

新一代在线安全分析技术架构及未来展望

王国春¹, 许洪强¹, 冯长有¹, 于之虹², 徐伟³

(1. 国家电网有限公司, 北京市 100031; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192;

3. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏省南京市 211106)

摘要: 为适应新型电力系统构建过程中面临的挑战,按照“继承、融合、创新”的理念,提出了新一代在线安全分析整体架构,在模型数据、功能体系、业务场景和人机交互等方面,通过基础平台、实时量测、网络分析、仿真计算等有序配合,实现了设备模型参数、实时量测信息、稳控模型、断面限额等多源数据与在线分析应用的联通交互。针对电力系统运行出现的新特性,开发了在线机电-电磁混合仿真、转动惯量和新能源多馈入短路比在线评估等新功能,使得新一代在线安全分析架构更科学、分析更快速、仿真更准确、生态更开放、人机更友好。相关成果已在国分调控云部署并服务于电力系统省级以上调度机构。最后,从设备建模、计算效率、仿真分析和结果应用4个方面,提出了未来发展方向。

关键词: 在线安全分析; 模型数据; 功能体系; 业务场景; 人机交互

0 引言

随着新能源快速并网和跨区直流大力发展,电力系统“双高”特征进一步凸显,系统调节能力明显不足、扰动能力持续下降,直流故障冲击下电网稳定破坏风险增加,送受端相互影响的连锁反应加剧。同时,电网建设正处于高峰期,系统检修规模庞大,电网结构调整频繁,电网系统性风险、结构性矛盾、阶段性困难交织^[1-3]。传统调度模式难以支撑实时调控运行需要,一体化的在线安全分析成为推动调度运行向分析型、主动型转变不可或缺的技术手段。

首先,电网特性深刻变化对调度运行提出了更高要求。电力电子设备广泛接入,现有基础稳定理论、稳定分析方法、设备建模原则、系统仿真精度不能有效适用,特高压直流馈入数量持续增加和新能源占比快速提高,给离线方式分析、生产组织安排和实时调控运行带来新的挑战。在实时运行层面,需要通过一体化的在线安全分析,实时评估运行风险,及时提供辅助决策,提升电网运行控制能力。

其次,电力市场化改革步伐加快,政策约束、市场需求进一步加大,电网运行方式安排受市场交易影响更加多变,调度模式、安全管理、清洁能源消纳等方面面临巨大压力,对实时调度运行精益化管理

提出了更高要求,需要借助在线安全分析实时评估电网运行状态,滚动优化日内方式安排,为实时运行提供精细化的辅助决策。

2003年北美“8·14”大停电后,为提升电网实时调控运行风险预控能力,国家电网有限公司调度机构依托调度自动化系统着手建设在线安全分析应用功能。2004—2008年是技术发展前期阶段,解决了多源数据融合、计算并行化和计算功能在线移植问题;2009—2017年,随着国家电网智能调度控制D5000系统(以下简称D5000系统)建设推广,在线安全分析技术在各级调度机构统一部署,成为辅助调度运行开展在线安全监测、日内计划校核和故障反演的有力工具。

现有在线安全分析在模型参数、计算功能、人机交互等方面仍存在不足,影响了功能实用化,主要包括:1)在线安全分析包括设备建模、信息采集、状态估计和分析计算等多个环节,现有功能采用封装模式开发,计算配置不透明,结果合理性和验证手段不足;2)缺乏保护装置和稳控系统二次设备模型的实时状态和策略信息,多采用程序内置方式模拟二次设备动作策略,计算结果不能精准反映系统实际运行状态;3)故障集配置依赖离线经验且采用程序内置方式,不能动态匹配外部实时工况变化,不能满足电网运行风险评估需求;4)稳定类计算采用机电暂态仿真,无法仿真电力电子类元器件毫秒级过程,难以精细化仿真直流和新能源等设备动态特

收稿日期: 2023-09-20; 修回日期: 2023-11-23。

上网日期: 2023-12-07。

性;5)静态安全、暂态稳定等功能计算参数设置复杂、不透明,人机友好性不足,计算结果分散,调度运行人员难以快速掌握系统运行情况。

自2018年起,为适应电力系统结构形态和运行特性重大变化,国家电网有限公司启动了新一代调度技术支持系统建设^[4-11],在线安全分析是其中重要组成部分。依托国分调控云分析决策中心武汉和上海站点,采用“继承、融合、创新”技术路线,针对日益扩大的电网仿真规模和日趋复杂的运行特性,在模型数据、功能体系、业务场景、人机交互等方面实现了技术突破,通过夯实模型数据基础、扩充应用分析功能、丰富人机交互界面,为“双高”电力系统安全运行提供技术保障。

1 整体框架

新一代调度技术支持系统以“共享、智能、开放、安全”为主要特征,包含运行控制子平台和调控云子平台,支撑实时监控、自动控制、分析校核、培训仿真、现货市场、新能源预测、运行评估、调度管理等业务高效运行,整体架构如图1所示。在线安全分析隶属于其中的分析校核部分,为调度运行提供基础安全稳定分析服务,为特高压交直流/关键输电断面等特定场景提供全方位稳定分析。

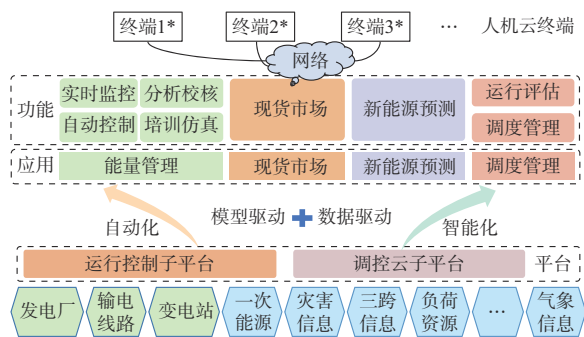


图1 新一代调度技术支持系统整体架构
Fig. 1 Overall architecture for new generation of dispatching technical support system

