

## 多能微网阶段化多模式混合仿真关键技术综述

张树卿<sup>1</sup> 唐绍普<sup>1</sup> 朱亚萍<sup>2</sup> 于思奇<sup>1</sup> 孙钰博<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(清华大学电机工程与应用电子技术系 北京 100084)

<sup>2</sup>(北京市智中能源互联网研究院 北京 100176)

<sup>1</sup>(zsq@mail.tsinghua.edu.cn)

## Key Techniques for Phased and Multi-Mode Hybrid Simulation of Multi-Energy Micro Grid

Zhang Shuqing<sup>1</sup>, Tang Shaopu<sup>1</sup>, Zhu Yaping<sup>2</sup>, Yu Siqu<sup>1</sup>, and Sun Yubo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>2</sup>(Beijing Smart China Energy Internet Research Institute, Beijing 100176)

**Abstract** Energy Internet has become a powerful driving force of energy production and consumption revolution all over China. Two core technologies, including smart micro grid and multi-energy complementary, are widely integrated into micro energy Internet. Energy sources, loads and storages of various energy forms are constructed and integrated as a whole, which imply complicated energy conversion, transmission mechanism and complex operation characteristics. However, the existing simulation means of various energy systems always only aim at one independent energy system, thus they cannot be directly applied to the coupling and interaction mechanism of different energy forms, or to the analysis of operation and control characteristics of multi-energy system. This paper has summarized the current development and achievement of simulations of micro-grids and other types of energy systems, which are the foundations of multi-energy system simulation. Then it has analyzed and summarized the basic characteristics of multi-energy system, intricacies and main points to implement its simulation. Furthermore, phased and multi-mode hybrid simulation is designed and presented with its key techniques. By the hybrid simulation, it is expected to make full use of the foundations of the existing energy equipment-system simulation models and algorithms and to establish dynamic and transient simulation of multi-energy system. The application of the phased and multi-mode hybrid simulation in the multi energy system is illustrated by a typical example of cold combined heat and power system.

**Key words** micro-grid energy Internet; multi-energy system; phased simulation; multi-mode simulation; hybrid simulation

**摘 要** 能源互联网已经成为我国能源生产和消费革命强大的推动力,它将智能微网技术和多能协调互补等核心技术集成应用,多种能源形式的“源-荷-储”交叉共建,使得能量转化、传输机理和系统运行特性复杂。现有热力、电力等能源系统的计算方法和仿真手段分别针对一种独立能源系统,不能满足多种不同能源耦合和交互机理、多能系统组网运行及控制特性的计算分析需求。总结评述了作为多能系统

收稿日期:2016-12-21;修回日期:2017-01-23

基金项目:国家自然科学基金(51307093)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51307093).

通信作者:唐绍普(tangshaopu@126.com)

仿真基础的微电网和非电能源系统仿真技术现状,分析和概括了多能系统根本特征、仿真要点和难点,进一步提出了阶段化、多模式混合仿真思想,概括了其中的关键技术,以期充分利用现有能源设备-系统仿真模型和算法基础,建立适用于多能源系统动态、暂态仿真分析技术,并以典型的冷热电联供为例说明阶段化多模式混合仿真技术在多能系统中的应用。

**关键词** 能源互联微网;多能系统;阶段化仿真;多模式仿真;混合仿真

**中图法分类号** TK01+9

在能源生产与消费革命、“互联网+”背景下,能源互联网被设计提出,以解决资源紧张、新能源消纳、环境污染和气候变化、现有能源利用和设备利用率低下等问题;在电力体制改革的带动下,通过局地能源高效利用寻求一定的经济效益。

能源互联网是基于互联网思维和理念构建的新型的信息-能源融合复杂系统<sup>[1]</sup>.作为能源互联网的基本实现形式,能源互联微网(多能微网)通过新能源发电、多种微能源采集、汇聚与分享以及微网内的储能或用电消纳组成<sup>[2]</sup>,体现了能源互联网的“源网荷储”各环节形式的多样性、“源荷储”交叉共建、能量转化机理和系统运行特性复杂等特征。

国内能源互联网尚在可研、规划设计和摸索建设阶段,即使在国外,也少有可参考的成熟案例.规划设计阶段重点关注技术可行性、源-荷匹配及能量运输路径和经济性等因素,技术方面主要考虑多种能源的源与荷在多种可能的运行工况下的匹配、能源系统定工况计算与静态稳定等。

实际上,能源系统的动态、暂态稳定性已在微电网、多电力电子电网中成为普遍关注的问题,并在实际电网中显现,典型的是多变流器之间及其与电网间相互作用引起的振荡<sup>[3]</sup>,在主电路参数匹配失当、装置内部和装置间控制不协调的情况下,易引发电路中的次同步振荡<sup>[4-5]</sup>.能源互联网中更易由多尺度序贯控制机制<sup>[6]</sup>、低惯性和宽频带响应特性引起能源系统设备之间及能源互联微网与外网之间的复杂交互作用,使得能源互联网的暂态、动态稳定问题更加突出、形式更加多样和复杂,增加了能源互联微网行为特性分析研究和运行控制的难度。

各地已经开始了能源互联网实际工程的探索和规划、建设,已有园区能源互联微网将逐步开始运行.然而,当前能源互联网的理论体系、技术体系、标准体系、产业体系都还没有形成<sup>[7]</sup>.对于系统规划参数设计及方案验证、设备组网并网后的特性分析、控制行为特性分析、控制保护整定、系统的运行特性研究都需要有效的动态、暂态仿真技术手段作支撑。

多能系统是能源互联网的物理层核心,已有的电网、微电网、热电厂、热力系统等能源系统仿真技术手段并不能满足能源互联网中多能系统动态、暂态仿真的需求.目前微电网、多电力电子网络的仿真是传统暂态稳定仿真和电磁暂态仿真的延伸,两者均无法克服传统暂态仿真的缺点<sup>[8]</sup>.如针对微网次同步振荡,由于仿真手段的限制,鲜有考虑多变流器的异构性和电网形态的多样性<sup>[9-11]</sup>.已有能源系统的动态、暂态仿真仅针对单一类型能源系统或设备,而对于不同能源形式的仿真程序相对独立,无法计及不同类型能源系统和设备的关联与耦合<sup>[12-15]</sup>。

本文首先调研、总结了微电网和以热能、热力系统为代表的非电能源系统仿真技术现状,它们是多能源系统动态、暂态仿真的基础;接着总结多能微网的特征,针对这样的系统,分析了动态和暂态仿真的要点和难点;基于复杂电网和微电网仿真技术,进一步提出了阶段化多模式混合仿真的思想,并分解阐述了其原理及关键技术点。

# 1 能源网仿真技术现状

## 1.1 能源互联网仿真技术基础

能源互联微网是电网、微电网的拓展和延伸<sup>[16-17]</sup>,并在电能的基础上引入了热动系统、热力网、燃料管网等非电能源,是多种能源综合、互补分配利用的能源发、输、储、用系统.电网、电力系统仿真技术方面已有较丰富的成果,针对各类需求和关注点,形成了诸如潮流和静态稳定、电磁暂态、机电暂态和准稳态、中长期稳定等较成熟的仿真手段.在电网、电力系统仿真技术的基础上,人们通过模型开发拓展了微电网仿真技术,并有一定的应用<sup>[18-19]</sup>.微电网仿真则为多能微网仿真提供了部分模型和算法基础。

在能源互联网中,多种能源系统的设备和子系统之间紧密耦合与相互作用.在非电能源领域,也有各自的分析计算方法和手段.因此,在多能微网仿真中可有选择地引进和借鉴。

## 1.2 微电网仿真

微电网系统内分布式电源种类丰富,受外部环境变量的影响,微网运行环境、运行状态复杂多变,包含多种能源的输入输出、多种能源转换方式、多种运行状态、部分电源的间歇性和随机性,其中涉及到的物理过程跨越了几十微秒、毫秒乃至分钟以上的的时间尺度.微网仿真重点关注新能源接入、分布式能源建设与并网等,涵盖了上述较宽时间尺度的物理过程.

