

MMC 控制系统时序逻辑与子模块故障监测

罗 程,赵成勇,张宝顺,倪晓军,翟晓萌,郭春义

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:对模块化多电平换流器(MMC)采用站级控制器、子模块控制器(SMC)和阀基控制器(VBC) 3 层控制系统。设计了 SMC 与 VBC 之间的时序逻辑,保证了控制系统的实时性。当硬件模拟电路检测到子模块出现过电压或者欠电压时,如果过电压或者欠电压时间超过 $20\ \mu\text{s}$,则 SMC 将故障信息传送至上层控制,有效降低了保护系统误动的概率。对采用了上述控制系统的 MMC 物理模拟系统进行了稳态实验,实验结果表明,系统能够有效控制直流电压、输送功率,并使子模块电压稳定在 $150\ \text{V}$ 左右。

关键词:模块化多电平换流器;换流器;物理模拟系统;控制系统;时序逻辑;子模块故障

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.013

0 引言

模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 是 2001 年由德国慕尼黑联邦国防军大学的 Rainer Marquardt 提出,它区别于以往由多个开关器件直接串联构成的两电平、三电平电压源换流器 VSC (Voltage Source Converter) 结构,采用子模块 (SM) 级联的方式,这种方式可有效降低 IGBT 器件的损耗和交流侧谐波含量,这种模块化结构也使得系统更易于扩展^[1-4]。

自 MMC 结构提出以来,国内外对其进行了大量的理论研究,包括其建模、调制策略、电容均压、环流等^[5-12],取得了很大进展。针对 MMC 物理系统及控制器,文献[13]介绍了基于南澳柔性直流输电示范工程的背靠背大功率柔性直流输电样机,分析了采用注入增强栅晶体管 (IEGT) 的优势。文献[14]建立了基于 MOSFET 的 49 电平 MMC 样机,采用光纤隔离测控复用电路有效地降低了光纤通道数,并且保证了全控器件触发的可靠性,但文中没有对如何可靠监测子模块的各类故障进行说明。文献[15]给出了一种柔性直流输电阀基控制器 VBC (Valve Base Controller) 的设计思路,并指出传统直流输电中的阀基控制设备与柔性直流输电中 VBC 的区别,但是针对 MMC 这种多级控制器系统,没有给出 VBC 与上层站级控制器以及底层子模块控制器 SMC (Sub-Module Controller) 之间协同工作的方法。文献[16]介绍了 Trans Bay Cable 工程的建模过程,但并未对其物理系统及控制器结构进行介绍。

本文提出一种控制器同步方法:顶层控制器通

过背板总线同时向 6 个桥臂上的 VBC 发送方波同步信号,VBC 在检测到方波信号的上升沿后同时开始一个新的控制周期,继而向各自桥臂上的所有 SMC 发送光纤同步信号,再结合合理的时序逻辑关系,通过这种自上而上、分级同步的方法实现了系统 3 级控制器的配合。针对子模块过电压以及欠电压故障的监测,采用硬件模拟电路检测是否出现过电压或欠电压,再通过软件短时延时算法来判断故障是否持续,实现了子模块过电压以及欠电压故障的可靠监测,防止了故障保护系统由于硬件模拟电路的误差出现误动。

1 MMC 及其物理模拟系统

1.1 MMC 基本拓扑

三相 MMC 拓扑结构及其内部子模块结构如图 1 所示,其每个桥臂由 N 个子模块级联构成,上下桥臂合起来组成一个相单元,每个桥臂上有一个电抗器 L ; O 为等效中性点;图 1 的虚线框中为子模块结

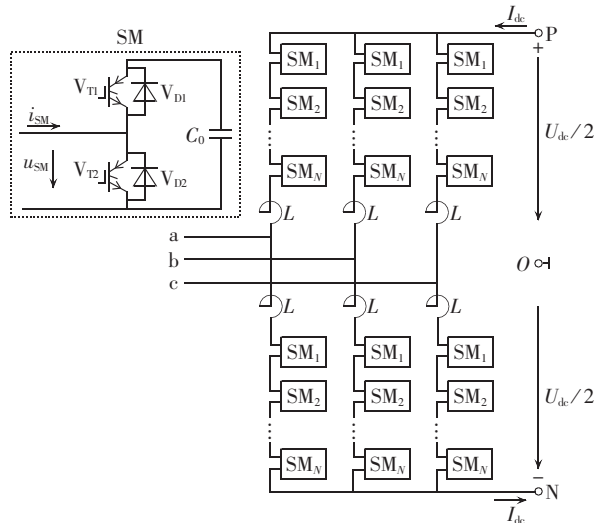


图 1 三相模块化多电平换流器拓扑结构

Fig.1 Topology of three-phase MMC

收稿日期:2014-03-22;修回日期:2015-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177042);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(SS2013AA050105)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51177042) and the National High-tech Research and Development Program of China(863 Program)(SS2013AA050105)

