

一种柔性直流子模块测试装置的研制及应用

李兴建¹, 王庆², 刘洪德¹, 笃峻¹, 于哲¹, 张延冬¹

(1. 南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 国网宁夏电力公司中卫供电公司, 宁夏 中卫 755000)

摘要:本文针对柔直输电系统缺乏调试手段的现状,提出一种用于模块化多电平柔直子模块自动调试的方法,设计了一种测试装置,包括管理单元、模块化多电平换流器(MMC)控制模拟单元、采集单元和能量输出单元。能量输出单元给子模块供电,MMC控制模拟单元模拟阀控协议控制子模块功能测试,采集单元采集子模块相关的电压状态,管理单元结合采集信息和通信状态信息共同辅助测试判断,从而完成柔直输电系统子模块的自动调试,工程实际表明该方法完全适用于现场验收测试以及出厂调试的需要。

关键词:柔性直流输电;子模块;自动测试

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)05-0114-06

0 引言

柔性直流输电技术是当今电力电子技术应用的制高点,其特点是采用全控型器件的电压源型换流器进行直流输电^[1,2],采用具有关断电流能力的绝缘栅极双极晶体管(IGBT),可以应用脉宽调制(PWM)技术进行无源逆变^[3,4],具有传统直流输电不具备的诸多优点^[5,6],可以直接向远距离的小型孤立负荷供电,连接分散电源,运行控制方式灵活多变,可以减少输电线路电压降落及闪变,提高电能质量^[7],因此得到了大力的推广应用。2011年5月,国内首个柔性直流示范工程——上海南汇柔性直流输电工程成功运行^[8];2013年12月,世界第一个三端柔性直流输电工程——南澳工程正式投运;2014年7月,世界第一个五端柔性直流输电工程——舟山工程正式投运^[9]。

随着模块化多电平直流换流器型高电压直流输电(MMC-HVDC)的成功应用,越来越多的国家对多端柔性直流输电技术表现出浓厚的兴趣并付诸工程实施^[9]。

子模块是MMC的基本单元,其工作是否正常关系到MMC的安全稳定运行。子模块与以往传统的交流保护装置相比,控制的对象、控制的方式都不一样,无法像传统保护装置一样进行调试。在工程现场和生产测试中急需调试效率高,调试模式先进的子模块测试装置。

1 子模块的工作原理及调试现状

借鉴传统直流输电的分层控制思想,柔性直流输电控制系统分为三个层次:极控层、阀控层、子模

块控制层^[10,11],它们之间的关系如图1所示,工程现场验收测试和出厂验收测试中往往按照分层的关系分级调试,分别对极控层装置、阀控层装置以及子模块控制层设备进行调试完毕,最后再进行整个系统的联调测试。

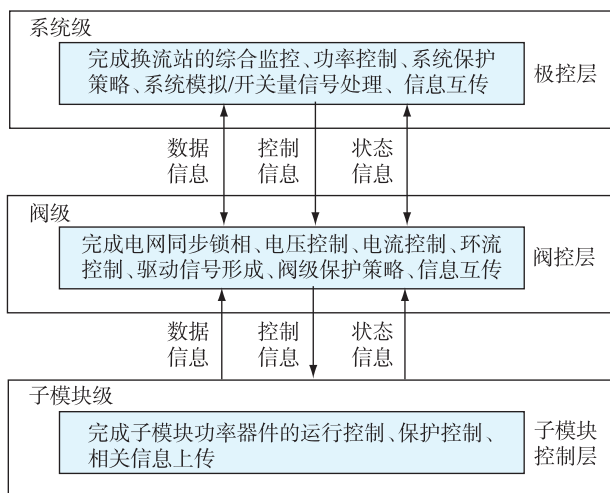


图1 柔性直流输电控制系统分层

Fig.1 Layered control system for flexible HVDC

目前工程现场柔性直流输电的系统联调调试采用实际运行方式通电进行测试;出厂验收测试或者研发调试一般采用RTDS/RT-LAB/PSCAD/EMTDC等仿真系统对系统故障进行仿真^[12-14],然后采用接口转换板卡将故障转换成厂家的数据通信协议,接入极控设备和阀控设备进行调试。这种测试方法受现场条件的限制比较多,实际运行的系统不可能模拟所有场景和所有工况的故障,而且试验过程繁琐,工程浩大,不可避免存在一些测试死角;RTDS/RT-LAB仿真系统是验证柔性直流系统的绝佳方案,但是这两种方法比较适合验证系统的保护逻辑,没法有针对性的测试出直流保护系统的

