

750 kV磁控式可控并联电抗器本体保护研究

苏 光, 熊再豹, 石雨鑫, 卢 伟, 布小红

(国核电力规划设计研究院有限公司, 北京 100095)

摘要: 可控高压并联电抗器是超/特高压系统中重要的无功调节设备, 新疆与西北联网第二通道工程鱼卡开关站在国内首次应用750 kV磁控式可控并联电抗器(Magnetically Controlled Shunt Reactor, MCSR)。MCSR本体结构特殊, 运行方式灵活, 对继电保护提出了更高的要求。分析了750 kV MCSR的工作原理和结构, 针对MCSR的本体保护关键技术进行研究, 分析匝间保护、控制绕组和补偿绕组保护的关键技术, 提出了MCSR本体保护配置以及智能化方案。

关键词: 磁控式可控并联电抗器; 本体保护; 匝间保护; 智能变电站

Research on the protection of 750 kV magnetically controlled shunt reactor

SU Guang, XIONG Zaibao, SHI Yuxin, LU Wei, BU Xiaohong

(State Nuclear Electric Power Planning Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100095, China)

Abstract: The controllable high-voltage shunt reactor is an important reactive power regulating equipment in EHV/UHV system. The first application of 750 kV magnetically controlled shunt reactor (MCSR) in China is Yuka switching station in the second channel project of Xinjiang to northwest grid. MCSR has special structure and flexible operation mode, which puts forward higher requirements for protective relaying. The working principle and structure of 750 kV MCSR are analyzed. Then the key technologies of turn-to-turn protection, control winding and compensating winding protection for MCSR ontology protection are studied. The configuration and intelligent scheme of MCSR ontology protection are proposed.

Key words: magnetically controlled shunt reactor; ontology protection; turn-to-turn protection; intelligent substation

0 引言

超/特高压交流输电系统容性无功大、输送功率变化大, 对无功调节能力要求高。随着风电、光伏发电等新能源发电的大规模接入, 输电通道上潮流变化和电压波动更加频繁, 进一步加剧了无功调节的难度^[1-2]。可控高压并联电抗器不仅可以动态补偿输电线路无功功率、保证电压稳定, 还可以抑制工频过电压和操作过电压。可控高压并联电抗器分为磁控式、分级式和晶闸管可控式等^[3-4], 其中磁控式可控

并联电抗器 (Magnetically Controlled Shunt Reactor, MCSR) 通过交直流混合励磁来改变铁心的饱和程度, 进而达到调节电抗器输出容量的目的, 具有容量大范围平滑连续可调、响应速度快、谐波含量小和可靠性高等优点, 在超/特高压系统中具有广泛的应用前景^[5-6]。

MCSR的安全稳定运行关系到整个系统的无功平衡和电压稳定, 对继电保护配置的要求高。MCSR在我国超高压领域首次应用是在500 kV荆州磁控式可控并联电抗器示范

工程^[7-8]。传统MCSR响应速度慢,不适合在更高电压等级应用,为此改进绕组结构,形成新型MCSR应用于鱼卡750 kV开关站^[9]。由于新型MCSR特殊的铁心结构、绕组连接方式和工作条件下交直流共同励磁的特性,其保护配置与其他类型的可控高压并联电抗器相比有较大不同,有必要针对新型MCSR的保护配置展开研究。新疆与西北联网第二通道工程鱼卡开关站在国内首次应用750 kV MCSR,本文围绕鱼卡750 kV开关站MCSR的原理及应用,提出了完整的MCSR本体保护智能化方案。改进本体匝间短路保护,重点分析补偿绕组保护、控制绕组保护原理以及动作逻辑。

1 MCSR工作原理及结构

在500 kV MCSR的结构基础上,为了提高响应速度同时解决主磁通畸变的问题,新型MCSR每相网侧绕组由分支绕组并联改为分支绕组正极性串联;三相控制绕组由“三串两并”形式改为“两串三并”形式;另外增设了角接的补偿绕组^[10]。

