

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.04.007

小型反应堆在综合能源系统中作用的研究

Research on the role of small reactors in integrated energy systems

周涛^{1,3}, 张海龙^{2,3}, 刘文斌^{1,3}

ZHOU Tao^{1,3}, ZHANG Hailong^{2,3}, LIU Wenbin^{1,3}

(1.东南大学 能源与环境学院,南京 210096; 2.华北电力大学 核科学与工程学院,北京 102206;
3.核热工安全与标准化团队,中国)

(1.School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2.School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3.Institute of Nuclear Thermal-hydraulic Safety and Standardization, China)

摘要:目前,北方城市缺少清洁、高效的供热热源。通过发挥小型反应堆(以下简称小堆)的稳定性和可靠性,建立以小堆为中枢的核风光综合能源系统。该系统具有前期投资较小、选址成本低、分布区域广、建造周期短、功能选择灵活、适应性强、非能动安全等特点。可以利用人工智能网络和大数据技术做好系统的优化规划;通过积极建模仿真和试验,采用能动与非能动相结合的方法,保障系统的耦合度和安全性;综合利用电、气、热、冷等单一能源,对综合能源系统的技术、社会效益和经济效益进行综合评估。随着技术的不断发展,发挥分布式能源的优势,构建更加灵活、互联的综合能源系统,可更好地实现“碳中和”的目标。

关键词:小型反应堆;综合能源系统;非能动安全;分布式能源;碳达峰;碳中和;清洁供热;大数据

中图分类号:TK 01⁺9;TL 48 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)04-0039-08

Abstract: Currently, there is lack of clean and efficient heat sources in northern cities of China. Small reactor can take the pivotal role in a nuclear-wind-photovoltaic integrated energy system for its stability and reliability. This system has small initial investment, low site-selection cost, wide distribution area, short construction period, flexible function selection, strong adaptability, passive safety and so on. Artificial Intelligence network and big data can be used to optimize the system planning. Taking active modeling, simulation and experimentation, and combining active safety with passive safety, the coupling and safety of the system can be ensured. The system comprehensively utilizes electricity, gas, heat, and cold energy, and its performance can be evaluated from the technology, social and economic benefits of the integrated energy system. With continuous innovation of technologies, taking advantages of distributed energy, a more flexible and interconnected integrated energy system can be built to facilitate the carbon neutrality.

Keywords: small reactor; integrated energy system; passive safety; distributed energy; carbon peak; carbon neutrality; clean heat supply; big data

0 引言

热电联产和地区性燃煤锅炉房仍是我国集中供热的主要热源。燃煤导致北方城市冬季PM_{2.5}浓度升高,雾霾天气增多。就目前的技术水平而言,水能、风能和太阳能不能直接用于城市地区供热,而将其转化为电能再用于城市地区供热的经济效果较差。核能源不仅可以用于发电,而且可以通过

热交换产生城市供热所需要的蒸汽或热水,有很大的供热潜力。核电小型反应堆(以下简称小堆)技术以其用途广、安全性高、与用户距离近、清洁低碳等特点得到人们的重视与认同。它不仅可以替代传统的化石燃料发电站,还可以用于海水淡化、工业制氢、工业蒸汽供应、城市供热等领域。探讨小堆核能集中供热的可行性及实施途径^[1]对中国北方集中供热地区的可持续发展、实现中心城市的环境保护具有重要意义。为积极推动和加快落实《巴黎协定》,中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[2]。为应对

收稿日期:2020-12-10;修回日期:2021-03-30

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2020YFB1901700);东南大学学科振兴计划(1103007005);“双一流”学科建设专项资金(教师启动基金4003002071)

环境及气候变化,实现我国既定的“碳达峰”和“碳中和”目标,亟须加快能源结构转型的步伐^[3-4]。未来能源的发展方向是建立包括小型核能在内的综合能源系统,实现多种能源形式的转化和多种能源网络的互联互通。

1 综合能源系统设计方案

1.1 结构设计

国际原子能机构(IAEA)将功率在 300 MW 以下的反应堆定义为小堆。基于系统能效和互联网技术,以现有电网为基础,整合包括小堆的不同质能源,可以建成集供电、供气、供热、供冷、供氢等能源系统以及相关通信和信息基础设施的功能体系,具体结构如图 1 所示。

