

DOI: 10.7667/PSPC151126

# 特高压串补保护控制装置的研制

姚东晓, 马和科, 倪传坤, 邓茂军, 吕利娟, 汪花永, 原琳

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 特高压串补一次系统设备昂贵, 结构复杂, 故障类型多, 其保护控制装置与传统的继电保护装置在硬件及软件需求上存在很大差异。为反映 MOV 及间隙放电等瞬变电流, 串补保护控制系统对实时性要求非常高。在分析串补系统基本故障类型及对保护控制装置需求的基础上, 提出了串补保护控制系统硬件及软件方案。硬件采用模块化设计, 模拟量输入与处理、保护逻辑运算、通信及人机接口等硬件模块根据功能及性能需求独立设计, 以达到最高效率及最好稳定性。软件分层分模块设计, 底层软件由专业团队设计, 复杂的应用层软件采用可视化编程环境实现, 将各保护功能及算法模块化、可视化, 降低了编程出错几率, 提高了软件运行的稳定性。通过型式实验及数模仿真实验验证, 所研制串补保护控制装置动作行为及性能符合相关行业标准要求。

**关键词:** 特高压串补系统; 串补保护控制装置; 硬件设计; 软件设计; 保护配置; 高实时性

## Development for the UHV series compensation system protection and control device

YAO Dongxiao, MA Heke, NI Chuankun, DENG Maojun, LÜ Lijuan, WANG Huayong, YUAN Lin

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

**Abstract:** UHV series compensation system primary equipments are expensive, complex, and with a variety of fault types, so its protection and control devices are very different with conventional protection devices both in hardware and software requirements. To reflect the fast-changing currents such as MOV current and gap discharge current, the real-time requirement for the series compensation protection and control system is very high. Based on the analysis of the series compensation system protection and control devices' function configuration and performance requirements, it proposes the hardware and software design solutions for the series compensation system protection and control device. From using modular design for the hardware, every module is independently designed based on its performance needs, such as analog input and processing, protection logic operations, communications and human-machine interface modules, it can achieve maximum efficiency and better stability. From using hierarchical modular design for the software, underlying software design and debugging by the professional design department, complicated application-layer software using visual programming environment, making the various protection functions and algorithms modular, visualization, it reduces the probability of programming mistakes and improves the operating stability of the device. Through the static and real-time digital simulation instrument (RTDS) simulation testing, the action behavior and performance of the series compensation protection and control device developed meets the design requirements and relevant industry standards.

**Key words:** UHV series compensation system; series compensation protection and control devices; hardware design; software design; protection configuration; high real-time

## 0 引言

提高电能远距离输送容量的方式有两种, 一种是建设新的线路, 一种是提高原有线路的输送容量。对于建设新的线路, 由于需要占用大量土地资源及建设大量中间变电站或开关站, 成本非常高。若在满足新增输送容量的情况下, 通过在线路上安装串补电容器以提高原有线路的输送容量<sup>[1-3]</sup>, 将是经济

的选择。

目前我国已有多条在运行的特高压串补线路<sup>[4-6]</sup>, 对串补系统相关理论及技术的研究也有很多<sup>[7-11]</sup>, 但是串补保护控制设备还主要通过进口国外产品来满足市场需求。我国采用的串补保护控制设备主要来自 ABB、西门子、诺基亚、通用电气等国外公司, 国内只有中电普瑞公司有在运行产品。

为打破串补保护控制装置主要依靠进口的格

局, 我们对串补保护控制装置的研制及实验进行了专门的立项研究。本文首先分析了串补系统结构及故障类型, 然后对串补保护控制装置的硬、软件研制及保护配置进行了系统的阐述, 最后通过型式试验及数模实验验证了所研制装置动作行为的正确性, 各项性能指标满足相关行业标准要求。

