



电力系统自动化

Automation of Electric Power Systems

ISSN 1000-1026, CN 32-1180/TP

《电力系统自动化》网络首发论文

题目：面向以新能源为主体的新型电力系统仿真工具研究初探
作者：董雪涛，冯长有，朱子民，唐君毅，刘震，徐志，亢朋朋
收稿日期：2021-04-20
网络首发日期：2021-11-25
引用格式：董雪涛，冯长有，朱子民，唐君毅，刘震，徐志，亢朋朋. 面向以新能源为主体的新型电力系统仿真工具研究初探[J/OL]. 电力系统自动化. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211124.1503.006.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

面向以新能源为主体的新型电力系统仿真工具研究初探

董雪涛^{1,3}, 冯长有^{1,2}, 朱子民^{1,3}, 唐君毅^{1,3}, 刘震^{1,3}, 徐志^{1,3}, 亢朋朋⁴

- (1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830001;
2. 国家电网有限公司国家电力调度控制中心, 北京市 100031;
3. 新疆电力系统全过程仿真重点实验室, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830001;
4. 国网新疆电力有限公司电力调度控制中心, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830002)

摘要：能源转型背景下,新型电力系统中高可再生能源占比和高比例电力电子设备接入引起的“双高”特征将深刻改变电网形态和运行特性,对仿真理论研究和先进仿真工具研发提出了新的需求。文中梳理了现有仿真软件、仿真体系在应对新型电力系统稳定特性更迭、仿真分析时间及空间尺度跨度增大和电力系统数字化发展过程中电网智能分析运行控制体系构建3个层面上的需求与挑战,结合现有仿真技术特性的分析,指出当前仿真工具存在的不足。最后,理清仿真工具发展趋势,提出新型电力系统仿真技术框架,并就目前仿真工具需要关注的潜在技术发展点进行展望。

关键词：新型电力系统; 高比例可再生能源; 高比例电力电子设备; 电力系统仿真软件; 先进仿真工具

0 引言

电力系统是实现能源转型的关键支撑,构建以新能源为主体的新型电力系统是达成中国“30·60双碳”战略目标的必然途径^[1-2]。2021年3月,中央财经委员会第九次会议明确提出了实施可再生能源替代行动、构建新型电力系统的重要部署,未来电网将在能源清洁化发展和电力技术革新的共同推动下,实现新能源和跨区域电网的高质量、跨越式发展^[3-4]。伴随这一过程中系统高可再生能源占比和高比例电力电子设备接入的“双高”特征的凸显,电网特性复杂程度和运行难度骤升。当前针对复杂大电网稳定特性的认知与规划方案、运行控制策略的制定仍高度依赖仿真分析,现有仿真软件难以满足新型电力系统各项分析需求,亟需理清电网和仿真工具发展趋势,构建完善的仿真技术框架体系并针对新型电力系统开展深入分析研究,从而全面掌握电网安全稳定特性^[5-6]。

电力系统由当前高碳电网向深度低碳、零碳新型电力系统转变过程中,电网动态特性随基础支撑电源的清洁能源化与火电机组电量供应主体转换为电力供应主体的定位变化而发生深刻转变^[7-8];规模化新能源接入、柔性输电技术的广泛应用使得电网

逐步呈现高度电力电子化和扁平化、分布化的特点^[9]。电力电子元件较低的故障耐受能力和复杂的控制逻辑对系统仿真与安全稳定特性的分析提出新的挑战,其快速暂态过程对电网局部电磁暂态精细化模型、等效聚合模型的建立和快速求解算法提出更高要求^[10-11];新型电力系统中可再生能源经由特高压直流跨大区输送成为重要的电能传输方式,交流互联、直流组网局面的逐步形成使得区域电网间的耦合特性日趋紧密,对大电网仿真分析的时间、空间尺度和全国范围内电网数据统一管理、分析过程智能化、仿真计算平台化均提出了新的需求^[12-13]。配电网中海量不同类型的小、微型分布式电源(DG)的接入、用户侧多能综合能源系统构建和电网跨区域互联等大电网发展带来的海量运行数据,迫切地需求建立完备的基于全景信息的电网多元数据驱动分析、运行控制体系。探究面向新型电力系统先进仿真工具发展路径与解决方案具有重要战略意义^[14-15]。

本文着眼于“双高”背景下新型电力系统特征与发展趋势,梳理并归纳“双高”特征对新型电力系统仿真分析带来的挑战,理清仿真工具发展趋势,提出新型电力系统仿真技术框架,并就目前仿真工具需要关注的潜在技术发展点进行展望。

1 新型电力系统对仿真分析带来的挑战

结合“30·60”双碳目标的实现时序,可将新型电

力系统发展建设过程以2030年为关键节点,划分为转型期、形成期-成熟期两大阶段,最终形成以新能源为主体、火电+碳捕获、利用与封存(carbon capture,utilization and storage,CCUS)技术作保障、

