

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221690

## 继电保护数字孪生技术应用展望

章耀耀<sup>1</sup>, 侯勇<sup>1</sup>, 叶海<sup>1</sup>, 刘中平<sup>1</sup>, 刘虎林<sup>1</sup>, 李丹阳<sup>2</sup>

(1. 国网华东分部调度控制中心, 上海 200001; 2. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 数字孪生作为“工业4.0”背景下的新兴研究热点, 为应对新型电力系统给继电保护带来的挑战提供了关键技术支撑。为此剖析了数字孪生的内涵, 并结合继电保护领域的实际应用需求, 定义了继电保护数字孪生相关术语, 归纳了继电保护数字孪生的期望特征。在此基础上, 提出一种继电保护数字孪生系统的典型架构, 并针对现有继电保护数字孪生研究在数据实时交互能力、保护逻辑透明性和接口标准化等方面的不足, 指出其构建的关键技术。最后挖掘了继电保护数字孪生的潜在应用价值, 预期能为后续数字孪生技术在继电保护领域的进一步研究和应用提供一定的参考。

**关键词:** 继电保护; 数字孪生; 建模; 实时交互

### Application prospect for relay protection digital twin technology

ZHANG Yaoyao<sup>1</sup>, HOU Yong<sup>1</sup>, YE Hai<sup>1</sup>, LIU Zhongping<sup>1</sup>, LIU Hulin<sup>1</sup>, LI Danyang<sup>2</sup>

(1. State Grid East China Branch Dispatching Control Center, Shanghai 200001, China;

2. Xuchang KETOP Testing Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** As an emerging research hotspot with the background of "Industry 4.0", digital twin provides key technical means to support the challenges to relay protection brought by the new power system. For this reason, digital twin is analyzed, and combined with the practical application requirements in the field of relay protection. The relevant terms of relay protection digital twin are defined, and its expected characteristics are summarized. A typical architecture of relay protection digital twin system is proposed. In view of the shortcomings of existing research on relay protection digital twin in terms of data real-time interaction ability, protection logic transparency, interface standardization, etc., the key technologies for its construction are noted. Finally, the potential application value of the technology is explored. It is expected to provide some reference for further research and application of digital twin technology in this field.

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

**Key words:** relay protection; digital twin; modeling; real-time interaction

## 0 引言

“双碳”目标背景下, 我国新型电力系统建设全面加速, 新能源占比不断增大, 特高压直流远距离输电规模持续提升, 同时用户侧分布式电源快速发展, 高比例新能源、高比例电力电子并网特征日益显著<sup>[1]</sup>。电力系统的安全稳定运行高度依赖继电保护系统, 新型电力系统中源、网、荷的变化使得继电保护面临重大挑战。

1) 交直流电网的复杂故障响应特征、不同换流站的控制策略组合等对保护的影响机理并不清晰,

加之新能源的出力波动性强, 一些极端气象条件、新能源脱网等特殊工况也会产生暂态过程, 从而导致新能源交直流电网保护系统的性能评价、整定计算和优化配置更为困难<sup>[2]</sup>。

2) 电网中自主可控新一代继电保护装置在采用国产化芯片、国产化操作系统、国产化站控层通信协议(CMS协议)和SV/GOOSE共网等措施后, 在保护原理、数据交互形式以及动作行为等方面将面临新要求, 其自身是否安全可靠以及接入电网后性能是否稳定等有待进一步验证<sup>[3-4]</sup>。

3) 系统电力电子化程度不断攀升, 可能带来宽频振荡、谐波、谐振等事故风险<sup>[5-6]</sup>, 加之现阶段新型电力设备的运行和维护技术尚未发展成熟, 其接

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007143)

入电网后如何安全可靠运行亦有待深入研究。

在继电保护领域,一般借助仿真手段来模拟电力系统并辅助制定控制策略,比如在对新的保护功能进行开发测试时,多采用将编写的程序烧写至实际保护装置,再借助仿真测试系统对保护装置进行动模测试,以此验证所设计的方案是否合理,此方法所需开发周期较长;若对继电保护装置进行系统级测试,则需要多台装置与之相配合,测试环境搭建繁琐,人力、物力等成本投入相对较高。在进行系统稳定性分析时,对于未提供继电保护模型的仿真软件,一般仅通过开关固定时间的开合操作来模拟相应的保护功能,对于提供继电保护模型软件,其提供的模型与实际继电保护装置的動作特性存在一定出入,在进行精细化分析时不再适用。为此,迫切需要通过学习研究构建新的风险管控手段来应对新型电力系统给继电保护带来的挑战。

数字孪生通过仿真技术、数据感知、混合建模和虚拟现实等技术来构建物理实体的精确仿真或全数字化表达,具有实时、闭环、保真等特点。相较于传统仿真,在模型搭建层面,仿真搭建的模型具有普适性,偏向于反映物理对象的内在规律和运行机理,而数字孪生搭建的模型高保真,更偏向于物理对象的个性差异;在模型运行层面,传统仿真中模型多离线运行,参数离线更新,且物理对象与模型之间的数据多为单向流动,而数字孪生可实现模型的实时运行和参数自动更新,且物理实体与孪生体之间的数据为双向互动。新型电力系统要适应高比例新能源接入、新能源的不稳定性、多种调度的协同运行和灵活主动的用电特性,须与新一代信息技术、数字技术等进行深度融合,为新型电力系统数字化赋能。继电保护领域也须紧跟新型电力系统的发展,研究以“数字孪生”为代表的新兴技术,探索学习保护、研究保护、管理保护新的技术路径,以应对新型电力系统给继电保护带来的挑战,促进继电保护领域的深度数字化转型。

