

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241561

基于硬件在环的安全稳定控制系统分布式 检测平台研究与开发

檀俊^{1,2}, 叶小晖^{1,2}, 朱旭凯³, 梁纪峰⁴, 王蕾⁴

(1. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学), 河北 秦皇岛 066004; 3. 国电众智电力技术有限公司, 北京 100192; 4. 国网河北省电力有限公司 电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 安全稳定控制系统保障电力系统的安全稳定运行。现有稳控系统功能测试在离线环境下的集中式开环测试无法有效应对复杂动态情况, 且在实时性和适应性方面存在一定局限。为此, 提出一种基于硬件在环的分布式在线测试方法, 实现非实时仿真工具下的在线测试, 旨在解决以往测试方法在实时性和适应性方面的不足。首先, 研究了分布式结构下的同步机制、信息互访和结果评价等关键技术。接着针对测试需求, 设计了适用于动态测试的事件识别算法。然后, 开发支持多轮闭环迭代的检测平台来提供全面的测试结果, 以验证稳控系统的有效性。最后, 以某送出区域电网稳控系统为例, 进行试点应用, 通过仿真测试和实际工程验证, 证明了所提测试方法的性能。

关键词: 安全稳定控制系统; 分布式测试; 非实时仿真; 在线测试; 事件识别

Research and development of a distributed detection platform for security and stability control systems based on hardware-in-the-loop

TAN Jun^{1,2}, YE Xiaohui^{1,2}, ZHU Xukai³, LIANG Jifeng⁴, WANG Leibo⁴

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Key Laboratory of Power Electronics for Energy Conservation and Drive Control of Hebei Province (Yanshan University), Qinhuangdao 066004, China; 3. Guodian Zhongzhi Electric Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China; 4. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Security and stability control systems ensure the secure operation of power systems. Existing function tests of stability control systems are typically performed in offline environment using centralized open-loop testing, which cannot effectively address complex dynamic conditions and suffers from limitations in real-time performance and adaptability. To overcome these shortcomings, this paper presents a distributed online testing method based on hardware-in-the-loop, enabling online testing with non-real-time simulation tools. First, key technologies such as synchronization, information exchange, and result evaluation in a distributed system are studied. Then, an event identification algorithm suitable for dynamic testing is designed according to testing requirements. Next, a multi-round closed-loop iteration testing platform is developed to provide comprehensive testing results and verify the effectiveness of the stability control systems. Finally, a pilot application of the proposed method is conducted on the stability control system of a sending-end power grid. Simulation tests and engineering validation confirm the performance of the proposed testing method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52407140).

Key words: security and stability control system; distributed testing; non-real-time simulation; online testing; event identification

0 引言

作为电力网络的第二道防线, 安全稳定控制系

统对于整个电力网络的稳定运行至关重要^[1-4], 它能够在电力系统发生故障时快速响应, 通过切机、切负荷等措施, 防止事故的扩大, 保障电网的安全稳定运行。在实际电网运行中, 很少出现严重的电力事故, 安全稳定控制系统往往不会启动, 然而从安

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52407140)

全性的角度出发, 定期检测安全稳定控制系统的功能是必要的, 这就需要一种高效、便捷且全面的测试方法来确保安全稳定控制系统的可靠性和有效性。随着新能源渗透率的持续上升, 电网运行状态的不确定性显著增加, 决策执行过程中的不确定性也随之增强, 新型电力系统安全稳定运行面临着巨大的挑战^[5-6], 对安全稳定控制系统的测试技术也提出了更高的要求。

根据文献[7]所述, 稳控系统(装置)的检验分为4种。1) 出厂验收检验: 对新设备出厂前或软件更换后的设备进行检验; 2) 新安装检验: 对新安装或长期停运后再次投运的设备进行检验; 3) 运行中系统(装置)定期检验: 对运行中的设备进行周期性的全面或部分检验; 4) 运行中系统(装置)补充检验: 对硬件或软件变更、异常或事故后进行检验, 相关检测内容主要包括: 外部检验、绝缘及耐压检验、逆变电源检验、本体功能检验、与其他场站稳控装置的联合检验与调试、通信通道检验、投运检查等。从测试进程上看, 初期研发阶段的测试通常是以模块为单位的测试, 中期成品综合测试的内容主要包括静态模拟实验和动态模拟实验, 之后进行外界环境测试, 主要包括电磁、温度、湿度、机械等方面的测试, 最后完成试运行及实际运行后的异常测试, 主要包括装置自诊断及测试^[8]。

为了全面测试安全稳定装置的功能和验证策略的正确性, 可以采用继电保护测试仪等辅助设备进行动态测试。该方法采用开环测试的方法, 将其作为稳控装置的输入信号源, 配合录波功能进行检测。通常区域稳控系统所涉及的设备较多, 且地理位置分散, 所涉及厂站达上百个之多^[9]。但是这种单体测试方法没有充分考虑到系统耦合, 因而与实际电网的运行工况存在差异, 无法模拟电网在故障时的异常工况, 也就无法准确测试电网发生故障后稳控策略的执行情况, 同时也会出现多个设备厂家共用一台数字化继电保护测试仪的情况^[10], 具有较大的局限性。除此之外, 功能性测试也可以采用硬件在环(hardware-in-the-loop, HIL)方式下的半实物测试, 通过在仿真中测试硬件, 可以在没有真实仿真环境的情况下检测和修复问题, 避免在实际操作中发生严重故障, 还可以设置各种极端的运行条件或故障模式, 帮助测试人员测试在实际系统中难以实现或难以安全实现的各种工况。

根据不同的测试目的和条件, 目前针对安全稳定控制系统(装置)的测试方法主要聚焦于以下3个方面。1) 响应时间: 非实时与实时; 2) 测试结构: 分布式与集中式; 3) 测试环境: 在线与离线等。每

个分类内容的优缺点总结如下: 1) 非实时仿真^[11]复杂性较低, 相较于对硬件和网络性能要求较高的实时仿真^[12-13]更容易实现; 2) 集中式^[14]的测试结构只适用于出厂检验, 即设备安装后无法进行检验, 而分布式结构^[15]灵活性更高, 扩展性更好, 具有更高的系统冗余度; 3) 离线测试环境模拟工况可能与实际场景存在差异, 而在线环境下可以采用系统真实运行数据, 更贴合实际^[16]。

以往测试方法在不同维度上呈现出响应时间、测试结构、仿真方式的组合。在响应时间方面, 实时测试^[17-20]虽然能够模拟电网动态过程并对控制系统进行快速响应测试, 但它需要高昂的硬件支持, 并且对通信网络的实时性要求很高, 这在测试复杂分布式系统时会增加实现难度, 成本较高。此外, 实时测试对测试人员的专业性要求较高, 使得广泛推广存在一定的技术障碍。非实时测试避免了对实时仿真和精确时间同步的需求, 从而减少了对高性能硬件和高带宽通信网络的依赖, 降低了测试系统的整体成本, 并且非实时测试更加灵活, 更适合多场景、多条件的全面测试^[21-22]。在测试结构方面, 集中式测试结构^[19-20]依赖于单一的控制中心, 这种集中管理在实验室环境中效果较好, 但在大规模电网的实际运行环境中, 其适应性和灵活性受到很大限制, 尤其是难以应对广域环境中设备的动态行为和分布式相互作用。分布式测试结构^[21-24]可以使测试系统分布在多个地理位置, 通过分布式节点的协同实现对系统的广域性验证。这种结构特别适合模拟和评估分布式电网环境中各子系统的交互关系, 能够更好地反映系统实际运行中设备间的协调性和依赖性, 同时提升了系统的扩展能力。在测试环境方面, 离线测试^[21-22]虽然在实验室环境下更加安全和可控, 但由于无法模拟设备在实际运行中的复杂动态行为, 测试结果的代表性往往受到限制。在线测试^[17-20]能够更真实地反映系统在运行中的性能, 使得测试结果更具代表性, 有助于在不影响系统稳定运行的前提下捕捉设备和策略在真实工况下的响应和表现。

