

秒级响应电网在线分析软件平台

周二专¹, 冯东豪², 严剑峰¹, 周孝信¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192;

2. 国网电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

A Software Platform for Second-order Responsiveness Power Grid Online Analysis

ZHOU Mike¹, FENG Donghao², YAN Jianfeng¹, ZHOU Xiaoxin¹

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: A new second-order power grid online analysis system software platform is introduced for the development of the next generation of online analysis systems with the real-time responsiveness. An approach to enhance the response speed of the online analysis system is presented. An online analysis platform solution architecture, its implementation techniques and re-usable software modules are presented. Based on the extension of the platform, a new online analysis system was built. The new system was deployed and running in the dispatching center in Hunan province for demonstration purpose. The preliminary testing data indicates that the new online analysis system can achieve second-order end-to-end response speed.

KEY WORDS: grid online analysis; DSA; digital twin; in-memory computing; parallel computing; complex event processing; machine learning; neural network model

摘要: 介绍一个新的电网实时在线分析系统软件平台, 以支持下一代秒级响应在线分析系统的研发。文章介绍了在线分析系统响应速度提升的总体思路, 在线分析软件平台技术路线、实施方案和平台的通用功能模块。基于该在线分析软件平台的拓展, 研发了一套新在线分析系统。该系统已经在湖南省调部署并在线示范运行。初步测试数据表明, 新在线分析系统可以达到秒级的响应速度。

关键词: 电网在线分析; DSA; 数字孪生; 内存计算; 并行计算; 复杂事件处理; 机器学习; 神经网络模型

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0083

0 引言

随着特高压大电网的形成, 我国电网形态和运行特性呈现高度耦合的一体化特征。电网规模不断扩大, 电力电子设备的大量应用, 交直流之间、大区域电网之间相互影响进一步加强, 新能源并网容量大幅度增长, 对电网的在线监视、分析和控制提出严峻挑战, 对电网在线分析(DSA)的实时性提出

了更高的要求^[1]。国网组织研发的 D5000 智能电网调度控制系统^[2], 基于一体化平台集成了实时监控与预警等四大类应用, 目前已推广至全国省级以上及众多地区电网调度机构。然而现有调度控制系统是从弱互联中、小电网阶段发展起来的, 调度业务运作基本按照省级电网内部平衡模式开展, 存在层级多、链条长、业务协作水平低、全局决策能力不足等问题。文献[3-4]提出了“物理分布、逻辑统一”的新一代调度控制系统建设思路以及系统功能框架设计。文献[5]指出大电网全局监控需要具有更广阔的监视范围、更多元的监视内容、更强大的实时数据处理能力、更高的数据实时性与一致性、更大寻优空间的协调控制, 以及更为友好实用的辅助决策支持。可以看到快速在线分析是实现新一代调控系统, 特别是大电网全局监控, 关键支撑技术之一。

由故障引起的大电网机电暂态过程以秒级速度发展, 本文的实时、快速是指数据处理和仿真计算具有秒级响应速度。目前, 国网在线分析模型约 4 万节点规模, 国网调控中心运行的在线分析系统从数据采集、状态估计、数据整合、分析预警、裕度分析到最终形成辅助决策需要约 10min 完成^[6]。我国的 DSA 计算周期目前设定为 15min。文献[7]深入和全面讨论了电网实时在线分析系统需求和实施技术路线, 展望了其在下一代具有秒级响应的实时调控系统中的主要应用场景。

在线分析目前通常仅包含实时分析应用模式, 新一代调控系统需要增加研究分析模式和趋势分析模式。实时分析模式、研究分析模式和趋势分析模式的一体化实施将对在线分析软件系统的响应速度和开放性、模块化设计提出挑战^[8]。预防控制

辅助决策是大电网在线安全稳定分析控制系统的主要功能^[9]。对于在线安稳预防控制而言,在线分析计算速度是一个关键指标。当电网出现安全稳定隐患时,需要尽快(通常是秒级)给出调整措施。在当前的在线分析系统中,通常采用计算机集群,利用分布式并行计算技术来满足对计算速度的要求^[10]。然而,现有的 DSA 分布式并行计算通常是在过程(Process)层面实施,这类并行计算的实施方案难以充分和有效地利用新多 CPU/核计算机硬件架构^[11]。