抽水蓄能、新型储能和燃氢电站作调节、负荷侧协同互动为辅助的坚强、智能、数字化新型电力系统。各发展阶段电网主要特征和电网发展、仿真软件带来的挑战如图1所示。

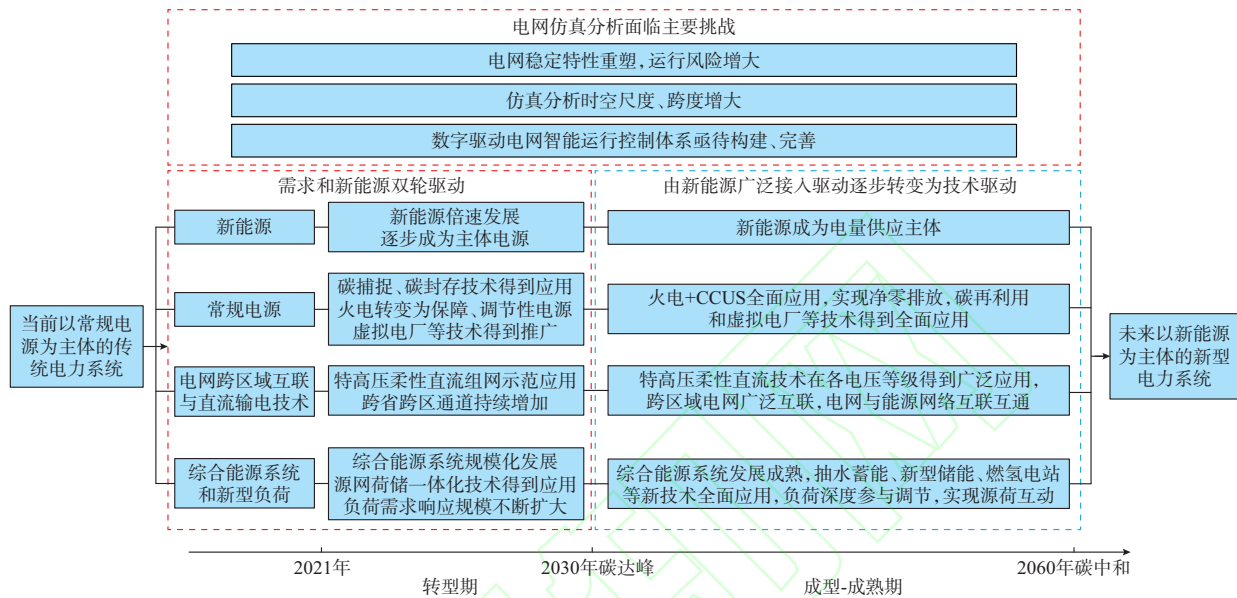


图1 新型电力系统各发展阶段特征与仿真分析主要面临的挑战

Fig. 1 Characteristics and main challenges of simulation analysis in each development stage of low-carbon power system

新型电力系统不同发展阶段对仿真工具带来的挑战主要可归纳为系统动力学特性改变背景下电网稳定特性重塑,运行风险增大、跨区域大电网耦合特性增强和综合能源体系构建背景下仿真分析应对的时空尺度、跨度增大与电网数字化发展过程中基于全景信息的电网数字驱动分析、运行控制体系重构3个层面。

1.1 电网稳定特性重塑,运行风险增大

电网稳定特性的重塑贯穿新型电力系统转型、成型和成熟的全过程。高占比新能源和高比例电力电子设备接入电力系统,既给系统带来灵活快速的调控手段,同时也深刻改变了电力系统稳定形态和运行特性^[16]。随着新能源占比提升,起到调节及惯性支撑作用的传统火电机组被新能源机组替代,电网调节能力和稳定裕度逐步降低,系统运行风险增大,安全稳定问题愈加突显^[17]。

新能源机组独有的快速动态响应与低转动惯量特性将“重塑”系统整体的动态行为,系统整体动力学特性由机电过程主导逐步转化为切换控制主导,电网响应更加快速、动态特性更加复杂,一、二次宽频带耦合特征凸显,故障连锁演化过程愈加复杂,精细化的电力系统建模及仿真分析技术需求随之日益增长^[18]。中低压电网中综合能源系统与电网的高耦合度带来的负荷侧多种影响因素和不同接入、汇

集方式下新能源机组出力的强波动性、高随机性、难预测性共同影响下,系统各电压层级潮流分布、运行方式多变,仿真计算边界难以确定,影响电网经典稳定性的各个方面^[19-20]。

文献[21-22]针对“双高”背景下系统在不同时间尺度上经典稳定性和宽频带电磁谐振/振荡等新型稳定性问题进行分析,指出电力系统在逐步转变为新能源为主体电源的过程中,需革新大扰动稳定性分析的基础理论与方法,形成弱中心化甚至去中心化的稳定性快速分析与调控体系;待系统转变为完全由“双高”特征主导时,原有的稳定性定义与分类等基础概念可能不再适用,建立全新的稳定性定义与分类是需要解决的首要问题,并亟需针对大扰动异构设备机电-电磁暂态的交互影响及多时间尺度暂态分析过程中电磁暂态过程影响的刻画展开更为深入的研究与分析^[23]。

1.2 仿真分析应对的时空尺度、跨度增大

新型电力系统发展和完善过程中,跨大区电网间多条特高压直流同送同受现象的存在,和未来直流组网的发展趋势将使得电网间耦合特性日趋紧密,极大地增大了仿真分析时空尺度上的跨度和范围;局部电网中热、冷、氢、气等能源深度耦合的综合能源体系构建过程中负荷特征的柔性、生产和消费兼具特性的转变,以及电网运行过程中源网荷储协

同互动的非完全实时平衡模式转变对系统仿真在多长时间尺度的综合分析上提出了新的挑战。

当前电力系统仿真分析主要聚焦于区域电网范围内新能源机组、传统同步机组间交织交互因素影响下的电磁暂态、机电暂态和中、长期动态过程特性分析,但在跨大区强耦合电网特性和多形态能源综合接入影响下系统大范围长时间尺度的慢过程、长过程分析仍是解耦的^[24],整体情况如图2所示。新能源电量主导场景下,数倍于负荷的新能源装机容量所造成的功率波动和热、冷、氢、气等大规模多类型能源转换系统的接入,将使得电网在小时乃至更长时间尺度上的功率平衡和运行控制难度进激增,新能源消纳与安全矛盾突出,给电网设计规划、生产运行带来极大挑战^[25-26]。

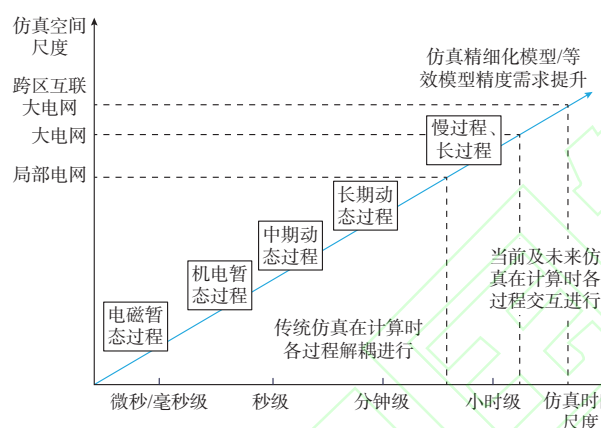


图2 不同阶段仿真分析聚焦的时间尺度
Fig. 2 Time scale of simulation analysis focused in different stages