鉴于此,本文结合数字孪生的内涵和继电保护的的实际应用需求,总结了继电保护数字孪生应具备的特征,在此基础上,提出了一种继电保护数字孪生系统的典型架构,并分析其实现的关键技术,最后挖掘了继电保护数字孪生的潜在应用价值。

## 1 数字孪生概述

### 1.1 数字孪生的内涵及定义

文献[6]于2003年提出了数字化概念模型:“与物理模型等价的虚拟数字化表达”。该模型从概念上具备虚拟空间、物理空间以及两者的接口这三个要

素,但受制于当时的技术水平,数字孪生仅停留在概念阶段。直到2010年,考虑到航空航天领域中航天器工作环境的特殊性及其生产成本高昂等问题,美国NASA和Air Force相继开始了航空航天领域中数字孪生的研究。近些年,得益于产业信息化和数字化进程的飞跃式发展,数字孪生的相关研究呈指数级增长,被广泛应用于智能制造、建筑建设、能源电力和城市管理等领域<sup>[7-9]</sup>,支撑产品方案验证、设备性能分析以及场景三维可视化等。

由于研究的物理对象多样,很难统一给出数字孪生的唯一定义。目前被广泛接受的定义为:“数字孪生充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相应实体装备的全生命周期过程”<sup>[10]</sup>。

作为物理实体在虚拟空间的映射,数字孪生的首要特征是与物理实体的运行规律和内在机理保持一致。关于数字孪生的其他特征,虽然不同学者之间的描述不尽相同,但都暗含数字孪生体能够与物理实体进行实时数据交互,并通过统一标准化实现孪生体之间的数据共享,能够独立于物理实体。通过对其进行反演、前推、预测等操作,能够为物理实体的优化运行提供建设性指导的理念<sup>[10-11]</sup>。需要注意的是,孪生体与物理实体之间交互的实时性和频率取决于物理实体对象的特点和应用需求<sup>[12]</sup>,比如在对电力系统进行规划时,电力系统的网架结构在很长一段时间内保持不变,那么就没必要对系统拓扑结构和参数进行频繁的实时交互。

### 1.2 数字孪生的应用技术架构

文献[13]在数字孪生车间的研究中,提出了包含物理实体、虚拟实体、数据、服务以及连接交互的数字孪生五维模型。基于该五维模型,不同学者针对输变电设备状态评估、能源互联网、电力装备等领域的实际应用需求,提出了数字孪生在各领域的应用技术架构<sup>[14-16]</sup>,如表1所示。

以输变电设备状态评估为例,其技术架构分为五层,分别是物理层、感知层、数据层、模型层和应用层,其中物理层主要指现场实际运行的输变电设备,对应五维模型中的物理实体;感知层主要借助现场安装的各类传感装置全面感知设备运行数据,对应五维模型中物理实体和虚拟实体间的数据交互;数据层主要依据各类算法进行数据清洗、最优数据获取等操作,对应五维模型中的数据;模型层则凭借海量数据的优势和对数据的分析挖掘,构建能表征数据量与状态量之间关系的输变电设备状态评估模型,对应五维模型中的虚拟实体;应用层

主要指所构建的状态评估模型的具体业务应用，对应五维模型中的服务。

能源互联网领域依据其自身的各项业务环节，将五维模型中的数据和虚拟实体合并至平台层，同

时负责数据管理和模型构建功能；电力装备领域则以设备全生命周期过程为指导，将五维模型中的数据和连接交互合并至通信层，同时实现数据管理和传输交互功能。

表 1 数字孪生技术架构对比

Table 1 Architecture comparison of digital twin technology

数字孪生应用领域	技术架构组成				
输变电设备	物理层	感知层	数据层	模型层	应用层
能源互联网	感知层	网络层	平台层		应用层
电力装备	物理层	通信层		虚拟层	应用层

由表 1 可以看到，虽然不同学者提出的数字孪生应用技术架构有所不同，但都包括数据感知与获取、数据处理及实时交互、建模仿真和实际功能应用这几大模块。要实现完整的数字孪生，需从与这几大模块紧密相关的技术层面着手进行研究。

## 2 继电保护数字孪生概述

### 2.1 继电保护数字孪生相关术语定义

现有研究中未明确给出继电保护数字孪生相关的定义，本文参考数字孪生的内涵及特征，结合继电保护领域的实际应用需求，认为继电保护数字孪生应能实现对真实继电保护设备的功能替代，同时

