

大电网运行映像模型及关键技术研究

孙华东, 黄彦浩, 李宗翰, 赵兵, 王虹富, 何春江, 李勤新, 郑超
(电网安全全国重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Research on Operation Mapping Model and Key Technologies of Large Power Grid

SUN Huadong, HUANG Yanhao, LI Zonghan, ZHAO Bing, WANG Hongfu, HE Chunjiang, LI Qinxin, ZHENG Chao
(National Key Laboratory of Grid Security (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The integration of massive renewable energy into the grid has resulted in significantly power-electronic features of power systems, which presents new challenges for the secure and stable operation of the new power systems. The existing contingency analysis approaches based on time-domain simulation techniques are difficult to address issue above effectively. Facing the demand of joint decision-making analysis between simulation calculation and non-simulation technology, including response control, artificial intelligence, and other technologies, this paper proposes a novel technology for grid operational analysis with core technology of mapping model. The system employs real-time measurement data of power systems as its input. It accurately presents the system dynamic process and constructs an analysis algorithm based on non-time-domain simulation. Nevertheless, a data interface between the mapping model and simulation analysis is built. The system combines features of simulation calculation, analysis, and artificial intelligence algorithm, which satisfies the requirements of a new type of power system in terms of speed of operation analysis and precision of strategy formulation. In this paper, key technologies such as the theoretical concept, application system and system architecture of mapping model are proposed. To validate the feasibility of the system proposal, a prototype system is built with practical grid parameters implemented.

KEY WORDS: mapping model; real-time measurement; online analysis; power grid operation

摘要: 大规模新能源并网导致电力系统呈现高度电力电子化特征, 对新型电力系统的安全稳定运行带来新的挑战, 现有基于时域仿真技术的预案式分析方法难以有效应对这一问题。面向响应控制、人工智能等非仿真技术与仿真计算共同分析决策的需求, 该文提出了大电网运行映像模型及其关键技术。映像模型以直接反映系统动态过程的实时量测数据为输入, 支持非时域仿真的系统分析算法, 并可与仿真计算接

口, 从而有力支持仿真计算方法、解析计算方法, 以及人工智能方法三者的结合, 满足新型电力系统在运行分析速度、策略制定精度等方面的要求。该文提出了映像模型的理论概念、系统架构、关键技术, 以及应用体系, 并结合实际电网数据构建了原型系统, 验证了技术方案的可行性。

关键词: 映像模型; 实时量测; 在线分析; 电网运行

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0323

0 引言

现代电网的发展和赓续与电网分析方法的升级和换代, 两者如影随形、相互促进、共同演进。准确、快速、全面地反映不断变化的物理电网特性, 是电网分析技术突破的方向^[1]。长期以来, 随着交直流混联电网规模的扩大、动态元件的增多, 动模仿真、数字仿真等技术不断进步, 支撑了电网发展的需要^[2-4]。

当前, 新能源并网规模不断扩大, 电力系统电力电子化特征愈加凸显, 电网运行的不确定性、动态行为的复杂性发生空前变化, 电网仿真计算面临诸多挑战^[5-7]。

1) 柔性直流、新能源等电力电子设备的复杂性导致仿真建模困难, 需要投入大量的人力物力, 模型研究较之设备投运有一定滞后, 计算精度受限。

2) 仿真模型参数更新滞后, 如负荷模型、新能源发电模型等, 尚存在计算参数一次建立、长期使用的情况, 与经济、社会的高速发展存在一定脱节, 影响计算精度。负荷在线建模、发电设备参数在线辨识等参数更新技术, 尚需巨量投入才能实用化。

3) 为提高计算精度, 近年来电磁暂态仿真和机电-电磁混合仿真得到了长足发展, 但是也极大地增加了计算量, 仿真计算时间难以缩短到实时水平, 使得以仿真为基础的电网运行分析无法做到“实时分析、实时决策”, 难以根本性地应对新能源大规模接入带来的系统快速变化。

为了弥补仿真分析的不足,近年来业界开展了有关响应控制技术^[8]的理论研究,电网的量测可以分为能够跟踪系统振荡过程、基于广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)或直接基于同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)的动态或实时量测,以及基于数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA),主要用于体现潮流状态的静态量测。响应控制技术主要基于实时量测信息并结合少量系统参数,实现对系统稳定状态的快速判别和控制策略的实时制定,目前已在理论技术和工程应用方面取得了显著进展^[9-11]。此外,以海量量测和仿真样本为基础的电力系统安全稳定智能分析与控制技术也取得了长足进步,相关成果逐步实用化^[12]。

响应控制和人工智能技术所构建的数学模型与仿真计算模型存在一定差异,主要在于以量测数据为基础开展建模工作,特别是动态量测数据的接入和快速更新,以及根据算法需求简化非必要信息。在可以预见的将来,仿真计算、以响应控制算法为代表的解析计算,以及人工智能计算将共同应用于电网运行与控制,三者相互配合以解决不同时间尺度、不同难度的电网运行分析、控制决策问题。因此,亟需构建新型电网计算分析模型,以适应这三类算法的需要,具体需求如下:

一是各类静态和动态量测数据的接入和实时更新,从运行分析和决策需求出发,实现对系统运行状态的快速孪生;二是基于孪生结果高效支持仿真分析、解析计算分析、人工智能分析,为各类分析方法提供统一数据源;三是能够为不同时间尺度的反演和推演分析提供有效支撑。

目前,在电网运行分析领域,在量测数据接入和运行状态孪生^[13-14]方面已开展了部分研究工作和工程实践,主要包括在线安全稳定分析系统(dynamic security assessment, DSA)和数字孪生系统。

1) 基于智能电网调度控制 D5000 平台的 DSA 系统^[15-17],采用关系型数据表和文件组织电网计算数据,按照 5 或 15min 时间间隔进行仿真计算,校验故障和安全稳定运行关键指标,并根据校验结果进行辅助决策分析,给出系统运行方式调整建议。

2) 基于直流潮流建立的数字孪生系统,采用面向对象方式组织电网计算数据,可以在百毫秒级生成潮流,进而基于并行计算在秒级完成静态 N-1 校核,并支持运行限额的在线校核。该系统已在湖南电网投入实际生产^[18-20],系统性能在近两年的实际应用中得到了验证。

此外,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”^[21-22]探索了基于动态仿真的电网运行数字孪生技术,通过持续进行机电-电磁混合仿真计算,采用与量测数据同步的方式,使得计算过程与系统变化相一致^[23]。当系统发生扰动时,从持续进行的仿真过程中切出一个断面,进行快速的超实时计算和结果分析。

上述工作为构建新型电网计算分析模型提供了坚实基础,针对未来电网运行控制需要,本文深入分析了提出了作为新型计算模型的电网运行分析映像模型理论概念,讨论了映像模型基本架构、与现有技术的差异、应用体系,以及实现方式和关键技术等问题。

