

## 高温缺水地区换流阀冷却系统的研究

刘重强, 张恩龙, 陈绪胜, 文玉良

(广州高澜节能技术股份有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:**基于传统的高压直流输电换流阀用密闭式循环水冷系统,结合高温缺水地区环境条件,研究采用冷水机组、蓄冷与空气冷却器组合的复合式冷却方式,并根据不同的环境温度给出了相应的冷却策略,对复合式冷却方式在不同环境条件下的应用进行分析,通过试验来验证分析结果,实现了根据进阀温度要求进行相对应的空冷器、制冷机组以及蓄冷罐放冷的逐级加载和反向卸载功能,使系统运行更加合理,逻辑控制更加直接,自动化程度更高,可靠性更强,提高了换流阀外冷设备对环境温度的适应性,保证了直流输电换流阀正常工作。

**关键词:**高温缺水; 冷却系统; 换流阀; 冷水机组

**中图分类号:** TM723

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)04-0054-05

### 0 引言

换流阀是直流输电工程的核心设备,换其核心部件是晶闸管<sup>[1,2]</sup>,它在运行时会产生大量的热,为保证元件的正常使用和防止其老化,需要对其配置冷却系统,进而保证换流站的正常运行<sup>[3]</sup>。目前国内外换流站晶闸管换流阀冷却方式有2种:水冷却方式和空气冷却方式。当采用水冷却方式时,一般采用冷却塔;当采用空气冷却方式时,一般采用空气冷却器<sup>[4,5]</sup>。然而在我国西部地区,存在着昼夜温差大、环境极限温度高、水资源匮乏等情况<sup>[6]</sup>,无论采用空气冷却器还是冷却塔设备都难以满足冷却系统正常运行要求。因此需要研究一种适用于高温缺水地区的换流阀冷却系统,它能够与现有的常温环境冷却设备、极端低温外冷设备形成互补,为高压直流换流阀冷却提供全套的解决策略,促进我国直流输电工程的发展。

### 1 密闭式循环冷却系统

冷却系统按照供水方式的不同可分为直流供水系统和循环供水系统<sup>[7]</sup>,按照运行方式可分为开放式系统和密闭式系统,按照冷却介质可分为普通水冷却系统和纯水冷却系统。从节能减排的角度以及对冷却介质的特殊要求来考虑,换流阀水冷系统一般采用密闭式循环纯水冷却系统<sup>[8]</sup>。它包括内冷系统、外冷系统、输配水系统及控制系统,其中内冷系统包括主循环冷却回路、去离子水处理回

路、稳压系统、辅助系统;外冷系统包括纯水软化装置、反渗透装置,空气冷却器、冷却塔;其主要工作原理如图1所示。冷却介质(主要为纯水)经主循环泵升压后,通过管道系统进入室外散热单元(空气冷却器或闭式冷却塔),与室外空气或水等冷媒进行热交换后进入换流阀,带出换流阀高功率密度器件热量,升温后的冷却介质流经脱气罐,回到主循环泵入口,形成密闭式循环冷却回路。部分冷却介质经离子交换器形成去离子提纯回路,保持冷却介质绝缘性。

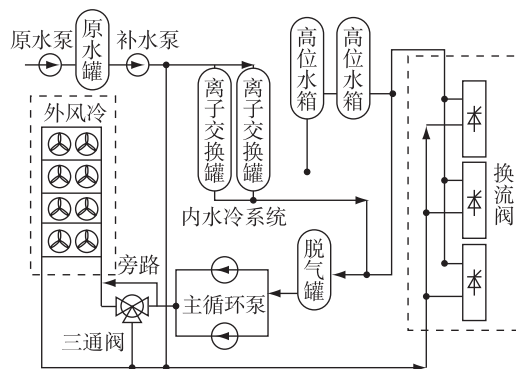


图1 换流阀密闭式循环纯水冷却系统工作原理图

Fig.1 Working principle diagram of closed circulation water cooling system of converter valve

### 2 外冷系统冷却策略

#### 2.1 闭式冷却塔

在我国南方地区直流输电换流阀外冷却设备一般选择闭式冷却塔<sup>[9]</sup>。在闭式冷却塔中,循环水流过管内,通过管壁将热量传给管外的喷淋水,喷淋水通过蒸发散热,将热量传递给空气。闭式冷却塔是将管式换热器置于塔内,通过管外流通的空气、喷淋水与管内的循环水换热,实现降温目的<sup>[10]</sup>。