综上所述, 综合考虑实际测试要求, 本文采用硬件在环方式构建稳控系统的动态测试环境, 采用基于非实时仿真计算结果的分布式在线测试方法, 模拟电网复杂工况下稳控系统的策略执行情况, 对已投运的稳控系统的功能和策略进行有效性验证。

1 检测平台硬件设计

1.1 总体结构

分布式测试系统由非实时仿真系统、接口子系

统、被测装置构成。非实时仿真系统部署在个人或测试主机中，采用中国电力科学研究院开发的全数字电力系统仿真系统(advanced digital power system simulator, ADPSS)^[25-26]中的电磁暂态仿真程序ETSDAC作为主要仿真工具。参考实际电网中的区

域稳控系统的信息，通过信息数字化建模，运用信号转换装置获取电网的实际运行状态，涵盖电磁暂态模型、元件参数、连接拓扑等关键要素。稳控系统检测平台总体结构如图1所示。

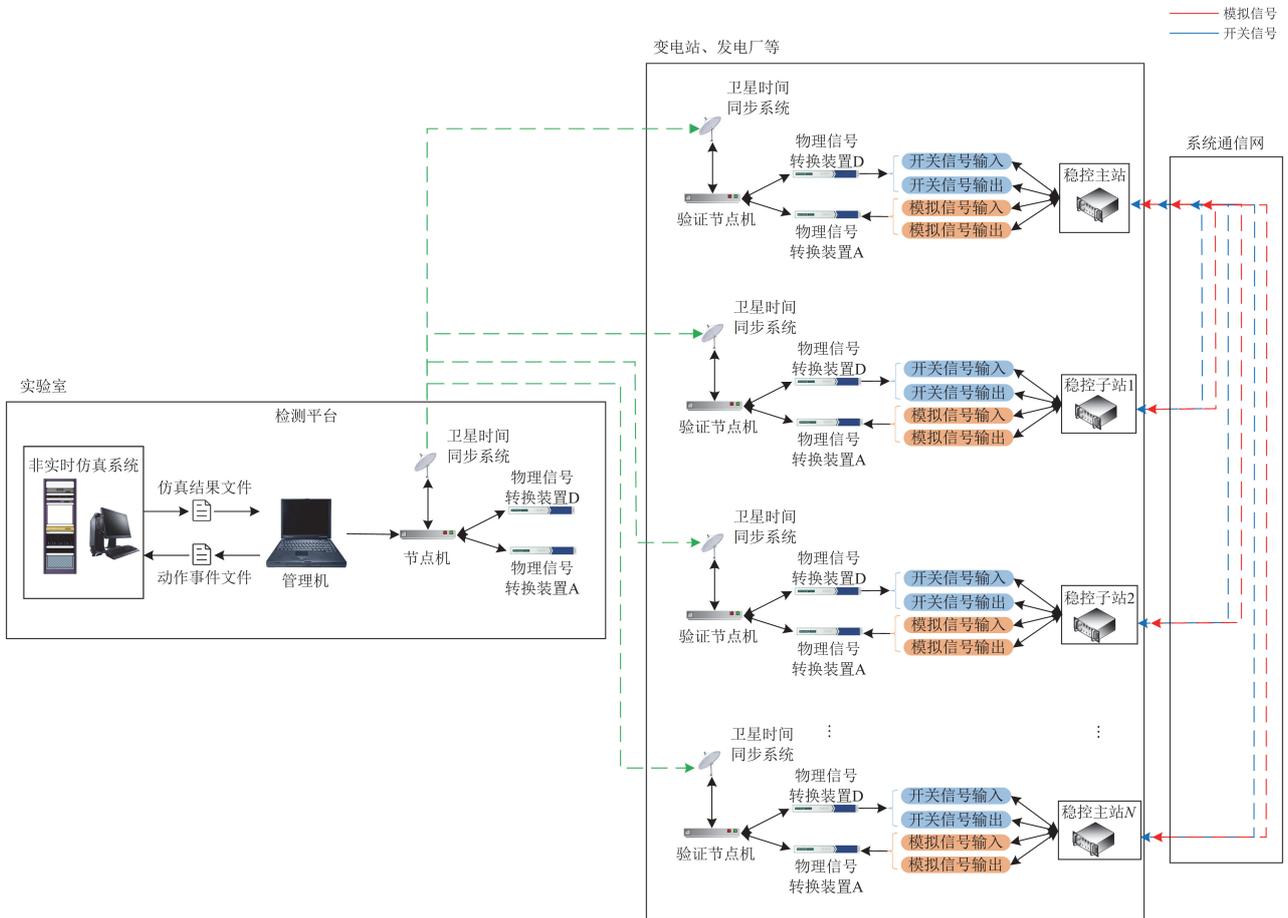


图1 检测平台总体架构

Fig. 1 Overall architecture of the detection platform

1.2 接口子系统

接口子系统是整个测试系统的枢纽，实现人机交互、无线通信、数据转换、任务分配、时间同步等多项核心功能，主要由管理机、节点机、5G无线通信模块、物理信号转换装置、卫星时间同步系统等硬件实物组成，在实现这些功能时，接口子系统的设计需要保证各个功能模块之间的高效协同与数据流的动态处理。

1.2.1 管理机

管理机的核心功能是管理整个系统的配置，完成仿真系统的仿真结果数据文件与节点机所需检测数据文件之间的数据交互。此外作为人机交互软件程序，负责处理、分析非实时仿真结果并支持对稳

控系统动作的在线录波回放，最终通过动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法^[27]捕捉动作序列，保证分布式监测平台的数据一致性，从而完成整个闭环测试过程。

1.2.2 节点机

节点机负责接收并处理管理机下发的配置信息和仿真数据，按步长要求将其传输给物理信号转换装置；并负责接收物理信号转换装置的返回数据，存储后反馈回管理机。

1.2.3 5G无线通信模块

5G无线通信模块采用爱陆通AR7088H-RSTD标准版无线通信模块，基于5G/4G/3G/2G、虚拟专网等技术开发的无线路由器，采用高性能的工业级

32位通信处理器和工业级无线模块, 以嵌入式实时操作系统为软件支撑平台, 满足现场通信的需求。

1.2.4 物理信号转换装置

物理信号转换装置与被测稳控装置通信, 按步长传输至被测装置。同时, 接收被测设备反馈的遥测与遥信信号信息, 并将其返回至节点机。主要包括模拟量的输入 AI 与输出 AO、数字量的输入 DI 与输出 DO 等 4 种类型装置。

1.2.5 卫星时间同步系统

卫星时间同步系统采用 GPS 与 IRIG-B 协同的方式, 通过卫星信号使分布在不同地点的装置和系统保持同步, 主要解决分布式系统各信号间的同步问题。

整个接口子系统硬件实物布局如图 2 所示。

1.3 检测平台硬件关键技术

1.3.1 分布式架构

稳控系统的规模和电力系统复杂性不断变化, 导致测试难度加大, 同时物理信号转换装置 I/O 模块输入输出数据的控制和捕捉是一个严格要求实时处理的任务, 任何细微的响应延迟都存在导致误操