750 kV鱼卡开关站母线MCSR采用分相结构,由3个独立的单相三绕组结构组成^[11-12]。单相铁心采用四柱式结构,两主柱位于中间位置,用于缠绕绕组,两旁轭位于两侧,用于提供磁通回路,减少漏磁通。绕组分别为网侧绕组、补偿绕组和控制绕组,三相MCSR电气主接线如图1所示。每相两个网侧绕组同极性串联,三相之间Y形连接,中性点直接接地;每相两个控制绕组反极性串联构成控制支路,三相控制支路并联接于直流母线间(简称“两串三并”式);补偿绕组三相接成三角形。网侧绕组与系统母线相连,直接用于调节无功。电源通过整流变压器、整流器形成直流输入到控制绕组,根据电网中监测到参数的变化,系统自动控制整流电路中晶闸管的触发角,改变直流励磁电流大小以改变铁心的磁饱和度,进而平滑地调节电抗器的容量。MCSR采用自励磁和外励磁结合的方式,外励磁使用站用电。补

偿绕组为励磁系统提供交流电源,并连接至滤波支路。750 kV 鱼卡开关站母线MCSR可实现输出无功在5%~100%额定容量范围内的连续调节。

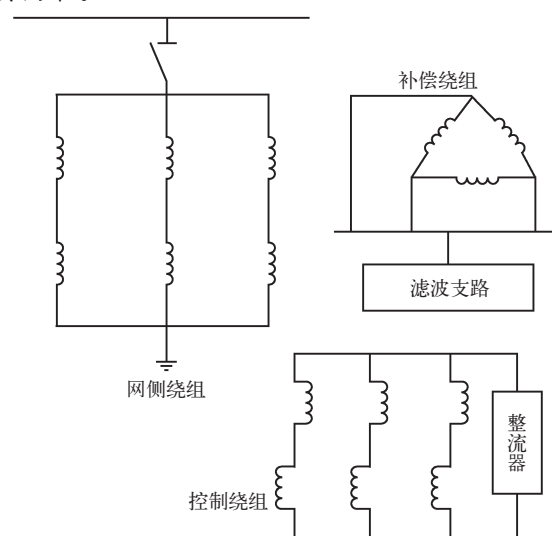


图1 三相MCSR电气主接线示意图

Fig. 1 Main electric circuit of three-phase MCSR

2 MCSR本体保护原理及关键技术

与其他类型的可控高抗相比,MCSR二次侧不接负载电抗,而是设有控制绕组,另外还增设补偿绕组,需要专门针对控制绕组和补偿绕组配置保护。同时为了保护协同,需要统筹三个绕组的保护配置。由于MCSR采用新型绕组结构,本体保护配置更加复杂,保护配置的重点与难点主要体现在匝间保护、控制绕组和补偿绕组的保护^[13],相应的改进措施有以下三个方面。

1) 在电抗器匝间保护中设置相应的补偿绕组判据来提高保护的灵敏度。

2) 为MCSR特有结构形式配置补偿绕组的复压过电流保护、接地保护和控制绕组的间隙保护。

3) 配置直流母线接地保护,保护直流母线的对地绝缘。

2.1 本体保护配置方案

本体保护整体配置方案如图2所示,分为电量保护和非电量保护两部分。主电抗器保护

配置有：纵联差动保护、零序差动保护、匝间短路保护、电抗器过电流保护、电抗器过负荷保护和零序过电流保护。其中，电抗器过电流保护可作为补偿绕组、控制绕组的后备保护。补偿绕组保护配置有：补偿绕组复压过电流保护和补偿绕组接地保护。控制绕组保护配置有：间隙过电流保护。励磁直流母线保护配置有：励磁直流母线接地保护。非电量保护配置有：瓦斯、绕组温度、压力释放、油温、油位及冷却系统保护。