又能与其进行实时数据交互，为此定义了以下继电保护数字孪生相关术语。

#### 1) 继电保护数字孪生模型

继电保护数字孪生模型指通过仿真技术、数据感知、混合建模、虚拟现实等技术手段构建而成的实际继电保护装置的数字化实体，包括保护原理模型、外特性模型等。

#### 2) 继电保护数字孪生系统

继电保护数字孪生系统指继电保护数字孪生模型和支撑该模型进行继电保护逻辑计算和与外部设备进行数据交互的元件的总称。

继电保护数字孪生的示意图如图 1 所示。

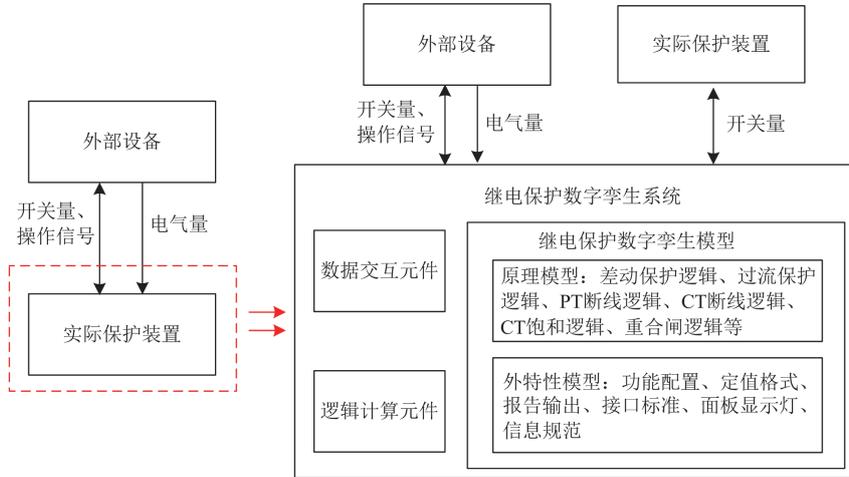


图 1 继电保护数字孪生示意图

Fig. 1 Schematic diagram of relay protection digital twin

### 2.2 继电保护数字孪生的期望特征

基于图 1，对继电保护数字孪生应具备的特征归纳如下。

#### 1) 一致性

一致性指继电保护数字孪生系统的功能配置、定值格式、报告输出、接口标准、信息规范和动作行为等应与实际的继电保护装置一致。考虑到实际

继电保护装置的物理特性，如低通滤波特性、受温度影响特性、A/D 特性等，数字化手段难以模拟，为此仅要求继电保护数字孪生系统的功能和外特性与实际继电保护装置一致即可。

#### 2) 互动性

互动性指继电保护数字孪生系统应能通过物理信号接口或通信接口与其他继电保护数字孪生系

统、实际电力设备和仿真系统等进行实时数据交互。

### 3) 透明性

透明性指继电保护数字孪生系统的内部逻辑、站控层和过程层应透明可视化。该特征主要考虑到封装模式对于人员培训、保护调试以及保护动作过程分析等非常不利, 因此要求继电保护数字孪生系统在采样、数据处理、逻辑判别和动作出口等各个环节的逻辑程序和运行结果均可以查看和监视。

### 4) 共享性

共享性指继电保护数字孪生系统应支持通过标准化的接口嵌入不同保护厂家开发的中间元件或保护元件, 实现平台共享。该特征主要是考虑到继电保护装置种类繁多, 不可能依靠单独的几个厂家构建所有保护装置的数字孪生系统, 必然需要所有保护厂家的参与配合, 然而不同厂家在搭建模型时由于所用建模方式、建模软件的不同, 使得模型不统一, 为此继电保护数字孪生系统应支持不同保护厂家开发的中间元件或保护元件嵌入, 使其能够在同一平台上运行。

## 2.3 继电保护数字孪生系统的典型架构

基于上述继电保护数字孪生的四点特征, 提出如图 2 所示的继电保护数字孪生系统的典型架构, 该架构包含数字孪生计算单元、数字孪生接口和数字孪生系统后台 3 部分。

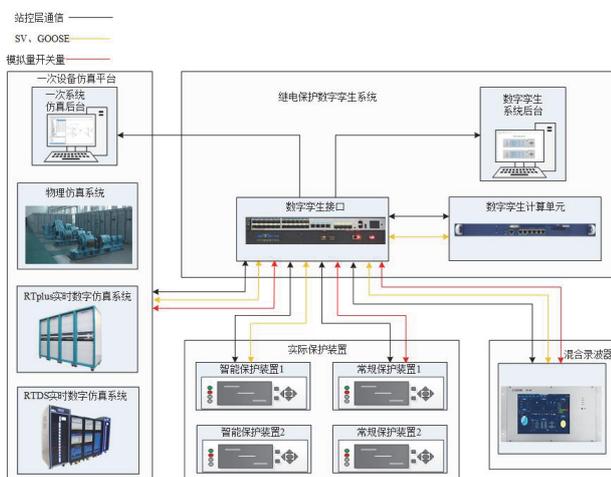


图 2 继电保护数字孪生系统典型架构

Fig. 2 Typical architecture of relay protection digital twin system

数字孪生计算单元主要负责继电保护多个数字孪生模型的逻辑实时计算, 具备在单个仿真步长时间内完成逻辑单步计算、接口读写等操作的能力, 其核心部件可采用中央处理器(CPU)、数字信号处理器(DSP)、现场可编程门阵列(FPGA)等运算能力强的处理器。

数字孪生接口主要负责与其他继电保护数字孪生系统、实际电力设备及仿真系统进行输入/输出数据交互, 包括物理信号接口和通信接口。其中物理信号接口主要负责模拟量、开关量信号的交互, 通信接口则负责 SV、GOOSE、MMS 等信息的交互。

数字孪生系统后台主要负责继电保护数字孪生模型的搭建和人机交互, 如: 基于被孪生的实际继电保护装置进行可视化保护数字孪生模型的搭建; 具备继电保护数字孪生系统与实际物理装置之间输入/输出数据交互的接口信号定义和通道关联功能, 可采集接口信号来源、信号类型、互感器变比、接口板卡及通道编号等信息, 支持对孪生系统的站控层及过程层接口参数的定义功能, 可根据接口参数生成装置 ICD 文件模型; 具备查看继电保护数字孪生系统的保护事件、告警信号、保护遥测、保护遥信、保护功能状态、保护功能闭锁等信息的功能; 具备修改继电保护数字孪生系统的保护装置参数、保护定值及保护软压板的功能; 具备继电保护数字孪生系统的保护录波调取功能。