作、误判等风险的可能, 所以采用合适的分布式架构和协同式通信网络来进行测试。整个检测平台分布式架构如图 3 所示。

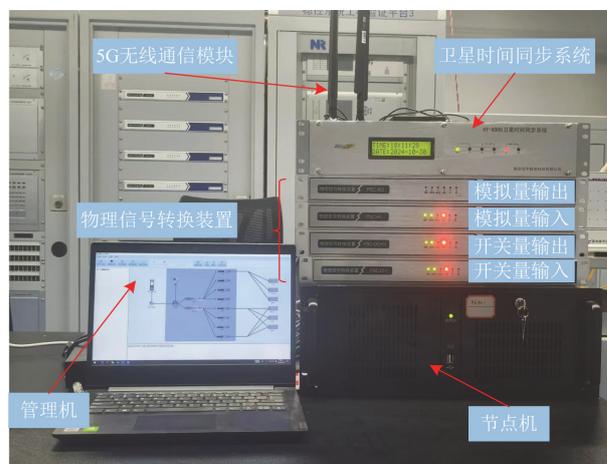


图 2 检测平台接口子系统硬件实物布局

Fig. 2 Hardware physical layout of the detection platform interface subsystem

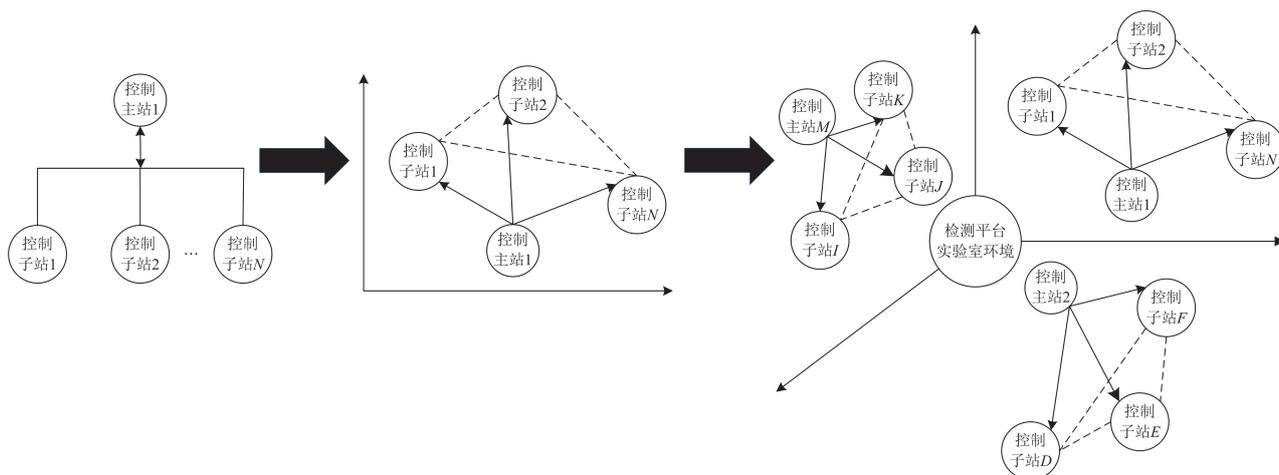


图 3 检测平台分布式架构

Fig. 3 Distributed architecture of detection platform

从整体布局上看, 稳控系统各个装置之间是金字塔形式的交互关系, 内部的数据信息流按照特定的层次自上而下或自下而上进行交互, 根据几何图形学中对于坐标空间和投影映射的概念, 同样可以采取分布式多维控制层的结构。在三维坐标系中, 原点位置对应实验室中所布置的检测平台, 按照空间位置不同, 稳控系统站点分布于不同位置, 原点与所要测试稳控系统节点之间存在多维联系。

1.3.2 同步机制

由于检测平台采用无线方式传输数据, 且受到接口子系统与被测装置之间距离的影响, 导致数据

传输存在延时, 因此仿真数据传输到接口子系统和被测装置的时间节点并不相同, 为了实现同步, 应该首先定义传输数据的生效时间, 保证在考虑实际延时的前提下系统数据的输出可以实现同步。检测平台同步机制如图 4 所示。

以管理机单元、物理信号转换装置和被测装置为主要的数据传输节点为例, 在 $t = T_0$ 时刻, 管理机接收到非实时仿真系统的仿真结果数据文件并通过节点机处理后发送至物理信号转换装置, 后者再通过无线通信的方式发送至被测装置, 由于传输延时不同, 物理信号转换装置和被测装置接收 T_0 时刻数

据的时间节点也会存在差异，这就直接导致了数据不同步，因此提前规定：在保证起始时间同步的前提下，分别对物理信号转换装置与被测装置所采集的数据设置绝对时间标记，各时间节点在绝对时间标记的基础上延时至 $t = T_0 + T$ 后统一生效，保证数据的同步。

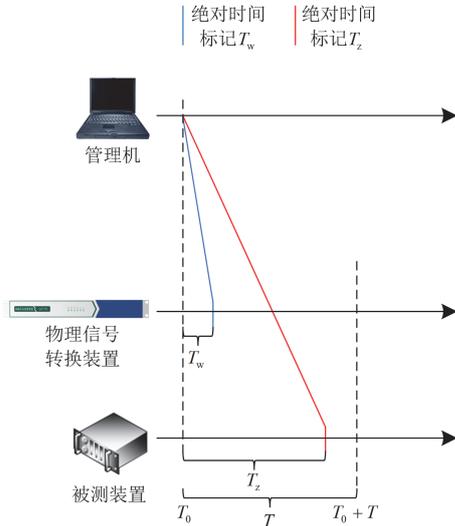


图4 检测平台同步机制

Fig. 4 Synchronization mechanism of detection platform

同时为了确保同步机制的正确性，在当前测试周期内多次采集数据通信报文，不断优化绝对时间标记和最终同步延时。

1.3.3 数据互访

在同步机制的基础上，测试过程中主要有非实时仿真数据和在线动态测试数据。同时在分布式测试结构下，需要实现非实时数据与在线数据的数据互访。

对于非实时数据，在完成一次仿真后会暂存至本地管理机中，而在线数据则更加频繁地在线生成在线取用，非实时数据通过数据积累并经过同步机制，按照数据的对应时序在线输出所需要的在线数据。主要采用动态内存池来实现数据互访，在初始化时预先分配一大块连续的内存空间，这块内存空间被划分成若干个固定大小的内存块。这些内存块并不立即被使用，而是保存在内存池中，在收到需要内存的请求指令后，将非实时数据暂存至内存池中，经过时序匹配，最终实现数据互访，其原理如图5所示。

对于经过无线方式远程采集的数据，由于存在一定的网络延时和网络不稳定的情况，实验室本地环境下发送的数据在被采集后可能存在顺序被打乱的情况，因此在本地环境下，首先对数据按照生效

