

新型电力系统的建模仿真关键技术及展望

郭琦^{1, 2, 3}, 卢远宏^{1, 3, 4}

(1. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东省广州市 510663;

2. 国家能源大电网技术研发(实验)中心, 广东省广州市 510663;

3. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广东省广州市 510663;

4. 中国南方电网公司电网仿真重点实验室, 广东省广州市 510663)

摘要: 在实现“碳达峰、碳中和”目标、推动构建以新能源为主体的新型电力系统背景下,高比例新能源并网、高比例电力电子装备将成为未来新型电力系统的主要趋势和突出特征。文中首先概述了新型电力系统的特征,总结了新型电力系统对建模仿真技术提出的迫切需求,分别从建模优化方法、多时间尺度仿真方法和仿真计算加速方法等方面分析了电力系统建模仿真技术的现状和改进方案,同时,描述了面向新型电力系统的仿真新技术和应用新模式。最后,对建模仿真新技术及其应用新模式如何更好地适应新型电力系统构建和运行给出了建议。

关键词: 新型电力系统; 新能源; 电力电子; 建模; 仿真; 超级计算; 云计算; 数据驱动

0 引言

电力系统仿真是在数字计算机上为电力系统的物理过程建立数学模型,用数学方法求解以进行仿真研究的过程,是支撑电力系统认知与研究的重要手段^[1]。随着电力系统规模的增大和结构的变化,电力系统的运行特性愈加复杂,发生的事故越来越难以用传统的分析方法预测,导致电力系统仿真技术也在不断变化,不同的仿真技术的特征和侧重有所不同。电力系统是一个复杂的大规模非线性多时间尺度系统,含有大量不同时间常数的变量,有些变量具有快变特征而有些变量则具有慢变特征,电力系统至少可分为快变(电磁暂态)、正常速率(机电暂态)及慢变(中长期动态)3种时间尺度动态^[2]。

机电暂态仿真用于研究系统大扰动后的暂态稳定和小扰动后的静态稳定性,可支持数万节点的电网规模快速仿真,适用于仿真步长为10 ms级别的交流电网基频特性仿真。国际上常用的机电暂态软件包括 PSS/E、ETMSP、SYMPOW、NETOMAC 等,国内常用的机电暂态仿真软件包括电力系统综合程序(PSASP)^[3]和中国版电力系统分析程序(PSD-BPA)等。

随着中国三峡电站的建设、“西电东送”工程的实施和全国联网工程的推进,中国交直流互联电网既包括交流线路和直流线路,还包括静止无功补偿器(SVC)等电力电子设备和柔性交流输电系统(FACTS)装置,进一步增大了电网安全稳定运行控制的复杂性,也对电力系统仿真技术提出了更高的要求^[2]。以直流输电为主的电力电子装备仿真响应更快,为实现对交直流混合系统的仿真,机电-电磁混合仿真及全电磁暂态仿真被更多地采用。

国际上,电磁暂态仿真产品主要包括加拿大的 RTDS、RTLAB、EMTDC/PSCAD 和 MicroTran,德国的 NETOMAC 和 dSPACE,以及瑞士的 Speedgoat 和 Typhoon 等。在中国,中国电力科学研究院有限公司在 EMTP 的基础上开发了 EMTPE、全电磁混合仿真程序 PSD-PSModel 以及机电-电磁混合实时仿真平台 ADPSS,清华大学开发了基于云计算的全电磁暂态仿真软件 CloudPSS,中国南方电网科学研究院有限责任公司开发了机电-电磁混合实时仿真平台 SMART。

为实现“碳达峰、碳中和”战略,大力发展以风电、光伏发电为主的可再生能源,是实现能源可持续发展的必由之路。作为能源枢纽的电力系统正在向以新能源为主体的新型电力系统转变和发展。预计到2050年,中国将形成以可再生能源为主的能源体系,可再生能源在能源消费中的比例将达到60%以上,占总发电量的85%以上^[4]。可再生能源等清洁

收稿日期: 2022-02-27; 修回日期: 2022-04-17。

上网日期: 2022-05-05。

中国南方电网有限责任公司科技项目(KYKJXM-20210056)。

能源将在一次能源生产和消费中占有更大份额,为推动能源转型,建设清洁低碳、安全高效的新一代能源系统提供支撑^[5]。

新型电力系统的显著特征是高比例新能源并网运行、高比例电力电子装备(下文简称“双高”),具有强不确定性、低惯性^[6]、弱抗扰性、强非线性^[7],其快速动态响应的特性及系统规模庞大的特征给仿真技术提出了新的挑战和迫切的改进需求。本文根据新型电力系统构建和运行控制的新特征,讨论了新型电力系统仿真技术的发展现状,对电力系统仿真模式与应用趋势进行了展望。

1 仿真技术现状和改进方案

电力系统时域仿真包括机电暂态仿真^[8]、机电-电磁暂态混合仿真和全电磁暂态仿真^[9]。由于电磁暂态仿真能够更详细地刻画基波及更宽范围频率的物理过程,可以更好地适应“双高”特征新型电力系统的分析计算需求,因此逐渐成为电力系统仿真的主要手段。根据仿真进程与物理过程之间同步与否,可以分为实时仿真和非实时仿真两大模式。实时仿真主要应用于硬件在环场景;非实时仿真可分为离线仿真(算例与实际运行数据没有交互,例如电网方式计算等)和在线仿真(算例与实际运行数据有交互,例如在线安全校核等)。

实时仿真要求每个步长的计算、通信、延迟时间相加后小于现实时间,并在每个步长结束时进行硬件时钟同步,相比于非实时仿真,在计算效率方面更为严苛,需要额外优化。非实时仿真便于快速开发模型进行拓扑、控制器的初步验证,在配电网、输电网、大型复杂网络中都有广泛的应用。实时仿真分为硬件在环和功率在环仿真两种,二者的区别在于硬件在环控制器为实物、一次系统为数字模型,功率在环则相反。实时仿真可以较低的成本还原工程场景,使用现场控制器或一次设备提高仿真结果的精确性和可靠性。同时,实时仿真还广泛地用于检验控制器性能,在一些新型控制设备验证、控制策略验证中发挥着重要作用。在某些场合下,仿真模型的计算速度可以比现实世界的物理过程快,实现“超实时”。超实时仿真不需要严格同步时钟和硬件设备配合,其技术难度主要来自实现大规模网络的超快速计算求解。在拓扑遍历验证等需要大量仿真的研究场景下,超实时仿真可以有效提高研究效率。在数字孪生系统的研究中,超实时仿真可以提前感知电网的运行状态,提供控制策略指导和故障预警。然而,大规模网络的超实时仿真对算法和硬件性能

的要求非常高,目前很难被广泛应用。使用多计算设备互联的高性能云计算或超级计算技术将有可能解决这一问题,目前尚在探索中。

仿真规模、仿真精度、仿真速度是电力系统仿真中相互制约的3个要素,三者紧密耦合、互相制约,如图1所示。

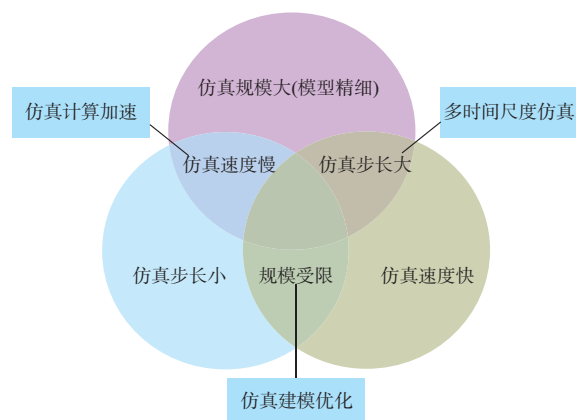


图1 电力系统仿真要素的相互制约关系
Fig. 1 Restrictive relationship between power system simulation elements

新型电力系统含有海量新能源发电及电力电子设备,在具备快速动态响应特性的同时仿真规模急剧增大,导致计算量也急剧增大。现有仿真技术采取的改进方案主要分别针对3类要素,如图2所示。

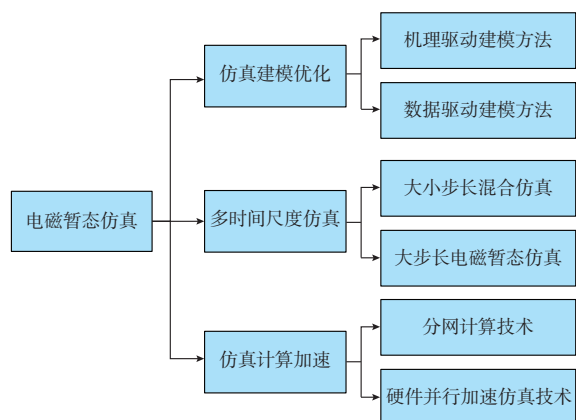


图2 电力系统电磁暂态仿真技术
Fig. 2 Electromagnetic transient simulation technology of power system