1.1 新一代在线安全分析应用架构

新一代在线安全分析按照“物理分布、逻辑统一”的双活云端集中部署,依托国分调控云节点建设面向220 kV电压等级以上主网、服务于省调的在线安全分析,依托省地调控云节点,构建面向省域电网、服务于省地县调的在线安全分析。具体地,基于国分调控云提供的电网实时运行潮流数据、一次和二次设备静态模型参数及电网数据库(power system database, PSDB)提供的动态元件模型参数,生成计算数据开展在线仿真计算,采用统一模型、统一数据、统一故障集、统一计算标准,实现模型、数

据、算法和算力等生产要素的全局高效共享,快速准确地在线量化电网运行态势。

新一代在线安全分析的核心功能包括静态安全分析、短路电流、暂态/电压/频率稳定等各类计算,应用场景包括实时方式分析、未来方式分析和研究方式分析等,通过分析界面、设备/电网卡片等多种方式展示计算结果,整体架构如图2所示。

与现有D5000系统在线安全分析参数内置、各类功能强耦合不同,新一代在线安全分析根据所需数据类型和仿真流程,实现了稳控和保护信息接入、设备模型参数获取、故障集和计算参数设置、核心计算、计算结果展示等相关环节的解耦,以服务形式对外提供数据信息并展示结果。调度运行人员可根据电网实际运行情况,灵活调整扫描故障集,按需配置计算控制参数,获取各类计算结果。同时,稳控和保护动作信息、设备模型参数及各类计算功能,既可通过国分调控云在各级调度间共享共用,也可被其他应用灵活调用,提升新功能开发效率。

1.2 模型数据

新一代在线安全分析基于国分调控云提供的实时数据服务和模型数据服务,能够秒级汇集并直接生成在线安全分析所需的全网标准化模型数据,开展220 kV电压等级以上主网统一计算,从根本上解决了数据时效性和模型参数一致性的问题。根据调管范围和故障影响范围,向省级以上调度机构主动推送分析结果,实现计算结果全网共享和按需获取。

1.2.1 一、二次设备建模

现有D5000系统在线分析应用中,不同区域一次设备建模范围不一致,新能源机组建模原则不同;二次设备,特别是稳控装置模型,在应用程序中独立建模维护,计算时未计及稳控装置实际运行工况,直接影响在线分析结果准确度。

新一代在线安全分析基于国分调控云实现一、二次设备全建模,实现了稳控系统统一管理;计算范围扩展至220 kV主变压器中低压侧,覆盖离线分析计算,支持新能源机组精细化建模,以及低电压等级新能源和负荷按需纳入计算。按照对象化建模思想,构建了保护、稳控等二次设备和断面稳定限额、故障集等标准化模型,能够接入稳控装置实测信息,为复杂严重故障分析提供统一规范的模型支撑。

1.2.2 动态模型参数

充分利用国家电网仿真中心离线建模成果,建立了离线仿真模型与国分调控云模型数据平台的交互机制,将动态模型参数从PSDB平台同步到国分调控云,支持动态参数的版本管理和统一发布,实现发电机、直流等设备动态模型参数的源头获取与维

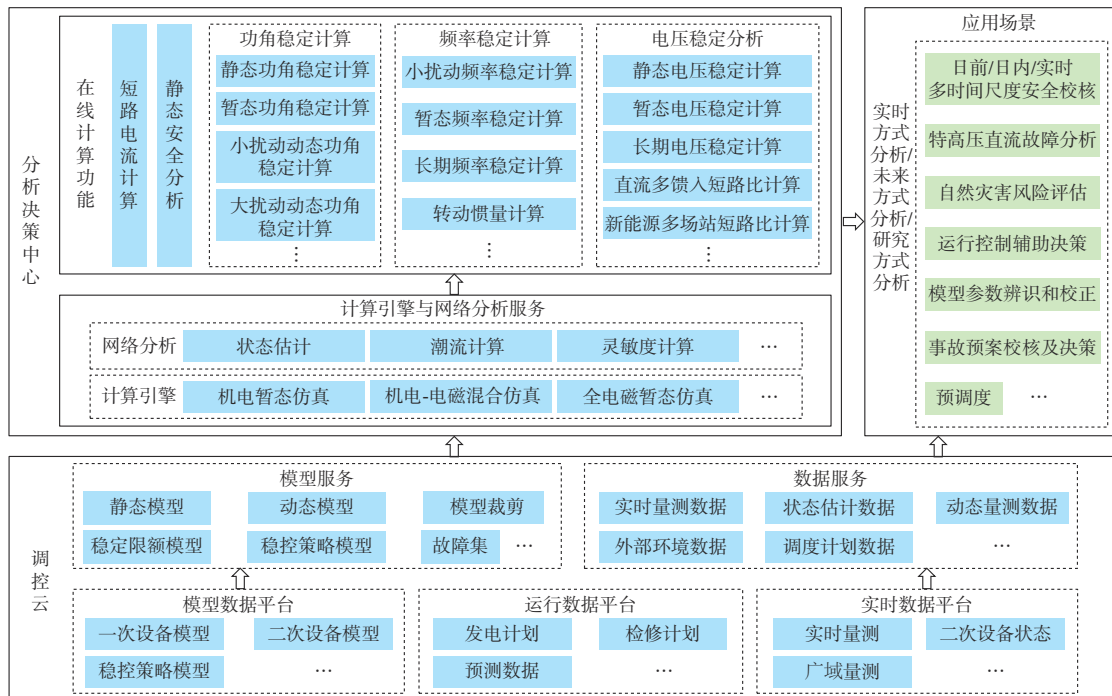


图2 新一代在线安全分析整体架构
Fig. 2 Overall architecture for new generation of online security analysis

护,实现在线和离线模型参数的统一管理,解决了在线计算动态参数维护不准确和不及时等问题,各类应用可通过服务调用的形式共享数据和模型,支撑省级以上调度机构基于全网数据开展统一分析计算。

1.2.3 故障集

故障集是在线分析应用中静态安全分析、暂态稳定分析和短路电流计算功能的基础输入数据。新一代在线安全分析应用中,建立了故障集专用管理模块,通过元数据统一建模和模型订阅,保证了国分调控云-省地调控云两级故障集模型的一致性,实现主网220 kV电压等级以上交流设备 $N-1$ 故障、直流典型故障按规则自动生成,支持自定义交流 $N-m$ 故障类型;基于外部环境、设备状态等信息,将高风险故障集自动纳入分析;通过纵向同步工具实现故障集数据源端维护和云端汇集,通过服务发布实现故障集数据远程调用和全局共享。