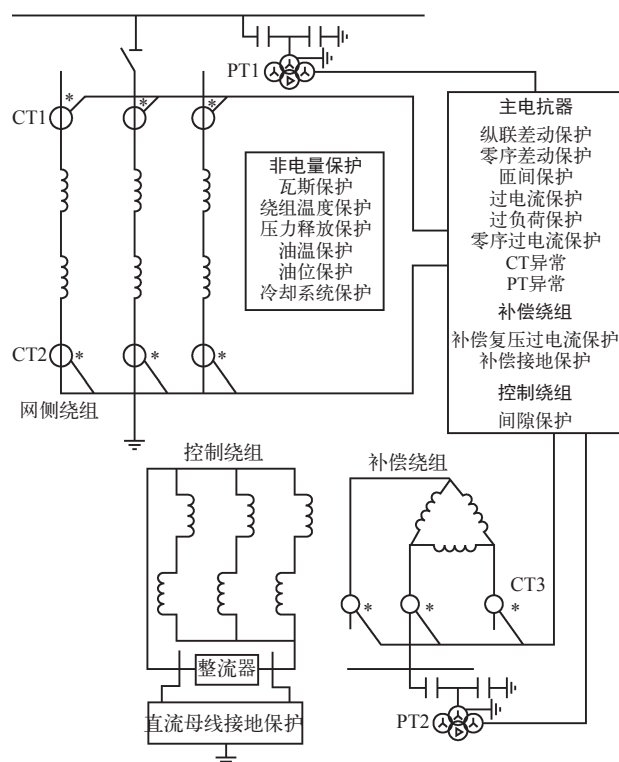


图2 750 kV MCSR本体保护整体配置方案

Fig. 2 Protection configuration of 750 kV MCSR

除匝间保护、补偿绕组保护和控制绕组保护外，其他电量保护的 protection 范围和动作设置如下。

1) 网侧纵联差动保护由差动速断、比率制动和高值比率制动组成，保护信号取自网侧绕组电流互感器CT1和CT2，保护范围为网侧绕组接地和相间故障，动作于跳开本体网侧开关、整流变压器和滤波器支路开关。

2) 网侧零序差动保护由零差速断和两段式比率制动的差动保护组成，保护信号取自电

流互感器CT1和CT2的自产零序电流，保护范围为网侧绕组接地故障，动作于跳开本体网侧开关、整流变压器和滤波器支路开关。

3) 可控电抗器过负荷保护、过电流保护和零序过电流保护为MCSR内部故障的后备保护，信号均取自网侧绕组首端电流互感器CT1。过电流保护和零序过电流保护延时动作于跳开本体网侧开关、整流变压器和滤波器支路开关，过负荷保护延时动作与发出告警信号。

2.2 匝间保护

传统固定高压并联电抗器通过零序功率方向配置匝间保护，由于MCSR控制绕组和补偿绕组对外均没有明显的零序电流通路，零序功率方向配置对于控制绕组和补偿绕组匝间短路的灵敏性不高。因此有必要研究适用于MCSR的匝间保护。匝间保护信号取自网侧绕组电流互感器CT1和CT2、补偿绕组角外电流互感器CT3以及网侧电压互感器PT1和补偿绕组电压互感器PT2。保护范围为网侧、控制绕组和补偿绕组的匝间故障，动作于跳开本体网侧开关、整流变压器和滤波器支路开关。

匝间短路采用容错复判自适应保护原理。电抗器内部匝间短路时，对应的末端测量值总是满足零序电压超前零序电流，而且此时零序电抗的测量值为系统的零序电抗。当电抗器外部故障时，对应的零序电压滞后于零序电流，此时零序电抗的测量值为电抗器的零序阻抗。因此采用电抗器末端自产零序电压、电抗器安装处的自产零序电压组成的零序功率方向来区分电抗器匝间短路、内部接地故障和电抗器外部故障。零序功率方向元件的动作方程为

$$0^\circ < \arg \frac{(3U_0 + KZ3I_{02})}{3I_{02}} < 180^\circ \quad (1)$$

式中， $3U_0$ 和 $3I_{02}$ 分别为电抗器安装处PT1的自产零序电压和主电抗器末端CT2的自产零序电流； Z 为电抗器的零序阻抗； K 为自适应补偿系数，取(0~0.8)。