硬件故障,也不方便在现场应用。

系统测试由于某些破坏性故障试验等原因,存在一定测试死角,因此有必要在分级测试时,对各层设备进行完备充分的测试,以保证柔直输电系统运行的可靠性。

极控层和阀控层装置跟传统的保护装置相类似,可以借助原来的调试仪器进行逻辑测试。柔直子模块控制层测试是分级测试的难点,柔性直流输电工程一般采用 MMC, MMC 桥臂由子模块串联组成,每个桥臂的串联模块达到数百个,整个换流站子模块将达到数千个。目前的测试及试验主要依靠辅助电源、万用表等工具进行,这些工具不易携带,测试方法也不成熟,无法单独测试,需要和柔直输电系统的阀控层配合甚至极控层配合才能进行,测试的快速性和准确性不能兼顾。一些厂家由于缺乏有效的测试手段,干脆放在系统测试中进行测试,但有一些对系统有损害的故障在系统测试中无法检测出来,因而对子模块的测试不够充分,给柔直输电系统的可靠运行带来了一定的隐患。

由于上述的问题,有必要研制一种全新的子模块测试装置,采用自动化的测试方法,为柔直输电系统数量庞大的子模块提供高效、自动、全面的测试,以保证柔直输电系统的可靠运行。

2 柔直子模块测试系统总体设计

柔直子模块测试系统架构如图 2 所示,柔直子模块测试装置包括管理单元、可扩展的 MMC 控制模拟单元、采集单元和可控能量输出单元几个功能模块。

(1) 管理单元。管理单元提供人机接口,用于根据工程需要配置 MMC 控制模拟单元的数量和采用的控制协议,配置采集单元的数量和采样计算参数,控制能量输出单元的输出,根据配置控制柔性直流保护系统的测试过程。管理单元通过 MMC 控

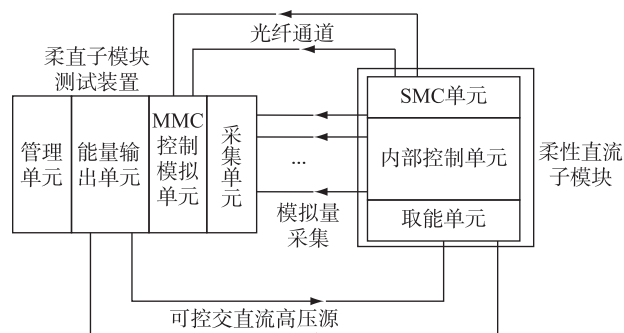


图 2 柔直子模块测试系统架构

Fig.2 The structure diagram of the testing system for sub module of flexible HVDC

制模拟单元接收被测柔直子模块的通信报文获取状态数据,通过采集单元的采集数据,结合状态数据自动判断测试结果,并给出测试报告。

(2) MMC 控制模拟单元。该单元用于模拟柔性直流阀控单元对子模块进行控制,采用 FPGA(现场可编程逻辑门阵列)实现柔性直流子模块控制协议的模拟,协议的格式、时钟频率等可灵活配置,用于支持不同直流系统的测试。实际测试中 MMC 控制模拟单元的数量也可以根据需求灵活扩展,该单元通过光纤模拟阀控单元的通讯协议控制柔直子模块的 IGBT 的导通关断、闭锁、解锁、KM 开关分合等,并接收柔直子模块的反馈的状态数据,解析后传递给管理单元。

具体的功能架构图 3 所示,中断循环的时间间隔根据子模块单元协议而定。子模块所采用的数据协议通过管理单元从内置协议库中选取,该中断是高速率中断,实际采用的中断频率一般为 20 MHz。如此高速信号要完成数据模拟和编码需要处理器性能比较强,故本文采用数字信号处理芯片(DSP)+现场可编程门阵列(FPGA)的实现方式。DSP 的中断循环中模拟的数据,通过 FPGA 进行物理层的数据编码;接收到的状态数据通过 FPGA 解码后,在中断中实时读取,状态数据包括开关数据、故障代码、温度数据、采样数据、版本信息等,由于中断数据速率太高,需要根据数据类型进行数据处理后再传输给管理单元。

