

# 构建新型电力系统仿真体系研究

陈国平<sup>1</sup>, 李明节<sup>1</sup>, 董昱<sup>1</sup>, 郭强<sup>2</sup>, 贺静波<sup>1</sup>, 张放<sup>1\*</sup>

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

## Research on the Simulation Technology Architecture for the New-type Power System

CHEN Guoping<sup>1</sup>, LI Mingjie<sup>1</sup>, DONG Yu<sup>1</sup>, GUO Qiang<sup>2</sup>, HE Jingbo<sup>1</sup>, ZHANG Fang<sup>1\*</sup>

(1. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China;  
2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Simulation is a key technical means to recognize the characteristics of power systems. Physical power systems and corresponding simulation technologies have been developed in parallel and promoted each other. As China's power industry actively evolving towards a new-type power system, its simulation technology is facing brand new challenges and opportunities. This paper analyzes the difficulties of current simulation technologies adapting to the new-type power system in terms of simulation dimension, depth, breadth and accuracy, and proposes a novel simulation technology architecture characterized by full-dimension, full-scenario, full-element and full-process. This paper also puts forward the key technical orientations and several suggestions to accelerate the implementation of the proposed architecture.

**KEY WORDS:** new-type power system; power system simulation; renewable energy power generation

**摘要:** 仿真是认知电力系统特性的关键技术手段, 电力系统与其仿真技术共同发展、相互促进。在我国加快建设新型电力系统的过程中, 仿真技术将面临全新的挑战与机遇。该文分析指出传统电力系统仿真体系在维度、深度、广度与精度方面难以满足新型电力系统建设需求, 提出构建以全维度、全场景、全要素、全过程为特征的新型电力系统仿真体系, 分析了需要突破的关键技术方向, 并研究了加快构建新型电力系统仿真体系的相关措施。

**关键词:** 新型电力系统; 电力系统仿真; 新能源发电

## 0 引言

电力系统是最复杂的人造系统, 且关系国计民生, 运行不可中断, 运行特性难以通过实际系统试验获得, 仿真成为掌握电力系统特性的关键技术手段。在我国电力系统发展的每一个关键时期, 仿真

技术都做出了突出贡献, 保障了众多开创性重大输电工程和全国电网互联的顺利实施<sup>[1-3]</sup>。以 20 世纪 90 年代三峡电站输变电工程设计为例, 我国采用了当时可用的全部仿真技术手段, 包括国内计算机数字仿真、数模混合仿真及俄罗斯高压直流研究院(NIIPT)动模仿真, 对三峡送出系统特性开展了长达 16 个月的全面仿真分析验证, 保证了系统设计的科学性, 促进了我国电网技术水平的大幅提升。近年来, 我国电力系统仿真技术持续进步, 已建成现代电力系统仿真平台, 通过高精度数模仿真和高性能数字仿真相结合, 兼顾仿真精度和效率, 实现了特高压交直流互联大电网特性的准确认知, 技术指标达到国际领先水平<sup>[4-5]</sup>。

我国长期以来的电力系统建设与运行实践表明, 对电力系统的研究不能滞后于工程实际, 仿真技术的进步不能滞后于电网发展。“双碳”目标背景下, 我国新型电力系统建设全面加速, 电力系统各方面将发生广泛而深刻的变化<sup>[6-9]</sup>。新型电力系统建设将高度依赖仿真技术, 为仿真技术带来了全新挑战与机遇<sup>[10-11]</sup>。目前, 业界对于新型电力系统仿真建模<sup>[12-13]</sup>、算法<sup>[14-15]</sup>、工具<sup>[16]</sup>、平台<sup>[4,17-18]</sup>等已开展了一系列研究, 文献<sup>[19-20]</sup>对电力系统建模仿真技术近期进展进行了综述; 这些研究为新型电力系统仿真体系建设打下了良好基础, 但大多属于具体技术层面的研究, 尚缺少对新型电力系统仿真技术体系进行顶层设计的系统性研究。本文结合特大电网运行与控制的长期实践经验, 以及传统电力系统向新型电力系统的转型发展趋势, 分析了传统电力系统仿真体系在新型电力系统场景下存在的不同

适应性,针对科学构建新型电力系统的需求,提出构建以全维度、全场景、全要素、全过程为特征的新型电力系统仿真体系,分析了需要突破的关键技术方向,并研究了加快构建新型电力系统仿真体系的相关措施。

## 1 新型电力系统对仿真体系提出新要求

经过长期的发展,我国已经形成了较为成熟的电力系统仿真体系。该体系以基波相量法为基础,以稳态潮流计算和机电暂态仿真为核心,以实测元件模型参数和典型运行方式为数据,以电子计算机为工具,能够较好地刻画以同步发电机为主导元件的传统电力系统的主要特性,满足了我国电力系统快速发展和特高压交直流大电网安全稳定运行的需要<sup>[2,4-5]</sup>。

目前,我国正在全力开展新型电力系统建设,新能源占比不断提高,以沙漠、戈壁、荒漠地区为代表的大型新能源基地加速开发,特高压直流远距离输电规模持续提升,同时用户侧分布式电源迅猛发展,高比例新能源、高比例电力电子装置并网的“双高”特征日益显著,电力系统面貌发生深刻变化<sup>[6]</sup>。一是生产结构发生深刻变化。新能源出力随机波动,电力生产面临高度不确定性。电源的空间分布愈加偏远、愈加深入低电压等级。二是运行机理发生深刻变化。电力电子类电源大量替代同步发电机,电源并网技术原理从机械-电磁耦合作用转向基于人为控制的快速开关过程。三是控制基础发生深刻变化。电力系统控制对象从源侧少数同质化大容量同步发电机,转向广泛分布于源网荷储各侧的海量异构资源,规模呈指数级增长。上述各方面变化对电力系统仿真技术提出了更高要求。

### 1.1 更高的仿真维度要求

传统仿真体系重点关注电力系统本身,新型电力系统与自然资源、人类社会耦合更加紧密,电力供应和电网安全与外部因素高度相关,客观上要求将气象、能源、信息、社会等外部系统纳入电力系统仿真。

在电源侧,一二次能源呈现深度耦合,各类电源发电能力的仿真评估需要考虑外部因素影响。新能源发电出力与气象条件密切相关,具有间歇性、随机性,极端天气对供电能力影响极大,需要在电力系统仿真中考虑气象因素<sup>[7,21]</sup>。2021年7月28日,我国东北地区遭遇“极热无风”天气,全网风

电最低出力仅34MW,同时率不足0.1%。水电发电能力与来水情况紧密关联,2022年夏季,长江干流和主要支流来水为有水文记录以来同期最枯,四川作为全国水电装机第一大省,首次在汛期出现电量短缺,被迫采取有序用电措施<sup>[22]</sup>。化石能源发电的燃料供应易受政策、价格、运输等因素影响,例如2019年5月某城市电网因燃气压力降低导致15台燃气机组跳闸;2021年秋季煤价高企导致全国在传统用电淡季出现大范围供电紧张,需要在电力系统仿真中考虑燃料生产和运输等系统,准确评估燃料供应对供电能力和电网安全的影响。

在电网侧,电力系统安全稳定分析需要实时评估气象环境等外部因素。近年来,受全球气候变暖等因素综合影响,极端天气事件趋多趋强,灾害发生的时空不确定性、复杂性增强,多发群发链发效应更加明显,山火、台风、局部强对流等极端天气严重影响电网安全,原生灾害和次生灾害防范应对难度不断加大<sup>[2,5]</sup>。例如,2019年8月、2020年11月,台风“利奇马”、雨雪冰冻灾害分别导致华北、东北500kV主网出现N-6方式,2021年河南“7·20”特大暴雨使500kV主网出现N-7方式,远超《电力系统安全稳定导则》设防标准。极端天气影响大,但发生概率低,如对极端天气故障常态化设防,将严重影响电网运行经济性,因此需要电力系统仿真与各时间尺度的气象环境预报紧密结合,按照极端天气概率大小做出针对性的计算分析与方式安排。

在负荷侧,电力供应能力和系统运行特性的仿真分析需要考虑社会、气象等外部因素。我国用电负荷长期以来以第二产业用户为主,近年来第三产业和居民用电比例快速上升。据测算,2022年夏季,在供电能力最为紧张的晚高峰时段,华东、华中电网居民用电负荷占比分别达到70%、75%。第三产业和居民用电受人类活动和气象等外部因素影响显著,尤其是空调负荷的影响日益增加<sup>[23,24]</sup>。2022年度夏期间,国家电网经营区降温负荷据测算达385GW、超过最大负荷的33%,累计用电量达398TW·h、占比28%<sup>[22]</sup>。调查表明,降温负荷中变频空调占比达40%~60%,在故障期间近似呈恒功率特性,其余定频空调呈感应电动机特性,不同温度下空调负荷占比出现显著差异,将对系统特性产生一定影响<sup>[25]</sup>。为更加准确地研判电力供应能力、分析系统运行特性,需要在电力系统仿真中综合考