另一方面,随着对精确模拟电网集群化电力电子设备快速动态过程和交织交互因素影响下电网慢过程、长过程等多时空尺度上仿真需求的日益增长,系统稳定分析对电磁暂态仿真、数模混合仿真等精细化仿真技术的依赖度也越来越高^[27]。系统分析过程中,所需模型参数和建模复杂度成倍增加,如何将大规模风电、光伏基地、储能场站和综合能源系统的机电、电磁暂态等值模型准确性达到实际研究、应用需求的标准,对电力系统仿真软件提出了更高要求;跨区域大电网层级仿真需基于超级计算资源开展,以电磁暂态和数模混合仿真为主的精细化仿真质效面临巨大挑战^[28],如何实现机电暂态仿真过程中电磁与机电参数的融合、超高维异构系统稳定性快速分析、广域互联大电网的电磁参数平台化统一建模与统一管理,以及实现大电网机电、电磁等不同仿真引擎的云端调用,已经成为适应大电网电力电子化仿真计算的关键环节^[29]。

1.3 数字驱动的电网分析、运行控制体系重构

新型电力系统发展成型、成熟过程中,社会-物理-信息的高度耦合,对数字驱动的电网全景信息分析、运行控制体系重构提出了新的挑战。

现有仿真体系下,模型驱动的电网静态/暂态分析基于设备物理模型,并利用严格的数学公式推导关联各维度之间数据,但其分析过程需做大量相关信息的预处理工作,存在复杂电力系统的交织问题,并缺乏有效的机制来应对模型等效、系统固有误差、不确定度在不同电网层级上的传递和有效评估,更难以有效利用新型电力系统运行过程中产生的海量数据,发挥大数据带来的数据优势^[30]。构建基于电网运行数据的电力系统数字孪生模型,进而建立实时态势感知、超时虚拟推演的分析、运行控制体系,可有效解决以上问题^[31]。基于随机矩阵理论对电力系统数字孪生模型进行分析挖掘,结合时间序列分析、建立相应量化评价指标,能够实现对大电网扰动的影响程度分析和影响范围评估,一定程度上可实现仿真模型与交织问题的解耦^[32]。

数字驱动的电网全景信息分析、运行控制体系典型构架如图3所示。

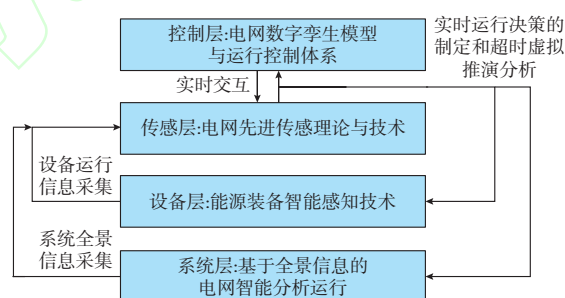


图3 数字驱动的电网全景信息运行控制体系典型构架
Fig. 3 Typical architecture of digital driven power grid panoramic information operation control system

通过对系统宏观层面上全景信息和电网物理设备层面上实时运行信息的广域智能感知、全面实时连接,构建电网完整映射的数字孪生体^[33];进而,建立并完善新型电力系统大数据和人工智能支撑下的运行分析控制平台,结合云端协同、物理-数字孪生技术支撑的物理系统分析管控等手段,实现调控运行的智能决策和电网各层级资源的友好、协同互动;通过互联互通、数字赋能,形成新型电力系统各层级不同类型要素之间的高效协同与资源优化匹配,在数字层面完善机理与数据融合的建模方法、自主智能控制策略等,并闭环作用于物理系统,使得安全稳定特性分析过程中获取的信息更为多元化,系统运行控制体系和电网数字模型实现完善、灵活的自寻优、自校正、自愈能力,全面支撑高比例可再生能源

消纳,促进电网低碳高效运行,从而进一步提升新型电力系统安全稳定水平^[34]。

2 当前主要仿真工具不足

当前电网数字孪生模型和智能分析运行控制体系的构建尚处于起步状态,相应仿真软件和系统、平台较为欠缺;针对传统电力系统开展仿真分析的主流软件从时间尺度层面,可划分为电力系统中长期生产模拟仿真技术、机电暂态仿真技术、电磁暂态仿真技术、机电-电磁混合仿真技术和数模混合仿真技术五大类,每种仿真技术在应对新型电力系统仿真分析时均存在各自优缺点。

1) 电力系统中长期生产模拟仿真技术

新型电力系统“双高”特征突显背景下,电力系统中长期生产模拟仿真技术重要性进一步突显。由于新能源和冷、热等多种能源资源具有波动性和不可储存性,高占比新能源机组和综合能源系统的接入使得电力系统实时平衡难度骤增,而实时电力平衡是导致新能源弃风弃光的直接原因^[35]。采用时序生产模拟的方法逐时段模拟高占比新能源接入情况下电网的运行情况,是分析新型电力系统中新能源接纳能力的重要手段^[36]。代表工具主要有源网荷一体化生产模拟软件 PSD-PEBL、REPS、LPSP_ProS、SPER_ProS、MAPS、BALMOREL、EnergyPLAN、WILMAR Planning Tool 和 DIgSILENT 等^[37]。

新型电力系统背景下,考虑综合能源系统接入的大电网长时间尺度生产模拟仿真分析需进一步完善多类型储能电站、燃氢机组、光热机组等新设备的精细化仿真模型,并打通与机电、电磁暂态仿真模型间的模型参数壁垒,实现不同仿真软件精细化模型参数、等效模型参数间的互通互用与平台化管理;精益化新能源机组功率预测和电力用户侧综合能源系统用能分析预测,支撑电源、柔性负荷和多种储能间非实时电力电量平衡模式的重构,实现新型电力系统的全过程仿真分析,助力系统新能源承载能力的全面评估^[38-39]。