1.2.4 仿真计算范围

随着能源转型深入推进,电力生产结构和系统形态快速改变。在电源侧,高占比新能源采用集中式和分布式并行模式,沙戈荒大型风光基地、分布式新能源加速开发,接入位置愈加偏远、接入电压等级更低,常规电源逐步作为调节与支撑电源,抽水蓄能和储能电站得到规模化应用。在负荷侧,负荷和电源的界限更加模糊,负荷特性由刚性、消费型向柔

性、产消型转变,并大规模参与电网调控运行。电源和负荷的深刻变化,对复杂大电网稳定控制的全局统筹、全网分析、全局控制等能力提出更高要求。

新一代在线安全分析开发了电网边界管理工具,支持计算模型、新能源和负荷模型等计算边界快速等值和按需延伸扩展,能够根据计算目的、范围和深度,灵活、快速、便捷地调整计算范围,提升在线分析的灵活性和扩展性。

1.2.5 计算参数

综合考虑国内主流安全稳定分析软件(PSASP和PSD)在各区域电网应用实际,新一代在线安全分析设计并建立了统一的计算参数数据结构,各类分析计算功能的控制参数统一纳入国分调控云平台一体化管理,实现计算参数源端可视化、透明化维护和一、三区数据同步,与在线安全分析计算实现全流程贯通。

1.3 应用功能

按《电力系统安全稳定导则》^[12]等相关规范规定的计算深度和广度,新一代在线安全分析应用涵盖了静态安全、短路电流、功角稳定、频率稳定和电压稳定等各类计算功能。核心计算功能主要是跟踪电网发展建设新需求,在仿真模型、仿真参数和仿真功能等方面开展工作,重点解决包含直流、负荷、风光储等新能源关键元件设备模型构建、仿真精度和仿真效率提升等技术难题;在数据接口方面,及时应

用仿真建模研究成果,保证对电网运行形态的及时如实感知。

为适应新型电力系统建设过程中突出的频率、电压问题,在常规稳定分析基础上,增加了转动惯量在线评估、新能源多场站短路比在线分析等新功能。

1.3.1 在线转动惯量快速评估

为实现惯量全景监视和评估,面向电网发展需求,建立了含多类型调频资源的系统频率响应模型,快速计算惯量关键指标,量化系统频率响应能力,明晰系统运行边界,提高在线评估可靠性。

1)模型优化。针对水电、火电和新能源等多类型调频资源,综合考虑负荷电压对不平衡功率的影响以及频率空间分布特征,建立了适应多类型电源的频率响应模型,更加精准刻画了实际电网的频率动态响应过程^[13-14]。

2)参数动态聚合。随着集中式和分布式新能源快速发展,电源出力、负荷波动更加频繁,运行方式不确定性增强,系统运行方式安排更加复杂。基于电网实时运行的开机组合,计及单个机组的频率调节特性,将采用加权动态聚合方法计算得到的频率响应模型参数替代固定典型参数,提高了模型在不同运行方式下的适应性。

3)多维度评估指标。在D5000系统惯量评估基础上,基于预想扰动下频率响应模型输出的频率曲线,提取频率变化过程中的关键特征,新增频率最大偏差、扰动后稳态频率偏差等指标,实现系统惯量水平的多维度在线评估。其中,频率最大偏差根据电网的高低频防线设置,受端电网直流闭锁或大电源失去情况下不触发系统低频减载动作,送端电网直流闭锁后不触发高频动作防线。

4)全景监视评估。除满足不同场景下的惯量需求评估,还可支持新能源脱网、机组非计划停运、直流闭锁后受端电网等低频运行场景和直流闭锁后送端电网高频场景下惯量水平的计算,实现转动惯量的态势感知。

1.3.2 新能源多场站短路比在线计算

新能源多场站短路比在线计算考虑多个新能源场站间的交互影响,实现新能源汇集站母线及机端短路比的在线计算校核,及时发现电网薄弱环节,提供辅助决策,支撑新能源安全可靠并网。

1)在线-离线数据整合。为满足机端短路比在线评估的计算准确性和计算范围要求,将离线数据和在线数据进行整合,如图3所示。根据在线数据确定新能源实时功率、机组开机方式、电网拓扑;根据离线数据获取新能源等值机模型和箱变参数,将计算范围由新能源汇集站母线延伸至新能源机端。

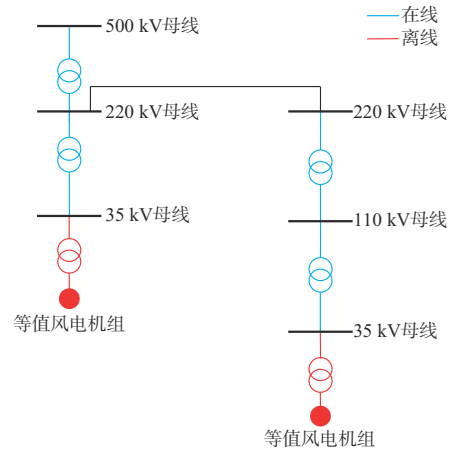


图3 在线和离线数据整合示意图
Fig. 3 Schematic diagram for online data integration with offline data

2)新能源多场站短路比计算。《电力系统安全稳定导则》^[12]给出了新能源多场站短路比计算方法,调度机构在离线方式计算中将其推广到了机端。参考离线方式计算方法,新一代在线安全分析根据实时潮流数据滚动计算新能源多场站运行短路比(multiple renewable energy unit operation short-circuit ratio, MROSCR),针对短路比水平较低的新能源机组进行告警。新能源场站*i*的MROSCR(用 $I_{MROSCR,i}$ 表示)计算公式如式(1)所示。

$$I_{MROSCR,i} = \frac{S_i}{P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \left| \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} P_j \right|} \quad (1)$$

式中: S_i 为新能源场站*i*机端母线短路容量; P_i 和 P_j 分别为新能源场站*i*和*j*机端实时出力; Z_{ii} 和 Z_{ij} 分别为新能源场站*i*机端处的自阻抗、互阻抗; n 为新能源场站数目。