互联电网的完整性在系统干扰下可能会受破坏,系统解列甚至可能导致大面积停电。为了减轻系统干扰可能造成的不良影响,特殊保护系统(SPS)被广泛应用以保护系统完整性^[12]。文献[13]报道了一种特殊保护系统实施方案,该系统每隔 30s 进行一次预想故障的暂态稳定分析计算,并根据发电机功角的加速特征预先筛选合适的控制措施。一旦发生故障,系统在 150ms 内对发电机开关发出跳闸信号,完成快速切机。值得注意的是特殊保护系统实施中采用的快速在线分析方法是特殊场景和用途研发,通常基于降阶电网计算模型,不具备通用性和泛化能力。

SCADA 目前采用主备机方式同时处理所有实时测量数据,主要用于实现电网实时运行稳态信息的监视和设备控制,并与其他高级应用提供可靠的稳态数据基础服务。新型分布式 SCADA 系统的研发^[14-15],预期可以解决 SCADA 目前在数据吞吐能力、实时性、可扩展性、可靠性等方面面临的挑战,为新一代快速在线分析系统提供更高质量的实时测量数据。

在国际上,美国 PJM^[16]和欧盟^[17]最新研发的调控系统架构采用 SOA 架构,支撑调控平台开放式、模块化软件整体设计原则,同时支撑能量管理(EMS)和电力市场管理(MMS)应用业务。我国新一代快速在线分析系统需要建立新的全局一体化软件架构和研发支撑新架构实施的相关软件技术。依托国家电网公司千人计划项目“提升电网在线分析系统性能的关键技术研究”,研发了一套新在线分析系统,并已于 2018 年在湖南省调在线示范运行。运行实测数据表明该系统具有秒级的响应速度。本文介绍支撑该系统实施的在线分析软件平台,包括平台软件架构设计、平台支撑软件模块集成和基于平台拓展开发的在线分析应用案例。

1 总体思路

本文研究工作的聚焦是在线分析系统的整体

响应速度提升问题,这是一个全局系统优化问题。本小节讨论在线分析系统速度提升的总体思路。

1.1 复杂软件系统开发方法

体系架构、支撑平台和业务应用是电网调控系统的核心^[3]。现代调控系统是一个大型、复杂的软件系统,其研发应该遵循成熟的复杂软件系统开发方法论^[18]。值得注意的是文章^[3-5]对新一代调度控制系统建设的论述主要是在功能框架层面。从软件系统开发角度看,论述了“ What-需要做什么”。而本文聚焦是从“ How-怎么做”角度论述在线分析软件系统建设。本文介绍的在线分析软件系统研发包括三个主要步骤:1)根据在线分析业务和 D5000 调控系统集成需求,设计快速在线分析系统软件架构;2)根据设计的系统架构,研发在线分析系统软件实施平台和相关支撑通用软件模块;3)根据具体应用需求,通过软件实施平台功能拓展,开发在线分析应用系统。

目前,D5000(也包括其他)的在线分析系统是由传统离线计算程序的在线化应用打造而成^[19],基于周期性批处理计算模式。采用这种体系架构的主要原因是受传统离线计算程序缺乏灵活和延展性的限制。这是一种自底向上(Bottom-up)、应用到架构的软件设计方法,得到的顶层软件系统架构受底层应用程序实施方案的影响和限制。另外目前的在线分析系统中没有独立的应用级软件平台层,通常仅有一个数据整合层^[8],主要功能是给在线计算程序准备输入数据文件。本文介绍的研发工作采用自顶向下(Top-down)、架构到应用的软件设计方法,并且增加了一个全新的应用级软件平台层。本文讨论的重点是该应用级平台的技术路线和实施方案。

1.2 新在线分析系统架构

根据在线分析业务和 D5000 调控系统集成需求,在研究中提出了一种新的在线分析系统架构^[6],如图 1 所示。在线分析系统速度的提升是一个全局系统优化问题。目前,在 D5000 的在线分析系统架构中,SCADA、状态估计、在线分析采用串行架构,采用周期性批处理计算模式,具有分钟级响应速度(图 1 中分钟级路径)。新架构采用分钟级常规在线分析和秒级快速在线分析并行架构。在新路径中(图 1 中秒级路径),使用数据网格来承载电网实时分析模型^[20]。通过订阅 SCADA 系统发布的电网变更事件(RTU),实时更新分析模型。对分析模型的更新也作为模型更新事件发布出去。这些模型更新事件由复杂事件处理(CEP)引擎订阅,进行态势感知分析。根据 CEP 引擎内设置的 CEP 规则,如果

