

模块化多电平换流器型高压直流输电系统 控制保护体系框架

蔡新红^{1,2}, 赵成勇¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 石河子大学 机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003)

摘要: 在介绍了 MMC-HVDC 系统拓扑结构的基础上, 阐述了 MMC-HVDC 控制保护系统的设计原则和主要功能, 指出采用冗余配置和分层设计的必要性。控制保护系统是 MMC-HVDC 系统的核心之一, 在搭建了 MMC-HVDC 控制保护系统总体结构的基础上, 提出建立 4 层结构的 MMC-HVDC 控制保护体系框架, 即直流系统控制层、极控制保护层、阀组控制层、子模块控制保护单元, 并进一步阐述了各控制层的控制功能及相互关系。

关键词: 高压直流输电; 模块化多电平换流器; MMC-HVDC; 控制保护体系

中图分类号: TM 72

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.028

0 引言

20 世纪 90 年代以来, 随着以全控型器件为基础的电压源换流器 VSC (Voltage Source Converter) 在高压直流 (HVDC) 输电系统中的逐步应用^[1-2], 目前已投入的 VSC-HVDC 输电工程已超过 14 项, 多为两电平和三电平的 VSC, 其存在的主要问题为 IGBT 串联所带来的静态均压、动态均压、电磁干扰以及由于过高的开关频率带来的开关损耗^[3]。而模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter)^[4-5]通过子模块串联构成, 易于扩展, 谐波畸变小, 开关损耗低, 容易实现冗余控制^[6-7], 因此 MMC 一经问世, 便以其独特的技术优势受到各国学者的广泛关注。目前已投入的 MMC-HVDC 工程仅有 2 项, 文献[8-10]对工程的各方面给予了介绍, 在控制保护系统方面, 文献[11-16]重点放在了 MMC 的控制策略、调制策略、电容电压平衡控制、桥臂环流抑制及故障保护策略研究上, 而对整体的 MMC-HVDC 系统控制保护体系框架的研究文献甚少, 文献[17]对 VSC-HVDC 控制保护系统的功能进行了详细的论述, 文献[18]也仅指出了 MMC-HVDC 控制系统包括系统级控制、变流器控制和阀控制, 因此对 MMC-HVDC 控制保护体系框架的进一步研究是非常有必要的。

本文首先介绍了 MMC 的拓扑结构及两端 MMC-HVDC 输电系统的基本组成, 详细阐述了 MMC-HVDC 控制保护系统的设计原则、基本要求及主要功能, 阐明了控制保护系统采用多重化配置及分层设计的必

要性, 进一步明确了 MMC-HVDC 控制保护系统的体系框架, 搭建了 MMC-HVDC 控制保护系统的总体结构。最后提出了 MMC-HVDC 控制保护系统的设计和实现方案, 为后续直流输电系统通用控制保护平台的开发奠定了基础。

1 MMC-HVDC 系统结构

MMC 拓扑结构如图 1 所示, 右边子图为子模块 (SM) 的电路结构。

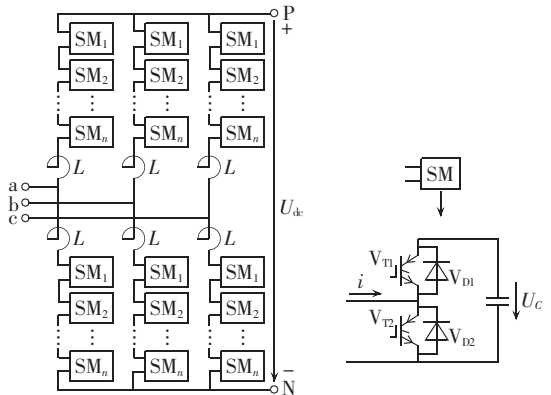


图 1 MMC 基本结构

Fig.1 Basic structure of MMC

典型的两端 MMC-HVDC 系统如图 2 所示, 主要包括以下设备。

a. 联接变压器: 将系统侧交流电压转换为与 MMC 直流侧电压相匹配的电压, 以确保开关调制度不至于过小, 使换流器运行在系统要求的运行区间内, 减

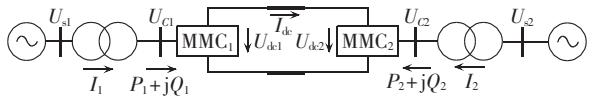


图 2 两端 MMC-HVDC 结构示意图

Fig.2 Two-terminal MMC-HVDC system

收稿日期: 2012-08-30; 修回日期: 2013-07-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划重大项目 (2010BAA-01B01)

