

# SVC 纯水冷却控制系统研制<sup>\*</sup>

杨茂生, 姜周曙<sup>\*</sup>, 王 剑

(杭州电子科技大学 自动化研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**直流融冰为 500 kV 及以上高压电网融冰的唯一方法。针对高压输电线路融冰装置 SVC(静止无功补偿装置)的散热问题,通过对主流冷却方式、SVC 运行环境的研究,研制了一套基于 PLC、触摸屏、ModBus 通信的密闭式纯水冷却自动控制系统,实现了对 SVC 冷却的远程、就地自动控制,同时系统引入抗干扰技术,克服了周边恶劣的电磁环境的影响。应用结果表明该控制系统性能稳定、运行可靠,有效地保证了直流融冰装置的正常运行。

**关键词:**静止无功补偿装置;水冷却;抗干扰

**中图分类号:**TM7;TP273;TH39

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2011)02-0220-04

## Research of water-cooling control system for SVC

YANG Mao-sheng, JIANG Zhou-shu, WANG Jian

(Institute of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** DC based De-icing is the only way to melt ice for power grid 500 kV and above. In order to solve the cooling problem of de-icing device SVC, according to the research of mainstream cooling methods and system running environment, full-closed de-ion water-cooling system was designed. Based on PLC, touch screen and ModBus communication, the water-cooling system could be controlled locally and remotely. Anti-interference technology was also applied to the system to overcome the harsh electromagnetic environment. The running result indicates that the system is stable and reliable, ensuring the De-icing device running under the normal status.

**Key words:** static var compensator(SVC); water-cooling; anti-interference

## 0 引 言

直流融冰时母线上的电流可达几千安培,SVC 的核心部件晶闸管会迅速升温,以 ABB 公司晶闸管 5STP 42U6500 为例,当壳温由 70 ℃升高到 80 ℃时,器件工作时的通态平均电流  $I_T(AV)M$  由 3 460 A 下降到 2 840 A 左右,下降了 17%;而如果壳温继续上升到 90 ℃,则  $I_T(AV)M$  将进一步下降到 2 180 A,即额定电流下降了 37%<sup>[1]</sup>。此外,当结温由 50 ℃升高到 100 ℃时,器件 1 000 小时故障率(Failure rate/1 000 h)将由 0.001 提高到 0.1 左右,故障率提高近 100 倍<sup>[2]</sup>。因此,晶闸管有效的冷却是提高 SVC 寿命和可靠性的

至关重要的手段。2008 年 1 月份罕见的暴风雪给浙江电网带来了前所未有的灾难。浙江某 500 kV 变电所为应对冬季冰雪袭击时输电线路的融冰问题,设计了动态无功补偿装置(SVC)。

本研究通过对主流冷却方式、SVC 运行环境的研究,研制了一套密闭式纯水冷却自动控制系统,以高纯度、高制冷量为目标,实现了对晶闸管的高可靠性、高效率冷却控制<sup>[3]</sup>。

## 1 系统设计

冷却系统的基本任务是根据传热学的基本原理,为晶闸管设计一个热阻尽可能低的热流通路,使晶闸

收稿日期:2010-07-27

基金项目:浙江省科技计划资助项目(C31083)

作者简介:杨茂生(1984-),男,山西大同人,主要从事自动控制方面的研究. E-mail: ymshs@163.com

通信联系人:姜周曙,男,教授,博士,硕士生导师. E-mail: jiangzhou\_shu@163.com

管发出的热量尽快散发出去,从而保证其正常运行。在稳定工况下每单位时间通过平壁所传递的“热流量” $Q[W]$ 将正比于平壁两侧流体的温差 $(t_{f,1} - t_{f,2})[^{\circ}C]$ 和平壁表面积 $F[m^2]$ <sup>[4]</sup>,如下所示:

$$Q = kF(t_{f,1} - t_{f,2})$$

在某一稳定工况下,传热系数 $k[W/m^2 \cdot ^{\circ}C]$ 为定值,当高温冷却水与大气温差 $(t_{f,1} - t_{f,2})$ 基本稳定时,为使单位时间内 $Q$ 更大,只能增加有效传热面积 $F$ ,即增加系统换热器的个数。根据系统设计额定冷却容量及所选风冷换热器型号,计算得12个风冷换热器即可满足SVC系统最大散热时的需求。纯水冷却系统既要节能、延长使用寿命又要确保晶闸管的稳定运行,就必须实现对风冷换热器运行个数、电动三通阀流量等进行自动控制,让其能够根据不同的工况进行及时地调节,从而实现系统供水温度、流量、压力的稳定。传统的控制领域,控制系统动态模式的精确与否是影响控制优劣的最主要因素,系统动态的信息越详细,则越能达到精确控制的目的。然而,对于密闭循环纯水冷却这类复杂的系统,由于变量多,往往难以正确描述系统的动态过程,而模糊控制却可以依靠模糊控制规则对目标进行分析,得出较好的控制策略。模糊控制规则的来源主要有3种:专家经验和知识、操作员操作模式、自我学习。本研究采用专家经验和其他系统运行的历史数据,根据供水、回水温度对电动三通阀开度和12台风冷换热器的起停建立相应的控制规则,实现了对晶闸管的冷却。

## 2 系统组成

系统主要由密闭式纯水冷却装置、PLC、触摸屏监控三部分组成。

### 2.1 密闭式纯水冷却装置

标准DL/T 1010.5-2006(发改办工业[2003]873号)对适用于高压静止无功补偿装置的密闭式水冷却装置的技术要求、试验要求、制造工艺、检验规则等主要指标进行了规范。依据该标准,本研究提出了如图1所示的密闭式纯水冷却系统(风-水冷却方式)。

冷却装置主要由主循环冷却回路、去离子水处理、补水回路、氮气稳压系统和控制系统等5个部分组成。去离子水处理、补水回路和氮气稳压系统合称副循环回路。

主循环回路主要包括一用一备的两台主循环泵、电动三通阀、风冷换热器等。控制器自动控制主循环泵的启动、停止、切换,同时根据实际情况输出预警及跳闸信号。风冷换热器根据目标温度设定值及当前供

水温度,通过模糊控制规则来控制12台风冷换热器的起/停、切换,及电动三通阀的开度,自动调整进入风冷换热器的水流比例,使水温符合要求。

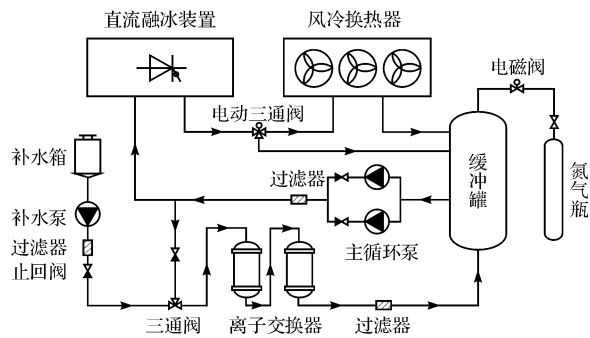


图1 密闭式纯水冷却系统工作原理

去离子水处理、补水回路包括离子交换器、三通球阀、补水泵等。离子交换器不断净化副循环回路中的离子,保证冷却介质具备极高的电阻率。进入去离子水处理回路的水流量大小可以通过三通球阀调节。

氮气稳压系统包括缓冲罐、气路电磁阀、氮气瓶等。与缓冲罐连接的氮气恒压系统保持管路中冷却介质的充满及隔绝空气。气路电磁阀由控制器控制,根据缓冲罐压力高低限值而自动开关,从而使缓冲罐的压力稳定在一定范围内,并保证整个水冷系统维持一定的静压。