感知到电网安稳态势出现较大变化,CEP 引擎将驱动基于数据驱动、人工智能的快速 DSA 模块执行安稳评估。新架构(图 1 中秒级路径)基于电网实时分析模型,采用事件驱动、反应式计算模式,支持内存计算,采用 CEP 引擎控制和协调计算任务的执行流程,其响应速度设计为秒级。

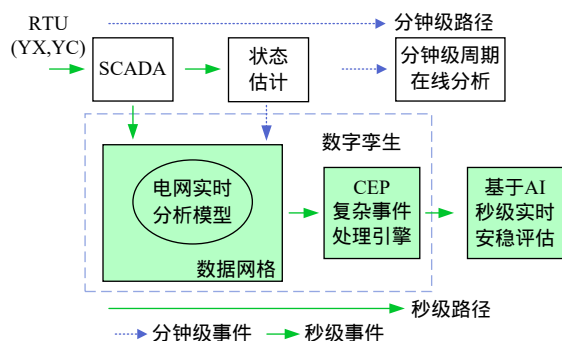


图 1 新在线分析系统架构

Fig. 1 A new online analysis system architecture diagram

数字孪生自 2017 年以来每年都在 Gartner 的十大战略技术趋势列表中。数字孪生概念最初是为解决大规模复杂制造问题而提出的^[21]。在数字孪生实施方案中,虚拟模型可以实时地更新,对物理系统进行“镜像”。对虚拟模型进行分析和仿真可以实现实时辅助决策支持。在本文介绍的研发中,实现了一个在线分析数字孪生系统,如图 1 所示。在在线分析数字孪生中,电网分析模型(虚拟模型)通过订阅 SCADA 消息跟踪电网(物理系统)更新,即镜像物理电网,用于支撑电网在线分析实时态势感知功能的实现。根据实际系统的性能测试数据,这种“镜像”可以达到实时,具有毫秒延时^[20]。此外,内存计算和 CEP 规则也可以应用于虚拟模型,进行态势感知分析,提供实时辅助决策支持。对数字孪生及在电网在线分析中应用的全面和深入讨论超出本文范围,请参见文献[22]。

1.3 技术路线

D5000 电网调控系统^[2]是一个一体化通用平台,集成了实时监控与预警等四大类应用,如图 2 所示。在 D5000 调控平台上运行的众多业务应用的需求差异很大,同时在线分析专业性很强。因此,D5000 平台很难对在线分析提供特殊、专门以及可定制的支持和服务。目前 D5000 平台中的在线分析应用的响应速度为分钟级。本文的技术路线是增加一个新应用级在线分析软件平台,如图 2 所示。此应用级平台在 D5000 通用平台上运行,对在线分析提供深度、可定制的支持和服务,是对 D5000 功能的一个补充。新应用级在线分析平台基于数字孪生理念,支持秒级在线应用的实施。

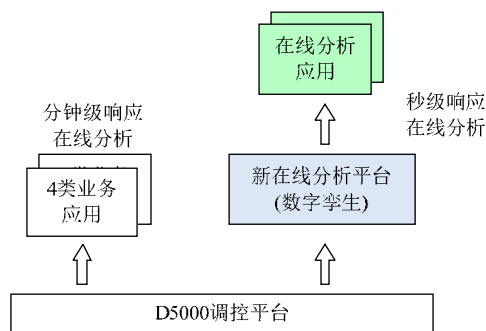


图 2 调控系统整体解决方案

Fig. 2 EMS high-level solution architecture

目前的在线分析数据主要流程如图 3(a)所示。电网测量信息(RTU)通过 SCADA 和状态估计处理形成潮流断面。目前在 D5000 平台中,潮流断面到达图中数据整合层延时为分钟级^[6],这是影响在线分析响应速度提升的主要限制之一。然后潮流断面再经过数据整合和计算过程控制层^[8],驱动预防控制辅助决策在线分析应用,主要包括静态安全、暂态稳定、动态稳定、静态电压稳定、频率稳定^[9]。在这些在线分析应用中,静态安全、静态电压稳定、频率稳定基于代数方程求解,暂态稳定、动态稳定基于微分方程求解。