针对新能源占比不断增加、接入形式多样化、局部地区出现了新能源并入弱交流电网等问题,文献^[15]提出了新能源多场站临界短路比概念,量化评估新能源接入规模,也可作为未来验证应用方向加以研究。

3)新能源功率控制辅助决策。当新能源多场站短路比指标越限时,针对短路比偏低场站,确定满足约束的可调整新能源场站集合及其调整范围,以总体调整代价最小为控制目标,生成新能源功率调整辅助决策方案。

1.4 应用生态

新一代在线安全分析基于标准、开放、共享的平台环境,践行服务化理念,灵活构建多类型应用场景,便捷开放地集成各类应用功能,实现业务功能按需组合和全局共享,打造开放灵活共享的应用生态。

新一代在线安全分析基于统一的人机界面和标准化的服务调用,灵活便捷地集成各类应用软件,支持同一应用功能软件不同研发单位的同质化展示和结果比对,支持实现计算功能交叉部署、第三方无差别调用,促进各类应用产品的持续迭代升级和充分竞争;应用场景通过“搭积木”方式调用各模块进行组合开发,开发环境更加便捷,同时,基于电力系统图形描述规范扩展,增强了界面表达能力,实现了界面组件交互联动,提升了不同应用场景的研发效率;提供方便、通用、标准的运维工具,支持模型、图形和数据的统一管理、分工维护和按需使用,为运维人员

提供系统规模不断扩大、应用功能日趋复杂环境下高效协同的一站式运行管理平台。

2 关键技术

新一代在线安全分析应用依托国分调控云平台建设,平台提供了模型统一构建、广域通信总线等技术,支撑在线分析实现了多源数据规范化访问、多种计算服务化调用和多类计算资源一体化管理、告警信息双活等功能。与D5000系统相比,新一代在线安全分析在稳控建模、故障集设置、计算效率、仿真精度及人机交互等方面取得了新的进展,如表1所示。

表1 在线安全分析关键技术比较
Table 1 Comparison of key technologies of online security analysis

系统	稳控设备建模	故障集	计算效率	仿真精度	人机交互功能
D5000系统	没有考虑稳控策略,计算结果和生产运行实际情况偏差大	故障集设置照搬离线计算场景,没有考虑运行工况变化	计算周期取15 min,不能满足高占比新能源接入后的计算时间要求	以秒级机电暂态仿真为主,不能满足高占比电力电子设备接入后计算精度要求	通过传统的组件拖拽实现,布局简单,展示效果单一,信息孤立,数据呈现不够直观
新一代系统	实现稳控策略等二次设备信息电子化管理及接入,计算结果能如实反映电网运行实际情况	考虑外部气象等数据信息,动态设置故障集	静态问题计算周期缩短至5 min以内,暂态问题计算周期缩短至5~10 min	初步实现在线机电-电磁毫秒级混合仿真,针对电力电子设备集中接入区域试点开展全电磁仿真,提升在线多时间尺度仿真分析能力	重构展示界面,通过图元调用、卡片关联以及场景融合,实现焦点信息高效互动展示

2.1 稳控系统建模技术

由于电网结构、稳定特性和故障类型不同,稳控系统及其装置在功能构造、动作方式、控制策略等方面差别较大,需要建立适应不同类型稳控系统的对象化模型。D5000系统在线安全分析应用中按调管范围将稳控策略内置于程序中,未对稳控系统建模,未实现省级以上调度机构共享计算;新一代在线安全分析应用结合电网计算和调控管理业务需求,综合考虑更多应用场景,按照国分调控云“对象、编号、关联、属性”模型设计原则,充分复用已有设备模型,基于函数和运算符定义的表达式统一描述各类稳控系统的动作逻辑,实现稳控系统对象化标准化建模,如图4所示。

- 1) 稳控系统是由多个厂站的安全稳定控制装置经通信网络联系在一起而组成的系统。
- 2) 稳控站点用于描述厂站内多个同等策略角色稳控装置的集合。
- 3) 稳控装置根据运行方式、故障条件等动作判据实施一系列稳控动作命令,实现切机、切负荷、快速减出力、直流功率紧急提升或回降等功能。
- 4) 稳控站点间通道描述2个稳控装置之间的稳控逻辑通道。
- 5) 稳控动作判据由稳控动作的方式约束、故障

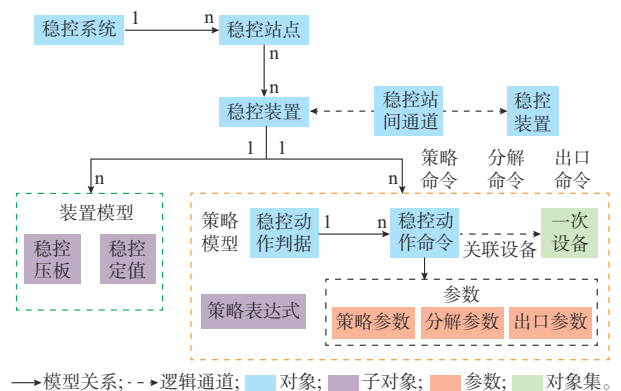


图4 稳控系统对象化建模示意图
Fig. 4 Schematic diagram for object-oriented modeling of stability control system

- 约束、潮流约束等条件集构成。
- 6) 稳控动作命令是描述稳控策略动作相关命令的总称,包含策略参数、分解参数及出口参数。其中,策略参数描述稳控动作命令的控制量、控制原则,分解参数描述控制量在不同厂站或设备间的分配原则,出口参数描述最终出口命令。
- 7) 稳控压板是稳控装置重要组成部分,用于控制稳控装置功能投退或出口回路通断,可以是硬件设备,也可以是软件控制逻辑。
- 8) 稳控定值指稳控装置内用于描述与装置策略

功能相关的参数。

9)策略表达式指由函数和运算符定义的用于描述稳控策略各类约束条件的表达式。

基于上述模型,在国分调控云中完成了中国华东频率协控系统 200 余套稳控系统建模,直观展示了不同运行方式和故障下稳控动作策略,已在新一代在线安全分析、调度员培训仿真系统等功能中应用。