Project supported by the Key Project of Scientific and Technical Supporting Programs of China during the 12th Five-year Plan Period (2010BAA01B01)

少输出电压和电流的谐波量,同时它也是换相电抗的一部分。

b. 换流器:采用模块化多电平换流器拓扑结构,如图 1 所示,每个桥臂由 n 个相同的子模块和桥臂电抗器串联而成,子模块由 2 个 IGBT 和 2 个反并联二极管组成半桥,与直流电容器并联构成。作为 MMC-HVDC 系统的核心设备,用于实现能量的交/直和直/交变换。

c. 直流线路:可以采用电缆或架空线路,实现有功功率的长距离传输。

2 MMC-HVDC 控制保护系统的设计原则及基本要求

2.1 设计原则

2.1.1 冗余

为了达到工程所要求的可用率和可靠性指标,不管是控制系统还是保护系统,全部采用多重化设计^[19-20],即冗余。通常是采用双通道设计,其中一个通道工作时,另一个通道处于热备用状态,并且每个通道都有自检系统。当工作中的通道发生故障时,切换逻辑将其退出工作,处于热备用状态的通道则自动切换到工作状态。

2.1.2 分层设计

一方面,从提高运行可靠性、运行操作和维护的方便性及灵活性、降低控制环节故障所造成的影响及危害的角度出发,复杂的控制系统宜采用分层结构^[21];另一方面,从加快控制速度、缩短控制周期的角度考虑,应该尽量减少决策环节,满足“扁平化”的需要,故层次不宜过多。

各层设计遵循如下原则^[22]:控制指令流从高控制层向低控制层单向流动,而运行流相反,即从低控制层向高控制层单向流动;同等级层的各控制功能尽可能不相互干扰,任一环节的故障尽可能不影响其他环节。

2.1.3 控制系统与保护系统相对独立

控制和保护在硬件配置和软件配置上都要着重考虑,保护要独立于其他设备,并在物理上和电气上独立于控制系统,控制系统和保护系统统一实现时,应采用不同的主机。

2.1.4 控制与保护功能应相互配合

控制系统和保护系统的性能直接影响着整个系统运行的可靠性、安全性及经济性,因此这两者的协调配合也就至关重要,需具备良好的配合逻辑关系。

如系统发生故障时,控制系统应立即利用其快速性来抑制事故发展,使直流系统尽可能不退出运行而发挥其技术优势,给交流系统提供有力的支援。但当系统发生严重故障,控制系统达到控制范围极

限,系统不能恢复稳定时,保护应迅速动作闭锁换流器触发脉冲,根据故障严重程度和不同区域,发出跳开交流断路器指令,隔离故障设备,停运系统。

因此 MMC-HVDC 控制系统和保护系统的协调配合能有效地抑制故障的扩散,缩小故障区域,减少对非故障区域的危害,以便在故障消除后能迅速恢复系统的稳定运行。

2.2 对控制保护系统的基本要求

a. 可靠性。可靠性是对控制与保护系统性能的最根本要求。控制保护装置均采用冗余配置,防止在控制保护系统失效的情况下故障不能可靠清除,避免发生误动或拒动。每套冗余配置的控制、保护完全一样,有自己独立的硬件设备。

b. 灵敏性。控制保护系统的灵敏性是指对控制指令及故障和不正常运行状态的反应能力。在系统任意运行条件下,当控制指令发生改变或出现故障及不正常运行状态时都能敏锐感觉、正确反应。

