

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.170324

特高压直流输电控制保护系统实时仿真技术的研究及应用

王伟

(许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 采用模拟高压直流输电一次系统的 RTDS 平台与直流工程的实际控制装置相结合的方法, 实现直流工程的仿真验证平台的搭建, 存在占地面积大、接线复杂的问题。提出了一种直流输电控制保护系统实时仿真的技术。使用 Matlab/Simulink 图形化的方式一比一搭建直流控保程序, 通过代码转换及多线程优化调度方案将图形化程序转变为 CBuilder 代码文件, 构建高集成度的 RTDS 自定义元件, 只需采用单个 RTDS 计算单元实现了整个直流工程换流站的控保程序计算。在 RTDS 仿真平台上对所提出的技术进行了验证, 试验结果表明该技术有效、可行。该仿真技术使交直流混联大电网的实时仿真问题变得更加经济、高效。

关键词: Cbuilder; Matlab/Simulink; 多线程计算; 层级化建模

Research and application of real-time simulation technology for UHVDC control and protection system

WANG Wei

(Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: By combining RTDS platform of HVDC primary system with actual control device of HVDC project, the simulation and verification platform of HVDC project is built, which has the problems of large area and complex wiring. A real-time simulation technology for HVDC transmission control and protection system is proposed. And the HVDC control and protection program is built one by one by using the graphical method of Matlab/Simulink. Then the graphical program is transformed into a CBuilder code file through code conversion and multi-threaded optimal scheduling scheme, and a highly integrated RTDS custom component is constructed. Only one single RTDS computing unit is used to realize the calculation of control and insurance program of the whole HVDC project converter station. The proposed technology is validated on RTDS simulation platform, and the experimental results show that the technology is effective and feasible. The simulation technology makes the real-time simulation of AC/DC hybrid power grid more economical and efficient.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: CBuilder; Matlab/Simulink; multi-thread calculation; hierarchical modeling

0 引言

随着直流输电线路的增多及输电容量的逐步增大, 直流输电对电网安全稳定运行的重要性越来越高, 控制保护系统作为直流输电的神经中枢, 对直流输电的高效稳定运行起着关键作用^[1-10]。

对直流输电进行实时仿真, 为了达到与实际工程高度的一致性, 通常的方法是使用 RTDS 模拟直流一次系统, 将 RTDS 与实际直流输电控制保护屏柜进行连接, 实现闭环实时仿真。该仿真方法与实

际工程的吻合度非常高, 但需要几面或几十面控制保护屏柜, 占地面积大、成本高、接线复杂^[11-18]。

在交直流混联大电网稳定分析研究中, 往往需要对数条直流输电线路进行仿真, 同时希望每条直流输电的控制保护系统能够与实际工程高度一致, 如果每条直流线路都通过连接实际的屏柜来实现交直流混联大电网仿真研究, 这几乎是不现实的。

RTDS 除了自身的元件库外, 还支持用户通过其 CBuilder 平台开发自定义元件^[19-20]。如果能将若干面屏柜中复杂的直流控制保护程序集成到 RTDS 仿真平台中的一个自定义元件中, 该自定义元件与直流输电一次系统在 RTDS 仿真平台上同时进行实

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600)

时计算，可以实现更加经济、高效的直流输电系统的仿真。如此，包含多条直流线路的交直流混联大电网的实时仿真问题也变得迎刃而解。

以云广±800 kV 特高压直流输电工程为例详细地阐述了通过 RTDS/Simulink 平台完成对直流控制保护自定义元件的创建，并解决自定义元件与 RTDS 之间关于多线程计算的难题，最终实现对直流输电的一次系统及二次系统的实时仿真，并实际控制保护屏柜进行暂稳态特性比对。

1 CBuilder 自定义元件

CBuilder 是 RTDS 公司提供的自定义元件开发平台，目前支持两种方法创建自定义元件。

1) 直接使用 CBuilder 语言(类 C 语言)编写自定义元件的代码。

2) 使用 Matlab 中的 Simulink 以图形化的方式搭建，之后将该图形文件直接导入 CBuilder，形成自定义元件。

方法 1 适用于逻辑相对简单、代码量较小的元件的开发。方法 2 采用图形化的方式，可读性强，适用于大型元件的开发，但要求所搭建的元件具有相同的计算周期。

直流控制保护的程序逻辑复杂，代码量有数万行之多，并且包含多个计算周期，目前的两种方法均不易直接完成对程序的建模。

以 Simulink 图形化的方式搭建直流控制保护逻辑，通过代码转换及多线程优化调度技术将图形文件转变为 CBuilder 代码文件，以此形成直流输电控制保护元件。