## 2.4 继电保护数字孪生的雏形应用

现阶段继电保护数字孪生的相关研究主要有: 针对交流保护, 文献[17]提出以保护对象的数学模型为研究对象, 通过对其进行动态状态估计进行保护动作行为判别; 随后, 文献[18]将该思想用于直流线路保护, 通过对比实测电气量与孪生模型状态估计量之间的差异, 进行保护动作行为判别, 仿真结果表明该方法可有效缓解直流保护中的“四性”矛盾。

除了上述保护原理方面的应用外, 在交直流混联大系统的仿真实验研究、直流控制保护关键参数的校核及离线调试方面, 也有一些数字孪生的雏形应用, 具体如下。

1) 在开展包含直流输电系统电网的试验研究中, 考虑到采用实际的控制保护屏柜成本高(约 200~400 面)、接线复杂、效率低等问题, 文献[19]提出一种工程镜像仿真方法, 借助 SIMADYND 和 RTDS 平台, 搭建了与实际直流控制保护功能、外特性一致的仿真模块, 与 RTDS 的一次系统构成完整的交直流闭环实时仿真试验环境, 实现了特高压直流输电控制保护相关的数百面屏柜的精确数字化仿真, 但该系统无法与其他厂家的控保系统进行数据交互, 无法在该平台接入其他厂家的控保逻辑。

2) 考虑到直流定值的整定, 有许多是根据实际现场的工程经验整定的, 因此安徽古泉换流站数字孪生项目借助现场实际参数, 搭建了可在 PSCAD 平台运行的高精度古泉换流站一二次系统模型, 通

过对该模型中一些典型、极端运行工况进行仿真，实现控制保护等关键参数定值的校核，以指导优化现场实际运行，但该模型中二次系统的核心控保程序由厂家提供，被封装在最底层，逻辑的透明性不足，且模型处于离线运行状态。

此外，一些继电保护厂家在继电保护功能模块的离线仿真与调试、保护结果输出及展示、虚拟液晶等方面也进行了相关技术研究。

可以看到，现有继电保护领域数字孪生的应用多偏向于满足具体的场景需求，在数据实时交互能力、保护逻辑透明性、接口标准化、人机交互等方面普遍存在不足，仍处于数字孪生的初步探索阶段。

### 3 继电保护数字孪生构建关键技术

针对 2.3 节提出的继电保护数字孪生系统的典型架构，基于已有的技术基础，未来继电保护数字孪生构建的关键技术主要有继电保护数字孪生系统实时运行技术、IO 接口技术、原理建模技术、接口建模技术和人机交互技术。为保证建模的规范性和通用性，需对继电保护数字孪生系统变量命名规则技术进行研究。此外，继电保护数字孪生系统的运行离不开与一次仿真系统的交互，故还需进行新型电力系统背景下一次系统的建模技术研究。

#### 3.1 继电保护数字孪生系统实时运行技术

继电保护数字孪生系统的实时仿真运行依赖计算单元的实时性，为保证计算单元内计算步长的稳定和不同计算步长下模型实际计算时间的稳定，需针对实时操作系统和计算时间抖动问题加以研究。文献[20]基于开源的 Linux 操作系统，构造了一个 RT-Linux 硬实时内核，使应用的实时部分作为实时进程直接运行在这个硬实时内核之上，而非实时部分运行在常规的 Linux 核心之上，该常规 Linux 核心也能被 RT-Linux 硬实时内核所调度；对于计算时间抖动问题，提出了多核任务协调机制，即通过对 CPU 非模型运算核的运算负载的控制来实现模型运算核抖动时间的缩减。

为保证单个数字孪生系统可同时运行多套典型的继电保护数字孪生模型，还需对 CPU 多核并行计算技术、核与核之间的通信技术进行研究。

#### 3.2 继电保护数字孪生系统 IO 接口技术

继电保护数字孪生系统需要与一次仿真系统、实际保护装置、站控层通信子站和录波器等进行实时数据交互，数据交互示意图如图 3 所示。

继电保护数字孪生系统与一次仿真系统之间主要进行模拟量、开关量、SV 和 GOOSE 等信息的传输，其中继电保护数字孪生系统采集一次系统的 SV

报文或模拟量等信息进行保护逻辑计算，断路器位置信号、跳闸信号等则通过 GOOSE 报文或开关量的方式在一二次系统间进行双向交互；继电保护数字孪生系统与实际保护装置之间主要进行跳闸信号、启动失灵信号等信息的传输，通过 GOOSE 报文或开关量方式实现；录波器通过 GOOSE 报文或开关量方式获取继电保护数字孪生系统的动作信息，通过 MMS 协议实现对信息的获取和控制；站控层通信子站亦是通过对 MMS 协议实现对继电保护数字孪生系统信息的获取和控制。

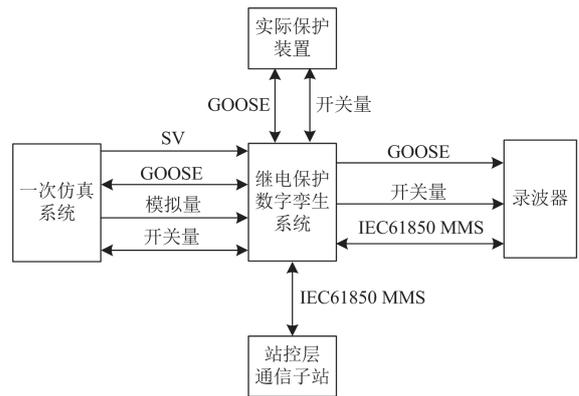


图 3 继电保护数字孪生系统与外部设备数据交互示意图

Fig. 3 Data interaction diagram between relay protection digital twin system and external equipment