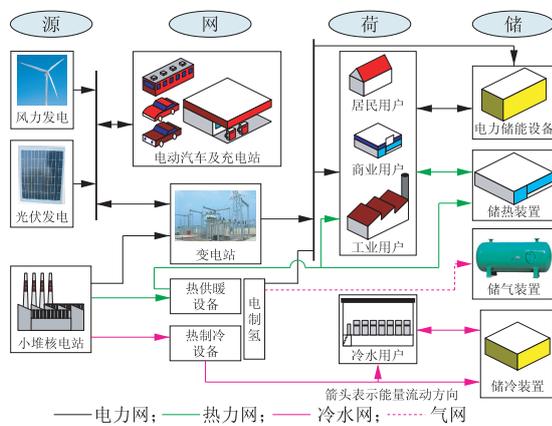


图 1 综合能源系统结构

Fig. 1 Architecture of an integrated energy system

由图 1 可以看出,作为能源互联网的核心和纽带,电力系统“源-网-荷-储”的协调优化在整个能源工业中得到广泛应用:“源”包括小堆核电、新能源电力、天然气等多种能源资源;“网”包括电网、供热网、供冷网、供气网等多种资源网络;“荷”不仅包括电力负荷,还包括用户的各种能源需求;而“储”主要是指各种储能设施以及能源资源的储能方式。

目前,为降低绿色用能的成本,各类相同或不同形式能量间的转换技术蓬勃发展;同时,非水可再生能源的随机性和分布特征使得电力系统的时间和空间维度特性日益复杂,必须采用更多系统性、综合性技术方案保证电力系统的安全、可靠和经济运行^[5]。尤其值得注意的是,作为唯一不受环境影响、可稳定输出的能源,核能在这一综合能源系统中扮演着定海神针的角色。

1.2 函数模式

综合能源系统中能源形式多种多样,各能源之间存在耦合作用。对此,需要建立能源之间的传递模型,描述转换过程的损耗;建立系统能量转换模

式,描述各能源之间的转换关系;考虑到多能源形式的储存,建立系统动态特性的转换模型。

1.2.1 传递模型

根据各能源及转换设备的特性,参考已有的相关数学模型,进行模型构建及分析。能源在传输、转换及存储的过程存在一定能耗。用效率函数描述转换过程的损耗,并以此获得输入、输出接口的函数关系,

$$L = MP, \quad (1)$$

式中: L 和 P 分别为以矩阵形式表示的输出、输入能量,包含电能、热能、燃气能以及其他各类形式能量; M 为输入、输出关系的耦合系数矩阵,由中转设备的效率以及能量的分配比例决定。

1.2.2 转换模式

运用边界层理论等建立系统能量转换特性模型。对不同工况下系统换热与流体流动换热的特性进行模拟分析,得出不同工况下系统能量转换、耦合特性及变工况计算分析方法。具体转换模式如图 2 所示^[2]:其中 C 为能源转换环节的能量; S 为储能单元的能量; E 为能源存储量。

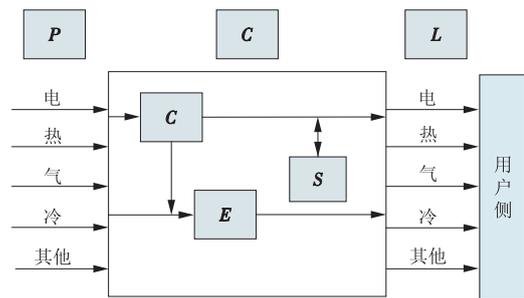


图 2 转换模式

Fig. 2 Energy transformation model

由图 2 可以看出,此类模型描述了各能源间的转换关系,考虑到系统的动态特性,并可根据需求侧响应实现负荷侧的转移和消减,具有较强的实用性^[6]。但是,由于能量耦合性强,用该模型求解综合能流和系统优化问题时,非线性度很高,难以求解。目前,综合能源系统的相关技术尚不明确,难以建立精确的动力模型,该技术仍需进一步完善。

1.2.3 转换模型

储能设备除去广义上的储电,还包括储热、储冷、储氢等多能源形式的储存装置。同时交通网的融入使得电动汽车亦可作为储能单元参与协调系统运行。这类模型将传统的、可体现系统单一截面特性的模型加以扩展,形成考虑系统动态特性的实用型模型,其接口输入、输出关系可表述为

$$L = (C - S) \begin{bmatrix} P \\ E \end{bmatrix}. \quad (2)$$

1.3 运行机制

该系统的具体运行机制如图 3 所示。从图 3 可以看出,综合能源系统是以电力系统为核心,在规划、设计、建设和运行中,对各类能源的分配、转化、存储、消费等环节进行有机协调与优化的过程。供电、气、冷、热网络各司其职又协调运转,充分利用新型区域能源供应系统,解决了单一能源的利用问题及多能源在多约束目标下的协同问题,提高能源自给比例和综合能源利用效率,促进用户能源消费习惯的转变。

