

UPFC 换流阀模块测试装置的研制及应用

李兴建, 笃峻, 姚婷婷, 于哲, 张延冬, 祁琦, 魏星

(南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:针对新兴的统一潮流控制器(UPFC)工程的分级调试,提出一种自动调试的方法,设计了一种测试装置,专门解决换流阀子模块的工程调试。测试装置由测试管理单元和测试执行单元两部分组成,测试管理单元通过内部分布式总线控制测试执行单元,是测试的核心;测试执行单元包括阀控模拟模块、采集模块和能量控制模块。阀控模拟模块模拟阀控装置的通信协议,控制子模块进行功能测试同时进行状态监测,采集模块采集子模块相关的电压状态,能量控制模块给换流阀子模块进行供电,用于测试子模块的充放电逻辑;测试管理单元配置测试执行单元模拟的阀控协议、子模块的拓扑结构等参数以控制测试的功能和流程,测试管理单元结合采集信息和通信状态信息共同辅助进行测试判断,测试结束给出完整的报告,完成UPFC换流阀子模块的自动调试,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:统一潮流控制器;换流阀;子模块;自动测试

中图分类号:TM 72

文献标识码:B

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.031

0 引言

统一潮流控制器(UPFC)^[1]是一种功能强大、特性优越的新一代柔性交流输电装置,也是迄今为止通用性最好的柔性交流输电系统(FACTS)装置,它综合了FACTS元件的多种灵活控制手段,具有电压调节、串联补偿和移相等各种能力^[2]。UPFC既能在电力系统稳定控制方面实现潮流调节,合理控制有功功率、无功功率,提高线路的输送能力,实现优化运行;又能在动态方面,通过快速吞吐无功,动态地支撑接入点的电压,提高系统电压稳定性;还可以改善系统阻尼,提高功角稳定性^[3-4]。

因UPFC有诸多显而易见的优越性,加上大功率晶闸管的造价日趋降低,目前我国和美国、瑞典、巴西、德国、英国、日本等国家都在积极开展FACTS设备制造或者应用的研究,我国更是取得了快速的进步,2015年12月,南京220 kV西环网UPFC工程正式投入运行^[5];2017年12月世界电压等级最高、容量最大的UPFC工程——苏州南部电网500 kV UPFC示范工程正式投运。这2个重点工程都是采用基于IGBT的模块化多电平换流器(MMC)的UPFC工程。MMC为多个模块构成的三相桥式结构,其基本单元是一个半桥单元(子模块),每个子模块由2个IGBT器件和1个直流储能电容并联组成,多个子模块串联在一起构成一个换流桥臂,6组级联换流桥臂组合在一起构成三相换流器^[6]。

MMC模块具有损耗小,可靠性高,电压、容量等级易于扩展,便于工程实现等优点,但开关器件数目增加,子模块数目比较多,据统计,每个桥臂的串联子模块数达到数百个^[7],这给新的UPFC工程的验收测试带来不小的难度。

子模块作为MMC的基本单元,其工作是否正常关系到UPFC工程的安全稳定运行。然而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。在现场的工程和生产测试中亟需调试效率高、调试模式先进的子模块测试装置,以保证UPFC工程的可靠运行。

1 子模块的工作原理及调试现状

参照IEC60633—1998标准的规定,UPFC工程采用分层控制思想^[8],控制系统分为系统控制层、换流器控制和阀控制^[9]3个层次,南京UPFC工程正是采用这种经典的结构,其工程结构如图1所示。Q/GDW11548—2016《统一潮流控制器工程分系统调试规范》中按照分层控制的思想,规定将UPFC工程分系统分级调试^[10],工程现场验收测试和出厂验收测试中正是根据这些原则分别对系统控制层装置、换流器控制装置和阀控层装置以及阀控装置的控制对象子模块设备进行调试完毕,最后再进行整个系统的功能联调测试。

