

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210342

直流输电控制与保护系统的工程镜像仿真方法

庄良文¹, 李亚萍¹, 周鹏鹏¹, 杨松浩², 张彦兵¹

(1. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了研究直流输电工程对电网的影响, 针对直流输电控制与保护系统, 提出了一种工程镜像仿真概念并研究了其实现方法。首先分析了工程镜像仿真的基本原理和关键技术。然后针对直流输电控制与保护系统典型开发平台 SIMADYN D 开发了工程镜像仿真工具 NewLinkC 组态软件平台, 利用 NewLinkC 完成了直流控制保护仿真程序功能模块的编制, 并封装成能够被 RTDS 识别的直流控制保护仿真模块, 与已有的 RTDS 系统元件仿真模块(如交流系统、换流变压器、换流阀、直流线路、滤波器等)构成 RTDS 闭环交直流实时仿真系统。最后以贵广 II 回直流输电项目为例, 对比分析了实际控制保护系统与镜像系统的暂态过程, 结果表明, 该镜像系统能准确反映实际控制保护系统的运行特性, 可替代实际控制保护系统进行直流输电工程的仿真研究。

关键词: 工程镜像仿真; NewLinkC 软件平台; RTDS 闭环; 直流输电; 控制与保护

Engineering mirror simulation method of control and protection system in DC transmission

ZHUANG Liangwen¹, LI Yaping¹, ZHOU Pengpeng¹, YANG Songhao², ZHANG Yanbing¹

(1. Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to study the influence of the HVDC project on the power grid, the concept of engineering image simulation is proposed for an HVDC control and protection system, and its implementation method is studied. First, the basic principle and key technology of engineering mirror simulation are analyzed, and then the engineering mirror simulation tool NewLinkC configuration software platform is developed for the typical development platform SIMADYN D of DC transmission control and protection system. The DC control protection simulation program function module is completed using NewLinkC and encapsulated into a DC control protection simulation module which can be identified by RTDS. It constitutes an RTDS closed-loop AC/DC real-time simulation system with an existing RTDS system component simulation module such as an AC system, converter transformer, converter valve, DC line, filter, etc. Finally, taking the Gui-Guang II HVDC transmission project as an example, the transient process of the actual control and protection system and the mirror system are compared and analyzed. The results show that the mirror system can accurately reflect the operational characteristics of the actual control and protection system, and can replace the actual control and protection system for the simulation research of DC transmission engineering.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007143).

Key words: engineering mirror simulation; NewLinkC software platform; RTDS closed-loop; DC transmission; control and protection

0 引言

由于高压直流输电特有的传输容量大、距离长、损耗小等特点, 在我国的“西电东送”和跨国互联等项目中得到了广泛应用, 特别是华东电网、华中

电网和南方电网等接入了多回高压直流输电线路。但是, 对于这些交直流混联系统, 当发生直流系统故障导致直流系统功率传输中断等现象时, 将对其运行的安全性和经济性带来新的挑战^[1-2], 同时也可能与发电机组耦合产生次同步振荡, 直接威胁发电厂的安全稳定运行^[3]。而由于直流输电系统的特点, 采用不同控制策略将对直流系统在发生故障导致换

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007143)

相失败或故障恢复过程存在较大差异^[4-8]。因此,为了研究直流系统对电网的影响,要建立与实际工程一致的控制保护系统研究模型。

仿真作为工程研究的主要手段,在直流输电领域应用广泛。文献[9-11]基于实际工业级控制平台,完成直流控制器软件设计,并以 RTDS 为控制对象组成闭环仿真系统,这种模式属于硬件在环(Hardware in the loop, HIL)试验模式,是直流输电控制与保护样机开发的主要手段。文献[12-13]提出了基于数字和物理混合建模的实时仿真平台,控制对象为实际物理装置,控制器为数字仿真平台,这种模式属于快速控制原型(Rapid Control Prototyping, RCP)试验模式,在柔性直流输电控制与保护样机开发中常常采用。文献[14-16]是软件离线方法,对于研究直流输电控制保护的基本策略和大规模新能源并网仿真具有一定价值。文献[17-18]将实际的控制保护装置接入模拟的一次系统,进而进行相应的试验研究,该方法需要大量的实际装置配合,通用性和经济性较差。文献[19]提出了在 RTDS 上建立包含控制策略的 MMC_UPFC 仿真试验平台,可对 UPFC 的控制策略进行有效性评估。