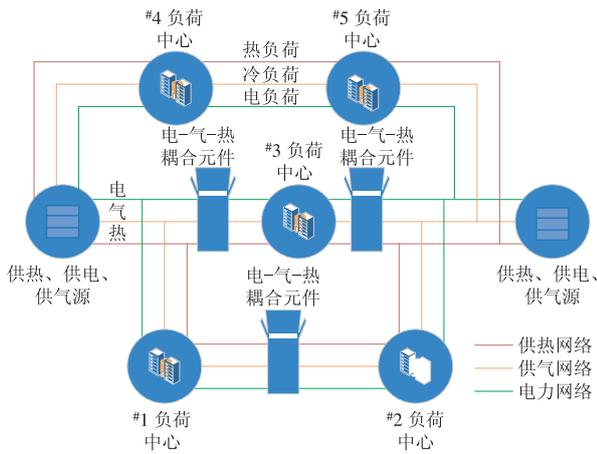


图 3 运行机制

Fig. 3 Operating mechanism

1.4 安全稳定机制

随着国内小堆设计研发推进,相应的安全要求建立也同步提速。

(1)热管堆引入事故瞬态安全特性。设计并选择合适的热管堆芯,建立适用于热管堆的瞬态热工水力分析模型,开发用于热管堆的安全特性分析的瞬态热工水力程序,可实现对反应性引入事故的模拟计算预测,保障核心小堆及其环境的安全。

(2)能量转换系统运行稳定性。实现系统各模块交替输出能源时的系统稳定,保证最大功率运行时系统全区域的稳定性。

2 核风光综合能源系统的特点

2.1 技术特点

核风光综合能源系统是对新技术的交叉应用与发展,该系统中各种技术特点见表 1。

2.2 经济特点

核风光综合能源系统也是一种新经济模式应用,其经济特点见表 2。

2.3 社会特点

核风光综合能源系统也是一种新发展理念,其基本思想是创新、协调、绿色、开放、共享。包括核

能在能的核风光系统更是为综合源系统带来了稳定的核心,它带来的社会效益见表 3。

表 1 应用于系统的技术特点

Tab. 1 Characteristic of technologies applied in the system

技术	特点
小堆技术	增强系统稳定性和可靠性
因地制宜的多元能源结构	优先可再生能源和能源立体发展
核风光能综合利用	增强系统适配和灵活性
综合运用人工智能技术	提高系统可靠性和智能化水平
利用各种优势互补能源载体	实现智能高效的有序配置
能源全生命周期管理	达到现代能源体系的优化

表 2 能源系统的经济特点

Tab. 2 Economy of technologies applied in the system

技术	经济性
小堆技术	提高品质
因地制宜的多元能源结构	降低成本
电、气、热、冷、储联产协同模式	节约成本
核风光能综合	提升效率
能源全生命周期管理	提质增效

表 3 能源系统的社会特点

Tab. 3 Social benefits of technologies applied in the system

技术	社会性
应用小堆技术	减少二氧化碳排放量是驱动
核风光能综合	可持续、效率是目标
应用网络技术	互联共享是核心
分布式多联产网络	研究与创新是支撑
应用智能技术	用户的双重角色和主动参与是特色
应用多类交叉技术	创造就业机会和社会效益是红利

3 未来技术发展趋势

3.1 小堆技术发展

国内外现有的小堆技术在已有多种类型,如压水反应堆、热管堆、熔盐堆等。目前,巴威公司的 mPower 反应堆^[7]在美国受到推崇,并打算于 2022 年实现原型堆。在俄罗斯,有 5 种不同的小堆原型堆正在同步研发,并打算率先应用于俄罗斯远东楚科奇地区的 KLT40s 浮动核电站。与此同时,韩国完成了功率为 330 MW 的 SMART 堆的设计工作,并做了大量安全分析工作,打算应用于工程建造。以压水堆为例的小堆系统工作原理如图 4 所示。

从图 4 可以看到,采用先进压水堆设计的小堆采用蒸汽发生器、稳压器和反应堆一体化设计,将输出的主蒸汽直接送至涡轮发电机,发电送至电网。工作结束后,部分乏汽直接送至市区供热网络供热,另一部分通过凝结加热再回到核心蒸汽供应系统,用于循环发电。小堆采用模块化建设,建设

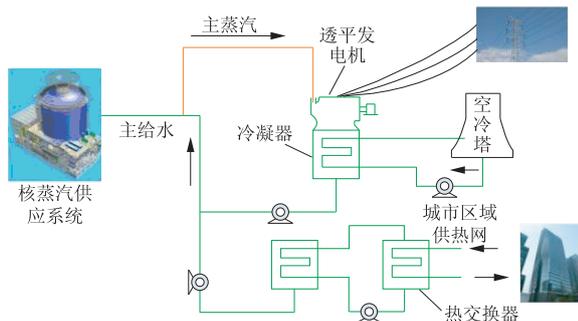


图 4 小堆系统工作原理

Fig. 4 Working principle of a small modular reactor system

周期短、安全性高、对电网的要求不高、选址成本低、适应性强、用途多,在未来有广阔的发展空间。

3.2 非能动技术

包括小堆在内的综合能源系统可以通过加强固有安全性设计标志,更多地引入非能动概念,采用能动与非能动的结合来强化包括反应堆内的综合能源系统安全特性。主要非能动及自然循环驱动技术标志见表4。