1) 仿真建模优化方法

在详细模型的基础上,抓住主要因素不变进行等值化简,降低计算量,具体包括新能源场站内多发电单元的聚合、含新能源单元的区域电网等值等。

2) 多时间尺度仿真方法

采用大小步长结合的多时间尺度混合仿真技

术,或在保证精度的前提下采用更大步长仿真技术来降低总体计算量,以加速仿真过程。

3) 仿真计算加速方法

采用并行计算等方式降低串行计算量,并采用现场可编程门阵列(FPGA)、图形处理器(GPU)等适用于大规模并行计算的异构硬件实现仿真计算加速,提升计算能力。

1.1 电力系统仿真建模优化方法

以新能源为主体的新型电力系统,对风电、光伏、储能、负荷、控制器等主体元件的精确建模是实现新型电力系统仿真技术的重要基础。在构建详细模型的基础上,为了提升计算效率、提高计算速度,还需要对模型进行合理的等值化简。

1.1.1 机理驱动建模方法

在器件建模方面,以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的全控型电力电子器件常采用理想开关模型。虽可以表征器件的开关状态,但无法准确模拟器件在开通关断过渡过程的暂态特性及其受到的应力、效率特征^[10]。因此,也有研究针对器件瞬态模型^[11]、电热模型^[12]等来开展。

对于不同时间尺度瞬态特征的模拟,可建立不同的IGBT开关瞬态模型。例如,Hefner模型^[13]是经典的非准静态IGBT机理模型,精度较高,但是存在模型复杂、计算慢、收敛难的问题;折线模型根据物理机理,对不同开关瞬态进行分段线性化,虽然存在一定误差,但是解决了计算慢、收敛难的问题,并且参数可从器件手册提取^[14]。进一步化简以提升计算速度的模型还包括开关线性模型和开关理想模型,适用于数十微秒级时间尺度的模型。对于多种时间尺度模型的综合使用,文献[15]提出离散状态事件驱动方法;关注变量缓慢变化时选用大时间尺度开关模型,关注变量快速变化暂态过程或变量是小时间尺度变量,则选用小时间尺度模型来精确仿真。

在传统发电系统设备建模方面,相关模型已较为成熟,包括同步发电机、励磁系统、调速系统、交流输电系统、柔性交流输电元件、传统储能、超导储能、分布式电源及微电网模型等。文献[16]提出了模块化多电平换流器(MMC)的平均值模型,通过对MMC桥臂动态行为的平均化减少了仿真计算复杂度,提高了计算速度,但平均化的思想忽略了子模块电容、电力电子开关等器件的动态行为,且难以应用于暂态过程,具有较大的局限性。

含有风电、光伏等海量新能源发电环节的新型电力系统拓扑结构复杂、动态行为多样,在投运前需

要通过仿真技术检验拓扑的正确性和控制系统的有效性。在电磁暂态仿真中,由于开关频率和变流环节中的高频变压器频率较高,所以需要极小的仿真步长(10 μ s及以下)。包含海量节点的超高阶网络矩阵求解以及小步长带来的超大计算量使得此类网络的仿真速度极其缓慢,难以满足科学研究和工程测试的需求,需要进行等值化简。快速嵌套求解法是一种预先存储内部节点信息并反映到外部节点上的精确等效算法,适用于大部分拓扑结构,在大幅提高仿真速度的同时降低精度损失^[17]。针对光伏电池板,文献[18]提出基于光生电流源及二极管为主的等效电路模型和工程化模型,为描述热斑现象、局部阴影下多峰特性,建立了基于LambertW函数的光伏电池双二极管显式模型^[19];针对逆变器谐波特性,文献[20]建立了一种基于诺顿等效电路的逆变器等效模型,考虑了死区、正弦脉宽调制产生的谐波电压因素,具有较好的动态性能。

储能系统也是新型电力系统的重要组成部分,除了抽水蓄能以外,国内外学者建立了多种单体电池模型^[21]。文献[22]提出了一种等效电路模型,模型参数直接反映了电池的电化学原理相关参数;文献[23]提出将一阶戴维南模型与安时法结合,通过平方根采样点卡尔曼滤波,对电池等效模型参数进行辨识,提高了模型精确度。

在新能源场站建模方面,一般会对全站拓扑进行适当等值化简之后建模,以降低计算量、提高仿真计算效率。文献[24]较为系统地总结提出线性系统等值化简方法(主要包括截断法^[25]、特征正交分解法^[26]和Krylov子空间法^[27]),以及非线性系统等值化简方法(包括扩展平衡截断法^[28]、子空间平衡截断法^[29]、泰勒展开法^[30]、分段线性拟合法^[31]、Gramain平衡降阶法^[32]等)。

等值化简方法按对象规模可分为单机等值和多机等值方法,其中单机等值方法将新能源场站等值为一个等值阻抗和一个扩容设备,多机等值方法根据不同的主导分群指标,对机组进行分群后再分别进行单机等值^[33]。文献[34]提出了一种基于K-means聚类算法的双馈风电机组分群和动态等值方法,将风电机组的状态变量矩阵作为分群指标,将同群风电机组等值为一台风电机组,实现了风电场的动态等值;文献[35]提出了一种基于差分进化算法的新能源并网辨识聚合模型,动态响应与传统的复杂模型保持着高度的一致性;文献[36]提出了一种风电场结构保持等值方法,可保留群内所有设备动态特性;文献[37]采用奇异摄动降阶理论对光伏并网系统进行模型降阶,其中9阶模型适用于精度优

先的小规模并网系统,5阶模型适用于仿真效率要求较高的大规模并网系统;文献[38]提出了一种计及光伏的配电网广义负荷一体化等值建模方法,简化了模型结构,且无须依赖光伏发电系统的出力数据。

由于分布式新能源发电地理位置的分布性,一方面,不确定性差异化的气象信息将导致风速、光照、温度以及发电单元出力不确定性的差异;另一方面,分布式新能源发电的网架结构相较集中式场站更为复杂。因此,分布式新能源发电的等值化简方法相对集中式更复杂,需根据分布式新能源发电的不确定性变量、网架结构等信息提取主导性的分群指标,对新能源场站和发电单元进行分群后,再分别开展等值化简。

针对新型电力系统中新能源发电设备数量庞大、分布性特征显著的特点,根据实际情况提出合理的分群指标和分群方式,从而分别开展等值化简,是新型电力系统仿真需要重点研究的一个方面。

1.1.2 数据驱动建模方法

基于数据驱动的建模方法,主要包括最小二乘法、神经网络、支持向量机、集成学习、小波分解、经验模态分解、核函数极限学习、模糊宽度学习等。其中,神经网络又可细分为深度神经网络、循环神经网络和长短期记忆网络等。

针对确定性建模,主要是通过数据驱动实现模型的辨识。例如,对于谐波源的建模需求,文献[39]利用大量的离线、在线实测数据,提出基于最小二乘法的谐波源模型的参数辨识方法;文献[40]提出基于神经网络的谐波源建模方法,可以任意精度逼近任何非线性函数,具有较好的鲁棒性,但不能保证网络的泛化能力;文献[41]提出基于半监督支持向量机的电压暂降源模型定位方法,实现了各类电压暂降源的准确定位,尤其是在已知源位置信息的电压暂降监测数据稀缺情况下,具有较大优势。又如,对于锂电池外特性的建模需求,有研究基于锂电池高阶次、多变量、非线性、强耦合、大时变的复杂电化学特性,建立了基于数据驱动的神经网络的电路模型^[42]、基于数据驱动的支持向量回归算法电池状态模型^[43],利用粒子群优化与支持向量机融合的方法建立锂电池剩余寿命模型^[44]。又如,对于限流器建模的需求,文献[45]基于人工智能反向传播网络,通过对大量限流器的试验数据以及电力系统各种限流场景下的运行数据进行大数据特征分析,结合快速开关型故障限流器固有参数与结构特征,得到了适用于电磁暂态仿真方法求解的限流器模型,给电磁暂态数据驱动建模提供了一种有效思路。

目前,基于数据驱动的风电预测方法还包括支持向量机、高斯过程、集成学习方法、神经网络方法、小波分解法、经验模态分解法、变分模态分解法等^[46]。基于数据驱动的光伏发电预测方法还包括神经网络预测、极端学习机、基于遗传算法的核函数极限学习机、循环神经网络、长短期记忆网络、基于模糊宽度学习系统方法等^[47]。