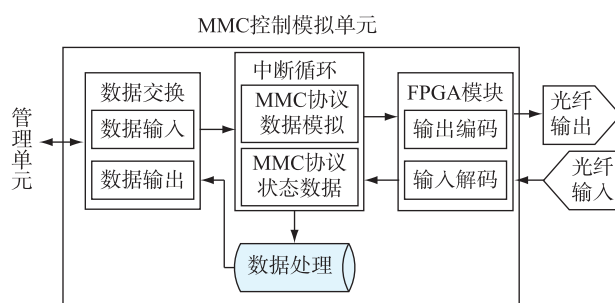


图 3 MMC 控制模拟单元

Fig.3 The structure of MMC control and simulation unit

(3) 采集单元。该单元用于采集柔性直流子模块动作时的模拟量信息,主要是各个测试采样点的直流电压,用于辅助柔直子模块测试结果的自动判断。采集单元的功能架构如图 4 所示。

采集单元采用两级中断处理方式,高速采集任务放在中断 1 中实现,在中断 1 实时采集各个测试采样点的数据,在次级中断 2 中计算数据的平均值,由于各个测试点都是直流数据,故其数据的计算采用公式(1):

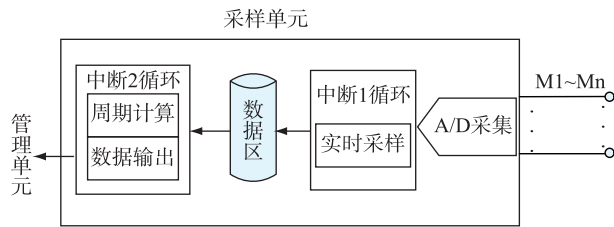


图4 采集单元构成

Fig.4 The structure of sampling unit

$$M(i) = (\sum_{j=1}^N u(j)) / N \quad (1)$$

其中 $M(i)$ 为各个采集通道的有效值; $u(j)$ 是各个采样点的实时采集数据; N 为每个中断 2 的时间所采样的点数。

(4) 能量输出单元。该单元采用市电供给能源,通过管理单元控制输出交直流电压源,给柔性直流子模块充电,保证测试不需要辅助电源或者系统其他部分的配合。能量输出单元采用可调节控制技术,控制输出交直流电压源,以满足不同工程测试的需要,图中的 RLY1-RLY3 以及 K1 均由管理单元控制。

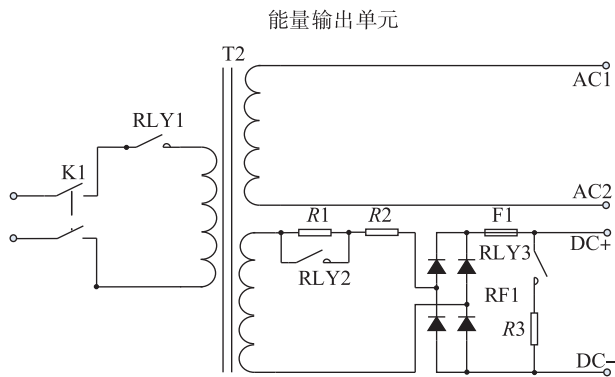


图5 能量输出单元构成

Fig.5 The structure of energy supplying unit

柔直子模块测试装置采用数据和控制总线方式,各个单元模块采用分布式架构布置在装置内,每个单元都是独立 CPU 的智能模块。由管理单元通过控制和数据总线统一控制和管理,数据总线采用 CAN 总线,负责下发测试任务的数据。控制总线包括同步脉冲信号、控制输出信号,负责其他各个单元模块的同步协调。其构成如图 6 所示。这种分布式和智能模块的方式决定了装置可以根据工程需要灵活扩展,不仅硬件支持灵活配置,所采用的通信协议也可以灵活扩展,既可根据需要同时测试多个子模块,以节约测试的时间,也可根据工程需要扩充支持不同柔直模块的测试。在工程应用中,用此测试装置完成了 MMC 子模块、阻尼子模块以及动态无功补偿及谐波治理装置(SVG)工程