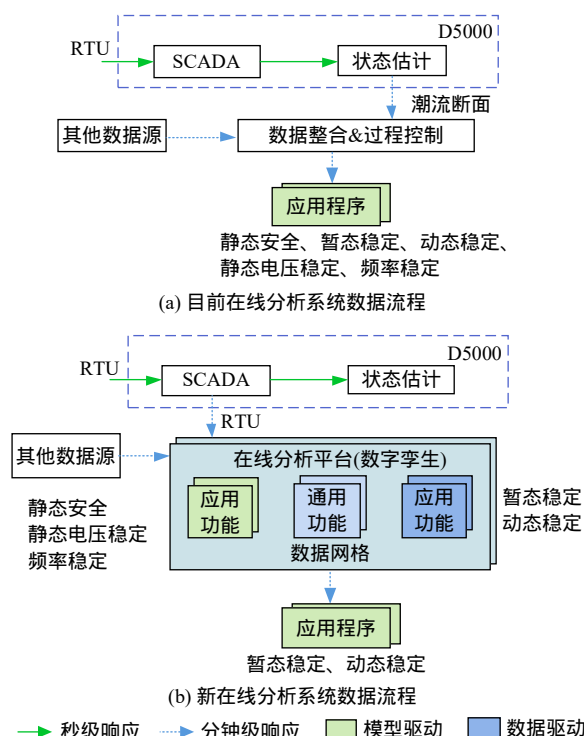


图 3 在线分析系统数据流程比较

Fig. 3 Comparison of online analysis system data flow

基于新架构的在线分析数据主要流程如图 3(b)所示。通过 RTU 的订阅在线分析平台从 D5000 平台获取电网实时测量信息,具有秒级延时。在线分析平台基于内存计算可以高效处理 RTU 信息、更新电网分析模型,形成具有亚秒级延时(以 D5000

实时库信息为参照)的物理电网镜像,以支撑秒级响应的在线分析应用实施。在线分析平台提供的通用功能目前包括一体化电网分析模型、内存计算、并行计算、复杂事件处理、机器学习等(详见第2小节讨论),以及基于内存计算的潮流算法和状态估计算法,基于并行计算的高效 $N-1$ 预想故障分析算法。在线分析平台基于分布式数据网格实施,可以为轻量级基于代数方程求解的模型驱动应用(静态安全、静态电压稳定、频率稳定)和数据驱动应用提供运行环境(runtime)支撑,还可以为重量级基于微分方程求解的模型驱动应用(暂态稳定、动态稳定)提供计算初始断面输入数据支持。

比较图3(a)、(b),在线分析响应速度提升技术路线的关键点为:1)将从D5000平台获取状态估计后潮流断面(分钟级延时)改变为直接从SCADA中订阅电网运行状态测量信息RTU(秒级延时);2)电网分析模型承载于数据网格中,从而可以实时被更新和实施基于内存计算的快速仿真计算。

2 在线分析软件平台

基于新在线分析系统架构和数字孪生理念,在本文介绍的在线分析系统研发中,打造了一个在线分析软件平台。此应用级平台在D5000通用平台上运行,对秒级在线分析应用的实施提供深度、可定制的支持和服务。本小节介绍在线分析软件平台实施方案。

2.1 电网实时分析模型

在线分析平台中,如图1所示,电网分析模型^[21]承载在一个数据网格中。分析模型的实时更新效率对在线分析平台的总体响应速度有决定性影响。以目前国网4万节点规模电网模型为测试案例,研发中对电网分析模型更新性能进行了全面测试。测试结果表明:分析模型能够高效地处理RTU测量信息,并对其进行自我更新,以跟踪电网运行状态变化,跟踪延时为毫秒级。

电网分析模型采用面向对象设计、基于键值(Key-Value)方法在数据网格中建模。电网分析模型建模采用包括模型驱动建模技术、代码自动生成技术以及内存数据网格技术。并且研发了实际电网调控系统的适配集成工具,实现了与D5000平台实时库、CIM/E格式QS文件以及PSASP LF格式文件进行数据交互。电网分析模型支持内存计算、多级别并行计算,支持与CEP引擎和基于机器学习的神经网络模型的无缝集成。