1 电网映像的概念

1.1 电网映像的定义

目前电网运行分析已有计算模型以仿真模型为主,包括网络模型和动态元件模型两大部分,支持稳态和动态计算。根据计算的时间尺度和模型的详细程度可以分为机电暂态模型和电磁暂态模型。

新型计算模型将动态和静态量测数据与仿真计算的模型融合,支持仿真、解析、人工智能三者一体的实时计算、分析、校验、决策过程,本文将其称为“映像模型”,其逻辑结构如图 1 所示。

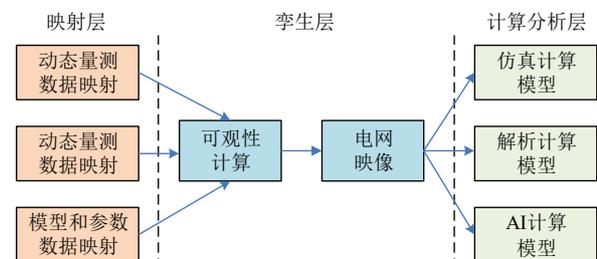


图 1 映像模型的逻辑结构

Fig. 1 Logical structure of the mapping model

所谓“映像”是指客观事物在人脑中的反映,同样的事物会在不同人的心里会留下不同的映像。映像模型需要基于系统的动态量测信息形成跟随系统实时变化的状态序列,结合静态量测和动作信号跟踪系统拓扑变化。同时,还需引入网络元件计算模型及参数数据信息,通过映射与动态和静态量测对应,进而不经动态仿真计算,直接实时生成系统随时间连续变化的电网映像,逼真反映系统状态和特性,并可在此基础上进一步衍生出支持仿真计算、解析计算,以及人工计算所需的模型。

以 U 代表系统状态量测, T 代表拓扑连接, P 代表元件参数, t 代表时间,则映像模型 M 可表示为

$$M=M'(T,P)+\Delta M((\Delta U,\Delta T,\Delta P),\Delta t) \quad (1)$$

其中： Δ 表示离散的间隔； M' 表示初始建模的映像模型； ΔM 表示更新的映像模型信息，是 Δt 的函数。从式(1)可以看出，映像模型理论上由初始的网络拓扑、元件参数，与按离散时间间隔更新的系统状态、网络拓扑，以及元件参数共同构成，对于 ΔU 、 ΔT 、 ΔP ，更新的时间间隔 Δt 可能不同，按目前的技术条件， ΔU 更新可与WAMS的数据服务更新同步，达到秒级； ΔT 可以与SCADA形成的QS数据更新同步，达到分钟级； ΔP 可以与在线负荷建模等参数更新系统的时间同步，为小时级。

对于仿真计算，可以基于电网映像每个时刻的全网状态，结合状态估计算法生成所需的潮流计算模型，之后再与元件动态模型结合实现时域仿真。由于映像模型可以跟踪系统动态过程，因此可以生成振荡过程中间时刻的潮流状态；对于不需要全网潮流收敛的解析计算，可以直接基于映像模型获取关注元件的量测结果和物理参数进行计算；对于人工智能计算，可以直接基于电网映像进行，也可以根据特征输入需要补充必要的元件参数。

针对电网映像形成过程涉及的量测误差、测量点缺失、量测结果对齐等问题，可基于获得的信息进行参数计算，这里称之为“可观性”计算。通过可观性计算，形成完备的电网映像，同时为形成潮流计算数据，支持仿真计算奠定基础。

1.2 映像技术与现有技术的差异

可以看出映像模型支持下的电网计算与现有应用存在以下差别：

1)与 DSA 的差异主要有：① DSA 基于 SCADA 量测经状态估计后形成的潮流，需通过仿真得到系统在预想故障情况下的动态过程。映像模型基于动态量测直接形成系统的当前动态过程。② DSA 主要支持仿真计算，映像模型同时支持仿真、解析、AI 计算。③ DSA 主要用于预防控制，计算周期为分钟级，映像模型可以实时跟踪系统动态变化，与响应控制和人工智能算法结合，有能力支持百毫秒级实时分析。

需要强调的是，映像模型可以为 DSA 提供初始潮流，基于映像模型的仿真计算类应用完全可以基于 DSA 进一步发展。因此，映像模型及其相关技术并非是要取代 DSA，而是与 DSA 形成衔接和补充。

2)与 WAMS 应用的主要差异有：① WAMS 应用以监控及监控数据分析为主，而映像模型旨在支持系统安全稳定分析及决策。②除了 WAMS 数据

外，映像模型还接入 SCADA 和网络元件计算模型，经整合后形成对仿真、解析、人工智能 3 种计算的支持。③映像模型还可根据需要进行扩展、整合故障录波、安控装置信息等更多类型的数据源，用于支持更复杂的应用需求。

3)基于直流潮流建立的数字孪生系统利用 SCADA 量测，基于仿真计算构建各类功能，虽然其可以在百毫秒级生成潮流，但是无法像映像模型那样，利用动态量测跟踪系统的实时动态过程，如扰动造成的振荡，因此该技术本质上与 DSA 相似，依然受到仿真计算技术的限制。

4)基于动态仿真的电网运行数字孪生技术，核心是采用连续进行的仿真计算来模拟电网实时变化，并非像映像模型技术利用动态量测直接形成电网的运行状态，通常需要持续的基于量测对计算过程进行矫正。映像模型是基于量测的孪生，可以作为矫正参照，并为仿真计算提供扰动信息。在获得矫正和扰动信息后，仿真可以加速实现对后续系统变化的超实时模拟，相当于在映像模型信息基础上的仿真推演。

上述 3 种技术都是以仿真计算为基础建立的，因此同样面临的模型、参数、速度等挑战，映像模型技术是突破这一难题关键路径之一。

2 映像系统基础平台的架构

基于映像模型的概念、应用体系，以及当前可用技术，可以构建大电网映像系统基础平台。该平台作为映像模型应用体系的初始系统，面向调控运行分析场景，接入电网动态量测数据，实现电网映像模型与实际电网的同步演变，进行连续百毫秒级快速分析，计算稳定特征、辨识稳定性质、给出控制策略。映像系统基础平台的架构共分为七个功能模块，分别是量测数据接入、实时映像电网、映像模型同步演化、响应驱动分析、响应驱动控制策略生成、智能增强分析。系统的实现架构如图 2 所示。

1)量测数据接入功能模块：通过动态数据接入，从智能电网调度技术支持系统 D5000 平台消息总线采用生产-消费多线程方式实时获取 PMU 数据。通过稳态数据接入，利用调控云的数据采集接口或 SCADA 实时数据库提供的数据库访问接口实时获取 RTU 数据，经过数据高速缓冲后，通过流式数据处理为大电网映像模型系统实时提供高质量的稳态/动态数据服务。