基于数据驱动的建模方法可在无法建立或者只能部分建立精确模型结构的情况下,直接通过数据训练得到可用模型。数据驱动方法可以应用于新能源单机设备,也可以应用于新能源场站整体,当应用于场站整体时还具有等值聚合的效果。

1.1.3 仿真建模优化方法仍需探索的问题和思路

1)研究机理分析与数据驱动的联合建模方法,以解决部分非线性特性难以通过机理分析进行建模的问题。

2)研究新能源适应性更好的非线性等值化简方法。为了降低计算量,等值化简是非常必要的,但是由于新能源系统快速动态响应及仿真规模庞大导致的复杂性,其等值化简难度远高于传统发电系统,目前仍未形成一种普遍适用的等值化简方法。

3)针对二次系统的建模,目前除了其控制的主要逻辑环节被建模,系统的其他特征环节较少得到关注,如大规模直流控制保护系统的测量环节、通信环节、处理器调度环节等,而这些环节在某些场景下会影响仿真模型的宽频特性。为准确反映这些特性,应研究涉及上述环节的建模方法,进一步提升仿真准确性。

1.2 多时间尺度仿真方法

采用较小的步长能够实现时间尺度上更精细的仿真刻画,但也会带来较大计算量。由于新型电力系统的庞大规模和复杂结构,若全部采用较小步长,可能导致巨大计算量,使计算资源难以承载。目前常见的解决方案有两种:一是采用大小步长结合的多时间尺度仿真方法(亦称为多速率仿真方法),即对电力电子开关过程采用数微秒级的小步长仿真,保持必要采样率,对交流电网采用数十微秒级的大步长仿真,通过大小步长接口实现混合仿真;二是在保证精度的前提下采用达到数百微秒级的更大步长仿真技术,降低单位时间计算次数,从而降低计算量。

1.2.1 大小步长混合仿真

为了准确描述新型电力系统的多时间尺度特性,需考虑大步长和小步长的选取以及大小步长系统间的交互方法。传统处理多时间尺度仿真交互的方法主要分为外插法^[48]和松弛法^[49]。文献[50]提

出在慢动态系统求解时充分利用其一个积分步长内的全部快动态系统求解结果,有效提高仿真的精度。文献[10]基于全隐式积分和内插值,利用传输线分网实现算法的并行化,提出一种基于传输线分网的并行多速率电磁暂态仿真算法。文献[51]主要对目前常用的多时间尺度仿真算法进行了归类:

1)平均法:在计算大步长变量时,使用小步长变量在大步长时间范围内的平均值;在计算小步长变量时,使用大步长变量相应时刻的插值。平均法对多时间尺度模型的性质不作要求,在数值计算中应用广泛。

2)预计算法:预先取大步长变量的不同取值组合,对小步长进行预计算。对存储要求较高,仅适用于大小步长计算相对独立的情况。

3)渐进法:将单个多时间尺度问题转化为多个单时间尺度问题,简化了模型的分析 and 计算,大小步长模型的参数差异越大,收敛速度越快。

4)谐波平衡法:在一个周期,时变线性系统被转化为时不变系统,但状态变量数量 M 增加为 $2M+1$,且存在截断误差。

1.2.2 大步长电磁暂态仿真

根据Nyquist采样定理,采样频率应该至少是原始信号频率的2倍才能保证采样不丢失原始信号的信息。电磁暂态仿真中,为了满足精度要求,仿真步长一般是最小信号周期的 $1/10$ 。因此,降低对原始信号的采样频率可相应减小采样频率,增大对应的仿真步长,在满足研究所需精度的情况下可以加快仿真计算速度。

基于Hilbert变换的移频电磁暂态仿真方法,对电力系统中电压、电流等电气信号进行移频变换后的频率小于原始信号频率,可以在不损失精度的情况下实现较大步长的仿真^[52]。文献[53]总结了移频电磁暂态仿真技术的研究进展,提出了移频电磁暂态的3个关键技术点:复数信号的构造方法、移频变换方法和离散化仿真模型。

移频变换分为复数形式和矩阵形式,两者等价,前者计算效率较高。复数信号的构造与移频变换之间互不影响,但是不同的复数信号构造方式有不同的仿真精度。目前,移频电磁暂态方法较为适用于大规模交流系统,且以基波含量为主,较大的高次谐波将影响仿真结果。由于Hilbert变换是一个与原始信号的卷积,虽然可以保持各次谐波不受影响,但变换本身的计算量很大,影响了仿真速度,对此文献[54]提出积分变换的复数信号构造方法,对于谐波比例很小的交流电网,系统主导频率是基波,因此变换前后对基波影响不大。

已有研究将移频法应用于MMC仿真:传统MMC加速模型由于数值稳定性的限制无法将仿真步长扩大到 $50\mu\text{s}$ 以上,采用旋转坐标变换方法,针对直流系统仿真步长可以扩大到 $100\mu\text{s}$,在三相对称故障和直流母线短路故障时可以根据交流量的瞬时值和高频包络线波形观察电磁暂态过程,在工频附近的精度较高^[55]。

为了避免傅里叶分解不适用于谐波动态变化的情况,文献[56]提出多频段时间尺度变换法,对信号进行时间尺度分解,采用属于线性分解的经验模态分解法,对每个分解出的单分量信号计算瞬时频率并划分若干频段,每个频段内分别进行不同频率的移频电磁暂态仿真,实现分组大步长并行仿真。

1.2.3 多时间尺度仿真方法仍需探索的问题及思路

1)移频电磁暂态法是否能解决新能源多时间尺度耦合下的稳定问题仿真还有待进一步研究。

2)非线性系统不同时间尺度分量的正交分解方法如何实现分频段解耦控制及针对性移频,还有待进一步研究。

1.3 仿真计算加速方法

针对大规模新能源接入的电力系统暂态过程仿真分析效率低下的问题,一种有效的方法是在仿真计算求解层面采用并行计算技术。

1.3.1 分网计算方法

电力系统电磁暂态仿真中最耗时的是稀疏矩阵的快速求解,电磁暂态仿真算法在每一个仿真步长都需对超大规模电力系统形成的超高阶导纳矩阵进行求逆计算,随着导纳矩阵的维数增大,需要的计算时间急剧上升。分网计算是将大规模电气网络划分为多个子网络,对每个子网络进行并行化计算,从而提高计算效率的仿真技术,可以有效避免电力系统规模过大导致仿真计算效率过低的问题。

文献[57]提出了目前最常用的长输电线解耦分网算法,当传输线路的长度超过光速乘以仿真步长时,则可以在传输线路两侧实现分网。文献[24]总结了大规模复杂电力系统的电磁暂态仿真分网技术,包括针对交流网架通过矩阵变换实现电力系统的双层分网方法^[58]、多区域戴维南等值分网后进一步通过降阶方程消除子网联络支路电流的分网方法^[59]、节点分裂法^[60]等。当电网中存在直流输电系统时,也有研究提出适用于交直流联络线电流的双层分网方法^[61],极大地降低了计算量。当存储空间足够大时,为避免换流阀在一个周期内多次通断使得网络拓扑结构变化,节点导纳矩阵重新三角分解,进而导致计算量大幅度上升,此时可采用预先计算

并存储各种拓扑结构情况下的换流器导纳矩阵的逆^[62],当换流器换流阀过大时,存储量呈指数级上升。

波形松弛(waveform relaxation, WR)方法是由Lelarsmee等学者在求解大规模集成电路的大型稀疏常微分方程时提出的,由动态迭代方法发展而来。WR方法首先根据系统各个分量的耦合关系,选择合适的分裂函数将大系统分解成若干个子系统。然后,在每个子系统内迭代计算直至收敛(松弛过程)。文献[63]在电力系统暂态稳定计算中引入WR方法实现分网,但是引入了迭代过程,某些情况下会导致计算量显著增加。文献[64]提出了延迟插入法,实现各支路电流和节点电压的求解相差半步时延,可实现支路级别的细粒度并行,但是改变了系统的动态特性,只适应于亚微秒级的小步长仿真。文献[65]提出一步时延分网方法,无须借助传输线,就可实现子系统间的自然分网与并行,但在开关动作时可能引起数值振荡。

文献[66]针对已有分网与并行仿真算法的不足,提出了电磁暂态半隐式延迟解耦并行仿真方法,可实现交直流电网的分网与并行,无须额外引入电容或电感,且不受限于子系统间传输线长度,也无须进行子系统等值,因此,具有分网过程更加灵活、适用范围更广的优势,并在含电压源逆变器(VSC)的IEEE 39节点算例下验证了正确性。文献[67]提出了基于电磁暂态半隐式延迟解耦原理的MMC高效电磁暂态仿真建模方法,具有拓扑导纳矩阵恒定、解耦电路简单、计算效率高、方法通用性强的优点。