目前UPFC工程还不太多,结合近年投入运行的南京西环220 kV UPFC工程和苏南500 kV UPFC工程来看,在现场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/MATLAB/PSCAD/EMTDC等仿真系统对系统故障进行仿真^[11-14],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,接入换流器控制设备和阀控设备进行调试,文献[11]搭建了一套RTDS模型,模拟了系统的各类故障,用于苏南UPFC工程研发阶段和出厂试验时的策略验证,起到了很好的效果。但这2种系统测试的方法都有很大的缺陷。现场采用直接通电进行系统测试的方

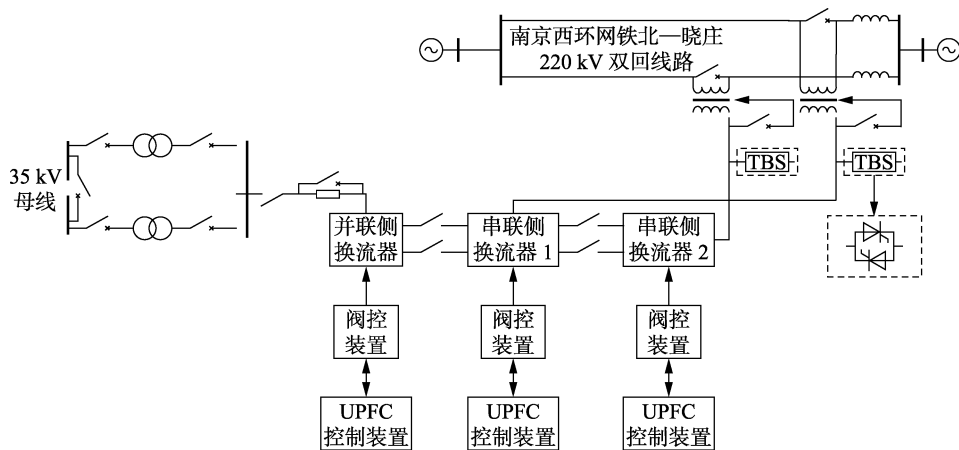


图 1 南京 UPFC 工程典型结构图

Fig.1 Typical structure of Nanjing UPFC Project

法,实际运行的系统不可能模拟所有场景和所有工况的故障,只能选取一些易于实现的系统故障进行验证,不可避免存在一些测试死角等问题,即便如此,调试也是工程浩大,试验过程非常繁琐。RTDS 等仿真方式是进行系统策略验证的绝佳手段,但是这种测试也有不足之处:①这种方法适用于系统级别的测试,无法对分级系统如子模块等进行单独快速测试;②这种测试方法不方便在现场实施,仅限于出厂检验和研发测试。

仿真试验无法在现场实施,现场系统测试由于某些破坏性故障不可能试验等原因,存在一定的测试死角,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 UPFC 系统在将来的运行可靠性。

系统控制层装置、换流器控制装置和阀控层装置跟传统的保护装置类似,可以借助原来的调试仪器和测试方法进行逻辑测试,但是子模块控制层测试是分级测试的难点,由于 UPFC 工程是新兴技术,市面上缺乏成熟的测试手段,目前的测试及试验主要依靠辅助电源、万用表等工具,通过阀控层装置配合甚至系统控制层装置的配合才能进行,测试的快速性和准确性不能兼顾,而 UPFC 工程的 MMC 子模块数量众多,据统计一个换流桥臂的子模块数量就接近 300 个,这无疑给现场调试人员带来了巨大的挑战。以往由于缺乏有效的测试手段,干脆放在系统测试中进行测试,而由上述可知,系统测试时有些对系统有损害的故障是无法进行的,因而对子模块的测试不够充分,给日后 UPFC 工程的可靠运行埋下了一定的隐患。