虑社会、气象等外部系统。

## 1.2 更高的仿真深度要求

电力系统的仿真分析基于典型运行方式数据开展。典型方式应具有一定代表性，能够反映实际电力系统各种运行工况，确保根据典型方式数据仿真分析制定的规划方案与运行策略能够满足安全需求。生成典型方式数据的关键在于确定开机组合，传统电力系统发电机组以可控的常规电源为主，电力系统运行方式呈现明显的季节性、时段性特征，采用“丰水期/枯水期”、“高峰/腰荷/低谷”等少数潮流组合即可较好地覆盖一年中可能出现的运行场景<sup>[26-27]</sup>。

在新能源高占比的新型电力系统中，新能源出力的随机波动性使得开机组合复杂多变，同一季节、同一时段的电网负荷水平相近，但在不同的新能源出力水平下，可能出现截然不同的开机方式。同时，新能源出力具有强时空相关性，同一时刻不同地区的新能源出力水平不同，运行方式将存在较大差异，我国地域辽阔、新能源发电分布广泛，这一问题尤为突出。以西北电网为例，目前省间联网通道潮流日波动超 16GW，大数据分析表明，7 天内联网通道典型方式聚类数超过 50 个，难以通过有限的典型方式覆盖工况变化<sup>[22]</sup>。此外，随着电力市场化改革的不断深入，开机方式受市场出清结果影响，更加容易出现单厂全开机或全停机等相对极端的开机组合。综上，新型电力系统中运行方式呈现去典型化的特征，为确保仿真分析能够覆盖所有可能出现的工况，必须考虑海量的潮流组合，生成、校验方式数据的工作量与仿真计算的工作量将出现指数级增长。

## 1.3 更高的仿真广度要求

传统电力系统仿真不需要很高的广度即可较为准确地反映关注的主要特性，满足各种场景需求。一是仿真对象的种类和数量有限。传统电力系统的仿真对象主要为电源和电网设备，且设备高度标准化、同质化，总数在数千到数万数量级。负荷侧主要采用感应电动机和 ZIP 等简化等值模型<sup>[20]</sup>。二是仿真模型的精细程度有限。传统电力系统的稳定问题主要体现在主网，对 220kV 以上电力系统建模即可较好地反映稳定特性，更低电压等级电网以热稳问题为主，在仿真分析中对其关注有限。

新型电力系统的各方面变化对仿真的广度提出了更高要求。在仿真对象方面，新能源机组单机

容量小，数量呈指数级增长，且运行特性由电力电子控制器决定，不同厂家的控制器结构和参数设计存在较大差异；电力新技术、新设备层出不穷，广泛分布于源网荷储各环节，需要更加全面的设备建模与仿真。在仿真颗粒度方面，新能源机组接入较低电压等级，同时负荷侧分布式电源、新型储能、电力电子类负荷等对电力系统特性的影响加剧，配电网不再是单纯从主网获取电能的消费者，而是具有一定电力生产和自平衡能力的“产消者”<sup>[6]</sup>，配网与主网之间的交互更加频繁复杂，对主网平衡和稳定特性的影响不断加剧。预计 2023 年国家电网经营区分布式新能源装机将超过 170GW<sup>[22]</sup>，而分布式电源涉网性能参差不齐，部分机型存在低电压期间长时间闭锁等自我保护设置，容易加剧故障冲击和连锁反应，客观上要求将仿真分析推向低电压等级，充分考虑分布式电源的影响。

## 1.4 更高的仿真精度要求

电力系统动态过程的数学本质是以麦克斯韦方程组为基础的微分-代数方程组，具有高阶、大规模、非线性特性，如对真实系统进行完整详细的数学描述，求解将十分困难。要实现大型电力系统的实用化仿真，需要对全状态方程进行合理简化，关注主导动态过程，简化或忽略非主导动态过程，从而降低求解难度。传统电力系统以同步发电机为基本元件，在传统电力系统的诸多动态中，同步发电机定子、转子之间机械-电磁耦合作用带来的毫秒-秒级机电暂态过程是主导动态<sup>[2,6]</sup>。基波相量法可以较好地刻画同步发电机转子的周期性旋转，以基波相量为基础建立电力系统的机电暂态数学模型，极大地简化了全状态方程，同时保留了重点关注的系统主导动态信息。结合快速发展的计算机技术，机电暂态仿真满足了实际大电网上万节点规模的仿真需要，支撑了现代电力系统大范围互联和规模快速发展<sup>[4-5]</sup>。

在新型电力系统中，同步发电机被新能源、直流等电力电子类电源大量替代。电力电子元件的工作原理是控制主导的开关切换过程，具有快速响应、强非线性特性，动态时间尺度在微秒级<sup>[12-13]</sup>。随着电力电子设备占比不断提高，高频段动态过程对系统特性的影响逐渐加大，基波相量法对高频段响应的描述能力难以满足需求。此外，同步发电机的定子三相绕组空间排布的对称性决定了三相电气量的自然耦合，以反映转子位置的单一旋转

相量即可描述三相电气量，而电力电子元件的工作基于所在单相的电气量瞬时值，三相电气量通过Park逆变换等人为控制实现对称，要精确描述故障暂态期间电力电子元件的行为，必须计算各相电气量瞬时值，相量法失去了物理基础。因此，要准确分析深度电力电子化电力系统的动态过程，必须回归麦氏方程组数学本质，以更精细的电磁暂态模型、更短的时间尺度对单相电气量瞬时值开展仿真分析。

在面临上述挑战的同时，电力系统仿真技术也面临着前所未有的发展机遇。高性能计算、云计算、人工智能等信息通信新技术的出现大大增强了计

算能力，为实现更大规模、更高精度、更高效率的电力系统仿真创造了条件；区块链、元宇宙、数字孪生等新技术的发展，为电力系统仿真技术进步带来了新的思路和技术支撑<sup>[4,19]</sup>。仿真技术应当抓住发展机遇，积极应对挑战，不断拓展内涵，适应新型电力系统建设需求，与电力系统同步进化，构建新型电力系统仿真体系。

## 2 新型电力系统仿真体系架构

新型电力系统仿真体系以电力系统仿真为核心，并与外部系统紧密交互，由硬件、数据、引擎、应用与接口共5个领域构成，总体架构见图1。

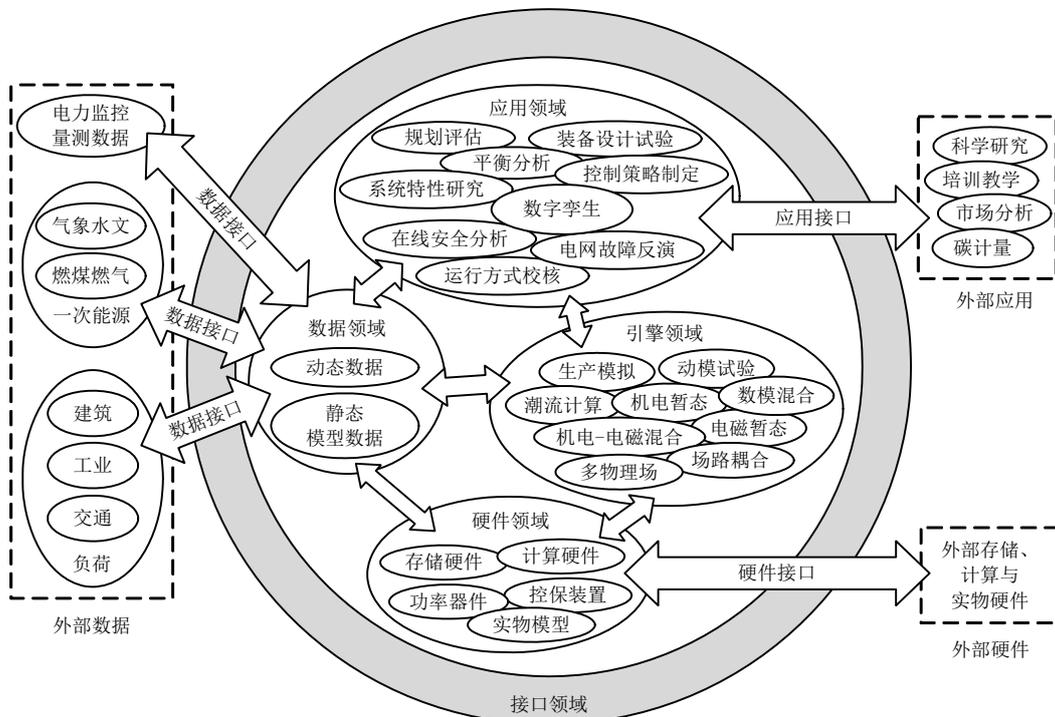


图1 新型电力系统仿真体系架构

Fig. 1 Simulation technology architecture for the new-type power system

### 2.1 硬件领域

硬件领域提供新型电力系统仿真依托的硬件资源，包括数据存储硬件、计算硬件以及实物理器件。存储硬件具备海量数据快速、并发存储与访问能力，支撑大规模计算和模型数据的存储和调用。计算硬件提供数字仿真需要的硬件计算资源，包括基于通用硬件架构的超级计算机云平台<sup>[18]</sup>，以及实时数字仿真器等专用计算硬件<sup>[14]</sup>。实物理器件包括用于模拟仿真和数模混合仿真的控保装置<sup>[17]</sup>、功率元件等真实器件<sup>[28]</sup>和用于动模试验的物理模型<sup>[29]</sup>等。