Opal-RT公司提出了基于短截线解耦的分网方法,即stubline分网方法^[68],其采用一个称为短截线的人工去耦元件,相当于一个带有损耗的Bergeron线模型,可经过调整实现恰好一个时间步长的传播延迟。通过采用stubline分网方法实现线路电感替代,附加的电容较小,因此能够保持较好的仿真精度。然而,在既不存在长线路也不存在大电感的电力系统模型中,stubline分网方法很难适用。

状态空间节点(SSN)方法将电力系统模型分成若干规模的子系统并分类到不同的群组,每个群组内采用状态空间法求解子系统,群组外采用节点法进行数据交互,以实现系统整体仿真计算^[69]。文献[70]对可用于任意网络的节点方程和状态空间方程的SSN方法进行了描述,文献[71]和文献[72]分别在MMC仿真和风电系统实时仿真场景下,验证了SSN方法在解决该类问题上的有效性。SSN方法通过消除人为延迟且允许耦合的子系统进行并行计算,提高系统整体仿真的并行程度和数值稳定性。

但是,为了得到数值可计算的表达式,SSN方法进行了指数近似和输入量的近似,降低了子系统的仿真精度^[73]。

1.3.2 仿真计算的硬件并行加速方法

大电网电磁暂态仿真计算主要包括节点导纳矩阵形成、诺顿等值电流计算、节点电压方程求解等步骤,其流程复杂,难以进行高度并行的计算,因此适用于中央处理器(CPU)计算;而MMC柔性直流、新能源等高频多器件电力电子设备的电磁暂态仿真计算流程相对简单,可并行的细粒度计算数量较大,可以转化为高并行度的计算,适用于GPU^[74]和FPGA^[75]。GPU和FPGA可作为CPU的协处理器,通过共享内存等高速通信方式交互数据,进行异构联合计算。

有研究利用FPGA对MMC、光伏、静止同步补偿器(STATCOM)等开展建模及仿真验证,取得了较好效果。文献[76]提出了一种基于FPGA的灵活可自定义的,适用于高电压、大容量、远距离柔性直流输电的新型子模块拓扑结构的实时仿真模型。文献[77]设计了具有高度并行性的多种典型分布式电源控制元件模块,基于单FPGA的实时仿真器,实现了3个单级式光伏发电系统的实时仿真,步长为1 μ s,仿真波形与RTDS仿真波形误差在0.5%以内。文献[78]提出了一种基于全硬件多块FPGA的实时仿真系统的架构,以多达5块FPGA作为并行运算单元,并提出了一种满足快速通信需求的通信互联方式,减小了FPGA和CPU的通信损耗,有效增加了仿真规模,缩短了仿真步长,实现了10 kV的12级联H桥STATCOM电路模型的实时仿真验证,实时仿真步长为2 μ s,仿真波形与MATLAB仿真波形误差在0.5%以内。

SoC FPGA是在FPGA上嵌入硬核CPU处理器一起封装的芯片,相比于使用FPGA通用逻辑资源搭建的软核CPU,使用硬核处理器可以有更高的时钟主频。各大FPGA厂家推出了SoC FPGA技术,例如Xilinx的ZYNQ/PYNQ系列、英特尔Agilex系列,集成了2至4个ARM核,同时具有CPU的软件可编程性和FPGA的硬件可编程性,相比分立的CPU和FPGA通过PCIe总线的通信方式,SoC FPGA可以实现更高的通信带宽和更低的延时,更容易支撑实现CPU和FPGA异构仿真计算。

1.3.3 仿真计算加速方法仍需探索的问题及思路

1)虽然利用FPGA开展MMC和新能源仿真目前已有较多成功研究成果,但是,针对上百台发电单元的新能源场站全拓扑精细化模拟需求,现有

FPGA 互联集群仿真的规模仍然偏小而无法满足。笔者认为,用于组建大规模 FPGA 实时仿真算力的大规模、小时延、高速互联的 FPGA 集群构架还有必要进一步研究,以支撑新能源为主的多电力电子设备大规模精细化建模仿真。

2) 仿真计算总时长取决于每一仿真时步的计算时长,而这一时长取决于并行的各个子网中最长的计算时间,以及子网间最长的通信时间。因此,对子网和算力进行优化匹配,可有效降低每一步的仿真时长,进而降低仿真总时长,达到计算加速的效果。笔者认为,应考虑各个子网如何匹配到最优的硬件算力,可通过量化评估各个子网计算时长、各个子网互相通信时长、各个单体仿真算力计算能力及通信效率后,建立子网计算时长、通信时长及单体算力的量化约束模型,通过优化方法实现子网与算力的最优匹配,实现仿真计算加速。

2 新型电力系统仿真新技术

新型电力系统特征对仿真的规模、精度和速度提出了更高的要求,导致计算量巨大,现有仿真计算方法及硬件难以支撑计算。对于非实时仿真,巨大的仿真计算量将导致计算时间延长,影响事故分析时效性;对于实时仿真,计算量过大则会直接影响仿真可行性,因此,必须采用新的仿真技术。

随着未来先进计算技术,如云计算、超大规模专用芯片计算、量子计算的不断发展,仿真技术可依托的计算算力不断增强,这将有力地推动仿真技术进一步发展,并进一步拓展仿真技术适用的场景。

2.1 基于云计算的仿真技术

随着电力系统的规模不断扩大、电网智能化程度的不断提高,云计算技术在电力系统仿真分析领域将得到广泛应用。云计算主要提供计算服务,可以实现多仿真任务并行仿真计算,满足仿真的算力需要^[79]。文献[80]搭建了基于容器技术的电力设备仿真云平台;文献[81]开展了基于云计算的仿真技术研究,提出基于动态构建的3层映射算法和虚拟化技术下的云仿真运行环境动态构建技术,体现了多用户灵活使用云计算平台大规模多核处理器的优势。根据集群中的负载情况自动扩容和缩容,可降低高性能计算机的购置成本,提升计算资源的利用效率。清华大学开发了电力系统暂态云仿真平台 CloudPSS^[82],腾讯仿真云、华为仿真云、MATLAB Online、中国电力科学研究院有限公司也实现了云化仿真技术。利用云计算的高仿真算力实现了多仿真任务的并行计算^[83]。

2.2 超大规模仿真专用芯片

CPU、GPU、FPGA 等通用计算芯片在带来通用性和便利性的同时,也附带了较多的冗余电路,限制了芯片的计算能力。因此,针对仿真计算特点,通过良好的芯片设计,并针对仿真模型特征进行芯片的架构优化(例如去除与仿真计算无关的冗余电路,使计算电路块距离更近、同芯片面积计算规模更大等)可以充分发挥硬件计算潜力。

目前,已存在利用电子设计自动化(EDA)工具,在超大规模集成电路上设计形成仿真模型的研究,这进一步发掘了芯片的计算能力。文献[84]提出基于并行计算特性的电力仿真计算专用优化架构,利用 EDA 工具直接设计片上电力仿真系统,在 IEEE 14、IEEE 30、IEEE 118 节点系统标准模型均有显著的加速效果,相比于基于 MATLAB 的电力系统仿真组件 MATPOWER(硬件配置:CPU 为 Intel i7-6600U @ 2.60 GHz,内存为 16 GB),其仿真计算速度最高可提升 25 倍^[84]。

仿真专用芯片技术提供了一种应用思路,即对电力系统中适合 FPGA 仿真的 MMC、变流器以及适合 CPU 仿真的交流网络等已经较为成熟稳定的模型和结构,采用仿真专用芯片来承载,其余相对灵活多变的部分仍采用可编程通用硬件计算。这样,既可以充分发挥仿真专用芯片的计算加速能力,又能兼顾仿真场景的通用性和建模的灵活性。

2.3 量子计算

量子计算作为一种新兴的计算范式,有望解决在组合优化、量子化学、信息安全、人工智能等领域中经典计算机难以解决的技术难题。量子计算可以实现指数级的计算力提升,当存在 N 个量子比特时,总共有 2^N 个叠加态,可以同时计算 2^N 种情况,极大地提升了并行计算能力^[85]。

对于以求解大规模微分方程组为主的电力系统仿真计算而言,受到传统计算机速度、通信带宽限制,仿真速度提升较为缓慢,而传统量子计算无法直接求解微分方程组。2010 年悉尼麦格理大学在量子计算机上建立了第 1 个求解线性微分方程的算法,该算法的速度比在传统计算机上更快;2021 年,马里兰大学和麻省理工学院分别用不同的原理提出非线性常微分方程组的近似解法。亦有研究开展了量子计算解常微分方程组的尝试,将方程组求解转化为量子计算较为成熟的优化问题进行求解,并采用 Runge-Kutta 数值计算的量子计算来实现^[86]。