电网分析模型是一个物理、计算一体化模型,

主要由物理模型(节点/开关模型)和计算模型(母线/支路模型)两部分组成,并在数据网格内存中缓存物理模型和计算模型的关联关系,通过拓扑分析建立两部分的映射和自动协同更新关系。还在电网分析模型上研发了一个全新的状态估计应用。该应用的特点是状态估计算法在数据网格中运行,基于内存计算通过内存直接访问,高效处理储存于计算模型中的电网运行实时断面数据,如图4所示,避免状态估计计算过程中跨计算节点的数据移动。

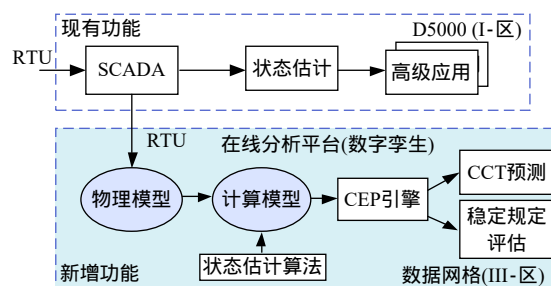


图4 示范在线分析系统架构

Fig. 4 Pilot online analysis system architecture

2.2 内存计算和并行计算

电网分析模型支持基于内存计算^[22]的电网仿真计算算法的实现。内存计算的主要思想是“移动算法而不是移动数据”,最初是为了解决大数据处理情况下的数据移动引起的数据处理效率降低问题而提出的。将内存计算方法应用到电网分析模型建模和电网仿真^[11]计算中,可以提升在线分析数据处理效率和系统总体响应速度。在该方法中,电网分析模型承载在数据网格中,仿真数据在接收到仿真计算请求之前已经按电网仿真计算需求被存储就绪。仿真计算算法通过直接内存访问处理数据,使得仿真计算过程中的数据移动最小化。在传统的在线分析系统中,通常是首先将代表当前电网运行状态的数据从某个存储节点导出,创建仿真计算初始断面。然后,将该断面作为仿真计算输入数据被发送到某一或一组计算节点。其中的数据交换通常是通过数据文件形式完成,对在线分析数据处理效率和系统总体响应速度有较大的负面影响。

电网分析模型支持高性能并行计算方法的实现。电网分析模型设计为多线程安全(multi-thread safe)。众所周知,面向对象编程(OOP)中的对象在并行处理中可能会产生副作用(side effects)。近来,为了有效地利用多CPU/核计算机硬件架构,编程范式有变化,从以OOP为中心的编程方法逐渐转到面向函数编程(FP)方法。通过引入FP编程方法和Monad软件设计模式,在电网分析模型上实现了高性能并行计算。以国网4万节点电网模型为测试案

例,对并行计算性能进行测试。测试结果表明:在 0.5s 内可以完成全网 $N-1$ 预想故障分析扫描(共计 15 789 个故障)。并行计算性能测试是在一台 4CPU (40 核)服务器上完成的,与串行处理方法相比,理论加速比为 40,而实际取得了约 27 倍的加速。

2.3 复杂事件处理(CEP)

在目前的在线分析系统中,信息处理执行流程是周期性、静态(预先设置)和线性的,具有分钟级响应速度。新在线分析系统架构基于电网分析模型,采用事件驱动、反应式计算模式,采用复杂事件处理引擎控制和协调计算任务执行流程^[6]。如图 1 所示,电网分析模型:1) 订阅电网变化事件以实时更新模型自身;2) 当有扰动发生时,通过订阅代表扰动的事件或事件集,CEP^[23]引擎即时对事件响应,启动必要的计算步骤,以提供辅助决策支持,协助问题的解决。

在线分析软件平台包含一个聚焦为“面向事件驱动的规则评估”复杂事件处理方法通用 CEP 引擎。该 CEP 引擎由 3 个主要功能模块组成:1) 规则引擎;2) 内存;3) 状态机。CEP 引擎设计基于事件驱动架构,引擎的输入和输出都是事件。在解决大规模 CEP 问题时,CEP 内存模块通常可以由独立的外部分布式数据网格实现,CEP 引擎提供一个与外部存储交互的通用接口。

在在线分析软件平台的实现中,电网分析模型承载在一个分布数据的网格中。电网分析模型通过集成可以被视为是 CEP 引擎的一个组成部分,即内存模块。通过这种方式,电网调度员的调控运行经验可以表示为 CEP 规则或 CEP 状态变化约束。将这些规则和约束应用到电网分析模型,可以实现电网运行状态的实时态势感知。