的测试,这种分布式智能模块的组合模式是本测试装置的创新。

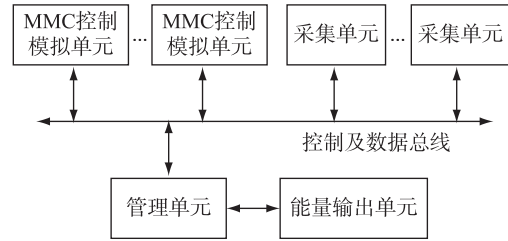


图6 柔直子模块测试装置构成

Fig.6 The structure diagram of sub-module tester

3 柔直模块测试系统的测试过程

对于柔性直流 MMC 子模块的测试,主要测试项目覆盖均压电阻 R_j 、直流电容 C 、子器件 IGBT1、子器件 IGBT2、真空接触器 KM、SMC 板卡等主要元器件,对这些器件的正常和异常情况都能进行检测和判断。测试时通过 MMC 控制模拟单元模拟各个器件的控制协议,根据逻辑依次开通 IGBT1、IGBT2、KM 等控制器件,根据各器件正常动作的判据判断是否正确动作,如果器件异常则指明故障原因。

MMC 子模块测试时接线原理如图 7 所示。

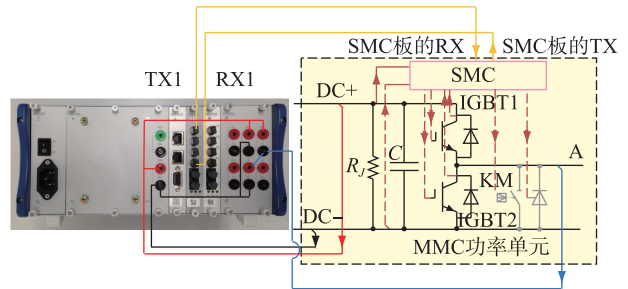


图7 MMC子模块测试接线

Fig.7 The wiring diagram of sub-module

依据图 7 以空载测试和 KM 测试为例对检测的原理进行简要阐述:空载测试时通过 MMC 控制模拟单元对 MMC 子模块发送控制命令交替开通 IGBT1 和 IGBT2,开通的频率为 400 Hz,其中开通 IGBT1 的时间为 t_1 ,开通 IGBT2 的时间为 t_2 ,IGBT1 与 IGBT2 的驱动信号互补,即开通 IGBT1 时 IGBT2 必须关闭,且 $t_1:t_2$ 需要满足一定的关系,典型参数为 3:2 的关系。测试开始时,开通命令、开通频率、导通时间的比例关系等通过管理单元发送给 MMC 控制模拟单元,MMC 控制模拟单元的中断循环中,根据这些参数实时产生控制命令,由 FPGA 编码输出控制子模块单元,同时 MMC 控制模拟单元实时解码子模块单元的状态数据,采集单元则实时采集并根据签署的公式(1)计算各个采集点的电压值。

如果 IGBT1、IGBT2 及控制部分正常工作,则开通时各测量点之间的电压变化如下。

DC+和 A 点之间的输出电压的平均值应满足式(2):

$$V_{DC+,A} = V_{DC+,DC-} \times t_2 / (t_1 + t_2) \quad (2)$$

A 点和 DC-之间的输出电压的平均值应满足式(3):

$$V_{A,DC-} = V_{DC+,DC-} \times t_1 / (t_1 + t_2) \quad (3)$$

其中 $V_{DC+,A}$ 为 DC+端和 A 点之间的电压; $V_{DC+,DC-}$ 为 DC+端和 DC-端之间的电压; $V_{A,DC-}$ 为 DC+端和 A 点之间的电压。

根据采集单元实时采集的各测量点之间的电压值,综合 MMC 子模块的状态值,可以判断 IGBT1、IGBT2 是否正确动作,并能根据采样点数据和状态数据判断出现问题时的故障原因,结果显示如图 9 所示。

真空接触器 KM 测试:通过光纤通道给 MMC 子模块下发闭合真空接触器 KM 命令,则闭合时各测量点之间的电压变化为: $V_{DC+,A}$ 由 0.5 倍 $V_{DC+,DC-}$ 变为 $V_{DC+,DC-}$, $V_{A,DC-}$ 由 0.5 $V_{DC+,DC-}$ 变为 0。

根据采集单元实时采集的各测量点之间的电压值,综合 MMC 子模块的状态值,即可以判断 KM 是否正确动作,如果 KM 拒动,则根据采样点数据和状态数据判断出现问题时的故障原因。