2)实时映像电网功能模块：从量测数据接入模块流数据处理结果中获取连续涌入的，具有时序

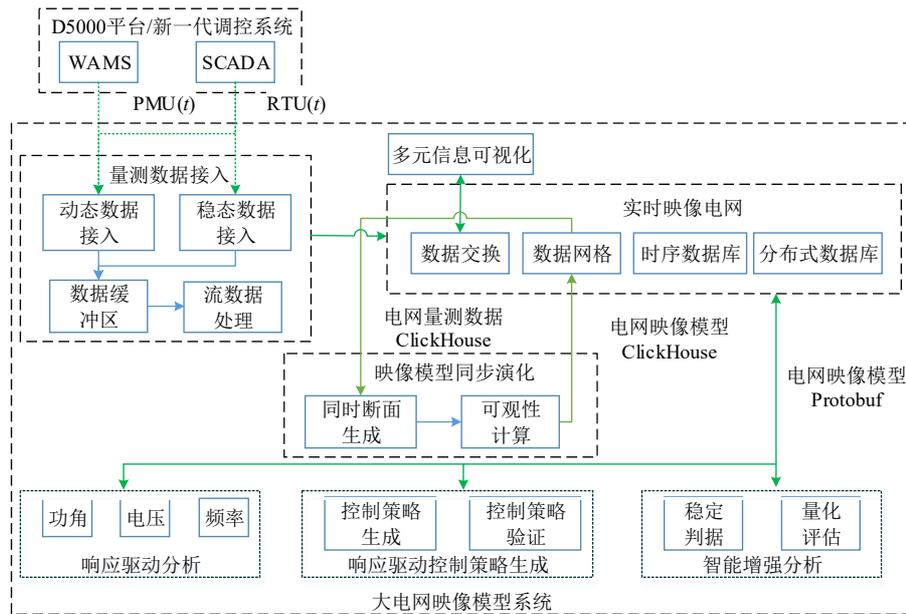


图2 大电网映像模型系统架构

Fig. 2 Implementation architecture of the mapping model

特征的所有稳态/动态量测数据,按预定的窗口确定数据采集时间段,处理缺失的测点量测数据,形成可供分析计算使用的连续时间段数据,存入分布式内存网格和时序数据库,并按照预定条件将内存中数据转移至分布式关系数据库持久化存储。

3) 映像模型同步演化功能模块:利用快速可观性计算等方法,处理量测时钟不同步、测点不全、数据污染误差等问题,快速形成广义动态潮流,快速形成电网映像,实现电网映像模型与实际电网的同步演变。

4) 响应驱动智能分析和决策功能模块:基于实时电网映像,集成功角、电压、频率等各种计算分析算法,进行连续百毫秒级快速分析,计算稳定特征、辨识稳定性质、给出控制策略,并基于实时电网映像进行验证。

5) 多元信息可视化功能模块:主要对电网映像和基于映像模型的各类算法计算分析后的结果进行展示。

3 映像系统实现的关键技术

3.1 映像模型数据结构

映像模型的数据结构设计是映像模型实现的基础。考虑电力系统发展建设、正常运行、故障扰动等不同时间尺度演变过程对信息记录的需求,采用面向电力系统设备元件物理描述的设备模型关系,可建立基于案例集合、节点集合、元件集合、拓扑结构、模型参数、运行状态、运行参数、模型参数定义、运行参数定义9类数据表组成的映像模

型数据结构,支持对同一套数据中同时存在的多时间尺度多种信息的无损、无冗余记录,如图3所示。

其中,案例集合表用于记录全部案例的基本信息,节点集合表用于记录全部节点的基本信息,元件集合表用于记录全部元件的基本信息,拓扑结构信息表用于按时间记录全部元件的拓扑结构信息,模型参数信息表用于按时间记录全部元件的模型参数信息,运行状态信息表用于按时间记录全部元件的运行状态信息,运行参数信息表用于按时间记录全部元件的运行参数信息,模型参数定义表用于定义设备模型参数清单,运行参数定义表用于定义设备运行参数清单。

该数据结构从描述某时间点电力系统单一状态信息扩展为描述某时间段电力系统演变过程信息,同时兼容对某时间点电力系统单一状态信息描述的能力,突破了在同一套数据中电力系统拓扑结构、模型参数、运行状态及参数固定不变的局限性,实现了基于同一套数据描述电力系统演变过程,具备以下特点:

1) 减少数据冗余:由于不需要采用多套独立的计算数据即可描述电力系统演变过程,避免了对相同的拓扑结构、模型参数、运行状态及参数进行大量重复的信息记录。基础数据不随时间而显著增长,随时间变化的数据仅记录变化信息,采用继承-派生机制可以显著减少不同的案例之间的重复数据,不仅节约了数据存储成本,还有助于提高数据提取和分析效率。