2.4 机器学习

在线分析软件平台支持基于数据驱动、机器学习^[24]的快速安稳评估应用的实现。基于机器学习的应用有两个主要步骤:1) 训练;2) 预测。

在训练步骤,将一组训练案例导入到机器学习引擎中来训练神经网络(NN)模型。平台基于谷歌的 TensorFlow 机器学习引擎进行 NN 模型训练。机器学习训练输出是一组 NN 模型。目前,平台已有的 NN 模型包括故障极限切除时间(CCT)预测、电压稳定性预测和低频振荡阻尼比预测。训练步骤是在离线完成的。电网稳定仿真训练样本来自我国某区域电网实际在线分析生产系统(DSA)产生的历史数据,包括 8794 个在线潮流断面和稳定仿真结论,时间跨度 30 天,时间间隔为 5 min。

在预测步骤,利用训练好的 NN 模型在线预测电网运行状态的态势,进行基于机器学习安稳评估。具体实现过程是首先将 NN 模型加载到在线分析平台数据网格内存中。然后将电网分析模型中存储的电网运行实时断面信息作为 NN 模型的输入进行预测,进行基于机器学习安稳评估。在线分析软件平台为基于机器学习的快速安稳评估应用提供高效(毫秒级延时)运行环境。

2.5 小结

如图 3(b)所示,在线分析平台支持数据驱动和传统模型驱动的在线分析应用的实施,提供一组通用、基础软件功能模块,包括上面 2.1—2.4 小节讨论的 4 个功能模块。电网分析模型是在线分析平台的核心,其中的物理模型状态和计算模型状态可直接输出并导入数据驱动应用;在其中的计算模型上进行状态估计产生具有收敛潮流结果断面可输出并导入传统模型驱动应用,实现数据驱动和模型驱动在线分析的一体化交互和融合。

上面 2.1—2.4 小节讨论的软件功能模块的具体实施细节已在文献[20-25]中详细介绍。本研究在这几篇文章介绍的研究工作基础上,在软件平台,软件模块的融合、集成和功能拓展方面进一步深化了研究。该平台通过数据网格给基于内存计算的在线分析应用提供运行环境。依托该平台,通过这些通用功能模块拓展,以及与现有、将开发的在线分析应用功能通过服务集成,预期可以更快研发出高性能、功能强的大的新一代在线分析系统。

3 在线分析应用

通过拓展在线分析软件平台,研发了一套新在线分析示范应用系统。该系统已于 2018.12 在国网湖南省电力有限公司调控中心部署,并且在线示范运行。

3.1 在线分析系统

如图 4 所示,研发的新在线分析系统为图中的新增功能部分。图中上部分(现有功能)是湖南省调现有在线分析系统。在新增功能部分中,物理模型、计算模型、状态估计算法和 CEP 引擎为在线分析软件平台通用功能模块。CCT 预测和稳定规定评估为具体应用模块,是根据湖南省调具体应用需求通过平台扩展研发的。

电网分析模型由物理模型和仿真模型组成。如图 4 所示,电网分析模型获取由 SCADA 发布的 RTU 信息,更新物理模型以及计算模型,实时跟踪电网运行状态变化。在进行在线分析时,基于内存

计算的状态估计对计算模型实施计算，形成潮流断面。然后，由 CEP 引擎驱动基于神经网络的 CCT 预测应用和稳定规定评估应用。

3.2 示范系统

湖南省调 D5000 平台处理湖南省内以及部分相关，如祁韶直流、鄂湘断面等实时数据。根据电网二次系统的特点，调度系统中物理隔离装置实现安全区 I/II 到安全 III 区的数据完全单向传输。D5000 安全区 I/II 直接涉及生产控制，有极高的安全要求。因此考虑运行安全问题，在线分析系统应用示范工作实际部署在现场调控系统 III 区，如图 4 所示。D5000 安全区 I、III 的 SCADA 数据的同步周期为 60s。