2 Simulink 图形化建模

2.1 直流控制保护程序

1) 程序简化

实际工程的控制保护系统有很多与冗余、顺控、通信、测量相关的逻辑，这些逻辑对控制保护的暂态、稳态特性影响很小，在仿真建模的时候进行适当简化。

仿真模型为单重系统，不考虑冗余系统，不考虑保护三取二的配置；简化顺控逻辑，直流场及交流场的配置状态直接作为仿真模型的输入；滤波器不考虑检修替换；站间通信只模拟通信延时，故障状态由 RTDS 进行控制。

除了这些简化，其余部分均与实际工程程序一致，进行一比一建模。

2) 标么化

直流控制保护分整流、逆变两侧，每侧分为两

个极，每个极分为两个阀组，这些部分之间的逻辑几乎一致，只是输入参数之间的差异，为了便于不同部分之间程序的移植，在搭建控制保护模型时统一使用标么值进行计算，标么化的工作在 RTDS 搭建一次模型时完成。

3) 锁相同步与脉冲触发的模拟

锁相同步的特性对直流输电很重要，控制保护模型使用了与实际工程一致的锁相环，包括频率跟踪采样、正序电压滤过、低电压锁定等技术。

RTDS 换流阀用脉冲插值法提供触发精度，在建模时搭建 TrigByp 模块用于旁通触发；RTDS 换流阀的熄弧角测量没有进行频率补偿，控制保护模型实现了频率补偿，使其在频率偏移时正确测量。

由于锁相同步与脉冲触发对实时性和精度要求很高，这部分功能在 RTDS 搭建一次模型时完成，控制保护模型产生触发角度、脉冲释放、投旁通对等信号。

2.2 层级建模

1) 层级建模方法

层级结构的示意图如图 1 所示。

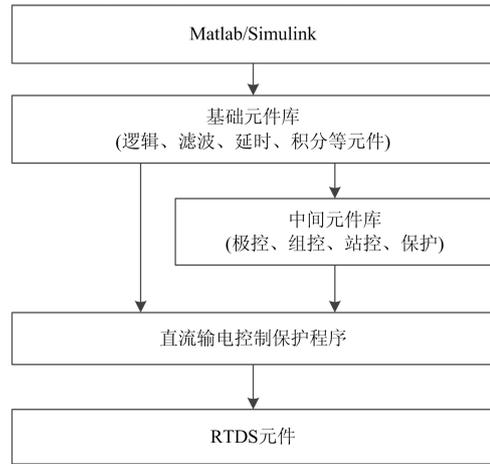


图 1 层级结构

Fig. 1 Hierarchical structure

层级建模采用基础元件库、中间元件库、仿真程序三级结构。

层级的封装以及层级之间信息的交互采用一些特定的元件，如图 2 所示。

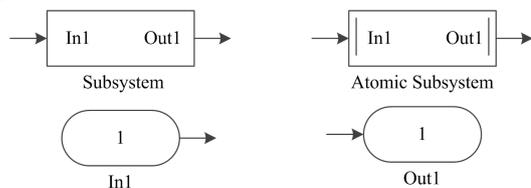


图 2 层级相关的元件

Fig. 2 Hierarchical components

使用 Subsystem 和 Atomic Subsystem 实现对功能逻辑的封装,使得在上层页面显示为一个块;在计算排序时,两者之间有所区别,Atomic Subsystem 在排序时被当作一个块,而 Subsystem 的内部功能块参与上层页面排序。

In 和 Out 元件定义了 Subsystem 的输入和输出引脚,这两个元件按照编号与外界对应相连。

层级封装示例如图 3 所示。

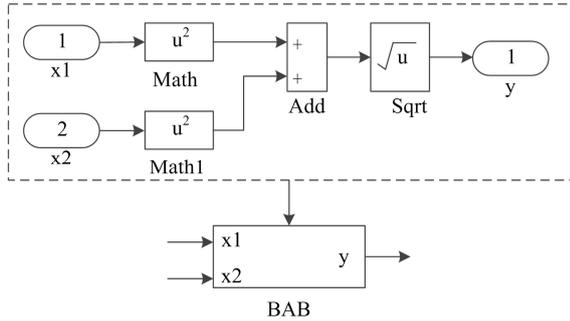


图 3 层级封装

Fig. 3 Hierarchical encapsulation

如果一些变量在程序中被频繁用到,则 Subsystem 将会增加太多的引脚。使用 From 和 Goto 元件,通过划分变量的作用域(局部变量、全局变量等)可以大大减少封装元件的引脚数量。