控制系统要求具有远程、就地操作模式和手动、自动两种控制方式。手动控制即通过控制柜上的按钮进行点动控制;自动控制即PLC通过设定好的参数,各实时采集数据进行自动控制;远程自动控制即采用ModBus通信协议与SVC主站连接,通过主站监控冷却系统的运行。

### 2.2 PLC 控制器

#### (1) 硬件选型。

本系统共77个I/O点,其中包括7个模拟量输入,1个模拟量输出,69个数字量输入/输出。考虑到系统运行环境恶劣(SVC大电流强干扰)选用性能价格比高的西门子S7-200 CPU226作为控制器,支持MPI、PPI通信协议,且扩展方便。传感器及低压硬件部分选用施耐德等设备。

#### (2) PLC 程序设计。

PLC首先根据各传感器的输入电流(4 mA ~ 20 mA)、电压(0 ~ 5 V/10 V)、数字信号的值进行输入采样,然后执行用户程序来分析、判断,最后刷新输出,通过继电器对各执行器的开关、开度等进行控制。上述3个阶段称作一个扫描周期,PLC的CPU以一定的扫描速度重复执行上述3个阶段<sup>[5]</sup>。用户程序部分只

要将工艺流程转化为直观易懂的梯形图 (LAD) 即可。公共部分作为子程序供主程序调用,程序实现模块化,便于后期维护,且具有通用性。如远程自动控制程序设计流程框图如图 2 所示。

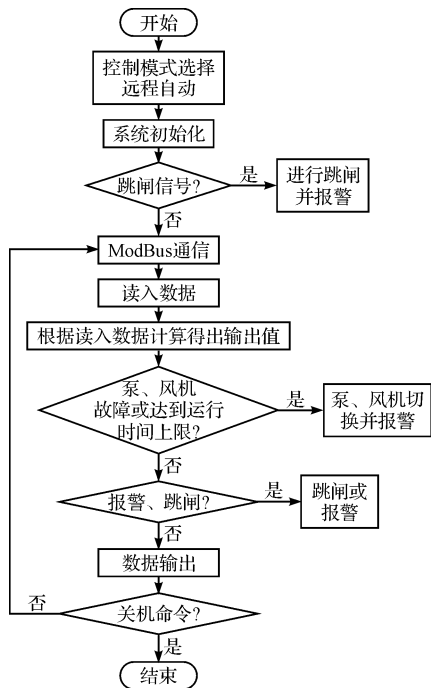


图 2 PLC 程序设计流程框图

### 2.3 触摸屏

触摸屏的功能主要是实时显示各主要运行参数,设定参数、使用成员、权限的设置,报警和跳闸信号的显示。触摸屏为西门子 TP177A,使用 MPI 协议与 PLC 建立链接<sup>[6]</sup>,采用 WinCC Flexible 2007 组态软件编辑触摸屏程序。主要组态窗口:登陆界面,主目录界面,监控界面,各参数设置界面(一年四季大气温度各不相同,为了能够得到更优的控制效果,拥有一定使用权的用户可以自行设置泵、风机、加热器的各档启停温度),传感器标定界面,用户管理界面,故障报警,数据显示等组成如图 3 所示。

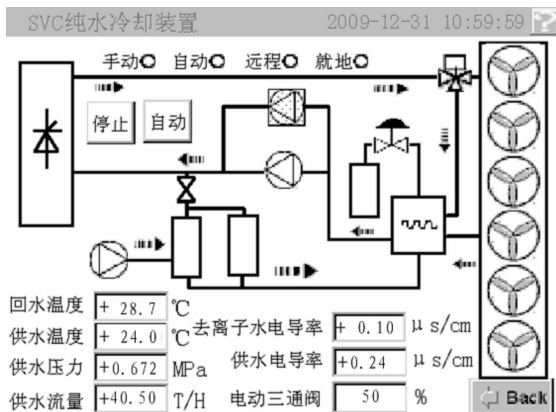


图 3 监控界面

## 3 抗干扰设计

系统中 PLC 采用集中安装方式,现场周围是强电路 SVC 系统,电磁环境恶劣,PLC 系统非常容易受到干扰。本研究通过对干扰源的分析、研究,得出了以下设计以抑制干扰。