2) 机电暂态仿真技术

机电暂态仿真主要针对同步发电机机械、电磁转矩之间不平衡引起的转子运动变化过程进行分析,仿真步长通常为半个周期或一个周期,主要应用于电力系统功角、电压和频率等的机电暂态过程稳定性研究、交直流混联大电网规划和运行分析,代表工具有电力系统仿真器 PSS/E、DIgSILENT、BPA 和国产仿真软件 PSASP 等^[40-41]。

该类型仿真软件采用准稳态相量模型,通常忽

略元件的电磁暂态过程和非基波分量,对跨区大电网中发生的同送同受多直流同时换相失败等典型故障特性的模拟存在局限性,且无法对电力电子设备带来的开关动态准确模拟,集中、分布式新能源机组和综合能源系统等值建模仿真精度也有待完善和提高。此外,当前机电暂态仿真软件中基于动态同调的多机等值模型无法描述多机设备的序贯动作及时空耦合特性,更难以分析由此导致的多机连锁反应的问题^[42]。

新型电力系统背景下,机电暂态仿真技术应对的电网规模骤增,系统功角、电压和频率稳定分析间的特性耦合也更为紧密,此时系统中的失稳可能表现为所有变量的失稳^[43]。现有传统仿真分析理论和求解算法难以应对新型电力系统成型-成熟阶段的稳定分析需求,且软件中主流求解算法的收敛性易受到电力电子器件快速、大功率波动的冲击影响,亟需基于分布式稳定性分析等新型稳定性分析方法,实现仿真分析体系的重构,以适应新型电力系统中海量元件组成的特点,并满足快速稳定性分析的需求^[44]。

3) 电磁暂态仿真技术

电磁暂态仿真技术综合考虑设备元件中电场-磁场耦合关系及相应电压、电流的变化过程,仿真步长可达微秒(μs)或纳秒(ns)级,主要应用于局部电网及大功率电力电子设备的快速暂态过程和事故反演分析^[45-46]。代表工具有 PSCAD/EMTDC、EMTPE、HYPERSIM、RTDS、PSModel 和国产仿真软件 CloudPSS、ADPSS/ETSDAC^[47]。电磁暂态仿真技术具有高仿真精度的特点,但计算速度慢、仿真规模小,存在常规发电机控制器模型不完备,现有网络元件模型参数准确度不高、直流控保模型与实际物理装置特性存在差距、与机电仿真数据的尚未实现有效融合等缺点;对于多机集群,电磁暂态仿真的详细建模将导致维数灾问题^[48]。此外,新型电力系统因“双高”特征而呈现的多种宽频带振荡现象对电磁暂态仿真技术提出了新的需求,亟需建立兼顾仿真精度与速度、适用于电磁暂态同步稳定分析的标准化仿真模型^[49]。

4) 机电-电磁混合仿真技术

机电-电磁混合仿真将机电暂态仿真技术与电磁暂态仿真技术的优点相结合,针对大电网机电暂态分析过程中电力电子设备密集区域或重点关注区域电网开展电磁暂态建模分析^[50]。代表工具包括 PSS/E、PSCAD/EMTDC、PSMODEL 和 ADPSS 等,主要存在的问题是机电/电磁暂态部分软件各自

维护,通用性差;模型间参数转换复杂,模型完备度、精细化仿真质效仍待提高;计算过程中初始化过程繁琐、硬件配置要求高等问题。

5) 数模混合仿真技术

数模混合仿真技术在数字仿真基础上,通过物理接口与设备实物实现混合仿真,可用于大电网稳定性专题研究、设备制造、事故反演及控保策略优化等研究^[51]。常见仿真工具包括 RT-LAB、HYPERSIM、RTDS、DDRTS 和国产仿真软件 ADPSS,其兼顾了数字仿真灵活与物理设备准确的优点,但其实时性、稳定性和试验规模等方面技术瓶颈和核心仿真能力仍待进一步突破与提升^[52]。此外,数模混合仿真硬件设备要求较高、价格昂贵,甚至需要专门定制,部分底层硬件仍依赖国外技术^[53]。

3 先进仿真工具发展趋势

为进一步提升新型电力系统安全稳定特性认知能力,完善自主仿真工具体系和标准化模型库,增强算法求解能力和仿真建模精细化水平,建立完善的电网多元数字驱动智能分析运行控制体系,建议主要从3个层面来提升仿真工具能力。

3.1 理论研究深入化、仿真工具精细化与国产化

从以下3个方面进一步提升电网运行特性理论研究深度、仿真建模精细化程度,逐步实现仿真软件国产化,全面掌握新型电力系统运行特性。

1) 提升电网运行特性理论研究深度

新型电力系统中源、网、荷三侧电力电子设备比例高,呈现出低抗干扰能力、低惯量和低过载能力等特性,在传统的稳定性问题上将产生诸如宽频振荡、锁相振荡等新型稳定性问题,需基于“分解应对规模”的去中心化分析思路,结合负荷特性、电网形态在新型电力系统发展不同阶段的变化特征,综合考虑电网特性分析过程中的保守性程度,建立适用于分布式和集中式稳定性分析的综合分析方法^[54]。在此基础上,基于大规模电磁暂态分网并行计算技术,突破数模混合仿真技术在实时性和仿真效率方面的瓶颈,在计算规模和仿真精度上实现全网全场景实时数模综合仿真,结合新的稳定性定义与分类和电力电子设备的建模与仿真,验证大扰动稳定性分析结论,最终形成适应未来“双高”电力系统的大扰动稳定性分析理论与方法^[55]。

2) 提升仿真精细化水平和算法求解能力

仿真模型方面,结合设备应用场景和所研究问题的特征,明确模型简化条件和适用范围,进而建立细节度与保真度得到有效控制和评估的精细化仿真

模型。

针对机电暂态仿真软件,深入研究电力电子设备的等效建模技术,构建适用于跨区域大电网的直流输电(含柔性直流)、FACTS 设备、新能源设备(含集中式和分布式)、综合能源系统中新型电力负荷的精细化模型;改进求解算法,消除大功率快速冲击下系统因高度电力电子化而产生收敛性能恶化问题,提升仿真工具对电力电子化电力系统的精细化仿真能力。