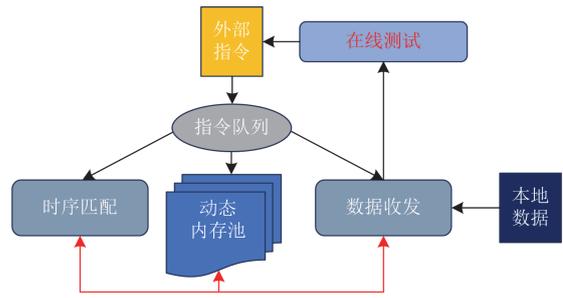


图5 数据互访原理

Fig. 5 Principle of data exchange

时间顺序进行排列，再发送至远方环境，经过时间同步后完成数据传输，保证数据的时序性。本地非实时数据产生后收集至管理机的数据寄存区，在此对数据的序列代码、数值、发布时间进行存储，之后非实时数据经过时序匹配单元输出到本地测试时间单元等待后续发布。时序匹配器主要的匹配规则如下：1) 序列代码递增：每个数据包都有唯一的序列代码。序列代码单调递增，即当前数据的序列代码应该始终小于后续数据的序列代码，避免错误时序。2) 相邻发布时间：数据发布时间戳相邻，确保没有数据在发布时间上出现不连贯的跳跃。若相邻发布时间戳之间的差距超过了预定的阈值，则需要标记该数据并进一步进行处理。数据时序匹配原理如图6所示。

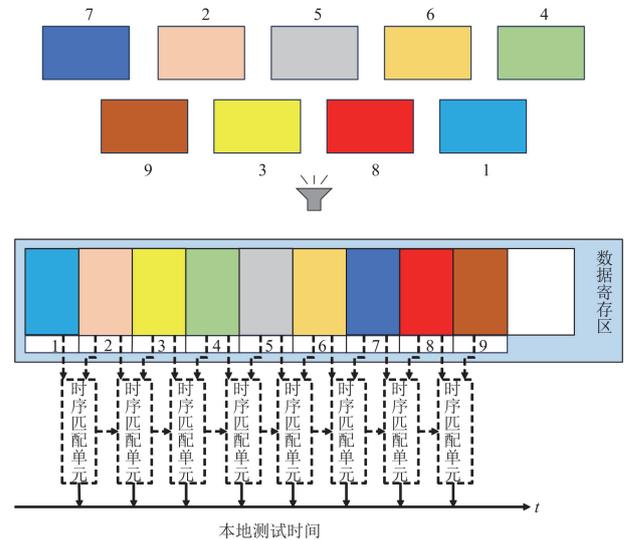


图6 数据时序匹配原理

Fig. 6 Principle of data temporal matching

1.3.4 结果评价

结果评价模块是检测平台管理机单元的重要组成部分，其主要功能包括波形录制、波形分析及事件识别，用于实时评估稳控装置的功能响应与策略

执行情况。通过数据录制功能高频采集并生成仿真曲线, 支持后续数据分析。

在每轮闭环测试中, 仿真曲线同步输出, 以便现场技术人员直观对比装置响应表现, 将测试数据实时反馈至离线仿真平台, 启动下一轮迭代测试直至系统满足终止条件。以上过程可以显著降低误判风险, 增强系统在复杂工况下的适应性。

2 检测平台软件测试方法

2.1 方法流程

在管理机检测软件方面, 本文提出的分布式在线检测方法为非实时仿真引入了基于信息反馈的 DTW 算法^[28], 使得仿真结果能够更好地反映电力系统的实际运行状态, 更加精确地定位故障进而实施相应保护措施。

DTW 算法基于动态规划^[29-31]实现, 输入为两个时间序列, 输出为两个时间序列之间的距离值。该算法通过对每一对时间序列中的数据点进行逐一比对, 并采用动态规划计算出全局最优的匹配路径。这一逐一比对与最优计算的过程通过逐步减少误差, 找到最佳对齐方式, 从而实现对事件序列之间相似性或差异性的精确比对, 以确保后续迭代测试的起始条件更加贴合实际情况, 同时增强了测试过程与实际系统的同步性, 并提高了测试的精度。

整个测试方法从信号输入到最终输出判别结果的过程可分为 4 个步骤, DTW 算法具体流程如图 7 所示。

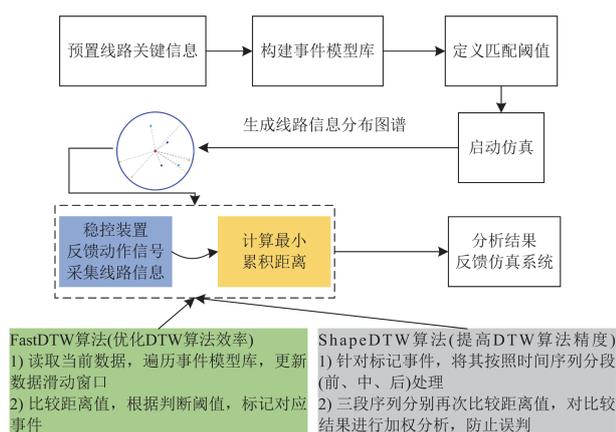


图 7 DTW 算法流程图

Fig. 7 DTW algorithm process

步骤 1: 首先从稳控装置中采集线路切除时的反馈信号, 包括线路电压、电流、功率等实时信号, 检测平台通过高频采集获取数据, 通常依据非实时仿真系统的仿真步长进行模拟信号捕捉。为了确保

输入数据的一致性和准确性, 并提高 DTW 算法对信号变化的敏感性, 采集信号还要进行必要的预处理, 包括滤波、归一化处理等操作。

步骤 2: 建立稳控装置策略中每条线路的切除事件模型库, 模型库涵盖相关线路在被切除时的典型反馈信号特征。为了提高算法的准确性, 模型库中的数据设置多个维度的信号特征。

步骤 3: 在稳控装置反馈线路切除信号时即发生动作事件, 实时读取反馈信号, 使用 FastDTW 算法对实时信号与模型库中的信号进行匹配, 计算最小累积距离。当时间序列较长时, DTW 算法的性能会降低。因此, FastDTW 作为一种具有线性时间和空间复杂度的近似 DTW 算法^[32]被采用, 它通过多层次方法, 逐层递归投影结果, 并对投影结果进行细化, 提升计算效率。累积距离用于评估反馈信号与事件模型库中各事件的匹配程度, 累积距离越小, 表示反馈信号与事件模型越相似。设定匹配阈值, 当累积距离值低于预设匹配阈值时停止匹配并标记对应线路, 判定该线路发生此动作事件。

步骤 4: 在复杂工况条件下, 相似信号可能导致误判。为了降低误判的风险, 并进一步加强对信号局部特征的匹配, 引入 ShapeDTW 算法, 该算法将信号分为多个部分(前、中、后)并分别进行 DTW 匹配, 以提高对局部特征的敏感度。ShapeDTW 本质上是一种 DTW 算法, 但 ShapeDTW 专注于对局部相似的结构进行配对, 并避免与不同的邻域结构进行匹配^[33]。通过引入形状描述符, 如局部特征信息或其他信号特征, ShapeDTW 能够更精确地捕捉事件的全局形状, 从而提高对稳控系统中复杂事件信号的匹配精度, 减少误报和漏报的可能性。

按照以上步骤完成一次测试过程, 根据测试结果和相关校验标准, 判断是否进入下一轮次迭代仿真测试过程。

2.2 基于 GPS 时钟校准的 DTW 算法

事件通常指的是引起动态系统状态变化的特定事实, 而事件识别是指对动态系统中发生的事件进行判断和分析。在电力系统中不同类型的事件时常发生, 而其中许多事件都会对电力系统的安全运行带来影响^[34]。在对特定事件进行深入分析后, 根据其特征采用不同的方法进行分类和判定。