MCSR具有补偿绕组，在补偿绕组内部及

其所接低压系统发生故障时, 匝间保护需仍具有很高的可靠性, 并且不降低内部故障时的保护动作灵敏度。为此匝间保护中设置了相应的补偿绕组判据, 采用补偿绕组的三相电压和电流来实现。判别补偿绕组自产负序电压 $3U_{c2}$ 、负序电流 $3I_{c2}$ 的方向: 若 $3U_{c2}$ 超前 $3I_{c2}$ 的角度为 $135 \sim 315^\circ$, 则判为方向区内; 否则判为方向区外。主电抗器匝间保护逻辑框图如图3所示。

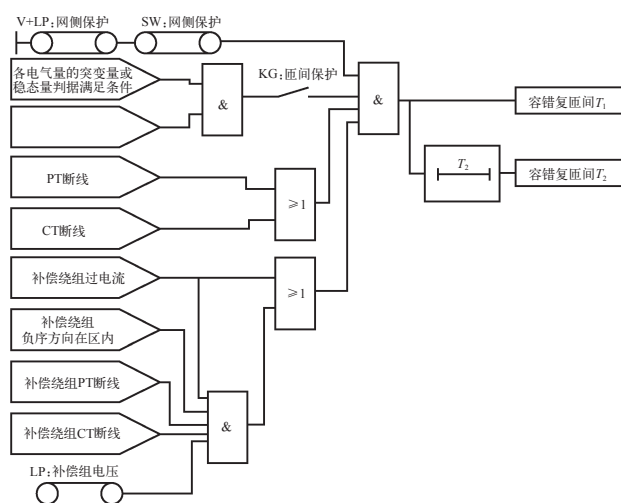


图3 主电抗器匝间保护逻辑框图

Fig. 3 Logic diagram of turn-to-turn protection of MCSR

注: LP为保护硬压板; SW为保护软压板; KG为保护控制字

2.3 补偿绕组保护

补偿绕组采用三角形连接, 运行时包含多次谐波电流分量, 进行保护补偿配置时需要考虑谐波问题。绕组保护包括复压过电流保护和接地保护, 其中接地保护信号取自电压互感器PT2。保护范围为补偿绕组接地故障, 延时动作于发出告警信号。

复压过电流保护信号取自补偿绕组角外电流互感器CT3和电压互感器PT2。保护范围为补偿绕组相间故障。复压过电流保护包含两段两时限, 每段有各自的电流和延时定值, 分别发出动作报文。第一时限延时动作于补偿绕组出线开关, 第二时限延时动作于跳开本体网侧开关、整流变压器和滤波器支路开关。可由控制字选择该保护是否经复合电压元件闭锁, 若选择不经复压元件, 则为纯过电流保护。若补偿绕组电压压板退出, 或发生了补偿绕组PT

断线, 则不判复压元件, 这时补偿绕组复压过电流保护成为纯过电流保护。补偿绕组复压元件由该绕组任一相电压降低、负序电压升高两者相“或”构成, 保护中设置有低电压定值和负序电压定值。补偿绕组复压过电流保护逻辑框图如图4所示。

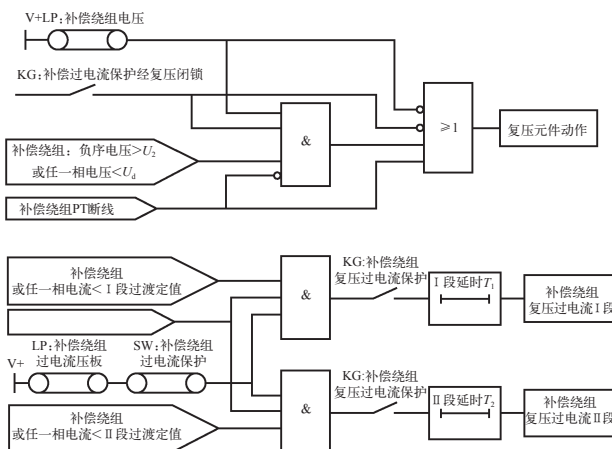


图4 补偿绕组复压过电流保护逻辑框图

Fig. 4 Logic diagram of repressing over-current protection of compensating winding