### 2.2 数据领域

数据领域提供新型电力系统仿真需要的基础

数据，包括静态模型数据和动态数据。静态模型数据存储电力系统元件拓扑结构、模型及参数，元件模型覆盖多重时间尺度和颗粒度，既包括基于电路的外特性等值模型，也包括基于内部物理场特性的精细模型<sup>[30]</sup>；既包括基于物理知识构建的结构化模型，也包含基于数据构建的相关性模型<sup>[17,31]</sup>；考虑电力电子设备控制器结构差异化与复杂性带来的知识产权保护问题，应包括开放模型与封装模型；在一次设备模型之外，还包括电力系统二次设备模型和拓扑信息。动态数据包括电压、电流、开关、压板状态等系统状态变量，以及需要通过在线辨识手段获取的可变负荷参数等。

### 2.3 引擎领域

引擎领域提供新型电力系统仿真所需的多品种、多时间尺度仿真工具，集成生产模拟、稳态潮流计算及各类暂态仿真工具。其中，生产模拟可进一步分为时序生产模拟与随机生产模拟等<sup>[32-33]</sup>，暂态仿真工具可进一步分为数字仿真(机电暂态、机电-电磁混合、电磁暂态)、数模混合仿真和动态模拟仿真等。在对整个电力系统进行仿真的同时，通过场路耦合<sup>[34-35]</sup>、多物理场耦合<sup>[36]</sup>等仿真引擎，对电力设备需要重点关注的电磁场和热、力等非电气特性进行仿真。

### 2.4 应用领域

应用领域根据仿真应用场景，综合运用电力系统仿真引擎，对仿真结果进行综合分析，以可视化形式展示并与用户交互，支撑电力系统各环节业务开展。具体应用包括电力电量平衡分析、规划方案评估比选、装备设计试验验证、系统特性分析、运行控制策略制定、运行方式校核(含市场出清结果安全校核)、在线安全分析、电网故障反演等。在上述基础应用之外，综合使用多种仿真引擎和模型、与数字信息技术深度融合、与物理电力系统紧密互动的电力系统数字孪生将成为新型电力系统仿真体系的一项重要应用<sup>[31]</sup>。

### 2.5 接口领域

新型电力系统仿真的一个突出需求是与外部系统频繁密切交互。为满足这一需求，新型电力系统仿真体系中设置与外部系统交换信息的接口领域，包括硬件接口、数据接口与应用接口。

硬件接口提供计算、存储硬件与实物器件对外部系统的接口，可以利用外部的计算、存储资源(如公共数据网上的云存储、云计算资源)开展仿真，或将外部实物器件(如试验设备)接入仿真系统。

数据接口提供仿真数据和模型对外部系统的接口。气象、水文、燃料、交通、建筑等外部系统的数据将以发电出力和负荷变化的形式进入仿真数据系统，同时电动汽车充电网、建筑微电网等新型并网主体可以通过标准化接口纳入仿真模型。

应用接口提供仿真结果对外部系统的接口，科学研究、教学培训、市场分析、碳计量等外部应用可以通过应用接口提出仿真需求，并获取相应仿真结果。

新型电力系统仿真体系将与外部系统紧密互动，但双方的数据标准、安全标准等存在较大差异，

各种接口将同时起到规约转换与安全隔离的作用。接口领域应严格通过标准化协议与外部系统交互，并高度重视信息交互过程中的网络和数据安全。

## 3 新型电力系统仿真体系的特征与关键技术

上述新型电力系统仿真体系是在传统电力系统仿真体系基础上的迭代升级，适应新型电力系统的深刻变化与仿真需求，具有全维度、全场景、全要素、全过程的特征，如图 2 所示，可以满足新型电力系统科学建设与运行的需要。

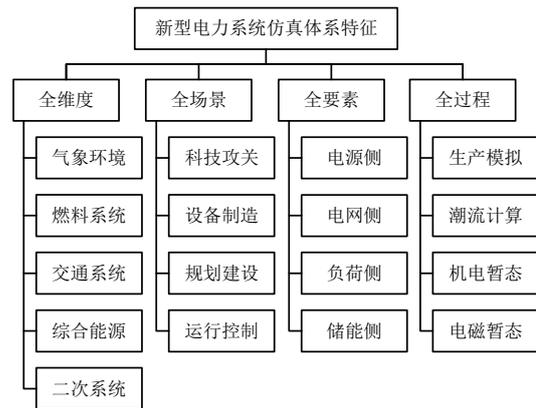


图 2 新型电力系统仿真体系特征

Fig. 2 Characteristics of the simulation technology architecture for the new-type power system

### 3.1 全维度仿真

适应新型电力系统与外部系统耦合更加紧密的特征，将仿真范畴从电力系统扩展至上下游系统，突破多能源互联系统运行关键特性的仿真分析基础理论与方法，准确反映外部系统与电力系统的交互。需要突破的关键技术主要属于数据领域与接口领域。

1) 气象系统与电力系统联合仿真。利用多时间尺度天气预报数据，预测发电能力<sup>[37-38]</sup>和用电负荷<sup>[24,39]</sup>的变化，准确评估电力供需形势，并生成符合实际情况的典型运行方式数据。结合气象与地理信息系统数据，根据概率评估，生成输电走廊多回线路故障、变电站全停等可信严重故障集，指导电力系统规划与运行，提升电力系统应对极端天气的韧性<sup>[40-42]</sup>。需要进一步突破的关键技术包括基于智能网格气象数据的风电、太阳能短期发电能力量化分析与预测技术，基于寒潮等过程性典型天气特征的风电、太阳能发电能力分析与预测技术，基于区域气候预测的可再生能源发电长期发电能力预测技术，温度敏感型和控温负荷分析与预测技术，基于多源异构信息的高比例新能源电力系统极端事

件数据模型快速生成、校核与优化技术等。

2) 燃料系统与电力系统联合仿真。建立煤炭、天然气等发电燃料的生产、运输、仓储系统仿真模型,接入实时运行数据,量化分析化石燃料电源提供电力电量的能力。燃气电厂一二次能源耦合相比燃煤电厂更加紧密,根据燃气供应关系建立缺气停机的严重故障集,准确评估燃气管道、泵站故障等一次能源系统故障对电力系统的影响<sup>[43-44]</sup>。需要进一步突破的关键技术包括:基于历史用能等数据驱动的一次能源供应紧缺性分析与预测技术、电煤产运储销系统建模与仿真技术、基于电煤供需特点的煤电可调发电能力预测技术及燃气-电力系统动态联合仿真技术等。

3) 交通系统与电力系统联合仿真。建立电动汽车充电网络模型,综合考虑居民活动、交通流向等因素,掌握电动汽车充电负荷时空分布规律<sup>[45-47]</sup>,引导电动汽车有序充电,提升电力系统调节能力。建立电气化铁路网模型,研究电力机车牵引负荷规律<sup>[48-50]</sup>,分析其对电力系统潮流特性、三相不对称、谐波污染等方面的影响。需要突破的关键技术包括基于用户行为约束和数据挖掘的电动汽车充电负荷分析与预测技术,包括铁路、地铁和电动公共汽车在内的电气化综合交通网络建模仿真技术等。

4) 包含信息通信系统的电力系统仿真。在传统的一次设备模型基础上建立电力信息系统模型,将保护、稳控<sup>[51]</sup>、通信<sup>[52]</sup>等二次设备纳入仿真,根据二次系统拓扑关系,研究二次设备异常、电缆沟起火等二次系统故障对电力系统安全的影响。进一步考虑人类社会、政策行为,开展信息-物理-社会系统仿真<sup>[53-55]</sup>。需要突破的关键技术包括一二次融合的大型电力系统硬件在环实验平台构建技术、基于地理和拓扑信息的电力二次系统故障集智能生成技术、信息-物理-社会系统跨领域交互仿真平台构建技术等。