为满足以上信号交互需求，继电保护数字孪生系统应同时具备常规接口和数字接口能力，为此需研究继电保护数字孪生系统的常规接口技术，其接口功能、转换精度和延时应符合孪生场景要求，且接口输入/输出通道数量应能配置及扩充；还需研究继电保护数字孪生系统的智能接口技术，应采用 IEC61850-8-1、IEC61850-9-2、IEC60870-5-104、GB/T18657、GB/T22239、GB/T26865.2、DL/T860 等电力系统常用通信标准与规约，通信带宽、通道延时应符合孪生场景要求，通信接口应采用模块化设计，通道数量应能配置和扩充。

#### 3.3 继电保护数字孪生系统原理建模技术

继电保护数字孪生系统原理建模方法大致可分为基于模型驱动和基于数据驱动两类。

当采用模型驱动建模方法时，重点在于装置运行机理的数字化复现。比如在继电保护装置模型的数据处理方面，文献[21]提出一种改进的全波傅氏算法来消除保护运算时由故障信号中衰减直流分量带来的计算误差，使其更贴近实际继电保护装置的保护算法。在继电保护装置的功能逻辑复现方面，常用手段大致可分为代码实现和图形化建模方式实

现两种: 1) 对于保护厂家, 其自身就有各种保护的源代码, 通过对其稍作处理, 并加以封装, 就可以实现保护功能在虚拟空间的复现, 该方法能最大程度还原实际保护装置的功能, 不足之处是保护逻辑不够直观, 可视性差, 如文献[22]借助 C++, 通过对自定义的输入、时间、脉冲、输出、中间等虚拟继电器进行一系列逻辑操作, 实现不同保护功能的复现; 2) 对于没有保护源代码的继保从业人员, 也可按照国网九统一标准和厂家说明书, 利用图形化方式搭建相应的保护控制逻辑以满足自身需要, 如文献[23]借助 Matlab/Simulink 平台搭建了图形化继电保护逻辑, 再利用特定的图形化程序代码生成技术使其在 RTDS 中运行, 以满足仿真试验的测试要求。由于保护逻辑中的一些经验问题、细节处理问题在厂家说明书中不会体现, 因此该方式搭建出来的保护逻辑与实际继电保护装置有细微差异, 适用于部分对保护逻辑要求不高的场合。

当采用数据驱动建模方法时, 重点在于运用大数据、人工智能、机器学习等手段, 拟合输入输出之间的关系, 从而构造与实际继电保护装置动作行为一致的数学模型。如文献[24]针对潮流计算问题, 将潮流方程视为已知一些参数求解另一些参数的过程, 从而不依赖网络拓扑结构, 借助深度学习等手段实现系统潮流计算, 将其与利用潮流方程计算得出的结果进行对比分析, 验证了数据驱动建模计算潮流的可靠性。

与基于模型驱动的建模方法相比, 数据驱动建模方法略去了对实际继电保护装置复杂运行机理的研究过程, 其建立的是黑箱模型; 随着训练样本的不断增多, 模型可以进一步完善, 但由于其对数据的依赖程度较高, 易受不良数据的影响。为此后续还需通过总结继电保护原理的程序实现方式, 研究数字孪生体的建模方式, 包括图形化、层级化、混合建模等技术, 使继电保护数字孪生体满足透明度、兼容性和易维护等要求。

### 3.4 继电保护数字孪生系统接口建模技术

考虑到继电保护数字孪生模型的接口包括后台输入/输出接口、IO 输入/输出接口、过程层 SV/GOOSE 数据、开入开出数据等信息, 为此可通过对不同接口定义不同的大类, 同一大类接口采用定义不同数据类型的方式来定义接口的建模规则, 方便在生成代码时对接口类型进行区分, 如文献[25]提出的变电站二次设备及回路的数字化建模方案可作为一种参考。

### 3.5 继电保护数字孪生系统变量命名规则技术

完整的继电保护模型中间变量数量众多, 为此,

必须标准化中间变量的命名方式, 并且符合继保行业的使用习惯。例如在采用基础元件库、中间元件库、保护元件库三层结构进行继电保护原理建模时, 可首先穷举建模过程中可能用到的所有基础变量, 并为该变量指定缩略语, 如动作 Start 的缩略语为 Str、定值 Value 的缩略语为 Val; 然后通过基础变量的组合实现中间元件属性的命名, 如动作定值 Start Value 的缩略语为 StrVal; 最后穷举所有中间元件, 并为其指定缩略语, 如过流保护 AC time overcurrent protection 的缩略语为 PTOC、距离保护 distance protection 的缩略语为 PDIS。注意变量在不同元件之间传递时可采用“中间元件缩略语\_属性”的命名方式, 如过流保护动作定值的命名即为 PTOC\_StrVal、距离保护动作定值的命名即为 PDIS\_StrVal。