c. 选择性。控制保护系统要能够根据不同的故障情况及严重程度,启动不同的自动顺序控制保护程序,确保设备主保护和后备保护时序上的正确配合。由于两端换流站控制保护系统相对独立,应避免一端换流器故障引起另一端换流器的保护动作。

d. 速动性。为提高系统运行的稳定性,充分利用控制系统,动作迅速而又能满足选择性要求,以尽可能快的速度停运、隔离故障系统或设备,保证系统和设备的安全。

3 MMC-HVDC 控制保护系统的主要功能

MMC-HVDC 的控制保护系统对于直流输电系统的安全、经济运行起着至关重要的作用,因此应具有以下基本的控制保护功能。

a. 直流输电系统的启停控制。MMC-HVDC 系统的启动或停运是按照一定的时序配合完成对子模块电容器的充电或放电、开关设备的投运或跳闸闭锁、换流器的解锁或闭锁的控制。

b. 功率控制。包括 MMC-HVDC 系统输送的有功功率的大小和方向的控制和对 MMC 向交流系统提供的无功功率的控制。功率方向的改变是通过改变电流的流动方向来实现的。

c. 变压器分接头控制。通过调节变压器分接头来调节变压器二次侧基准电压,使换流器的调制度保持在最佳范围,进而获得最大的有功和无功输送能力。

d. 干扰或故障状态下维持系统稳定运行。由于 MMC-HVDC 系统两端的控制系统是相对独立的,不需要站间通信,当一端交流系统故障或运行异常时,为了维持系统的稳定运行必须采取相应的控制保护策略,避免该类故障的发生对设备造成的危害。

e. 事故后快速恢复供电和黑启动^[23]。当系统一端发生电压崩溃或停电时,MMC-HVDC 系统可以为故障后电网的黑启动提供支撑。这时的直流系统相当于无转动惯量的备用发电机,随时准备向瘫痪的电网内重要负荷供电。实现这一功能的前提是直流系统的另一端连接在运行正常的电网上。

f. 直流输电保护控制。当系统发生故障或出现异常运行状况时,能迅速启动控制保护策略,保护一、二次设备安全,减少因过压或过流对设备造成的危害,提高系统运行的安全性和经济性。

g. 信息监控。对换流站、直流线路等各个一次设备的各种运行参数、运行状态以及控制系统本身的信息进行监视控制。

4 MMC-HVDC 控制保护系统的总体结构

MMC-HVDC 控制保护系统按照功能可分为:远方控制接口 RCI(Remote Control Interface)系统、运行人员监控系统、交直流站控系统和直流控制保护系统 4 个部分^[24-25],如图 3 所示。

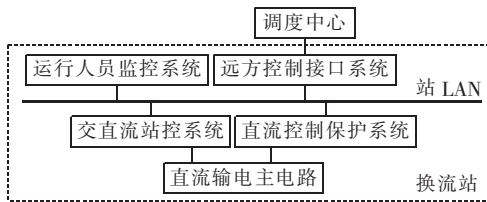


图 3 MMC-HVDC 控制保护系统功能结构示意图
Fig.3 Functional structure of MMC-HVDC control and protection system

4.1 RCI 系统

RCI 系统用于与网调、省调、直流集控中心等交换直流换流站的监控数据并执行远方调度命令,由远动工作站、远动通信设备等组成。

4.2 运行人员监控系统

运行人员监控系统是换流站正常运行时运行人员的主人机界面和监控数据存储系统。主要包括:站时钟系统、站 LAN 网、运行人员工作站、工程师工作站、站长工作站、SCADA 服务器、网络打印机、规约转换工作站或规约转换器、培训系统、MIS 接口工作站等。

4.3 交直流站控系统

交直流站控系统分为交流站控和直流站控 2 个部分,负责执行交/直流设备的投切、启停、运行方式转换、状态监视、测量等功能。主要设备包括站控系统的主机、分布式现场总线和分布式 I/O 等。

交直流站控系统的主要功能可以归纳如下:整个换流站范围内的数据采集及信息处理、上传至运行人员控制系统;全站范围内的开关、刀闸和地刀的操作控制;联锁功能;同期功能;站控系统内部及辅