3.3 测试结果

湖南在线分析计算模型约 1000 节点规模。示范应用的响应速度性能测试结果如表 1 所示。

表 1 湖南示范应用测试结果		
Tab. 1 Testing results of the Hunan pilot application		
项目	具体内容	耗时/s
步骤 1	物理模型与 SCADA 保持同步。	0.1
步骤 2	进行拓扑分析形成分析模型， 进行状态估计计算(合格率约 98%)。	0.1
步骤 3	基于实时分析模型(包括物理模型和 路径 1 分析模型)进行稳定规定评估。	<0.1
步骤 3	基于分析模型，通过神经网络模型进行 路径 2 快速预测极限切除时间 CCT。	<0.1

分析：新在线分析系统在 300ms 内可以完成包括物理模型更新、计算模型更新、状态估计、及基于机器学习的安稳评估或基于 CEP 电网调控稳定规定规则评估全过程，可以取得毫秒级响应速度。在模型数据处理方面，新系统可以形成相对 RTU 测量消息延时约 200ms 的初始潮流断面。在状态估计方面，新系统能在 50ms 内完成状态估计计算全过程，合格率约 98%，与现场生产中使用的 D5000 状态估计系统合格率(约 98.5%)差别在 0.5%之内。D5000 状态估计系统有多年的运行经验，各类量测数据、模型等细节处理得更加完善。基于内存计算的新状态估计系统采用的算法在原理上与 D5000 的状态估计系统基本一致，在计算效率，开放性，灵活性等方面有所提升。新系统使用 Java 编程语言，基于 InterPSS 电网对象模型^[26]和 CSparseJ 开源稀疏矩阵求解器^[27]研发。其性能提升关键点是：1) 算法和模型在同一个进程中执行，算法可通过内存直接访问模型数据^[22]；2) 多处使用并行处理，包括形成矩阵、QR 分解等步骤；3) 电网模型局部更新和局部拓扑分析^[21]。

4 结语

本文介绍一个新的电网实时在线分析系统软件平台，以支持下一代秒级响应在线分析系统的研发。文章讨论了在线分析系统响应速度提升的总体思路，介绍了在线分析平台技术路线、实施方案和平台的通用软件功能模块。

基于在线分析平台的拓展，研发了一套新在线分析系统。该系统已经在湖南省调部署并在线示范运行。初步测试数据表明，新在线分析系统在 300ms 内可以完成包括物理模型更新、计算模型更新、状态估计、及基于机器学习的安稳评估或基于 CEP 的电网调控稳定规定规则评估全过程，可以取得毫秒级响应速度。在该平台上研发的基于内存计算的全新状态估计应用能在 50ms 内完成计算任务，合格率约 98%，计算精度满足实际生产要求。

大电网在线分析应用场景数量巨大、“变化无穷”，同时随电网形态改变不断演化。本文研发的在线分析平台目前聚焦电网在线分析计算数据方面的处理效率问题，其主要功能是给在线计算算法提供具有毫秒级延时和高保真度仿真计算输入数据。值得指出的是毫秒级延时和高保真度数据是保证在线分析准确度的必要条件，但不是充分条件。在利用机器学习、数据驱动方法进行快速安稳评估方面，近来国内外有不少研究，但该方法的准确度和适用性目前还没有定论。

基于在线分析平台研发的在线分析应用目前仅在省级电网两个相对简单应用场景中示范应用。接下来的工作，结合 2018 国家重点研发计划“互联大电网高性能分析和态势感知技术”项目，计划将其应用于 2 万节点、16 回直流规模的大电网在线机电-电磁超实时仿真软件系统实施。

参考文献

[1] 郑超, 侯俊贤, 严剑峰, 等. 在线动态安全评估与预警系统的功能设计与实现[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 55-60.
Zheng Chao, Hou Junxian, Yan Jianfeng, et al. Functional design and implementation of online dynamic security assessment and early warning system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 55-60(in Chinese).

[2] 辛耀中. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.
Xin Yaozhong. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8(in Chinese).