在高压直流输电工程的设计和运行实践中,还存在一种仿真技术需求,就是本文提出的工程镜像仿真,文章论述了工程镜像仿真的概念、实现方法、关键技术和应用效果。

1 工程镜像仿真概述

常见的电力系统仿真技术有离线仿真、实时数字仿真、半实物仿真。根据实际的工程应用需求,提出了工程镜像仿真技术的概念,即将实际直流输电工程中控制与保护设备进行全数字化仿真建模的技术。

1.1 软件离线仿真

利用 PSCAD/EMTDC 或 Matlab/Simulink 等离线仿真软件开展对直流控制保护的建模与仿真。软件离线仿真一般采用普通 PC 机及其 Windows 环境下的仿真软件,具有使用方便、成本较低的优势。离线仿真时,仿真模型执行进度与系统时钟是不同步的,比如执行一个 30 s 的时域仿真任务,可能需要花费 100 s 的计算时间。由于仿真过程中时间变量和实际时间没有关联,所以离线仿真具有以下局限性:①不能和实际控制保护装置连接组成闭环系统;②处在实际时空下的使用者无法感受过程模拟的真实感,不具有展示效果;③全系统涉及到的 I/O 环节都是软件实现,无法支持系统开发与集成人员分析并解决 I/O 问题。

1.2 数字实时仿真

实时仿真是仿真模型执行进度与系统时钟完全同步的一类仿真。如果仿真系统有实物接入或人为操作介入,由于实物和人的行为遵循真实时间,就需要实时仿真。可用于直流输电实时仿真的平台有 RTDS 和 RTLAB 等。

1.3 半实物仿真

半实物仿真是以实时仿真为基础,通过实时仿真器的 IO 接口接入实际设备的一种仿真手段。它包括“快速控制原型(RCP)”和“硬件在环(HIL)”两个方面。①快速控制原型:该技术对控制系统的研究与设计非常有用。在技术或产品的构想阶段,设计者可以将新的控制思路(方法)在实时硬件上方便而快捷地进行测试。通过实时测试,可以在设计初期发现存在的问题,以便修改控制模型或参数,再进行实时测试,这样反复进行,最终产生一个合理可行的控制原型。②硬件在环:该技术是以实时处理器运行仿真模型来模拟受控对象的运行状态,通过 I/O 接口与被测的控制器连接,对被测控制器进行全面系统的测试。从安全性、可行性和合理的成本上考虑, HIL 硬件在环仿真测试是控制器开发流程中重要一环。

当前,直流输电保护与控制系统多采用硬件在环技术完成关键屏柜的测试与联调,如图 1 所示。



图 1 直流输电控制与保护系统的硬件在环测试场景
Fig. 1 DC transmission control and protection system hardware-in-the-loop test scene

图 1 所示系统中的诸多屏柜,就是换流站现场的实际工业装置,包括极控、站控和保护等功能屏柜;图 1 中的实时仿真器是 2 个 racks 的 RTDS。此处的 RTDS 用来模拟交流电网、直流线路、交流场设备、直流场设备、换流阀等元件组成的一次系统;实际工业屏柜通过 RTDS 的 IO 板卡与虚拟(数字)一次系统组成闭环系统。