微网仿真包括稳定仿真分析、系统暂态稳定特性仿真分析和系统-装置级行为特性精细仿真<sup>[19]</sup>.

稳定性仿真分析的基础,主要包括2类:1)根据给定的分布式发电系统运行方式求解系统的稳态运行点;2)短路故障分析是获取系统各种短路故障下的故障电流,为系统中各种设备和开关容量的选择提供依据.

系统暂态稳定特性仿真重点关注系统中慢的动态过程,采用简化的网络元件、电力电子装置、分布式电源及各种控制器模型对系统建模(准稳态模型).

系统-装置特性精细仿真更注重微网局部或设备更快、更细的特性,以电磁暂态仿真为核心,关注问题有如微电电能质量、系统控制器设计、保护与紧急控制系统设计、故障情况下的暂态短路电流等.

基于常规的电网仿真方法的拓展,在微网新形式稳定问题、大量新能源分布式发电并网等问题的研究中渐现不足.模型规模和计算量庞大、建模复杂度高使得电磁暂态仿真难以适用于包括大量变流器、众多电气节点的实际微网.机电暂态仿真则忽略了设备、电网的电磁暂态过程.

## 1.3 非电能源系统仿真

热能系统是典型的非电能源系统,是国内规划建设中能互联微网多能系统重要组成部分.热力系统设备多样、行为特性跨越较宽的时间尺度,模型通过代数方程、常微分方程和分布参数偏微分方程描述,能够覆盖能源系统建模和仿真解算的关键技术,具有代表性.

已有热能系统建模与仿真研究大致可以概括为2个层级:部件-设备建模与仿真分析、部件-设备-系统建模与仿真.

1) 部件-设备层级建模与仿真分析.其主要针对设备内部结构参数优化、设备各环节设计和验证、性能分析、变工况或扰动下设备运行状态模拟、控制特性分析和控制设计等,建模无需考虑设备之间的关联与耦合,针对热力过程涉及的主要部件,根据不

同需求建立不同详细程度的模型,部件模型通过关联状态量或关联方程联立.根据模型解算结果分析不同层级的设备部件行为和特性,可分为静态集总参数、静态分布参数、动态集总参数和动态分布参数建模与仿真.以吸收式制冷机为例,Herold等人在文献[20]中给出的集总参数模型具有代表性,可用于系统的热力计算,也可用于简化的设计计算;静态分布参数模型可计算出制冷剂与溶液在各部件中的分布量.文献[12,21-22]考虑到系统中工质热容、流动状态的差异,分别针对吸收式制冷机中发生器、换热器等设备,建立了更为详细的模型,大大提高了对系统运行特性描述的准确性.

2) 部件-设备-系统层级建模与仿真.其重点倾向设备-系统一级的过程和问题,包括在系统环境下设备选型匹配和协调运行、系统和设备运行特性分析、设备参数对系统的影响、系统性能分析、系统在运行条件变化或故障扰动下运行状态模拟、系统和设备控制特性分析和设计等.该层级的仿真基本不考虑部件本体参数和工质状态的差异性,部件-设备大多采用响应特性建模,设备模型之间通过关联状态量或输入输出联立<sup>[22]</sup>.通过分区集中模型,一定程度上反映主导的分布参数的特性.整体上,部件-设备-系统层级仿真,分为静态和动态2种.

① 设备-系统静态仿真.其考虑系统稳定运行工况,静态模型可以用于根据该地区的气候状况和建筑物的使用性质等因素,针对系统全年冷热电负荷的需求量和变化特点,确定系统的配置方案、运行模式和运行方案等,或根据分时电价以及电力、热(冷)负荷的变化,对系统运行方案进行协调优化控制等.张微微等人<sup>[23]</sup>建立了锅炉和3缸汽轮机的集总参数稳态模型,用于系统定工况和变工况计算;董坤<sup>[24]</sup>建立了代数方程描述的热力系统稳态模型,并用于能效诊断和经济性评估;张超等人<sup>[25]</sup>通过60多个非线性代数方程建立了完整的热力系统,包括锅炉、过热器、再热器、汽轮机等,并研究采用Powell方法求解;文献[26]中建立了舰船热力系统的稳态模型,部分设备基于机理建模,部分设备采用特性曲线拟合建模.

② 设备-系统动态仿真.其用于分析热力系统受扰下的暂态和动态过程分析、研发系统的控制策略、系统安全稳定性能分析等.王兵树等人<sup>[27-28]</sup>建立了蒸汽联合循环机组和重型燃机组热力系统的集总参数的动态仿真模型,基于系统动态仿真得到系统动态特性,可用于机组运行分析、故障诊断、控制

开发和运行人员培训等;罗波<sup>[29]</sup>以设备为单元,建立了包含接收器、油罐、管壳式换热器、蒸汽蓄热器、汽轮机等设备的太阳能热发电热力系统的动态模型并开展动态特性研究;马文通<sup>[30]</sup>、苏明等人<sup>[31]</sup>分别针对阀门、透平机系统和锅炉、阀门、汽轮机、凝汽器系统建立了集总参数动态模型,用于系统级仿真,并针对小容积部件模型需要小步长解算的不足提出了时步预测方法.此外,还有专门针对设备-系统仿真建模和算法的研究,如文献<sup>[32-33]</sup>提及了几种热力系统集总参数动态建模仿真的精度改进方法,如增加部件分段数、增加惯性补偿方程式等.

与电力系统相比,热力网规模不大,设备、部件数量有限,因而热力系统仿真中设备之间的耦合处理较为直接,通过输入输出量和关联状态量联立,形成更高维数的代数方程或微分方程组.对模型方程,通常也采用较直接的、常规的解算方法,如针对静态模型代数方程组,多采用牛顿法或牛顿改进法<sup>[24-26]</sup>;针对动态微分方程组,常采用低阶稳定性较好的算法求解,如隐式梯形法等<sup>[30-31]</sup>.

#### 1.4 多能系统仿真

在多能系统仿真分析中,冷、热、电联供系统是最为典型的、常见的多能系统.