## 1 串补一次系统结构及故障类型

串补一次系统由串补电容器组、金属氧化物限压器(MOV)、阻尼回路、火花间隙、旁路断路器、旁路刀闸、隔离刀闸、接地刀闸、串补平台组成, 如图 1 所示。

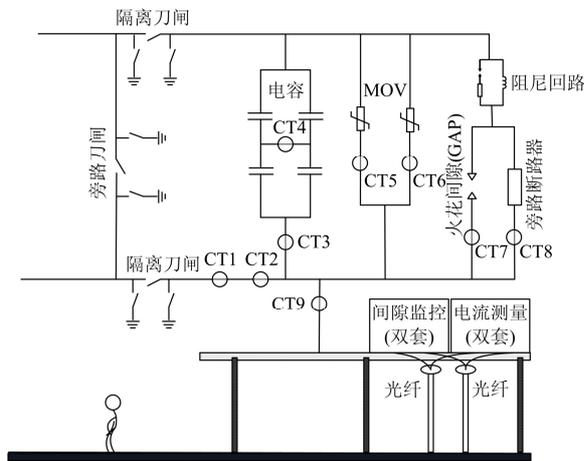


图 1 串补系统一次结构图

Fig. 1 Structure of the series compensation system

串补系统的电气量保护主要保护电容器组、MOV、火花间隙、旁路断路器及串补平台。电容器组是串补系统的基本功能元件, 由多台电容器通过串并联方式组成, 其故障类型主要包含电容器过负荷、电容器损坏(熔丝熔断或电容器击穿); MOV 作为电容器组的主保护元件, 用于限制电容器组过电压, 其故障类型主要包括 MOV 过电流、过能量、过温度, 双分支不平衡; 火花间隙用于严重过电压时快速旁路串补系统, 降低金属氧化物避雷器吸收的能量, 主要故障类型包括间隙自触发、长时触发、拒触发、延迟触发; 旁路断路器用于投入和退出串补系统, 主要故障类型为合闸失灵、分闸失灵、压力过低等; 串补平台用于放置串补系统设备元件, 主要故障类型为主设备对平台闪络放电。

## 2 串补保护控制装置硬件系统研制

### 2.1 硬件系统需求分析

串补保护控制装置硬件研制难点在于其高实时性要求, 既要满足高采样速率要求, 又要满足高处

理速度要求。串补保护控制装置需要具备很高的数据采样速率, 来完整反映电容器经间隙放电及 MOV 过电压放电电流, 一般继电保护每工频周波只需 24 个采样点(采样速率每秒 1 200 点), 本文研制的串补保护控制装置达到每工频周波 200 个采样点(采样速率每秒 10 000 点)。另外发生严重故障时为瞬时触发间隙以快速旁路串补系统, MOV 高电流等快速保护要具备极高的实时性。

串补保护控制装置模拟量采用光数字采集模式, 采样数据由安装在串补平台上的采集器通过光纤以 FT3 点对点方式传输到合并单元, 合并单元再将各采集器数据汇总打包传输给保护装置; 开关量输入输出采用硬接线直接接到保护装置; 人机交互具备按键操作及液晶显示功能, 支持就地修改定值、投退压板、查看报告及运行数据等功能; 具备采用快速以太网与远方监控系统通信功能, 支持无人化运行管理。