1.4 工程镜像仿真

1.4.1 工程镜像仿真原理

工程镜像仿真是对半实物仿真的发展,是把半

实物仿真中的实物部分(实际屏柜)镜像为一个软件模块或一个紧凑型智能模块, 该镜像模块可以等效模拟大量实际屏柜的测量、控制和保护算法。镜像原理如图 2 所示。

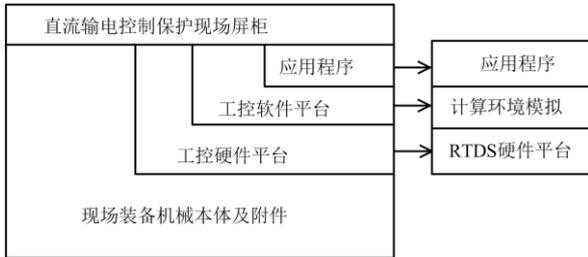


图 2 直流输电控制保护屏柜(组)的镜像原理

Fig. 2 DC transmission control and protection cabinet (group) mirror principle

图 2 中, 直流输电控制保护屏柜(组)是实际工程中的现场装备, 这些装备的核心功能是由其应用程序及其运行软硬件平台决定的, 该核心功能通过一定技术手段在 RTDS 平台上再现出来, 本文称之为工程镜像。

1.4.2 工程镜像仿真的价值

工程镜像仿真在直流输电工程中具有重要意义。实际的直流输电控制保护环节需使用一百多面屏柜, 它们共同完成换流站的阀控、极控、站控等层面的控制与保护功能。而在工程投运后, 当需要对直流输电工程进行事故分析或对包含该工程的交直流混联电网进行研究时, 就必须重复配置一套控制保护屏柜, 其占用空间大、经济性差和使用不便的缺点十分突出, 而工程镜像仿真可以完全复现直流输电工程的控制保护程序, 无需这些实际的控制保护屏柜配合, 节省了大量的资源, 同时也提高了相关仿真研究的效率。

2 工程镜像仿真的关键技术

对于实际直流输电控保装置, 一般采用高性能的软硬件基础平台来实现。国内主要使用西门子的 SIMADYN D、SIMATIC TDC 及 ABB 的 MACH2、DCC800。本文以西门子的 SIMADYN D 平台为例, 阐述工程镜像仿真的关键技术。把实际直流工程的控保装置镜像到 RTDS 平台, 需要解决程序的计算周期分频、程序的执行效率、元件的优化排序, 以及 RTDS 编译瓶颈等关键问题。为了解决这些问题, 首先自主开发了图形化组态工具 NewlinkC, 然后基于该软件工具开发了能够被 RTDS 识别的控保元件和程序。

2.1 半实物仿真

在 SIMADYN D 中, 其计算周期分为 $T_1 \sim T_n$ 多个级别, T_1 为最小周期, 对于 50 Hz 系统, T_1 时间为 0.625 ms, 而 RTDS 的仿真步长为固定周期, 典型值为 0.05 ms。

为保证仿真与应用的一致性, 需要在 RTDS 上模拟其计算环境, 由于 RTDS 的仿真步长快于 SIMADYN D 的计算周期, 可以利用分频技术, 即 RTDS 不连续计算仿真程序, 而是间隔相应周期计算一次。但 RTDS 的仿真步长并不是控制保护程序计算周期的整数倍, 则需要插值处理。

2.2 程序的执行效率

因为直流控制保护程序的元件数量十分巨大, 因此每个基础元件的执行效率尤为重要。在保证元件逻辑和算法正确的基础上, 必须对元件的执行时间进行优化。使用的主要技术包括算法优化和多线程执行。算法优化包括: ①将短循环展开; ②将函数调用展开; ③用模寻址代替循环赋值; ④增加临时变量以复用中间结果; ⑤使用常数赋值, 避免函数运算。多线程执行是指: 由于 RTDS 的仿真步长快于直流控制保护仿真程序的计算周期, 采用分频技术后, 将造成 RTDS 的每个计算周期的计算量严重不平衡, 这样可以把元件的计算任务分步计算, 即把计算任务分解, 在 RTDS 的不同的仿真周期计算不同内容^[20], 但确保在 SIMADYN D 的计算周期内完成, 这样实现了并行的多线程技术, 元件性能提升十分显著。