### 3.6 继电保护数字孪生系统人机交互技术

为模拟传统继电保护的人机界面, 实现对继电保护数字孪生系统信息的获取和控制, 需进行保护界面模拟及控制研究。此外, 还需研究: 1) 数字孪生模型文件的自动生成技术, 通过读取生成代码中的接口参数信息自动生成 ICD 文件, 且生成的 ICD 文件满足现有的 IEC61850 标准, 可与实际继电保护装置进行配置; 2) 虚拟站控层服务技术, 可运行 MMS-Server, 供站控层客户端、录波器、保信子站等连接, 实现在站控层获取继电保护数字孪生系统的信息, 包括读取保护参数、定值、压板、遥测、遥信, 实时上送功能状态、保护功能闭锁状态、保护事件、保护告警信号、遥测及遥信等; 3) 数字孪生系统的接口配置技术, 可实现模型中的 I/O 信号和硬件通道之间的对应。

### 3.7 新型电力系统背景下的一次系统建模技术

新型电力系统背景下, 一次系统建模更多关注的是对风光储荷及电力电子器件等的精确建模, 同时为了保证计算效率, 还需对模型进行合理简化。

对于含新能源的发电设备等值建模, 文献[26]针对风机并网特性研究中必不可少的电压源换流器模型, 提出了一种模型与数据混合驱动的等效建模方法, 有效克服了模型驱动建模中机理复杂以及数据驱动建模精度低的问题; 文献[27]综合考虑光伏逆变器建模中死区、谐波电压等影响因素, 在诺顿等效电路基础上, 提出一种动态性能良好的逆变器等效模型。

对于新能源场站等值建模, 文献[28]详细总结了风电场的分群原则及相同机型风电场常用的静态和动态等值方法。相较于集中式新能源场站, 分布式新能源场站在网络结构、场站和发电单元出力的不确定性等方面差异较大, 在进行等值建模时, 可

从这几方面着手进行分群指标提取。

对于储能系统等效建模,文献[29]提出的等效电路模型可直接反映电池电化学反应相关参数;文献[30]综合考虑锂电池建模时容量衰减、电流倍率、温度等影响因素,在戴维南等效模型的基础上,提出一种精度更高的改进的储能电池单体模型。

对于负荷等效建模,文献[31]针对传统统计及光伏的配电网广义负荷模型存在的结构复杂、参数辨识困难等问题,提出一种光伏发电和负荷一体化等值模型,该模型中光伏发电系统用多项式等值模型替代,简化模型结构的同时,较好地保留了负荷的动态特性。

在电力电子器件等效建模方面,针对理想开关模型不能准确反映其瞬态特征的不足,文献[32]提出了非准静态的 Hefner 模型,该模型精度高,但过于复杂;文献[33]借助分段线性化手段,提出了折线模型,该模型不存在计算慢、收敛难等问题,但精度稍差;文献[34]从研究对象的关注过程着手,提出离散状态事件驱动方法,依据关注对象的不同选用不同时间尺度的开关模型,实现效果最优。

综上,可以看到,在继电保护数字孪生构建关键技术中,继电保护数字孪生系统原理建模和一次系统建模等方面已有一些相关基础研究,再加之继电保护装置现阶段已满足九统一技术要求,标准化程度高,可为继电保护数字孪生系统的构建及数据接口标准化工作打下基础,且实时数字仿真技术随着芯片的进步得到快速发展,多核并行计算、多硬件单元并行计算、多步长协同计算等技术能够对更大电网、更多新能源元素进行实时仿真计算,快速发展的仿真计算能力也为开展大规模、精细化继电保护孪生提供支撑,未来有望在上述继电保护数字孪生关键技术方面实现突破,进一步构建可替代真实保护的继电保护数字孪生系统,从而推动继电保护整个行业的发展。

#### 4 继电保护数字孪生技术应用展望

借助继电保护数字孪生构建关键技术,可搭建一二次系统实时闭环仿真试验平台,继而在保护装置系统级测试、保护新原理开发、继保从业人员专业技能培训、智能变电站运维辅助决策以及交直流保护安全稳定运行等方面发挥潜在的应用价值。

##### 1) 保护装置系统级测试

现有实验室在开展 500 kV 及以上继电保护入网测试时,采用整站测试模式。为最大程度接近被测保护装置在现场的实际运行环境,需要多台其他类型或厂家的保护装置与之相配合,测试环境搭建

较为繁琐、费时费力。借助前述继电保护数字孪生关键技术,可使各个厂家搭建的继电保护数字孪生系统在同一平台运行,并通过数字孪生接口实现互通信、互操作,从而用继电保护数字孪生系统来替代系统级测试时进行配合的实际保护装置,在满足电网研究和新一代变电站定值整定及运行策略相关工作需求的同时,简化了测试环境的搭建过程。

##### 2) 保护新原理开发

借助该平台,保护厂家只需对继电保护数字孪生系统进行保护功能、性能、数据交互形式等方面的测试,就可实现方案验证,大大节省了研发周期,有利于推进自主可控的新一代继电保护设备的技术迭代升级。同时,继电保护专业学者及从业人员也可借助该透明化的继电保护逻辑开发及验证平台,进行基于孪生的保护新原理研究。

##### 3) 继保从业人员专业技能培训

传统继电保护培训以理论知识辅以现场实操的方式存在明显弊端,如理论知识主要以原理公式为主,与实际的保护逻辑相差较大;对于被培训者来说,实际的保护装置就像一个黑匣子,难以深入了解其工作机理;难以实现二次系统与一次系统的交互,缺乏与实际电网生产环节的真实性和一致性等。借助上述一二次系统实时闭环仿真试验平台,可为被培训者提供真实直观的学习资料,支撑电力高校、电科院及电力二次设备生产企业开展二次系统相关试验培训,继而实现人员专业技能的强化。