2.2 考虑外部环境因素的设备故障概率生成方法

新一代在线安全分析考虑了外部环境、设备状态等因素,计算单一设备、多重设备故障概率,自动生成高概率预想故障集。特别是对于输电距离长且跨越多个气象分区的特高压线路,每个区域的气象条件差异很大,且在极端气象灾害时,存在多种外部气象因素和运行工况的组合作用,故障概率更大;对于密集通道、线路交叉跨越等,气象灾害可能导致多条线路同时故障。因此,需首先给出单条线路的故障概率,然后,考虑线路途经密集通道和交叉跨越、同塔多回架设等相关性故障特点,给出多条线路故障的概率。

1)单条输电线路故障概率生成方法。根据国分调控云提供的导线经纬度坐标划分网格,按沿线各网格的气象条件分别生成每一段故障概率;由于各段之间为串联关系,通过元件可靠性串联模型,得到整条线路的故障概率。考虑到在恶劣或灾变气象条件下,存在多种外部气象因素及运行工况组合作用的故障概率,任意一个发生时都能够导致线路故障。因此,如图 5 所示,将多因素组合视作“并联模型”,进而根据多因素评估线路故障概率。

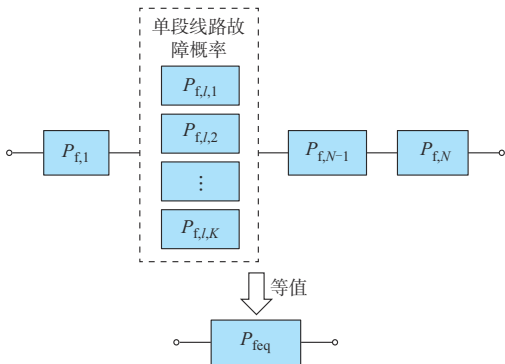


图 5 计及不同区段气象的输电线路故障概率等值模型
Fig. 5 Equivalent model of transmission line fault probability considering weather conditions in different sections

在时段 t ,对于单段线路 l ,考虑多气象因素组合的故障概率 $P_{f,l}(t)$ 表示为:

$$P_{f,l}(t) = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - P_{f,l,k}(t)) \quad (2)$$

式中: $P_{f,l,k}(t)$ 为第 k 种气象因素作用下的线路 l 故障概率; K 为该极端天气中可能存在的风险因素类型数目。

对于有 N 个分段的输电线路,时段 t 等值故障概率 $P_{feq}(t)$ 表示为:

$$P_{feq}(t) = 1 - \prod_{l=1}^N (1 - P_{f,l}(t)) \quad (3)$$

2)多重故障集生成方法。针对不同的关联输电线路,生成多重故障集的方法如下:

(a)同塔多回线路属于多重故障的“共因模式”,当同塔架设区段出现恶劣气象条件时,同塔架设线路全部进入多重故障集。

(b)针对交叉跨越线路,采用“连锁”计算模式,当交叉跨越线路所在区域出现恶劣气象条件时,根据故障概率排序;当上跨线路被选入多重故障组合时,被跨越线路按条件概率进入多重故障组合。

(c)密集通道属于“环境相依模式”,出现恶劣天气时,密集通道的所有线路进入多重故障组合选项,但每条线路的故障概率仍独立抽样。

2.3 在线计算效率提升技术

新一代在线安全分析从硬件适配和软件流程优化、任务调度、核心算法计算耗时等方面提高计算效率,缩短计算周期。

在硬件适配方面,针对在线安全分析计算特点,通过对中央处理器(central processing unit, CPU)、内存、磁盘不同组合进行对比测试,确定与计算规模、故障集数量相适配的典型硬件配置方案和并发运行实例个数,避免由于某项资源存在瓶颈导致系统整体计算性能下降。同时,全面比较机架式服务器与高密度服务器优劣关系,给出不同 CPU 核心数、内存配置下的并发案例个数。

在软件流程优化方面,在现有应用功能计算任务串行调度基础上,可在支持多个应用功能计算任务的同时将任务提交至并行计算平台进行动态调度,避免计算节点闲置;同时,实现了所有计算功能流程化监视,实时监视各环节耗时情况,耗时较长或计算停止时及时告警。

在任务调度方面,根据应用功能计算任务的规模、单个计算任务的预计耗时、计算节点数量和并行计算平台的调度开销时间,支持为每个应用功能指定计算任务的调度粒度。针对单个算例计算耗时较少的静态安全分析、短路电流计算等,增加计算任务算例数量,减少调度交互次数,缩短单个任务的调度管理时间;根据计算任务的预估执行时间优化调度

顺序,优先执行预估时间长的任务,提高不同计算节点计算任务执行时间分配的均衡性,缩短计算资源空闲等待时间。

在核心算法计算耗时方面,提升状态估计与在线安全分析交互性能,实现高风险故障的快速筛选,理想情况下详细仿真的故障集数量可减少90%;提高核心算法内部数据并行处理化程度,降低文件读写和数据遍历频次,大幅降低计算耗时。

与D5000系统在线安全分析相比,新一代在线分析应用中故障集由常规 $N-1$ 扩展至 $N-m$ 故障;并根据外部环境动态调整,状态估计时间由5 min降为1 min,静态安全分析和短路电流计算时间由15 min降为2 min,各种稳定类分析由15 min降为5 min。

2.4 在线机电-电磁混合仿真

新一代在线安全分析应用基于国分调控云搭建了各类型直流电磁暂态模型,将机电-电磁混合仿真应用于在线分析。考虑各区域电网系统保护、直流控保以及自动发电控制等不同时间尺度控制策略,实现电网安全稳定精细扫描,准确仿真换相失败、再启动等典型直流故障。

新一代在线机电-电磁混合仿真确保所有直流有功功率/无功功率在2 s内进入稳态,直流功率与潮流稳态功率的最大相对误差小于1%,可实现秒级全自动计算。

一是直流电磁暂态模型自适应自动初始化。依据机电侧直流输电模型及交流联络线的潮流信息设定钳位电源,为直流系统启动到平稳状态提供电压支撑,同时,隔离直流对交流系统的扰动,引导含控制保护在内的电磁直流模型快速进入稳态。直流电磁模型基于在线运行方式进行内部潮流计算,计算结果作为直流电磁模型的工况信息,对控制系统的指令、换流变压器的抽头位置以及滤波器投入的组数进行准确计算并初始化。混合仿真基于此初始化状态计算,自动校验和微调电磁模型,根据触发角/关断角的偏差量判断并上下调整一级换流变压器抽头位置,根据无功功率交换偏差量,按组对滤波器进行投切。