虽然预计未来几年仍无法实现通用量子计算,但是随着量子计算技术的持续高速发展,若未来量子计算发展到较为成熟的阶段,使求解超大规模方

程组成为可能,届时将会为仿真计算提供强有力的算力支撑。

3 新型电力系统仿真应用新模式

3.1 系统性全环节的仿真应用

针对建模复杂性、计算能力受限等问题,传统电力系统仿真较少考虑IGBT等关键器件多时间尺度的瞬态过程,通常也忽略设备通信延时环节、测量环节、嵌入式操作系统调度环节。同时,未考虑电热效应及其他多物理场因素的综合影响,对系统到设备以至器件全环节综合特性仿真方面的研究较少。在工程应用中,此类全环节仿真可以支撑实现精细化的系统全工况特性分析,有助于器件选型和控制器设计,有利于排查柔性直流或新能源发电并网系统各环节的潜在故障发生及传播风险,或对已有故障进行全面诊断。因此,有必要结合多时间尺度、多影响环节、多物理场因素,研究系统性的全环节仿真技术。

3.2 基于超级计算的实时仿真应用

仿真计算分为非实时和实时仿真,后者对于每一个步长的计算、通信时间有严格限制。为了应对日益复杂的交直流混联大电网的运行特性分析及控制系统试验难题,国内外开展了相关仿真技术的研究,并建立了适合于交直流复杂大电网电磁和机电暂态全过程的实时仿真平台,如基于RTDS的全电磁暂态全景仿真技术、数字物理交互的电磁-机电暂态混合实时仿真技术^[87]、基于HYPERSIM仿真软件的数字物理混合仿真技术^[83,88]、基于PSModel和ADPSS的交直流大电网仿真技术^[89]等。对于新型电力系统,更大规模的电磁暂态实时仿真平台是不可或缺的重要研究分析支撑平台。

超级计算机(下文简称超算)系统是超大规模高性能计算主机通过高速通信互联形成的高性能计算整体。目前,超算系统主要为非实时仿真计算提供强有力的算力支撑,实现了明显的计算加速。但是,超算系统的计算能力评价指标是每1 s内浮点运算能力,而实时仿真考量的则是每个数十微秒级仿真步长的计算能力,目前的超算系统尚无法满足实时仿真需求,需要研究具备实时性特征的新型超算系统。

3.3 基于云计算技术的仿真生态

随着新型电力系统构建进程的不断推进,电网规模不断扩大,新能源设备厂家众多、场站设备数量大,设备特性各不相同,软件、数据和模型维护工作愈加复杂,需要建立标准化的仿真模型库,以支撑不同系统和软件之间的模型转化应用。

对于模型本身,新型电力系统各类模型数量庞大、种类繁多、特性差异大、更新速度快,同时,新型电力系统中参与仿真模型构建的主体众多,即使同样的电力元件在不同实际场景或不同研究场景下,由不同模型构建主体所建立的模型格式、开放程度、访问方式均不一致,建模成果无法共享联调。设备厂商出于商业保密等原因,设备详细结构、准确参数、控制策略详细模型通常无法获得。

文献[90]提出基于动态链接库技术的“去控制器”数字建模方法,将新能源机组的控制器源代码封装后接入数字模型,实现风电机组电磁暂态建模。这种建模方法相对于开放式的建模相当于在仿真算例内嵌入了“黑盒子”,虽不利于仿真算例的整体优化,但在有效保护控制器厂家知识产权的条件下实现了联合仿真,有利于多方合作。针对部分开放逻辑但是格式不统一的仿真模型,文献[91]开展了PSCAD、ADPSS、PSS/E、RTDS等主流仿真软件的模型格式解析和转化技术研究。

云计算技术提供了可弹性扩展、上限极高的仿真算力,能有效满足当前以及未来持续增长的仿真算力需求。同时,云计算平台常用的微服务架构可实现各组件互相解耦,以支撑各类仿真模型、各类仿真软件、各类仿真算力等组成部件的即插即用、算力虚拟化、算力优化匹配、算力灵活调度的需求;云平台本身强大的资源共享能力能够支撑仿真算力、模型、数据的共享协作应用。

3.4 数字孪生与在线仿真应用

数字孪生既不是数字与物理无互动的数字模型,也不是物理到数字的单向数字影子,而是数字与物理空间双向互动^[92]。近年来,新型电力系统数字化、智能化进程不断加快,基于电力系统设备或系统状态的实时全方位感知,建立现实空间到虚拟空间的双向映射的数字孪生技术,通过在虚拟空间的建模、仿真、推演、决策,实现以虚控实、虚实互动,如果能实现,将对新型电力系统起到很强的支撑作用。

文献[92]介绍了基于数字孪生的能源互联网规划平台——CloudIEPS,通过能源互联网规划案例进一步证明了数字孪生技术的重要作用。但是,由于新型电力系统规模庞大、复杂程度高,电网数字孪生对数据采集、分析、反馈的及时性要求极高,需要极高性能的计算、通信能力及高效算法支撑,未来电网数字孪生能否真正实现还有待进一步观察。

4 新型电力系统仿真应用建议

1)在新型电力系统构建进程中,随着新能源发电的快速发展,参与规划、设计、制造、调度、运行和

科研等环节的生态主体激增,上述各主体对仿真提出了模型协作与共享的迫切需求。例如,规划部门在开展网络规划研究时需要尽可能准确的新能源发电模型,新能源厂家在设计并网控制策略时需要电网模型等,但因保密方面的考虑又无法完全获得模型全部细节。本文建议开展以下仿真协作技术的研究:

(1)设计具有自描述能力的统一规范模型描述语言,建立丰富、精确、模块化和标准化的各类元件模型。模型的模块化、标准化使得系统建模可在任意仿真软件的建模环境下进行,并可在其他仿真软件中进行转化和调用。

(2)为了解决厂家模型调用问题,从易于仿真的角度出发,开放模型结构并且采用统一的建模描述方式是最优选择,既便于机理分析、等值简化,又便于模型联合使用。对于客观存在的知识产权和隐私问题,可以考虑通过信息安全技术手段解决。例如,采用以多方安全计算、差分隐私和可信执行环境等计算技术,既实现仿真应用,又能兼顾数据安全以及计算参与方的隐私。

(3)实现仿真资源的集市,包括模型、算力、数据、高级应用等。以标准化的接入标准,实现模型和算力等的协作和共享,结合快速发展的非同质代币(non-fungible tokens)技术等可以探索建立仿真资源的交易市场。

2)在交直流混联电网的安全稳定仿真等应用场景里,实时仿真因其能够闭环连接实际控制系统和真实反映关键控制逻辑而发挥了重要的作用。典型应用包括国家电网仿真中心的新一代特高压交直流电网仿真平台中的数模仿真系统^[83],以及南方电网仿真重点实验室的交直流混联电网运行控制实时仿真系统^[87]。但在新型电力系统大规模新能源发电单元接入的背景下,目前的实时仿真系统在规模和精度方面都受到较大的限制,面临较大挑战。实时仿真要求每个仿真步长内计算和通信必须完成,对操作系统调度环节、通信传输环节等所有环节的总时延最大值非常敏感。可在现有超算系统强大算力的基础上进行实时性改造,通过优化网络通信架构与协议、实时操作系统调度等,攻克满足每个步长实时性的、通信时延小且稳定的“实时性”新型超级计算技术,能对实时仿真起到显著的仿真计算加速和规模扩展作用。这样的新型超级计算技术通过监控仿真步长的方式,既能够支持非实时甚至超实时仿真,又可以实现硬件在环的实时仿真,并根据研究需要进行模式切换,可以在扩大实时仿真规模的同时,最大程度实现计算资源的优化利用。

3)为适应新型电力系统规划、建设和运行的需要,可探索构建新型电力系统的多生态仿真平台,具有以下几个特征:

(1)用户开放性:新型电力系统仿真的参与用户众多、生态丰富,包括偏研发的科研机构、高校、仿真设备厂商等,以及偏应用的电网规划、电网调度、电网运维、装备制造厂商等,应具备便利、直观、开放的开发与使用环境。

(2)仿真模型的共享与协作:一方面仿真模型作为一种数据资源,可建立数据中台进行存储、检索、分析和共享;另一方面,为兼容现有仿真生态的应用习惯,新的多生态仿真平台有必要对现有主流仿真软件及模型进行兼容,可通过研究统一的仿真接口标准来实现,根据开放程度的不同将仿真模型以“白盒”转化、“黑盒”嵌入的多种形式进行联合仿真,实现协作。

(3)仿真算力的适配与协同调度:针对CPU、GPU、FPGA、仿真专用芯片等,根据其算力自身特点与计算性质进行匹配。例如,成熟固定的仿真计算任务由专用芯片承担以提高仿真效率,其他计算任务根据并行及串行程度由GPU/FPGA/CPU分工承担以提高灵活性。充分利用云平台技术,实现算力的虚拟化、即插即用、灵活调管与扩展。