2) 适应多时间尺度演变过程:在拓扑结构信

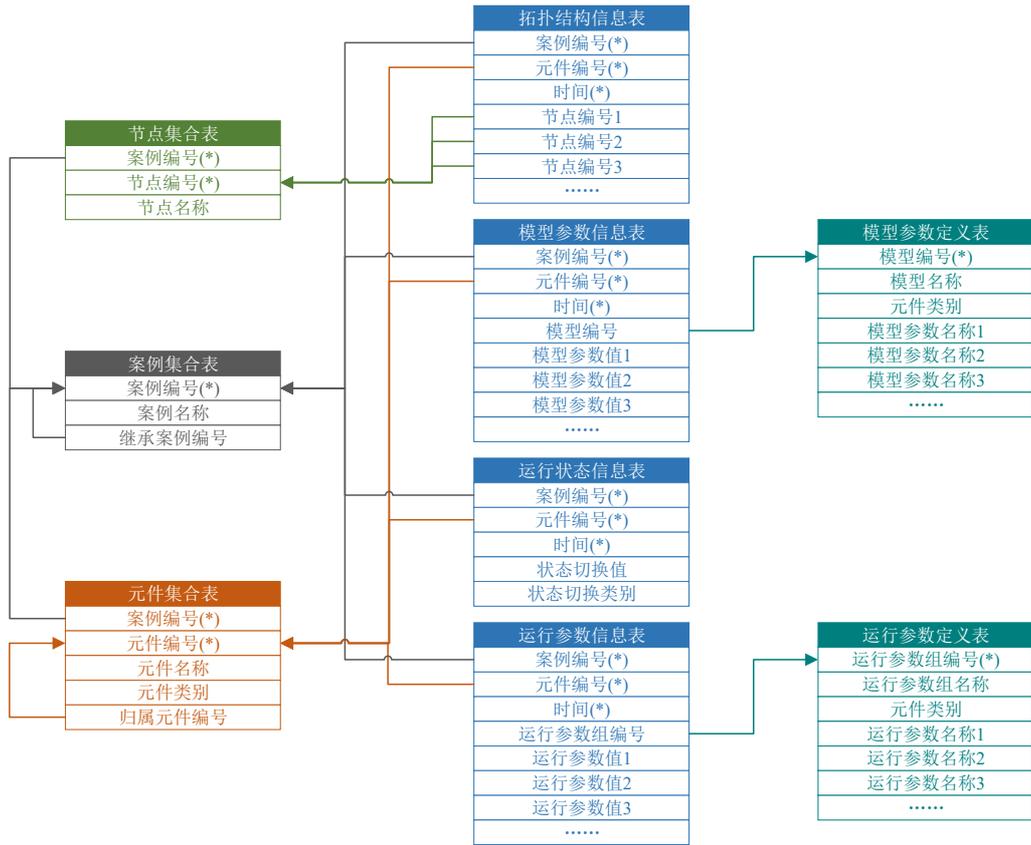


图 3 大电网映像模型数据结构
Fig. 3 Data structure of the mapping model

息表、模型参数信息表、运行状态信息表、运行参数信息中，每个元素是否需要数据更新的判断规则是相互独立的，每个表、每个案例中的每个元素都拥有独立的带时标的的数据序列，能够充分适应从电力系统发展建设到故障扰动、开关动作等不同时间尺度演变过程对信息记录的需求，并且支持对同一套数据中同时存在的不同时间尺度的不同信息的无损、无冗余记录。

3) 精确描述拓扑结构变化：节点是构成电力系统拓扑结构的基础，拓扑结构信息表专门用于描述元件与节点的联结关系。对于案例包含的任一元件，在该表中至少需存在一条记录以描述其起始拓扑结构信息；当某元件拓扑结构在某时刻发生了变化，如开关动作，则需相应地增加一条记录来记录该变化。这种描述拓扑结构变化的机制是精确的，同时也是无冗余的。

3.2 高速数据处理

映像系统需要快速处理大量量测数据，不断更新映像模型内容。对于电网运行状态，最常用的量测是 PMU/RTU，其数据接入处理方案如图 4 所示。通过多线程方式，将接收到的 PMU 数据按照消息总线发送的格式进行解析，形成符合映像模型数据结构格式要求的映像电网实时数据，按遥测和遥信

数据类型分别发送到分布式消息队列 Kafka 中指定的 Topic 下进行数据高速缓冲。

接收到的 RTU 数据写入实时映像电网的分布式消息队列 Kalka 和时序数据库 InfluxDB 中。此后，映像模型系统利用消息总线从固定通道接收事件，写入分布式消息队列 Kafka 中进行数据高速缓冲。

经过数据高速缓冲后，通过流式数据处理为实时映像电网提供高质量的稳态/动态数据服务，通过量测数据接入从流数据处理中获取连续涌入的，具有时序特征的所有稳态/动态量测数据，按预定的窗口确定数据采集时间段，处理缺失的测点量测数据，形成可供响应控制分析计算使用的连续时间段数据，存入分布式列关系数据库 ClickHouse 和时序数据库 InfluxDB 中，实现 1s 量测数据，约 700ms 完成映像模型同步更新。

3.3 模型演化机制及评价体系

在实际电网中，各类电源、负荷，以及电气设备的参数具有时变性，例如线路电阻会随温度变化，负荷组成会随社会生产生活时序演变等。为了对物理电网进行准确映像、精确分析计算，需要实时定位模型演进方向，对模型结构、参数进行修正，保证映像模型与物理电网的实时同步。同时，还需构建映像模型的评价体系，保证大电网映像模型的

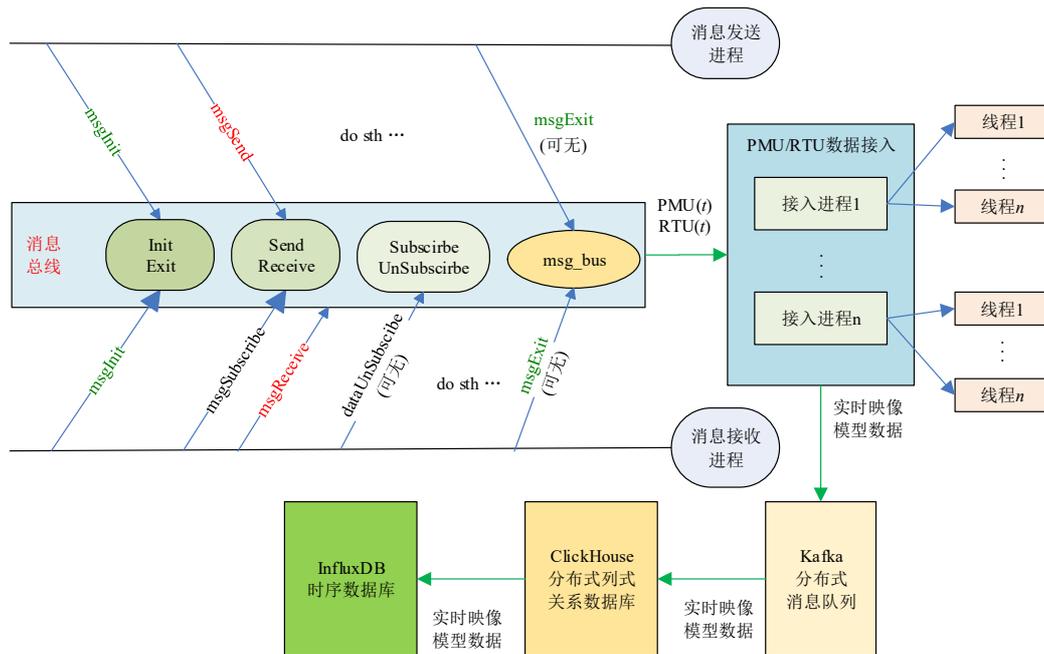


图4 PMU/RTU数据接入方案
Fig. 4 Data access scheme of PMU/RTU

有效性。

基于量测对电网计算模型进行修正的工作目前已有开展，具有代表性的是基于营销或调度数据的在线负荷建模技术及其应用^[24]，主要是基于同负荷成分、负荷功率等相关数据，对仿真分析负荷模型的参数进行修正，并对修正后的模型进行仿真验证和发布。相关研究、应用的成果可以作为映像模型演进的支撑和基础。