2.3 元件的优化排序

在图形化组态平台上, 仿真程序是通过图形模块之间“连线”组成的, 这给应用程序开发带来极大便利。但是, 对于本文研究的组态工具开发层面上的工作是一个较大挑战。组态完成之后, 各部分的计算次序由元件排序决定, 对于有反馈逻辑的图形程序, 元件排序不当可导致执行结果错误。目前, RTDS 控制元件自动排序有两个缺点^[21]: ①所有 CPU 总体排序; ②不能正确处理反馈。

2.4 NewLinkC 图形化组态平台

NewLinkC 图形化组态平台是我们自主研发的一个能够灵活组态构建实时运行程序的软件平台, 通过在 NewLinkC 平台上建立由大量元件组成的程序块, 再经过自动封装处理, 即可形成可被 RTDS 识别的控保元件。NewLinkC 组态平台解决了前述如计算周期控制、多线程计算分解等问题, 同时还借鉴了 PSCAD 软件算法优势^[22], 通过增加反馈处理环节, 保证了含代数环方程的正确求解, 成功地解决了排序问题。

3 工程镜像仿真的实现方法

利用 NewLinkC 开发与实际控制保护应用开发所需要的平台一致的基础元件库,需要做到在名称、外观、代码及 I/O 参数等方面的完全一致。

以西门子 SIMADYN D 技术平台为例,在做镜像仿真时,需考虑西门子平台的两种不同 CPU:极控的闭环控制和保护算法部分使用了基于 24 位定点 DSP(数字信号处理)的处理器结构,板卡型号为 EP3;而顺序控制和通信联网部分使用了基于 64 位浮点 RISC 的处理器结构,板卡型号为 PM6,两者使用完全不同的基础计算算法。因此在基于对底层源代码深入分析的基础上,仿真元件库分别建立了基于定点数计算理论的 EP3 元件库和基于浮点数计算理论的 PM6 元件库。

基于 NewLinkC 建立的基础元件库与西门子 SIMADYN D 平台的元件库完全一致,其中大多数

元件也能与西门子的 TDC 平台的元件库相兼容,从而大大提高了元件库的适用范围。

3.1 极控系统仿真程序

极控系统是高压直流输电控制系统的核心部分,极控系统的控制性能将直接决定直流系统的各种响应特性以及功率/电流稳定性。极控系统的运行特性主要是由直流电流调节器、直流电压调节器和熄弧角调节器三个基本控制器完成。

图 3 所示是使用 NewLinkC 组态工具编制的极控调节器配合逻辑图,其中,电流偏差(dId)、逆变侧电压偏差(dUdInv)、整流侧电压偏差(dUdRec)、熄弧角偏差(dGamInv)经选择器选择后送入比例积分控制器(PICH),同时选择电流控制、电压控制、熄弧角控制对应的比例系数(LKP)和积分时间(LTN)送入比例积分控制器,比例积分控制器的输出经反余弦(ASTI)和速率限制(DFA)即得到触发角(FireAngle)。