在进行图形化建模的时候,变量众多,连线复杂,非常容易形成代数环。一旦形成代数环,编译器就不能为其生成代码,因此需要将代数环进行有效的切断。Unit Delay 元件通过对变量传递增加单位延时的方法消除代数环的产生。

2) 层级元件库

通过上述层级建模方法形成层级元件库,包括基础元件库、中间元件库。

(1) 基础元件库

基础元件库可以通过直接复制 Simulink 元件、层级封装、编写 M 代码文件等方法形成元件库。

元件库包括:简单元件、算术类元件、逻辑类元件、比较选择类元件、滤波器类元件、数学函数类元件、延时类元件、积分类元件、投切点元件等。

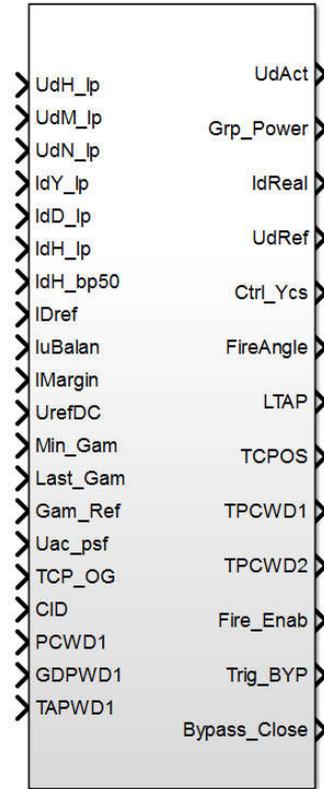
(2) 中间元件库

中间元件库包括极控、组控、站控和保护 4 个元件,每个元件包括跟实际工程一致的功能模块。

极控中间库包括交流低电压检测、电压电流预处理、电压平衡控制、双极功率除以双极电压、极间功率转移、电流裕度补偿、电流限制、电流跟踪协调、电流裕度切换、解锁附加参考值、低压限流功能、频率限制、交流功率参考值、解闭锁控制、

ESOF 及 BLOCK 处理、线路故障重启、线路电阻测量、直流电流参考值、过负荷限制等功能模块。

组控中间库包括电压电流预处理、闭锁时序、解锁时序、电压电流偏差、控制器限制、比例积分控制器、换流器监视、分接头控制等功能模块,阀组控制的元件外观如图 4 所示。



阀组控制

图 4 阀组控制元件外观

Fig. 4 Group control component outlook

站控中间库包括直流功率参考值、低负荷无功优化、极间电流平衡、功率提升、功率回降、交流滤波器控制等功能模块。

保护中间库包括换相失败保护、桥差保护、交流异常电压保护、直流线路保护、线路差动、横差保护、谐波保护、直流差动保护、高压母线保护、中性母线保护、接地极线保护等功能模块。

3) 控制保护元件

由中间元件库组成整个换流站的控制保护元件,包括 1 个站控元件,2 个保护元件,2 个极控元件,4 个组控元件。

2.3 多计算周期及代码分割

1) 多计算周期

直流控制保护程序包含多个计算周期(0.625

ms、1.0 ms、2.0 ms、4.0 ms、16.0 ms 等)。在 Simulink 中不同计算周期的代码封装成 Subsystem 之后，可以对整个 Subsystem 指定计算周期。在 Simulink 编译生成代码时，不同的计算周期会对应生成一个函数。

2) 代码分割

如果某一个计算周期的逻辑量很大，在生成代码后该计算周期所对应的函数代码量会很大，为以后的多线程调度带来困难，可以将同一个计算周期的逻辑分割为几个部分，每部分均封装为一个 Subsystem，利用 Simulink 对多线程编译的支持，每个部分生成一个独立的函数代码。

3 CBuilder 代码转换及多线程技术

1) 多线程计算

RTDS 使用多 CPU 并行计算技术实现实时仿真计算，典型计算步长为 50 μs，直流输电控制保护程序包含多个计算周期，这些计算周期要比 RTDS 的计算步长大得多。如果将生成的控制保护自定义元件直接进行计算，元件中所有的逻辑都将按照 RTDS 的步长进行计算，RTDS 的计算步长内单个 CPU 的计算能力有限，根本完成不了如此庞大代码量的计算。