收稿日期:2017-02-10;修回日期:2017-04-03

基金项目:广州市科技计划产学研协同创新重大专项(2015-08030019);广州市产学研协同创新重大专项(20160401-0006)

由于循环水是闭式循环,能够保证水质不受污染,很好地保护了主设备的高效运行,提高了使用寿命。

## 2.2 空气冷却器

换流阀外冷却设备所用的空气冷却器属于翅片管换热器,一般采用不锈钢无缝钢管和铝翅片,也称作空气冷却换热器,简称空冷器<sup>[11]</sup>。它由若干多支翅片管按照一定的排布规律排列而组成的,换热单元叫做翅片管束。翅片管束由3部分组成:翅片管、管箱和构架。它以环境空气作为冷却介质,风机强制空气横掠翅片管外,使管内高温工艺流体得到冷却或冷凝<sup>[12]</sup>。使用自然空气作为冷却介质,节约了宝贵的水资源,减少了工业污水的排放,保护了自然环境。

## 2.3 冷水机组制冷

换流阀外冷却设备涉及的范围包括换热器及其配套设备,当环境温度和散热器的目标温度的温差符合设定温度差时,外冷设备主要为冷却设备;否则需要增加制冷设备,那样外冷设备就变得较为复杂。制冷设备的冷水机组主要部件有:压缩机、冷凝器、干燥过滤器、气液分离器、膨胀阀、蒸发器以及控制仪表及控制元件<sup>[13]</sup>。工作时由压缩机排出的高温高压制冷剂气体进入冷凝器被冷凝成中温过冷液体,经低温膨胀阀节流降压变成低温低压的汽液两相混和物进入蒸发器,在其内蒸发并吸收流经蒸发器的载冷剂的热量,使流经蒸发器的载冷剂得以降温,制冷剂汽化后蒸汽再被压缩机吸入,不断循环,从而达到降温目的<sup>[14]</sup>。

## 2.4 组合式外冷却设备

电力行业中素有“削峰填谷”说法,即在电力需求量少的时候的电用于高峰期<sup>[15,16]</sup>。对于密闭式循环冷却系统的外冷换热也可采用削峰方式进行,其原理如图2所示。一般情况下的空气散热器设计温度按环境极限温度 $t_2$ 进行,冷却对象温度 $t_4$ ,假设散热设备设计温差为 $\Delta t$ ,则设计环境极限温度为 $t_2$ ;如冷却对象出水温度为 $t_3$ ,则按该设备冷却水温度设计的温差为 $\Delta t'$ ,设计环境极限温度为 $t_1$ ;采用制冷的方式将高于 $t_1$ 的热能散走,达到削峰目的。依据换流阀热阻分析,换流阀散热受节温和环境温度影响<sup>[17]</sup>,对于常规的换流阀 $T_j$ 是一定的, $T_a$ 存在最大值,如果夏季环境温度较高超过常规空气冷却器设计极限环境温度 $T_a$ 就会出现冷却能力不足。当环境温度较高且水资源较为缺乏时,无法单独采用空气冷却器或闭式塔满足换热和运行要求,本文提出一种空气冷却器加冷水机组冷却的组合冷却方式,可以很好适应高温缺水的使用环境。

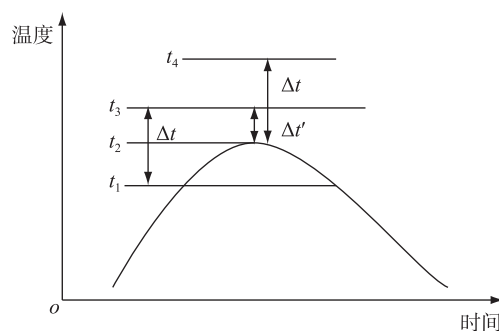


图2 设计方案温度状况

Fig.2 Design scheme of temperature condition

## 3 组合式外冷却设备的应用分析

### 3.1 运行原理

冷水机组辅佐空气冷却器典型配置原理如图3所示。冷却系统已经略去离子回路,在此基础上增加了风冷冷水机组进行辅助冷却。风冷冷水机组主要由压缩机、冷凝器、蒸发器、膨胀阀、缓冲罐、水泵和换热器组成。