2 UPFC 换流阀模块测试系统总体设计

鉴于目前 UPFC 工程中测试存在的问题,特别是对子模块测试存在以下几个难题:①无法单独测试,子模块从一次系统取电,一次系统未运行时,子

模块无法工作;②系统供电后要进行相应的功能测试,需要阀控装置以及换流器控制装置配合;③测试完毕需要工程测试人员判断模块问题,无法自动诊断。本文提出并研制了一种便携式 UPFC 换流阀子模块测试装置,旨在解决目前子模块测试存在的上述难题,用自动化的测试方法为 UPFC 工程中数量庞大的子模块提供高效、自动、全面的测试,以保证 UPFC 工程系统的可靠运行。

UPFC 换流阀子模块测试系统架构如图 2 所示,包括测试管理单元和测试执行单元两部分。

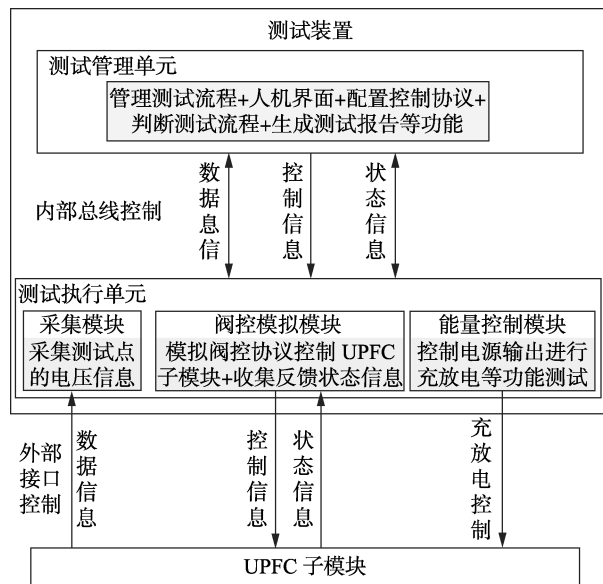


图 2 UPFC 换流阀子模块测试系统架构图

Fig.2 Structure diagram of testing system for sub-module of UPFC

各单元的功能如下。

(1) 测试管理单元。测试管理单元提供人机接口,用于根据工程需要配置阀控模拟单元采用的控制协议,配置采集单元采样计算参数,以及控制能量控制单元的电压输出和放电回路,最后根据配置控制子模块的测试过程,测试中测试管理单元通过测

试执行单元阀控模拟模块接收被测 UPFC 子模块的通信报文获取状态数据,通过测试执行单元采集模块的采集数据,结合状态数据自动判断测试结果,并给出测试报告。目前不同的 UPFC 工程采用的协议并不相同,子模块的拓扑分类、结构也不尽相同,本设计通过测试管理单元以配置的方式,实现模拟协议可配置,测试功能根据子模块的拓扑和结构自适应,兼容各个工程的 UPFC 子模块的测试。

(2) 测试执行单元。测试执行单元用于执行子模块的测试功能,按照功能划分成阀控模拟模块、采集模块和能量控制模块几个模块,功能结构如图 3 所示,采用 DSP+FPGA 的实现方式,其中 DSP 负责和测试管理单元交换数据、模拟阀控应用层协议、采集计算测试点的数据、控制子模块的充放电逻辑, FPGA 则用于实现阀控协议物理层的收发控制,各模块功能如下。