### 2.2 硬件系统设计

该串补保护控制系统硬件由电源模块、模拟量输入及处理模块、开关量输入输出模块、保护 CPU 模块、通信 CPU 模块、人机接口模块组成, 如图 2 所示。

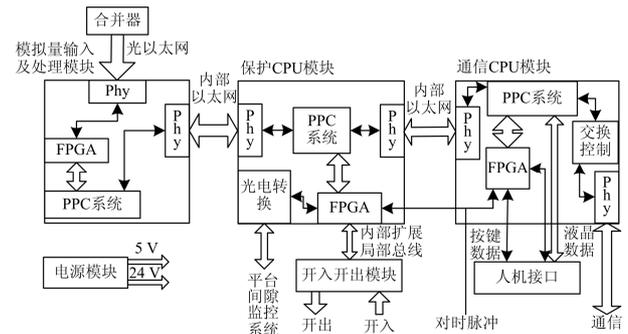


图 2 装置硬件系统结构图

Fig. 2 Device hardware system structure

模拟量输入及处理模块用于模拟量采集及处理, 模拟量数据由合并单元通过以太网通信方式输入。该模块采用高性能 powerPC 处理器(PPC)作为中央处理单元, 主频可达 777 MHz, 内含浮点处理单元以及快速以太网通信接口, 浮点运算速度快, 内部以太网接口方便与保护 CPU 模块间的实时通信; 高性能大规模可编程门阵列(FPGA)部署有以太网控制器 IP 核, 用于接收外部数据采集报文, 并实现报文诊断及过滤, 将采样值取出并打包, 通过 PCI express 总线发给中央处理器; PCI express 总线数据传输速率为 2.5 Gbit/s, 内部快速以太网数据传输速率为 100 Mbit/s, 而采样值传输所需传输带宽仅为

10 M 左右(纯采样数据所占带宽为 7.68 M), 因此完全满足采样实时性要求。

保护 CPU 模块的主要功能是进行保护逻辑的运算处理。CPU 采用与模拟量输入模块相同的 PPC 处理器; 采用两个片上以太网控制器分别与模拟量输入及处理模块和通信 CPU 模块通信; FPGA 用于扩展局部总线、与间隙控制系统通信及处理 B 码对时。扩展局部总线用于开入开出数据交换; 与间隙控制系统通信采用串口曼切斯特编码的方式, 经光电转换模块通过光纤通信完成触发火花间隙及接收间隙控制系统运行状态信息。

通信 CPU 模块的主要功能是与监控系统通信及实现人机接口处理。处理器同保护 CPU 模块。对外通信通过交换控制器扩展 4 路以太网实现与外部监控系统通信。FPGA 用于对时信号处理、按键读取、信号灯驱动、液晶驱动器片选信号译码, 液晶数据及主控制信号由 CPU 片上液晶控制器控制交换。

人机接口模块包括液晶显示器(240\*320)、10 个按键、12 个指示灯, 用于实现人机交互, 由通信 CPU 模块具体控制。

开入开出模块包含开入插件和开出插件。开入插件用于采集外部的开关量状态, 主要包含旁路刀闸、隔离刀闸、旁路断路器位置、线路联跳串补开入等。开出插件用于驱动保护动作及告警信号, 主要包括旁路断路器出口、重投出口、触发间隙出口以及相关的信号出口。

电源模块输出+5 V 和+24 V 电源, 分别用于数字系统电源和继电器电源。

### 3 串补保护控制装置软件系统研制

串补保护控制系统软件分为底层支持软件和应用层功能软件, 如图 3 所示。

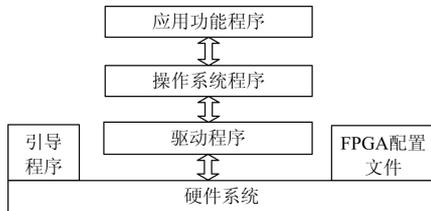


图 3 装置软件系统结构图

Fig. 3 Device software system structure

底层支持软件包括引导程序(Bootloader)、驱动程序、FPGA 配置文件、嵌入式操作系统程序。引导程序用于将其他程序下载到 CPU 板 flash 存储器中; 驱动程序用于完成文件操作、以太网、flash、FPGA 等的驱动; FPGA 配置文件用于具体配置

FPGA 的功能; 嵌入式操作系统程序负责任务调度与资源管理。应用软件用于实现具体的保护控制逻辑判别、通信控制及人机接口控制, 是装置功能的具体体现部分。

#### 3.1 保护控制应用软件设计

底层支持软件由专门的嵌入式软件开发部门根据项目需求设计, 本文不做详细介绍。

保护控制应用软件采用可视化编程环境设计。该环境采用模块化设计理念, 将每种功能作为一个功能模块, 将每个算法或功能单元作为一个具有输入输出引脚的元件, 任何复杂的保护功能均可通过这些元件的有机组合来实现。可视化保护功能程序仅是一些逻辑图及算法单元的组合, 通过可视化编译系统编译生成 C 语言及汇编语言源程序文件, 然后再调用 PPC 编译器及连接器, 编译、连接成最终下载到装置中的目标程序。