### 3.1 接地抗干扰设计

(1) 系统接地有浮地、直接接地和电容接地 3 种方式。对 PLC 控制系统而言,它属于高速低电平控制装置,应采用直接接地方式<sup>[7]</sup>。

(2) 系统中 PLC 全部集中布置于现场一控制柜内,适于并联一点接地方式,柜体中心接地点以单独的接地线引向接地极。

(3) 控制柜用绝缘体与地面隔离。

### 3.2 电源部分的抗干扰设计

(1) 为抑制水泵、风机、电加热器等的轮换、启/停而引起电网电压的波动,强弱电分别采用各自的开关型稳压电源以保持供电电压的稳定及防止相互干扰。

(2) PLC 主控制器部分采用冗余电源,保证系统的正常运行。

(3) 模拟量部分与交流信号和可产生干扰源的供电电源保持一定距离。

### 3.3 I/O 部分的抗干扰设计

(1) 系统正常运行情况下周围会有很大的电磁干扰,I/O 点的布线方面要根据分散各处信号的多少和信号的动作时间,选择模块的密度。集中在一处的输入信号尽可能集中在同一个或几个模块上,便于电缆安装与系统调试。同时接点点数最好不要超过模块总数的 70%<sup>[8]</sup>。

(2) I/O 模块安装在会产生大干扰的控制对象晶闸管侧,所以采用了绝缘性 I/O 模块,且输入信号均自带光电隔离功能。

(3) 数字量模块的门槛电平值越大,抗干扰能力越强,抗感应电压越有利。

(4) 各 DI 模块的输入通道均加装隔离继电器避免外部干扰源进入通道,各 DO 模块的输出通道均加装中间继电器,避免直接驱动负载,造成感性负载产生浪涌电压而干扰输出信号。

(5) 重要输入点采用冗余技术,保证信号采集的可靠性。

### 3.4 软件抗干扰设计

软件抗干扰技术具有设计简单、耗资少、修改灵活

等优点。纯水冷却系统主要采用了数字滤波和软件容错技术。

(1) 数字滤波原理如图 4 所示。现场模拟信号具有较低的信噪比,常因瞬时干扰产生较大波动。可以经过 A/D 转换,利用数字滤波滤去噪声信号,获得品质优良的有用信号。工程上数字滤波方法有:平均值滤波法、中位值滤波法<sup>[9-10]</sup>、限幅滤波、滑动滤波法等。本系统采用了算术平均值滤波法,即每一次的采样值与前  $N-1$  次的采样值求算术平均值作为本次的滤波值。

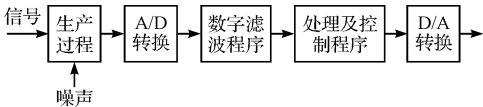


图 4 数字滤波原理图

表 1 冷却系统运行主要数据

| SVC 中电流/A | 回水温度/(℃) | 供水温度/(℃) | 供水压力/MPa | 供水流量/(T/h) | 去离子水电导率/(μs/cm) | 供水电导率/(μs/cm) |
|-----------|----------|----------|----------|------------|-----------------|---------------|
| 2 000     | 26.7     | 24.7     | 0.672    | 40.47      | 0.09            | 0.22          |
| 2 000     | 28.2     | 25.0     | 0.671    | 40.11      | 0.10            | 0.23          |
| 3 200     | 29.5     | 25.5     | 0.670    | 40.08      | 0.10            | 0.23          |
| 3 200     | 31.2     | 26.1     | 0.670    | 39.93      | 0.10            | 0.24          |
| 4 000     | 31.3     | 27.5     | 0.617    | 39.83      | 0.10            | 0.24          |
| 4 000     | 32.0     | 27.6     | 0.617    | 39.99      | 0.10            | 0.25          |
| 5 000     | 33.1     | 26.5     | 0.631    | 40.17      | 0.10            | 0.26          |
| 5 000     | 32.5     | 26.2     | 0.648    | 39.82      | 0.10            | 0.26          |