5) 包含电力系统的综合能源系统仿真。建立商业建筑、工业园区、住宅小区等综合能源系统模型,综合考虑电力与燃气<sup>[56]</sup>、供热<sup>[57-58]</sup>等多种能源传输网络,分布式电源、锅炉、空调、热泵等多种能源转换装置,以及各种终端用能装置,以实时性最强的电力系统为核心,结合气象和人类行为数据开展综合能源系统仿真<sup>[59-60]</sup>,分析多能流负荷和调节能力<sup>[61-62]</sup>。需要进一步突破的关键技术包括用户侧发电与负荷资源多时空维度互补性分析与分层

分区聚合技术,热、冷、氢、气等非电二次能源系统与电力系统联合仿真技术等。

### 3.2 全场景仿真

不同的仿真技术的适用场景各不相同,要针对新型电力系统从科研到运行各环节的各种应用场景,突破与之相适应的仿真技术,推动仿真技术在准确性、快速性、灵活性等方面不断进步,全方位满足新型电力系统建设需求。需要突破的关键技术主要属于引擎领域与应用领域。

对于科技攻关场景,依托仿真技术为科研人员搭建“试验台”,助力新理论、新技术的小范围试验验证。近年来,业界开发了多种电磁暂态仿真建模、电力系统稳态与暂态仿真的实用化工具<sup>[63-66]</sup>,可支撑电力科研仿真需求。需要突破的关键技术包括用于基础理论研究的自主可控电力系统数字仿真工具包,用于实验教学的通用化电力系统数字、动模仿真实验平台构建技术,用于新技术、新设备研发验证的大型电力系统数模仿真试验平台构建技术,基于通用接口协议的异构仿真系统联合仿真技术等。

对于设备制造场景,加强电力系统数模混合仿真能力,在仿真系统中接入控制器物理装置以至功率器件<sup>[28]</sup>,开展硬件在环试验,满足装备设计阶段仿真评估需求。对功率 MOSFET、IGBT 等电力电子器件开展电磁暂态建模和仿真<sup>[12,67]</sup>,并进一步利用场路耦合和多物理场仿真技术,对其在不同稳态、暂态工况下,在电场、磁场、温度场、流体场和力场等各物理场综合作用下的运行特性进行仿真<sup>[34-36]</sup>。需要突破的关键技术包括:模拟电力电子装置主要控制设备序贯动作逻辑的大电网数字仿真技术,多仿真主机联合、跨大区电网的电磁暂态数模混合仿真平台构建技术,面向实时仿真的电力系统动态等值技术,高比例新能源大型电力系统超实时仿真技术,基于人工智能的元件机理模型辅助构建和参数选取技术,数模混合仿真运行工况快速调节技术,复杂控保二次系统可靠性闭环仿真验证技术,电力设备多物理场仿真平台构建技术等。

对于规划建设场景,在传统电力生产模拟的基础上,充分考虑出力随机波动的新能源和电量输出能力受限的储能资源<sup>[32-33]</sup>,在确保电力供应充裕度的同时,保障合理水平的新能源利用率。针对送端沙漠、戈壁、荒漠地区大型新能源基地、海上风电和受端多回直流密集馈入电网的安全运行需求,落

实《电力系统安全稳定导则》和《电力系统安全稳定计算规范》等标准对规划设计研究深度的要求，在当前稳态潮流计算和机电暂态仿真工具基础上，强化局部深度电力电子化系统的电磁暂态仿真能力，准确认知系统特性，指导规划设计方案科学制定。需要突破的关键技术包括基于实际运行数据的未来态规划目标系统仿真数据智能生成技术，贯穿规划、设计、建设、运行的全过程、多时间尺度数字化仿真分析平台构建技术等。

对于运行控制场景，针对高比例新能源电力系统运行方式去典型化的特征，加快研发高性能仿真技术，实现大规模仿真算力的远程高效调用，满足多人异地协作的海量方式计算需求<sup>[18]</sup>。融合大数据、人工智能等先进信息技术，研发仿真算例便捷生成、仿真结果自动分析等智能化仿真手段<sup>[26-27,68]</sup>。结合调度自动化系统，推广应用在线仿真技术<sup>[69]</sup>和数字孪生技术<sup>[31]</sup>，整合来自外部系统的实时和预测数据，实现兼顾安全性与经济性的运行方式安排，以及对未来运行趋势的定量分析和精准推演。需要突破的关键技术包括：基于人工智能的潮流方式智能调整及方式数据智能生成技术，仿真数据统一管理、平台构建技术，基于数字孪生的高比例新能源电力系统在线分析与方式滚动推演技术，电力系统故障全过程反演与分析技术等。

### 3.3 全要素仿真

积极服务新型电力系统源网荷储各侧海量异构资源接入需求，研究各类新设备建模技术、流程和标准，从稳态到电磁暂态各种时间尺度，从单机到场站各种规模的电力电子设备模型参数库，准确反映并网设备特性和交互影响。需要突破的关键技术主要属于数据领域与硬件领域。

在电源侧，建立新能源单机<sup>[70]</sup>和场站<sup>[71]</sup>多时间尺度详细模型及分布式电源<sup>[72]</sup>模型，从典型控制器结构参数开始，逐步形成实测模型数据库，构建与常规电源同质化的仿真建模体系。针对电力电子化电源控制器结构复杂性，研究模型聚合等值技术<sup>[73-74]</sup>，保留重点关注的主导动态和拓扑结构信息，同时简化模型、降低计算量。需要突破的关键技术包括：适用于多种仿真平台的新能源统一接口封装建模技术，新能源封装模型到开放架构模型的参数拟合技术，可反映站内阻抗和功率分布特性新能源场站聚合等效建模和参数拟合技术，适用于大电网仿真的大型新能源场站模型的自动化生成技

术，新能源场站在线仿真建模技术和模型在线参数辨识修正技术等。

在电网侧，研究柔性直流和各类柔性交流输电设备的动模<sup>[29]</sup>、数模混合<sup>[75]</sup>、数字<sup>[76]</sup>建模仿真技术，重点研究沙漠、戈壁、荒漠地区大型新能源基地送出、海上风电多端汇集和受端多重落点的大容量柔性直流模型。鉴于高压直流元件规模大、控制器结构复杂，工程化应用的仿真计算量极大，需要根据不同应用场景、不同时间尺度的分析需求，针对重点关注的动态(如常规直流换相失败)，研究兼顾仿真精度与效率的高压直流建模<sup>[77-79]</sup>与暂态仿真<sup>[80-82]</sup>方法。将电网建模向低电压等级延伸，逐步建立 110kV 及以下有源配电网及微电网模型，开展输电网与配电网联合仿真<sup>[83-85]</sup>。建立基于地理位置信息和变电站内断路器等器件的电网真实拓扑模型，与外部环境和设备状态监测信息联动，支撑极端天气和设备异常导致电网复杂严重故障的分析。需要突破的关键技术包括：VSC、LCC-VSC 混联直流等新型直流输电系统的多时间尺度建模及参数拟合技术，SVG、SVC、STATCOM 等设备电磁暂态建模技术，直流机电暂态模型、封装模型和含实际保护装置模型的参数拟合技术等。

在负荷侧，基于实测负荷动态特性及故障扰动数据，开展负荷模型参数辨识，实现精细化、差异化负荷建模<sup>[86]</sup>。建立分布式电源、虚拟电厂、电动汽车、变频负荷等广义综合负荷模型<sup>[87,88]</sup>，重点刻画其在控制系统主导下与电网之间能量与信息复杂交互行为，准确评估分布式电源和综合能源系统对电力平衡和电网安全的影响。需要突破的关键技术包括：含分布式新能源的广义综合负荷建模和聚合等值技术，含感应电动机负荷的电磁暂态高效仿真建模技术，数据驱动的相关性负荷模型构建技术，计及分布式发电的综合负荷模型网络等值计算技术等。

在储能侧，建立电化学储能<sup>[89]</sup>、压缩空气储能<sup>[90]</sup>、飞轮储能<sup>[91]</sup>、重力储能、氢能等各类新型储能模型，在电力电量平衡调节的基本功能之外，重点研究对电网安全的影响和主动支撑潜力。需要突破的关键技术包括适用于大电网仿真的新型储能电磁暂态典型结构模型、机电暂态模型及参数辨识技术等。

### 3.4 全过程仿真

适应新型电力系统动态时间尺度缩短、多种时

间尺度动态相互耦合的特征,综合使用各种仿真工具,高效、精确反映电力系统各时间尺度行为。需要突破的关键技术主要属于硬件领域与引擎领域。

生产模拟作为长周期系统平衡分析的基础性工具,未来将继续应用于发展规划方案评估、电力电量平衡分析、电力供应可靠性评估、电网运行方式安排等传统领域。在电力生产模拟工具中,基于概率分布的随机生产模拟具有不依赖具体时序信息的特点,在考虑出力随机波动的新能源发电方面具有原理性优势<sup>[32,92]</sup>,未来将在系统新能源消纳能力评估、系统灵活调节能力规划等方面深化应用。需要突破的关键技术包括:考虑一次能源特性和电量受限资源的随机生产模拟技术、基于冬季晚高峰等典型场景构建的电力系统时序生产模拟技术等。