在稳态建模仿真及其应用方面,已有较为丰富的研究工作. Murai 等人<sup>[34]</sup>基于组件输入-输出特性模型为电驱动式热泵区域冷热联供站提出了一种以运行成本为优化目标的运行控制策略; Buoro 等人<sup>[35]</sup>研究了分布式冷热联供系统的运行优化及配置优化,仍是基于系统静态特性的经济性运行为目标; Ono 等人<sup>[36]</sup>为提高区域系统联供站的能源利用率,对供能端设备的优化运行进行了仿真,并表明优化运行策略将使得系统能耗和成本分别降低 11.0% 和 8.2%; 文献<sup>[37-39]</sup>研究了冷热系统的多目标运行化策略和冷热电联供系统的运行模式. 还有针对建模或仿真本身的研究工作,如胡忠文等人<sup>[40]</sup>采用人工神经网络建立了发电机、微燃机、溴化锂吸收式机组模型,可解算出微燃机联供系统随环境温度变化的状态参数.

多能源系统动态建模和仿真刚开始起步,有少量初步的工作. 上海理工大学热工程研究所<sup>[41]</sup>建立了能源岛冷、热、电三联供系统的数字、物理混合仿真,实现不同方案能源岛系统的运行仿真,为设计、优化微燃机能量联供系统提供部件匹配和参数匹配的指导,优化机组启动过程以及运行控制;中国电力科学研究院施浩波<sup>[42]</sup>针对微型燃气轮机、燃料电池

联合发电系统进行建模仿真,分析了联合发电系统的动态过程对接入配电网的影响,包括电压分布、系统稳定性等.

目前,针对热力、电力、新型分布式发电等构成的多能源系统仿真研究多以静态模型、以经济性成本为目标的运行方式优化为主,而对系统的动态、暂态建模、仿真研究则刚开始有所关注.

## 2 多能系统特征、仿真要点和难点

### 2.1 多能系统基本组成及结构

国内已积极推进能源互联网全方位的探索 and 规划建设,并在多种能源高效综合利用规划设计方面已展开一定的工作. 在不久的将来,多能系统至少包含电能、热能和燃料化学能 3 种能源形式. 在多能系统中,一般将新能源通过能源转化装置将其转为电能,并通过变流器接入电网,主导电气特性由变流器决定,因此新能源不单独作为一种非电能源形式特殊考虑. 多能系统基本组成如图 1 所示,含大量电力电子装置的交直流电网将源侧和负荷侧设备关联耦合在一起,设备通过电力电子变换器或直接接入交直流电网. 此外,在某些运行模式下,微电网可能接入常规输配电网,当能源互联微网内机组发电盈余时可并入电网,也可转化为冷热储存,当机组满足不了用户端冷、热、电负荷时,可从电网购得电能. 典型的热力系统包括热电联产机组、微型燃气轮机、热力设备、制冷机、储热蓄冷设备等,通过热力暖通管网将热能输送至热负荷;同时也可通过电热转换装置获得热能.

多能系统结构和能源间耦合关联如图 1 所示,电力交直流微电网、热力暖通管网和化学能燃料管网(气网)3 种能源网将多种能源设备关联形成一张混合能源网. 电网、热力网通过三联供机组、微型燃气轮机、发电机和电制冷机等设备关联、耦合. 在能源互联网中,需求侧管理和需求响应负荷使得热、电系统在负荷侧又建立关联和耦合,这种关联不仅是稳态能量转化和交换,也存在于在动态、暂态时间尺度. 随着热力系统规模减小,其动态响应时间常数也在减小,与电网中长期动态过程时间常数发生重叠,甚至深入到机电暂态过程响应频段,热、电系统和设备之间存在动态、暂态耦合. 在冷热电三联供机组中,一部分燃气在燃气轮机燃烧后驱动发电机组发电,同时排出的高温烟气可通过余热锅炉制得乏汽进行发电,或者直接制得热水加以利用;另一部分燃

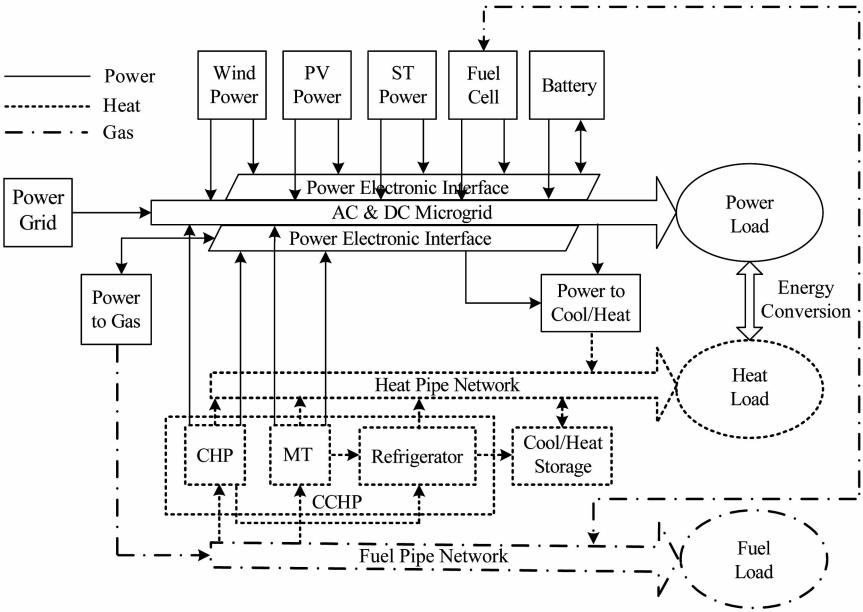


Fig. 1 Structure of multi-energy system  
图 1 多能系统结构

气在三联供机组供应不足时通过驱动备用锅炉来制取热水进行供冷或供热。跨能源动态、暂态耦合的另一路径则是化学能燃料管网<sup>[43]</sup>，如通过燃气锅炉、微型燃气轮机、燃料电池这些将化学能转化为热能、电能的能源转化设备，热能、电能、化学能 3 种能源网关联和耦合。

2.2 多能系统宽时间尺度特征

已有研究工作以设备为单元分析总结了常规电力系统<sup>[44-45]</sup>、微电网<sup>[19]</sup>受扰和控制干预下响应时间

常数范围。不考虑某些器件层级快速而细致的物理过程，如电力电子开关器件的开关瞬态，电能涉及的受扰物理过程及其控制干预，粗略地可将响应时间分为微秒至若干秒的暂态过程和十几秒至几十分钟的中长期过程<sup>[46-47]</sup>。

进一步补充热力、燃料管网设备动态和暂态过程的时间尺度，与电力系统、微电网合并，得到典型能源互联微网多能源系统的动态、暂态、中长期过程响应时间常数范围，如图 2 所示：