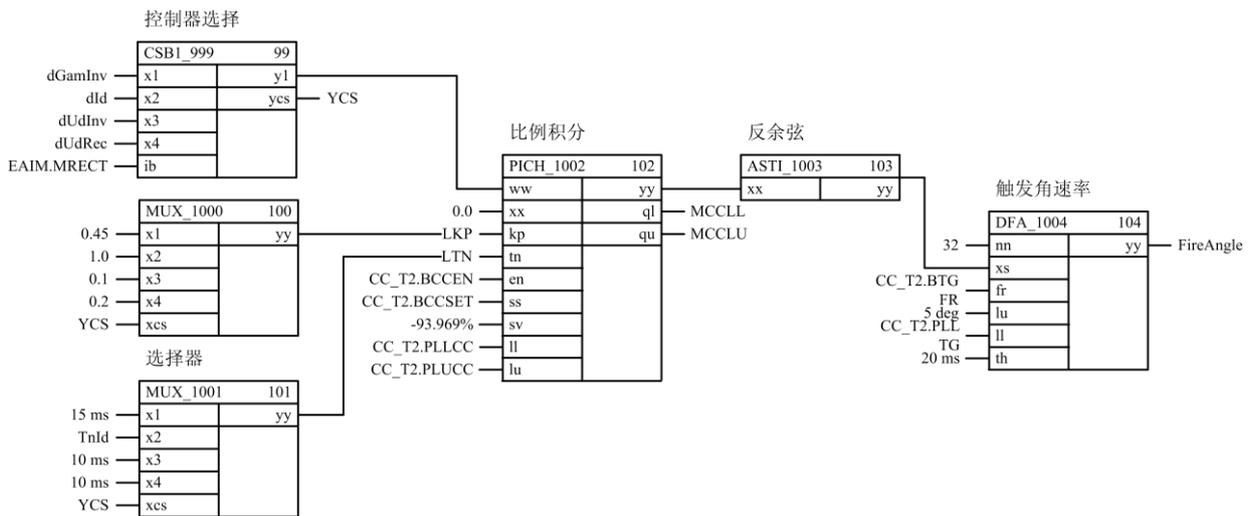


图 3 极控调节器配合逻辑图

Fig. 3 Pole control regulator coordination logic

3.2 站控系统仿真程序

站控系统在实际系统中主要负责直流场开关设备顺序控制和交流滤波器投切控制。

图 4 为交换无功滤波器投切逻辑, WQREF 为交换无功参考值, WQDED 为交换无功死区值, Q_SYS 为系统交换无功测量值, Q_Ctrl 为交换无功控制模式。上述信号经减法模式、限制值监视模块、与门模块后生成请求投入滤波器信号(Qreq_on)和请求切除滤波器信号(Qreq_off)。

3.3 直流保护仿真程序

直流输电系统中可能出现各种故障,如交流进

线短路故障、换流阀内部短路故障,直流线路短路故障等^[23],在发生这些故障或其他异常情况下,直流保护通过检测相应的电气量(电流、电压、功率、频率等)或其他非电气量的变化,做出正确的响应,保证直流输电系统安全稳定运行,防止损坏高压直流输电设备。直流保护按保护区域可分为直流换流器保护、直流极保护、直流双极保护。

图 5 为直流换流器的阀短路保护组态图,用于检测阀短路故障和换流变阀侧相间故障。在正常运行工况下,差动电流很小,如果交流侧电流明显高于直流电流,则表明发生了故障,保护快速动作。