助系统的事件生成和上传至运行人员控制系统;在线谐波监视;对辅助系统的监控(包括站用电系统的控制、监视,以及对其他辅助系统的监视功能);对一次测量装置的接口功能。

4.4 直流控制保护系统

直流控制保护系统(图 4)是整个直流输电工程的核心,其控制特性直接决定直流系统的各种响应特性。直流控制保护系统包括直流控制系统和直流保护系统 2 个部分。

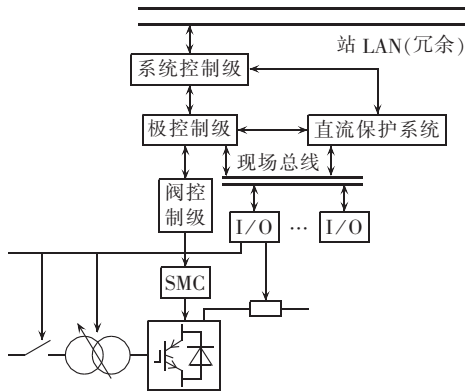


图 4 直流控制保护系统结构示意图
Fig.4 Structure of DC control and protection system

a. 直流控制系统按控制级别由高到低可分为系统控制级、极控制级、阀控制级与功率子模块控制保护单元 SMC(SubModular Control unit)。

b. 直流保护系统的控制、保护功能分别由不同的主机完成,保护区内的所有保护功能集成在 1 台主机内。通常直流保护系统采取 2 套冗余配置或三选二冗余配置。直流保护系统主要由决策单元、开关量输入输出接口和数据采集系统 3 个部分构成。

5 MMC-HVDC 控制保护系统的设计与实现

MMC-HVDC 控制保护系统的设计基于一种分层、分布的开放式系统,为了提高系统的安全性和保护的可靠性,两端换流站的控制保护系统采用完全双重化设计^[26],可确保直流系统不会因为任一控制系统的单重故障而发生停运,也不会因为单重故障而失去对换流站的监视。

MMC-HVDC 系统控制保护系统照按面向物理或逻辑对象的原则进行功能配置,可将 MMC-HVDC 控制保护系统分为 3 个层次^[27]:数据采集与监控层、控制保护层、输入输出层,其总体结构如图 5 所示。其中控制保护层是 MMC-HVDC 系统正常运行的核心部分,按上下层结构划分,主要由直流系统控制层、极控制保护 PCP(Polar Control Protection)层、阀组控制(VBC)层及功率子模块控制保护单元 4 个层次组成。

考指令的接入,并通过外环控制设计对有功量及无功量进行有效的控制,输出的有功电流和无功电流参考指令通过内环电流解耦控制器得到跟踪,得到换流器期望的正弦参考基波电压,下发给阀组控制层,以获得期望的电压、潮流等运行指标,并把本级有关运行信息反馈给直流系统控制层。极控制系统包括以下具体控制功能。

a. 直流电压、功率等控制。根据直流系统控制层提供的直流电压、有功功率、无功功率和交流电压或频率参考值,通过一定的控制策略得到调制信号,然后将其输入到阀控层的触发脉冲环节以实现换流器的控制。典型的两端极控制结构设计示意图如图 6 所示。

b. 直流电压限幅控制。当交流系统发生故障引起直流电压上升或下降且超过限值时,为避免因故障电流致使直流电压失去控制或电压过高损坏器件及降低绝缘性能,引发新的故障,故在直流电压的控制中进行限幅控制。