稳态潮流计算仍是仿真体系的重要基础,将在电力系统运行方式安排与静态安全校核等方面继续发挥关键作用,并为暂态仿真提供基础数据。拓展潮流计算范畴,探索含电、热、气等多种能源综合网络的广义潮流计算方法<sup>[56-57,62]</sup>。需要突破的关键技术包括:考虑大规模新能源、分布式电源接入和电力市场运作的随机潮流、最优潮流计算技术,多能网络广义潮流高效计算技术等。

在未来较长时间内,电力系统将继续以交流电技术为基础,大电网仍以交直流互联电网为主干、同步发电机为基本元件,毫秒级机电暂态过程仍是电网的主导动态<sup>[6]</sup>。机电暂态仿真由于其适用规模大、计算效率高、模型参数积累丰富的特点,在大电网稳定特性研究、规划方案与运行控制策略制定、海量方式并行计算等方面将强化应用。为进一步发挥机电暂态仿真的优势,业界近期开展的研究包括利用并行计算技术提升计算规模<sup>[4,18]</sup>,利用动态相量法突破宽频带分析能力<sup>[93]</sup>,以及利用半解析法<sup>[94]</sup>、微分变换<sup>[95]</sup>等技术提升计算效率等。需要进一步突破的关键技术包括:考虑电力电子设备开关动态响应、面向大规模并行计算的电力系统高精度、工程化机电暂态仿真技术,基于数模混合仿真、电磁暂态仿真的机电暂态仿真精度校核和模型结构参数优化技术等。

对于大型新能源基地、直流密集馈入等深度电力电子化系统,特性畸变导致机电暂态仿真无法准确反映系统动态,必须大力发展电磁暂态仿真,用于精细化的专题研究、宽频振荡等新型稳定问题研究,以及对机电暂态仿真结果的校核。近年来,业

界重点研究方向包括电磁暂态并行计算高效算法<sup>[96-98]</sup>,基于GPU<sup>[99]</sup>、FPGA<sup>[100]</sup>等新型硬件架构的计算技术,以及考虑外部扰动和参数随机性等更多实际因素的仿真方法<sup>[101]</sup>等。需要进一步突破的关键技术包括:适用于大步长仿真的电力电子设备电磁暂态建模技术,基于机电暂态数据的电磁暂态仿真自动化建模技术,基于异构硬件平台的电磁暂态并行计算和分布式计算技术,电磁暂态高效自动解耦分网和并行计算技术,基于机电暂态潮流的大电网电磁暂态运行工况快速建立技术,海量电磁暂态仿真结果挖掘分析技术等。

电磁暂态仿真在原理上可替代机电暂态仿真,但当前计算能力难以满足大电网工程化应用需求,近期可采用机电-电磁混合仿真作为过渡技术,优先应用于含高比例电力电子设备局部电网的大规模交直流电网的仿真,远期随着计算能力的提升与技术发展成熟,逐步实现全电磁暂态仿真。机电网络与电磁网络接口的处理是机电-电磁混合仿真技术的关键,重点关注接口位置选取、等值方法及交互时序技术的创新<sup>[15,17]</sup>。需要进一步突破的关键技术包括:多层次、多颗粒度混合仿真模型自动化生成技术,混合仿真接口高效计算技术,非工频分量误差分析与控制技术。

## 4 构建新型电力系统仿真体系的重点措施

### 4.1 加快新型电力系统仿真关键技术攻关

随着电力系统新能源发电占比的提高和电力电子化程度的加深,电力系统将呈现不同的技术形态,文献[6]将新型电力系统构建过程总体分为转型期、形成期与成熟期3个阶段。在新型电力系统不同的发展阶段,所需的仿真技术重点也不尽相同,需要有针对性地开展技术攻关。

在传统电力系统转型期,新能源快速发展,但常规同步电源仍是电力电量供应主体,交直流互联大电网仍是电网的主要形态,储能技术以抽水蓄能、电化学储能等小时级储能为主,负荷侧主动调节逐渐起步。本阶段内,传统仿真技术总体上仍然适用,需要重点强化仿真体系数据领域、硬件领域与引擎领域技术创新,完善新能源和直流的建模和仿真能力,提升面向特大规模电网短周期分析的稳态、机电暂态仿真能力,以及面向局部深度电力电子化系统的电磁暂态仿真能力。同时,需要强化全电磁暂态仿真能力建设,提前布局有源配电网仿真,为后

续更高比例新能源电力系统做好技术储备。

在新型电力系统形成期，新能源逐步成为装机主体，常规电源功能转向调节与支撑，交直流互联大电网与直流电网、微电网等多种形态共存，大规模储能技术取得突破，负荷侧参与主动调节成为常态。在本阶段，“双高”特性影响由量变转入质变，电力电子设备和配电网、负荷侧建模技术全面成熟，电磁暂态仿真在工程应用中基本取代机电暂态仿真；电力系统与外部系统耦合更加紧密，需要重点攻关仿真体系接口领域与应用领域技术，支撑电力系统与外部系统频繁互动，适应高度市场化运作、在线风险感知与防控需求。同时，现有技术和发展模式在本阶段面临瓶颈，颠覆性技术逐步成熟，需要通过先进仿真技术积极支撑颠覆性技术的研发与应用。

在新型电力系统成熟期，电力系统依托成熟的颠覆性技术呈现全新形态，新能源成为主力电源，并以多种二次能源形式、多种途径(如氢能)传输和利用，发用电基本实现解耦。在本阶段，电力系统与各类能源系统高度耦合，实时性最强的电力系统将是枢纽和核心。需要攻关多能流网络仿真的基础理论、工具和平台，在能源系统广泛应用数字孪生技术，促进数字系统与物理系统紧密交互、深度融合。

#### 4.2 持续强化仿真数据积累与挖掘

全面准确的仿真数据是电力系统仿真体系的基石。为支撑低压分布式电源高渗透率环境仿真需求，有必要扩大仿真建模和数据管理范围，开展全电压等级电力系统数据的收资和管理工作，进行含详细配电网数据的大电网仿真建模。实施规范化、标准化的仿真模型参数管理，保障模型数据的可靠性和准确性。仿真动态数据库应当与电力调度、规划等数据库互联互通，广泛、便捷获取电力系统的真实数据，不仅作为仿真数据源，同时提供仿真结果的比对校验。基于人工智能和大数据技术，对仿真动态数据进行分析处理，形成电力系统典型运行方式和故障集等，充分挖掘仿真数据内在规律与价值。在存储和使用仿真数据的过程中，需要高度重视信息安全，避免电力系统关键信息泄露。

为推动新型电力系统仿真体系建设，国家电网结合长期以来的电网运行实践，编制发布了一批典型仿真数据算例<sup>[102-103]</sup>。算例基于真实电力系统简化等值，覆盖了新能源高占比、水电高占比、直流送受端等典型场景下的各类稳定问题，有助于业界

共同开展新型电力系统仿真技术及稳定特性研究。

#### 4.3 在新型电力系统建设中广泛实践仿真技术

仿真技术的生命力体现在对现实世界的指导作用。构建新型电力系统需要始终坚持系统思维，在准确认知系统特性的基础上，遵循电力系统的技术规律和技术要求开展各项工作，有必要在各环节、各阶段的工作中广泛深入开展仿真分析，以全面准确的仿真结论引领新型电力系统科学发展，并在应用实践中不断强化仿真体系自身建设。

在科技攻关阶段，需要以工程应用为导向，使用仿真技术对新理论、新方法、新设备进行试验验证。需要强化电力、数学、气象环境、信息通信等多学科交叉技术领域的合作，联合科研单位和电力、IT 企业等各方力量，开展仿真关键技术攻关。积极推动仿真软硬件产品化、商业化、平台化，逐步实现仿真技术全链条自主可控。

在规划阶段，需要重点拓展仿真分析的深度和精度，与运行阶段仿真统一工具、模型和标准，根据仿真结论统筹规划电源与送受端电网，避免“搭积木”式建设使电力系统结构性问题不断累积。

在工程设计阶段，需要通过仿真分析详细研究工程对整个电力系统的影响，有针对性的深化工程设计方案，明确安全稳定控制措施。

在电力装备研发中，需要通过系统级仿真，根据电力系统稳定特性科学设计控制器结构和参数，优化设备并网性能，以技术创新保障必要的惯量、调节、支撑等稳定要素，确保“双高”电力系统安全运行。