注: LP为保护功能硬压板; SW为保护功能软压板; KG为保护功能控制字。

2.4 控制绕组保护

新型MCSR每相两个控制绕组反极性串联, 由于串联点封闭在油箱中, 造成无法直接通过互感器测量两控制绕组的电压, 也给各相控制支路的电流测量造成困难, 传统MCSR控制绕组的平衡差动保护不再适用^[8]。控制绕组的故障分为接地短路故障、匝间短路故障和相间短路故障三类, 配置控制绕组间隙保护和直流母线接地保护。

控制绕组经放电间隙的接地, 需要配置间隙电流保护。根据经验, 保护的一次动作电流取100 A。用户根据采用中性点经放电间隙的专用零序电流互感器的电流比计算可得二次电流定值。间隙电流保护可以应对控制绕组接地和部分控制绕组匝间故障, 动作于跳开本体网侧开关、整流变压器和滤波器支路开关。

直流母线接地保护可以应对接地故障, 也可以应对匝间或相间故障造成的直流母线过电压情况。保护信号取自直流母线电压和接地

电阻电压, 保护范围为直流母线, 延时动作于发出告警信号。直流母线接地保护采用“注入式”方法, 直流母线正负两端与大地之间注入一个方波电源, 采集正、负半波的数据实时求解直流母线对地绝缘电阻值。实时监视注入源电压和注入回路的完好性, 当发现注入电源电压低于50%的正常电压或注入回路断线时瞬时闭锁保护, 延时10 s发告警信号。保护可实时监视励磁电压变化, 确保在励磁电压波动过程中保护不会误动作。

2.5 仿真实验

根据实际参数, 建立新型MCSR仿真模型, 对各种故障进行仿真, 验证保护方法的合理性, 故障点位置如图5所示。

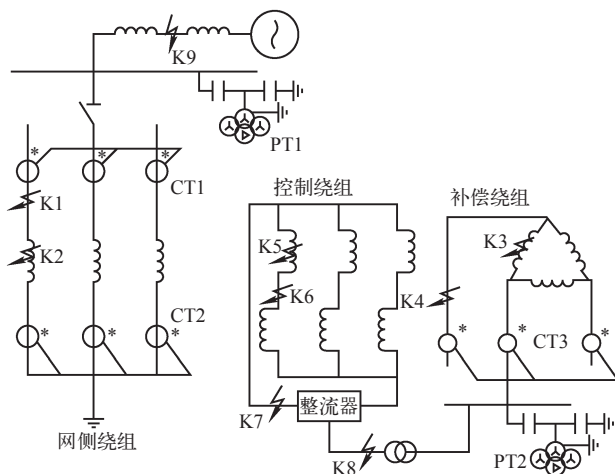


图5 故障点设置示意图

Fig. 5 Diagram of fault points setting

故障点K1和K3分别表示网侧绕组和补偿绕组接地及短路故障, 包括单相接地、两相接地或短路以及三相短路故障。K2、K4和K5分别表示网侧绕组、补偿绕组和控制绕组匝间故障。K6表示控制绕组接地故障, K7表示直流母线接地故障。K8、K9分别表示整流变压器低压侧和区外接地或短路故障, 包括单相接地、两相接地或短路以及三相短路故障。搭建模型分别仿真, 仿真实验结果表明, 本文针对匝间故障、补偿绕组故障和控制绕组故障设计的保护方案有效。100%容量下控制绕组50%匝间故障仿真结果如图6所示。其他故障仿真结果不再赘述。