对于不同的计算周期，只要在该计算周期内完成计算，就能保证仿真的实时性及准确性，同时间接提高了 RTDS 板卡的计算性能，从而大幅提高了仿真规模。每个计算周期就是一个线程，通过对多个线程的优化调度来实现多线程的实时仿真。

2) 多线程实现方法

RTDS 的计算步长为典型值 $T_0(50 \mu s)$ ，一个复杂的自定义元件包含 n 个计算周期 $T_1、T_2、\dots、T_n$ ， n 个计算周期均大于 $T_0(T_n$ 为最大的计算周期)，多线程调度的实现步骤如下。

(1) 计算单个 CPU 在 T_0 计算步长内能够计算的代码量，如 X_0 行；

(2) 统计 n 个计算周期的代码量，分别为 $X_1、X_2、\dots、X_n$ ；

(3) 计算 n 个计算周期的代码量所占用的计算资源系数 $K_1、K_2、\dots、K_n$ ，($X_1/X_0 = K_1、\dots、X_n/X_0 = K_n$ ， K 取整数，如 2.2 取 3)；

(4) 判断 n 个计算周期的代码量是否能在单个 CPU 内完成计算，判别原则： $(K_1+K_2+\dots+K_n) < (T_n/T_0)$ ，如果满足公式，说明单个 CPU 能够完成 n 个计算周期代码量的计算，否则需要将 n 个计算周期平均分成两部分，每个部分放在一个 CPU 进行计

算，判断每个 CPU 的计算能力重复上述步骤；

(5) 为 n 个计算周期的代码分配不同的计算优先级，计算周期越小，优先级越高；

(6) 生成优化调度程序，RTDS 以 T_0 的步长一直运行，第 n 个计算周期的代码第 m 次调度时刻为第 X 个 T_0 时刻($X = (mT_n)/T_0$ ， X 取整)，如果在某个时刻有多个计算周期需要调度计算，则按照优先级顺序进行选择。

RTDS 的步长为 T_0 ，某一个线程的计算周期为 T_n ，若 $T_n = 2.5 \times T_0$ ，则该线程任意连续三次的代码调度情况如图 5 所示。

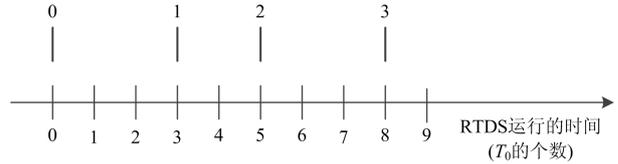


图 5 调度示意图

Fig. 5 Dispatch diagram

3) 控制保护程序生成

使用上述的多线程调度方法对搭建的直流控制保护程序编译生成代码文件，对代码文件中的计算周期及代码量进行统计如表 1 所示。

表 1 多计算周期代码统计

Table 1 Code quantity of multi-cycles

控制保护程序	保护	0.625 ms, 1 668 行
		1.000 ms, 506 行
		2.000 ms, 326 行
	组控	0.625 ms, 1 447 行
		2.000 ms, 1 002 行
		4.000 ms, 888 行
	极控	0.625 ms, 1 683 行
		2.000 ms, 5 574 行
		16.00 ms, 1 928 行
	站控	0.625 ms, 840 行
		4.000 ms, 1 538 行
		16.00 ms, 5 857 行

整个控制保护程序包含 12 个线程，按照上述调度原则进行计算，仅用 1 个 CPU 完成整个换流站的控制保护程序计算。

4 结果比对

要保证生成的控制保护程序与实际屏柜的特性一致，需要对控制保护特性进行逐一比对，本文以解锁、阶跃、交流测故障三个典型的项目为例进行比对说明。

1) 解锁

系统双极解锁至 500 MW，选择极 1 高端阀组的直流电压、直流电流、直流电流参考值及触发角作为观测量，如图 6 所示。

2) 阶跃

设定电流阶跃，直流电流从 1.0 p.u. 阶跃至 0.5 p.u., 500 ms 后恢复至 1.0 p.u., 比较电流实际值、电流参考值，对比图如图 7 所示。

