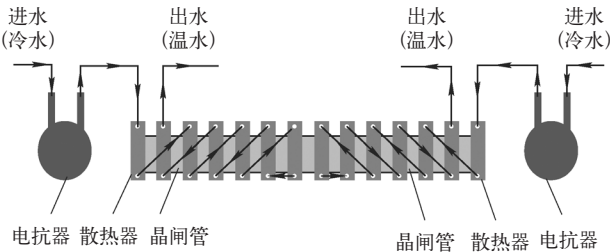


图7 晶闸管组件中的冷却水流向

Fig.7 Water-cooled flow direction of vavle module

饱和电抗器采用冷却水直接冷却。冷却水流进电抗器，直接冷却电抗器线圈，这样可以保证在各种条件下饱和电抗器都能得到充分冷却。由于晶闸管组件内采用的是串并联水路，而散热器之间存在电位差，水管中会出现微小的漏电流。为了防止对铝散热器造成腐蚀，每个散热器的进出水口均设计有不锈钢电极。

3 型式试验验证

锡泰工程换流阀按照在IEC 60700-1标准规定的型式试验成功通过的验收标准。型式试验包括绝缘试验和运行试验。

(1) 绝缘试验

绝缘试验主要检验阀支架相关绝缘件的电压耐受能力、多重阀单元的外绝缘和单阀之间电压耐受能力、单阀的电压特性设计是否合理等^[11-14]。锡泰工程泰州站阀支撑、多重阀单元和单阀绝缘型式内容及其试验参数如表2所示。

阀悬吊结构试验的试品为一个完整的双重阀，包含阀支撑结构、光通道和冷却水路等。试品是高、低电位12脉动桥的阀悬吊/支撑结构部分，包括冷却水管、光通道、悬吊结构、电晕屏蔽罩和所有正常运行时阀的其他组件。试验时，MVU主端子将被短接在一起，主端子与地之间施加试验电压。试验中应设置阀外杂散电容，以便模拟它们对受试阀支撑结构的电压分布所产生的最不利的影响。阀悬吊结构的直流耐压试验、交流耐压试验分别如图8、图9所示。冲击试验如图10所示。

表2 绝缘型式试验项目及参数

Table 2 Items and parameters of dielectric type test

试验对象	直流耐压试验/kV	交流耐压试验/kV	操作冲击试验/kV	雷电冲击/kV	陡波冲击/kV
阀支撑	高电位12脉动桥： 979.2/1 min; 795.6/3 h 低电位12脉动桥： 326.4/1 min; 265.2/3 h	325/1 min; 221.2/3 h	高电位12脉动桥： ±1 250 低电位12脉动桥： ±565.0	高电位12脉动桥： ±1 400 低高电位12脉动桥： ±657.0	高电位12脉动桥： ±1 400 低高电位12脉动桥： ±657.0
多重阀单元	1 305.6/1 min; 1 060.8/3 h		±1 675	±1 870	±1 870
单阀	干试：±320/1 min; ±160/3 h; 湿试：±320/1 min; ±160/5 min	275.1 kV/15 s 199.3/30 min	±446	±440	±480