考虑到不同场站、机组、线路在动作过程中电气量变化的差异, 可以根据这些差异进行事件识别。由于在明显区分度的前提下, 动作的暂态过程具备可复现性, 所以可以结合 GPS 时钟与 DTW 算法, 完成时序匹配与事件识别。基于 GPS 时钟校准的 DTW 算法示意图如图 8 所示。

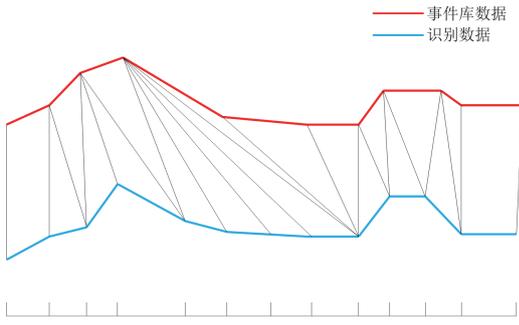


图8 基于GPS时钟校准的DTW算法

Fig. 8 GPS clock calibration-based DTW algorithm

图8中黑色连接线代表两条折线对应点之间的点位关系,所有点位均按照时间轴方向展开。根据稳控装置暂态过程中电气量的变化差异,可以通过DTW算法实现事件识别。

基于GPS时钟校准的DTW算法的核心思想是,通过非线性扭曲的GPS时间轴,最小化两个序列之间的累积距离,从而找到最佳对齐路径,具体应用于本文时,通过计算两个时间序列之间的最小累积距离确定最佳匹配路径,以判定具体的动作事件。

对于两个时间序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 和 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, 定义二者之间的各个对应点之间的距离,如式(1)所示。

$$d(x_i, y_j) = (x_i - y_j)^2 \quad (1)$$

式中: $d(x_i, y_j)$ 表示时间序列 X 中的第 i 个数据点 x_i 与序列 Y 中的第 j 个数据点 y_j 之间的欧氏距离。式(1)通过计算数据点差的平方的方式度量两个数据点之间的相似性,欧氏距离的平方形式确保度量值非负并且可以灵敏地反映数据点之间的差异。

采用递归的方式计算DTW算法的累积距离矩阵 D , $D(i, j)$ 记录了从起点到达当前点 (i, j) 之间的最小累积距离,其递归公式为

$$D(i, j) = d(x_i, y_j) + \min\{D(i-1, j), D(i, j-1), D(i-1, j-1)\} \quad (2)$$

式中: $D(i, j)$ 表示点 (i, j) 的累积最小距离, $D(i-1, j)$ 、 $D(i, j-1)$ 、 $D(i-1, j-1)$ 分别表示3个可能的前驱点(左,上,左上)。式(2)表明当前点的累积距离等于当前点的距离 $d(x_i, y_j)$ 加上从3个可能的前驱点中最小的累积距离,通过不断地递归逐步构建出一个从起点到终点的最小累积距离。

在构建累积距离矩阵时,设定初始条件,确保DTW算法从起点开始正确计算,初始条件的定义为

$$D(0, 0) = 0 \quad (3)$$

$$D(i, 0) = \sum_{k=1}^i d(x_k, y_0) \quad \text{for } i > 0 \quad (4)$$

$$D(0, j) = \sum_{k=1}^j d(x_0, y_k) \quad \text{for } j > 0 \quad (5)$$

式中: $D(0, 0)$ 代表初始值为0,也即起点没有累积距离。式(4)和式(5)的累积距离分别是逐点累加的结果,保证在路径的边界上可以正确累积距离值,为后续递归计算提供初始值。

经过上述过程得到两个时间序列 X 和 Y 之间的最小匹配距离,其结果表示为

$$D(X, Y) = D(m, n) \quad (6)$$

式中: m 和 n 分别表示时间序列 X 和 Y 的长度; $D(X, Y)$ 表示沿着最优路径将序列 X 和 Y 对齐时的最小累积距离。 $D(X, Y)$ 反映了两个序列之间的整体相似性, $D(X, Y)$ 越小则意味着两个序列越相似,最终通过比对数据结果确定相应的事件序列。

由于DTW算法在计算效率和精确度上存在一定的不足,所以考虑采用改进的DTW算法即FastDTW算法与ShapeDTW算法进行计算。

FastDTW算法,同样基于上述时间序列计算其欧几里得距离,如式(7)所示。

$$F(i, j) = \|x_i - y_j\| \quad (7)$$

式中: $F(i, j)$ 是时间序列 X 和 Y 在位置 i 和 j 的欧氏距离。

然后计算累积距离,即从起始点到当前点之间的最小累积距离,其计算公式为

$$F^n(i, j) = F^{n-1}(i, j) + \min\{F^n(i-1, j), F^n(i, j-1), F^n(i-1, j-1)\} \quad (8)$$

式(8)中通过迭代计算的方式,不断计算最小累积距离,通过在不同分辨率下计算最小累积距离提高计算效率,并不断迭代优化。

ShapeDTW算法,主要关注形状相似性下时间序列的形状而不是更加具体的时间节点,形状相似性度量公式为

$$c(X[i], Y[j]) = \sum_{i=1}^n \min(S(x_i, y_j)) \quad (9)$$

式中: $c(X[i], Y[j])$ 表示两个时间序列 X 和 Y 之间的形状相似性度量,通过不断对最小欧氏距离进行累加得到形状相似性度量,之后需要通过归一化时间序列来消除时间尺度的影响,归一化表达式 $S(i, j)$ 为

$$S(i, j) = c(X[i], Y[j]) + \min\{S(i-1, j), S(i, j-1), S(i-1, j-1)\} \quad (10)$$

式中: $S(i-1, j)$ 表示在原有时间节点基础上新节点

的插入; $S(i, j-1)$ 表示对于原有时间节点的删除; $S(i-1, j-1)$ 则表示原有时间节点相似性匹配当前形状, 需要保留。

2.3 多轮闭环测试

为了实现动态测试的目标并解决测试过程中对

硬件的依赖问题, 选择将非实时仿真结果同步到在线检测系统, 以单轮测试为一个时间尺度, 通过多轮次测试叠加, 实现多轮闭环测试, 多轮闭环测试的时间序列如图 9 所示。