表 4 技术标志

Tab. 4 Technical markings

技术	图标	设备	图标
自然循环		逆止阀	
重力驱动		密度锁	
温差驱动			

非能动安全系统安全功能依靠状态的变化、储能的释放或自主动作来实现,如利用流体被加热或蒸发、冷却或冷凝产生的密度差形成驱动压头或利用位差形成的重力压头,在事故工况下,无需任何外部动力即可实现应急堆芯冷却和安全壳喷淋,导出堆芯和安全壳内的热量,确保安全壳的完整性。不仅简化了专设安全设施,而且可以减少人员干预可能产生的误动作,改善了人机关系,提高了核电站的安全性。然而非能动技术中许多关键技术^[8-10]仍需要进一步研究。关键共性技术包括部件失效和物理过程失效2部分的可靠性研究。非能动技术需要向增大功率、提高效率、增强动力、增加技术交叉和种类等方面发展。

3.3 优化规划技术

3.3.1 多能源系统统筹协调技术

系统统筹协调工作原理如图5所示。在规划阶段,分析资源开发利用的具体模式,结合区域铁路网、燃气管网、供热管网的整体情况,确定核电站、光伏发电、燃气发电、传统煤电的容量和位置,设计相应的能源规划方案和系统运行方案;随后,通过模型测算,设计相应的能源规划方案和系统运行方案,保证规划的合理性和可靠性,实现电力、燃气、地热等系统的协调统一^[11]。

3.3.2 多样化互补规划技术

综合能源系统优化规划技术能有效满足用户多样化需求,实现能源互补优化,其工作原理如图6所示。



图 5 系统统筹协调工作原理

Fig. 5 Coordinating work of the system

多级能源系统规划是在优化能源结构的基础上,统筹考虑各子系统的扩展需求和运行约束,重点解决多级能源转换装置的投建,实现多能量耦合和协调^[12]。其目标一般是投资最小、长期运行成本最低,同时可以解决建设地点、建设周期、装置容量、输送管网和能量转换装置等存在的问题。

为综合考虑实际应用过程中来自源、网、荷、储等方面的多重不确定因素,系统规划应采用内点法

进行优化,采用蒙特卡洛数值法、枚举解析法等^[13]实现能源系统综合规划,并考虑各种不确定因素,提高规划方案在实际应用中的适用性和有效性。

3.4 系统建模和仿真技术

3.4.1 交互建模和仿真技术

随着能源网络中分布式能源的增加和热电联产(CCHP)、热泵、空调等分布式技术的广泛应用,电、气、冷、热的耦合^[14]出现在能源生产、转换、存

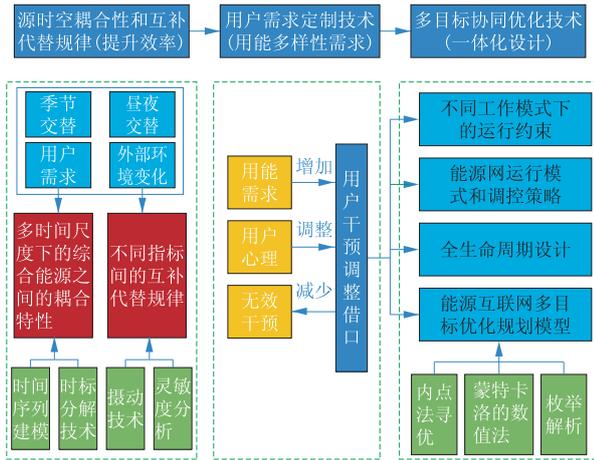


图 6 系统互补优化工作原理

Fig. 6 Working principle of system complementary optimization

储、需求多个方面。传统的对不同能源分别建模的方法已经不能满足现实问题分析的需要。

现有的多能源系统建模策略是以元件建模为基础,通过仿真实验验证其正确性,并建立相应的模型库。系统交互建模的技术流程如图 7 所示,图中: $V_{in,1}, V_{out,1}$ 为进入和离开能源中心的蒸汽量; $V_{in,2}, V_{out,2}$ 为进入和离开能源中心的电量, $V_{in,m}, V_{out,m}$ 为进入能源中心的热量。