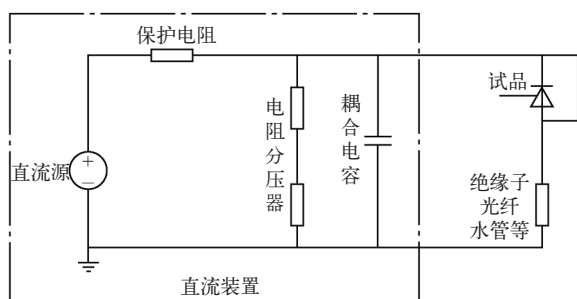


图8 阀支撑直流耐压试验电路

Fig.8 Circuit of DC withstand voltage tests for valve support

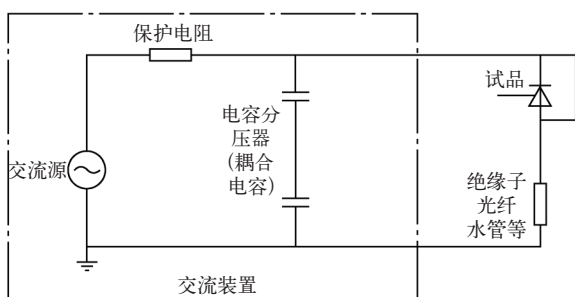


图9 阀支撑交流耐压试验电路

Fig.9 Circuit of AC withstand voltage tests for valve support

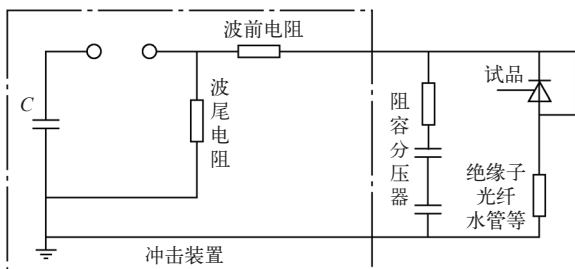


图10 阀支撑冲击电压试验电路

Fig.10 Circuit of impulse voltage tests for valve support

对于特高压换流阀，受试验场地限制无法完成全部阀塔安装，一般采取双重阀串等效负载作为试品的试验方式，直流耐压试验采用阻性负载，操作冲击电压试验采用容性负载，雷电和陡波冲击电压试验采用阻感负载，试验中的双重阀除避雷器以外，包括所有晶闸管级的阻尼电容、阻尼电阻、阀电抗器、冷却水管、光通道、避雷器机架、悬挂结构、电晕屏蔽罩和所有正常运行时多重阀单元的其他组件。多重阀直流耐压试验如图11所示，冲击试验如图12所示。

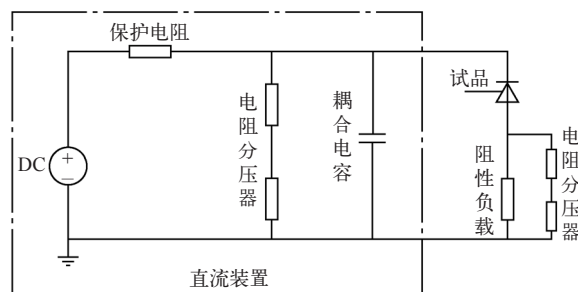


图11 多重阀直流耐压试验

Fig.11 Circuit of DC withstand voltage tests for MVU

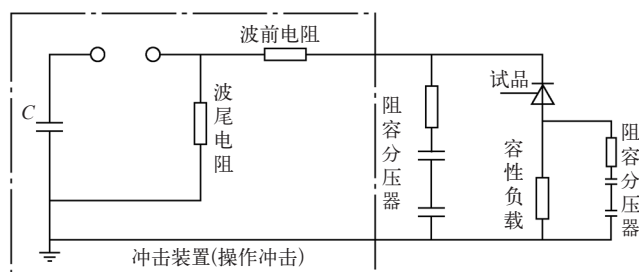


图12 多重阀冲击试验

Fig.12 Circuit of impulse voltage tests for MVU

阀的绝缘试验旨在检验所设计的阀在各种过电压下（直流、交流工频、操作冲击、雷电冲击、陡波头冲击过电压以及非周期触发）的特性。受试阀应包括与处于地电位的元部件相连接的冷却设备和控制设备，其中冗余晶闸管级全部短路（只在“非周期触发试验”中包括冗余晶闸管级），试验中不包括阀避雷器。试验中附加阀电路的杂散电容，并围绕阀支承结构合理设置接地屏蔽，以模拟附近建筑物中的钢结构、接地网和其他任何结构物的影响，这些结构主要影响受试结构对地的杂散电容。在进行冲击电压试验时，晶闸管的控制保护板TCE预先充电，确保TCE正常工作。单阀直流耐压、交流耐压、操作冲击、雷电冲击和陡波冲击分别如图13～图17所示。

非周期触发试验的主要目的是验证晶闸管和辅助电子电路耐受极端电压和电流的能力，试验模拟使用条件下的分布电容和阀避雷器的作用，并在最高电压时由正常的门极触发将晶闸管开通。晶闸管将承受最高电压和大电流应力作用。试验将采用并联电容器法，试验过程中试品阀与辅助阀上施加取能电源，并利用阻容回路调节试