##### 4) 智能变电站运维辅助决策

通过实时数字仿真器搭建与变电站现场一致的一次系统模型,利用现场继电保护装置的数字孪生系统代替实际的保护装置接入仿真系统,可构建与现场一致的变电站一二次系统闭环测试环境。借助该测试环境,可开展一些较难模拟工况的故障试验,如采样异常等,有助于发现系统中的潜在运行风险;可对二次设备数字孪生系统进行不同工况、不同缺陷/故障的多物理场耦合仿真虚拟试验,为不同工况设备状态变化提供重构和复现的手段,也为设备缺陷/故障的智能查找、诊断及预警提供案例样本和分析依据;可兼顾电网供电可靠性和设备投资成本,对孪生系统中线路、母线、变压器等保护装置的安装位置及数量进行科学、合理的优化配置,为变电站的扩建、改造提供装置配置层面的指导方案;可对孪生系统进行继电保护定值整定、运行策略等方面的测试,分析保护整定值、运行策略等设置的合理性。继而为变电站二次系统中变电站改扩建、继电保护定值整定、设备功能配置优化、设备故障隐患诊断及预警和现场反措等工作提供研究平台支

撑, 进一步提升系统的运行可靠性。

### 5) 交直流保护安全稳定运行

借助该平台, 一方面, 可结合新能源交直流电网一次系统、控保系统关键电气量及区域气象信息等数据, 识别影响交直流保护系统性能的关键信息, 进行考虑极端天气与故障情景的新能源交直流线路故障预警及故障计算方法研究; 另一方面, 可研究时域、频域故障暂态分量相结合的新能源交直流输电线路保护原理, 提出能利用数字孪生环境进行推演预测, 从而根据运行态势切换保护定值或功能区的新能源交直流电网智能保护方法。此外, 还可研究利用该平台的虚实映射能力, 发现极端气象条件、交直流相互作用等复杂场景下的故障演化机理, 提出具有在数字孪生环境中学习、校核和改进能力的继电保护整定方法, 提升复杂态势下新能源交直流电力系统安全稳定运行能力、保护专业的决策能力和运维水平。

## 5 结论

新型电力系统源、网、荷的变化使得现有的继电保护系统面临重大挑战, 而现有的仿真手段在应对这些挑战时略显不足, 数字孪生作为一种新兴的数字化技术手段, 在继电保护领域应用潜力巨大。为此, 本文结合数字孪生的内涵和继电保护的的实际应用需求, 对继电保护数字孪生模型和继电保护数字孪生系统进行定义, 并认为继电保护数字孪生应具备一致性、互动性、透明性和共享性。基于该原则, 提出了一种包含数字孪生计算单元、数字孪生接口和数字孪生系统后台的继电保护数字孪生系统典型架构。针对该架构, 考虑到现有继电保护数字孪生研究在数据实时交互能力、保护逻辑透明性和接口标准化等方面的不足, 分析了继电保护数字孪生实现所涉及的关键技术, 并挖掘了其在保护装置系统级测试、保护新原理开发、继保从业人员专业技能培训、智能变电站运维辅助决策以及交直流保护安全稳定运行等方面的潜在应用价值, 以期能为后续数字孪生技术在继电保护领域的进一步研究和应用提供一定的参考。

## 参考文献

- [1] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37-54.
- [2] 董新洲, 汤涌, 卜广全, 等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3119.
- [3] DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.
- [3] 仲伟, 王仲, 陶保震, 等. 新一代自主可控保护装置软硬件平台技术[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 135-140.
- [4] ZHONG Wei, WANG Zhong, TAO Baozhen, et al. Software and hardware platform technology of an independent controllable relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 135-140.
- [4] 李肖博, 于杨, 姚浩, 等. 新一代智能变电站采控装置[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 85-92.
- [4] LI Xiaobo, YU Yang, YAO Hao, et al. Sample-control-device of smart substation[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 85-92.
- [5] 袁小明, 张美清, 迟永宁, 等. 电力电子化电力系统动态问题的基本挑战和技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1904-1917.
- [5] YUAN Xiaoming, ZHANG Meiqing, CHI Yongning, et al. Basic challenges of and technical roadmap to power-electronized power system dynamics issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1904-1917.
- [6] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[J]. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, 2017: 85-113.
- [7] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
- [7] TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.
- [8] 杜晓东, 曾四鸣, 刘科研, 等. 基于云模型的配电网运行画像数字孪生构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 104-113.
- [8] DU Xiaodong, ZENG Siming, LIU Keyan, et al. Construction of portraits for a distribution network with digital twins based on a cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 104-113.
- [9] 陈晨, 宋晓帆, 董平先, 等. 基于数字孪生的变电站逻辑模型移交深化应用[J]. 现代电力, 2023, 40(1): 108-116.
- [9] CHEN Chen, SONG Xiaofan, DONG Pingxian, et al. Deep application of substation logic model handover based on digital twin[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(1): 108-116.