(4)仿真实时性的兼容切换:通过软件设置、硬件响应切换,同一套算力资源可快速切换实时仿真和非实时仿真两种应用模式,提升算力资源利用率。

(5)高级应用的支撑性:仿真平台应提供开放、丰富的接口供上层高级应用调用,如电网方式计算、电网风险在线预警、电力装备设计与并网检测、电力系统数字孪生、仿真资源共享与交易等。

综上,从新型电力系统多生态主体的仿真需求出发,笔者提出多生态仿真平台的架构,主要分为3层,如图3所示。底层为“仿真算力层”,是受云平台调度的“新型可虚拟化异构超算系统”,将各类计算硬件构成虚拟仿真算力,支持独占式实时仿真、虚拟化非实时仿真等不同模式;中间层为“仿真计算层”,由仿真模型、计算算法、算力调管算法及对外应用程序编程接口(API)模块组成“仿真操作系统”,具备仿真计算、优化调管底层算力,以及对上层提供API调用支撑等能力;上层为“仿真应用层”,通过调用仿真计算层提供的API,实现各类基于仿真计算的“生态应用”。

上述新型电力系统多生态仿真平台具备开放共享、即插即用、协作仿真等特征,未来可通过云计算平台提供服务,以承载多生态主体参与的多类型仿真应用需求。

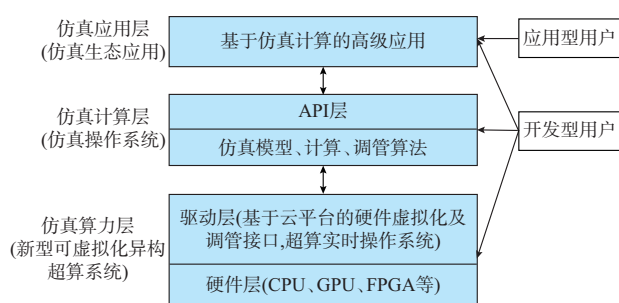


图3 电力系统多生态仿真平台
Fig. 3 Multi-ecology simulation platform of power system

4)随着新型电力系统的数字化和智能化程度越来越高,同时得益于快速迭代发展的先进计算和仿真技术,未来基于机理-数据的混合驱动技术,并结合先进的传感技术,可研发构建电力系统的数字孪生体,依托云计算、超算等强大算力完成超实时的仿真推演、预测和决策。

5 结语

本文从新型电力系统的高比例新能源并网和高比例电力电子装备的两个特征出发展开讨论,概述了新型电力系统运行控制的显著特性对电力系统仿真提出的技术需求。然后,分别从仿真建模方法、多时间尺度仿真方法和仿真计算加速方法等几个方面介绍了建模仿真技术的现状和改进方案。同时,描述新型电力系统仿真新技术和应用新模式。最后,针对建模仿真技术如何更好地适应新型电力系统未来发展进行了展望。总结如下:

1)新型电力系统运行控制的新特征对电力系统仿真技术的建模准确度、仿真规模、计算速度都提出了新的要求,尤其是急剧增加的仿真计算量对仿真计算能力提出了更高要求;

2)为了满足新的仿真需求,研究者从仿真建模优化方法、多时间尺度联合仿真方法、仿真计算加速方法3个方面开展了相关研究;

3)研究者还开展了基于先进计算技术提升仿真对新型电力系统适应能力的研究,如数据驱动、云计算、超级计算技术等,以及异构高性能硬件算力的运用,如FPGA、GPU、定制化超大规模电力仿真专用芯片、量子计算技术等;

4)笔者认为,基于“新型可虚拟化异构超算系统”“仿真操作系统”“仿真生态应用”的电力系统多生态仿真平台,是可预期的未来多生态主体参与多类型仿真应用的承载形态。

本文在撰写过程中得到中国电力科学研

究院有限公司汤涌总工程师和清华大学沈欣教授的指导,并得到南方电网科学研究院“高潜计划”项目(SEPRI-K213015)资助,特此感谢!

参考文献

- [1] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.
TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.
- [2] 汤涌. 交直流电力系统多时间尺度全过程仿真和建模研究新进展[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 1-8.
TANG Yong. New progress in research on multi-time scale unified simulation and modeling for AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 1-8.
- [3] WU Z, ZHOU X. Power system analysis software package (PSASP)—an integrated power system analysis tool[C]// 1998 International Conference on Power System Technology, August 18-21, 1998, Beijing, China.
- [4] 中国2050高比例可再生能源发展情景暨途径研究[EB/OL]. [2022-03-02]. <https://www.docin.com/p-1933373586.html>.
2050 high-proportion renewable energy development scenarios and approaches in China[EB/OL]. [2022-03-02]. <https://www.docin.com/p-1933373586.html>.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘栋, 唐绍普, 胡祥楠, 等. 电力系统基础仿真算法对比分析研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(2): 137-143.
LIU Dong, TANG Shaopu, HU Xiangnan, et al. The comparison and study of fundamental algorithms in power system simulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1

- (2): 137-143.
- [10] 穆清, 李亚楼, 周孝信, 等. 基于传输线分网的并行多速率电磁暂态仿真算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 47-52.
MU Qing, LI Yalou, ZHOU Xiaoxin, et al. A parallel multi-rate electromagnetic transient simulation algorithm based on network division through transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 47-52.
- [11] 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.
- [12] 唐勇, 汪波, 陈明. IGBT 开关瞬态的温度特性与电热仿真模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 146-153.
TANG Yong, WANG Bo, CHEN Ming. Temperature characteristic and electric-thermal model of IGBT switching transient [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 146-153.
- [13] MITTER C S, HEFNER A R, CHEN D Y, et al. Insulated gate bipolar transistor (IGBT) modeling using IG-SPICE [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(1): 24-33.
- [14] 施博辰, 赵争鸣, 蒋焯, 等. 功率开关器件多时间尺度瞬态模型 (I) —— 开关特性与瞬态建模[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 16-24.
SHI Bochen, ZHAO Zhengming, JIANG Ye, et al. Multi-time scale transient models for power semiconductor devices (Part I: switching characteristics and transient modeling) [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 16-24.
- [15] 蒋焯, 赵争鸣, 施博辰, 等. 功率开关器件多时间尺度瞬态模型 (II) —— 应用分析与模型互联[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 25-32.
JIANG Ye, ZHAO Zhengming, SHI Bochen, et al. Multi-time scale transient models for power semiconductor devices (Part II: applications analysis and model connection) [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 25-32.
- [16] XU J Z, GOLE A M, ZHAO C Y. The use of averaged-value model of modular multilevel converter in DC grid [C]// 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, USA.
- [17] 冯漠可, 王傲群, 袁帅, 等. 国产化电磁暂态仿真平台发展方向分析及展望[J/OL]. 电力系统自动化: 1-12 [2022-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.tp.20211101.1022.002.html>.
FENG Moke, WANG Aoqun, YUAN Shuai, et al. Analysis and prospect of development of China's independent electromagnetic transient simulation platform [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-12 [2022-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.tp.20211101.1022.002.html>.
- [18] 菲美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
MAO Meiqin, YU Shijie, SU Jianhui. Versatile Matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [19] 徐伟. 光伏发电系统的建模及智能 MPPT 算法研究[D]. 上海: 东华大学, 2021.
XU Wei. Modeling of photovoltaic power generation system and research on intelligent mppt algorithm [D]. Shanghai: Donghua University, 2021.
- [20] 沈阳武, 刘佳润, 张斌, 等. 光伏逆变器动态谐波等效建模及其影响因素研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 126-132.
SHEN Yangwu, LIU Jiarun, ZHANG Bin, et al. Research on dynamic harmonic equivalent modeling and influencing factors of photovoltaic inverter [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(8): 126-132.
- [21] 李建林, 梁忠豪, 李雅欣, 等. 锂电池储能系统建模发展现状及其数据驱动建模初步探讨[J]. 油气与新能源, 2021, 33(4): 75-81.
LI Jianlin, LIANG Zhonghao, LI Yaxin, et al. Development status in modeling of the lithium battery energy storage system and preliminary exploration of its data-driven modeling [J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(4): 75-81.
- [22] BERRUETA A, URTASUN A, URSÚA A, et al. A comprehensive model for lithium-ion batteries: from the physical principles to an electrical model [J]. Energy, 2018, 144: 286-300.
- [23] RENGASWAMY R, NARASIMHAN S, KUPPURAJ V. Receding nonlinear Kalman (RNK) filter for nonlinear constrained state estimation [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2011: 844-848.
- [24] 董毅峰, 王彦良, 韩估, 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.
- [25] BELHOCINE M, MARINESCU B. A mix balanced-modal truncations for power systems model reduction [C]// 2014 European Control Conference (ECC), June 24-27, 2014, Strasbourg, France.
- [26] FARZAMFAR M, RASILO P, MARTIN F, et al. Proper orthogonal decomposition for order reduction of permanent magnet machine model [C]// 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), October 25-28, 2015, Pattaya, Thailand.
- [27] WANG C S, YU H, LI P, et al. EMTP-type program realization of Krylov subspace based model reduction methods for large-scale active distribution network [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(1): 52-60.
- [28] STURK C, VANFRETTI L, CHOMPOOBUTRGOOL Y, et al. Coherency-independent structured model reduction of power systems [C]// IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), February 18-20, 2015, Washington, USA.