针对电磁暂态仿真软件,实现基于机电数据的电磁暂态仿真数据转换与自动建模;针对直流输电系统电磁模型参数多、初始方式调整困难问题,研究方式智能调整、快速初始化技术、初值偏差自适应调整和快速进入稳态的电磁暂态仿真平稳启动策略,提出基于电力电子设备端口量约束的仿真模型状态变量初值求解方法;设计多时间尺度解耦、网络分区解耦、元件解耦的多层级并行仿真框架,提出兼顾计算负载和通信负载均衡性的自动分网优化算法和电力电子设备宽频带动态特性建模方法,并研发高比例电力电子电力系统宽频带振荡特性分析软件。

3) 提升仿真分析工具国产化水平

当前中国自主研发的电磁暂态仿真、数模混合仿真等工具在模型完备性、软件认可度、实时仿真性能、用户生态等方面和国际领先水平均存在一定差距,电网全电磁暂态仿真能力、精细化模型建立、数据管理和综合仿真计算平台的搭建方面仍面临巨大挑战^[56]。

在掌握基于机电数据的电磁暂态仿真建模方法的基础上,进一步研发实用化工具,实现模型构建与求解方法、启动策略、仿真框架和优化算法上的国产化,进而在仿真模型、仿真算法、软件稳定性上达到国际水平,实现对国外产品的替代。针对目前仿真软件中底层技术的国外引进情况,及时跟踪国产芯片、通信技术和国产操作系统的进展情况,评估国产技术在仿真工具中应用的可行性,最终实现仿真工具全面国产化的目标。

3.2 仿真平台一体化、体系智能化

实现电力系统生产模拟、电磁与机电暂态仿真模型参数的融合,电磁暂态仿真模型参数的平台化统一建模、统一管理,以及机电、电磁等不同仿真引擎的云端调用,是适应跨区域大电网仿真分析和电网电力电子化仿真计算的关键环节;构建统一的数据管理应用、通用仿真计算的一体化智能化仿真工作平台,是减少仿真分析过程中衔接环节工作量、提升整体工作效率的重要途径^[57]。通过仿真计算数据统一建模和稳定分析计算过程的平台化、智能化

以实现仿真工作的一体化平台建设。

1) 大电网仿真计算数据统一建模和仿真平台

研究电力系统生产模拟、机电暂态、电磁暂态仿真计算数据统一建模技术和大电网计算数据处理技术来实现仿真计算数据平台化,达到计算数据一源多用,满足不同目标、不同时间尺度以及不同仿真程序的计算需求。通过提升不同算法之间数据流转效率,将平台功能拓宽至涵盖不同类型仿真计算,以实现机电、电磁等不同仿真引擎的云端调用,进一步提升仿真分析效率。

2) 稳定分析计算全过程平台智能化水平提升

针对海量电网实时运行数据的处理和应用,利用大数据技术实现高效管理、智能筛选与处理,同时对输电断面稳定裕度评估、电网安全稳定控制策略生成和大电网薄弱环节快速定位等智能自动化技术进行探索,为潮流计算调整和方式报告生成的智能化和高效化提供技术支撑^[58]。

通过构建领域知识图谱,以人工智能方法实现对电网运行方式进行高精度和高效率的分析计算;

通过仿真工具实现人机混合态势判断、多通道人机混合交互环境和知识交互的新型电网调控支撑系统,为应对大规模新能源接入对电网调控带来的挑战做好充分的准备。进一步,将人工智能分析技术与超算电磁暂态云仿真平台相结合,在系统稳定性分析、稳定极限求取和稳定策略生成方面具备结果可视化和方式报告自动化生成入库能力,提升电网运行方式分析速度和精度。以此为基础进一步实现人机知识交互、多智能体协同分析和混合智能持续进化能力,大幅提升仿真工具、仿真平台的自动化仿真分析处理能力。

3.3 多元数据驱动综合防御仿真体系

在前两部分工作基础上,结合电网数字孪生技术,构建多元数据驱动下的电网综合仿真防御体系,进一步提升新型电力系统复杂电网运行背景下系统分析计算能力,为电力系统运行风险预警、风险评估、降风险措施的制定提供数据支撑,最终形成的新型电力系统多元数据驱动全场景综合防御仿真体系架构如图4所示。

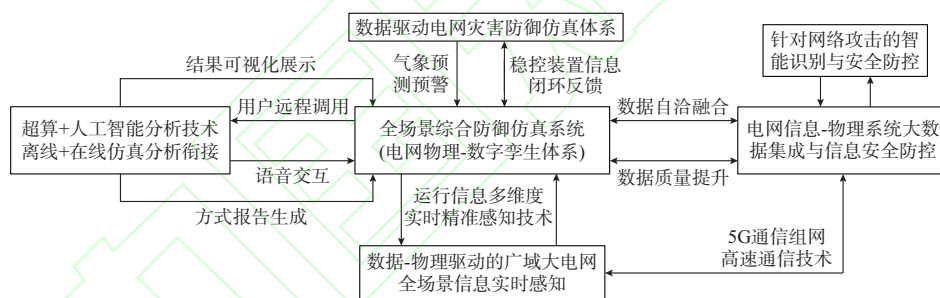


图4 多元数据驱动的新型电力系统综合防御仿真体系
Fig. 4 A comprehensive defense simulation system for low-carbon power system driven by multiple data

1) 电网数字孪生体系构建方面:研究新型电力系统在数据、知识双重驱动下的相关性模型、因果性模型构建方法和有机融合技术;研究电网数字模型在多物理场景下的场路耦合优化方法和高效求解技术;研究面向综合能源系统和集中、分布式新能源大规模接入背景下配电网分布式资源的多颗粒度数字孪生建模与特征信息提取、聚合方法;研究基于系统实时运行数据和多电压等级层面间信息灵活交互的“源-网-荷-储”精细化动态特性辨识、在线建模方法。进一步,构建能够全面模拟新型电力系统复杂动态特性的电网智能化数字孪生模型和仿真分析体系,探究数据驱动建模的理论精度边界,优化仿真建模精度,提升模型求解算法的求解能力与速度^[59]。