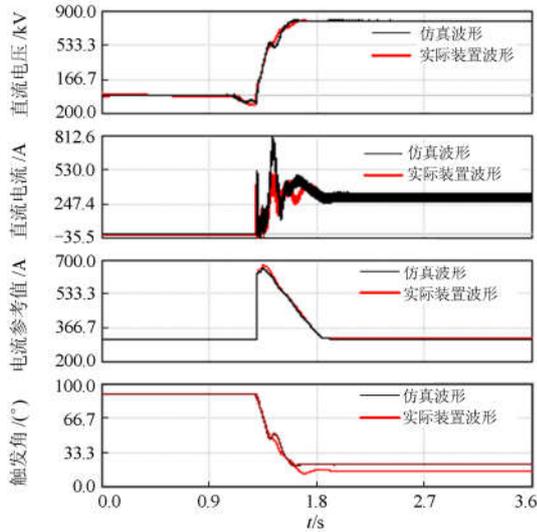


图 6 解锁波形
Fig. 6 Deblock plot

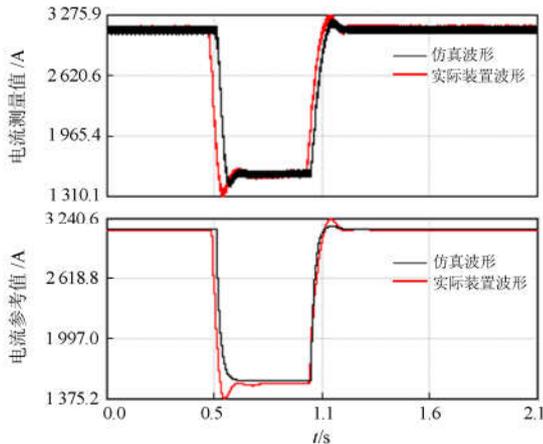


图 7 阶跃响应比对
Fig. 7 Step response comparison

电流阶跃的超调量及响应时间均在要求的范围内。

3) 交流故障

直流系统运行功率升至 5 000 MW，模拟整流侧交流系统 A 相接地故障，故障时间 100 ms，分别比对电流实际值、触发角，比对波形如图 8 所示。

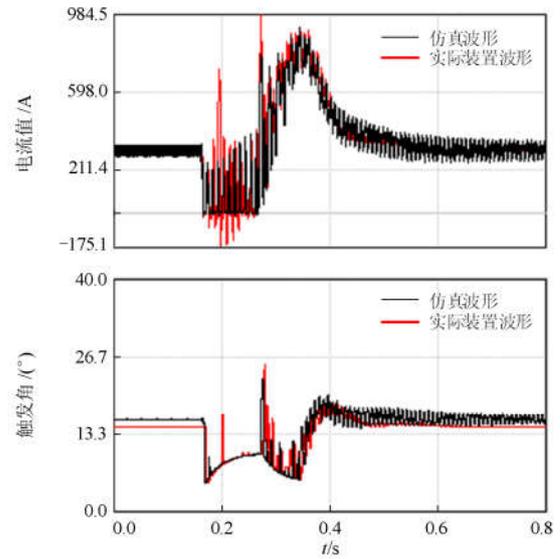


图 8 交流故障比对
Fig. 8 AC fault comparison

从比对结果来看，控制保护模型与实际屏柜的控制特性非常一致。

5 结论

通过 Matlab/Simulink 图形化的方式 1:1 搭建了直流控制保护逻辑，通过代码转换及多线程优化方法生成了 RTDS 自定义元件，仅用 RTDS 板卡的 1 个 CPU 就能完成该元件的计算。最后以云广±800 kV 特高压直流输电工程为例与实际屏柜的程序进行了比对，结果表明两者的稳态、暂态特性高度一致。

提出的仿真方法能够使用很少的 RTDS 硬件资源完成对直流输电一次系统、二次系统的仿真，在解决交直流混联大电网的仿真问题上，该方法非常经济、高效。

参考文献

[1] 艾红杰, 方扬, 陈大鹏. 晋北-南京特高压直流输电工程安稳系统及其控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 124-131. AI Hongjie, FANG Ying, CHEN Dapeng. Study on stability system and control strategy in Jinbei-Nanjing HVDC project [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 124-131.

[2] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.

[3] 邓诗蕾, 王明渝. 直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 40-45. DENG Shilei, WANG Mingyu. Cooperative control strategy