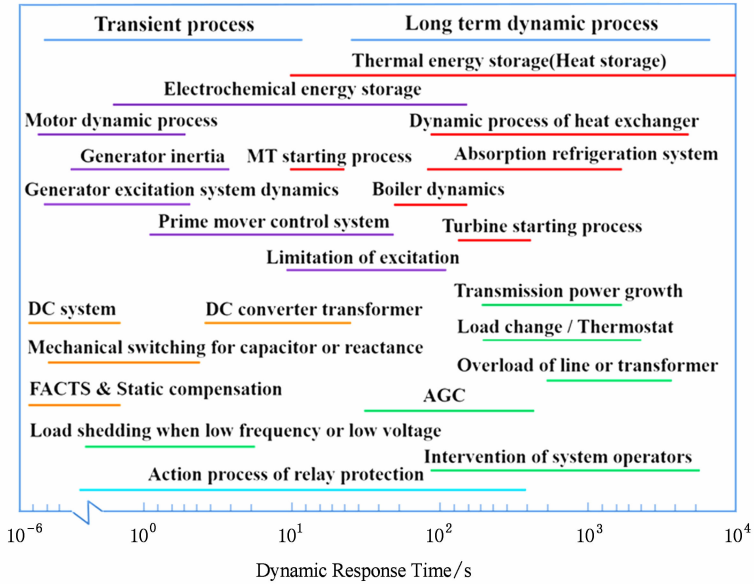


Fig. 2 Dynamic response time constant distribution of multi-energy system<sup>[46-47]</sup>  
图 2 多能系统动态响应时间常数分布<sup>[46-47]</sup>

可见多能源系统全部设备响应时间跨度很大,从电力系统变流器高频开关电路的电磁暂态微秒级过程,跨越到热力系统设备中热交换的几十分钟到数小时的过程.整体上,电能、热能与化学能的动态设备元件时间尺度在 2 个范围内有重叠:

1) 在几秒到若干分钟的范围,物理过程涉及电网发电原动机、调速装置、发电机机械惯性、设备过热保护和限制、机械开关动作、自动发电控制、暂态切负荷、系统中长期过程等,涉及热力系统中微型燃气轮机启动、锅炉动态、储热蓄冷和换热器热交换过程等,涉及燃料管网燃料供给动态过程.

2) 在几十分钟到数小时的范围,主要涉及电力、热力系统中负荷调整及人员干预过程.

同一能源系统设备间的耦合不难理解,不同类型能源系统和设备间在上述 2 个时间尺度的耦合,至少通过如下 3 个途径:

1) 电力、热力系统、燃气管网在能量源测中存在紧密耦合,锅炉、微型燃气轮机一部分热能驱动透平机,带动发电机发电,另一部分热能进入热力网供热、制冷或储存;

2) 热电、燃料电池等发电设备,在燃料供给侧耦合,同时这些设备将电网、热力管网耦合在一起;

3) 热、电负荷功率变化导致的热力、电力网在几十分钟到若干小时时间尺度上的耦合,属于较慢响应过程的耦合.

前 2 种耦合在几秒到若干分钟时间尺度上耦合,属于较快响应过程的耦合.多能系统设备在宽时间尺度上耦合,给仿真模型解算带来了困难.一般地,响应快速的设备和子系统需要小步长解算,以保证算法收敛性和精度.电能系统小时间尺度的设备部件模型解算需要几十微秒甚至更小的解算步长,若全系统数学模型采用同一步长进行解算,增加了运算量,降低仿真速度和限制仿真规模;若采用多种步长,尚未有成熟完善的数值算法保证模型解算的有效性和精度.

2.3 不同能源网机理差异、建模和解算差异

不同形式能源的设备、设备耦合形成系统的机理存在本质差异,建模和解算采用不同的方法,增加了多能系统建模和联立解算的困难有 3 种情况:

1) 设备-设备、设备-网耦合建模及解算  
电力系统主体是由发电机及其励磁和调速控制、输配电网络、电力电子装置和负荷等组成.电力系统的一次设备元件往往通过电网关联耦合,在电磁暂态仿真和机电暂态仿真中,设备元件通过电网

耦合,并通过“机网接口”并入整个电网,实现设备和电网模型的联立求解.以发电机为例,端电压和电流经坐标变换,与同步坐标下网络方程接口并联立求解,其转子角用于发电机  $dq$  坐标下电量和网络  $xy$  同步坐标下电量间的接口<sup>[48]</sup>.

而热力系统规模相对较小,设备数量有限,设备-设备之间的耦合较为直接,在仿真中设备模型多采用关联方程或关联参量联立.

这种设备-系统和设备-设备的耦合模式,导致模型解算方法的差异.在每个时步解算中,对前者各设备和动态元件模型可以分开独立解算,模型解通过机网接口并入系统(网络)方程求解中,并进行联立求解;对后者,各个设备和动态元件的模型直接联立形成更高维的模型,全系统联立统一求解或在算法层级设计分步解算方法.

2) 强非线性代数方程

能源网和设备的动态模型包括微分方程和代数方程 2 部分,其中非线性因素主要存在于代数方程中,是能源系统模型求解的难点.模型解算是否收敛和收敛快慢依赖方程未知数初值、迭代算法和加速收敛方法等因素.不同能源系统模型非线性来源和处理均有着明显的差异.

对电能,电网往往通过稀疏线性方程建模,或动态集总参数网络元件经差分化后的线性网络方程;非线性主要体现在网络变拓扑,特别是电力电子变换器的电路,拓扑结构变化频繁,需在仿真中重构网络方程,开关动作依赖于开关电路状态,开关动作时间并非恰好在整步长,因而需要引入插值或补偿机制<sup>[49-51]</sup>.对于其他非线性代数方程描述的设备元件模型,如非线性静负荷,一般根据母线电压将方程转化为电网注入电流,并与网络方程迭代求解.

热力系统动态模型非线性代数方程主要有:压气机、透平部件工作特性,换热器的换热方程(换热温差乘面积),设备、系统总容积方程,物性方程等.一般地,这些方程联立成高阶非线性方程组,通过牛顿法及改进方法<sup>[24-25]</sup>解算.

可见,不同能源系统的非线性特性来源和建模存在显著差异,处理和解算方法存在本质差异,因而不宜将混合能源网模型的全部代数方程联立在一起求解.

3) 能源系统动态元件长过程状态质变和多物理融合

热力系统中工质状态变化,如固态、液态和气态

之间转化,其特性会发生非光滑连续的变化或显著的变化.如吸收式制冷系统开机过程中,发生器溶液被加热直到饱和温度,认为自然对流换热;而后蒸汽开始发生.对这种情况,用一组模型方程往往难以正确描述多个阶段变化的物理过程.

电力系统中某些非线性动态元件多尺度物理过程重叠,给建模和模型参数获取带来了实质困难.如系统仿真中同步发电机基于 Park 变换的  $dq0$  坐标下的电气方程,以定、转子电路的电阻和电感作为参数<sup>[52]</sup>.虽然方程和这些参数基本决定了电机的电气特性,但这些参数难以通过直接测得的电机响应来确定,使得模型不具备实用和应用价值.

可见,能源元件设备本身的长动态过程中工质状态质变、多尺度物理过程重叠融合等,增加了系统

建模仿真的难度,在设备-系统层级仿真中难以建立一套能够适应全动态过程的模型.