在建设阶段，需要针对工程建设过渡期认真开展系统仿真分析校核，落实过渡期安全保障措施。

在运行阶段，在不断拓展仿真分析维度、深度、广度、精度的同时，需要结合实际电网故障和系统性试验开展仿真反演分析，对仿真模型进行校正，及时发现电力系统安全隐患。

## 5 结语

构建新型电力系统是一项复杂的系统性工程，需要遵循技术规律、坚持技术原则，在电力系统规划、建设、运行等各个环节中全面深入开展仿真分析。本文分析了新型电力系统仿真在维度、深度、广度和精度等方面面临的更高要求，传统电力系统仿真体系难以完全适应，有必要依托先进信息通信技术，建设以全维度、全场景、全要素、全过程为

特征的新型电力系统仿真体系,全方位满足新型电力系统各环节、各阶段的仿真需求。为加快构建新型电力系统仿真体系,应当根据新型电力系统不同发展阶段的特征与需求,有针对性地开展关键仿真技术攻关,持续开展仿真数据积累与挖掘,充分发挥仿真分析对于新型电力系统科学发展的引领和指导作用,通过广泛深入的应用实践反哺仿真体系建设。

## 参考文献

- [1] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22):1-8.  
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8(in Chinese).
- [2] 陈国平,李明节,许涛,等.我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J].电网技术,2017,41(10):3095-3103.  
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 陈国平,李柏青,李明节,等.新一代特高压交直流电网仿真平台设计方案[J].电网技术,2021,45(8):3228-3237.  
CHEN Guoping, LI Baiqing, LI Mingjie, et al. New generation UHVAC/DC power grid simulation platform design scheme[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3228-3237(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.  
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69(in Chinese).
- [7] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818.  
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).
- [8] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-55056.  
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505 6(in Chinese).
- [9] 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(01):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(01): 20-27(in Chinese).
- [10] 李明节,于钊,许涛,等.新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J].电网技术,2017,41(4):1035-1042.  
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042(in Chinese).
- [11] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.  
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191(in Chinese).
- [12] 杭丽君,闫东,胡家兵,等.电力电子系统建模关键技术综述及展望[J].中国电机工程学报,2021,41(9):2966-2979.  
HANG Lijun, YAN Dong, HU Jiabing, et al. Review and prospect of key modeling technologies for power electronics system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 2966-2979(in Chinese).
- [13] 陈垣,张波,谢帆,等.电力电子化电力系统多时间尺度建模与算法相关性研究进展[J].电力系统自动化,2021,45(15):172-183.  
CHEN Yuan, ZHANG Bo, XIE Fan, et al. Research

- progress of interrelationship between multi-time-scale modeling and algorithm of power-electronized power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 172-183(in Chinese).
- [14] 徐晋, 汪可友, 李国杰. 电力电子设备及含电力电子设备电力系统实时仿真研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 3-17.
- XU Jin, WANG Keyou, LI Guojie. Review of real-time simulation of power electronic devices and power systems integrated with power electronic devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 3-17(in Chinese).
- [15] 董毅峰, 王彦良, 韩佶, 等. 电力系统高效电磁暂态仿真技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2213-2231.
- DONG Yifeng, WANG Yanliang, HAN Ji, et al. Review of high efficiency digital electromagnetic transient simulation technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2213-2231(in Chinese).
- [16] 沈沉, 陈颖, 黄少伟, 等. 新型电力系统仿真应用软件设计理念与发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 75-86.
- SHEN Chen, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Design idea and development path of simulation application software for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 75-86(in Chinese).
- [17] 王玘, 李亚楼, 陈绪江, 等. 基于 ADPSS 新一代仿真平台的大规模交直流电网数模混合仿真[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 227-234.
- WANG Pin, LI Yalou, CHEN Xujiang, et al. Digital-analog hybrid simulation of large-scale AC-DC power grids based on ADPSS next-generation simulation platform[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 227-234(in Chinese).
- [18] 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 [J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1144-1150(in Chinese).
- [19] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18-32.
- GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32(in Chinese).
- [20] 李亚楼, 张星, 胡善华, 等. 含高比例电力电子装备电力系统安全稳定分析建模仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 33-42.
- LI Yalou, ZHANG Xing, HU Shanhua, et al. Modeling and simulation technology for stability analysis of power system with high proportion of power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 33-42(in Chinese).
- [21] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
- LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986(in Chinese).
- [22] 国家电网有限公司. 2023 年国家电网公司系统电网运行方式[Z]. 2023.
- State Grid Corporation of China. Power Grid Operation Mode of SGCC in 2023[Z]. 2023(in Chinese).
- [23] 李明节, 梁志峰, 许涛, 等. 基于敏感气温空间分布的度夏度冬日最大负荷预测与应用研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1088-1097.
- LI Mingjie, LIANG Zhifeng, XU Tao, et al. Prediction and application of maximum daily load in summer and winter based on spatial distribution of sensitive temperatures[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1088-1097(in Chinese).
- [24] 王彩霞, 时智勇, 梁志峰, 等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 37-48.
- WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 37-48(in Chinese).
- [25] 王海潜, 乔黎伟, 张正利, 等. 空调负荷模型对电网仿真影响[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2): 31-35.
- WANG Haiqian, QIAO Liwei, ZHANG Zhengli, et al. Influence of air conditioners load model on simulation of power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(2): 31-35(in Chinese).
- [26] 黄彦浩, 于之虹, 谢昶, 等. 电力大数据技术与电力系统仿真计算结合问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 13-22.
- HUANG Yanhao, YU Zhihong, XIE Chang, et al. Study on the application of electric power big data technology in power system simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 13-22(in Chinese).
- [27] 侯庆春, 杜尔顺, 田旭, 等. 数据驱动的电力系统运行方式分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 1-12.
- HOU Qingchun, DU Ershun, TIAN Xu, et al. Data-driven power system operation mode analysis[J]. Proceedings of

- the CSEE, 2021, 41(1): 1-12(in Chinese).
- [28] LAUSS G, STRUNZ K. Accurate and stable hardware-in-the-loop(HIL) real-time simulation of integrated power electronics and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10920-10932.
- [29] 王唯, 王映祺. 基于 VSC 的多端直流输电系统的动模平台设计[J]. 电工技术, 2022(23): 36-40.  
WANG Wei, WANG Yingqi. Design of dynamic model platform for multiple terminal flexible DC transmission system based on VSC[J]. Electric Engineering, 2022(23): 36-40(in Chinese).
- [30] LI Yongjian, YAN Xinxiao, WANG Chunguang, et al. Eddy current loss effect in foil winding of transformer based on magneto-fluid-thermal simulation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7): 1-5.
- [31] 沈沉, 曹任妮, 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): 487-4989.  
SHEN Chen, CAO Qianni, JIA Mengshuo, et al. Concepts, characteristics and prospects of application of digital twin in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 487-499(in Chinese).
- [32] 朱睿, 胡博, 谢开贵, 等. 含风电-光伏-光热-水电-火电-储能的多能源电力系统时序随机生产模拟[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3246-3253.  
ZHU Rui, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Sequential probabilistic production simulation of multi-energy power system with wind power, photovoltaics, concentrated solar power, cascading hydro power, thermal power and battery energy storage[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3246-3253(in Chinese).
- [33] 邵成成, 冯陈佳, 王雅楠, 等. 含大规模清洁能源电力系统的多时间尺度生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6103-6113.  
SHAO Chengcheng, FENG Chenjia, WANG Yanan, et al. Multiple time-scale production simulation of power system with large-scale renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6103-6113(in Chinese).
- [34] 马天兆, 罗毅飞, 贾英杰, 等. 考虑芯片电热应力分布的 IGBT 动态雪崩工况电热联合仿真[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7068-7079.  
MA Tianzhao, LUO Yifei, JIA Yingjie, et al. IGBT electro-thermal simulation under dynamic avalanche condition considering distribution of electro-thermal stress on chip[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7068-7079(in Chinese).
- [35] ZHU Sa, CHENG Ming, CAI Xiuhua. Direct coupling method for coupled field-circuit thermal model of electrical machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 473-482.
- [36] 程书灿, 赵彦普, 张军飞, 等. 电力设备多物理场仿真技术及软件发展现状[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 121-137.  
CHENG Shucan, ZHAO Yanpu, ZHANG Junfei, et al. State of the art of multiphysics simulation technology and software development for power equipment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 121-137(in Chinese).
- [37] 叶林, 赵金龙, 路朋, 等. 考虑气象特征与波动过程关联的短期风电功率组合预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 54-62.  
YE Lin, ZHAO Jinlong, LU Peng, et al. Combined prediction of short-term wind power considering correlation of meteorological features and fluctuation process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 54-62(in Chinese).
- [38] 师浩琪, 郭力, 刘一欣, 等. 基于多源气象预报总辐照度修正的光伏功率短期预测[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 104-112.  
SHI Haoqi, GUO Li, LIU Yixin, et al. Short-term forecasting of photovoltaic power based on total irradiance correction of multi-source meteorological forecast[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 104-112(in Chinese).
- [39] 李滨, 陆明珍. 考虑实时气象耦合作用的地区电网短期负荷预测建模[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 60-68.  
LI Bin, LU Mingzhen. Short-term load forecasting modeling of regional power grid considering real-time meteorological coupling effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 60-68(in Chinese).
- [40] XU Jie, YAO Rui, QIU Feng. Mitigating cascading outages in severe weather using simulation-based optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 204-213.
- [41] 吴勇军, 薛禹胜, 陆佳政, 等. 山火灾害对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 14-20.  
WU Yongjun, XUE Yusheng, LU Jiazheng, et al. Space-time impact of forest fire on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 14-20(in Chinese).
- [42] 王建, 熊小伏, 李哲, 等. 气象环境相关的输电线路故障时间分布特征及模拟[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 109-114.  
WANG Jian, XIONG Xiaofu, LI Zhe, et al. Time distribution of weather-related transmission line failure and its fitting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 109-114(in Chinese).
- [43] BAO Zhejing, JIANG Zhewei, WU Lei. Evaluation of bi-directional cascading failure propagation in integrated electricity-natural gas system[J]. International Journal of

- Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106045.
- [44] 张安安, 李静, 林冬, 等. 考虑天然气管网极限风险影响的电-气耦合系统连锁故障模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7275-7285.
- ZHANG An'an, LI Jing, LIN Dong, et al. A cascading failure model of electricity-gas coupling system considering the influence of limit risk of natural gas pipeline network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7275-7285(in Chinese).
- [45] ZHANG Jing, YAN Jie, LIU Yongqian, et al. Daily electric vehicle charging load profiles considering demographics of vehicle users[J]. Applied Energy, 2020, 274: 115063.
- [46] 龙雪梅, 杨军, 吴赋章, 等. 考虑路网-电网交互和用户心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 86-93.
- LONG Xuemei, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Prediction of electric vehicle charging load considering interaction between road network and power grid and user's psychology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 86-93(in Chinese).
- [47] XIANG Yue, JIANG Zhuozhen, GU Chenghong, et al. Electric vehicle charging in smart grid: a spatial-temporal simulation method[J]. Energy, 2019, 189: 116221.
- [48] 王科, 胡海涛, 魏文婧, 等. 基于列车运行图的高速铁路动态牵引负荷建模方法[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(1): 102-110.
- WANG Ke, HU Haitao, WEI Wenjing, et al. Modelling method for dynamic traction load of high speed railway based on train working diagram[J]. China Railway Science, 2017, 38(1): 102-110(in Chinese).
- [49] 陈维荣, 姜天, 戴朝华, 等. 电气化铁路接入下的电力系统概率潮流分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6899-6907.
- CHEN Weirong, JIANG Tian, DAI Chaohua, et al. Probabilistic load flow of power system with traction power load of electrified railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6899-6907(in Chinese).
- [50] YANG Shaobing, SONG Kejian, ZHU Guangli. Stochastic process and simulation of traction load for high speed railways[J]. IEEE Access, 2019, 7: 76049-76060.
- [51] 朱介北, 邱威, 孙宁, 等. 基于序贯蒙特卡洛法的安全稳定控制系统架构可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 21-27.
- ZHU Jiebei, QIU Wei, SUN Ning, et al. Reliability analysis of security and stability control system architecture based on sequential Monte Carlo method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 21-27(in Chinese).
- [52] LEDESMA P, GOTTI D, AMARIS H. Co-simulation platform for interconnected power systems and communication networks based on PSS/E and OMNeT++ [J]. Computers and Electrical Engineering, 2022, 101: 108092.
- [53] 薛禹胜, 谢东亮, 薛峰, 等. 支持信息-物理-社会系统研究的跨领域交互仿真平台[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 138-148.
- XUE Yusheng, XIE Dongliang, XUE Feng, et al. A cross-field interactive simulation platform for supporting research on cyber-physical-social systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 138-148(in Chinese).
- [54] 付灿宇, 王立志, 齐冬莲, 等. 有源配电网信息物理系统混合仿真平台设计方法及其算例实现[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7118-7125.
- FU Canyu, WANG Lizhi, QI Donglian, et al. Design and experiments of active distribution network CPS simulation platform[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7118-7125(in Chinese).
- [55] 孙充勃, 成晟, 原凯, 等. 基于节点映射模型的电力信息物理系统实时仿真平台[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2368-2377.
- SUN Chongbo, CHENG Sheng, YUAN Kai, et al. Real time simulation platform of power cyber-physical system based on node mapping model[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2368-2377(in Chinese).
- [56] 彭石, 谢宁, 王承民, 等. 电气-供热管网系统等值模型与静态潮流分析方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 62-73.
- PENG Shi, XIE Ning, WANG Chengmin, et al. Equivalent model and static flow analysis method for electricity and heating network system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 62-73(in Chinese).
- [57] MASSRUR H R, NIKNAM T, AGHAEI J, et al. Fast decomposed energy flow in large-scale integrated electricity-gas-heat energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1565-1577.
- [58] 欧阳自强, 韩鹏飞, 严正, 等. 计及双向耦合的气-电综合能源系统全动态多速率联合仿真算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(17): 6170-6184.
- OUYANG Ziqiang, HAN Pengfei, YAN Zheng, et al. Research on complete dynamic multi-rate co-simulation algorithm of integrated electric-gas energy system with two-way coupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17): 6170-6184(in Chinese).
- [59] 夏越, 陈颖, 杜松怀, 等. 综合能源系统多时间尺度动态时域仿真关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 97-110.
- XIA Yue, CHEN Ying, DU Songhuai, et al. Key technologies for multi-time-scale dynamic time-domain

- simulation of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 97-110(in Chinese).
- [60] 李亚楼, 李芳, 刘赫川, 等. 基于 PSASP 的综合能源仿真分析系统[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2498-2506. LI Yalou, LI Fang, LIU Hechuan, et al. Framework design of simulation system for integrated energy systems based on PSASP[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2498-2506(in Chinese).
- [61] HUANG Qihua, MCDERMOTT T E, TANG Yingying, et al. Simulation-based valuation of transactive energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 4138-4147.
- [62] 朱永强, 蔡钦钦, 龚萍, 等. 多能源网络稳态能量流分析与计算方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 59-66. ZHU Yongqiang, CAI Qinqin, GONG Ping, et al. Analysis and calculation method of steady-state energy flow in multi-energy network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 59-66(in Chinese).
- [63] MASOOM A, MAHSEREDJIAN J, OULD-BACHIR T, et al. MSEMT: an advanced modelica library for power system electromagnetic transient studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 2453-2463.
- [64] 陈颖, 高仕林, 宋炎侃, 等. 面向新型电力系统的高性能电磁暂态云仿真技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(08): 2854-2864. CHEN Ying, GAO Shilin, SONG Yankan, et al. High-performance electromagnetic transient simulation for new-type power system based on cloud computing[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(08): 2854-2864(in Chinese).
- [65] LI Changgang, WU Yue, ZHANG Hengxu, et al. STEPS: A portable dynamic simulation toolkit for electrical power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3216-3226.
- [66] BUKHSH W, EDMUNDS C, BELL K. OATS: optimisation and analysis toolbox for power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3552-3561.
- [67] 沈卓轩, 姜齐荣. 电力系统电磁暂态仿真 IGBT 详细建模及应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 235-247. SHEN Zhuoxuan, JIANG Qirong. Detailed IGBT modeling and applications of electromagnetic transient simulation in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 235-247(in Chinese).
- [68] 汤涌, 姚伟, 王宏志, 等. 电网仿真分析与决策的人工智能方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5384-5406. TANG Yong, YAO Wei, WANG Hongzhi, et al. Artificial intelligence techniques for power grid simulation analysis and decision making[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5384-5406(in Chinese).
- [69] 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.
- [70] HONRUBIA-ESCRIBANO A, GÓMEZ-LÁAZARO E, FORTMANN J, et al. Generic dynamic wind turbine models for power system stability analysis: a comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1939-1952.
- [71] LIN Ning, CAO Shiqi, DINAHAHI V. Comprehensive modeling of large photovoltaic systems for heterogeneous parallel transient simulation of integrated AC/DC grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 917-927.
- [72] 孙华东, 李佳豪, 李文锋, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(一): 模型结构[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1378-1389. SUN Huadong, LI Jiahao, LI Wenfeng, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system simulation (Part I): model structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1378-1389(in Chinese).
- [73] DU Wei, TUFFNER F K, SCHNEIDER K P, et al. Modeling of grid-forming and grid-following inverters for dynamic simulation of large-scale distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2035-2045.
- [74] 何君毅, 周瑀涵, 王康, 等. 主导模态保持的风电场站自适应等值方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 28-36. HE Junyi, ZHOU Yuhan, WANG Kang, et al. Self-adaptive equivalence method for wind farm with maintained dominant mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 28-36(in Chinese).
- [75] 杨立敏, 朱艺颖, 郭强, 等. 基于 HYPERSIM 的柔性直流输电系统数模混合仿真建模及试验[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4055-4062. YANG Limin, ZHU Yiyang, GUO Qiang, et al. Modelling and validation of digital-analog hybrid simulation for VSC-HVDC system based on HYPERSIM[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4055-4062(in Chinese).
- [76] 贺之渊, 刘栋, 庞辉. 柔性直流与直流电网仿真技术研究[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 1-12. HE Zhiyuan, LIU Dong, PANG Hui. Research of simulation technologies of VSC-HVDC and DC grids[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 1-12(in Chinese).
- [77] STEPANOV A, MAHSEREDJIAN J, KARAAGAC U,