二是含大规模电磁网络的多端口自动解耦混合并行仿真。实现了基于图搜索的大电网电磁模型自动解耦和机电-电磁边界点网群解耦,机电网通过边界点拓扑分组,电磁网通过长线路解耦,实现了边界点矩阵求逆降维和电磁仿真并行效率的提升,降低了仿真分析耗时,确保混合仿真分析能够周期性在线运行。

目前,新一代在线安全分析已针对11回直流电

磁模型滚动开展混合仿真,受硬件资源限制,计算周期设为30 min,实时分析交直流系统相互影响。

2.5 人机交互技术

新一代在线安全分析按照对象化、服务化理念,以全网通用数据对象编码为基础,重构功能界面和交互体系,利用前后端分离、画面处理微服务化、广域终端交互、互动增强人机可视化等技术,构建了轻量化人机云终端,实现了标准、开放、通用的轻量化人机交互集成框架,支持灵活的数据接入及多厂家图元的多维度扩展与集成。

新一代在线安全分析通过服务化串联起核心计算功能,一方面,可直接获取到计算所需的全网全电压等级各类实时数据,既包括故障集、稳控模型及策略、稳定断面及限额等计算输入数据,也包括场站详细参数、接线方式、生产信息等相关数据;另一方面,系统中需要在在线安全分析信息的应用或用户,例如,电网、断面、直流等设备卡片,可通过服务调用方式主动获取在线分析的计算结果,实现了更广泛范围内信息的高效互通和实时共享,全方位、立体化高效感知电网运行状态。结合调控运行实际需求,新一代在线安全分析已对外提供稳控装置、动态模型和支持BPA/PSASP仿真软件的潮流数据等模型数据类服务,实现13类计算结果展示类服务,提供短路电流、 $N-1$ 灵敏度等计算类功能服务。

3 在线安全分析技术未来发展方向

在新型电力系统建设过程中,将长期面临安全-经济-环境矛盾,“保供应、保安全、促消纳”任务艰巨。作为电力系统感知和认知电网运行的重要手段,在线安全分析将承担更多风险防控重任。下一步,要细化各类设备建模,持续优化离线、在线模型参数一体化交互,实现安全稳定分析模型参数规范化管理和开放共享;推进在线计算架构和各层次数据管理模式优化,提升计算效率;深化安全分析校核技术,推进电力系统在线多时间尺度仿真能力建设,充分考虑运行工况的随机波动性,实现与人工智能等新兴技术的有机融合,构建多级调度一体的多层次应用体系;拓宽结果应用范围,强化在线分析对各专业支撑力度。

3.1 在线设备建模技术

3.1.1 新能源机组聚合建模和高效仿真技术

在线安全分析中,新能源机组多为集中式等值建模,通常建模到35 kV集电线,少量到220 kV集电线,离线方式计算中多数建模到690 V/400 V箱式变压器低压侧。此外,还存在部分新能源机组在线建模而离线未建模的情况。在线分析中用到的新

能源机组动态模型是从离线数据中获取,电压等级不一致容易造成参数不易匹配;在线和离线新能源机组等值建模原则不同,在数量和容量方面存在不一致情况,即使参数匹配一致仍无法使用;在线运行方式多样,量测和状态估计数据质量对仿真结果影响大。上述情况影响了在线分析对新能源机组仿真的精度,为此,需要提高在线、离线新能源机组建模的一致性,包括新能源厂站、机组数量、电压等级等,持续提高量测数据质量和状态估计结果可靠性,完善数据容错机制,削弱异常数据对计算的影响。

3.1.2 负荷在线聚合建模和精细化仿真技术

负荷种类多且存在时变性、分布性,导致负荷业务管理上存在人力成本高、建模周期长、模型时效性差、精准性不足等问题,影响了仿真计算结果合理性。今后,基于调控云平台,利用大数据技术贯通负荷侧调度、运检、营销等多业务数据,支持低电压等级新能源和负荷按需纳入计算,实现不同区域、不同站点、不同时间段的负荷模型参数计算,真正实现负荷模型按站分时分类建模;利用高性能计算技术、人工智能技术,实现精细化仿真,提升潮流计算、暂态稳定分析、小扰动稳定分析的准确性。

3.1.3 稳定限额和稳控策略的自动建模技术

稳定断面和稳控装置数量众多,且随着电网建设发展每年都会动态调整。目前,电网稳定限额和稳控策略模型维护工具还需进一步完善,例如,提升人机交互易用性,扩充稳控装置信息采集范围,支持稳控策略完整性和逻辑正确性的校验,提高运行维护效率。在此基础上,进一步结合人工智能相关技术,针对规范化的运行管理规定和稳控装置说明书文本,探索通过文本处理、语义识别等技术手段提炼出建模逻辑,实现稳控策略自动建模。

3.1.4 信息物理联合建模仿真技术

频发的寒潮、高温、台风等灾变冲击扰动将对电网运行造成灾难性影响,探索灾变冲击扰动影响下复杂电网物理和信息网络可靠性韧性提升方法,对确保能源安全、保证持续可靠供电具有重要意义。下一步,通过构建通用型多尺度仿真框架,拓展时步概念,用尺度可定义的事件取代时步;建立事件驱动仿真机制,用不同事件队列表示不同尺度仿真进程,实现多尺度并存;建立多尺度同步机制,通过控制不同尺度事件触发时刻,实现多尺度进程间的配合与协同;构建和完善信息共享机制,实现多尺度信息全网共享。