c. 直流电压、电流变化速率的控制。直流电压、电流变化速率过大将会损坏器件,故将电压、电流的变化速率限制在器件所能承受的范围之内。

d. 换流单元闭锁和解锁及紧急闭锁顺序控制。在干扰和故障状态下,为维持系统的稳定,保护设备,通过一定步骤对换流器实施解锁或闭锁控制。

e. 直流线路故障重启。当直流线路瞬时故障时,极控系统可以通过暂时闭锁控制换流站脉冲限制暂态过电流,经过一定时间后,直流系统试图重启,以恢复直流系统的运行。

f. 负序电流控制。当 MMC 系统侧交流系统电压不平衡或发生不对称故障时,换流器交流侧会产生较大的负序电流,为避免系统故障保护动作,威胁换流装置的安全,必须采取抑制负序控制的策略,使有功、无功及直流电压中 2 次谐波分量限制在系统能正常运行的范围内,以便故障解除后系统能迅速恢复到正常状态。

g. 运行信息的采集和处理。处理整个极控制层

内信息的采集及信号,送至上一控制层;接收下一层运行信息,判断是否达到换流器控制层指令要求,实时调整向下一层发送的控制指令。

5.2.2 极保护系统^[28]

根据前文的设计原则,保护系统采用完全双冗余化冗余配置,防止在保护系统失效的情况下故障不能切除。保护系统的配置是根据不同的故障类型进行的,根据 MMC-HVDC 系统的结构,整个系统的保护主要分为交流系统的保护、换流站的保护和直流输电线路的保护。极保护系统的功能主要包括直流场保护、直流线路保护等。

5.3 阀组控制层

阀组控制层在功能上是联系上层控制系统与底层开关器件控制的中间枢纽。阀组控制层接收极控制层输出的控制信号,并通过适当的调制方式产生相应的阀触发脉冲以控制阀组的导通、关断,从而实现对换流器阀的触发控制。同时接收各子模块开关器件驱动电路的回报信号及状态信息并上报至极控制保护系统的监控单元。阀组控制层是实现各种指令的具体执行操作层,与系统控制层、极控制层相比,其响应速度是最快的。阀组控制层的功能结构示意图如图 7 所示。

阀组控制层主要包括以下功能。

a. 开关调制。各换流器阀的触发脉冲是通过接收极控制层传来的控制指令,通过适当的调制而产生的。产生调制触发脉冲的方法有多种^[10],较常用的除正弦脉宽调制外,还有空间矢量脉宽调制、特定谐波消除及载波移相正弦脉宽调制等。

b. 阀组导通、关断控制。阀组控制系统将调制产生的换流器阀的触发脉冲发射、分配和转换并送到每个子模块的控制极,以控制阀组的导通、关断,从而实现对换流器阀的触发控制。