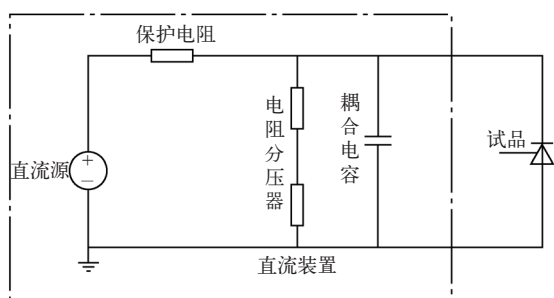


图13 单阀直流耐压试验电路

Fig.13 Circuit of DC withstand voltage tests for single valve

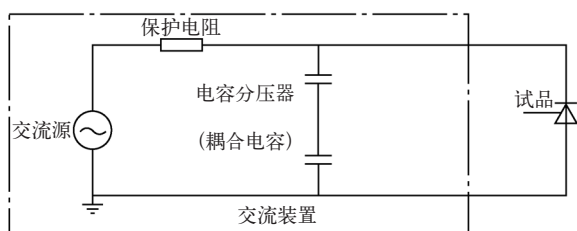


图14 单阀交流耐压试验电路

Fig.14 Circuit of AC withstand voltage tests for single valve

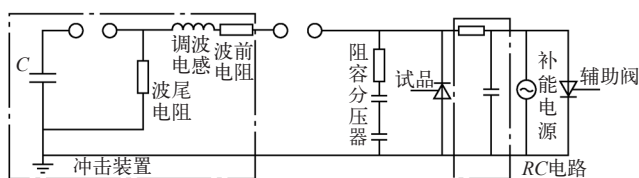


图15 单阀操作冲击试验

Fig.15 Switching impulse voltage test for single valve

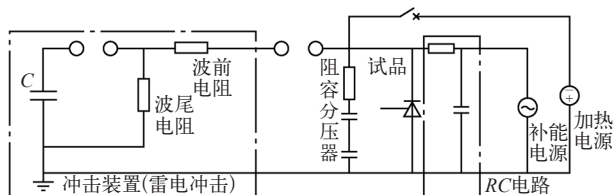


图16 单阀雷电冲击试验

Fig.16 Lightning impulse voltage test for single valve

品阀导通电流幅值，冗余晶闸管不需要短接。试品上施加5个正极性的操作冲击电压，试验电压(峰值)为423.4 kVpk，波形为(250/2 500) μ s。

晶闸管阀在一个低于保护触发水平的电压下触

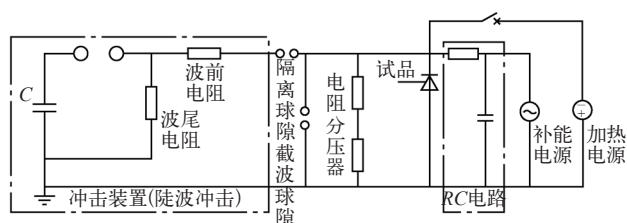


图17 单阀陡波冲击试验

Fig.17 Steep wave impulse voltage test for single valve

发，大约等于冲击电压耐受试验期间确定的晶闸管阀承受的最小操作冲击电压。阀触发时的电流模拟晶闸管阀保护触发动作时产生的最大触发电流应力。非周期触发的试验如图18所示。

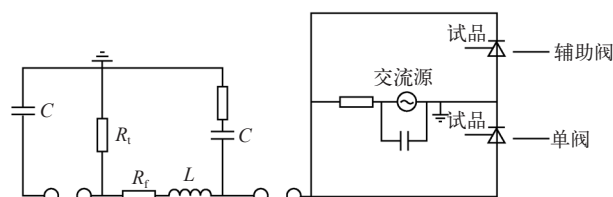


图18 单阀非周期触发试验电路

Fig.18 Circuit of non-periodic firing test for single valve

(2) 运行试验

运行试验在组成一个单阀的阀组件上进行。选取组件5级以上晶闸管进行；泰州换流站换流阀采用6级晶闸管进行试验；该试验是为了验证所设计的换流阀在所规定的正常运行条件和过负荷运行条件，以及非正常运行条件和故障暂态运行条件下的运行性能，确保阀的各项功能完善。运行试验系统主要由电压源、电流源、冲击电压源和短路电流源4个部分和辅助控制阀构成，主回路结构如图19所示，运行试验项目及参数如表3所示。