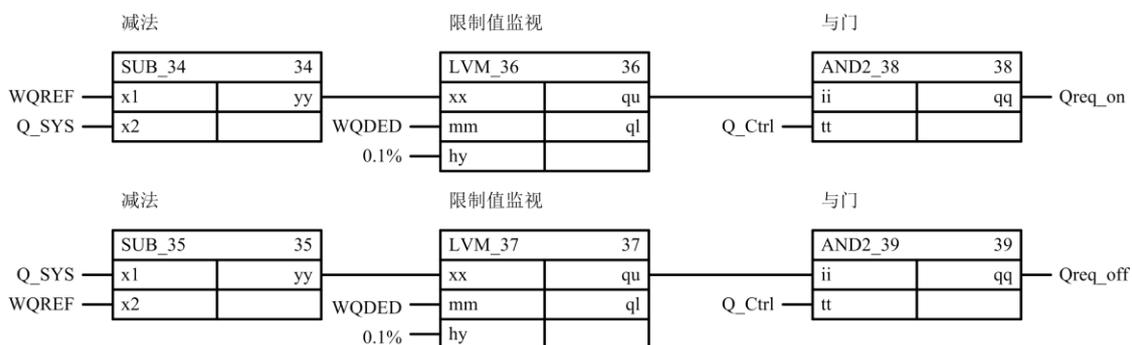


图 4 交换无功滤波器投切逻辑

Fig. 4 Reactive power exchanging filter switching logic

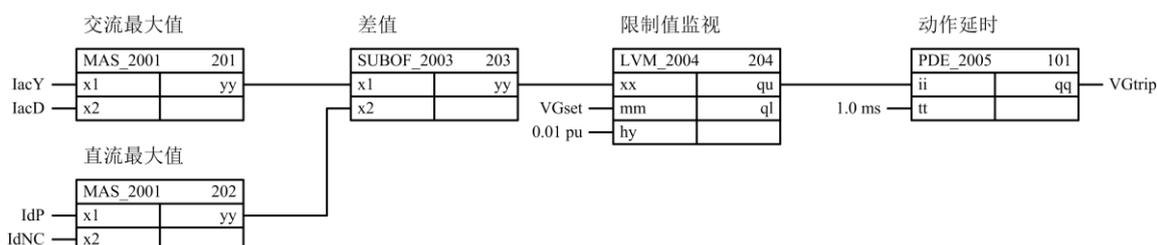


图 5 阀短路保护组态图

Fig. 5 Valve short-circuit protection configuration

保护判据为: $\text{Max}[I_{acY}, I_{acD}] - \text{Max}[I_{dP}, I_{dNC}] > \text{定值 VGset}$, 其中 I_{acY} 和 I_{acD} 分别是变压器 Y 绕组和 D 绕组三相电流的整流值, I_{dP} 是直流极母线电流, I_{dNC} 是直流中性母线电流。

4 算例分析

为了验证基于 NewLinkC 组态平台的直流控制保护镜像仿真系统的准确性, 需要进行镜像系统与实际工程比对的试验验证。

4.1 实际工程

±500 kV 贵广 II 回直流输电项目是中国南方电网西电东送重点电网建设工程, 西起贵州兴仁, 东至广东深圳, 全长 1225 km, 输电容量为 300 万 kW。

4.2 镜像仿真系统

基于 RTDS 建立了包含交流等效系统、换流变压器、直流换流阀、直流输电线路、接地极线路、交流滤波器、直流滤波器、平波电抗器等的一次系统仿真模型。

本试验系统, 共使用 2 个 Racks, 1 个 Rack 配置 6 块 GPC 板卡。模拟 1 个站的控制保护程序需要 2 块 GPC 板卡(4 个 CPU), 其中 2 个 CPU 用于计算极控, 1 个 CPU 用于计算站控, 1 个 CPU 用于计算直流保护。

4.3 对比试验

设置距离贵州高坡换流站 300 km 处直流输电线路故障, 直流保护发出线路故障信号通知极控系统, 由极控系统完成重启动以及超过重启次数时闭锁直流系统。图 6 及图 7 分别为该故障场景下极控系统重启成功的实际工程和镜像仿真的录波比对。

对比试验结果表明, 采用贵广直流实际控保装备与采用镜像仿真平台所得实验结果高度一致。基于镜像仿真平台所得到的直流电压、直流电流和触发延迟角等变量的暂态过程与基于实际系统所得曲线有很好的吻合性。