- of DC microgrid power flow controller and distributed energy storage system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(24): 40-45.
- [4] 王卫星, 郭宝甫, 李瑞生. 多端口光储联合发电装置技术规范研究[J]. *供用电*, 2018, 35(12): 69-74.
WANG Weixing, GUO Baofu, LI Ruisheng. Research on technical specifications of multiport PV energy storage combined power generation device[J]. *Distribution & Utilization*, 2018, 35(12): 69-74.
- [5] 赵晋斌, 蒋伟明, 孟伟. 直流微电网中混合储能系统的动态均流控制策略[J]. *供用电*, 2018, 35(9): 16-21.
ZHAO Jinbin, JIANG Weiming, MENG Wei. Dynamic power sharing control strategy for hybrid energy storage system in DC microgrid[J]. *Distribution & Utilization*, 2018, 35(9): 16-21.
- [6] 朱益华, 郭琦, 李威. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. *电网与清洁能源*, 2018, 34(12): 20-25.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei. Research on security and stability characteristics and control strategy of power grid with VSC-HVDC[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(12): 20-25.
- [7] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. *电网技术*, 2013, 37(12): 3368-3374.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(12): 3368-3374.
- [8] 杨星星, 张沛超, 刘之尧, 等. 基于多线程技术的数字保护实时仿真系统[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(19): 73-76.
YANG Xingxing, ZHANG Peichao, LIU Zhiyao, et al. A real-time digital protection simulation system based on multi-thread technology[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(19): 73-76.
- [9] 贾旭东, 李庚银, 赵成勇, 等. 基于 RTDS 的交直流混合系统实际故障再现分析[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(10): 54-58.
JIA Xudong, LI Gengyin, ZHAO Chengyong, et al. Real-time simulation studies of actual faults in AC/DC power system based on RTDS[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(10): 54-58.
- [10] 陈平, 李庆民, 张黎. 电网瞬时频率的一种跟踪算法[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(1): 80-84.
CHEN Ping, LI Qingmin, ZHANG Li. An algorithm for tracing instantaneous frequency of power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(1): 80-84.
- [11] 贾旭东, 李庚银, 赵成勇, 等. 基于 RTDS/CBuilder 的电磁-机电暂态混合实时仿真方法[J]. *电网技术*, 2009, 33(11): 33-38.
JIA Xudong, LI Gengyin, ZHAO Chengyong, et al. Electromagnetic transient and electromechanical transient hybrid real-time simulation method based on RTDS/CBuilder[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(11): 33-38.
- [12] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 36-70.
- [13] 边宏宇, 张海波, 安然然, 等. RTDS 上机电暂态仿真自定义模块的研究与开发[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(22): 61-65.
BIAN Hongyu, ZHANG Haibo, AN Ranran, et al. Research and development of power system transient stability simulation using object-oriented technique[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(22): 61-65.
- [14] 李保福, 李莹, 王芝茗, 等. RTDS 应用于线路保护装置的动模试验[J]. *电力系统自动化*, 2000, 24(15): 69-70.
LI Baofu, LI Ying, WANG Zhiming, et al. Comprehensive test of protective relays on different ends of long transmission line by RTDS[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(15): 69-70.
- [15] 陈礼义, 顾强. 电力系统数字仿真及其发展[J]. *电力系统自动化*, 1999, 23(23): 1-6.
CHEN Liyi, GU Qiang. Power system digital simulation and its development[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(23): 1-6.
- [16] 徐科, 吴在军, 闵涛, 等. 基于 IEC1850 标准的新型数字保护平台研究与实现[J]. *电力自动化设备*, 2007, 27(2): 79-84.
XU Ke, WU Zaijun, MIN Tao, et al. Digital protection platform based on IEC61850[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2007, 27(2): 79-84.
- [17] 宋洁莹, 冯献强, 崔福博, 等. MMC-UPFC 动态建模及内部特性仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(增刊 1): 67-75.
SONG Jieying, FENG Xianqiang, CUI Fubo, et al. Dynamic modeling and internal characteristic simulation research of MMC-UPFC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(S1): 67-75.
- [18] 周飞, 陆振纲, 于弘洋, 等. 统一潮流控制器多时间尺度混合实时数字仿真[J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2848-2855.
ZHOU Fei, LU Zhengang, YU Hongyang, et al. Research on multiple time scale hybrid real-time digital simulation and testing of unified power flow controller[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2848-2855.
- [19] RTDS Technologies Inc. Real time digital simulation for the power industry manual set[Z]. 2007.
- [20] 刘威鹏, 曾丽丽, 张爱玲. LMS 自适应滤波器在雁淮特高压直流工程交流滤波器保护系统中的应用研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(24): 117-123.
LIU Weipeng, ZENG Lili, ZHANG Ailing. Application and study of LMS adaptive filter in AC filter protection of Yan-Huai UHVDC Power Transmission Project[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(24): 117-123.

收稿日期: 2018-03-31; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

王伟(1972—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真试验。E-mail: wangwei@ketop.cn

(编辑 姜新丽)