- et al. Adaptive modular multilevel converter model for electromagnetic transient simulations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 803-813.
- [78] 潘尔生, 杨惠文, 宋钊, 等. 适用于大步长情形下基于模块化多电平拓扑的直流电网高效仿真建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6142-6150.
- PAN Ersheng, YANG Huiwen, SONG Zhao, et al. An efficient modeling of modular multi-level converter based DC grids by using larger time-steps[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6142-6150(in Chinese).
- [79] 连攀杰, 刘文焯, 杨泽栋, 等. 混合型 MMC 全状态高效电磁暂态仿真方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8520-8531.
- LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, YANG Zedong, et al. Research on hybrid MMC full-state efficient electromagnetic transient simulation method [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8520-8531(in Chinese).
- [80] SHU Dewu, OUYANG Ziqiang, YAN Zheng. Multirate and mixed solver based cosimulation of combined transient stability, shifted-frequency phasor, and electromagnetic models: a practical LCC HVDC simulation study[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4954-4965.
- [81] 王宾, 李志中, 董新洲. 基于动态相量法的直流系统暂态响应实时快速仿真计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1608-1618.
- WANG Bin, LI Zhizhong, DONG Xinzhou. Real-time rapid simulation method for transient response of LCC-HVDC based on dynamic phasor method [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1608-1618(in Chinese).
- [82] 单俊儒, 刘崇茹, 李欢, 等. 考虑锁相环和换相失败的 LCC-HVDC 闭环动态相量仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3046-3056.
- SHAN Junru, LIU Chongru, LI Huan, et al. Closed-loop dynamic phasor simulation model of LCC-HVDC considering phase-locked loop and commutation failure [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3046-3056(in Chinese).
- [83] MOHSENI-BONAB S M, HAJEBRAHIMI A, KAMWA I, et al. Transmission and distribution co-simulation: a review and propositions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(21): 4631-4642.
- [84] PANDEY A, PILEGGI L. Steady-state simulation for combined transmission and distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1124-1135.
- [85] WANG Wenbo, FANG Xin, CUI Hantao, et al. Transmission-and-distribution dynamic Co-simulation framework for distributed energy resource frequency response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 482-495.
- [86] 徐贤, 周晋航, 王颖, 等. 基于类噪声的解耦测辨负荷模型机理分析及应用[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 138-145.
- XU Xian, ZHOU Jinhang, WANG Ying, et al. Mechanism analysis and application of ambient noise decoupling load measurement and identification model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 138-145(in Chinese).
- [87] 鞠平, 郭德正, 曹路, 等. 含主动负荷的综合电力负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 367-376.
- JU Ping, GUO Dezheng, CAO Lu, et al. Review and prospect of modeling on generalized synthesis electric load containing active loads[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(4): 367-376(in Chinese).
- [88] 徐衍会, 邓子琳, 司大军. 新型电力负荷建模研究现状与展望[J]. 云南电力技术, 2021, 49(4): 10-14, 20.
- XU Yanhui, DENG Zilin, SI Dajun. Current status and prospects of research on modeling of new power load[J]. Yunnan Electric Power, 2021, 49(4): 10-14, 20(in Chinese).
- [89] 叶小晖, 刘涛, 吴国旻, 等. 电池储能系统的多时间尺度仿真建模研究及大规模并网特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2635-2644.
- YE Xiaohui, LIU Tao, WU Guoyang, et al. Multi-time scale simulation modeling and characteristic analysis of large-scale grid-connected battery energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2635-2644(in Chinese).
- [90] CALERO I, CAÑIZARES C A, BHATTACHARYA K. Compressed air energy storage system modeling for power system studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3359-3371.
- [91] SILVA-SARAVIA H, PULGAR-PAINEMAL H, MAURICIO J M. Flywheel energy storage model, control and location for improving stability: the Chilean case[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3111-3119.
- [92] 丁明, 林玉娟. 考虑风光荷不确定性的随机生产模拟[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2937-2944.
- DING Ming, LIN Yujuan. Probabilistic production simulation considering randomness of renewable wind power, photovoltaic and load[J]. Acta Energetica Sinica, 2018, 39(10): 2937-2944(in Chinese).
- [93] KULASZAMA, ANNAKKAGE U D, KARAWITA C, et al. Extending the frequency bandwidth of transient stability simulation using dynamic phasors[J]. IEEE

- Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 249-259.
- [94] WANG Bin, DUAN Nan, SUN Kai. A time-power series-based semi-analytical approach for power system simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 841-851.
- [95] LIU Yang, SUN Kai, YAO Rui, et al. Power system time domain simulation using a differential transformation method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3739-3748.
- [96] 姚蜀军, 庞博涵, 吴国旻, 等. 半隐式延迟解耦电磁暂态并行仿真方法(一): 原理及交流分网与并行[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2486-2497.
- YAO Shujun, PANG Bohan, WU Guoyang, et al. A method of parallel computing for electromagnetic transient simulation based on semi-implicit latency decoupling technology(Part I): theory and ac network partitioning and parallel[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2486-2497(in Chinese).
- [97] ZHENG Jialin, ZHAO Zhengming, ZENG Yangbin, et al. An event-driven parallel acceleration real-time simulation for power electronic systems without simulation distortion in circuit partitioning[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 15626-15640.
- [98] 高仕林, 宋炎侃, 陈颖, 等. 电力系统移频电磁暂态仿真原理及应用综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 173-183.
- GAO Shilin, SONG Yankan, CHEN Ying, et al. Overview on principle and application of shifted frequency based electromagnetic transient simulation for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 173-183(in Chinese).
- [99] SUN Jingfan, DEBNATH S, SAEEDIFARD M, et al. Real-time electromagnetic transient simulation of multi-terminal HVDC-AC grids based on GPU[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 7002-7011.
- [100] CAO Shiqi, LIN Ning, DINAHAHI V. Faster-than-real-time dynamic simulation of AC/DC grids on reconfigurable hardware[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1539-1548.
- [101] 陈鹏伟, 刘奕泽, 阮新波, 等. 电力电子化电力系统随机电磁暂态仿真算法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3829-3841.
- CHEN Pengwei, LIU Yize, RUAN Xinbo, et al. Stochastic electromagnetic transient simulation algorithm applied to power electronics dominated power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3829-3841(in Chinese).
- [102] 李明节, 郭强, 贺静波, 等. 高比例新能源特高压交流典型算例系统(一): 电压及功角稳定算例系统[J/OL]. 电网技术, 2023(2023-03-22). <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2341>.
- LI Mingjie, GUO Qiang, HE Jingbo, et al. Typical test system of UHV AC and DC network with high penetration of new energy(1): test system for analyzing voltage and power angle stability[J/OL]. Power System Technology, 2023(2023-03-22). <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2341>(in Chinese).
- [103] 李明节, 郭强, 贺静波, 等. 高比例新能源特高压交流典型算例系统(二): 频率及振荡问题算例系统[J/OL]. 电网技术, 2023(2023-03-22). <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2342>.
- LI Mingjie, GUO Qiang, HE Jingbo, et al. Typical test system of UHV AC and DC network with high penetration of new energy(2): test system for analyzing frequency and oscillation stability[J/OL]. Power System Technology, 2023(2023-03-22). <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2342>(in Chinese).



陈国平

收稿日期: 2023-02-24。

#### 作者简介:

陈国平(1965), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行与控制, [chen-guoping@sgcc.com.cn](mailto:chen-guoping@sgcc.com.cn);

李明节(1963), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行与控制, [li-mingjie@sgcc.com.cn](mailto:li-mingjie@sgcc.com.cn);

董昱(1974), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行控制与管理等, [dong-yu@sgcc.com.cn](mailto:dong-yu@sgcc.com.cn);

郭强(1972), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划技术, [guoqiang@epri.sgcc.com.cn](mailto:guoqiang@epri.sgcc.com.cn);

贺静波(1983), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制, [he-jingbo@sgcc.com.cn](mailto:he-jingbo@sgcc.com.cn);

\*通信作者: 张放(1987), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行与控制, [zhang-fang@sgcc.com.cn](mailto:zhang-fang@sgcc.com.cn)。

(责任编辑 乔宝榆)