根据柔性直流工程的需要,测试项目分为自动测试和单项测试,自动测试包括顺序进行子单元直流侧充电、子单元状态检测、功能测试(单个 IGBT 开通关断测试)、空载测试(2 只 IGBT 交替开通关断测试)、真空接触器 KM 测试、均压电阻 R_j 测试,测试结束后进行子单元直流侧快速放电操作,以保证测试人员的安全。单项测试为上述测试项目的分项测试,即分别进行功能测试(单个 IGBT 开通关断测试)、空载测试(2 只 IGBT 交替开通关断测试)、真空接触器 KM 测试、均压电阻 R_j 测试。其中每一项测试都包括子单元直流侧充电、子单元状态检测和直流侧放电操作。单项测试的目的是为了自动测试出问题排查后,快速进行相关测试项的再次试验,节省试验时间。测试的流程如图 8 所示。

现场测试中不仅要能进行自动化测试,更重要的是测试出问题时,能准确指示出故障的位置和具体的原因,本文的测试系统中充分考虑了这个问题,通过液晶给现场测试人员提供详尽的界面显示,如图 9 所示,并在管理单元中保存测试项目的报告,工程测试完毕可以上传到计算机,通过数据库和管理后台提供测试管理。

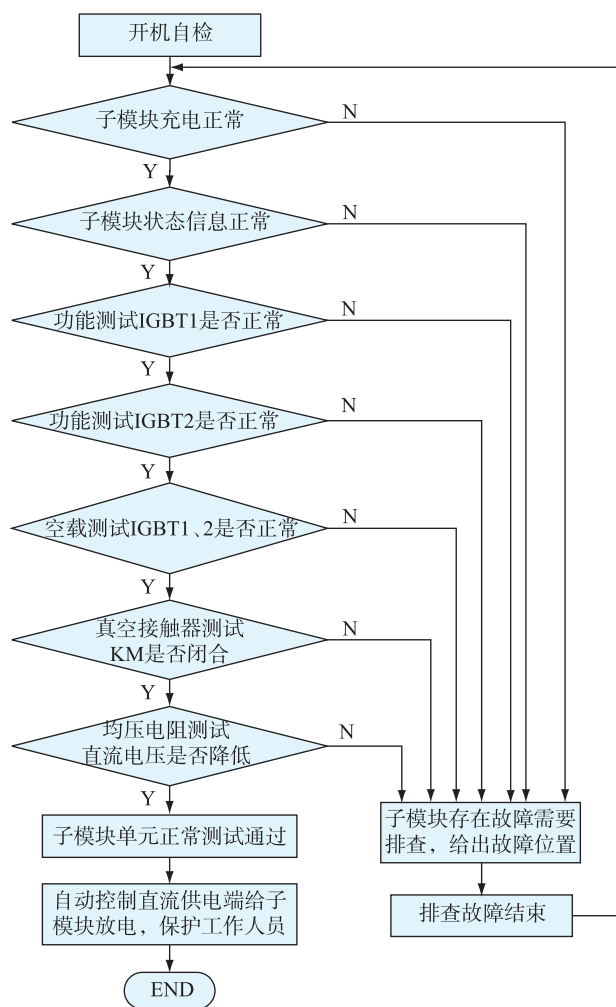


图 8 子模块自动测试流程

Fig.8 The flow chart of automatic test for sub-module

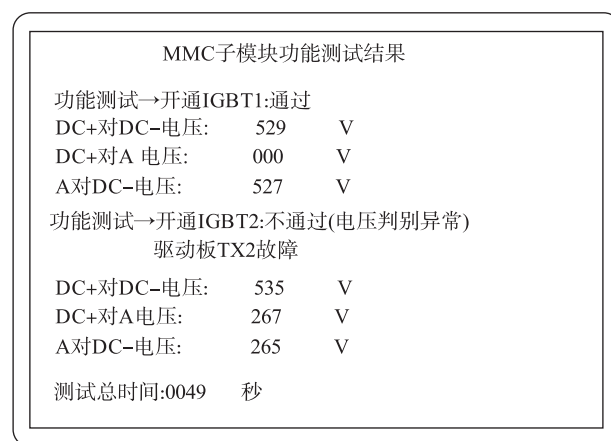


图 9 子模块自动测试结果显示

Fig.9 The result figure of automatic test for sub-module

4 柔直子模块测试装置的工程应用

柔直模块测试装置解决了柔直输电工程调试中存在的实际问题,在出厂试验、舟山五端柔性直流输电工程投运验收过程中发挥了实际作用。舟

山五端柔性直流输电示范工程中,每个桥臂子模块的个数约为270个(包括约20个冗余配置),每端包含6个桥臂,测试任务繁重,如果按照以往的测试方法,工作量巨大,而采用本文的测试系统,包括测试接线在内,每个子模块完成自动测试仅需3分钟左右,大大加快了项目验收的进度,其便携、自动、全面的测试手段为工程投运的顺利实施作出了贡献。

5 柔直模块测试装置的优势和不足

本文所介绍的柔直子模块测试装置使用对象定位为现场工程服务人员,尽量简化其操作步骤,主要用途是可以检验柔直输电系统子模块的安装工艺的正确性,控制逻辑是否与设计一致,主子器件的完好性,是否可以被可靠触发,各主要元器件是否正常工作,工作异常时自动定位故障位置方便测试人员排查。测试时自备取能单元简化了测试过程,自动判断自动定位故障,减少了测试时间,其协议及数量灵活可扩展的特点,可以适应不同工程测试的需求。

但是柔直子模块测试装置也存在一些不足,所采用的控制协议不具备通用性,不能兼容其他厂家的模块测试;仅仅模拟了阀控单元对子模块进行测试,没有涉及到柔直输电系统的极控层、阀控层,因而无法对整个柔直系统进行全部测试。针对这些不足,将在后续的工作中结合实际情况给出更好的解决思路。

6 结语

本文在充分研究当前柔直输电测试工作中存在的实际问题基础上,设计并开发出了一种柔直子模块测试装置。该装置符合柔直输电系统子模块测试的应用场景,解决了以往测试手段的不足,提高了故障定位的命中率,节省了测试的时间,并在出厂试验和舟山柔直工程中得到了应用。工程实践表明,该测试装置所采用的试验方法,原理可靠,并贴近工程使用的实际情况,为柔直输电系统工程的运检、验收提供了有效的测试手段。

参考文献:

- [1] 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):1-9.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and application of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1):1-9.
- [2] 董云龙,田杰,黄晓明,等.模块化多电平换流器的直流侧主动充电策略[J].电力系统自动化,2014,38(24):68-72.
DONG Yunlong, TIAN Jie, HUANG Xiaoming. A DC-side active charging strategy for modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24):68-72.