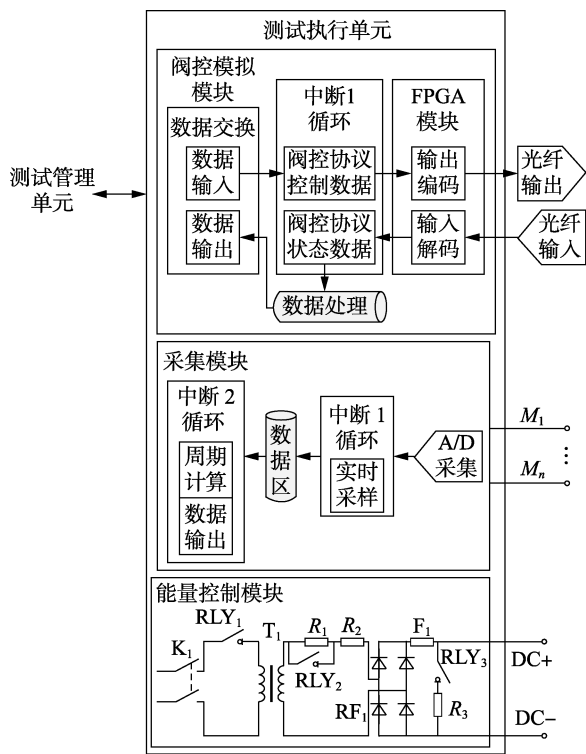


图 3 测试执行单元功能图

Fig.3 Structure of test executive unit

a. 阀控模拟模块。该模块用于模拟 UPFC 阀控装置对子模块进行控制,所模拟协议的格式、内容、时钟频率等可灵活配置,子模块采用的拓扑结构、充电时间、放电时间、温度传感器的类别等也可通过配置的方式进行控制,用于支持不同直流系统的测试,阀控模拟模块通过光纤模拟阀控单元的通信协议控制 UPFC 子模块的 IGBT 的导通、关断、闭锁、解锁和真空接触器旁路开关分合等,并接收 UPFC 子模块反馈的状态数据,解析后传递给测试管理单元。本文在 UPFC 工程设计之初充分考虑了现场工程测试

的问题,所采用的控制协议留有现场调试接口,可以用调试接口测试硬件,也可以用调试接口测试子模块在各种异常工况下的自检返回状态,保证现场出现异常时能及时发现问题。阀控模拟模块实现时采用了 2 种控制方式:一种是现场实际采用的控制协议控制子模块单元,这种模式下,在测试装置功能开发时,对用于测试的子模块设置各种异常情况,包括各个测试点破坏性操作,以保证测试装置功能的严密性;另一种则是采用调试命令的方式,将各种破坏性试验也不易实现的子模块通信自检状态反馈也一一测试,尽最大可能使测试不留死角。其具体实现的功能架构如图 3 中阀控模拟模块所示,测试时根据测试管理单元选取的协议类型、拓扑结构等配置信息, DSP 在实时中断循环中模拟阀控应用层数据,然后通过 FPGA 进行物理层的数据编码;接收到的状态数据也通过 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,故需要根据数据类型进行数据处理后再传输给管理单元,由测试管理单元综合后进行结果判断。

b. 采集模块。该模块用于采集 UPFC 子模块动作时各个测试采样点的直流电压,用于辅助子模块测试结果的自动判断。采集模块的功能架构如图 3 中采集模块所示,采集模块在 DSP 任务中实施,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如下公式:

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

其中, $M(i)$ 为各个采集通道的有效值; $u(j)$ 为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。

c. 能量控制模块。该模块采用市电供给能源,根据需要控制输出直流电压源的量级和时间,用于给 UPFC 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,做到独立测试;子模块测试过程结束时,需要控制放电过程,图 3 中的 RLY_1 — RLY_3 以及 K_1 均由 DSP 控制,根据测试需要控制电源和电阻,控制子模块放电过程。该模块是子模块进行自动测试的基础,使得现场的测试不依赖于一次系统及其他控制装置。