构, i_{SM} 和 u_{SM} 分别为子模块的电流和电压, C_0 为子模块内部电容。

子模块运行状态可以根据其内部 2 个 IGBT 器件的通断状态分为投入、切除和闭锁 3 种:

a. V_{T1} 导通、 V_{T2} 关断, 子模块对外呈现其内部电容电压, 此时为投入状态;

b. V_{T1} 关断、 V_{T2} 导通, 子模块对外呈现零电压, 此时为切除状态;

c. V_{T1} 与 V_{T2} 均闭锁, 这种工作状态为闭锁状态, 其为非正常工作状态, 用于 MMC 启动时向子模块电容进行预充电, 或者在发生系统故障时保护换流器。

1.2 MMC 物理模拟系统

MMC 物理模拟系统接线如图 2 所示。为了降低对实验室电源的要求, 系统采用互拖式的运行结构, 2 列均为 21 电平 MMC 系统, 换流器每桥臂串联 22 个子模块, 其中 2 个子模块为热备用; 2 列 MMC 系统之间通过直流电缆连接, 直流线路上装有开关; 电源侧设置有调压器, 可用来测试系统在不同电压下的运行工况; 在系统的交流侧和直流侧预留了多个外部接口, 可用来进行故障设置以及多端柔性直流输电系统的扩展。

通过多个开关间的配合, 本系统可开展多种实验。

a. 断开 QS_2 , 闭合 QF_1 、 QS_1 、 QS_{a1} 、 QF_{a1} 、 KM_{a8} 、 KM_{a9} 、 KM_{b8} 、 KM_{b9} 、 QF_{b1} 、 QS_{b1} , 通过操作 $KM_{i2/3/4}$ 可进行 MMC 高压直流输电 MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter High Voltage Direct Current) 给无源负载供电的实验。

b. 闭合 KM_{a8} 、 KM_{a9} 、 KM_{b8} 、 KM_{b9} 以及 QS_2 , 系统处于双端运行状态, 此时可进行两端 MMC 环网运行实验, 用以研究 MMC 特性。处于这种运行状态下时, 有功功率只会两端换流站和直流线路之间环形流动, 不经过实验室电源, 实验室电源提供的有功量只包含两端换流站有功损耗。

c. 闭合 $KM_{a2/3/4}$ 中任意单个或多个开关, 可以研究 MMC 在交流系统出现电压不平衡或者短路时的运行工况。

d. 闭合 KM_1 、 KM_2 中的 1 个或 2 个, 可以分别研究 MMC-HVDC 单极直流短路故障以及双极直流短路故障。

2 控制系统及其时序逻辑

2.1 控制系统架构

本文采用分级控制结构, 将系统的控制划分为 3 级, 即站级控制器、VBC、SMC。其中站级控制器根据上位机所给参考量和实时采样数据产生调制比及移相角, 形成正弦电压参考波, 并完成与上位机的通信; VBC 根据站级控制器产生的参考波, 并结合环流抑制策略及均压排序策略来产生各个子模块所需的触发脉冲; SMC 根据 VBC 所产生的触发脉冲实现对全控器件的可靠触发。

站级控制器的功能由数字信号处理器 (DSP) 与现场可编程门阵列 (FPGA) 协同实现。其中 DSP 负责主控芯片 FPGA 与上位机之间的数据通信以及系统控制保护的功能, 主控芯片 FPGA 负责正弦电压参