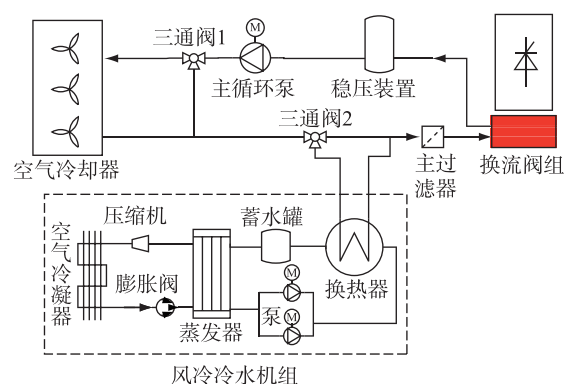


图3 冷水机组辅佐空气冷却器典型配置原理图

Fig.3 Chiller assisted air cooler typical configuration principle diagram

其工作原理及其过程为恒定压力和流速的冷却介质,经过主循环水泵源源不断地流经三通阀1,进入外冷设备(空气冷却器),将被冷却器件发出的热量在室外与空气进行热交换,冷却后的介质再进入换流阀,带出热量,回流到主循环泵入口,形成密闭式循环冷却系统。当环境温度高于某一设定值时,例如 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,空冷器无法完全满足冷却要求,冷水机组启动,调整三通阀2,风冷式空气冷却器满负荷运转,总负荷量余下的 $30\% \sim 70\%$ 由风冷式冷水机组完成。通过风冷式冷水机组冷却进一步降低冷却水的温度,以满足换流阀的进水温度要求。通过增加蓄冷装置可以实现高效节能。当夏天气温高于某一设定值时,例如 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,风冷式空气冷却器与冷水机组同时工作,剩下一部分冷却功率由蓄冷罐

提供,当夜间温度较低时,蓄冷罐将储存的热量释放到外界环境中。

### 3.2 系统控制

根据时间和环境温度工况建立控制策略,控制策略如图4所示。

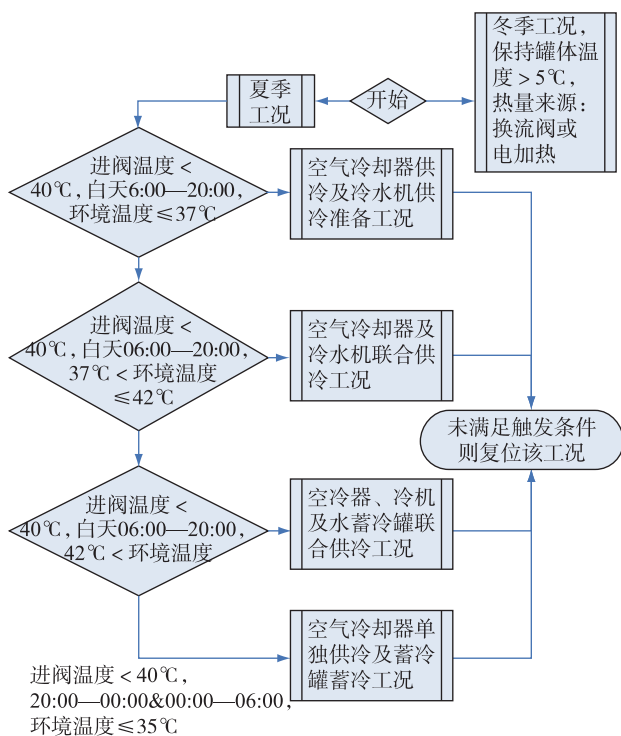


图4 控制策略

Fig.4 Control strategy

根据给定的控制策略,分别介绍不同模式下的外冷系统控制方式。

(1) 空气冷却器冷却及冷水机供冷。在本工况下,两级板式换热器热侧进口阀门关闭,两级板式换热器热侧旁通阀门打开,冷却水不经过板式换热器。冷冻水侧除了冷水机组供冷回路相应阀门在一定温度段打开外,其余冷冻水回路的阀门均保持关闭。若空气冷却器或水冷却系统出现故障,而其余空气冷却器全负荷运行,当进阀温度 $>40^{\circ}\text{C}$ 时,则立即进入冷水机组与蓄冷罐的联合供冷模式,并发出相应的故障报警信号,故障排除后返回原运行模式。