5 结束语

根据密闭式纯水冷却系统的特点,本研究研制了一套完整的 SVC 纯水冷却自动控制系统,并且最终现场安装、调试、运行都达到了相应的要求。对于我国这样一个严重缺水的国家,这种效率高、体积小、无污染、节约水资源的密闭式纯水冷却系统应用前景广阔。

参考文献(References):

[1] Phase control thyristor 5STP 42U6500,Doc. NO. 5SYA1043-2[R]. ABB Switzerland Ltd., Semiconductors,2004.

[2] Effects of temperature on thyristor perform-ance, application note,AN4870-1. 2[R]. Mitel Semiconductor,1998.

[3] 陈建业,沈英奎. 密闭式循环纯水冷却系统及其在工业中

(2) 软件容错技术。首先针对死循环设计了看门狗定时程序,避免控制系统进入死循环;其次,为确保重要的开关量输入信号和易抖动模拟信号的采集,都采用了相应的延时,通过多次读取,结果判定有效才加以采用。

4 运行结果

冷却系统运行期间 SVC 装置的输出电流(直流)为 2 000 A~5 000 A,晶闸管的出水温度低于 35 ℃,冷却效果好,于 2009 年 11 月交付金华某 500 kV 变电所使用,运行至今状态稳定、可靠。具体运行数据如表 1 所示。

的应用[J]. 电工技术杂志,2001(9):31-32.

[4] 王补宣. 工程传热传质学(上册)[M]. 北京:科学出版社,1998.

[5] 张 扬,蔡春伟,孙明建. S7-200PLC 原理与应用系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[6] 高鸿斌,孔美静,赫孟合. 西门子 PLC 与工业控制网络应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006.

[7] 艾 莉,程加堂. PLC 控制系统的电磁抗干扰技术研究[J]. 机械工程与自动化,2009,155(4):167-168.

[8] 西门子中国有限公司. 深入浅出西门子 S7-200 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.

[9] 柯赫振. 硬件和软件结合提高微机保护抗干扰能力的措施[J]. 电气应用,2005(5):17-20.

[10] SUN Zhen-wu, HUO Yu-ping, LIU Gen-cheng, et al. Automatic control system of ion electrostatic accelerator and anti-interference measures[J]. **Plasma Science and Technology**,2007,9(1):101-105. [编辑:李 辉]

(上接第 208 页)

参考文献(References):

[1] 闫 政,梁君直,张 锋. 管道内环缝多焊头自动焊机研究及应用[J]. 电焊机,2004,34(7):28-31.

[2] 曾惠林,杜则裕,黄福祥. 管道环焊缝多焊炬自动内焊机关键技术分析[J]. 焊接学报,2009,30(7):77-80.

[3] 龚仲华,史建成,孙 毅. 三菱 FX/Q 系列 PLC 应用技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2006.

[4] Fairchild Semiconductor International. TL494 SMPS controller datasheet[EB/OL]. [2000-07-12]. <http://www.fairchildsemi.com>.

[5] ZHANG C. Techniques for low power analog, digital and mixed signal CMOS integrated circuit design[D]. Louisiana

State University,2005.

[6] FORD W E. The development of automatic welding in the pipeline project[J]. **Welding Journal**,1998,8(3):12-16.

[7] ZENG Hui-lin, DU Ze-yu, MA Jing, et al. Research on key control technologies of all-position automatic welding machine[J]. **CHINA WELDING**,2009,18(3):69-74.

[8] 陈善本. 焊接过程现代控制技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.

[9] 胡绳荪. 焊接自动化技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[10] 李亚江,王 娟. 焊接原理及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2009. [编辑:李 辉]