应用程序首先按不同功能划分为不同的功能模块, 功能模块可以嵌套使用。如图 4 所示, 串补保护控制程序包括线路监测、电容器保护、MOV 保护、平台闪络保护、线路联跳串补、次同步谐振保护等初级保护功能模块。然后再对每个保护功能模块进行逻辑图编程实现。对于复杂的保护功能模块, 里面也可以建立二级功能模块。如图 5 为电容器保护模块中的电容器不平衡低值保护程序。



图 4 串补保护相关逻辑功能模块

Fig. 4 Series compensation system protection logic function module

该可视化编程环境同时支持实时仿真调试, 可与装置进行实时通信, 调取程序中所有监测数据的实时数值或状态。

采用这种可视化编程环境的优点是数据管理方便, 逻辑清晰, 开发人员可将主要精力用于保护功能实现, 不易出错, 便于查错, 同时也便于多人合作开发。

#### 3.2 串补系统保护配置

本串补保护控制装置集成了串补系统的全部保

护功能, 具体保护配置及动作输出如下。

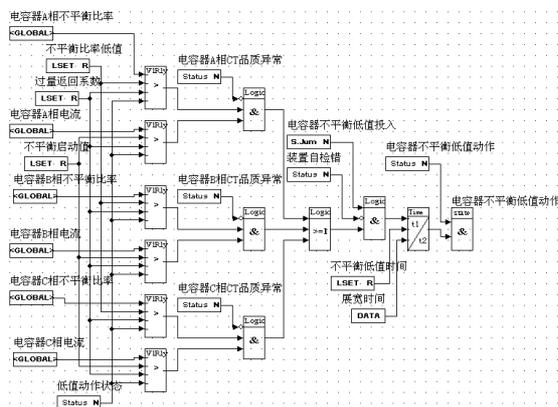


图 5 电容器不平衡低值保护程序

Fig. 5 Low value capacitor unbalance protection program

电容器保护: 包含电容器不平衡低值保护、电容器不平衡高值保护、电容器过负荷保护。电容器不平衡保护用于反映电容器是否有断线或击穿, 该保护动作后直接旁路串补系统并闭锁重投; 电容器过负荷保护用于反映电容器是否过电流, 过流会导致电容器过热, 可加速老化甚至损坏。电容器过负荷保护动作首先旁路串补, 经过负荷闭锁重投延时后进行重投, 重投成功则进入正常运行状态, 若多次重投不成功, 超过允许重投次数, 则永久旁路串补系统。

MOV 保护: 包含 MOV 不平衡保护、MOV 高电流保护、MOV 短时能量保护、MOV 高温保护。MOV 不平衡保护反映 MOV 是否有损坏, 该保护动作后触发间隙、旁路串补, 并永久闭锁重投; MOV 高电流保护、MOV 短时能量保护、MOV 高温保护主要反映 MOV 吸收能量, MOV 吸收能量大于释放能量会导致温度上升, 温度过高可导致 MOV 加速老化甚至爆炸。MOV 高电流、MOV 短时能量保护动作后触发间隙、旁路串补, 在经重投闭锁延时后若重投条件满足则重投串补; MOV 高温保护动作后触发间隙、旁路串补, 暂时闭锁重投, 待 MOV 温度降低到闭锁重投定值以下时, 解除高温闭锁重投条件, 但其本身不重投串补。

间隙保护: 包括间隙自触发保护、间隙长时触发保护、间隙拒触发保护、间隙延迟触发保护。间隙自触发保护动作后旁路串补, 暂时闭锁重投, 经暂时闭锁延时后, 若无其他重投闭锁条件, 则重投串补, 重投成功则进入正常运行状态, 若在整定次数内重投不成功, 则永久闭锁串补重投; 间隙长时触发保护动作后旁路串补, 永久闭锁重投, 并远跳线路断路器; 间隙延迟触发和拒触发保护动作后旁

路串补, 永久闭锁重投。

平台闪络保护: 串补平台与串补系统低压端母线相连, 平台闪络保护用于监视平台上安装的功能设备(电容器组、MOV 组等)是否对平台闪络放电。平台闪络保护包括平台闪络高值保护、平台闪络低值保护, 保护动作后旁路串补, 永久闭锁重投。