3 UPFC 子模块的测试过程

UPFC 子模块测试时接线原理图如图 4 所示,图中 SMC 为子模块控制器。

通过能量控制模块的输出电压 $DC\pm$ 给子模块供电,通过光纤控制子模块,在各个被测开关的两端设

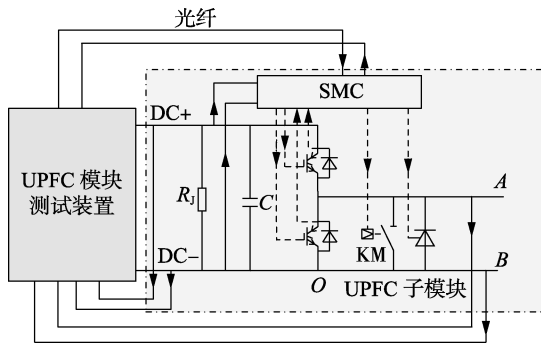


图 4 UPFC 模块测试接线图

Fig.4 Wiring diagram of sub-module

置采集点,通过测试夹具回采测试点的电压值。

UPFC 子模块测试涵盖充电阶段、稳定工作时的功能测试,以及放电阶段的状态测试,如图 5 所示。充电测试主要测试子模块是否能够快速充电,控制 $DC_{\pm}$ 输出需要的直流电压后,在规定的时间内测试子模块的充电电压是否能达到预期幅值。

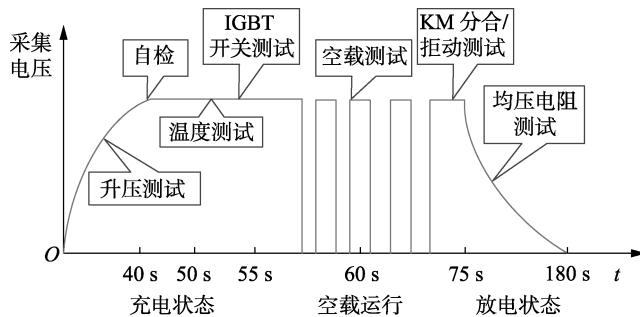


图 5 子模块阶段测试图

Fig.5 Test phase of sub-module

稳定工作时的功能测试包括温度测试、IGBT 开关测试、空载测试和真空接触器 KM 的分合及拒动测试、均压电阻测试几个项目,测试覆盖均压电阻 R_j 、直流电容 C 、子器件 IGBT (全桥拓扑时有 4 个 IGBT 器件,半桥拓扑有 2 个 IGBT 器件,目前 UPFC 工程中采用半桥拓扑)、真空接触器 KM 等主要功率器件,要对这些器件的正常和异常情况都能够进行检测和判断,测试时通过阀控模拟模块发送各个器件真实的控制命令进行控制,根据子模块发送的状态数据和采集点的电压值,判断测试的结果,为了保证测试装置的严密,各个模块正常功能测试完毕,进行了各个环节的破坏性试验,以验证测试装置的功能。如图 4 所示,采集模块采集点主要是 DC 之间的电压 $V_{DC+,DC-}$ 、DC+和 A 点之间电压 $V_{DC+,A}$ 、A 点和 DC-之间电压 $V_{A,DC-}$ 、DC+和 B 点之间电压 $V_{DC+,B}$ 、B 点和 DC-之间电压 $V_{B,DC-}$ 、A 点和 B 点之间电压 $V_{A,B}$ 。