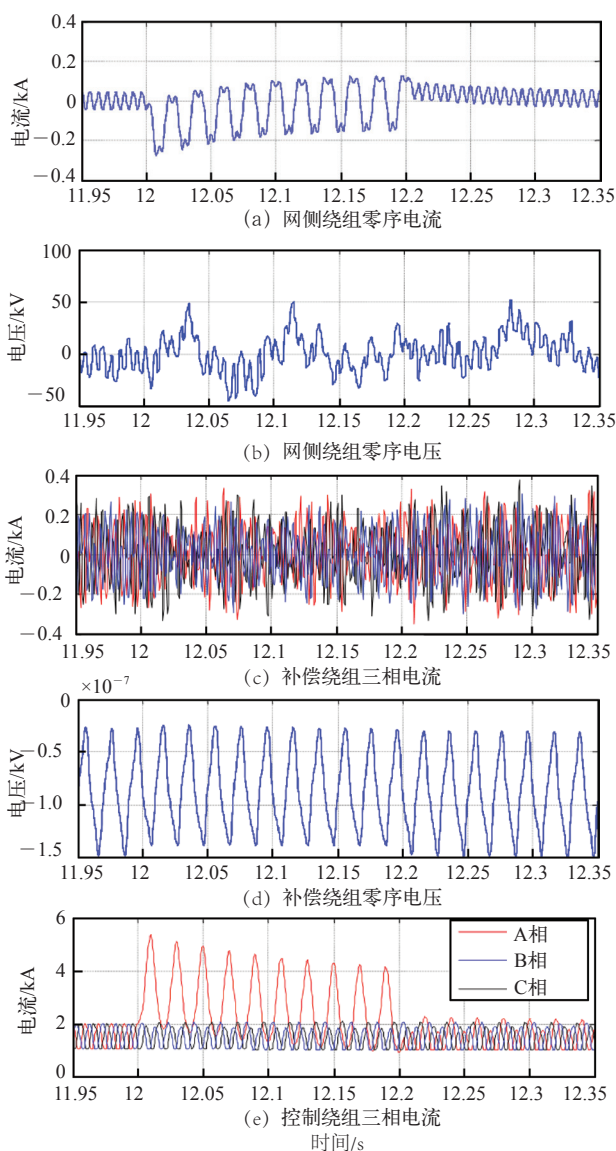


图6 100%容量下控制绕组50%匝间故障仿真结果

Fig. 6 Simulation result for 50% turn-to-turn fault at 100% capacity

3 MCSR本体保护的智能化方案

智能变电站是变电站综合自动化技术的发展方向, 其基本特征包括采用合并单元和智能终端实现设备智能化; 采用光纤通信替代二次电缆实现信息传输网络化以及按照DL/T 860标准实现信息模型、通信协议标准化。MCSR本体保护的智能化实施方案如图7所示。MCSR保护遵循“双重化设计”原则, 保证每套保护装置功能独立完备、安全可靠。跳闸信号通过点对点方式接入就地智能终端实现跳闸。MCSR本体配置4台合并单元和1台智能终端,