旁路开关保护: 包括旁路开关合闸失灵保护、分闸失灵保护、开关三相不一致保护、开关压力低保护。旁路开关合闸失灵保护动作后旁路串补, 永久闭锁重投, 并远跳线路断路器; 分闸失灵保护、开关三相不一致保护、开关压力低保护动作后旁路串补, 永久闭锁重投。

次同步谐振保护(SSR)监视线路 SSR 电流, 若 SSR 电流大于动作门槛值, 则次同步谐振保护动作。SSR 保护动作后旁路串补, 保护与线路相连发电机安全, 经 SSR 闭锁重投延时后进行重投, 重投成功则进入正常运行状态, 若在整定次数内重投不成功, 则永久旁路串补系统。

线路联切串补保护用于线路跳闸时旁路串补, 降低潜供电流影响, 提高重合闸成功率。保护动作后旁路串补, 触发间隙, 暂时闭锁重投, 经闭锁重投延时后重投串补。

## 4 实验验证

为验证串补保护控制装置保护功能及性能是否满足设计要求, 进行了详细的实验验证, 包括型式实验验证及数模实验验证。

### 4.1 型式实验验证

型式实验包含电气性能检验及安全检验、电磁兼容检验。研制装置通过了国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心开普试验室全面的型式检验验证, 报告编号为 JW150215, 检验结果证明各项功能及性能指标完全满足国标和企标要求。

### 4.2 数模实验验证

采用实时数字仿真仪(RTDS)搭建了数模仿真系统模型, 模型采用双回线, 一次系统接线图如图 6 所示。

模型中串补系统参数如表 1 所示。表 1 中参数并不是相互独立的, 由电容器电容量可求得电容器额定阻抗:  $Z = 1/j\omega C$ ; 电容器额定电压为电容器额定阻抗与串补额定电流之乘积:  $U = ZI$ ; 三相电容额定容量为 3 倍额定电压与额定电流之乘积:  $S = 3UI$ ; MOV 额定电压取 1.29 倍电容器额定电压峰值, MOV 伏安曲线数据根据保护控制装置的 MOV 模型设置; 阻尼电抗与电阻用于限制电容器放电电流, 防止瞬间放电电流超过间隙及旁路开关

的允许范围。

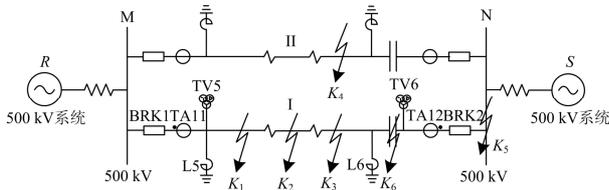


图 6 仿真系统电气主接线图

Fig. 6 Main electrical wiring diagram of emulation system

表 1 串补模型参数

Table 1 Series compensation component model parameters

参数	数值
电容器电容	145.5 $\mu$ F
电容器额定阻抗	$-j21.89 \Omega$
电容额定电压	59.1 kVrms
三相电容额定容量	478.3 Mvar
串补额定电流	2 700 A
串补补偿度	45%
MOV 额定电压	108 kVrms
阻尼电抗	450 $\mu$ H
阻尼电阻	3.5 $\Omega$

线路模型采用分布参数模型(具体选择频基模型), 线路参数如表 2 所示。

表 2 线路参数

Table 2 Line parameter

参数	数值
线路总长	219 km
正序阻抗	3.63+j48.64 $\Omega$
零序阻抗	63.6+j197.6 $\Omega$
正序电导	2.19e-6 s
正序电纳	0.001 12 s
零序电导	2.19e-6 s
零序电纳	0.000 61 s

在实验过程中, 考核了串补系统所有电气量保护功能, 但由于除了 MOV 短时能量及 MOV 高温保护外, 其余保护均可在静模实验中得到精确考核, 考核结果均包含在型式试验报告中, 不再罗列详细的实验数据。这里仅列出 MOV 短时能量保护及 MOV 高温保护的实验定值及实验结果。MOV 短时能量及高温保护定值如表 3 所示。