- [29] LALL S, MARSDEN J E, GLAVAŠKI S. A subspace approach to balanced truncation for model reduction of nonlinear control systems [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2002, 12(6): 519-535.
- [30] CHEN Y. Model order reduction for nonlinear systems [D]. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [31] REWIENSKI M, WHITE J. A trajectory piecewise-linear approach to model order reduction and fast simulation of nonlinear circuits and micromachined devices [J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2003, 22(2): 155-170.
- [32] 赵洪山,薛宁,时宁.非线性电力系统模型经验Gramian平衡降阶[J].*电力自动化设备*,2014,34(9):21-26.
ZHAO Hongshan, XUE Ning, SHI Ning. Empirical Gramian balanced reduction of nonlinear power system model [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(9): 21-26.
- [33] 黄伟,张小珍.基于特征分析的大规模风电场等值建模[J].*电网技术*,2013,37(8):2271-2277.
HUANG Wei, ZHANG Xiaozhen. Feature analysis based equivalent modeling for large-scale wind farms [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(8): 2271-2277.
- [34] 陈树勇,王聪,申洪,等.基于聚类算法的风电场动态等值[J].*中国电机工程学报*,2012,32(4):11-19.
CHEN Shuyong, WANG Cong, SHEN Hong, et al. Dynamic equivalence for wind farms based on clustering algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(4): 11-19.
- [35] 李禹鹏.基于时频变换和辨识聚合的大规模新能源并网系统多速率仿真研究[D].上海:上海交通大学,2020.
LI Yupeng. Research on multi-rate simulation of large scale renewable energy connected system based on time-frequency transformation and identification aggregation theory [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [36] 周瑞涵,王冠中,王康,等.用于风电场小干扰稳定性分析的结构保持等值方法[J].*电力系统自动化*,2021,45(19):133-140.
ZHOU Yuhuan, WANG Guanzhong, WANG Kang, et al. Structure-retained equivalent method for small signal stability analysis of wind farm [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 133-140.
- [37] 龙文浩.光伏并网系统模型降阶研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
LONG Wenhao. Research on model order reduction of photovoltaic grid-connected system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [38] 吴峰,戴小妹.计及高渗透率光伏的配电网广义负荷一体化等值建模[J].*电力自动化设备*,2020,40(5):1-9.
WU Feng, DAI Xiaomei. Integrated equivalent modeling for generalized loads of distribution network considering high-penetration photovoltaic [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(5): 1-9.
- [39] 李湘,陈民铤,郑永伟,等.基于稳健偏最小二乘法的谐波发射水平估计[J].*电力系统及其自动化学报*,2016,28(6):86-90.
LI Xiang, CHEN Minyong, ZHENG Yongwei, et al. Assessing harmonic emission level based on robust partial least squares regression [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2016, 28(6): 86-90.
- [40] CHEN C I, CHEN Y C. A neural-network-based data-driven nonlinear model on time- and frequency-domain voltage-current characterization for power-quality study [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(3): 1577-1584.
- [41] 吕干云,蒋小伟,郝思鹏,等.基于半监督支持向量机的电压暂降源定位[J].*电力系统保护与控制*,2019,47(18):76-81.
LÜ Ganyun, JIANG Xiaowei, HAO Sipeng, et al. Location of voltage sag source based on semi-supervised SVM [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(18): 76-81.
- [42] ZHANG C P, JIANG J C, GAO Y, et al. Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time [J]. *Applied Energy*, 2017, 194: 569-577.
- [43] WANG J P, CHEN Q S, CAO B G. Support vector machine based battery model for electric vehicles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(7/8): 858-864.
- [44] 郭林.基于融合型数据驱动的锂离子电池剩余寿命预测方法的研究[D].青岛:青岛科技大学,2018.
GUO Lin. Research on prediction method of remaining useful life of lithium ion battery based on fusion type data driven [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2018.
- [45] 王俊生,杨世峰,谭捷,等.基于人工智能的故障限流器EMTP建模[J].*高压电器*,2021,57(8):54-60.
WANG Junsheng, YANG Shifeng, TAN Jie, et al. EMTP modeling of fault current limiter based on artificial intelligence [J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(8): 54-60.
- [46] 冉靖,张智刚,梁志峰,等.风电场风速和发电功率预测方法综述[J].*数理统计与管理*,2020,39(6):1045-1059.
RAN Jing, ZHANG Zhigang, LIANG Zhifeng, et al. Review of wind speed and wind power prediction methods [J]. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2020, 39(6): 1045-1059.
- [47] 李润泽,郭黎,李保平,等.基于模糊宽度学习模型的光伏发电预测方法[J].*控制工程*,2020,27(11):2016-2022.
LI Runze, GUO Li, LI Baoping, et al. A photovoltaic power prediction method based on fuzzy broad learning system [J]. *Control Engineering of China*, 2020, 27(11): 2016-2022.
- [48] BARTEL A, GÜNTHER M. A multirate W-method for electrical networks in state-space formulation [J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2002, 147 (2): 411-425.
- [49] BOAVENTURA W D C, SEMLYEN A, IRAVANI M R, et al. Robust sparse network equivalent for large systems: Part I methodology [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(1): 157-163.
- [50] MOREIRA F A, MARTI J R, ZANETTA L C, et al. Multirate simulations with simultaneous-solution using direct integration methods in a partitioned network environment [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2006, 53(12): 2765-2778.
- [51] 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.

- [52] STRUNZ K, SHINTAKU R, GAO F. Frequency-adaptive network modeling for integrative simulation of natural and envelope waveforms in power systems and circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Regular Papers, 2006, 53(12): 2788-2803.
- [53] 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.
- [54] 姚蜀军, 韩民晓, 汪燕, 等. 大规模电网电磁暂态快速仿真方法[J]. 电力建设, 2015, 36(12): 16-21.
YAO Shujun, HAN Minxiao, WANG Yan, et al. A fast electromagnetic transient simulation of large-scale power system [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(12): 16-21.
- [55] 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.
- [56] 姚蜀军, 刘畅, 汪燕, 等. 多频段时间尺度变换电磁暂态仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7199-7208.
YAO Shujun, LIU Chang, WANG Yan, et al. A research on multi-frequency band time-scale frame transformation for electromagnetic transients simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7199-7208.
- [57] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
DOMMEL H W. EMTP theory book [M]. Beijing: Water Power Press, 1991.
- [58] 姚奕荣. 并行处理技术在电磁暂态仿真计算中的应用研究[J]. 华东电力, 1998, 26(10): 9-12.
YAO Yirong. Electromagnetic transient simulation with computer parallel processing technology [J]. East China Electric Power, 1998, 26(10): 9-12.
- [59] MARTÍ J R, LINARES L R, HOLLMAN J A, et al. OVNI: integrated software/hardware solution for real-time simulation of large power systems [C]// Proceedings of the 14th PSCC, June 24-28, 2002, Sevilla, Spain.
- [60] 岳程燕, 周孝信, 李若梅. 电力系统电磁暂态实时仿真中并行算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 1-7.
YUE Chengyan, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei. Study of parallel approaches to power system electromagnetic transient real-time simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 1-7.
- [61] 田芳, 周孝信. 交直流电力系统分割并行电磁暂态数字仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 1-7.
TIAN Fang, ZHOU Xiaoxin. Partition and parallel method for digital electromagnetic transient simulation of AC/DC power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 1-7.
- [62] ACEVEDO S, LINARES L R, MARTÍ J R, et al. Efficient HVDC converter model for real time transients simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14 (1) : 166-171.
- [63] 林济铿, 李杨春, 罗萍萍, 等. 波形松弛法的电力系统暂态稳定性并行仿真计算[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 47-53.
LIN Jikeng, LI Yangchun, LUO Pingping, et al. Parallel calculation for power system transient stability based on waveform relaxation method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(12): 47-53.
- [64] SCHUTT-AINE J E. Latency insertion method (LIM) for the fast transient simulation of large networks [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Fundamental Theory and Applications, 2001, 48(1): 81-89.
- [65] KATO T, INOUE K, FUKUTANI T, et al. Multirate analysis method for a power electronic system by circuit partitioning [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2791-2802.
- [66] 姚蜀军, 庞博涵, 吴国畅, 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.
- [67] 姚蜀军, 庞博涵, 曾子文, 等. 半隐式延迟解耦电磁暂态仿真方法(二): 单端口子模块MMC通用解耦与快速仿真[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-11 [2022-03-09]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210064>.
YAO Shujun, PANG Bohan, ZENG Ziwen, et al. Semi-implicit Latency decoupling technology based electromagnetic transient simulation: Part II general decoupling and fast simulation for single-port sub-module MMC [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-11 [2022-03-09]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210064>.
- [68] HOOSHYAR H, VANFRETTE L, DUFOUR C. Delay-free parallelization for real-time simulation of a large active distribution grid model [C]// 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 23-26, 2016, Florence, Italy.
- [69] 王韦华, 朱晋, 李炜, 等. 基于SSN解算器的MMC-HVDC系统RT-LAB实时仿真[J]. 南方电网技术, 2015, 9(6): 22-27.
WANG Weihua, ZHU Jin, LI Wei, et al. SSN-based RT-LAB simulation of MMC-HVDC system [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(6): 22-27.
- [70] SAAD H, DUFOUR MAHSEREDJIAN C, DENNETIÈRE S, et al. Real time simulation of MMCs using the state-space nodal approach [EB/OL]. [2022-03-03]. http://www.opal-rt.com/sites/default/files/technical_papers/Paper_SSNMMC_SAAD.pdf.
- [71] SAAD H, DUFOUR C, MAHSEREDJIAN J, et al. Real time simulation of MMCs using the state-space nodal approach [C]// The International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), June 18-20, 2013, Vancouver, Canada.
- [72] 谭伟, 邱华静, 邹毅军. SSN算法在大型风电系统实时仿真中的