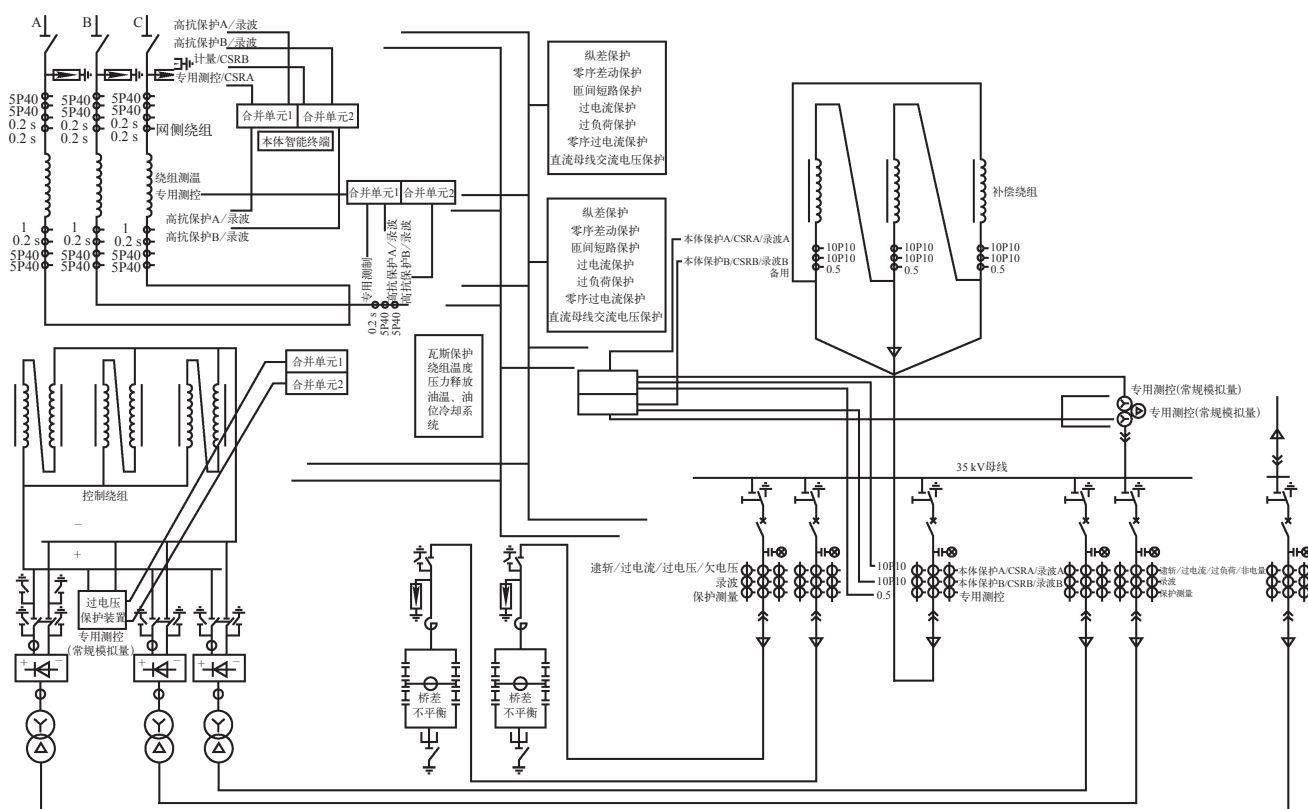


图7 MCSR本体保护智能化方案配置图

Fig. 7 Configuration diagram of intelligent scheme of MCSR ontology protection

补偿绕组配置2台合并单元，控制绕组配置2台合并单元。

MCSR控制系统通过两台站控层交换机与变电站自动化系统站控层完成信息交换功能，实现装置的数据采集、监视和控制等功能。MCSR控制系统上传至自动化系统的信息至少包括：①电流、电压和无功功率；②励磁系统告警信号；③保护动作信号；④滤波支路故障等信号。站内自动化系统下行至MCSR控制系统的命令：①无功控制指令；②励磁系统投退指令。MCSR控制系统站控层网络结构如图8所示，两套保护装置分别接入过程层网络，相互之间保持独立性；保护装置具备1个光口用于接收开关位置、保护闭锁和失灵等信息；具备1个MMS以太网通信接口与站控层通信。

新疆与西北联网第二通道的自动电压控制(AVC)系统由敦煌、沙州、鱼卡、烟墩和柴达木5个750 kV变电站或开关站的所有无功设备组成。无功设备包括线路可控高压并联电抗

器、母线可控高压并联电抗器、SVC和低压电抗器。750 kV MCSR作为母线可控高压并联电抗器，可控容量连续可调，弥补了整个AVC系统中分级式可控高压并联电抗器不能频繁调节的缺点。该系统自投运以来运行情况良好。

4 结束语

新疆与西北联网第二通道工程鱼卡750 kV开关站在国内首次应用磁控式可控并联电抗器。本文针对MCSR的保护关键技术进行研究，改进本体匝间短路保护，重点分析补偿绕组保护、控制绕组保护原理以及动作逻辑。结合保护配置和智能变电站运行要求，提出MCSR完整的智能化保护方案。

参考文献

- [1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 1-8.
- [2] 左玉玺, 王雅婷, 邢琳, 等. 西北750 kV电网大