3.2 高效能计算技术

3.2.1 高性能并行计算技术/内存计算技术

目前,在线安全分析并行计算采用调度服务器

和计算节点之间“统一协调控制-任务分发-多核并行计算-结果回收”的软硬件计算架构模式,上下级主从机之间通过文件形式传输数据信息,执行具体计算任务的计算节点收到数据后,需遍历计算文件才能开展计算,负责计算结果统计的调度服务器需要遍历结果文件才能确定人机展示内容。未来,建议围绕业务需求并兼顾计算速度,构建CPU从主内存读写数据的数据访问机制,建立以分布式缓存为主体的并行计算体系,重点实现存储架构和计算模型的技术突破,规范内存数据格式、内存索引技术、数据压缩技术等,建立内存数据库或内存云体系,将算法下放到数据层,将现有并行任务提升至基于内存的并行处理层级。

3.2.2 状态估计提升技术

当前国分调控云实时数据平台基于秒级汇集的数据采集与监控(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统数据进行状态估计。随着新能源大规模并网,由于SCADA数据量测量没有统一时标,在状态估计中新能源量测数据的波动性、间歇性会引入较大的量测误差。后续在传统SCADA量测的基础上,引入具有统一时标的同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)的量测量,研究分析SCADA与PMU数据的匹配问题,实现利用PMU量测量提高状态估计可观测性及计算精度。

3.3 安全稳定分析技术

3.3.1 多时间尺度仿真技术

目前,新一代在线安全分析已部署机电-电磁混合仿真功能开展直流运行特性分析,初步具备毫秒级的电磁仿真能力。下一步,一方面需要开展全电磁仿真技术在线应用研究,对电力电子设备集中接入区域进行局部全电磁建模仿真,精准分析电力电子设备导致的振荡风险^[16];另一方面,需要纳入能模拟电网连锁故障和慢速动态变化过程的中长期动态仿真技术,构建非线性超大规模电力系统动态特性机理、事故特征及其安全稳定措施的全过程完整分析体系。中长期动态仿真采用与机电暂态仿真统一的动态元件模型,机电暂态仿真和中期计算不需要进行模型切换。现有计算机技术支持电网数小时以上连续动态过程的模拟计算,不存在硬件和数值算法方面的障碍,中长期动态仿真技术已具备在线应用条件,实测建模和在线实现可同步开展^[17]。

3.3.2 人工智能与仿真技术融合

新型电力系统安全稳定分析(潮流计算、稳定控制、断面限额等)被表征为一个非线性、多目标和多约束的高度复杂优化问题^[18],传统解析算法往往

会陷入局部最优求解漩涡,推演泛化能力有限。近年来,深度学习、强化学习及其组合深度强化学习、知识图谱等人工智能方法在电力系统中的探索性研究日益增多,但在样本合理性、泛化迁移能力、专业知识融合、环境适应性、计算鲁棒性等方面距离实际应用还有提升空间。在线安全分析具备开展人工智能方法应用的数据优势,每天产生725 GB数据,每年至少产生258 TB调度运行数据及对应的各类稳定分析数据,可真实反映电网运行状态和稳定水平。经过一定时间积累和数据推衍,具备开展大模型人工智能方法应用的物质基础,具备融入调度运行等专业领域知识、构建面向调控运行的安全稳定分析伴随系统/平行空间/人在回路^[19]的基础应用条件。例如,针对分布式电源、负荷侧储能等可调资源快速增长、换流器等非线性元件控制逻辑复杂等带来的设备建模、负荷等值、计算效率等在线仿真分析问题,通过采用深度学习、强化学习等方法,提取海量在线分析数据中的电网安全轨迹演化特征,并研究依靠数据指标刻画电网稳定状态的高效分析方法来实现精准辅助决策。

3.3.3 多级调度协同的运行控制辅助技术

随着大电网送受端、上下级、输配电网耦合日益紧密,连锁故障影响范围持续扩大,对多级调度协同控制能力提出更高要求。未来需研究适用于大电网多级调度协同安全稳定防御的在线预防控制优化决策方法,提升严重故障风险辨识和协同处置水平,具体包括:通过多级调度的数据整合在大范围、多调控层级电网中实现预防控制措施的搜索,实现多类控制措施快速识别;研究支持多目标和多类型安全稳定问题的预防控制辅助决策技术,实现减少控制代价、促进新能源消纳和降低电网安全稳定运行风险的综合协调目标;研究计及事故风险等级的多级调度预防控制辅助决策技术,将存在安全事故风险分区的减负荷量分配给其他分区,以降低或规避电力安全事故风险;研发基于调控云的在线运行方式智能决策闭环控制应用系统,实现在线辅助决策控制策略的实时下发与自动执行;基于调控云全网信息共享架构,通过风险评估结果、在线辅助决策等信息的协同共享,实现各级调度机构在线安全协同分析。

3.4 在线安全分析结果应用

新一代在线安全分析在进一步提升电网预想预判预处理风险防范能力基础上,可将其研发过程中产生的共性技术和海量结果数据用于支持电网生产各专业部门工作。在电网规划方面,提出电源、网架优化加强目标;在设备管理方面,给出重载线路及主变、断路器等设备改造方向;在运行方式校核方面,

优化补充重要运行方式;在计划安排方面,给出机组组合、设备检修安排相关建议,支撑不同时间尺度场景下的电网安全运行工作。进一步,叠加电力市场交易数据,有力支撑市场出清、安全校核、效益评价及行为演化分析;叠加碳交易信息,从能源市场、电力市场和金融市场等视角,支撑构建考虑电力市场均衡、综合能源互补、博弈-协调-优化的低碳经济调度机制。

4 结语

在线安全分析是新一代调度技术支持系统的重要组成部分,也是大电网安全稳定分析理论及技术实现成果转化的载体,辅助调度运行人员及时掌握电网运行状态。通过系统研发和技术实践,有效融合了建模仿真、稳定分析、高性能计算、人机可视化等多专业研究成果,实现了多数据源、多模态运行数据高效融合,将长期停留在验证阶段的新理论、新技术及时转化为服务于大电网实际运行的软硬件产品。

新一代在线安全分析研发建设,恰逢中国新型电力系统建设和数字化转型实践关键阶段,坚持服务标准化、维护便捷化、用户友好化,在系统架构、平台设计、数据管理、接口规范方面形成了大量通用化成果,解决了不同应用间信息的高效交互和良性互动,使架构更科学、分析更快速、生态更开放、人机更友好。