从表 3 定值可知, MOV 分为两组, 现场应用中两组 MOV 分别安装独立的 CT, 用于检测两组 MOV 流过的电流是否一致, 主要用于 MOV 不平衡保护; MOV 模块并联数乘以 MOV 模块串联数可计

表 3 MOV 保护定值

Table 3 MOV protection settings

保护定值	整定值	单位
CT 一次额定值	3 000	A
CT 二次额定值	1	A
第一组 MOV 柱数	32	
第二组 MOV 柱数	33	
MOV 模块并联数	65	
MOV 模块串联数	14	
I500A 时 MOV 模块电压	10.1	kV
MOV 模块比热	520	J/M.K
MOV 模块质量	1.1	kg
MOV 短时能量保护定值	43	MJ
MOV 高温旁路值	125	$^{\circ}$ C

算出总的 MOV 模块数, 结合 MOV 模块比热和质量, 可以得出 MOV 总比热, 用于计算 MOV 吸收能量后的温升; I500 A 时 MOV 模块电压用于确定 MOV 伏安曲线, 由于每个 MOV 模块特性参数并不完全相同, 该定值反应了最终定型后 MOV 模块流过 500 A 电流时的平均电压值, 现场一般需要根据实验获取; MOV 短时能量保护定值确定了当 MOV 吸收能量超过该定值且仍在增加时, MOV 短时能量保护动作, 故障相发出触发间隙及合旁路开关命令。MOV 高温保护定值确定了当 MOV 温度超过该定值且仍在上升状态时, MOV 高温保护动作, 三相同时发出触发间隙及合旁路开关命令。

串补线路近端区内三相故障时 MOV 短时能量保护的波形如图 7 所示。

图 7 中故障发生后, 电容器出现过电压, MOV 导通以限制电压继续上升, MOV 最大电流峰值达到 6.9 A。MOV 导通后开始吸收能量, 故障 37 ms 后, B 相 MOV 吸收能量达到 43.2 MJ, 超过短时能量定值 43 MJ, B 相 MOV 短时能量保护首先动作, 触发 B 相间隙并发 B 相旁路命令, B 相间隙击穿, 间隙电流峰值达到 22.3 A, 串补系统 B 相被旁路。随后 A、C 相 MOV 短时能量保护动作, 并发出触发间隙命令及旁路命令; 从波形看, A、C 相同时动作, 原因为任两相保护动作后均触发三相旁路动作, 因此即便有一相短时能量不满足, 在两相动作的情况下三相均旁路。

由于触发间隙命令为光信号, 且间隙的动作时间极短, 为微秒级, 故间隙基本瞬时被击穿。而旁路命令经保护装置继电器节点输出, 同时旁路开关合闸时间为 30 ms 左右, 因此旁路命令晚于触发间

隙命令 4 ms 左右(保护继电器动作时间), 同时旁路开关合闸成功时刻晚于间隙动作 34 ms 左右。旁路开关合闸后, 间隙被旁路, 间隙电流减为 0, 电弧熄灭。