3 阶段化多模式混合仿真

3.1 基本思想

第 1 节已充分总结微电网、非电能源网和多能源网仿真工作进程,常规电网、微电网和以热能为代表的非电能源系统已有较好的模型基础,各能源系统和设备模型解算算法相对成熟.为了利用和借鉴已有的能源系统仿真工作和基础,开发组建多能系统的设备-系统层级仿真,本节概括提出阶段化多模式混合仿真方法,给出其基本思想和关键技术,如图 3 所示:

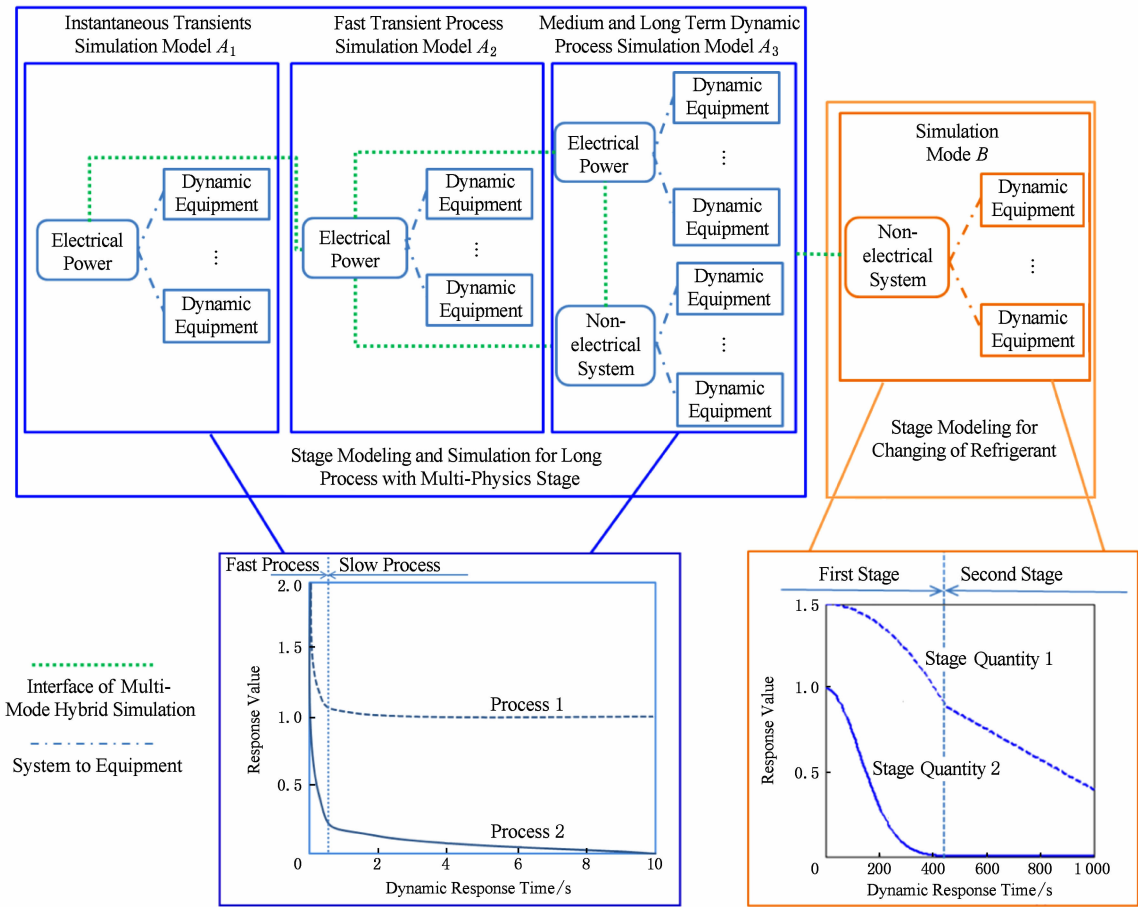


Fig. 3 The method of phased and multi-mode hybrid simulation

图 3 多模式阶段化混合仿真思路

阶段化混合仿真针对能源系统动态元件长过程状态质变和多物理过程融合,难以通过一组方程对动态元件准确建模这一难点,将一个动态过程分解为若干阶段,分别建立动态模型并解算.动态过程阶段划分可以依据:

- 1) 工质状态质变,如工质由液态转变为气液混合态,这个过程工质状态量和特性有显著变化,可将工质状态质变前后划分为不同阶段;
- 2) 设备部件动态过程包含响应速度在较宽范围变化的物理过程,可根据主导分量衰减所需时间

划分动态过程的各个阶段。

多能系统宽时间尺度特性和不同能源系统机理差异带来的建模和解算方法差异(设备-设备、设备系统耦合、非线性因素等)给多能系统仿真带来实质困难。对此,多模式混合仿真方法将完整的多能系统在空间上分割为多个子系统,每个子系统采用适合各自能源形式模型的解算方法求解,在子系统仿真求解中,其他部分在分割边界进行等值,并以特定的步长交换分割边界的计算条件和参数,例如电网的电磁暂态、机电暂态混合仿真<sup>[53]</sup>。多能系统空间分割可依据:

1) 设备和局部系统所关注的物理过程时间尺度大小,将响应时间跨度相近的设备和局部系统划分在一起。如电力系统中直流电网、大容量电力电子设备、需要详细测试分析的局部电网等,采用电磁暂态模式建模和仿真;而常规电网、一般发电机组和负荷等,采用机电暂态模式建模和仿真;

2) 不同能源系统和设备,因采用差异较大的建模和模型解算方法,如电力和热力系统的设备-设备、设备系统耦合、非线性因素处理等,应分别建立能源子网模型,并通过多模式混合仿真方法接口联立。

### 3.2 关键技术

阶段化多模式混合仿真方法的关键技术分为:多能系统阶段化建模方法和分阶段模型过渡解算算法的实现,及能源互联网多模式混合仿真接口的实现。

1) 多能系统阶段化建模方法和分阶段模型过渡解算算法

① 有效抽象和提炼设备元件主导动态过程,准确划分工质质变分界点和多时间尺度物理过程衰减所需时间,可作为阶段划分的依据。

② 建立动态元件的各阶段动态过程的数学模型,建立动态元件不同响应速率阶段的数学模型。

③ 阶段化模型仿真解算算法,在各阶段模型准确解算的同时,保证相邻2个阶段有效衔接。

针对工质质变的阶段化模型,工质物性方程可用于衔接相邻2个阶段模型解。针对多时间尺度物理过程融合,可通过建模方法确保有效衔接各个阶段模型的解;通过若干不同响应速度的线性动力系统模型的解的叠加来近似多时间尺度物理过程。

2) 能源互联网多模式混合仿真接口技术

① 多能系统空间网络化分

根据多能系统空间分割的依据进行能源网混合仿真的子系统划分,此外,仿真关注度高的局部系统

和设备可放入时间尺度小的子网,进行更详细、更快响应速度的求解物理过程。

#### ② 子网解算时外网等效建模

多模式混合仿真中,每个子系统计算过程中,其余部分在系统分割位置处等效建模,分割接口等效模型应能够反映能源系统能量动态交换物理过程和交互作用机理,能够考虑模型方程类型差异、解算算法和步长的差异。如直流电网电磁暂态、常规交流电网机电暂态、热动力设备惯性容积动态响应3种模式仿真子网模型间接口等效。响应快速的子网向慢速响应的子网等效,应提取低频段物理特性;响应慢速的子网向响应快速的子网等效,除低频段物理特性外,应根据需要补充中高频段关键物理过程在分网端口的等效特性。