最大持续触发和恢复电压试验波形以及恢复期正向暂态电压试验如图20、图21所示。

换流阀具有承担额定电流、过负荷电流及各种暂态冲击电流的能力。6 250 A换流阀能够承受以下故障：交流侧与直流侧接地故障、阀短路、交流系统故障和逆变换向失败（未造成阀损坏或阀特性永久性改变）。出现最严重的暂态电流冲击时，即短路电流流过另外一个阀，阀设计为能闭

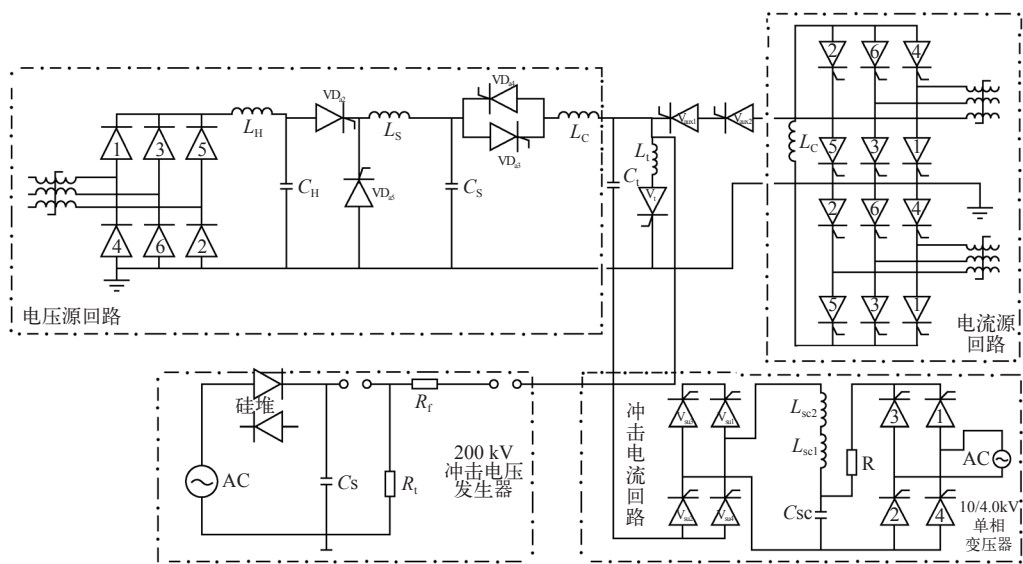


图19 运行试验系统原理图
Fig.19 Schematic diagram of operation testing system

表3 运行型式试验项目及参数
Table3 Items and parameter of operation type test

试验项目	运行试验参数
最大连续运行试验	$I_d \geq 6\,690\text{ A}$; $U_f \geq 17.0\text{ kV}$; $U_r \leq -18.48\text{ kV}$; $T=60\text{ min}$
最大暂态运行负载试验	$I_d \geq 1\,999\text{ A}$; $U_f \geq 24.86\text{ kV}$; $U_r \leq -32.32\text{ kV}$; $T=10\text{ s}$
最小延迟角试验	$I_d \geq 6\,690\text{ A}$; $U_f \leq 3.72\text{ kV}$; $T=15\text{ min}$
最小熄弧角试验	$I_d \geq 6\,690\text{ A}$; $U_r \leq -5.53\text{ kV}$; $T=15\text{ min}$
暂态欠电压试验	$I_d \geq 6\,690\text{ A}$; $U_f \leq 1.5\text{ kV}$; $T=10\text{ s}$
直流断续试验	$I_d \geq 6\,690\text{ A}$; $U_f \geq 24.86\text{ kV}$; $T=10\text{ s}$
单周波故障电流试验	短路电流 $\geq 58.8\text{ kA}$;
三周波故障电流试验	短路电流 $\geq 62.1\text{ kA}$
恢复期正向暂态电压试验	$I_d \geq 6\,690\text{ A}$; 冲击电压 $\geq 36.3\text{ kV}$; 恢复电压 4.8 kV