(2) 空气冷却器及冷水机联合供冷。在本工况下,蓄冷回路和水蓄冷罐供冷回路关闭;板式换热器冷侧的冷冻水进口阀门调节流量,通过PID表控制阀体进水温度 $35\sim 40^{\circ}\text{C}$ ;环境温度 $35^{\circ}\text{C}$ ,保持空冷器全开,打开第一级板式换热器热侧冷却水进口阀门,并关闭对应的旁通管道阀门,冷却水流经第一级板式换热器。

(3) 空冷器和冷水机组及水蓄冷罐联合供冷。

在本工况下,当环境温度 $40^{\circ}\text{C}$ ,保持空冷器和冷水机组供冷全满负荷运行,打开第二级板式换热器热侧冷却水进口阀门,并关闭对应的旁通管道阀门,冷却水流经第二级板式换热器;环境温度 $40^{\circ}\text{C}$ ,水蓄冷罐进出口阀门打开,释冷水泵开启,结合水泵旁通阀门和水泵变频调节流量,通过PID表控制阀体进水温度 $35\sim 40^{\circ}\text{C}$ ;并监测水蓄冷罐回水温度。监测水蓄冷罐内不同液位的冷冻水温度,计算并模拟显示水蓄冷罐内冷量的变化;在此工况下,蓄冷回路阀门关闭。

(4) 空气冷却器单独冷却及蓄冷罐蓄冷。在本工况下,换流阀冷却水仅通过空冷器散热;环境温度 $30^{\circ}\text{C}$ ,监测水蓄冷罐温度情况,如需蓄冷则开始进入蓄冷模式。通过阀门关闭切换使冷水机组串联,相应的蓄冷水泵串联。释冷水泵保持关闭,水蓄冷罐进出口阀门打开,蓄冷水泵开启,然后冷水机组启动;调节冷水机组启停和能量输出,PID监控水蓄冷罐下部进水温度 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ ;监测水蓄冷罐内不同液位的冷冻水温度,计算并模拟显示水蓄冷罐内冷量的变化;当水蓄冷罐出水温度(最高位置温度传感器)达到 $7^{\circ}\text{C}$ 后连续超过 $15\text{min}$ ,蓄冷结束。在此工况下,冷水机组供冷及水蓄冷罐供冷回路关闭。

## 4 结果分析

组合式外冷却设备连续运行情况如图5所示。测试时间是在广州的12月份,环境温度较低,而且受到热负荷装置最大容量为 $100\text{ kW}$ 的局限,实际测试时关闭了空冷器风机,主要对冷水机组供冷、蓄冷罐放冷进行了辅助冷却的测试。测试时根据实际环境温度对各模式工况进行了设定,即模式1对应环境温度为 $7\sim 10^{\circ}\text{C}$ ;模式2对应环境温度为 $10\sim 16.5^{\circ}\text{C}$ ;模式3对应环境温度为 $16.5\sim 35^{\circ}\text{C}$ ;模式4对应环境温度为 $0\sim 35^{\circ}\text{C}$ 。结合实际运行情况,人为投入合适大小的热负荷量,对各主要运行模式的冷却效果及自动控制进行测试,测试情况及结果基本正常。

通过对水冷装置实际连续运行试验测试,对个别模式下出现的问题进行了总结和调整,主要包括缓冲罐出水温度浮动问题,蓄冷水罐供冷时关于进阀温度和蓄冷罐回水温度控制问题,热负降低后模式卸载和模式退出控制问题,模式切换问题等。综合分析上述问题,拟对原定的4种模式进行整合,统一整合到一个新的模式下,避免主要依据环境温度分为多个模式控制复杂的情况,主要根据进阀温度

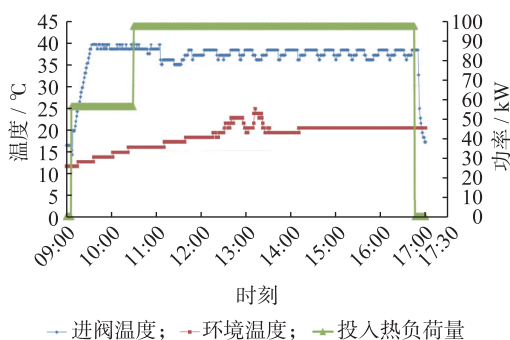


图5 水冷装置(广州12月份)连续运行试验

Fig.5 Continuous running test of water cooler (Guangzhou, December)