#### ③ 仿真计算与分网接口交互时序

多模式模块化模型联立求解的时序流程,包括仿真主流程、子系统间等效参数和接口边界量交互时序控制、各仿真模块同步。

多能系统以微电网为核心,拓展了热力系统、燃料管网,并以输配电网为靠背,多模式混合仿真在时序设计中也应以电网、微电网为多能系统模型联立解算的协调网络,利于控制计算时序,加速收敛。

### 3.3 模型仿真结果分析方式

微电网仿真和非电能源仿真领域均有相应的发展,为多能系统仿真提供了模型基础。因此对于系统中常规环节、部件,当前已经有较为丰富的模型可借鉴;针对系统中关键环节、部件,根据采用本文提出的阶段化多模式仿真理论进行建模,重点考虑其外部特性与多能源系统各子系统仿真平台中模型特性做对比分析。另外,对于系统中较易测试的特征量值,可结合实验实测值对仿真模型进行相应考量。

构建典型多能系统案例,电网部分仿真与商业参考程序基本一致;据了解目前非电能源网系统级动态仿真软件较少,因此,重点考虑其合理有效性。

## 4 典型案例

图4给出了冷热电联供系统典型场景,进行基于多能系统的阶段化多模式构型的说明。

在该系统中,风力发电机、燃气轮机经过电力变换装置将交流转变为直流,相应的直流电网、大容量电力电子设备采用电磁暂态模式建模和仿真,如果不需要详细的研究发电机、风力发电机、电力储能等装置特性,可采用机电暂态模型进行仿真测算;热力

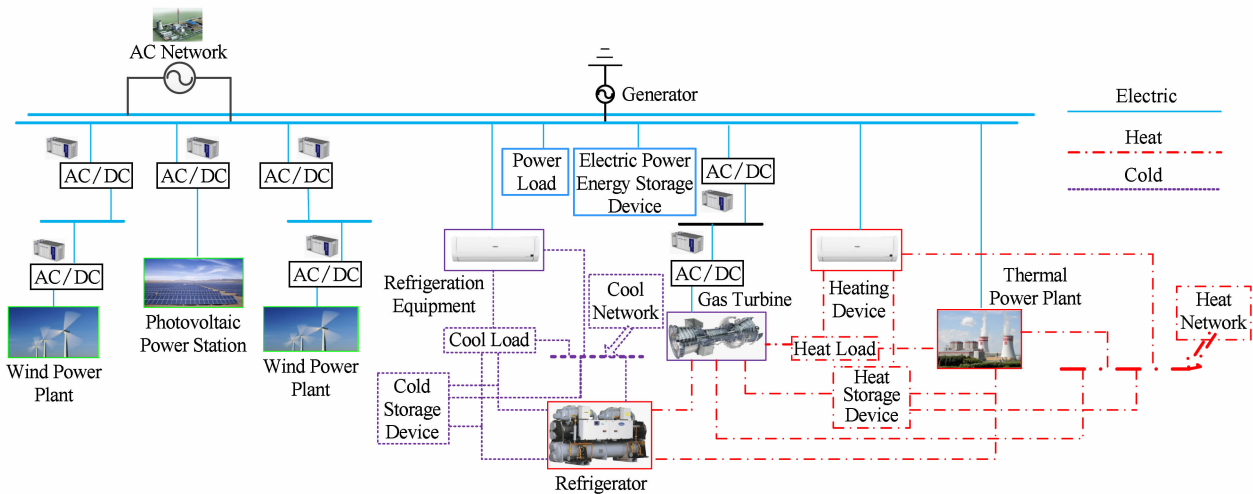


Fig. 4 Typical example of cold combined heat and power system

图 4 典型冷热电联供系统

及相应的负荷,应建立其相应的中长期动态过程模型;另外,由于电力网与热力网运行机理的差异性,还可考虑其他的建模方式. 由于不同能源系统和设备,建模和模型解算方法差异性较大,宜划分建立不同的能源网络,并通过多模式混合仿真方法接口联立,此系统中,如将能源转换为电能和热能的燃气轮机,将热转换为冷的制冷机,将电能转换为热、冷的制热、制冷装置等.

分阶段建模在该系统中应用也是广泛存在的,如相变储能中工质在融化或凝固过程,对于固相区域,热量以热传导方式传递;对于液相区域,热量除了以热传导方式传递外,还可能会以对流方式传递. 再如,发电机的动态、暂态模型中会考虑其次暂态过程和暂态过程,次暂态过程即为相对快过程,而暂态过程为相对慢过程.

5 总 结

能源互联微网中多能系统动态、暂态特性和稳定性能作为能源互联网优化设计、稳定高效运行、优化调控、新型设备研发测试等生产和科研分析计算的基础,逐渐引起业内关注.

电网、微电网和热力等非电能源设备-系统层级的建模和仿真是多能系统仿真的基础,包括稳态分析、系统暂态稳定特性仿真和系统-装置级行为特性精细模拟的电磁暂态仿真,后 2 种仿真模式各有优势,也各有局限. 现有热力系统仿真规模不大,设备、部件数量有限,往往一套大型设备即为一个独立的热力系统. 多能系统的动态建模和仿真刚刚起步,有

少量初步的工作,如三联供系统、微型燃气轮机和燃料电池联合发电等.

现有的电力、热力及多能源系统建模和仿真工作作为多能系统的动态、暂态仿真提供了一定的基础,特别是部件和设备的模型. 然而能源互联网的多能系统具有动态过程覆盖时间尺度宽广、不同类型能源设备和系统耦合与交互影响的特点,不同能源网机理差异造成的建模仿真的差异,包括设备-设备和设备-网耦合机理及其建模解算、强非线性代数特性建模、动态元件长过程中状态质变和多物理过程融合. 这是多能系统动态、暂态仿真的根本难点.

针对多能系统特点及仿真难点,本文提出了阶段化多模式混合仿真的思想及技术框架,阶段化混合仿真针对能源系统动态元件长过程状态质变和多物理过程融合,将一个动态过程分解为若干阶段,分别建立动态模型并解算;而多模式混合仿真将完整的能源系统分割为多个子系统,每个子系统采用合适的算法求解,子系统间再通过混合仿真接口联立. 阶段化多模式混合仿真能够利用已有的能源系统仿真建模工作和基础,开发组建多能系统的设备-系统层级仿真. 最后,本文结合典型冷热电联供系统,针对性地说明了阶段化多模式混合仿真技术在多能系统中的应用.