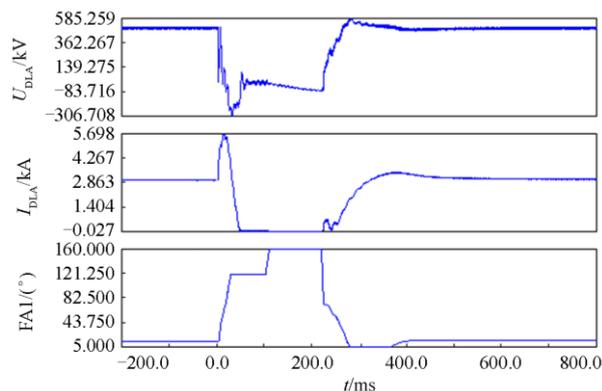


图 6 实际工程数据录波图

Fig. 6 Engineering practice recorder data

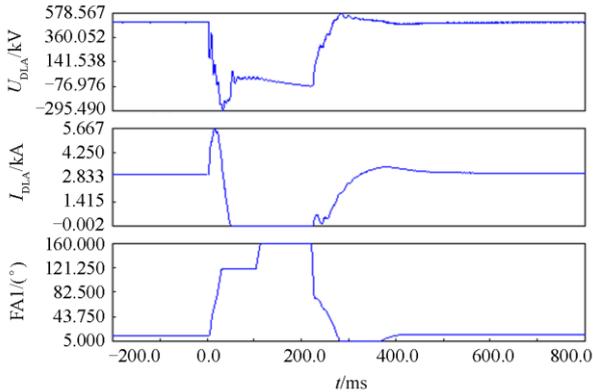


图7 镜像仿真系统数据录波

Fig. 7 Mirror simulation system recorder data

5 结论

基于 NewlinkC 组态软件平台及 RTDS 实时仿真技术建立的工程镜像仿真平台, 可实现对直流控制保护系统的完全仿真, 并与 RTDS 系统构成完整的闭环仿真平台, 从根本上解决了现有的直流输电控制保护仿真缺陷和系统仿真瓶颈, 成为直流输电控制保护系统仿真的最有效、最经济、最灵活的手段。特别对直流工程的前期设计研究和工程运行故障分析具有重要意义。

参考文献

- [1] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [2] 洪潮, 刘鸣, 陈雁, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流互联系统无功优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 32(11): 13-20.
HONG Chao, LIU Ming, CHEN Yan, et al. Reactive power optimization strategy for AC/DC interconnected system with VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2020, 32(11): 13-20.
- [3] 崔亚辉, 张俊杰, 赵宗彬, 等. 高压直流输电超临界 600 MW 机组次同步振荡扭振模型及仿真[J]. 热力发电, 2016, 45(6): 106-110.
CUI Yahui, ZHANG Junjie, ZHAO Zongbin, et al. Subsynchronous oscillation torsional vibration model and simulation for a supercritical 600 MW unit with high voltage direct current transmission[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(6): 106-110.
- [4] 吕佳宁, 叶小晖, 杨明玉. 混合级联多端直流输电系统的功率协调控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 009-015.
LÜ Jianing, YE Xiaohui, YANG Mingyu. Power coordination control strategy for hybrid cascaded multi-terminal HVDC system[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 009-015.
- [5] 周贵勇, 郝俊芳, 王胜, 等. 一种直流输电无功控制功能优化策略及应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 187-193.
ZHOU Guiyong, HAO Junfang, WANG Sheng, et al. Optimization strategy and application analysis of reactive power control function for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 187-193.
- [6] 刘席洋, 王增平, 乔鑫, 等. 交直流混联电网换相失败分类及抑制措施研究综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 1-7.
LIU Xiyang, WANG Zengping, QIAO Xin, et al. Review on classification and mitigation measures of commutation failures in AC-DC hybrid power grids[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 1-7.
- [7] 黄智达, 石兆麒, 梅勇. 多端柔性直流输电系统动态协调优化控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 45-52.
HUANG Zhida, SHI Zhaoqi, MEI Yong. Dynamic coordination optimization control strategy for MMC-MTDC systems[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 45-52.
- [8] 李林, 吕彦北, 王永平, 等. 特高压直流输电工程逆变侧控制策略优化设计[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 208-214.
LI Lin, LÜ Yanbei, WANG Yongping, et al. Optimal design of inverter side control strategy for UHVDC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 208-214.
- [9] 康建爽, 周群英, 曹森, 等. 基于工业控制平台柔性直流输电仿真系统设计[J]. 云南电力技术, 2014, 42(6): 40-43.
KANG Jianshuang, ZHOU Qunying, CAO Sen, et al. Design of flex HVDC system based on the industrial control platform[J]. Yunnan Electric Power, 2014, 42(6): 40-43.
- [10] 李林, 王永平. 多换流器并联特高压直流系统控制策略及仿真[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 80-86.
LI Lin, WANG Yongping. Simulation of control strategy for multi-converter paralleled HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 80-86.
- [11] 路建良, 贺之渊, 唐茹彬, 等. 柔性直流输电阀基控制设