2) 新型电力系统规划设计-发展建设-调度运行全过程、多时间尺度数字化仿真分析平台与仿真分析体系构建方面:研究新型电力系统发展、完善过程

中电网复杂行为关联分析方法和复杂故障下系统多机设备序贯动作的时空耦合特性分析方法;结合新型电力系统全过程、多时间尺度上稳定分析评估与控制策略优化需求,开展人工智能技术能力提升研究,实现人工智能技术的“可信、可解释、可迁移”。在此基础上,研究多类型综合能源系统接入背景下基于电力物联网的配电网动态规划方法、自适应协同控制策略和云计算-边缘计算协同下的配电网运行、调控技术,使得电网运行过程中分析和决策能够在“信息-物理-人”各层面充分交互条件下实现进一步优化,全面支撑新型电力系统在不同发展阶段的安全、低碳、高效运行^[60]。

3) 新型电力系统全场景信息实时感知方面:研究电网外部环境中电场、磁场和温度、光等多元信息与电网内部各类型元件、设备间的全景信息映射关系,掌握系统全景特征信息的监测、监控方法;研究

系统设备不同运行条件下环境能量的分布特性,基于微机械微结构等新技术,构建电网全景信息分布式实时监测网络;研究系统多源时、空信息间的耦合关系及二者的融合理论、方法,进而建立完备的系统设备健康状态评估、诊断体系。通过上述研究的开展,进一步增强新型电力系统可观性,实现对电网全景信息中有效特征值的辨识和充分利用^[61]。

4)新型电力系统实时运行信息集成和安防控制方面:研究新型电力系统发展过程中从信息化到数字化的提升方法;研究社会物理信息系统数据多样性、混杂性特征下的新型电力系统数据自洽融合、质量提升、高效利用;研究新型电力系统信息传递体系针对网络攻击的智能识别与安防控制能力提升方法;研究满足新型电力系统安全、可靠需求的5G通信组网和高速通信技术。通过上述研究的开展,解决信息-物理耦合下复杂广域系统数据质量与数据安全问题^[62]。

5)构建基于稳控装置反馈和气象信息预警预测环节的电网防御方面:针对当前的仿真软件在数据互通、风险预警方面存在的脱节现象和直流控保等稳控装置方面存在的盲区而导致的仿真分析难以真实、准确的体现电网的实际运行情况,通过增设稳控装置反馈环节提高模拟仿真的真实性,进一步打通模型互通间的障碍,为模拟故障演化提供更为科学的依据。

新能源机组由于其固有属性导致出力波动性较大,致使气象信息预警预测成为机组出力特性分析的关键。现有仿真工具在气象数据分析方面存在短板,将导致新能源并网系统运行风险预警方面存在延迟,在机组出力预测方面精度偏低,给大规模新能源并网系统的稳定运行留下隐患。将适用于新能源机组的气象信息监测、信息处理与存储技术、多源自我优化和智能互动等新兴技术应用于新型电力系统仿真、调控体系,构建气象信息预测、预警环节,进一步提升新能源机组的出力预测精度,为仿真平台在系统运行风险评估和故障预警方面提供基础数据支撑。同时,融合大数据挖掘与信息共享平台,对海量资源监测数据进行高效管理和统计分析,实现全网新能源中长期、短期、超短期一体化功率预测功能,最终形成集气象信息监控、多源自我优化和智能互动于一体的仿真、控制体系。

4 结语

新兴技术的发展和运用,将对电力系统仿真工具的发展提供动力来源,电网仿真分析工具逐步向数字驱动的多元综合性仿真体系发展,但未来较

长一段时期内模型驱动的机电、电磁和混合仿真、数模仿真技术仍是电网分析的重要手段;新型电力系统仿真体系发展的高级阶段,模型驱动的仿真技术将与多元数据驱动综合防御仿真体系更为紧密的结合,最终实现多维度数据空间和多场景下真实物理空间和虚拟数字空间“信息-物理-人”的充分交互、有机结合。

本文首先分析了新型电力系统主要特征,梳理了“双高”特征对新型电力系统安全稳定带来三个层面上的挑战,分析了当前主流仿真工具不足。在此基础上,结合电网稳定特性研究深入化、仿真建模精细化、仿真软件智能化与国产化、平台一体化及电网数字化发展方面的发展趋势,分析了未来先进仿真工具的发展前景,提出了新型电力系统下多元数据驱动综合防御仿真体系构建,以期为低碳发展目标下的电网仿真分析能力提升提供参考。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 国家电网发布碳达峰碳中和行动方案[N].中国经济时报,2021-03-24(004).
State Grid Corporation of China released the action plan of carbon peak and carbon neutral[N]. China Economic Times, 2021-03-24(004).
- [2] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [3] 别朝红,林超凡,李更丰,等.能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2745.
BIE Zhaozhong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in context of energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [4] 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):5493-5506.
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): 5493-5506.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.
- WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [8] 张运洲, 张宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 1-11.
- ZHANG Yunzhou, ZHANG Ning, DAI Hongcai, et al. Analysis model construction and transformation path comparison of China's power system low-carbon development [J]. Electric Power, 2021, 54(3): 1-11.
- [9] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
- YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [10] 鲁宗相, 黄瀚, 单葆国, 等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.
- LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18.
- [11] 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.
- [12] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115(C): 1-12.
- [13] 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): 2966-2980.
- HANG Lijun, YAN Dong, HU Jiabing, SHA Deshang, et al. Review and prospect of key modeling technologies for power electronics system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 2966-2980.
- [14] NDAMULELO M, BERNARD B. Renewable energy integration impacts within the context of generator type, penetration level and grid characteristics [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 108(C): 441-451.
- [15] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J/OL]. 高电压技术 [2021-09-06]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210809>.
- HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of low-carbon power system planning under double carbon goals [J/OL]. High Voltage Engineering [2021-09-06]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210809>.
- [16] 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.
- [17] 周俊. 交直流电网数字物理混合仿真技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- ZHOU Jun. Study on AC/DC power system digital and physical hybrid simulation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [18] 林曦明. 综合能源系统建模及调频仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- LIN Ximing. Integrated energy system modeling and frequency modulation simulation analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [19] 朱艺颖, 于钊, 李柏青, 等. 大规模交直流电网电磁暂态数模混合仿真平台构建及验证: (一) 整体构架及大规模交直流电网仿真验证[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 164-170.
- ZHU Yiyang, YU Zhao, LI Baiqing, et al. Construction and validation of electromagnetic transient digital-analog hybrid simulation platform for large scale AC/DC power grid: Part one general configuration and simulation validation of large scale AC/DC Power Grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 164-170.
- [20] 朱艺颖, 于钊, 李柏青, 等. 大规模交直流电网电磁暂态数模混合仿真平台构建及验证: (二) 直流输电工程数模混合仿真建模及验证[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 32-37.
- ZHU Yiyang, YU Zhao, LI Baiqing, et al. Construction and validation of electromagnetic transient digital-analog hybrid simulation platform for large scale AC/DC power grid: Part two modeling and validation of digital-analog hybrid simulation of DC transmission projects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 32-37.
- [21] 杨鹏, 刘锋, 姜齐荣, 等. “双高”电力系统大扰动稳定性: 问题、挑战与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 403-414.
- YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: phenomena, challenges, and perspectives [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 403-414.
- [22] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.