参 考 文 献

[1] Cao Junwei. Reaserch on energy Internet [EB/OL]. [2014-12-26]. [http://www.china-cloud.com/yunzixun/yunjisuanxinwen/20141225\\_44506.html](http://www.china-cloud.com/yunzixun/yunjisuanxinwen/20141225_44506.html) (in Chinese)

- (曹军威. 能源互联网探析[EB/OL]. [2014-12-26]. [http://www.china-cloud.com/yunzixun/yunjisuanxinwen/20141225\\_44506.html](http://www.china-cloud.com/yunzixun/yunjisuanxinwen/20141225_44506.html))
- [2] Cheng Lin, Liu Chen, Zhu Shouzheng, et al. Study of micro energy Internet based on multi-energy interconnected strategy [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 132-138 (in Chinese)  
(程林, 刘琛, 朱守真, 等. 基于多能协同策略的能源互联微网研究[J]. *电网技术*, 2016, 40(1): 132-138)
- [3] Bi Tianshu, Kong Yongle, Xiao Shiwu, et al. Review of sub-synchronous oscillation with large-scale wind power transmission [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2012, 27(1): 10-15 (in Chinese)  
(毕天姝, 孔永乐, 肖仕武, 等. 大规模风电外送中的次同步振荡问题[J]. *电力科学与技术学报*, 2012, 27(1): 10-15)
- [4] Xu Zheng, Luo Huiqun, Zhu Ruijin, et al. Review on methods of analysis for sub-synchronous oscillations of power systems [J]. *Power System Technology*, 1999, 23(6): 36-39 (in Chinese)  
(徐政, 罗惠群, 祝瑞金, 等. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述[J]. *电网技术*, 1999, 23(6): 36-39)
- [5] Xie Xiaorong, Wang Yin, Liu Huakun, et al. Detection method for sub-synchronous and super-synchronous harmonic phasors in power system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(21): 189-194 (in Chinese)  
(谢小荣, 王银, 刘华坤, 等. 电力系统次同步和超同步谐波相量的检测方法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(21): 189-194)
- [6] Zhao M, Yuan X, Hu J, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2016, 31(4): 2925-2937
- [7] Wang Ping'an, Fan Jingang, Guo Yanlai. Application of block chain in energy Internet [J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2016, 14(9): 1-6 (in Chinese)  
(王安平, 范金刚, 郭艳来. 区块链在能源互联网中的应用[J]. *电力信息与通信技术*, 2016, 14(9): 1-6)
- [8] Chen Weidong, Xu Yin, Liang Shuo, et al. Fast electromagnetic transient simulation method of microgrid with piecewise averaged model [J]. *Southern Power System Technology*, 2015, 9(9): 98-103 (in Chinese)  
(陈卫东, 许寅, 梁朔, 等. 基于分段平均化模型的微电网快速电磁暂态仿真方法[J]. *南方电网技术*, 2015, 9(9): 98-103)
- [9] Xie X, Dong Y, Han Y. Online estimation of turbine-generator shaft fatigue loss-of-life caused by subsynchronous resonance [J]. *Electric Power Systems Research*, 2012, 92(92): 171-179
- [10] Xie Xiaorong, Dong Yipeng, Bai Kai, et al. The improved SSR electromagnetic simulation model and its comparison with field measurements [C] //Proc of the 2nd Int Conf on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. Setúbal, Portugal: Science Technology Press, 2012: 419-424
- [11] Xie Xiaorong, Zhang Xiaojin, Dong Xiaoliang, et al. Nonlinearity of torsional damping and its effect on SSR characteristics of turbine generators [C] //Proc of Int Council on Large Electric Systems. Harbin, Heilongjiang: Heilongjiang Science and Technology Press, 2011: 163-170
- [12] Misusato O. Dynamic behavior of absorption water chiller [J]. *Freeze*, 1998, 46(520): 1-10
- [13] Willers E, Neveu P, Groll M, et al. Dynamic modelling of a liquid absorption system [C] //Proc of Int Symp on High Performance Computing. Berlin: Springer, 1999: 24-26
- [14] Underwood C P. An investigation into the dynamic thermal modelling and capacity control of the absorption cycle heat pump [D]. Newcastle, England: Newcastle Upon Tyne Polytechnic, 1986
- [15] Sano J, Hihara E, Sato T, et al. Dynamic simulation of absorption refrigeration machine [C] //Proc of Absorption Heat Pump Conf. Tokyo, Japanese: Japanese Association of Refrigeration, 1991: 133-138
- [16] Xin Lichen, Dong Zhaoyang, Xu Yan, et al. Business mode analysis of energy Internet based microgrids [J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(8): 17-22 (in Chinese)  
(辛立宸, 董朝阳, 徐岩, 等. 能源互联微电网的商业模式分析[J]. *南方电网技术*, 2016, 10(8): 17-22)
- [17] Tian Shiming, Luan Wenpeng, Zhang Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy Internet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3482-3494 (in Chinese)  
(田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3482-3494)
- [18] Liu Zhiyong. Modeling and simulation of microgrid and platform development [D]. Changsha: Hunan University, 2010 (in Chinese)  
(刘志勇. 微电网建模仿真研究及平台开发[D]. 长沙: 湖南大学, 2010)
- [19] Wang Chengshan. Microgrid Analysis and Simulation Theory [M]. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese)  
(王成山. 微电网分析与仿真理论[M]. 北京: 科学出版社, 2013)
- [20] Herold K E, Radermacher R, Klein S A. Absorption Chillers and Heat Pumps [M]. Boca Raton, Florida: Crc Press, 1996
- [21] Zhuo C. Absorption heat transformer with TFE-Pyr as the working pair [D]. Delft, Holland: Delft University of Technology, 1995
- [22] Weng Shilie. Performance Analysis of Gas Turbine [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1987 (in Chinese)  
(翁士烈. 燃气轮机性能分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987)
- [23] Zhang Weiwei, Zhang Huisheng, Su Ming. Modelling and emulation analysis of units mixedly burning blast furnace gas and coal in thermal power plant [J]. *Thermal Power Generation*, 2012, 41(4): 59-64 (in Chinese)