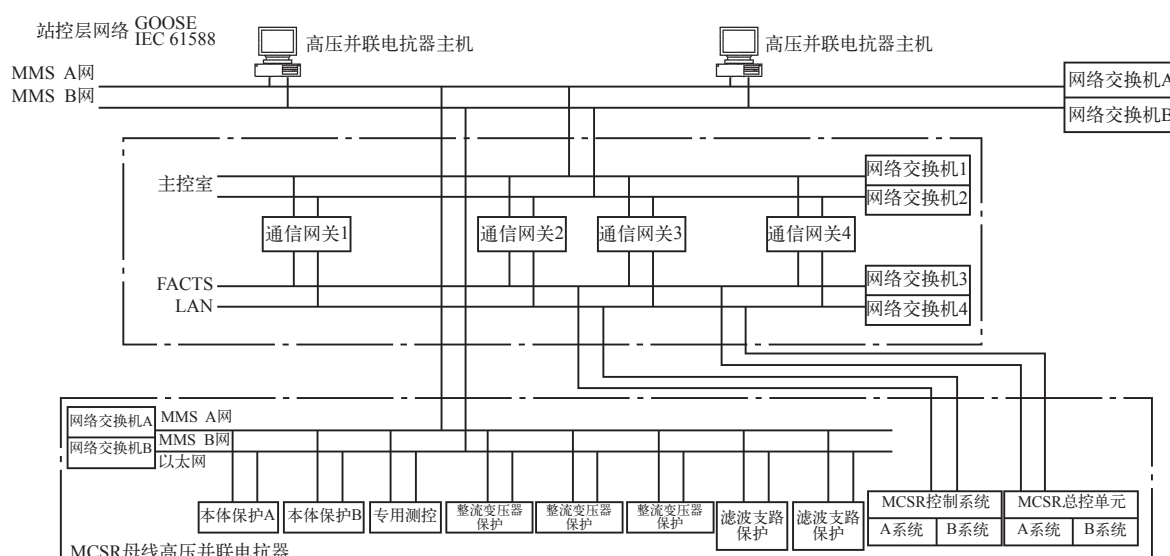


图8 MCSR控制系统站控层网络结构图

Fig. 8 Diagram of network structure for MCSR control system in station layer

- 容量新型FACTS设备应用研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2349-2354.
- [3] 郑涛, 赵彦杰. 超/特高压可控并联电抗器关键技术综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 127-135.
- [4] 周勤勇, 郭强, 卜广全, 等. 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 1-6.
- [5] 余梦泽. 新型并联磁控电抗器发展及应用[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 77-81.
- [6] 雷晰, 邓占锋, 徐桂芝, 等. 磁控型可控并联电抗器研究与实践[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊): 225-231.
- [7] 王庆杰. 500 kV磁饱和式可控电抗器电气特性及其保护研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [8] 张艳霞, 崔迪凡, 徐威. 500 kV磁控式并联电抗器控制绕组保护方案[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 148-154.
- [9] 赵彦杰. 新型磁控式并联电抗器仿真建模及保护策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [10] 周佩朋, 项祖涛, 郑彬, 等. 750 kV磁控式可控高抗谐波特性仿真与实测分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1059-1063.
- [11] 安振, 白保东, 马云飞, 等. 750 kV磁控式可控并联电抗器的研制与应用[J]. 变压器, 2016, 53(6): 1-4.
- [12] 郑彬, 班连庚, 宋瑞华, 等. 750 kV可控高抗应用中需注意的问题及对策[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 88-92.
- [13] 郑涛, 赵彦杰, 金颖. 特高压磁控式并联电抗器保护配置方案及其性能分析[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1396-1401.

作者简介



苏光

苏光 (1979-), 男, 高级工程师, 主要从事变电站设计工作。

熊再豹 (1979-), 男, 高级工程师, 主要从事变电站设计工作。

石雨鑫 (1989-), 男, 博士, 主要从事电力规划设计工作。

(收稿日期: 2019-06-21) **EA**