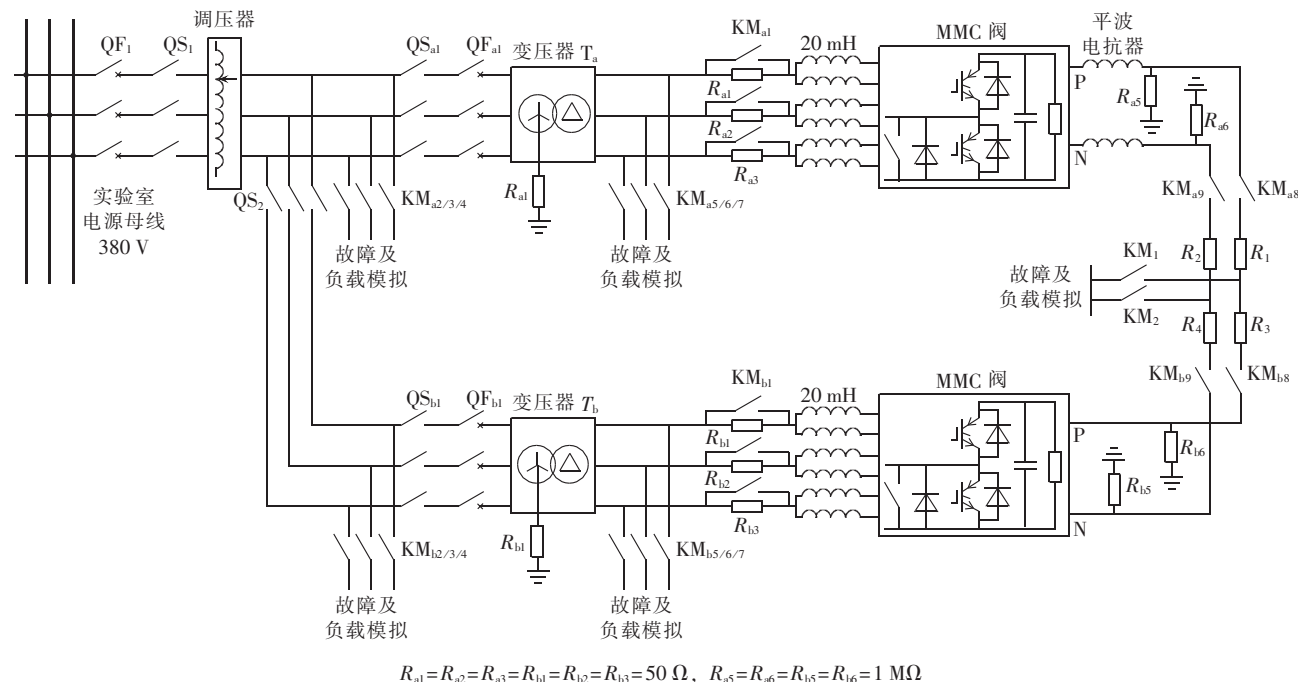


图 2 MMC 物理模拟系统

Fig.2 Physical simulation system of MMC

考波的生成。FPGA 和 DSP 之间通过 16 位的地址总线和 16 位的数据总线进行通信,DSP 与上位机之间通过以太网总线进行通信。VBC 的功能由 FPGA 实现,负责产生各个子模块所需的触发脉冲,并完成 VBC 与站级控制器的数据通信。SMC 的功能由复杂可编程逻辑器件(CPLD)实现,负责全控器件的可靠触发、子模块信息的采集以及与 VBC 的数据通信。控制系统整体架构如图 3 所示。

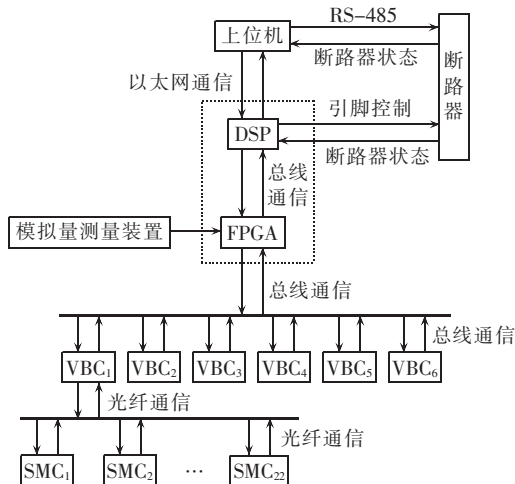


图 3 控制系统架构

Fig.3 Architecture of control system

2.2 控制系统时序逻辑

MMC 物理系统需要多级控制器协同工作,由于各个控制模块功能不同,所选芯片也不尽相同,其晶振或电路参数之间的差异会引起控制系统的误差。VBC 与 SMC 采用不同的芯片,它们分别工作在各自的时钟下,互不影响。基于此,本文提出以下控制系统时序逻辑:

a. 站级控制器向 6 个 VBC 同时发送 10 kHz 的方波信号作为同步信号,使整个系统工作在以站级控制器为统一基准的固定周期下,即 1 个控制周期为 100 μs ;

b. 当 VBC 检测到同步信号的上升沿时,开始 1 个控制周期,VBC 计时模块清 0,并开始计时;

c. 当 VBC 计时模块计时至 1 μs 时,VBC 向 SMC 发送同步数据帧,当 SMC 收到同步帧时,SMC 计时模块清 0,并开始计时;

d. 当 SMC 计时至 0.05 μs 时,SMC 向 VBC 发送 24 位数据帧,VBC 接收到子模块信息后,开始进行电容排序、故障处理等操作;

e. 当 VBC 计时至 70 μs 时,其向 SMC 发送 8 位数据帧,其中包含 IGBT 触发以及子模块是否旁路等信息,至此,VBC 1 个周期内的控制任务已全部完成,等待下一次同步信号;

f. 当 SMC 计时模块计时至 77.5 μs 时,进行死

区设置,死区设置时间为 10 μs ;

g. 当 SMC 计时至 87.5 μs 时,将 IGBT 触发信息发送至驱动模块,至此,子模块 1 个周期内的控制任务已全部完成;

h. SMC 等待下一次同步信号。

VBC 与 SMC 同步时序图如图 4 所示。

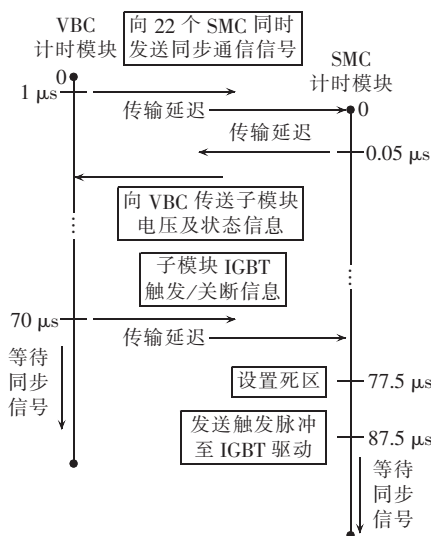


图 4 VBC 与 SMC 时序逻辑

Fig.4 Sequential logic between SMC and VBC

3 子模块故障监测及上报

子模块是 MMC 最基本的工作单元,MMC 通过控制子模块的有序导通和关断实现交流电能到直流电能的变换,子模块的工作状态信息包括子模块电容电压、子模块故障、子模块旁路信息。其中子模块的故障可以分为 2 类:SMC 光纤通信故障,包括接收数据超时、接收数据帧格式错误、奇偶校验错误;子模块内部故障,包括子模块电容过电压、欠电压、子模块温度超限和 IGBT 过流故障。本文重点研究子模块内部故障检测及上报原理。

3.1 子模块故障监测

3.1.1 子模块过电压欠电压故障监测

传统的过电压检测方法是通过硬件电路产生基准电压,然后将实时检测的电压与基准电压进行比较,如果超过基准电压,即判定为过电压,欠电压的检测方法类似。这种方法虽然操作简单,但是由于过电压、欠电压监测电路处于强电强磁场的环境中,易受到外部的干扰,干扰信号达到一定强度,叠加至原信号后,若超过过电压、欠电压设定阈值,就可能会引起比较电路判断错误,从而导致保护系统的误动,不利于系统稳定运行。本文通过硬件模拟电路检测、软件算法控制相结合的方法实现子模块电容过电压、欠电压的可靠监测。在子模块控制板上设置模拟电路检测子模块电容是否过电压或者欠电压,为了

防止硬件模拟检测电路的误差所带来的过电压、欠电压误动,在软件上设置了延时上报故障机制,即检测到过电压或者欠电压达到一定时间后,再向上层控制器上报故障,以下为具体的过电压、欠电压故障检测机制。