测试原理如表 1 所示。测试的流程如附录中图 A1 所示。

测试的目的不仅要测试出模块中的问题,更重要的是定位故障的位置和具体的原因,既要方便现场用户的使用,也要提供保存试验报告的能力,以便

表 1 测试方法及判据

Table 1 Testing method and criteria

测试项目	测试方法	判断方法
IGBT 开关测试 (IGBT 仅以 IGBT ₁ 为例,其他 IGBT 同理)	a. 发送 IGBT 开通命令; b. 根据光纤上送状态和采集点电压值判断; c. 测试结束发送关闭命令。	采集点电压变化: $V_{DC+,A}$ 由 $0.5V_{DC+,DC-} \rightarrow 0$, $V_{A,DC-}$ 由 $0.5V_{DC+,DC-} \rightarrow V_{DC+,DC-}$, 综合光纤驱动故障码判断。
空载试验	a. 按照需要的频率交替开通 IGBT ₁ /IGBT ₂ , 开通 IGBT ₁ 的时间为 t_1 , 开通 IGBT ₂ 的时间为 t_2 , IGBT ₁ 与 IGBT ₂ 的驱动信号互补,且 $t_1:t_2$ 需要满足一定的关系,典型的参数为 $t_1:t_2=3:2$; b. 根据光纤上送状态和采集点电压值判断; c. 测试结束发送关闭命令。	采集点电压变化: $V_{DC+,A} = V_{DC+,DC-} \times t_2 / (t_1 + t_2)$, $V_{A,DC-} = V_{DC+,DC-} \times t_1 / (t_1 + t_2)$, 综合光纤驱动故障码判断。
真空接触器 KM 测试	a. 发送真空接触器闭合命令; b. 根据光纤上送状态和采集点电压值判断; c. 测试结束发送关闭命令。	采集点电压变化: $V_{A,DC-}$ 由 $0.5V_{DC+,DC-} \rightarrow 0$, $V_{DC+,A}$ 由 $0.5V_{DC+,DC-} \rightarrow V_{DC+,DC-}$, 综合光纤驱动故障码判断。
均压电阻测试	a. 控制能量控制模块的继电器模拟输出电压的掉电过程; b. 恢复供电电压。	模拟掉电后设定时间开始判断上行通道故障,接收到上行通道故障后延时一段时间,然后判断延时前后掉电的幅值。如果均压电阻异常则放电会出现异常,延时前后的电压值变化范围非常小。
温度测试	测试过程中实时解析上送状态中的温度组合码,组合出上送的温度值。	温度值为当前室温,偏差范围过大则报错。

于用户反馈问题、厂家追溯质量,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,如附录中图 A2 所示,并在管理单元中保存测试项目的报告,工程测试完毕后可以上传到计算机,通过数据库和管理后台提供测试管理,可供日后进行质量跟踪。

4 UPFC 模块测试装置的工程应用

UPFC 模块测试装置解决了 UPFC 工程调试中存在的实际问题,在公司的出厂、生产试验环节、南京西环网 UPFC 工程、苏南 500 kV UPFC 工程投运验收过程中发挥了实际作用,由图 5 所示的自动测试涵盖了子模块各个阶段的功能,以苏南 UPFC 工程调试为例,调试中最复杂的当属均压电阻的测试,测试时需要模拟放电过程,测试子模块的行为,以判断均压电阻是否工作正常,因为本设计中采用了可控的能量模块,很容易模拟放电的过程,并在测试中实时采集子模块的状态,从而监控了均压电阻在放电整个过程的表现,通过对比正常和异常情况下的

测试曲线和计算值很容易判断均压电阻的工作状况。以往如果采用一次系统通电的过程进行测试,均压电阻很难测试,即使勉强测试,因为没有自动采集模块的监控,采用人工测量的方式,也很难判断均压电阻的工作状态。而采用测试装置后,包括充放电、各器件的功能测试,全部完成仅需3 min左右,极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,得到了用户的好评。

5 UPFC 模块测试装置的优势和不足

UPFC 模块测试装置主要针对 UPFC 工程中数量庞大的换流阀子模块进行测试,解决了子模块中绝大多数元器件的功能检测、接线检查以及控制协议的通信监测,具备很强的工程实用性,但是它只针对 UPFC 的工程局部,只体现了分系统调试的一部分,对 UPFC 工程的其他部分,比如阀控装置、UPFC 控制装置的功能逻辑和单机测试并未涉及,对于整个 UPFC 系统运行方面的测试也没有涉及,对于 UPFC 这样一个新兴技术只进行了一点工程实践方面的探索,在后续的研究中,本文将着眼于如何解决 UPFC 系统各个层次的控制装置分级测试以及系统功能测试,以期促进 UPFC 调试技术进一步的发展。