[3] 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 control system supporting integrated power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 1-8(in Chinese).
- [4] 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 functions of future power grid dispatching control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 1-7(in Chinese).
- [5] 郭建成, 南贵林, 许丹, 等. 大电网全局监控内涵与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 1-7.
Guo Jiancheng, Nan Guilin, Xu Dan, et al. Connotation and key technology of global monitoring for large power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 1-7(in Chinese).
- [6] Zhou M, Yan J F. A new solution architecture for online power system analysis[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 250-256.
- [7] Zhou M, Yan J F, Zhou X X. On power grid real-time online analysis[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(1): 236-238.
- [8] 孙树明, 谢昶, 吕颖, 等. 电力系统在线安全稳定分析应用模式[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2875-2881.
Sun Shuming, Xie Chang, Lü Ying, et al. Power system online security and stability analysis application modes[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2875-2881(in Chinese).
- [9] 方勇杰, 鲍颜红, 徐伟, 等. 电力系统安全稳定预防控制在线计算方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 199-207.
Fang Yongjie, Bao Yanhong, Xu Wei, et al. Review of online computing method for preventive control of power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 199-207(in Chinese).
- [10] 鲍颜红, 徐泰山, 许立雄, 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 32-35.
Bao Yanhong, Xu Taishang, Xu Lixiong, et al. Cluster computing mode for transient stability-constrained preventive Control implementation and total transfer capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 32-35(in Chinese).
- [11] Zhou M, Feng D H. Parallel contingency analysis for multi-CPU/core computing environment[R]. IFAC CSGRES 2019, Korea.
- [12] Yao Z W. Forewarned is forearmed - an automated system for remedial action schemes[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2014, 12(3): 77-86.
- [13] Kokai Y. Advanced SIPS using PMU and SCADA data[R]. EPCC Workshop, 2013.
- [14] 郑宗强, 翟明玉, 彭晖, 等. 电网调控分布式 SCADA 系统体系架构与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 71-77.
Zheng Zongqiang, Zhai Mingyu, Peng Hui, et al. Architecture and key technologies of distributed SCADA system for power dispatching and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 71-77(in Chinese).
- [15] 赵林, 周二专, 范泽龙, 等. 面向快速响应的电网在线分析系统架构研究[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 95-100.
Zhao Lin, Zhou Mike, Fan Zelong, et al. Architecture of online analysis system for power grid oriented to rapid response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 95-100(in Chinese).
- [16] Ott A. Experience with advanced technology in the PJM market[C]// IEEE Transmission & Distribution Conference, 2014.
- [17] Ioannis K. Implementation of a massively parallel dynamic security assessment platform for large-scale grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3): 1417-1426.
- [18] Brown Paul. SOA 实践指南-应用整体架构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [19] Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[R]. White Paper, 2014.
- [20] Zhou M, Yan J F, Feng D H. Digital twin framework and its application to power grid online analysis[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 391-398.
- [21] Zhou M, Feng D F. A new modeling approach for power grid online analysis[R]. Berlin: The 21st IFAC World Congress, 2020.
- [22] 周二专, 冯东豪, 武志刚. 内存计算技术及在电网分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 1-7+25.
Zhou Mike, Feng Donghao, Wu Zhigang. In-memory computing and its application to power system analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 1-7+25(in Chinese).
- [23] 周二专, 冯东豪. 面向电网在线分析的复杂事件处理(CEP)引擎研发[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 105-113.
Zhou Mike, Feng Donghao. Development of complex event processing (CEP) engine for application to power grid online analysis[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2019, 43(20): 105-113(in Chinese).
- [24] Shi D Y. Analysis of online quick judgment of transient stability based on Siamese network[C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON 2018). Guangzhou, 2018.
- [25] 郭健. 高性能在线分析计算现状与协同计算关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 149-159.
Guo Jian. Current status of high-performance on-line analysis computation and key technologies for cooperating computation[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2018, 42(3): 149-159(in Chinese).
- [26] Zhou M, Huang Q H. InterPSS: a new generation power system simulation engine[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1711.10875>.
- [27] Wendykier P. CSparseJ - a concise sparse matrix Java package[EB/OL]. <https://github.com/rwl/CSparseJ>.



周二专

收稿日期: 2020-03-09.

作者简介:

周二专(1960), 男, 博士, 通信作者, 主要研究方向为大电网调度控制技术、大数据技术在电网调度中的应用、电力系统仿真建模, E-mail: mike.zhou@interpss.org;

冯东豪(1991), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统仿真与建模、在线数据整合、内存计算技术在电力系统仿真和分析中的应用, E-mail: dh.feng@foxmail.com;

严剑峰(1977), 男, 博士, 从事 PSASP 动态安全评估(PDSA)软件开发工作;

周孝信(1940), 男, 主要研究方向包括电力系统分析与控制、电力系统数字仿真和柔性交流输电系统(FACTS)。

(责任编辑 王晔)