图 7 交互建模和仿真技术

Fig. 7 Interactive modeling and simulation technology

从图 7 可以看到,在多能源问题中,可以将电、热、冷等能源综合考虑,以区域多能源系统为中心,负责不同能源的转换、分配和存储,将其他能源转化为所需的能源,能源通过不同的区域多能源系统以及外部能源网络进行交互。通过这种建模方式可以对不同类型能源特性进行概括和抽象,突出能源间的耦合作用,有利于提高能源供应的稳定性。

3.4.2 时空与行为立体建模和仿真技术

利用分析手段对综合能源系统进行仿真研究,揭示其运行机理和动态特性。在进行仿真研究时,需要同时考虑其在时间、空间和行为 3 方面的复杂性。该复杂性决定了采用综合能源系统的仿真技术时的多时标、高维数、大量非线性等难题。

时间、空间和行为因素^[15]见表 5。

3.4.3 建模和仿真结果

热负荷需求主要由电锅炉、水蓄热、CCHP 机组、地源热泵和燃气锅炉共同供应。对某热系统全年的供需平衡进行建模和仿真,如图 8 所示。全年 8 760 h 热系统供需平衡均得到满足,即电锅炉出

表 5 时空与个人行为因素

Tab. 5 Factors of time and space and personal behavior

因素	内容
时间方面	既要考虑传输速度极快的环节(电力系统),又要考虑传输速度慢、具有较大时延的环节(燃气、热力等管道系统)。
空间方面	既要考虑单一能源环节内部的动态,也要考虑不同能源环节的相互影响;既要考虑能源在区域大范围内的平衡和互济,也要考虑能源在局部的优化与消纳。
行为方面	既要考虑系统的连续环节的影响,也要考虑大量的不连续(如跃变、切换等)环节的影响;既要考虑可量化因素的影响,也要考虑不可量化因素的影响。

力+CCHP 机组出力+地源热泵出力+水蓄热出力+燃气锅炉出力=热负荷。

3.5 运行控制技术

3.5.1 互补协调控制技术

互补协调控制技术如图 9 所示。通过电、热、气等单一能源系统的耦合,能源互联网充分利用各种能源系统的互补优势和协同效益,冷热电多种能源的互补优化调度和互补协调控制,可实现更大范围内的资源优化配置与运行,提高能源的集中合理配置与消纳、能源效率、综合能源经济高效运行水平。

3.5.2 运行控制架构技术

综合能源运行控制架构如图 10 所示。综合能源运行控制架构大致分为 3 个层级:最底端的分布式能源系统和采集互动终端属于物理设备层,主要集成了各类综合能源类设备、负荷用户及能源信息采集及控制装置;中间通信网络和信息支撑属于通信层,负责对物理设备层数据的传输和交换;上端系统平台和系统应用属于平台应用层,建立能源互联网综合管控与服务平台,实现对综合能源规划、设计、运行、维护、交易、评价等各个环节的能源监控,支持各类用户的操作和指令的执行。

3.6 系统能量转换方式与效率研究

(1)风光核能量转换小型系统的能量管理。在考虑系统可靠性、能源利用率和电能质量要求的基础上,根据各单元的并网运行和独立运行情况,设计能量管理控制策略,研究在外界条件影响下,各单元的功率控制方式。

(2)风光核能量转换小型系统的混合储能系统。提出混合储能系统集成控制方法,设计储能混合控制系统,选择和设计储能方式,建立以可靠性指标为约束条件的储能能力优化模型,获得最优的容量配置。

(3)风光核能量转换系统运行效率的影响因素。对影响系统运行效率的主要因素进行量化分析,给出各因素影响程度,找出关键影响因素并给出效率控制措施。为风光核能量转换小型系统的