6 结语

UPFC 被认为是功能最强大的 FACTS 设备,也是第三代 FACTS 的代表,在我国智能电网的建设中有着广阔的应用前景,但是作为新兴的技术,在工程实际中还缺乏先进的测试手段,这势必也会影响工程的应用。本文提出的 UPFC 模块测试装置,根据工程的实际需要,解决了一部分工程调试的难题:用可控能量模块给予模块供电,解决子模块依赖一次系统、不能独立测试的问题;用模拟阀控协议的方式控制子模块功率器件的功能测试,解决以往需要阀控装置甚至换流器控制装置配合才能进行子模块测试的问题,同时采用配置的方法解决目前 UPFC 工程控制协议多变以及子模块拓扑变化带来的测试问题;采用实时采集模块以及状态监测的方式解决自动判断的问题。工程实践表明,该测试装置所采用的试验方法原理可靠,方便易行,贴近工程使用的实际情况,为数量众多的子模块独立测试提供了解决思路,从而为 UPFC 工程的运检、验收提供了有效的测试手段。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘新. 统一潮流控制器(UPFC)的建模与应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2009.
- [2] 吴捷,王建. 基于 UPFC 的灵活交流输电潮流控制计算[J]. 电力系统自动化,2001,25(8):3-6.
- [3] 马朋,刘青,邹家平,等. UPFC 有功控制引起的交互影响研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):176-181.
- [4] 朱鹏程,刘黎明,刘小元,等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):45-51.
- [5] 李璇,刘国静,朱磊,等. 含 UPFC 南京西环电网系统可靠性评估研究[J]. 电力工程技术,2018,37(1):26-31.
- [6] 华文,凌卫家,黄晓明,等. 舟山多端柔性直流系统在线极隔离试验[J]. 中国电力,2016,49(6):78-82.
- [7] 刘波峰,候维杨,李诚明. MMC 子模块电容电压检测新方法[J]. 电子测量与仪器学报,2017,31(7):1137-1143.
- [8] 王华伟,王明新,周亦夫,等. 高压直流输电术语:IEC60633—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [9] 鲁江,秦健,潘磊,等. 南京 UPFC 工程控制保护系统架构与配置研究[J]. 江苏电机工程,2015,34(6):1-5.
- [10] 刘建坤,李鹏,刘大伟,等. 统一潮流控制器工程分系统调试规范:Q/GDW11548—2016[S]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [11] 肖建民,董云龙,卢宇,等. 统一潮流控制器的 RTDS 仿真试验系统[J]. 供用电,2017,34(8):33-38.
- [12] 陈剑平,李林川,张芳,等. 基于 PSASP 的 UPFC 潮流控制建模与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(2):66-70.
- [13] 黄方能,黄成军,陈陈,等. UPFC 稳定控制器的研究及应用[J].

电力自动化设备,2009,29(3):101-105.

HUANG Fangneng, HUANG Chengjun, CHEN Chen, et al. Study and application of UPFC stabilizer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 101-105.

[14] 郑三保,程时杰. UPFC 动态特性仿真研究[J]. 电力系统自动化,2000,24(7):26-29.

ZHENG Sanbao, CHENG Shijie. Dynamic simulation study of the UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(7): 26-29.

作者简介:



李兴建

李兴建(1977—),男,山东潍坊人,高级工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为继电保护测试(E-mail:lixj@nrec.com);

笃峻(1975—),男,江苏南京人,研究员级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统自动化。

Research and application of sub-module test device for UPFC converter valve

LI Xingjian, DU Jun, YAO Tingting, YU Zhe, ZHANG Yandong, QI Qi, WEI Xing

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Aiming at the grading debugging of new UPFC (Unified Power Flow Controller) project, an automatic debugging method is proposed, and a test device is designed to solve the sub-module debugging of converter valve. The test device consists of test management unit and the test execution unit. The test management unit is the core of the test device, which controls the test execution unit through internal distributed bus. The test execution unit includes valve-controlled simulation module, sampling module and energy control module. The valve-controlled simulation module can simulate communication protocol of valve-controlled device and control sub-module to realize function test and state monitoring at the same time. The sampling module acquires the related voltage state of sub-module. The energy control module can control energy output to test the charge and discharge logics for sub-module. The test manager unit configures the parameter, including control protocol and the topologic structure of sub-module to control test function and flow. Combining the sampling information and communication state information, the test manager unit can make test judgment and give the test report at the end of test, so as to complete automatic debugging of sub-module of UPFC project. Engineering practice shows that the proposed method is fully applicable to the requirements of field acceptance test and factory debugging.