- [23] 姜齐荣,赵崇滨.并网逆变器的电磁暂态同步稳定问题[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5):415-428.
JIANG Qirong, ZHAO Chongbin. Electromagnetic transient synchronization stability with grid-connected inverters [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 415-428.
- [24] 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.
- [25] 李威,牛拴保,吕亚洲,等.直流机电暂态仿真建模及与电磁暂态仿真的对比[J].高压电器,2018,54(8):155-160.
LI Wei, NIU shuanbao, LYU Yazhou, et al. HVDC electromechanical transient model and comparison with HVDC electromagnetic transient model [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 155-160.
- [26] 程改红,陆韶琦,邵冲,等.大规模交直流电力系统电磁暂态仿真高效建模方法[J].电网技术,2017,41(6):1919-1926.
CHENG Gaihong, LU Shaoqi, SHAO Chong, et al. A high efficiency modeling method for electromagnetic transient simulation of large scale AC/DC power system [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1919-1926.
- [27] 韩肖清,李廷钧,张东霞,周鑫.双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J/OL].高电压技术[2021-09-06].
<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210809>.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of low-carbon power system planning under double carbon goals [J/OL]. High Voltage Engineering [2021-09-06]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210809>.
- [28] SHAN Junru, LIU Chongru. A new kind of fast simulation model for AC-DC hybrid power grid [C]// 2020 3rd International Symposium on Power Electronics and Control Engineering (ISPECE 2020), November 27-29, 2020, Chongqing, China.
- [29] 肖雄,宋新立,谈超,等.跨层级多区域电力系统AGC全过程动态仿真建模及验证[J].电网技术,2020,44(11):4063-4070.
XIAO Xiong, SONG Lixin, TAN Chao, et al. Construction and validation of full dynamic simulation models for cross-level and multi-area power system [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4063-4070.
- [30] 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 digital twin in power system application [J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009-2019.
- [31] 王超超,董晓明,孙华,等.考虑多层耦合特性的电力信息物理系统建模方法[J].电力系统自动化,2021,45(3):83-91.
WANG Chaochao, DONG Xiaoming, SUN Hua, et al. Modeling method of power cyber-physical system considering multi-layer coupling characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 83-91.
- [32] BROSINSKY C, SONG X, WESTERMANN D. Digital twin-concept of a continuously adaptive power system mirror [C]// International ETG-Congress; ETG Symposium. VDE, 2019:1-6.
- [33] PILEGGI P, VERRIET J, BROEKHUIJSEN J, et al. A digital twin for cyber-physical energy systems [C]// 2019 7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), April 15-15, 2019, Montreal, Canada: 1-6.
- [34] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [35] 龙覃飞.电力信息物理融合系统建模及其性能分析研究[D].北京:华北电力大学,2020.
LONG Qinfei. Research on modeling of cyber-physical power system and its performance analysis [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [36] 汪浚,牟宏,刘晓明,等.电力系统全过程动态仿真技术综述[J].山东电力技术,2017,44(12):23-27.
WANG Yuan, MOU Hong, LIU Xiaoming, et al. Overview of power system full dynamic simulation technology [J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(12): 23-27.
- [37] 訾鹏,李铁群,谭贝斯,等.大电网仿真工具现状及其在华北电网推广应用的思考[J].电力自动化设备,2019,39(9):199-205.
ZI Peng, LI Yiqun, TAN Beisi, et al. Current situation of large-scale power grid simulation tools and their popularization and application in North China Power Grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 199-205.
- [38] 田芳,黄彦浩,史东宇,等.电力系统仿真分析技术的发展趋势[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2151-2163.
TIAN Fang, HUANG Yanhao, SHI Dongyu, et al. Development trend of power system simulation and analysis technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2151-2163.
- [39] 乔铮,郭庆来,孙宏斌.电力-天然气耦合系统建模与规划运行研究综述[J].全球能源互联网,2020,3(1):14-26.
QIAO Zheng, GUO Qinglai, SUN Hongbin. Research survey on the modeling, planning and operational analysis of electricity-natural gas coupling system [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 14-26.
- [40] 陈皓勇,陈思敏,陈锦彬,等.面向综合能源系统建模与分析的能量网络理论[J].南方电网技术,2020,14(2):62-74.
CHEN Haoyong, CHEN Simin, CHEN Jinbin, et al. Energy network theory for modeling and analysis of integrated energy systems [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 62-74.
- [41] 刘威,张东霞,丁玉成,等.基于随机矩阵理论与熵理论的电网薄弱环节辨识方法[J].中国电机工程学报,2017,37(20):5893-5901.
LIU Wei, ZHANG Dongxia, DING Yucheng, et al. Power grid vulnerability identification methods based on random matrix