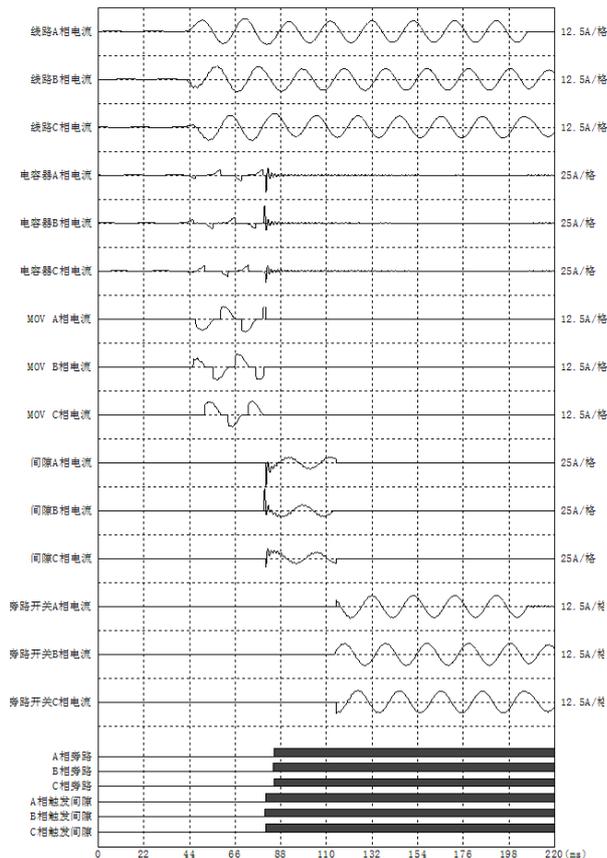


图 7 串补线路近端区内三相故障时 MOV 短时能量保护动作波形

Fig. 7 MOV short-time energy protection action waveforms of the near end 3 phase fault in the series compensated line

图 8 为串补线路近端区内三相故障时 MOV 高温保护的波形。MOV 高温保护动作时间与故障前 MOV 温度有关, 由于 MOV 高温保护定值为 125 °C 是固定的, 若故障前 MOV 温度低, 则 MOV 温度定值与故障前温度之差就大, MOV 允许吸收的能量就多, MOV 高温保护动作时间就长; 反之, MOV 允许吸收的能量就少, MOV 高温保护动作时间就短。

图 8 中故障发生前 MOV 温度为 25 °C。故障发生后, MOV 过压导通, 吸收能量, 温度升高, 故障 45.5 ms 后, B 相 MOV 温度达到 125.3 °C, 超过 MOV 高温保护定值 125 °C, 高温保护动作, 三相同时触发间隙并发旁路命令, 旁路串补系统。

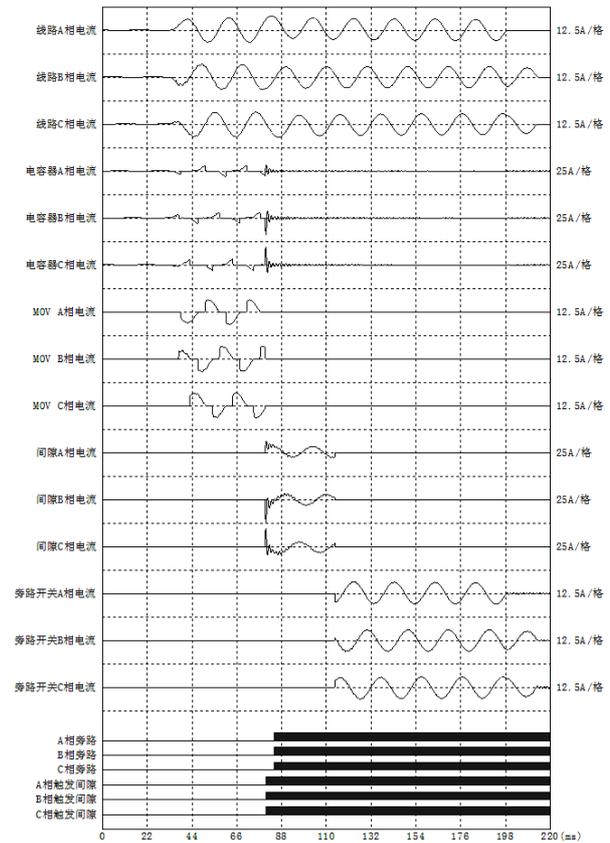


图 8 串补线路近端区内三相故障时 MOV 高温保护动作波形  
Fig. 8 MOV temperature protection action waveforms of the near end 3 phase fault in the series compensated line

## 5 结语

本文综述了串补保护控制装置的硬、软件研制、保护配置及实验验证情况。硬件系统采用模块化设计, 各模块根据功能及性能需求独立设计, 充分发挥 CPU 等主功能芯片的潜力, 保证较大性能裕量。软件采用分层设计, 底层软件由专业团队设计, 应用层软件采用可视化编程环境分模块实现, 保证了软件的高效性和可靠性。保护配置包含了串补系统所有的电气量保护功能。经国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心型式实验及公司 RTDS 仿真实验验证, 动作行为及性能指标满足相关行业标准要求<sup>[12-13]</sup>。

## 参考文献

- [1] 周孝信, 郭剑波, 胡学浩, 等. 提高交流 500 kV 线路输电能力的实用化技术和措施[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 1-6.  
ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, HU Xuehao, et al. Engineering technologies and measures for improving the transmitting capability of 500 kV transmission lines[J]. Power System

Technology, 2001, 25(3): 1-6.