- 备硬件在环测试方法[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 62-69.
- LU Jianliang, HE Zhiyuan, TANG Rubin, et al. Hardware-in-the-loop test method for valve base controller of VSC-HVDC[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 62-69.
- [12] 刘栋, 汤广福, 贺之渊, 等. 模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 68-73.
- LIU Dong, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Hybrid real-time simulation technology for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 68-73.
- [13] 张宝顺, 赵成勇, 刘兴华, 等. 基于 PXI 的 MMC-HVDC 系统快速控制原型设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 59-64.
- ZHANG Baoshun, ZHAO Chengyong, LIU Xinghua, et al. Design of rapid control prototype for MMC-HVDC system based on PXI[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 59-64.
- [14] 樊云龙, 任建文, 叶小晖, 等. 基于 MMC 的渝鄂直流背靠背联网工程控制策略研究[J]. 中国电力, 2019, 52(4): 96-103.
- FAN Yunlong, REN Jianwen, YE Xiaohui, et al. Study on control strategy of back to back MMC-HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 96-103.
- [15] 董富德, 程汉湘, 洗冀, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 与 C 语言接口技术的直流输电仿真系统的研制[J]. 电气自动化, 2015, 37(5): 22-24.
- DONG Fude, CHENG Hanxiang, XIAN Ji, et al. Development of an HVDC simulation system based on PSCAD/EMTDC and C language interface[J]. Electrical Automation, 2015, 37(5): 22-24.
- [16] 曹斌, 王立强, 赵永飞, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的大规模新能源并网电磁暂态并行仿真[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 154-161.
- CAO Bin, WANG Liqiang, ZHAO Yongfei, et al. Electromagnetic transient parallel simulation of large-scale new energy grid connection based on PSCAD/EMTDC[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 154-161.
- [17] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江±800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.
- WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ±800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [18] 万磊, 丁辉, 刘文焯. 基于实际工程的直流输电系统仿真模型[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 629-634.
- WAN Lei, DING Hui, LIU Wenzhuo. Simulation model of control system for HVDC power transmission based on actual project[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 629-634.
- [19] 庄良文, 张彦兵, 荆雪记, 等. 基于 RTDS 仿真的 MMC_UPFC 串联侧间接电流控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 56-61.
- ZHUANG Liangwen, ZHANG Yanbing, JING Xueji, et al. Simulation research of MMC_UPFC indirect current control strategy based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 56-61.
- [20] RTDS Technologies. Component builder tutorial[Z]. Multi-Thread Component, 2012.
- [21] RTDS Technologies. Real-time digital simulator tutorial manual[Z]. Chapter 10B HVDC Control Modeling on the RTDS, 2007.
- [22] MANITOBA-HVDC Research Centre. PSCAD User's Guide[Z]. Component Ordering, 2005.
- [23] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-020-00173-9.
-
- 收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-05-25
- 作者简介:
- 庄良文(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统仿真试验研究工作;
- 李亚萍(1963—), 女, 博士, 教授级高工, 从事继电保护检测和标准研究工作;
- 周鹏鹏(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统仿真试验研究工作。E-mail: zhoupengpeng@ketop.cn
- (编辑 张爱琴)