- [10] 沈沉, 曹仟妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概念, 特点及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 487-499.  
SHEN Chen, CAO Qianni, JIA Mengshuo, et al. Concepts, characteristics and prospects of application of digital twin in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 487-499.
- [11] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 18-24, 40.  
BAI Hao, ZHOU Changcheng, YUAN Zhiyong, et al. Prospect and thinking of digital power grid based on digital twin[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(8): 18-24, 40.
- [12] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 1-13.  
SHEN Chen, JIA Mengshuo, CHEN Ying, et al. Digital twin of the energy internet and its application[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1-13.
- [13] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.  
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [14] 张晓刚, 王策, 龙娜, 等. 数字孪生技术架构及在输变电设备运维中的应用[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(5): 507-512.  
ZHANG Xiaogang, WANG Ce, LONG Na, et al. Digital twin technology architecture and its application in operation and maintenance of power transmission and transformation equipment[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2022, 38(5): 507-512.
- [15] 邵天睿, 尚涛, 李显旭. 数字孪生电网安全分析[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(8): 60-65.  
SHAO Tianrui, SHANG Tao, LI Xianxu. Security analysis of digital twin of power systems[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(8): 60-65.
- [16] 张露, 鲁非, 刘睿, 等. 新型电力系统背景下电力装备数字孪生技术架构及应用展望[J]. 湖北电力, 2022, 46(3): 36-44.  
ZHANG Lu, LU Fei, LIU Rui, et al. Framework and application of digital twin technology in electric equipment under the background of new power system[J]. Hubei Electric Power, 2022, 46(3): 36-44.
- [17] MELIPOULOS A P S, COKKINIDES G J, MYRDA P, et al. Dynamic state estimation-based protection: status and promise[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 320-330.
- [18] 李猛, 聂铭, 和敬涵, 等. 基于数字孪生的柔性直流电网纵联保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1773-1783.  
LI Meng, NIE Ming, HE Jinghan, et al. Pilot protection of flexible DC grid based on digital twin[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1773-1783.
- [19] 庄良文, 李亚萍, 周鹏鹏, 等. 直流输电控制与保护系统的工程镜像仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 109-115.  
ZHUANG Liangwen, LI Yaping, ZHOU Pengpeng, et al. Engineering mirror simulation method of control and protection system in DC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 109-115.
- [20] 李亚萍, 李志勇, 周鹏鹏, 等. 新型实时数字仿真继电保护测试系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 90-95.  
LI Yaping, LI Zhiyong, ZHOU Pengpeng, et al. Research of relay protection testing system based on new type real-time digital simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 90-95.
- [21] 刘亚丽, 周昀, 王少荣. 配电网继电保护一二次联合数字仿真系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 124-129.  
LIU Yali, ZHOU Yun, WANG Shaorong. Research on the primary and secondary combined digital simulation system of distribution network relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 124-129.
- [22] 吴国昉, 宋新立, 汤涌, 等. 电力系统动态仿真中的继电保护建模[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 64-70.  
WU Guoyang, SONG Xinli, TANG Yong, et al. Protection relay modeling for dynamic simulation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 64-70.
- [23] 周鹏鹏, 李书琰, 李志勇, 等. 基于 IEC61850 的数字孪生新型仿真试验平台的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 120-124.  
ZHOU Pengpeng, LI Shuyan, LI Zhiyong, et al. Research on digital new simulation test platform based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 120-124.
- [24] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009-2019.  
HE Xing, AI Qian, ZHU Tianyi, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009-2019.
- [25] 刘千宽, 刘宏君, 丁晓兵, 等. 服务于变电站数字化设

- 计的二次设备建模技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 166-172.
- LIU Qiankuan, LIU Hongjun, DING Xiaobing, et al. Research on secondary equipment modeling technology for substation digital design[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 166-172.
- [26] 陈剑, 王海风. 模型-数据混合驱动直驱风机 VSC 等效建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 10-17.
- CHEN Jian, WANG Haifeng. A model-data hybrid driven method of VSC equivalent modeling of a permanent magnetic synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 10-17.
- [27] 沈阳武, 刘佳润, 张斌, 等. 光伏逆变器动态谐波等效建模及其影响因素研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 126-132.
- SHEN Yangwu, LIU Jiarun, ZHANG Bin, et al. Research on dynamic harmonic equivalent modeling and influencing factors of photovoltaic inverter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8): 126-132.
- [28] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
- ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [29] BERRUETA A, URTASUN A, URSÚA A, et al. A comprehensive model for lithium-ion batteries: from the physical principles to an electrical model[J]. Energy, 2018, 144: 286-300.
- [30] 李建林, 郭兆东, 曾伟, 等. 面向调频的锂电池储能建模及仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 33-42.
- LI Jianlin, GUO Zhaodong, ZENG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of lithium battery energy storage oriented to frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 33-42.
- [31] 吴峰, 戴小妹. 计及高渗透率光伏的配电网广义负荷一体化等值建模[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 1-9, 46.
- WU Feng, DAI Xiaomei. Integrated equivalent modeling for generalized loads of distribution network considering high-penetration photovoltaic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 1-9, 46.
- [32] MITTER C S, HEFNER A R, CHEN D Y, et al. Insulated gate bipolar transistor (IGBT) modeling using IG-SPICE[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(1): 24-33.
- [33] 施博辰, 赵争鸣, 蒋焯, 等. 功率开关器件多时间尺度瞬态模型(I)—开关特性与瞬态建模[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 16-24.
- SHI Bochen, ZHAO Zhengming, JIANG Ye, et al. Multi-time scale transient models for power semiconductor devices (part I: switching characteristics and transient modeling)[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 16-24.
- [34] 蒋焯, 赵争鸣, 施博辰, 等. 功率开关器件多时间尺度瞬态模型(II)—应用分析与模型互联[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 25-32.
- JIANG Ye, ZHAO Zhengming, SHI Bochen, et al. Multi-time scale transient models for power semiconductor devices (part II: applications analysis and model connection)[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 25-32.

收稿日期: 2022-10-24; 修回日期: 2023-03-27

作者简介:

章耀耀(1964—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为继电保护; E-mail: zhbox@139.com

侯勇(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 2672921978@qq.com

叶海(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: yeahhi100@aliyun.com

(编辑 许威)