下一步,重点针对计算效率、计算精度和结果运用方面开展以下工作。

1)持续提升计算效率,从结构、应用、接口等多方面优化处理流程,降低数据流转损耗,提高全计算链条数据质量。

2)跟踪电网安全稳定分析方法和控制技术最新研究成果,深入推进电磁类计算工具的在线化应用,不断提高在线计算结果精度。

3)针对电网规划、设备运行、调度运行等专业需求,实现在线分析计算数据的高效应用,结合机器学习、人工智能、数据挖掘等新技术,分析电网特性,掌握运行规律,储备丰富的数据生产力资源。

参考文献

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [2] 陈国平,李明节,许涛,等.关于新能源发展的技术瓶颈研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical

- bottleneck of new energy development [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [3] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制 [J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [4] 许洪强. 面向调控云的电力调度通用数据对象结构化设计及应用 [J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2248-2254.
XU Hongqiang. Structured design and application of power dispatching universal data object for dispatching and control cloud [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2248-2254.
- [5] 许洪强, 蔡宇, 万雄, 等. 电网调控大数据平台体系架构及关键技术 [J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4798-4807.
XU Hongqiang, CAI Yu, WAN Xiong, et al. Architecture and key technologies for big data platform in power grid [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4798-4807.
- [6] 许洪强, 尚学伟, 张令涛, 等. 大电网调控系统业务中台设计与研究 [J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2222-2230.
XU Hongqiang, SHANG Xuewei, ZHANG Lingtao, et al. Design of business middle platform of bulk power grid dispatch and control system [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2222-2230.
- [7] 许洪强, 孙世明, 葛朝强, 等. 电网调控实时数据平台体系架构及关键技术研究与应用 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 157-164.
XU Hongqiang, SUN Shiming, GE Zhaoqiang, et al. Research and application of architecture and key technologies for power grid real-time dispatching and control data platform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 157-164.
- [8] 许洪强, 姚建国, 南贵林, 等. 未来电网调度控制系统应用功能的新特征 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 1-7.
XU Hongqiang, YAO Jianguo, NAN Guilin, et al. New features of application function for future dispatching and control systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 1-7.
- [9] 许洪强, 姚建国, 於益军, 等. 支撑一体化大电网的调度控制系统架构及关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 1-8.
XU Hongqiang, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Architecture and key technologies of dispatch and control system supporting integrated bulk power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 1-8.
- [10] 许洪强, 赵林, 景艳艳, 等. 面向大电网的人机云终端设计 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 130-136.
XU Hongqiang, ZHAO Lin, JING Shenyang, et al. Design of human-machine cloud terminal for large-scale power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 130-136.
- [11] 汪际峰, 沈国荣. 大电网调度智能化的若干关键技术问题 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 10-16.
WANG Jifeng, SHEN Guorong. Some key technical issues on intelligent power dispatching of bulk power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 10-16.
- [12] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定导则条文释义与学习辅导 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
National Technical Committee for Standardization of Power Grid Operation and Control. Interpretation and study guidance of guidelines for power system safety and stability [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020.
- [13] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [14] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 114-127.
WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Minimum inertia estimation of power system considering dynamic frequency constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 114-127.
- [15] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497-506.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497-506.
- [16] 熊卿, 张路寅, 张庆华, 等. 适应新型电力系统的高性能电磁暂态仿真技术及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 43-52.
XIONG Qing, ZHANG Luyin, ZHANG Qinghua, et al. High-performance electromagnetic transient simulation technology and application for new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 43-52.
- [17] 郭剑波, 王铁柱, 罗魁, 等. 新型电力系统面临的挑战及应对思考 [J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 32-43.
GUO Jianbo, WANG Tiezhu, LUO Kui, et al. Development of new power systems: challenges and solutions [J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 32-43.
- [18] 王甜婧, 汤涌, 王兵, 等. 传统方法与人工智能: 潮流控制优化算法的现状、挑战与未来方向 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1799-1818.
WANG Tianjing, TANG Yong, WANG Bing, et al. Traditional methods versus artificial intelligence: optimization algorithms for power flow control in state of the art, challenge and future directions [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1799-1818.
- [19] 乔骥, 郭剑波, 范士雄, 等. 人在回路的电网调控混合增强智能初探: 基本概念与研究框架 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 1-15.
QIAO Ji, GUO Jianbo, FAN Shixiong, et al. Human-in-the-loop hybrid-augmented intelligence method for power system dispatching: basic concept and research framework [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 1-15.

王国春(1967—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向:电力系统调度运行管理。E-mail:wang-guochun@sgcc.com.cn

许洪强(1964—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向:电力系统调度运行管理。E-mail:xu-hongqiang@sgcc.com.cn

冯长有(1982—),男,通信作者,博士,正高级工程师,主要研究方向:电力系统调度自动化管理。E-mail:changyou-feng@sgcc.com.cn

(编辑 顾晓荣)

Technical Architecture and Future Prospect for New Generation of Online Security Analysis

WANG Guochun¹, XU Hongqiang¹, FENG Changyou¹, YU Zhihong², XU Wei³

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: To adapt to the challenges faced in the construction process of new power systems, according to the concept of “inheritance, integration and innovation”, the overall architecture for the new generation of online security analysis is proposed. In the areas of model data, functional systems, business scenarios, and human-computer interaction, through the orderly cooperation of basic platform, real-time measurement, electrical network analysis and simulation computation, the connection and interaction between multi-source data and online analysis applications are realized, such as equipment model parameters, real-time measurement information, stability control model, stability limits. For the emerging new characteristics of power system operation, new functions are developed such as online electromechanical-electromagnetic hybrid simulation and online evaluation of rotational inertia and renewable energy multi-feed short-circuit ratio, which make the new generation of online security analysis architecture more scientific, analysis faster, simulation more accurate, ecology more open, and human-computer more friendly. The relevant achievements have been deployed on the dispatching and control cloud platform and served for dispatching agencies at or above the provincial level of the power system. Finally, the future development trends are proposed from four aspects of equipment modeling, computing efficiency, simulation analysis, and result application.

Key words: online security analysis; model data; functional system; business scenario; human-computer interaction