c. 阀组保护控制。保护换流器阀不受正向电压和电压变化率陡值的冲击。如果出现阀击穿或短路,能够闭锁触发脉冲,自我保护,并触发相应的控制保护机制。

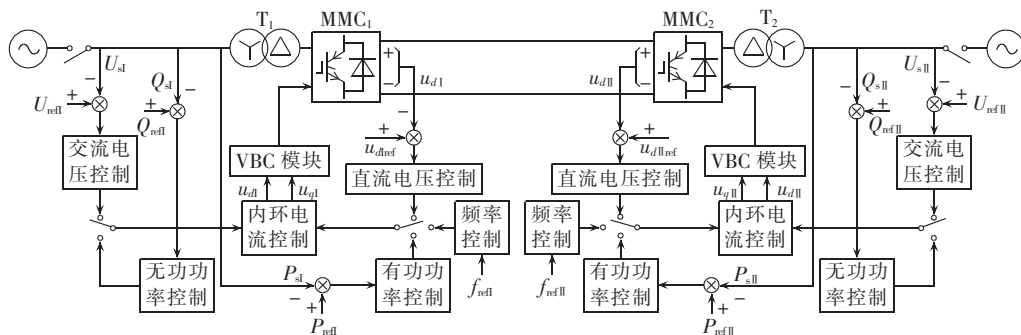


图 6 两端 MMC-HVDC 极控制结构设计示意图

Fig.6 Design of two-terminal MMC-HVDC polar control structure

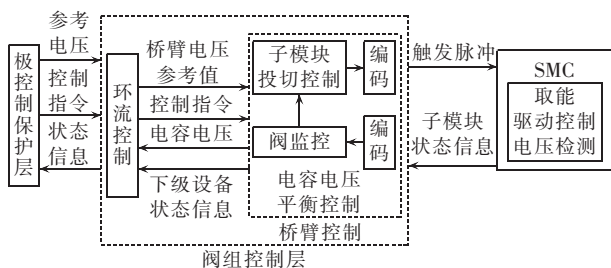


图 7 阀组控制层功能结构示意图

Fig.7 Functional structure of valves control layer

d. 阀组的导通、关断状态监测。通过光纤与阀控单元相连,监测阀组子模块的通、断状态;判断阀组是否正常运行,并且将状态信息反馈给极保护系统。

e. 子模块电容电压平衡控制。对于 MMC 拓扑结构本身而言,子模块电容在桥臂电流发生变化时,存在电容的充放电现象,会导致各个子模块电容电压不均衡,造成功率器件的电压应力不一致,因而必须对各桥臂子模块的电容电压进行均衡控制。

f. 内部环流抑制控制。MMC 内部环流是由各相上、下桥臂电压之和彼此不一致引起的,它只在 MMC 三相桥臂间流动,对外部交流系统不产生任何影响,但会造成换流器桥臂电流波形畸变。因此需抑制内部环流,使桥臂电流更逼近正弦波,以减小相单元总能量的波动幅度,有利于 MMC 的稳定运行。

5.4 功率子模块控制保护单元

功率子模块控制保护单元是直接对 MMC 中的每个子模块进行触发控制的设备,其主要功能有:

a. 负责接收阀组控制层通过光纤输出的子模块控制脉冲,并对各子模块下达触发脉冲指令;

b. 上报各子模块电容电压及状态信息,并将这些信息传送到阀组控制的检测板,每块检测板对子模块电容电压进行预处理,将电容电压值与电容编码,连同出现故障的子模块信息上报至中央处理板。

6 结论

本文较为全面地构建了 MMC-HVDC 系统控制保护体系框架,明确了控制保护系统设计原则和基本要求,指出了采用冗余配置及分层控制结构的必要性,明确了控制保护系统各层次之间的关系及实现的控制功能,详细阐述了控制保护系统各层控制系统的设计和实现,为新型混合双馈入直流输电系统通用控制保护平台的开发和建设奠定了基础。随着我国大力发展智能电网技术的需求趋势,MMC-HVDC 系统控制保护体系框架的建立有利于缩短设计周期及工程实用化,因而是非常有实际意义的。

参考文献:

[1] 张桂斌. 新型直流输电及其相关技术研究[D]. 杭州:浙江大学,

2001.

ZHANG Guibin. Some topics on novel HVDC and its related technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.

[2] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.

LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.

[3] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.

XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.

[4] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]// Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 1-6.

[5] MARQUARDT R, LESNICAR A. A new modular voltage source inverter topology[C]// EPE 10th European Conference on Power Electronics and Applications. Toulouse, France: European Power Electronics and Drives, 2003: 5.

[6] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.

LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.

[7] ALLEBROD S, HAMERSKI R, MARQUARDT R. New transformerless, scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission[C]// Power Electronics Specialists Conference. [S.l.]: IEEE, 2008: 174-179.

[8] 乔卫东,毛颖科. 上海柔性直流输电示范工程综述[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1137-1140.

QIAO Weidong, MAO Yingke. Overview of Shanghai flexible HVDC transmission demonstration project[J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1137-1140.

[9] 刘高原,季子孟,林思海. 柔性直流换流站保护系统的研究与分析[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1141-1145.

LIU Gaoyuan, JI Zimeng, LIN Sihai. Research on protection system of flexible HVDC converter station[J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1141-1145.

[10] 王熙骏,包海龙,叶军. 柔性直流输电技术及其示范工程[J]. 供用电, 2011, 28(2): 23-26.

WANG Xijun, BAO Hailong, YE Jun. High-voltage DC flexible technology and its demonstration engineering[J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(2): 23-26.

[11] 丁冠军,汤广福,丁明,等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 1-6.