要求进行相对应的空冷、制冷以及蓄冷罐放冷的逐级加载和反向卸载功能,使系统运行更加合理,逻辑控制更加直接,自动化程度更高,可靠性更强。

## 5 结论

本研究解决了高温缺水地区大功率高压直流换流阀冷却技术难题,为我国西部地区的直流输电工程换流阀的正常运行提供保障。研究了采用冷水机组、蓄冷与空气冷却器等组合的复合式冷却方式,并根据不同的环境温度给出了相应的冷却策略,与现有的常温环境冷却策略、极端低温外冷冷却策略形成互补,为高压直流换流阀冷却提供的系列化、规范化、标准化的全套解决策略,提升了我国高压直流换流阀的技术性能,使我国的换流阀及其水冷设备能够走向国门,赶超国外的先进技术,参与世界范围内的直流输电市场竞争。

### 参考文献:

- [1] 李 侠, SACHS G, UDER M.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电用6英寸大功率晶闸管换流阀[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 1-5.  
LI Xia, SACHS G, UDER M.  $\pm 800$  kV UHVDC transmission with a 6 inch high power thyristor converter valve [J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2010, 46(6): 1-5.
- [2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2010.  
TANG Guangfu. Voltage source converter based hvdc power transmission technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [3] 刘 辉. 换流站换流阀冷却系统的选型研究[J]. 吉林电力, 2012, 40(1): 30-32.  
LIU Hui. Selection of cooling system of converter valve in converter station [J]. Jilin Electric Power, 2012, 40(1): 30-32.
- [4] 侯莉莉. 蒸发条件下包气带水热运移模拟研究[D]. 西安:长安大学, 2009.  
HOU Lili. Simulation of water and heat transfer in vadose zone under evaporation condition [D]. Xi'an: Chang'an

University, 2009.

- [5] 林 杉. 寒冷地区 HVDC 外水冷系统传热性能研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2015.  
LIN Shan. Study on heat transfer performance of HVDC external water cooling system in cold area [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [6] 董增川, 刘 凌. 西部地区水资源配置研究[J]. 水利水电技术, 2001, 32(3): 1-4.  
DONG Zengchuan, LIU Lin. Study on water resources allocation in Western China [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2001, 32(3): 1-4.
- [7] 石 诚, 余 平, 龙国庆. 1000 MW 超临界机组海水直流供水系统循环水泵配置方案的探讨[J]. 电力建设, 2008, 29(3): 54-55.  
SHI Cheng, YU Ping, LONG Guoqing. Discussion on the configuration scheme of circulating water pump for seawater supply system of 1000 MW supercritical unit [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(3): 54-55.
- [8] 薛海平, 赵森林, 卢亚军, 等. 特高压直流工程的融冰控制保护策略及试验分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 84-90.  
XUE Haiping, ZHAO Senglin, LU Yajun, et al. Analysis of control and protection strategy and test for de-icing mode in UHVDC project [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 84-90.
- [9] 戚 菲. 直流输电外冷水系统介绍及故障分析[J]. 科技展望, 2016, 26(22): 114.  
QI Fei. Introduction and failure analysis of DC cooling water system [J]. Science and Technology Prospect, 2016, 26(22): 114.
- [10] 邹昌宏. 冷却塔实用新型专利介绍[J]. 制冷与空调, 2014(1): 77-78.  
ZOU Changhong. Introduction of utility model for cooling tower [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2014(1): 77-78.
- [11] 刘撑庆, 高兴国. 化工装置斜顶空冷器安装施工工序及注意事项[J]. 化工管理, 2014(30): 201.  
LIU Chengqing, GAO Xingguo. The installation and construction of inclined air cooler in chemical plant [J]. Chemical Engineering Management, 2014(30): 201.
- [12] 陈晓环. 对空冷器管束结构设计、制造、检验问题的探讨[J]. 中国新技术新产品, 2012(24): 179-179.  
CHEN Xiaohuan. Discussion on the design, manufacture and inspection of air cooler tube bundle structure [J]. China New Technology and New Products, 2012(24): 179-179.
- [13] 沈小兵. 双压控制的空气源热泵系统[P]. 中国: CN104132487A, 2014.  
SHEN Xiaobing. Dual pressure controlled air source heat pump system [P]. China: CN104132487A, 2014.
- [14] 王 亮. 基于人工鱼群优化算法中央空调制冷系统优化研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.  
WANG Liang. Study on optimization of central air conditioning refrigeration system based on artificial fish swarm optimization [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.