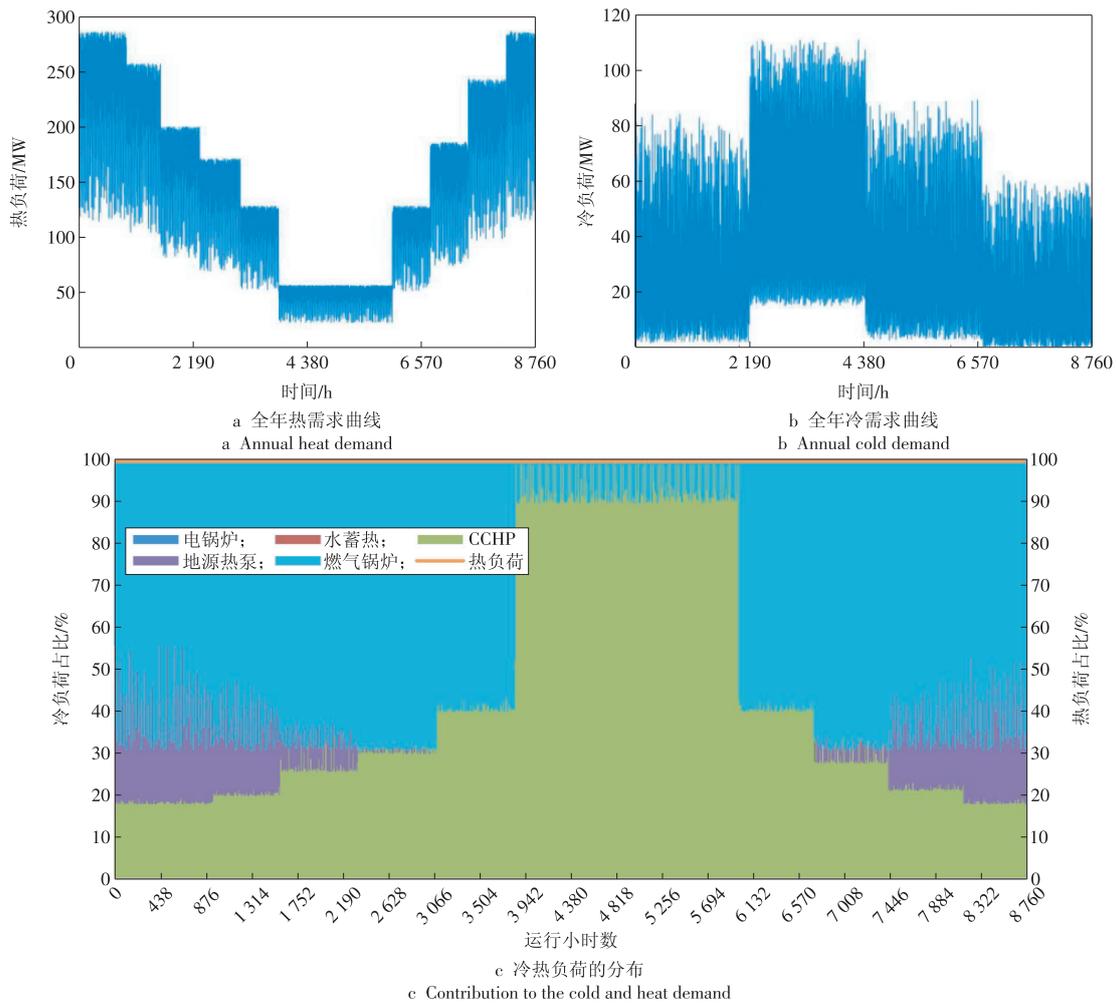


图8 热系统供需平衡

Fig. 8 Thermal system supply and demand balance

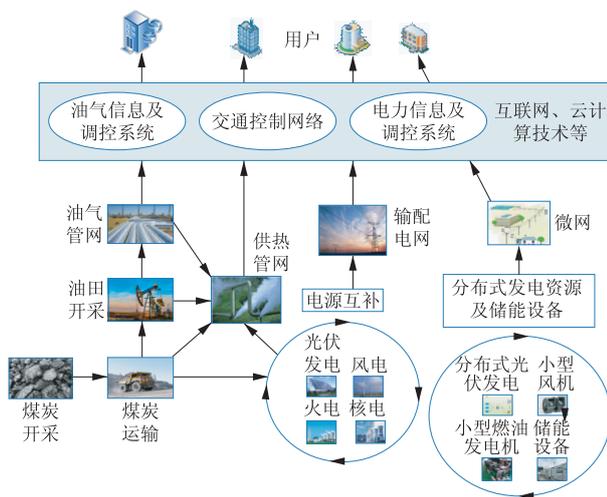


图9 互补协调控制技术

Fig. 9 Complementary coordinated control technology

设计施工提供措施和参考。

3.7 综合评估技术

目前能源系统评估工作大多针对独立的系统,评估指标的细化导致评估内容缺乏完整性。与单一能源供应系统的可靠性评估不同的是,综合能源

系统包括电、气、冷、热等多种形式的能源,其性质各不相同,所采用的评估模型、评估算法及评价指标也不尽相同^[16-17]。各种能源形式间还存在复杂的耦合关联,其中包括具有显著不确定性的可再生能源发电与各种能源形式的时空耦合,这使得系统特性又不同于各单一供能系统,综合能源系统可靠性评估变得更加复杂。以多能量耦合和能量信息融合特性为核心,深入系统地研究综合能源系统可靠性评估的模型、算法和评价指标体系,是未来综合能源系统可靠性评估亟待解决的问题,评估的基本环节包括:建立综合能源系统评价指标体系,全面考虑各类相关影响因素,进行综合能源系统一体化评价方法。