Key words: UPFC; converter valve; sub-module; automatic test

(上接第 211 页 continued from page 211)

Review and prospect of distribution network planning

XIAO Bai, GUO Bei

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The research of distribution network planning is reviewed from planning model, planning method and solving algorithm. According to the content of distribution network planning, whether to take active management measures and the difference of stakeholders considered, the planning models are classified into five categories: power source planning, grid structure planning, joint planning of power source and grid structure, planning under active management measures and planning of multi-stakeholder, and the key issues of planning models are commented. According to the number of objective functions, the number of layers, time dynamics and whether uncertainties are taken into account in the planning model, the planning methods are classified into four types: multi-objective planning, bilevel planning, multi-stage planning and uncertainty planning, and the planning methods are analyzed. The advantages, disadvantages and applicability of mathematical and artificial intelligence optimization algorithms used for solving the objective functions of distribution network planning are compared. Finally, the future research direction of distribution network planning is prospected.

Key words: distribution network planning; planning model; planning method; solving algorithm

附录

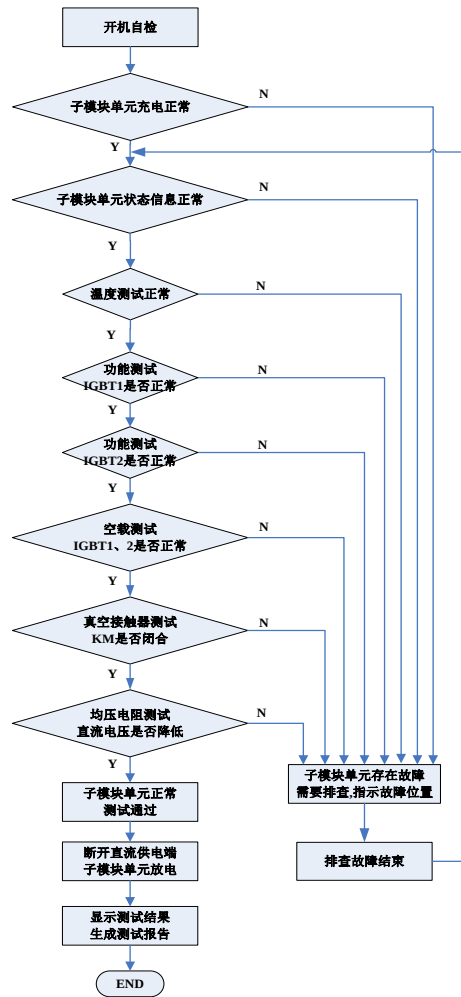


图 A1 子模块自动测试流程图

Fig.A1 Flowchart of automatic test for sub-module

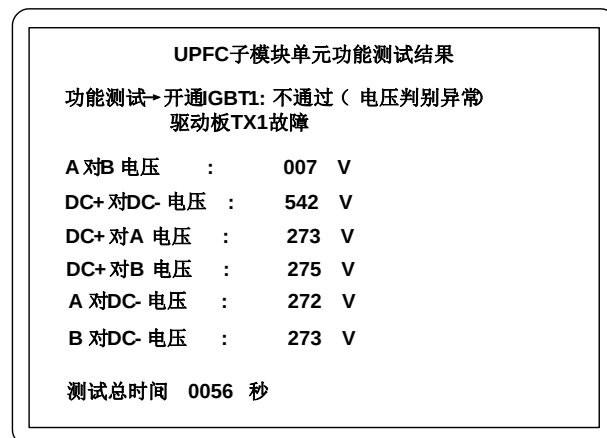


图 A2 子模块自动测试结果显示图

Fig.A2 Result figure of automatic test for sub-module