3.4 适用于映像模型的量测体系

映像系统作用的发挥依赖于系统量测体系的构建，完善且快速的动态量测数据是及时形成准确电网映像的前提。从目前我国电网的量测系统来看，还需解决以下问题：

1) PMU的量测可以达到毫秒级，但是数据接入到WAMS系统后，数据服务的延时可达秒级，这使得部署于调度台的映像系统对于扰动和故障只起到分析提示作用，无法作到控制，限制了其作用的发挥。在这方面可采用直连PMU的专用信道以提升速度，考虑成本问题，可以集中关注关键点状态量变化。此外，还可结合新一代WAMS系统建设，优化其结构和数据服务速度。

2) PMU量测存在缺失和误差。对于这个问题最根本的解决办法是增加PMU布点、提升量测装置准确性，甚至可以采用冗余量测的办法，以获得全面且准确率足够高的量测数据，使得电网从量测角度完全可观。在现有条件下，可以根据实际关注的电网范围需要，考虑是否采用状态估计技术进行

处理，但这样可能会导致延时，需要对算法进行优化。

3) PMU量测不含系统拓扑变化信息，需要将PMU数据与SCADA数据结合使用，以获得全面的数据源，需要解决映射与时标对齐问题。

可见，基于现有PMU和SCADA量测尚不能完全发挥映像系统的能力，需深化开展调度多源数据的整合工作，将PMU、SCADA、安控装置，以及保护和录波等各类量测信息接入映像系统。同时，需进一步研发低成本动态量测装置，建立高速数据通道，实现高速、高精度，并适度冗余的实时量测，从而减少甚至取消状态估计计算，以提升分析精度和处理速度，接近甚至达到实时控制要求。

4 映像系统的构建及应用

基于映像系统架构和映像模型数据结构设计，以及高速数据处理等技术，构建了映像系统基础平台原型系统，如图5、图6所示。该系统以PSASP暂稳仿真数据案例模拟实时量测数据，通过集成量测数据接入、实时映像电网、映像模型同步演化、多元信息可视化，以及sBTTC响应驱动分析算法分析等功能，实现百毫秒级连续快速生成动态变化的电网运行信息，能够对实时发生的系统扰动，连续进行快速分析，计算稳定特征、辨识稳定性质，支持多角度可视化展示。

简化支路暂态输电能力sBTTC指数(simplified branch transient transmission capability, sBTTC)^[25]，可基于广域支路响应信息反映机群间不平衡功率

交换能力下降、表征系统稳定性恶化程度。通过筛选系统中的关键支路 k 并判断其sBTTC指数的大小是否到达门槛值,可以实现对系统稳定性的判别,如式(2)(3)(4)所示:

$$sBTTC = \psi_{U_i} \psi_{\theta_i} = U_{im} U_{in} \cos^2 \frac{\Delta\theta}{2} \quad (2)$$

$$k = \operatorname{argmin}_{i \in \{1, 2, \dots, N\}} \{sBTTC_i\} \quad (3)$$

$$sBTTC_k < \varepsilon_{th} \quad (4)$$

式(2)中: ψ_{U_i} 为电压因子; ψ_{θ_i} 为相位因子; U_{im} 、 U_{in} 分别为第 i 条支路两端节点的电压幅值信息; $\Delta\theta$ 为第 i 条支路两端节点的相位差信息。式(3)表示具有最小sBTTC指数值的支路为关键支路,结合支路垂足电压位置系数可以进一步确定准确性。式(4)表示当sBTTC小于设定阈值 ε_{th} 时,判定为失稳。在此基础上,还可进一步生成稳定控制策略。

sBTTC算法的运行要求获得节点电压幅值和相位,以及元件的拓扑关系等信息。在调度中心使用时,可以基于映像系统进行计算,利用电网映像整合的WAMS、SCADA数据,以及网络元件模型,求取全网各支路的sBTTC指标。在现有量测系统条件下,可以实现对系统扰动的快速捕获和分析。

以2023年新疆电网某时刻等值系统作为仿真案例,验证映像系统结合sBTTC算法分析系统运行问题的能力。算例电网已形成750kV双环网交流主网架,该送端网架薄弱,WB-WCW、TLF-SS-TS两个输电断面是西电东送的重要通道,HM-DH、TS-YD-SZ两个输电断面是西北联网通道。总发电48030MW,总负荷31300MW,直流外送功率14500MW。WB-WCW、TLF-SS-TS断面由西向东送电6400MW。仿真模拟实验设置WB-WCW一回线在1s发生三相永久短路,1.1s切除故障线路及并联无故障线路;受交流电气联系减弱、潮流大范围转移至TLF-SS-TS通道等因素影响,位于末端的某换流站近区电压大幅跌落,率先呈现出局部电压稳定问题;随着西部机群超前摆动,其相对东部电网和西北主网机群的功角持续增大,进而呈现出功角失稳,并在TLF-SS-TS近区形成振荡中心,西北电网部分发电机功角差如图7所示。

测试中,映像系统每10ms完成一次仿真电网模拟量测数据同步并生成电网映像,支持sBTTC分析在1.8s时判定为暂态功角失稳,进而生成功角稳定控制措施量700MW,2s启动紧急切机控制切除新疆西部某2个350MW机组,新疆电网恢复功角稳定,切机措施后系统功角响应如图8所示,可有效解决大规模新能源并网导致的系统安全稳定