DING Guanjun, TANG Guangfu, DING Ming, et al. Topology mechanism and modulation scheme of a new multilevel voltage source converter modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 1-6.

[12] 丁冠军,丁明,汤广福,等. 新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.

DING Guanjun, DING Ming, TANG Guangfu, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of new multilevel VSC modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 1-6.

[13] 屠卿瑞,徐政,郑翔,等. 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 547-552.

TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. Mechanism analysis on the circulating current in modular multilevel converter based on HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 547-552.

[14] HAGIWARA M, AKAGI H. PWM control and experiment of modular multilevel converters [C]// Proceedings of Power

- Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece: IEEE, 2008: 154-161.
- [15] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.
- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [16] 孔明,邱宇峰,贺之渊,等. 模块化多电平柔性直流输电换流器的预充电控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 67-72.
- KONG Ming, QIU Yufeng, HE Zhiyuan, et al. Pre-charging control strategies of modular multilevel converter for VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 67-72.
- [17] 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: 122-150, 327-334.
- [18] 刘隽,贺之渊,何维国,等. 基于模块化多电平变流器的柔性直流输电技术[J]. 电力与电源, 2011, 1(1): 33-38.
- LIU Jun, HE Zhiyuan, HE Weiguo, et al. The introduction of technology of HVDC based on modular multi-level converter[J]. Power and Energy, 2011, 1(1): 33-38.
- [19] 于德政. 基于模块化多电平换流器结构的 HVDC Light 系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- YU Dezheng. Study of HVDC light based on modular multi-level converter[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [20] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011: 93-94.
- [21] 梁海峰. 柔性直流输电系统控制策略研究及其实验系统的实现[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- LIANG Haifeng. Research on control strategy of VSC-HVDC and implementation of its experiment system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [22] 梁海峰,李庚银,王松,等. VSC-HVDC 系统控制体系框架[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 141-147.
- LIANG Haifeng, LI Gengyin, WANG Song, et al. VSC-HVDC control system framework[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 141-147.
- [23] 陈海荣,徐政. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 42-48.
- CHEN Hairong, XU Zheng. Control design for VSC-HVDC supplying passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 42-48.
- [24] 石岩,韩伟,张民,等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 11-15.
- SHI Yan, HAN Wei, ZHANG Min, et al. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 11-15.
- [25] 王蓓. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 53-58.
- WANG Yao. Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 53-58.
- [26] 韩业辉,陈建业,关胜利. 基于 DSP、工控机和网络的 SVC 分布式控制系统[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(9): 1206-1209.
- HAN Yehui, CHEN Jianye, GUAN Shengli. SVC distributed control system using digital signal processing, industrial computers and network[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(9): 1206-1209.
- [27] 田杰. 高压直流控制保护系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 10-14.
- TIAN Jie. Design and realization of HVDC control and protection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 10-14.
- [28] 傅闯. 高压直流输电控制保护系统新技术——WIN-TDC[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(9): 72-77.
- FU Chuang. Technologies in HVDC control and protection system WIN-TDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(9): 72-77.

作者简介:

蔡新红(1968-),女,甘肃武威人,副教授,博士研究生,主要研究方向为交流输配电及柔性直流输配电技术(E-mail: wrpcxh@163.com);

赵成勇(1964-),男,浙江丽水人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为高压直流输电与柔性输配电技术、现代电能质量分析与控制等(E-mail: chengyongzhao@ncepu.edu.cn)。

Framework of control and protection system for MMC-HVDC transmission system

CAI Xinhong^{1,2}, ZHAO Chengyong¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: The topological structure of MMC (Modular Multilevel Converter)-HVDC system is introduced, based on which, the design principles and main functions of its control and protection system are illustrated. Since the control and protection system is of great importance, the necessity of its redundant configuration and multi-layer design is pointed out. Its overall structure is given and a four-layer framework is proposed: DC system control layer, polar control & protection layer, valve control layer and sub-module control & protection unit. The control functions of each control layer and the relationship among layers are further described.

Key words: HVDC power transmission; modular multilevel converter; MMC-HVDC; control and protection system