- [15] 赵娟, 谭忠富, 李强. 我国峰谷分时电价的状况分析[J]. 现代电力, 2005, 22(2): 82-85.  
ZHAO Juan, TAN Zhongfu, LI Qiang. Analysis of TOU electricity price in China[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(2): 82-85.
- [16] 吴桥, 卢树峰, 杨世海, 等. 需求侧响应条件下的家庭用电管理研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(5): 28-31.  
WU Qiao, LU Shufeng, YANG Shihai, et al. Household electric power management under demand side response [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5): 28-31.
- [17] 倪汝冰. 换流阀冷却系统温度控制策略分析[J]. 工业, 2014(12): 80-81.  
NI Rubing. Analysis of temperature control strategy of converter valve cooling system [J]. Industry, 2014(12): 80-81.

作者简介:



刘重强

刘重强(1982—),男,湖北枣阳人,工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: liucq@goaland.com.cn);

张恩龙(1979—),男,山东单县人,高级工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: zhangel@goaland.com.cn);

陈绪胜(1974—),男,湖北天门人,工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: chenxs@goaland.com.cn);

文玉良(1972—),男,湖南邵阳人,高级工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: wenyyl@goaland.com.cn)。

文玉良(1972—),男,湖南邵阳人,高级工程师,研究方向为电力电子行业水冷系统新产品的研发(E-mail: wenyyl@goaland.com.cn)。

## Converter Valve Cooling System for High Temperature Water Shortage Area

LIU Chongqiang, ZHANG Enlong, CHEN Xusheng, WEN Yuliang

(Guangzhou Goaland Energy Conservation Technology Limited Company, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** The conventional HVDC converter valve closed cycle cooling system based on the combination of environmental conditions of high temperature and drought area, using composite cooling chillers, cold storage and air cooler combination, and according to the ambient temperature are given different cooling strategies accordingly, were used in the analysis of the different environmental conditions composite cooling method, the analysis result is validated through experiment, achieved the corresponding air cooler, refrigeration and cold storage tank cold loading and reverse unloading function according to the valve inlet temperature, make the system more reasonable and logical control is more direct, higher degree of automation, reliability, improve the cold exchange equipment valve of environmental temperature adaptability, to ensure the normal work of HVDC converter valve.

**Key words:** high temperature water shortage; cooling system; thyristor valve; water chiller

(编辑 徐林菊)

(上接第 47 页)

## Manufacture Factor Analysis and Effective Control of High Voltage XLPE Cable Breakdown

LU Ning

(Shandong Baoshida Cable Co. Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:** The high voltage cable, especially the extra high voltage XLPE cable in the transmission operation once the breakdown, will cause great damage to the power grid, causing great losses to the country. At the same time, enterprises in the manufacturing process, once the cable partial discharge standard value (PC value) exceeded, or even withstand voltage test breakdown, the economic losses caused to the enterprise is also very great. Based on the theory of electric breakdown, this paper analyzes and studies the manufacturing process of high voltage XLPE cable in theory and practice, and finds out the key points that lead to high voltage breakdown and partial discharge standard value exceeds. Such as: Conductor burr; Electrical conductivity of conductor semi conductive shielding tape; Bump and scratch of extruder die; Bump and scratch of extruder runner; Cleaning and storage of material; Number and size of micro pore in insulation layer, and internal stress in insulation layer and so on. Through the analysis of these easily overlooked, but also extremely important part of the manufacturing process, the control method is given, in order to achieve the purpose of reducing partial discharge and breakdown frequency, improve the overall quality of high voltage XLPE cable.

**Key words:** electrical tree; pointed end; convex; breakdown; partial discharge value; micropore; aureole; scorch

(编辑 刘晓燕)