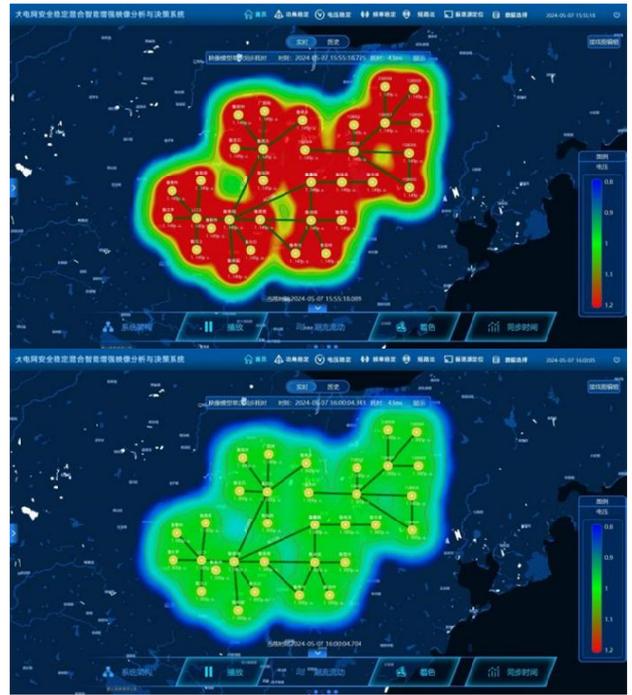


图5 映像系统电网电压状态可视化展示

Fig. 5 Visual display of power grid operation state in the prototype system



图6 映像系统sBTTC指数线路着色可视化展示

Fig. 6 Visual display of sBTTC calculation results in the prototype system

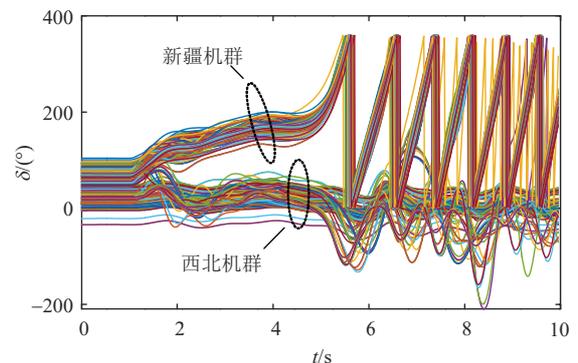


图7 西北电网部分发电机功角曲线

Fig. 7 Angle curve of Northwest Power Grid

运行问题。

映像系统部署到省级电网调度端时的架构,如图9所示,其从新一代调控系统调控云实时数据平台接入PMU、RTU数据,并可扩展其它动态量测数据。利用SCADA系统RTU数据测点覆盖更全特

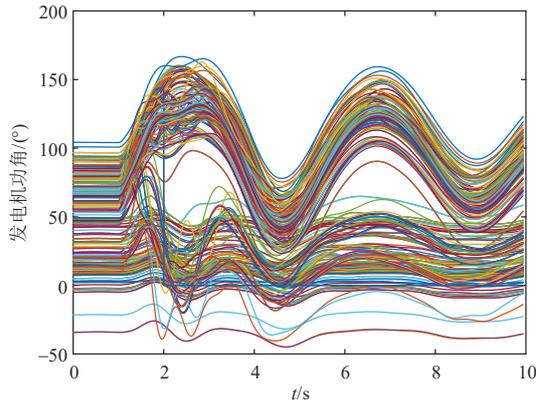


图 8 切机措施后系统功角曲线

Fig. 8 Angle curve after cutting generator

点,构建映像系统网架数据;利用 WAMS 系统 PMU 数据更新速度较快的特点,构建映像系统状态量数

据。映像系统融合利用不同时间尺寸的 PMU、RTU 数据,百毫秒级连续快速生成动态变化的全网运行信息,可集成基于量测数据响应控制的新能源多场站短路比实时监测与预警^[26-28]、频率稳定判别与控制^[29-30]、功角稳定判别与控制^[31-32],以及电压安全稳定监测与控制等分析决策功能^[33],能够对实时发生的系统扰动、振荡,连续进行快速分析,计算稳定特征、辨识稳定性质、给出控制策略,进行多角度可视化展示,为调度人员提供控制策略的实时更新、新能源出力优化调整等提供技术支撑,切实降低新能源高渗透率电网运行风险。此外,映像系统还可接入省级电网稳定性混合智能增强分析与控制系统装置上送的信息,补充系统运行状态数据。

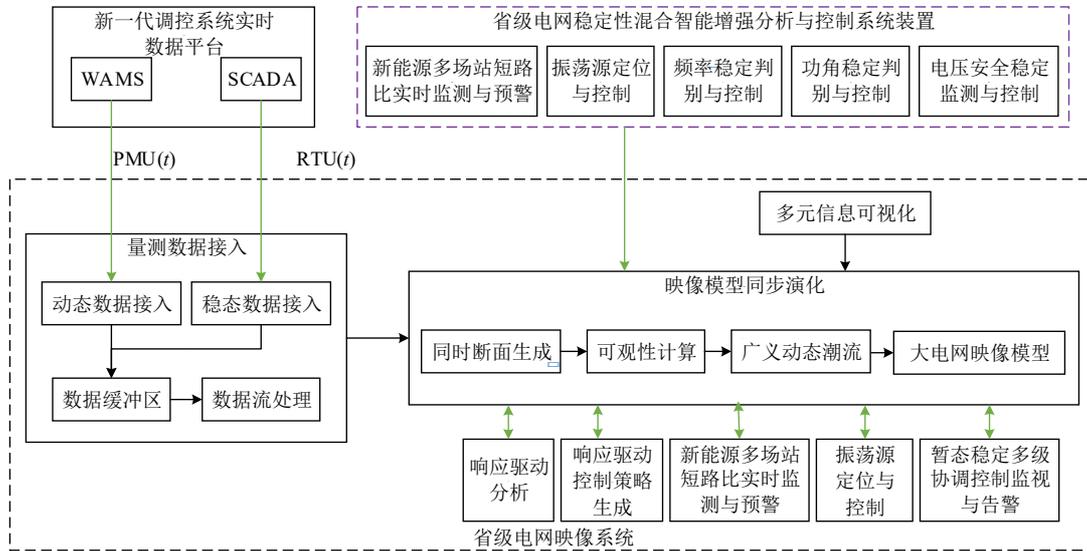


图 9 省级电网映像系统部署架构

Fig. 9 Mapping model system of provincial grid

5 映像模型的应用体系

基于新型电力系统运行控制需求,可以设计映像模型的应用体系,覆盖新型电网运行分析体系的核心功能,如图 10 所示,共分为 6 个层级,分别是对象层、场景层、数据层、映像模型、算法层、应用层。

1) 对象层:映像模型的对象是多电压等级的互联大电网,其特点是根据实际电网不同应用场景的分析需求,广泛配置量测。

2) 场景层:映像模型应用具有实时、离线、实验、规划等 4 种不同的电网分析场景。

3) 数据层:映像模型可接入在线、离线、实验、规划等数据,涉及状态量测、控制保护、气象环境、市场行为、政策法规等诸多方面,是构建映像模型的数据基础。

4) 映像模型:对多源数据进行融合,通过在线构建孪生体实现物理对象的数字映射,利用实时

演化机制保证物理-数字的实时同步。

5) 算法层:为映像模型提供分析、控制、演化等高级功能的算法支撑和计算引擎。主要包括各类智能算法、内存计算、串/并行仿真计算、嵌入式计算、超实时计算等。

6) 应用层:根据电网的需要,定制高级应用功能,包括静/动态实时分析、未来演化分析等。具体功能包括:

①运行状态的实时感知。

集中观测:建立场站(负荷/新能源)并网强制性功能规范,提出实时建模所需数据的信息交互要求,实现运行状态的集中观测。

全网可观:基于集中观测数据,利用已掌握的物理规律,推算出尚未配置量测元件的运行状态,实现全网状态的实时可观。

②认知体系的同步更新。

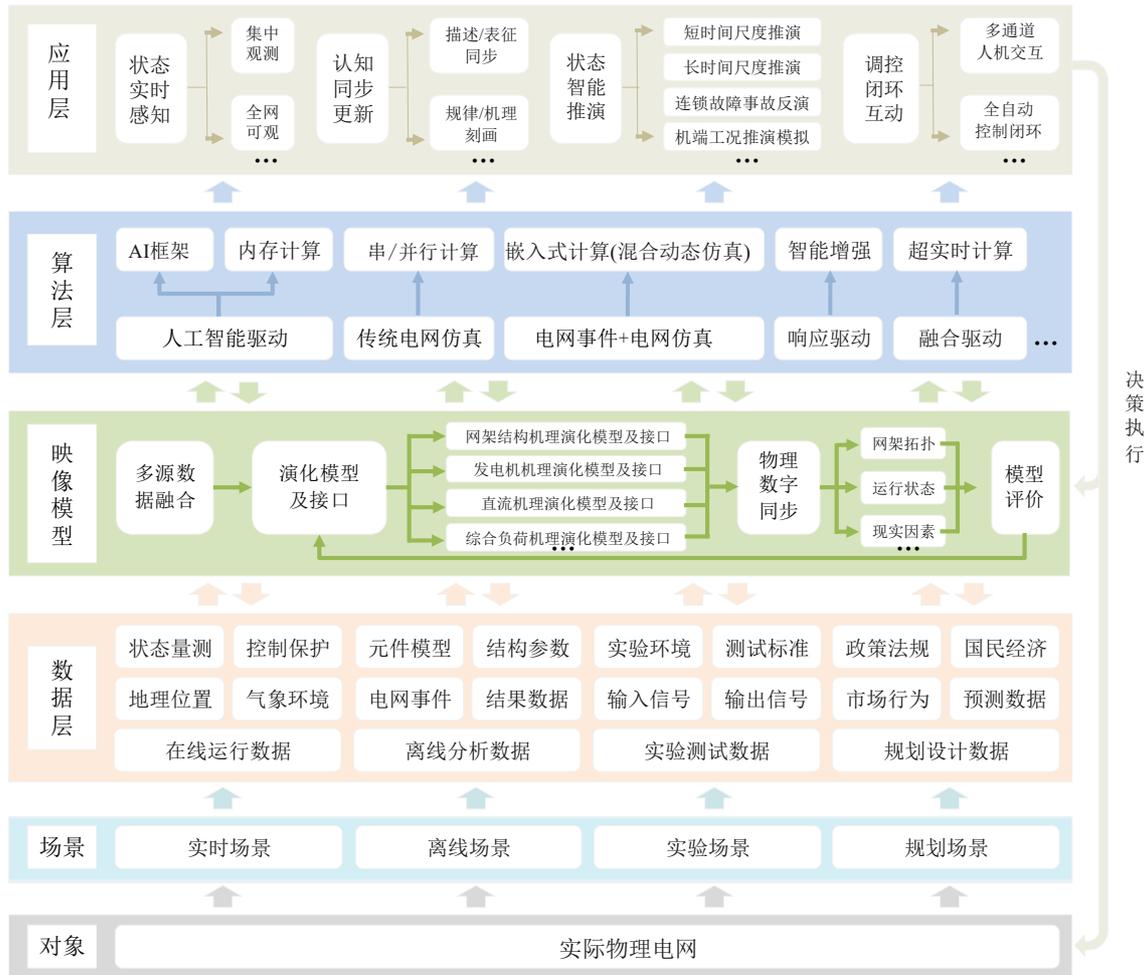


图 10 省级电网映像系统部署架构

Fig. 10 Application framework of the mapping model

描述/表征同步：模型实时构建、参数(源网荷储)实时演化、运行状态实时同步、客观影响因素同步，是对电网运行规律认识的前提和基础，映像模型需要与实际电网同步演化，能够与实际电网背后所蕴含物理规律趋同。

规律/机理刻画：探索发现新的稳定问题和特性、完善修正已知的稳定问题和特性，是电网运行规律认识的核心，需要基于映像模型了解现象背后的机理，实现对原有客观物理规律认知体系的有益补充或是改观。

③运行状态的智能推演。

运行态势的实时分析：利用量测数据开展静/动态稳定性的实时分析，满足安全稳定态势实时分析的需求，进而为实时控制提供决策依据。

短时间尺度的推演预测：综合考虑气象环境、市场行为等因素，预测当前态电网运行态势的变化趋势，满足超前预警和分析的需求。

长时间尺度的推演预测：综合考虑政策法规、国民经济等因素，预测未来态电网发展演化的路

径，满足电网远期规划和设计的需求。

连锁故障的事故反演：在事后分析中建立连锁故障的事件序列，模拟不同故障路径，提取诱导因素并建立因果关系，提高未来电网对连锁故障的防御能力。

极端工况的推演模拟：模拟一些出现概率极低的极端工况，如网络攻击、自然灾害等，在人工智能技术指导下进行攻防演练，为抵御极端工况储备防控策略。

④调控信息的闭环互动。

多通道人机交互：将海量量测、多尺度预测、仿真计算结果、AI输出等信息融合展现，建立多通道人机交互，提高人(分析能力)与机器(计算能力)的互动水平。

全自动控制闭环：为控制算法和规划方案提供测试开发平台，为当前态电网的即时控制策略和未来态电网的远期规划路径，提供控制策略自动闭环的验证环境。

6 结论

在过去半个世纪中，以电网仿真分析为核心的运行控制技术有力保障了我国电网的安全稳定运行。为应对新型电力系统运行控制所面临的严峻挑战，需要实现仿真计算、解析计算，以及 AI 计算的综合作用。本文提出的映像模型能够实时跟踪系统动态变化，不经仿真直接生成系统动态过程，突破了现有基于 SCADA 的电网在线计算模型，仅能跟踪系统潮流变化的限制，为实现解析计算，如 SBTTC 算法，以及 AI 计算等与仿真计算相结合这一目的奠定了模型和数据基础。基于本文提出的映像模型关键技术构建的原型系统，证明了本文技术方案的可行性，同时也表明映像模型具备高速数据同步能力。

虽然目前受限于量测系统时延，尚未能发挥映像模型及其应用系统的快速分析、决策能力，但是依然可以通过对系统实时运行状态的持续跟踪和分析，以远高于现有 DSA 的频率和速度不断给出系统状态判断和决策建议。同时，为离线方式的仿真分析提供关键实际运行数据，用于形成潮流断面，以及支撑故障反演、仿真结果校核等工作。