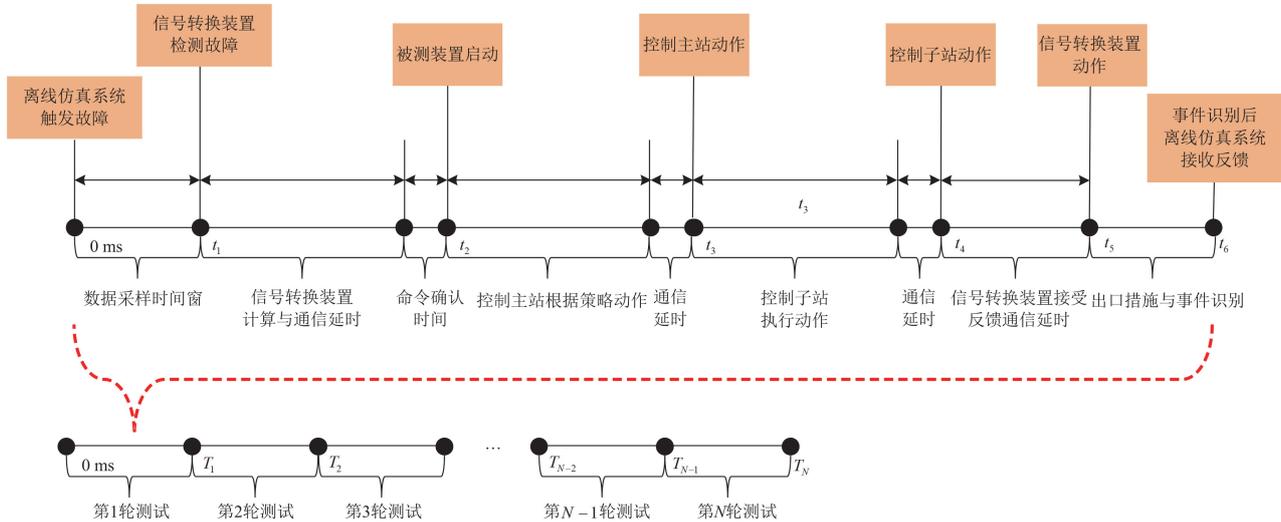


图 9 多轮闭环测试时间序列图

Fig. 9 Multi round closed-loop testing time series

在收到非实时仿真数据结果之后, 通过DTW算法完成单次事件识别, 将识别结果反馈至非实时仿真系统, 对照验证策略后改变信号输入源再次进行仿真, 完成单次闭环测试。时间序列主要包括数据采集时间、信号转换装置计算时间、通信延迟时间、命令确认时间、动作时间、出口措施与事件识别时间等, 所有的时间数据均处于典型值及其上下限范围内。完成单次闭环测试后, 对照测试要求, 判断稳控系统(装置)功能是否满足条件, 若满足则结束测试; 若不满足则在现有模型库基础上继续执行下一轮闭环测试, 整个过程无需其他硬件设备参与, 只需要利用当前非实时仿真数据与事件模型库数据。

3 检测实验验证

3.1 测试方案

以某送出区域电网为主要原型, 在检测平台管理中搭建验证模型, 并基于非实时仿真平台建立该区域稳控系统模型, 模型主要包括电网网架、变压器、断路器、负荷、火电机组及其控制部分, 新能源机组及其控制部分, 交直流输电及其控制部分等, 同时根据实际电网数据库(PSASP)设置电气元件模型参数, 且测试按照典型潮流进行验证。#1 变通过#1 变—#4 变三回线与#4 变联系, C3、C7 新能源机组接入#4 变, C5、C6、C8 新能源机组接入#5

变, #4 变接入新能源厂站装机达 350.00 MW(风电) + 150.00 MW(光伏), #5 变接入新能源厂站装机达 330.00 MW(光伏)。该送出区域电网地理接线图如图 10 所示。

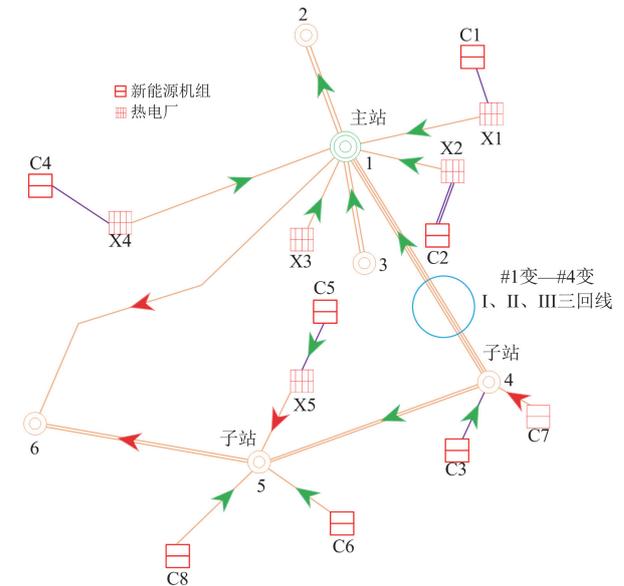


图 10 测试算例地理接线图

Fig. 10 Geographic wiring diagram of test case

该区域电网主要解决 330 kV#1 变—#4 变三回线同杆 N-2 过载问题, 以改善该区域新能源受限

问题,提高新能源消纳能力。采用检测平台对该区域的稳控装置进行测试,稳控装置根据预置策略执行切机和回降直流功率指令。在实际运行中,一般采用两套稳控装置互为备用的方式,在一套稳控装置进行离线检测期间,另一套稳控装置可以正常运行,确保电网的安全稳定运行。使用检测平台进行动态检测,验证其方案的有效性。所有的稳控装置均布置于现场环境,通过无线通信的方式与实验室环境下的检测平台进行通信,实现分布式测试的目的。通过模拟具体的故障工况,观测具体事件信息(事件发生时间,对应事件内容)来实现检测。为了确保测试的全面性和可靠性,设计对照实验。在多轮测试中引入稳控装置故障,以模拟故障状况。在此故障状况下,通过监测线路功率变化、线路开关动作时间以及相关事件反馈,系统地评估稳控装置的功能表现。通过对比故障情况下的测试结果与正常情况下的表现,判断稳控装置在不同工作状态下的性能和可靠性,从而为后续的优化和改进提供数据支持和理论依据。该区域所测试的稳控策略如表 1 所示。

表 1 区域稳控策略表

Table 1 Regional stability control strategy

策略	策略条件	策略措施
1	330 kV#1 变—#4 变三回线 同杆 N-2 故障跳闸, 剩余 330 kV 单线过载	在出现故障工况的条件下动作事件共分为 3 个轮次, 按照先切新能源机组、后切火电机组的原则; 过载切机范围
	330 kV#1 变—#4 变三回线	包括合环方式下所有新能源机组(C3、C5、C6、C7、C8)
2	I、II 线任意一回线跳闸, 另线过载	

3.2 结果对比

根据策略 1, 共动作 3 轮, 稳控装置均正确动作, 系统可以正常运行, 试验结果与预期一致。在进行多轮次单独的闭环测试后汇总所有的试验结果, 按照动作事件与时间点一一对应的形式进行展示。策略测试仿真工况 I 如图 11 所示。

1) $t = 0$ s 时开始仿真, $t = 3$ s 时发生#1 变—#4 变三回线同杆 N-2 过载问题, I 回线与 II 回线出现故障, III 回线过载, 稳控装置在满足策略条件后判别故障, $t = 3.263$ s 时#1 变判别出三回线 N-2 故障, 发送切机指令, 切除新能源容量。

2) 检测平台于 $t = 3.407$ s 收到#1 变切除新能源机组动作指令, 切除新能源机组两台, $t = 3.583$ s 时根据第 1 轮动作事件识别结果, 由检测平台转发指令切除 C3、C7 新能源机组 131 MW, 线路过载量为 247 MW, 未能达到既定策略中稳定的要求, 需要进行第 2 轮动作。