- 应用[J].电力系统保护与控制,2014,42(5):98-103.
- TAN Wei, QIU Huajing, ZOU Yijun. Application of SSN algorithm in large wind power system real-time simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 98-103.
- [73] 郝晓亮,付立军,马凡,等.中压直流综合电力系统建模与实时仿真实现方法[J].电网技术,2021,45(3):1100-1109.
- HAO Xiaoliang, FU Lijun, MA Fan, et al. Modeling and real-time simulation of MVDC integrated power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1100-1109.
- [74] ZHOU Z Y, DINAHAHI V. Parallel massive-thread electromagnetic transient simulation on GPU [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1045-1053.
- [75] LI Y, CHANG T Q, BAI F, et al. Switching characteristics simulation of IGBT based on FPGA [C]// International Conference on Computational Problem-Solving, December 3-5, 2010, Lijiang, China.
- [76] 林雪华,郭琦,郭海平,等.基于FPGA的柔性直流实时仿真技术及试验系统[J].电力系统自动化,2017,41(12):33-39.
- LIN Xuehua, GUO Qi, GUO Haiping, et al. FPGA based real-time simulation technology and test system of flexible DC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 33-39.
- [77] 王成山,丁承第,李鹏,等.基于FPGA的光伏发电系统暂态实时仿真[J].电力系统自动化,2015,39(12):13-20.
- WANG Chengshan, DING Chengdi, LI Peng, et al. FPGA-based real-time transient simulation of photovoltaic generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 13-20.
- [78] 朱建鑫,滕国栋,秦阳,等.基于多FPGA的电力电子实时仿真系统[J].电力系统自动化,2017,41(9):137-143.
- ZHU Jianxin, TENG Guodong, QIN Yang, et al. Multi-FPGA based real-time simulation system for power electronics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 137-143.
- [79] ARMBRUST M, FOX A, GRIFFITH R. A view of cloud computing [J]. Communications of the ACM, 2010, 53(4): 50-58.
- [80] 赵宇峰,雷晟,张国钢,等.基于容器技术的电力设备仿真云平台设计与开发[J].计算机工程,2021,47(9):171-177.
- ZHAO Yufeng, LEI Sheng, ZHANG Guogang, et al. Design and development of container-based cloud platform for power equipment simulation [J]. Computer Engineering, 2021, 47(9): 171-177.
- [81] 张雅彬,李伯虎,柴旭东,等.基于虚拟化技术的云仿真运行环境动态构建技术[J].系统工程与电子技术,2012,34(3):619-624.
- ZHANG Yabin, LI Bohu, CHAI Xudong, et al. Research on virtualization-based cloud simulation running environment dynamic building technology [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(3): 619-624.
- [82] SONG Y K, CHEN Y, YU Z T, et al. CloudPSS: a high-performance power system simulator based on cloud computing [J]. Energy Reports, 2020, 6: 1611-1618.
- [83] 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.
- [84] DAI R C, LU Y, LIU G Y, et al. Power flow calculation using integrated circuit simulator [C]// 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration, October 30-November 1, 2020, Wuhan, China.
- [85] 陈然一,赵舜池,宋旨欣,等.混合量子-经典算法:基础、设计与应用[J].物理学报,2021,70(21):210302.
- CHEN Ranyiliu, ZHAO Benchu, SONG Zhixin, et al. Hybrid quantum-classical algorithms: foundation, design and applications [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(21): 210302.
- [86] ZANGER B, MENDL C, SCHULZ M, et al. Quantum algorithms for solving ordinary differential [EB/OL]. [2022-03-01]. <https://arxiv.org/abs/2012.09469v1>.
- [87] 郭琦.交直流混联电网运行控制实时仿真技术研究[J].南方电网技术,2017,11(3):59-64.
- GUO Qi. Research on real-time simulation technology of operation control of AC & DC hybrid power system [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(3): 59-64.
- [88] 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.
- [89] 朱旭凯,周孝信,田芳,等.基于电力系统全数字实时仿真装置的大电网机电暂态-电磁暂态混合仿真[J].电网技术,2011,35(3):26-31.
- ZHU Xukai, ZHOU Xiaoxin, TIAN Fang, et al. Hybrid electromechanical-electromagnetic simulation to transient process of large-scale power grid on the basis of ADPSS [J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 26-31.
- [90] 张兴,孙艳霞,李丽娜,等.风电机组电磁暂态建模及验证[J].中国电力,2020,53(7):106-112.
- ZHANG Xing, SUN Yanxia, LI Lina, et al. Electromagnetic transient modelling and verifying of wind turbine generator [J]. Electric Power, 2020, 53(7): 106-112.
- [91] 杨林超.大规模交直流系统动态等值和RTDS快速建模方法研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- YANG Linchao. Research on dynamic equivalent and rapid RTDS modeling method for large-scale AC/DC power systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [92] 沈沉,贾孟硕,陈颖,等.能源互联网数字孪生及其应用[J].全球能源互联网,2020,3(1):1-13.
- SHEN Chen, JIA Mengshuo, CHEN Ying, et al. Digital twin of the energy internet and its application [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1-13.

郭琦(1979—),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统仿真与控制、高压直流输电控制保护。E-mail: guoqi@csg.cn

卢远宏(1988—),男,通信作者,博士,高级工程师,主要研究方向:新能源发电、电力系统建模与仿真。E-mail: luyh@csg.cn

(编辑 鲁尔姣)

Key Technologies and Prospects of Modeling and Simulation of New Power System

GUO Qi^{1,2,3}, LU Yuanhong^{1,3,4}

(1. State Key Laboratory of HVDC (Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Company Limited), Guangzhou 510663, China; 2. National Energy Power Grid Technology R&D Centre, Guangzhou 510663, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Operation and Control for New Energy Power System, Guangzhou 510663, China; 4. CSG Key Laboratory for Power System Simulation, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In the background of achieving the goal of “carbon emission peak and carbon neutrality” and promoting the construction of the new power system with renewable energy as the main part, high proportion of renewable energy connected to the grid and high proportion of power electronics equipment will become the main trends and outstanding features of the new power system in the future. This paper starts with an overview of the characteristics of the new power system, and summarizes the urgent needs of the new power system for modeling and simulation technology, introduces the current status and improving schemes of modeling and simulation technologies for the power system in terms of modeling optimization methods, multi-time scale simulation methods and simulation calculation methods, and the simulation new technologies and new application modes for the new power system are described. Finally, the simulation modeling technology and its application mode are prospected to better adapt to the construction and operation of the new power system. In the future, due to the continuous improvement of calculation technologies and simulation computing power, revolutionary may emerge in the simulation technology and application mode of the power system breakthrough.

This work is supported by China Southern Power Grid Company Limited (No. KYKJXM-20210056).

Key words: new power system; renewable energy; power electronics; modeling; simulation; supercomputing; cloud computing; data-driven