图 5 为子模块过电压故障监测框图,当子模块电容电压大于设置的过电压基准电压时,通过模拟比较电路,端口 OV 输出高电平,此时将端口输出信息送至 SMC,但 SMC 不立即上报故障,而是对 SMC 控制芯片开始计时,设定延时时长为 20 μ s。若由于干扰信号造成比较电路判断错误,选择 20 μ s 的延时可以躲过各种干扰信号造成的电压毛刺,从而保护系统不会误动;若实际存在过电压欠电压故障,则须在子模块承受故障的最大允许时间内切除故障。综合考虑以上 2 点,为了保证保护系统的可靠性以及速动性,选择 20 μ s 作为软件延时时长。如果在 20 μ s 之后故障依然存在,则向上层控制器上报故障。

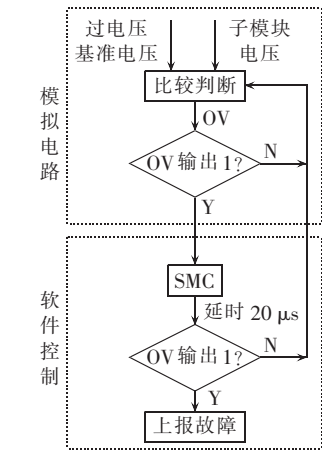


图 5 子模块过电压故障监测

Fig.5 Detection of sub-module overvoltage

图 6 是子模块欠电压故障监测框图。当子模块电容电压小于设置的欠电压基准电压时,通过模拟比较电路,端口 UV 输出高电平,此时将端口输出

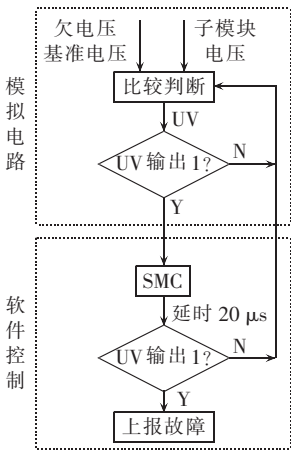


图 6 子模块欠电压故障监测

Fig.6 Detection of sub-module undervoltage

信息送至 SMC,同样地,SMC 也不立即上报故障,对 SMC 计时,如果在 20 μ s 之后故障依然存在,则向上层控制器上报故障。

采用这样的监测方法有效降低了系统保护误动的概率,提高了运行的可靠性。

3.1.2 子模块过温故障及 IGBT 过流故障监测

子模块的过温故障监测主要是指子模块内 IGBT 器件的过温监测,在正常运行过程中,IGBT 由于不断的投切,会产生大量的热量,若热量不能及时排出,导致 IGBT 温度过高,会对 IGBT 的正常工作造成严重影响。子模块过温监测是通过温控电路实现,当温度大于 80℃ 时,温控开关闭合,通过变换电路变为高电平向控制芯片上报故障。

子模块中 IGBT 的驱动模块采用 CONCEPT 公司的集成驱动 2SD315A,该驱动模块具有相应的过流故障监测能力,当 IGBT 发生过流故障时,驱动模块能够快速闭锁 IGBT,并向控制芯片上报故障信息。

3.2 子模块信息的上报

子模块需要及时向 VBC 传送大量信息,若将这些信息分别通过光纤向上层传送,需要耗费大量的光纤,并且会大幅增加二次系统的投资成本以及复杂性。采用给各个子模块加装控制器的控制结构,子模块有足够的处理能力去处理电压采集、故障检测、信息上报等工作。另外,上文中提到的子模块过压以及欠压的检测方法,也需 SMC 在算法上的配合。

SMC 通过数字编码光纤通信向 VBC 上报信息,为了保障高效可靠地完成通信,开发了如下的通信协议。

SMC 与 VBC 的通信采用异步串行通信方式,数据发送时总是以起始位开始,以停止位结束,另外还包含数据位和校验位。

在空闲时,发送信号线为逻辑高电平 1,通信开始时,首先发送起始位,起始位为逻辑低电平 0;起始位之后为数据位,SMC 向 VBC 发送 24 位的数据位;之后为奇偶校验位,采用偶校验方式;停止位为 1 位逻辑高电平,表示 1 帧通信完成。

通信帧格式如图 7 所示。通信协议规定 SMC 向 VBC 发送的数据位为 24 位,依次为 IGBT₁ 故障状态

0	1	2	3	4	5	6	7—18	19—23	
起始位	IGBT ₁ 故障状态位	IGBT ₂ 故障状态位	过电压故障状态位	过温故障状态位	光纤通信故障状态位	机械旁路状态位	电容电压 (共 12 位)	保留位 (共 5 位)	校验位