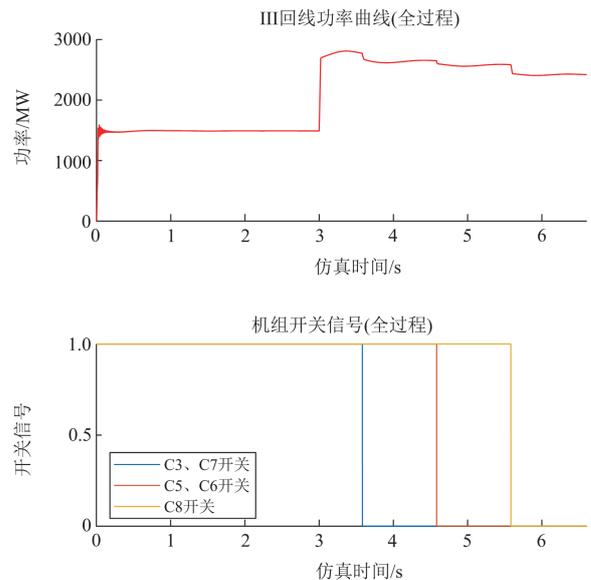


图 11 策略测试仿真工况 I

Fig. 11 Strategy testing simulation conditions I

3) $t = 4.583$ s 根据第 2 轮动作事件识别结果, 由检测平台转发指令切除 C5、C6 新能源机组 71 MW, 线路过载量为 176 MW, 未能达到策略稳定要求, 需要进行第 3 轮动作。

4) $t = 5.583$ s 根据第 3 轮动作事件识别结果, 由检测平台转发指令切除 C8 火电机组 176 MW, 此时线路功率为 2554 MW, 线路不过载, 符合稳定要求, 完成全部过程。

根据策略 1, 共动作 3 轮, 在管理机检测平台软件区域模型中设置新能源机组 C8 信号阻断, 此时稳控系统可以正常对策略进行响应, 但 DTW 算法无法对第 3 轮动作事件进行识别, 故预期仿真结果为 C8 开关将不动作, 而线路功率可以正常变化。策略测试仿真工况 II 如图 12 所示。

为更加全面地分析检测平台的性能, 对同一算例实时仿真和非实时仿真的结果进行波形对比。实时仿真工具选取 PSCAD, 对于该算例二者波形曲线基本没有太大的差异。从响应时间角度出发, 为解决实时仿真对于硬件规模依赖的问题, 可以考虑采用非实时仿真 ETSDAC, 二者仿真对比结果如图 13 所示。

通过以上结果分析, 针对在线动态测试与分布式系统架构, 可以得到如下结论:

1) 非实时仿真在离线环境下进行计算, 没有硬件等外部因素的干扰, 并且可以灵活选择仿真步长, 一定程度上减少了误差, 其仿真精度满足要求, 数据结果更加稳定, 仿真波形基本没有振荡。

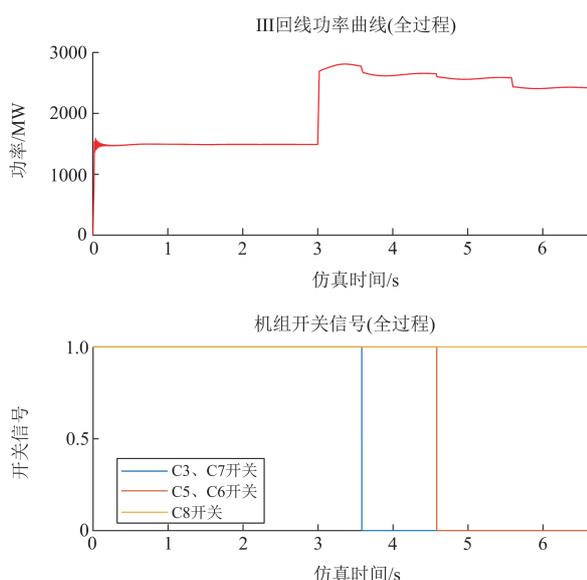


图 12 策略测试仿真工况 II

Fig. 12 Strategy testing simulation conditions II

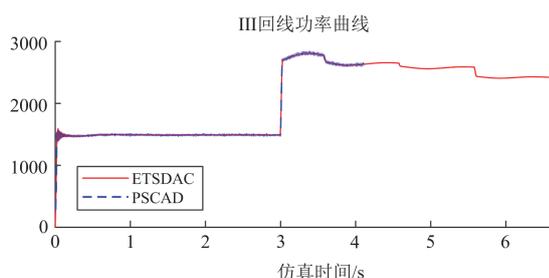


图 13 仿真对比结果

Fig. 13 Comparison results of simulation

2) 采用DTW算法的检测平台可以将非实时仿真计算结果传输到实时在线装置, 满足同步性的指标要求, 可以正确识别事件动作信息, 并按照策略表正确动作。

3) 可以模拟实际电网中的故障工况, 解决实验室条件下稳控系统测试与实际电网耦合度不高的问题。

4) 闭环实验的测试延时误差为 210 ms, 满足小于 300 ms 的测试要求, 测试系统在根据策略动作后保持稳定运行, 与实际装置反馈结果保持一致。

4 结论

本文总结并分析了当前稳控系统的主要测试方法, 为解决当前稳控装置的分布式动态测试存在的问题, 提出了一种基于硬件在环下的安全稳定控制系统分布式闭环测试方法, 采用基于GPS的DTW算法, 解决了分布式测试的对时问题, 同时基于该测试方法设计了稳控系统的检测平台, 可以将非实

时仿真结果用于在线检测, 解决了传统检测平台对硬件资源的依赖。最后通过对某实际交流送出断面区域安全稳定控制系统开展模拟实验, 验证了该检测平台系统在实际工程中的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 许剑冰, 冯霄峰, 徐海波, 等. 基于数字孪生的安全稳定控制系统试验验证展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 1-10.
- XU Jianbing, FENG Xiaofeng, XU Haibo, et al. Prospect of test verification based on digital twin for security and stability control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 1-10.
- [2] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 1-5.
- TANG Yong. Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 1-5.
- [3] GULZAR M M. Designing of robust frequency stabilization using optimized MPC-(1+PIDN) controller for high order interconnected renewable energy based power systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 180-193.
- [4] 张建新, 常东旭, 邱建, 等. 适应新型电力系统的安全稳定控制系统及装置设计方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(12): 10-19.
- ZHANG Jianxin, CHANG Dongxu, QIU Jian, et al. A design method of stability control device and system adapted to new power systems[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 10-19.
- [5] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
- HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [6] 李世林, 季亮, 常潇, 等. 基于改进白化权函数聚类的新能源电压支撑能力量化评估方法[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 73-80.
- LI Shilin, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Quantitative evaluation method of new energy voltage support capability based on improved whitening weight function clusteri[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 73-80.
- [7] 南方电网技术研究中心, 中国南方电网电力调度通信中心, 南京南瑞继保电气有限公司. 电力系统安全稳定控制系统检验规范: 中国, GB/T 22384—2008[P].