3.7.1 评估体系

综合能源系统各层级间非线性度较高,相关技术尚不明确,使得综合能源评价指标体系较为复杂,这里采用多耦合的方式。

3.7.2 影响因素与评估方法

电、气、冷、热等多种不同能源形式间存在复杂

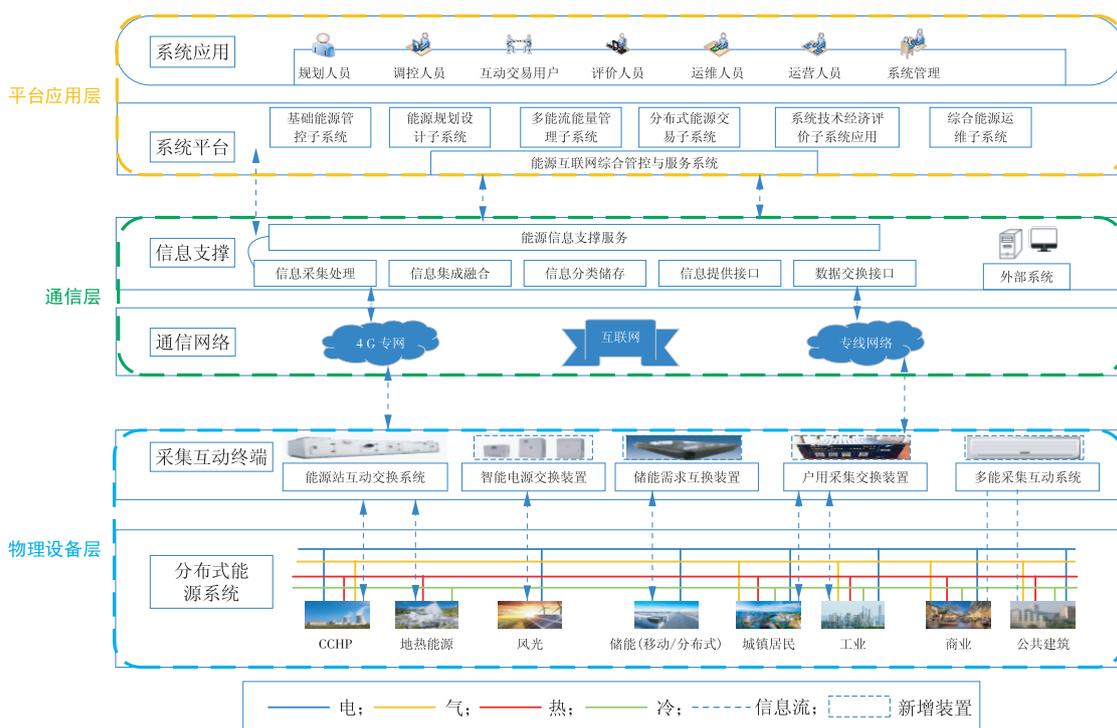


图 10 综合能源运行控制架构

Fig. 10 Integrated energy operation control architecture

的耦合关系,为其建立可靠性评估模型是难题。新形势下,综合能源系统运行状态的准确模拟及快速评估面临着瓶颈。根据不同能源形式的特点建立有针对性的可靠性评价机制,不同能源系统可靠性评估的影响因素及计算方法见表 6^[18]。

表 6 可靠性评价的影响因素与计算方法
Tab. 6 Influencing factors and calculation methods for reliability evaluation

影响因素	计算方法
可量化的因素(成本、回报率)	灵敏度计算分析法
难以量化的因素(用户舒适度、满意度)	神经网络研究领域的信息传递技术
无法量化的因素(社会效应、环境因素)	多场景协同评价方法

经过对不同能源系统的可靠性进行评估,得到该系统的安全性、经济性、能源利用率、用户舒适度和社会效益。

4 结束语

将小堆应用于综合能源系统中适应新的能源发展形势,为能源行业带来新理念、新思维、新技术、新市场,实现安全、可靠、经济、绿色、开放的发展目标,推动技术、经济和社会的跨越式发展。

(1)技术的进步。小堆技术和综合能源系统研究具有前瞻性和工程应用价值。交叉联合应用、定位能动技术与非能动技术是小堆系统安全可靠高效运行的基本保障,可提高非能动系统的运行可靠

性。信息化、大数据、云计算、人工智能等技术手段的应用不可或缺。跨学科、跨行业、跨专业的技术融合为该系统的创新特色,未来系统将涵盖高渗透率的可再生能源、多维非线性的随机系统、海量多源的离散大数据、动态多时空差异的源与荷。

(2)经济的成就。结构决定功能,未来综合能源系统需要灵活的网络拓扑结构。综合能源系统优化规划、建模仿真、运行控制、综合评估等领域考虑多时间尺度、多不确定性等实际问题。风光核互补系统同时利用风能、光能与核能,提高系统供电的可靠性、稳定性和连续性,能够更加充分地利用气候资源,可实现昼夜不断的输出能源。系统具有潜在的经济和社会效益。