- theory and entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5893-5901.
- [42] 屈星,李欣然.考虑配电网结构的电力系统综合负荷建模[J].电力系统自动化,2020,44(12):117-123.
- QU Xing, LI Xinran. Synthesis load modeling of power system considering distribution network structure [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 117-123.
- [43] HATZIGAR G, RIOU N D, MILANOVIC J V, et al. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies[R]. 2020.
- [44] 赵静波,鞠平,施佳君,等.电力系统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(1):87-94.
- ZHAO Jingbo, JU Ping, SHI Jiajun, et al. Review and prospects for load modeling of power system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 87-94
- [45] 马钊,周孝信,尚宇炜,等.未来配电系统形态及发展趋势[J].中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.
- MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [46] 董毅峰,王彦良,韩伟,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.
- [47] 王泽森.综合能源系统稳态建模及关联效应分析研究[D].北京:华北电力大学(北京),2019.
- WANG Zesen. Research on steady-state modeling and interaction effect analysis of integrated energy systems [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [48] 胡家兵,袁小明,程时节.电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5457-5467.
- HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467.
- [49] 杨洋,肖湘宁,王昊,等.电力系统数字混合仿真技术综述及展望[J].电力自动化设备,2017,37(3):203-210.
- YANG Yang, XIAO Xiangning, WANG Hao, et al. Review and prospect of power system digital hybrid simulation technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 203-210.
- [50] 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.
- [51] 徐家俊,王晓茹,王天钰,等.基于ADPSS的电力系统和牵引供电系统机电-电磁暂态混合仿真[J].电网技术,2014,38(7):1923-1927.
- XU Jiajun, WANG Xiaoru, WANG Tianyu, et al. Electromagnetic-electromechanical transient hybrid simulation of electric system and traction power supply system based on ADPSS [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1923-1927.
- [52] 曾杰,冷凤,陈晓科,等.现代电力系统大功率数模混合实时仿真实现[J].电力系统自动化,2017,41(8):166-171.
- ZENG Jie, LENG Feng, CHEN Xiaoke, et al. Implementation of high power digital-analog hybrid real-time simulation for modern power system [J]. Automation of Power Systems, 2017, 41(8): 166-171.
- [53] 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.
- [54] 朱艺颖.电力系统数模混合仿真技术及发展应用[J].电力建设,2015,36(12):42-47.
- ZHU Yiyang. Development and application of power system digital-analog hybrid simulation technology [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(12): 42-47.
- [55] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4720-4732.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [56] 宋新立,王皓怀,苏志达,等.电力系统全过程动态仿真技术的现状与展望[J].电力建设,2015,36(12):22-28.
- SONG Xinli, WANG Haohuai, SU Zhida, et al. Status and prospect of unified dynamic simulation technology for power system [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(12): 22-28.
- [57] 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.
- [58] 马宁宁,谢小荣,唐健,等.“双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5):457-464.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, TANG Jian, et al. Wide-area measurement and early warning system for wide-band oscillations in “double-high” power systems [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 457-464.
- [59] 张宁,马国明,关永刚,等.全景信息感知及智慧电网[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1274-1283.
- ZHANG Ning, MA Guoming, GUAN Yonggang, et al. Panoramic information perception and intelligent grid [J].

- Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1274-1283.
- [60] 孙秋野,滕菲,张化光,等.能源互联网动态协调优化控制体系构建[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3667-3677.
SUN Qiuye, TENG Fei, ZHANG Huaguang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3667-3677.
- [61] 王继业,蒲天骄,仝杰,等.能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J].电力信息与通信技术,2020,18(4):1-14.
WANG Jiye, PU Tianjiao, TONG Jie, et al. Intelligent perception technology framework and application layout of energy internet [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 1-14.
- [62] YAN Y, SHENG G, QIU R, et al. Big data modeling and analysis for power transmission equipment: a novel random matrix theoretical approach[J]. IEEE Access, 2017(6): 7148-7156.
- 董雪涛(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统规划、多能源系统、电力系统运行、电网安全分析等。E-mail:395604227@qq.com
- 冯长有(1982—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统调度运行、可靠性、电力市场等。E-mail:xjtufcy@gmail.com
- 朱子民(1991—),男,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统规划、电力系统运行、电网安全分析等。E-mail:878876042@qq.com
- (编辑 代长振)

Preliminary Study on Simulation Tool for New Power Systems Dominated by Renewable Energy

DONG Xuetao^{1,3}, FENG Changyou^{1,2}, ZHU Zimin^{1,3}, TANG Junyi^{1,3}, LIU Zhen^{1,3}, XU Zhi^{1,3}, KANG Pengpeng⁴

- (1. Xinjiang Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830001, China;
2. National Electric Power Dispatching and Control Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;
3. Xinjiang Key Laboratory of Whole Process Simulation for Power System, Urumqi 830001, China;
4. Electric Power Dispatching and Control Center of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830002, China)

Abstract: Under the background of the energy structure transition, the characteristics caused by the high access proportion of renewable energy and power electronic equipment, named “double high” phenomenon, will profoundly change the shape and the operation characteristics of the power grid, and this phenomenon will also put forward new requirements for the R&D of simulation theory and advanced simulation tools. This paper summarizes the needs and challenges of the existing simulation software and simulation systems in dealing with the following three levels: the update of stability of the low-carbon power system, the increasement of the time-and-space span of simulation analysis, and the construction of the power grid intelligent analysis operation-and-control system in the digitalization of the power system. Furthermore, the shortcomings of current simulation tools on the basis of the characteristics of existing simulation technologies are pointed out. On this basis, the development trend of simulation tools is clarified, a low-carbon power system simulation technology framework is proposed, and the potential technical development points that simulation tools need to pay attention to are prospected.

Key words: Low-carbon power system; high proportion of renewable energy; high proportion of power electronic equipment; advanced simulation tools