[2] 秦晓辉, 申洪, 周勤勇, 等. 特高压串补线路沿线电压分布及串补布置方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 43-49.  
QIN Xiaohui, SHEN Hong, ZHOU Qinyong, et al. Voltage distribution along the line and disposition scheme of series capacitors for UHV transmission lines with series capacitors[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 43-49.

[3] 曹继丰. 平果可控串补工程及其在南方电网中的作用[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 6-9.  
CAO Jifeng. An introduction to Pingguo TCSC project and its function in China Southern Power Grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 6-9.

[4] 潘勇斌, 杨绍远. 500 kV 河池固定串补运行情况分析[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 2): 82-85.  
PAN Yongbin, YANG Shaoyuan. Introduction and operation analysis of fax series compensation in Hechi[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 82-85.

[5] 李振动, 赵青春, 董杰, 等. 串联补偿对差动保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 139-143.  
LI Zhendong, ZHAO Qingchun, DONG Jie, et al. Research on influence of series compensation on differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 139-143.

[6] 王奇, 王海军, 李妍红. 砚山 500 kV 固定串补控制保护装置 RTDS 动态性能试验与系统短路试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 118-124, 144.  
WANG Qi, WANG Haijun, LI Yanhong. Research on system single phase fault experiment and dynamic performance experiment of Yanshan 500 kV FSC control and protection equipment based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 118-124, 144.

[7] 刘毅, 刘汉伟, 梅涛. 一种确定保护受串补电容影响区域的仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 84-90.  
LIU Yi, LIU Hanwei, MEI Tao. Simulation method of defining the area in which the distance protection affected by the series compensation capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 84-90.

[8] 邹蕴韬, 谭亲跃, 朱建行, 等. 超高压线路串补电容的微机保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 45-49.  
ZOU Yuntao, TAN Qinyue, ZHU Jianhang, et al. Microprocessor-based protection algorithm in UHV transmission lines with series compensated capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 45-49.

[9] 高本锋, 肖湘宁, 赵成勇, 等. 混合串联补偿装置抑制次同步谐振的研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 142-147.  
GAO Benfeng, XIAO Xiangning, ZHAO Chengyong, et al. Study of hybrid series compensator on sub-synchronous resonance damping[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 142-147.

[10] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 平行双回线中串补电容对零序电抗型距离保护的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 264-270.  
LIU Jiajun, YAN Bo, YAO Lixiao, et al. Influence of series compensation capacitor on zero-sequence reactance-type distance protection in parallel double-circuit lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 264-270.

[11] 吴熙, 蒋平. SEDC 与 TCSC 联合抑制次同步振荡的研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 179-184, 239.  
WU Xi, JIANG Ping. Research on sub-synchronous oscillation mitigation using supplementary excitation damping controller and thyristor controlled series capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 179-184, 239.

[12] Q/GDW 655-2011 串联电容器补偿装置通用技术要求[S]. Q/GDW 655-2011 general requirements for series capacitor installation[S].

[13] Q/GDW 663-2011 串联电容器补偿装置控制保护设备的基本技术条件[S]. Q/GDW 663-2011 basic specifications for control and protection equipment of series capacitor installation[S].

收稿日期: 2015-07-02; 修回日期: 2015-08-12

作者简介:

姚东晓(1982-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为继电保护; E-mail: yaodongxiao1@163.com

马和科(1981-), 男, 工程师, 主要研究方向为继电保护;

倪传坤(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护。

(编辑 葛艳娜)