(3)社会的品质。该技术可承担起绿色环保的社会义务。太阳能、风能、核能的互补性让风光核能转换系统成为了资源利用率最好的独立能源系统,为实现碳中和迈出重要的一步。还可以提高输变电系统的安全可靠性、减少线路损耗,成为主电网的有效补充。可解决远离电网的一些特殊地区的生态用电,如山区、海岛、新农村及城镇、医院建设、高速公路信号以及照明等供电成本高的用户。

参考文献:

[1]陈文军,姜胜耀.中国发展小型堆核能系统的可行性研究[J].核动力工程,2013,34(2):153-156.

- CHEN Wenjun, JIANG Shengyao. Feasibility study on development of small nuclear power reactors in China [J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(2): 153-156.
- [2] 田丰, 包存宽. 充分利用规划力量推动实现碳达峰碳中和目标[N]. 中国环境报, 2021-01-14(003).
- [3] 黄畅, 张攀, 王卫良, 等. 燃煤发电产业升级支撑我国节能减排与碳中和国家战略[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 1-6.
HUANG Chang, ZHANG Pan, WANG Weiliang, et al. The upgradation of coal-fired power generation industry supports China's energy conservation, emission reduction and carbon neutrality [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 1-6.
- [4] 杜炬虎, 刘静. 园区燃气分布式能源站微电网结构解析[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 23-25, 28.
DU Juhu, LIU Jing. Analysis of microgrid structure of a gas distributed energy station in a park [J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 23-25, 28.
- [5] 张希良, 姜克隽, 赵英汝, 等. 促进能源气候协同治理机制与路径跨学科研究[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 1-4.
ZHANG Xiliang, JIANG Kejun, ZHAO Yingru, et al. Boost interdisciplinary research on development pathway and synergy governance of energy and climate [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 1-4.
- [6] 张巍, 董昕昕, 孙伟卿, 等. 能源互联网中的综合能源系统研究[J]. 自动化仪表, 2017, 38(1): 12-15.
ZHANG Wei, DONG Xinxin, SUN Weiqing, et al. Research on the integrated energy system in Energy Internet [J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(1): 12-15.
- [7] 周蓝宇, 齐实, 周涛. 小型模块化反应堆发展趋势及前景[J]. 科技创新与应用, 2017(21): 195-196.
- [8] 周涛, 李精精, 汝小龙, 等. 核电机组非能动技术的应用及其发展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(8): 81-89.
ZHOU Tao, LI Jingjing, RU Xiaolong, et al. Application and development of passive technology in nuclear power units [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(8): 81-89.
- [9] 周涛, 李精精, 琚忠云, 等. 非能动自然循环技术的发展与研究[J]. 核安全, 2013, 12(3): 32-36.
ZHOU Tao, LI Jingjing, JU Zhongyun, et al. The development and study on passive natural circulation [J]. Nuclear Safety, 2013, 12(3): 32-36.
- [10] 陈娟, 周涛, 刘亮, 等. 非能动系统可靠性分析方法比较研究[J]. 华电技术, 2013, 35(2): 14-17.
CHEN Juan, ZHOU Tao, LIU Liang, et al. Comparison of reliability analysis methods for passive systems [J]. Huadian Technology, 2013, 35(2): 14-17.
- [11] 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 16-25.
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.
- [12] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [13] BIE Z H, ZHANG P, LI G, et al. Reliability evaluation of active distribution systems including microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2342-2350.
- [14] 孙宏斌. 能源互联网[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [15] 艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2-10.
AI Qian, HAO Ran. Key Technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10.
- [16] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [17] 薛少华, 李宁, 周星明, 等. 考虑综合需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(5): 7-12.
XUE Shaohua, LI Ning, ZHOU Xingming, et al. Optimal operation of integrated energy system considering integrated demand response [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(5): 7-12.
- [18] 贾宏杰. 综合能源系统(能源互联网)相关研究[EB/OL]. (2019-01-15) [2020-12-31]. https://www.sohu.com/a/289298930_805678.

(本文责编: 陆华)

作者简介:

周涛(1965—), 男, 陕西商州人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事核热工水力与安全方面的研究(E-mail: 101012636@seu.edu.cn)。

张海龙(1981—), 男, 河北张家口人, 高级工程师, 工学博士, 从事核热工水力与安全、综合能源、电力系统自动化方面的研究(E-mail: 215463641@qq.com)。

刘文斌(1998—), 男, 山东临沂人, 在读硕士研究生, 从事核热工水力与安全方面的研究(E-mail: lbwqiang@163.com)。