- 2008-09-24.
- [8] 杨永志, 李俊伟, 胡馨. 基于电网安全稳定控制装置测试的技术探讨[J]. 新型工业化, 2019, 9(10): 83-86.
YANG Yongzhi, LI Junwei, HU Xin. Discussion on the technology of testing based on grid safety and stability control device[J]. The Journal of New Industrialization, 2019, 9(10): 83-86.
- [9] 王亮, 王新宝, 高亮, 等. 基于故障场景的区域电网安全稳定控制系统测试方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 39-42, 95.
WANG Liang, WANG Xinbao, GAO Liang, et al. A fault scenario based method for the regional power grid security and stability control system test[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 39-42, 95.
- [10] 许士光, 封科, 唐冠军, 等. 智能变电站数字化稳控装置测试系统研究与开发[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(6): 23-29.
XU Shiguang, FENG Ke, TANG Guanjun, et al. Development and research on testing system of digital stability control device for smart substation[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2017, 15(6): 23-29.
- [11] 吴国旻, 宋新立, 汤涌, 等. 电力系统动态仿真中的安全稳定控制系统建模[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 71-75.
WU Guoyang, SONG Xinli, TANG Yong, et al. Modeling of security and stability control system for power system dynamic simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 71-75.
- [12] 赵朗程, 陈卓, 郝正航, 等. 新型省级电网电磁暂态实时仿真建模方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(8): 46-55, 73.
ZHAO Langcheng, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. Real-time simulation modeling method for electromagnetic transient in a new-type provincial power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(8): 46-55, 73.
- [13] 黄立滨, 郭临洪, 郭天宇, 等. 基于多核 CPU 的风光新能源场站全拓扑实时仿真建模方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(6): 79-88.
HUANG Libin, GUO Linhong, GUO Tianyu, et al. Full-topology real-time simulation modeling method for the wind farm and photovoltaic new energy station based on multi-core CPU[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 79-88.
- [14] 苏毅, 段偲默, 刘一亮, 等. 计及多风电场相关特性的集中式储能电站容量优化配置方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 150-157.
SU Yi, DUAN Simo, LIU Yiliang, et al. Centralized energy storage station capacity optimization configuration method considering relevant characteristics of multiple wind farms[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(9): 150-157.
- [15] 李忠文, 张玉成, 程志平. 光伏发电参与直流微电网多时间尺度电压支撑的分布式分层控制[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(12): 4707-4717.
LI Zhongwen, ZHANG Yucheng, CHENG Zhiping. Distributed hierarchical control of PV system to provide multiple-time scale voltage support for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(12): 4707-4717.
- [16] 宋墩文, 马世英, 侯俊贤. 实时动态安全评估中在线和离线仿真互访过程研究[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 71-75.
SONG Dunwen, MA Shiying, HOU Junxian. Research on inter-access between online and offline simulation during real-time dynamic security assessment of power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 71-75.
- [17] 郭琦, 朱益华, 常东旭, 等. 电网安全稳定控制系统远程试验方法及工程应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 152-159.
GUO Qi, ZHU Yihua, CHANG Dongxu, et al. Remote test method for security and stability control system of power grid and its engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 152-159.
- [18] 陈力, 王洪彬, 姚树友, 等. 大电网广域安全稳定控制系统远传测试技术研究[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(4): 76-81.
CHEN Li, WANG Hongbin, YAO Shuyou, et al. Research on remote simulation technology of wide area security and stability control system for large power grid[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2024, 53(4): 76-81.
- [19] 金吉良, 彭书涛, 朱云峰, 等. 安全稳定控制装置标准化测试系统研究与开发[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 147-154, 175.
JIN Jiliang, PENG Shutao, ZHU Yunfeng, et al. Research and development of standardized test system for security and stability control equipment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 147-154, 175.
- [20] 张武洋, 黄未, 王同, 等. 一种基于 RTDS 稳控系统性能测试试验方法的研究[J]. 东北电力技术, 2020, 41(6): 1-4.
ZHANG Wuyang, HUANG Wei, WANG Tong, et al. Study on simulation test method of stability control system performance based on RTDS[J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(6): 1-4.
- [21] 陈军, 南东亮, 张路, 等. 基于场景模拟的新疆电网稳控系统同步测试技术研究[J]. 电工电气, 2022(10):

- 44-49.
CHEN Jun, NAN Dongliang, ZHANG Lu, et al. Research on synchronous test technology of Xinjiang power grid stability and control system based on scenario simulation[J]. *Electrotechnics Electric*, 2022(10): 44-49.
- [22] 赵巍, 侯玉强, 陈涵, 等. 安全稳定控制系统远程非实时闭环测试技术研究[J]. *浙江电力*, 2024, 43(4): 63-73.
ZHAO Wei, HOU Yuqiang, CHEN Xiong, et al. Research on a remote non-real-time closed-loop testing technique for safety and stability control systems[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(4): 63-73.
- [23] 梁海峰, 丁政, 李鹏. 基于改进一致性算法的孤岛直流微电网储能系统分布式控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16): 59-71.
LIANG Haifeng, DING Zheng, LI Peng. Distributed control strategy of an energy storage system in an isolated DC microgrid based on an improved consensus algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 59-71.
- [24] 邹文斌, 韩松, 荣娜, 等. 基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(1): 166-173.
ZOU Wenbin, HAN Song, RONG Na, et al. Voltage control strategy for a PV inverter based on distributed consensus collaboration[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(1): 166-173.
- [25] 田芳, 黄彦浩, 史东宇, 等. 电力系统仿真分析技术的发展趋势[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(13): 2151-2163.
TIAN Fang, HUANG Yanhao, SHI Dongyu, et al. Developing trend of power system simulation and analysis technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(13): 2151-2163.
- [26] 徐树文, 卓谷颖, 李壮, 等. 基于 PSD-BPA 数据的 ADPSS 大电网电磁暂态转换建模方法与软件实现[J]. *中国电力*, 2024, 57(8): 182-189.
XU Shuwen, ZHUO Guying, LI Zhuang, et al. Large-scale power grid ADPSS electromagnetic transient modeling method and software implementation based on PSD-BPA data[J]. *Electric Power*, 2024, 57(8): 182-189.
- [27] 谭珊, 赵仲勇, 杨建, 等. 基于动态时间规整的变压器绕组变形故障诊断方法研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(2): 108-118.
TAN Shan, ZHAO Zhongyong, YANG Jian, et al. Research on diagnosis method of transformer winding deformation fault based on dynamic time warping[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(2): 108-118.
- [28] 杨子元, 许晓斌, 李欣, 等. 基于智能感知技术的用电事件识别方法研究[J]. *物联网学报*, 2019, 3(4): 109-115.
YANG Ziyuan, XU Xiaobin, LI Xin, et al. Research on appliance event detection method based on intelligent perception technology[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2019, 3(4): 109-115.
- [29] LI Fangyuan, GAO Lefei, ZHANG Yubo, et al. Hierarchical operation switch schedule algorithm for energy management strategy of hybrid electric vehicle using adaptive dynamic programming[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2023, 35.
- [30] YUAN Jun, ZENG Xianxian, ZHOU Jiayu, et al. Data-driven real-time home energy management system based on adaptive dynamic programming[J]. *Electric Power Systems Research*, 2025, 238.
- [31] 薛展豪, 陈力, 林志颖, 等. 基于双向长短期记忆生成对抗网络的电力系统次同步振荡数据生成方法[J]. *智慧电力*, 2024, 52(5): 60-66.
XUE Zhanhao, CHEN Li, LIN Zhiying, et al. Subsynchronous oscillation data generation method of power system based on bidirectional long shortterm memory generative adversarial network[J]. *Smart Power*, 2024, 52(5): 60-66.
- [32] STAN S, PHILIP C. Toward accurate dynamic time warping in linear time and space[J]. *Intelligent Data Analysis*, 2007, 11: 561-580.
- [33] ZHAO Jiaping, LAURENT I. shapeDTW: shape dynamic time warping[J]. *Pattern Recognition*, 2018, 74: 171-184.
- [34] 杨勤. 电力系统事件识别与安全防御基础研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
YANG Qin. Fundamental study on event recognition and security defense in power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.

收稿日期: 2024-11-22; 修回日期: 2025-06-23

作者简介:

檀俊(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析; E-mail: tanjun991120@163.com

叶小晖(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统建模与仿真分析; E-mail: yexiaohui@ysu.edu.cn

朱旭凯(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统数字仿真。E-mail: 18601150725@163.com

(编辑 周金梅)