- [3] 胡航海,李敬如,杨卫红,等.柔性直流输电技术的发展与展望[J].电力建设,2011,32(5):62-66.
HU Hanghai, LI Jingru, YANG Weihong, et al. The development and prospect of HVDC flexible technology[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(5):62-66.
- [4] 殷树刚,苗培青,拜克明,等.利用特高压技术提高全球能源使用效率[J].中国电力,2010,43(5):1-5.
YIN Shugang, MIAO Peiqing, BAI Keming, et al. To improve utilization efficiency of global energy resources through UHV power transmission technology[J]. Electric Power, 2010, 43(5):1-5.
- [5] 喻锋,王西田,解大.多端柔性直流下垂控制的子参考值修正方法[J].电力自动化设备,2015,35(11):117-122.
YU Feng, WANG Xitian, XIE Da. Power reference correction method for droop control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):117-122.
- [6] 胡兆庆,毛承雄,陆继明.适用于电压源型高压直流输电的控制策略[J].电力系统自动化,2005,29(1):39-44.
HU Zhaoqing, MAO Chengxiong, LU Jiming. A novel control strategy for voltage sourced converters based HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1):39-44.
- [7] 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.
TANG Guangfu. Key techniques for HVDC power transmission system based on voltage source converters[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [8] 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.
- [9] 董云龙,凌卫家,田杰,等.舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J].电力自动化设备,2016,36(07):169-175.
DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control and protection system for zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(07):169-175.
- [10] 胡四全,吉攀攀,俎李峰,等.一种柔性直流输电阀控测试系统设计与实现[J].中国电力,2013,46(9):112-117.
HU Siqian, JI Panpan, ZU Lifeng, et al. Design and realization of a testing system for flexible HVDC valve control equipment[J]. Electric Power, 2013, 46(9):112-117.
- [11] 吉攀攀,胡四全,俎李峰,等.柔性直流输电换流阀运行状态在线监测系统设计与实现[J].电网与清洁能源,2015,31(12):68-72.
JI Panpan, HU Siqian, ZU Lifeng, et al. Design of an on-line monitoring system for HVDC flexible valve[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12):68-72.
- [12] 潘良煜,魏芳,刘雅琴,等.舟山多端柔性直流输电系统