随着映像模型技术的成熟和量测系统的改进，映像系统预期将可得到长足发展，最终能够为未来新型电力系统实现“实时计算、实时分析、实时控制”提供有力支撑。

参考文献

- [1] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7796-7808.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on definition and classification of power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7808(in Chinese).
- [2] 王榕泰, 吴细秀, 冷宇宽, 等. 数字孪生技术在新型电力系统中的发展综述[J]. 电网技术, 2024, 48(09): 3872-3889.
WANG Rongtai, WU Xixiu, LENG Yukuan, et al. Review of the Development of Digital Twin Technology in New Type Power Systems [J]. Power System Technology, 2024, 48(09): 3872-3889(in Chinese).
- [3] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750(in Chinese).
- [4] 朱斌, 刘东, 刘天元, 等. 边缘计算在电力系统供需互动应用的研究进展与展望[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4327-4341.
ZHU Bin, LIU Dong, LIU Tianyuan, et al. Research Progresses and Prospects on Application of Edge Computing in Power System Supply-demand Interaction[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4327-4341(in Chinese).
- [5] 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): 487-498.
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): 487-498(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2028.
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2028(in Chinese).
- [8] 汤涌. 基于响应的电力系统广域安全稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5041-5050.
TANG Yong. Response-based wide area control for power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5041-5050(in Chinese).
- [9] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.
CHANG Naichao, LAN Zhou, GAN Deqiang, et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52(in Chinese).
- [10] 宋方方, 毕天姝, 杨奇逊. 基于 WAMS 的电力系统受扰轨迹预测[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 27-32.
SONG Fangfang, BI Tianshu, YANG Qixun. Perturbed trajectory prediction method based on wide area measurement systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 27-32(in Chinese).
- [11] 顾卓远, 汤涌, 张健, 等. 基于相对动能的电力系统暂态稳定实时紧急控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1095-1102.
GU Zhuoyuan, TANG Yong, ZHANG Jian, et al. Real-time power system transient stability emergency control scheme based on the relative kinetic energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1095-1102(in Chinese).
- [12] 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): 1-14.
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): 1-14(in Chinese).
- [13] 吕颖, 贾育培, 罗治强, 等. 计算资源共享的调度计划安全校核多应用并行计算调度[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 596-604.
LÜ Ying, JIA Yupei, LUO Zhiqiang, et al. Security Check of Scheduling Plan Based on Shared Computing Resources[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 596-604(in Chinese).
- [14] 张星, 徐得超, 李亚楼, 等. 基于超算的大电网数字并行仿真系统构建及应用[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1144-1150.
ZHANG Xing, XU Dechao, LI Yalou, et al. Construction and Application of Large-scale Power Grid Digital Parallel Simulation System Based on Supercomputing Technology. Power System Technology[J]. 2019, 43(4): 1144-1150.
- [15] 李亚楼, 张星, 李勇杰, 等. 交直流混联大电网仿真技术现状及面临挑战[J]. 电力建设, 2015, 36(12): 1-8.
LI Yalou, ZHANG Xing, LI Yongjie, et al. Present situation and challenges of AC/DC hybrid large-scale power grid simulation technology[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(12): 1-8(in Chinese).

- Chinese).
- [16] 严剑峰, 于之虹, 田芳, 等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 87-93.
YAN Jianfeng, YU Zhihong, TIAN Fang, et al. Dynamic security assessment & early warning system of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 87-93(in Chinese).
- [17] 严剑峰, 冯长有, 鲁广明, 等. 考虑运行方式安排的大电网在线趋势分析技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 111-116.
YAN Jianfeng, FENG Changyou, LU Guangming, et al. On-line trend analysis technology of large power grid considering operation mode arrangement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 111-116(in Chinese).
- [18] 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 M, 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).
- [19] ZHOU Mike, YAN Jianfeng, ZHOU Xiaoxin. Real-time online analysis of power grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(1): 236-238.
- [20] 周二专, 张思远, 严剑峰, 等. 电网调控决策知识模型建模及实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5057-5066.
ZHOU Erzhan, ZHANG Siyuan, YAN Jianfeng, et al. Decision knowledge modeling and implementation for power grid dispatching and control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5057-5066(in Chinese).
- [21] 张晓华, 刘道伟, 李柏青, 等. 智能全景系统概念及其在现代电网中的应用体系[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2885-2894.
ZHANG Xiaohua, LIU Daowei, LI Baiqing, et al. The concept of intelligent panoramic system and its application system in modern power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2885-2894(in Chinese).
- [22] 张晓华, 杨红英, 刘道伟, 等. 面向智能全景电网的虚拟负荷概念及其应用[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1734-1741.
ZHANG Xiaohua, YANG Hongying, LIU Daowei, et al. Conception and application of virtual load in intelligent panoramic grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1734-1741(in Chinese).
- [23] 陈绪江, 张星, 田芳, 等. 含大量电磁直流模型的机电-电磁暂态混合仿真技术研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1203-1210.
CHEN Xujiang, ZHANG Xing, TIAN Fang, et al. Electromechanical-electromagnetic hybrid simulation technology with large number of electromagnetic HVDC models[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1203-1210(in Chinese).
- [24] LAN Tiankai, SUN Huadong, WANG Qi, et al. Synthesis load model with renewable energy sources for transient stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1647-1663(in Chinese).
- [25] 郑超, 孙华东, 李惠玲. 基于响应的支路暂态输电能力指数及紧急控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 581-591.
ZHENG Chao, SUN Huadong, LI Huiling. Response-based branch transient transmission capability index and transient stability emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 581-591(in Chinese).
- [26] 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): 497-505.
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): 497-505(in Chinese).
- [27] YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. A critical system strength evaluation of a power system with high penetration of renewable energy generations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(3): 710-720.
- [28] 于琳, 孙华东, 赵兵, 等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 919-928.
YU Lin, SUN Huadong, ZHAO Bing, et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 919-928(in Chinese).
- [29] 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): 5179-5191.
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): 5179-5191(in Chinese).
- [30] 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): 114-126.
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): 114-126(in Chinese).
- [31] 郑超, 孙华东, 邓嘉卿. 基于广域支路响应的功角失稳主动解列控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 42(11): 3885-3895.
ZHENG Chao, SUN Huadong, DENG Jiaqing. Active splitting control of rotor angle instability based on wide area branches' response[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3885-3895(in Chinese).
- [32] 郑超, 孙华东, 李亚楼. 基于广域支路响应的功角稳定态势区段划分及多级主动防御[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4046-4055.
ZHENG Chao, SUN Huadong, LI Yalou. Rotor angle stability situation segmentation and multi-level active defense based on wide area branch response[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4046-4055(in Chinese).
- [33] 汤涌, 易俊, 孙华东, 等. 基于功率电流变化关系的电压失稳判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 7-11.
TANG Yong, YI Jun, SUN Huadong, et al. Voltage instability criterion based on variation relationship of power and current[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 7-11(in Chinese).



孙华东

在线出版日期: 2024-08-19.

收稿日期: 2024-03-04.

作者简介:

孙华东(1975), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, E-mail: sunhd@epri.sgcc.com.cn;

黄彦浩(1978), 男, 博士, 通信作者, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析、电力人工智能, E-mail: hyhao@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 赵梓含)