- (张微微, 张会生, 苏明. 混烧高炉煤气的火电机组热力系统建模与仿真分析[J]. 热力发电, 2012, 41(4): 59-64)
- [24] Dong Kun. Thermodynamics system simulation and energy efficiency diagnosis of off-design condition [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012 (in Chinese)
- (董坤. 变工况下热力系统仿真与能效诊断研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012)
- [25] Zhang Chao, Zhao Haibo, Jin Bo, et al. Simulation on the thermodynamic system of a 300 MW coal-fired power plant [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(9): 705-711 (in Chinese)
- (张超, 赵海波, 金波, 等. 300MW 燃煤电厂热力系统仿真研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(9): 705-711)
- [26] Yao Shouguang. Ship Thermal System Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese)
- (姚寿广. 船舶热力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003)
- [27] Wang Bingshu, Cui Ning, Zhang Congshi, et al. Dynamic simulation model for gas-steam combined cycle thermodynamic system [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(12): 3107-3113 (in Chinese)
- (王兵树, 崔凝, 张聪师, 等. 燃气-蒸汽联合循环机组热力系统动态仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3107-3113)
- [28] Cui Ning, Wang Bingshu, Deng Yong, et al. Dynamic simulation model for the heavy duty gas turbine thermodynamic system [J]. Proceedings of CSEE, 2008, 28(2): 110-117 (in Chinese)
- (崔凝, 王兵树, 邓勇, 等. 重型燃机热力系统动态仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 110-117)
- [29] Luo Bo. Dynamic simulation of thermodynamic system of the solar thermal power plant [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014 (in Chinese)
- (罗波. 太阳能热发电站热力系统动态特性仿真[D]. 重庆: 重庆大学, 2014)
- [30] Ma Wentong, Yu Nanhua, Su Ming. A rapid and real-time simulation method for thermodynamic simulation [J]. Computer Simulation, 2006, 23(7): 87-89 (in Chinese)
- (马文通, 余南华, 苏明. 一种实时快速热力系统仿真方法的研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 87-89)
- [31] Su Ming. Novel technique for simulation of large flows into and out of small volume in power system [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1998, 32(4): 11-13 (in Chinese)
- (苏明. 热力系统仿真中处理小容积环节的新方法[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(4): 11-13)
- [32] Guo Juan, Liu Feng, Liu Dongyong. The improving of modeling methods at thermal system simulation based on the parameters [J]. CD Technology, 2008 (5): 50-52 (in Chinese)
- (郭娟, 刘锋, 刘东勇. 在热力系统仿真中对基于集总参数法的建模方法的改进[J]. 光盘技术, 2008 (5): 50-52)
- [33] Fang Fang, Zhang Jianxin. Modeling and simulation of thermal system in power station based on system dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(2): 96-103 (in Chinese)
- (房方, 张建新. 基于系统动力学的电站热力系统建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(2): 96-103)
- [34] Murai M, Sakamoto Y, Shinozaki T. An optimizing control for district heating and cooling plant [C] //Proc of IEEE Conf on Control Applications. Piscataway, NJ: IEEE, 1999: 600-604
- [35] Buoro D, Casisi M, Pinamonti P, et al. Optimal lay-out and operation of district heating and cooling distributed trigeneration systems [C] //Proc of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. New York: ASME, 2010: 157-166
- [36] Ono E, Yoshida H, Wang F, et al. Retro-commissioning and optimal operation schemes for the heat source system of district heating and cooling system [C] //Proc of the 11th Int IBPSA Conf. Osaka, Japan: The Society of Heating, Air-Conditioning Sanitary Engineers of Japan, 2009: 1547-1553
- [37] Sakawa M, Matsui T, Ishimaru K, et al. An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective operation planning of district heating and cooling plants considering contract violation penalties [G] //LNCS 2182: Proceedings of the Int Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists 2010. Berlin: Springer, 2010: 654-661
- [38] Ding Shuiting, Duan Lun, Han Shujun, et al. Optimization of operation model of combined cooling, heating and power systems [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2007, 6(2): 95-100 (in Chinese)
- (丁水汀, 段伦, 韩树军, 等. 冷热电联供系统运行模式优化[J]. 热科学与技术, 2007, 6(2): 95-100)
- [39] Liang Junming. Simuiation and efficiency calculation on microturbine and power generation systems of CCHP [D]. Guangxi: Guangxi Normal University, 2013 (in Chinese)
- (梁峻铭. CCHP 中微型燃气轮机发电系统的仿真及效率计算[D]. 广西: 广西师范大学, 2013)
- [40] Hu Zhongwen, Wang Zhongping, Zhang Xuemei. Research on modeling and simulation of micro-gas turbine CCHP system [J]. Energy Research and Management, 2010 (4): 30-32 (in Chinese)
- (胡忠文, 王忠平, 张雪梅. 微燃机冷热电联供系统(CCHP)的建模及仿真研究[J]. 能源研究与管理, 2010 (4): 30-32)
- [41] Wang Jing. Dynamic and static simulation of energy island triple system [D]. Shanghai: University of Shanghai Science and Technology, 2004 (in Chinese)
- (王静. 能源岛三联供系统动静态仿真研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2004)
- [42] Shi Haobo. Study on modeling and simulation for distributed generation system based on gas turbin/fuel cell combined generation [D]. Beijing: China Electrical Power Research Institute, 2011 (in Chinese)

(施浩波. 基于燃气轮机/燃料电池联合发电的分布式发电系统建模仿真研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011)

[43] Xu X, Jia H, Chiang H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in micro grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014 (3): 1-10

[44] Qiao Ying, Shen Chen, Lu Qiang. Study on feasibility of islanding control of large-scale power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 50-55 (in Chinese) (乔颖, 沈沉, 卢强. 大规模电网解列控制可行性判断[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 50-55)

[45] Li Chen, Jiang Delong, Cheng Shengan. Current situation and development of analysis methods of power system transient stability [J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(16): 89-94 (in Chinese) (李晨, 蒋德珑, 程生安. 电力系统暂态稳定分析方法的现状与发展[J]. 现代电子技术, 2012, 35(16): 89-94)

[46] Lei Wen. Research on modelling order-reduction and stability analysis multi-time-scale power system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2003 (in Chinese) (雷文. 多时间尺度电力系统模型降阶与稳定性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2003)

[47] Carson W T. Power System Voltage Stability [M]. New York: McGraw-Hill, 1994

[48] Ni Yixin, Chen Shousun, Zhang Baolin. Theory and Analysis of Dynamic Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (in Chinese) (倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002)

[49] Song Qiang, Liu Zhongqi, Zhang Hongtao, et al. Advance of real time digital simulation for high-power electronics [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(12): 3329-3333 (in Chinese) (宋强, 刘钟淇, 张洪涛, 等. 大功率电力电子装置实时仿真的研究进展[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3329-3333)

[50] Wang Chengshan, Li Peng, Huang Bibin, et al. An interpolation algorithm for time-domain simulation of power electronics circuit considering multiple switching events [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25 (6): 83-88 (in Chinese) (王成山, 李鹏, 黄碧斌, 等. 一种计及多重开关的电力电子时域仿真插值算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 83-88)

[51] Ma Xiaojun, Yang Zongmin, Liu Chunguang, et al. Real-time simulation of power electronic devices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (18): 108-112 (in Chinese) (马晓军, 杨宗民, 刘春光, 等. 电力电子器件的实时仿真[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 108-112)

[52] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007 (in Chinese) (昆德·帕拉巴[加拿大]. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007)

[53] Zhang Shuqing, Liang Xu, Tong Luyuan, et al. Key technologies of the power system electromagnetic/electro-mechanical real-time hybrid simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 89-96 (in Chinese) (张树卿, 梁旭, 童陆园, 等. 电力系统电磁/机电暂态实时混合仿真的关键技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 89-96)



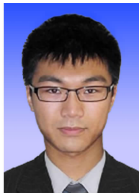
**Zhang Shuqing**, born in 1983. PhD. Lecturer. His main research interests include hybrid real-time simulation technology of power system, digital simulation method and algorithm of power system, micro-grid simulation technology and application, power system load (Group) measurement and identification modeling, etc.



**Tang Shaopu**, born in 1988. Master. His main research interests include hybrid real-time simulation technology of power system, micro-grid simulation technology and application, digital simulation method and algorithm of power system.



**Zhu Yaping**, born in 1990. Master. Her main research interests include modeling of the thermal system, simulation platform development.



**Yu Siqi**, born in 1992. PhD candidate. His main research interests include electric converter modeling and simulation, and multi-energy micro-grid.



**Sun Yubo**, born in 1992. PhD candidate in Tsinghua University. Received his master degree from University of Manchester in 2015. His main reasearch interests include simulation of muti-energy system, micro-grid, low voltage power system, low-carbon technology.