锁，无后续闭锁时能够耐受3个周波的电流。换流阀间发生短路故障时，会出现最大的短路电流。
泰州站单阀承受带后续重复正向电压的单周

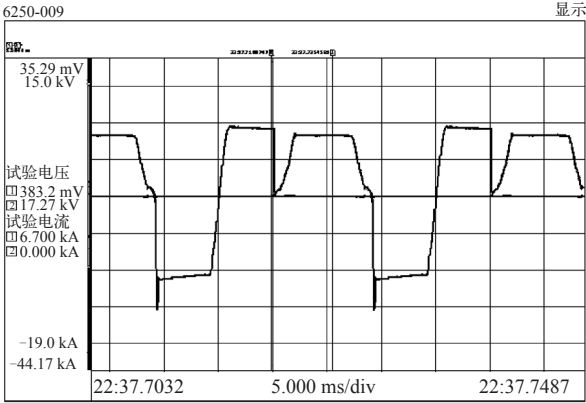


图20 最大持续触发和恢复电压试验波形
Fig.20 Test waveforms of maximum persistent firing

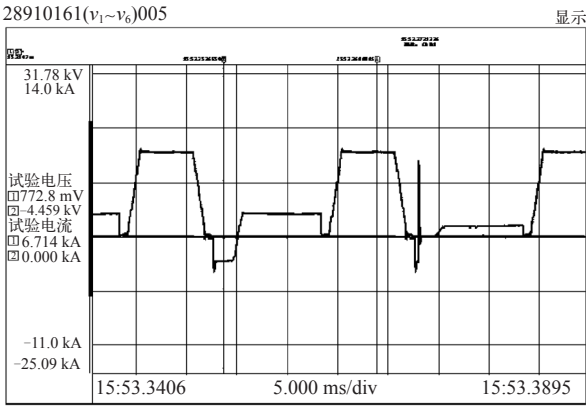


图21 恢复期正向暂态试验
Fig.21 Voltage and current waveforms at test of transient forward voltage applied during valve recovery period

波58.8 kA短路电流后设计为能够耐受259 kV的阻断电压。阀承受带后续闭锁电压的单周波短路电流试验波形如图22所示，试品的晶闸管级为6级。

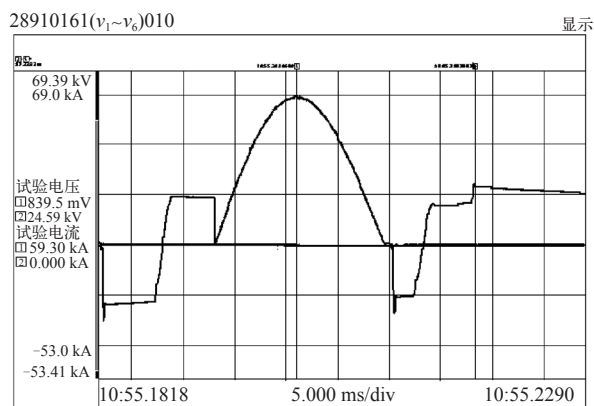


图22 带后续闭锁电压的单周波短路电流试验

Fig.22 One-loop fault current test with re-applied forward voltage

单级晶闸管承受的电压为

$$V_{fmax}=1.05 \times 259 \text{ kV}/67=4.06 \text{ kV} \quad (3)$$

式中，1.05为交流电压不均压系数。

泰州站高端所选用晶闸管在承受56.9 kA的短路电流后，其耐压能力为6.5 kV；低端所选用晶闸管在承受58.8 kA的短路电流后，其耐压能力为6.2 kV，满足要求。

4 结束语

1) 通过结构优化，阻尼电阻固定在散热器中，节省空间，与阻尼电阻采用水冷散热，大大减少了接头数量，降低了渗漏可能。直流均压电阻固定散热器散热，通过最大运行负荷试验，验证了散热的可靠性。