- 仿真试验研究[J]. 电气制造, 2015, (3):67-71.
PAN Liangyu, WEI Fang, LIU Yaqin, et al. Electrical Manufacturing, 2015, (3):67-71.
- [13] 方圆, 胡兆庆, 夏卫华, 等. 模块化多电平柔性直流控制保护系统动模仿真研究[J]. 智能电网, 2016, 4(6):567-571.
FANG Yuan, HU Zhaoqing, XIA Weihua, et al. Simulation research on dynamic physical model of control and protection system for the modular multi-level converter based VSC-HVDC[J]. Smart Grid, 2016, 4(6):567-571.
- [14] 李探, 赵成勇, 李路遥, 等. MMC-HVDC子模块故障诊断与就地保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10):1641-1649.
LI Tan, ZHAO Chengyong, LI Luyao, et al. Sub-module fault diagnosis and the local protection scheme for MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10):1641-1649.
- [15] 胡兆庆, 董云龙, 田杰, 等. 基于模块化多电平换流器结构的柔性直流控制策略[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(1):5-8.
HU Zhaoqing, DONG Yunlong, TIAN Jie, et al. Control strategy research of VSC-HVDC based on modular multilevel converter[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(1):5-8.
- [16] 徐政, 张哲任, 刘高任. 柔性直流输电电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):54-59.
XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):54-59.
- [17] 吴浩, 徐重力, 张杰峰, 等. 舟山多端柔性直流输电技术及应用[J]. 智能电网, 2013, 1(2):23-26.
WU Hao, XU Zhongli, ZHANG Jiefeng, et al. VSC-MTDC transmission technologies and its application in Zhoushan[J]. Smart Grid, 2013, 1(2):23-26.
- [18] 尹寿垚, 翟毅, 吴昊, 等. 基于柔性直流输电技术的分布式发电在城市电网中的应用[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(4):9-12.
YIN Shouyao, ZHAI Yi, WU Hao, et al. Application of the distributed generation based on VSC-HVDC technology in urban power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(4):9-12.

作者简介:



李兴建

李兴建(1977—),男,山东潍坊人,通信作者,硕士,高级工程师,从事继电保护测试工作(E-mail:lixj@nrec.com);

王庆(1977—),男,天津武清人,硕士,高级工程师,从事电网发展规划,运行管理工作;

刘洪德(1986—),男,山东潍坊人,硕士,工程师,从事柔直输电系统及设备研究工作;

笃峻(1975—),男,江苏南京人,硕士,研究员级高级工程师,从事继电保护工作;

于哲(1978—),男,山西运城人,硕士,工程师,从事继电保护测试工作;

张延冬(1978—),男,河北蔚县人,硕士,高级工程师,从事继电保护工作。

Research and Application of Test for Flexible HVDC Sub-module

LI Xingjian¹, WANG Qing², LIU Hongde¹, DU Jun¹, YU Zhe¹, ZHANG Yandong¹

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. Zhongwei Power Supply Company, Zhongwei 755000, China)

Abstract: Due to lack of debugging method of flexible HVDC system, a kind of automatic debugging method used for flexible HVDC sub-module based on modular multilevel converter is put forward in this paper, and a test device including manager unit, MMC control and simulation unit, sampling unit and energy supplying unit is designed. The energy supplying unit can control energy output to provide power supply for sub-module. The MMC control and simulation unit can simulate valve control protocol to control sub-module to realize function test. The sampling unit acquires related voltage state of sub-module. The manager unit combines the sampled voltage with communication state for making test judgment, so as to complete automatic debugging of sub-module. Engineering practice shows that the method is fully applicable to the requirements of site acceptance test and factory acceptance test.

Key words: flexible HVDC; MMC; sub-module; automatic test

(编辑 陈娜)