图 7 SMC 发送的通信帧的格式

Fig.7 Format of communication frame sent by SMC

位、IGBT₁ 故障状态位、过电压故障状态位、欠电压故障状态位、过温故障状态位、光纤通信故障状态位、机械旁路状态位、12 位子模块电容电压值以及 5 位数据保留位,其中,子模块电容电压通过 AD 转换芯片直接得到,用 12 位的数字量来表示。

4 实验结果

4.1 物理模拟系统参数

物理模拟系统控制部分按照以上所述的控制架构进行设计,一次部分交流侧、直流侧以及子模块参数如下。

a. 交流侧参数:额定电压为 380 V;额定有功功率为 100 kW;变压器变比为 380 V/2000 V;限流电阻为 50 Ω ;桥臂电抗为 20 mH。

b. 直流侧参数:电平数为 21;额定电压为 4 kV;额定电流为 25 A;平波电抗为 15 mH;线路阻抗为 2 Ω 。

4.2 双端稳态运行实验结果

启动时,应先对 MMC 系统的 2 列分别进行充电,待充电完毕后,切除充电电阻,再分别对两端进行解锁操作使之运行于正常工况下,此时实验室电源为两侧系统提供电压支持、无功功率及有功功率损耗。运行稳定以后,将直流线路上的开关闭合,并将其中一端切换至定有功功率模式,实现了功率的环网流动。

上位机设定直流电压参考值为 3 kV、输送功率参考值为 30 kW,录波设备监测到的波形如图 8—11 所示。图 8 为定直流电压端阀侧 C 相交流电流波形,其测量有效值为 12.2 A,由于模拟量的采集未进行滤波处理,电流波形谐波含量较大。图 9 为定直流电压端测得的直流电压波形,其值稳定在 3 kV,可看出定直流电压控制能够很好地稳定直流电压。图 10 为直流线路传输有功功率波形,其值稳定在 30 kW 左右,定有功功率控制效果良好。图 11 为定有功功率端 C 相下桥臂子模块电压波形,可以看出 22 个子模

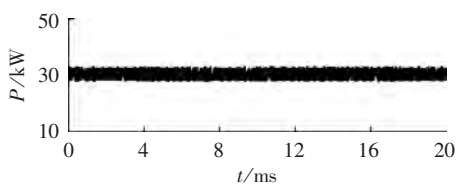


图 10 有功功率
Fig.10 Active power

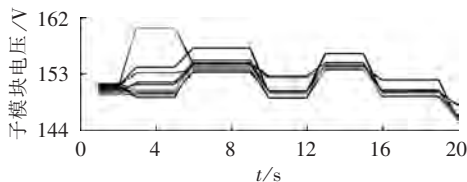


图 11 子模块电压
Fig.11 Voltage of sub-modules

块电容电压均处于 150 V 左右,均压效果良好。

由上述实验结果知,MMC 物理模拟系统可以有效地控制直流电压、输送功率并且进行子模块电压的均衡,说明了本文所提时序逻辑的可行性。

5 结论

本文分别针对 MMC 物理模拟系统各级控制器间的时序逻辑以及子模块的过电压欠电压故障监测进行了研究。对物理模拟系统进行了稳态实验,验证了所提时序逻辑的可行性。该物理模拟系统在多级控制器协同控制方面采用自上而下、分级同步的时序控制逻辑,有效地避免了不同控制单元由于自身晶振的差异所引起的控制系统误差。另外,该物理模拟系统具有检测子模块故障,并能将子模块各类故障上报的特点,其中对子模块过电压欠电压故障的检测,采用了硬件模拟电路检测结合软件控制的方法,减小了系统保护误动的概率,提高了运行的稳定性。

参考文献:

- [1] 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,2010:13-17.
- [2] 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):1-4.
XU Zheng,CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering,2007,33(1):1-4.
- [3] LESNICAR A,MARQUARDT R. A new modular voltage source inverter topology [C]//10th European Conference on Power Electronics and Applications. Toulouse,France:EPE,2003.
- [4] LESNICAR A,MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]//Proceedings of IEEE Power Tech Conference. Bologna,Italy:IEEE,2003:23-26.
- [5] 赵昕,赵成勇,李广凯,等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(21):48-55.
ZHAO Xin,ZHAO Chengyong,LI Guangkai,et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter

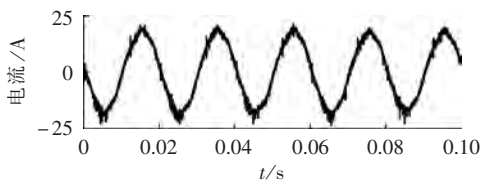


图 8 阀侧 C 相交流电流
Fig.8 AC current of phase C at valve side

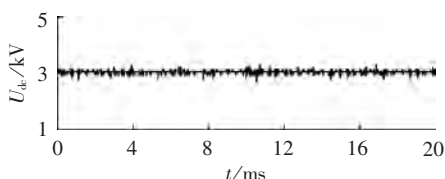


图 9 直流电压
Fig.9 DC voltage

- based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-55.
- [6] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.
- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Modeling of modular multi-level voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 1-8.
- [7] HAGIWARA M, AKAGI H. Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.
- [8] 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): 1-7.
- 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): 1-7.
- [9] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.
- TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.
- [10] 刘栋, 汤广福, 郑建超, 等. 模块化多电平换流器小信号模型及开环响应时间常数分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 1-7.
- LIU Dong, TANG Guangfu, ZHENG Jianchao, et al. Small signal modeling and analysis of open-loop response time constant of MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 1-7.
- [11] GLINKA M. Prototype of multiphase modular multilevel-converter with 2 MW power rating and 17-level-output-voltage[C]//Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 2572-2576.
- [12] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 89-92.
- DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.
- [13] 徐长宝, 耿亮, 王大力, 等. 基于 MMC 柔性直流输电背靠背样机的研制[J]. 电气技术, 2013(12): 33-38.
- XU Changbao, GENG Liang, WANG Dali, et al. Development of back-to-back HVDC prototype based on MMC[J]. Electrical Engineering, 2013(12): 33-38.
- [14] ZHOU Yuebin, JIANG Daozhao, HU Pengfei. A prototype of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013: 3267-3278.
- [15] 高阳, 刘栋, 杨兵建. 基于 MMC 的柔性直流输电阀基控制器及其动模试验[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 53-58.
- GAO Yang, LIU Dong, YANG Bingjian. MMC based valve base controllers of HVDC flexible and their dynamic simulation experiment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 53-58.
- [16] TEEUWSEN S P. Modeling the trans bay cable project as voltage-sourced converter with modular multilevel converter design[C]//Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA: IEEE, 2011: 18.
- [17] 文安, 邓旭, 魏承志, 等. 柔性直流输电系统交直流并列运行与孤岛运行方式间的切换控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 99-106.
- WEN An, DENG Xu, WEI Chengzhi, et al. Switching control between AC-DC parallel and islanded operations of VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 99-106.
- [18] 薛英林, 徐政, 张哲任, 等. 子模块故障下 C-MMC 型高压直流系统的保护设计和容错控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 89-97.
- XUE Yinglin, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Protection design and fault-tolerant control of C-MMC based HVDC system under sub-module failure condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 89-97.

作者简介:



罗程

罗程(1990—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为柔性直流输电仿真与控制(E-mail: luocheng.ncepu@gmail.com);

赵成勇(1964—),男,浙江丽水人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为直流输电、电能质量分析与控制等;

张宝顺(1986—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要研究方向为柔性直流输电仿真与控制。

Sequential logic and sub-module fault detection of MMC control system

LUO Cheng, ZHAO Chengyong, ZHANG Baoshun, NI Xiaojun, ZHAI Xiaomeng, GUO Chunyi

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A three-layer control system consisting of the station controller, SMC(Sub-Module Controller) and VBC(Valve Base Controller) is applied to MMC(Modular Multilevel Converter). The sequential logic between SMC and VBC is designed to guarantee its real-time performance. In order to effectively reduce the malfunction probability of protection system, only the information of a sub-module overvoltage or undervoltage fault, which is detected by the hardware analog circuit for more than $20\mu\text{s}$, is sent to the superordinate controller by SMC. A steady-state experiment of the proposed control system is carried out in a physical MMC simulation system and the results show that it controls the DC voltage and transmission power effectively and keeps the sub-module voltage around 150 V.

Key words: modular multilevel converter; electric converters; physical simulation system; control system; sequential logic; sub-module fault