2) 饱和电抗器从设计、安装工艺和金具制造3个方面优化改进，降低了通流母排载流密度，含水路的母排也消除了通流母排发热的隐患。

3) 采用光纤冗余触发系统设计，降低了VCE-TCE触发光纤数量和长度，触发通道冗余设计，增加触发控制的可靠性。

4) 换流阀组件水路采用的是串并联水路，水管接头的数量少，每个晶闸管级散热均匀。

锡泰工程泰州换流站特高压直流换流阀各项

指标完全满足工程应用要求，提高了世界首条额定容量达到10 000 MW的±800 kV/6 250 A直流输电工程的运行可靠性。

参考文献

- [1] 汤广福. 高压直流输电装备核心技术研发及工程化[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 1-6.
TANG Guangfu. R&D and application of key technologies for HVDC equipment[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 1-6.
- [2] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
YUAN Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3.
- [3] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [4] 舒印彪. 中国直流输电的现状与展望[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2.
SHU Yinbiao. Present status and prospect of HVDC transmission in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 1-2.
- [5] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800 kV 6 400 MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
SHU Yinbiao, LIU Zehong, GAO Liying, et al. A preliminary exploration for design of ±800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6 400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8.
- [6] 郭焕, 曹均正, 汤广福, 等. ±1100 kV特高压直流换流系统主电路优化设计[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2383-2389.
GUO Huan, CAO Junzheng, TANG Guangfu, et

- al. Optimization design of main circuit of converter system for ± 1100 kV UHVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2383-2389.
- [7] 刘国友. 6英寸高压晶闸管的研制[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 90-92.
LIU Guoyou. Development of 6 inches high voltage thyristor[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 90-92.
- [8] 刘士利, 刘庆达, 孙刚, 等. 换流阀饱和电抗器铁芯硅钢片绝缘耐压分析[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(6): 8-11.
LIU Shili, LIU Qingda, SUN Gang, et al. Analysis of voltage stress on silicon-steel sheets of saturable reactor for HVDC converter valves[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2015, 35(6): 8-11.
- [9] 欧阳文敏, 肖万芳, 王治翔, 等. 800 kV/6 250 A 特高压直流换流阀的研制[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3196-3200.
OUYANG Wenmin, XIAO Wanfang, WANG Zhixiang, et al. Research and development of 800 kV/6 250 A UHVDC converter valve[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3196-3200.
- [10] 张雷, 苟锐锋, 刘宁, 等. 高压直流换流阀用饱和电抗器性能研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 46-50.
ZHANG Lei, GOU Ruifeng, LIU Ning, et al. Study on performance of saturable reactor used on HVDC converter valve[J]. High voltage Apparatus, 2017, 53(11): 46-50.
- [11] 才利存, 常忠廷, 李娟. ± 800 kV/6 250 A 锡盟—泰州直流输电工程换流阀合成运行试验[J]. 中国电力, 2016, 49(11): 20-24.
CAI Licun, CHANG Zhongting, LI Juan. Thyristor valve synthetic operational test of ± 800 kV/6 250 A Ximeng-Taizhou UHVDC project[J]. Electric Power, 2016, 49(11): 20-24.
- [12] 高压直流输电晶闸管阀第一部分: 电气试验: GB/T 20990.1—2007[S].
HVDC thyristor valves Part 1: electrical testing: GB/T 20990.1—2007[S].
- [13] 曹均正, 汤广福, 王高勇, 等. ± 1100 kV 特高压直流输电换流阀研制及型式试验[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 67-71.
CAO Junzheng, TANG Guangfu, WANG Gaoyong, et al. Design and type testing for the converter valve for 1100 kV UHVDC power transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 67-71.
- [14] 习贺勋, 汤广福, 刘杰, 等. ± 800 kV/4 750 A 特高压直流输电换流阀研制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 15-22.
XI Hexun, TANG Guangfu, LIU Jie, et al. Development of the ± 800 kV/4 750 A ultra high voltage direct current converter valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 15-22.

作者简介



董意锋

董意锋 (1984—), 男, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电设计及试验方案研究。

(收稿日期: 2018-06-25) **EA**