

DOI:10.11784/tdxbz202106047

流程工业综合能源系统用电灵活性综述

徐宪东, 单文亮, 蔡云帆, 余晓丹, 贾宏杰

(天津市智慧能源与信息技术重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 随着风、光等间歇性可再生能源比例的提高, 灵活性在电力系统中的重要性更加突出。作为重要电力负荷之一, 流程工业用电行为具有较强的多能互济特性, 能够有效支撑电力系统灵活运行。然而, 与一般居民和商业用户侧综合能源系统不同, 流程工业用户涉及多能源系统与生产过程的交互, 灵活性更为复杂。本文首先从多能源系统耦合分析和能量-物质流模型两个角度介绍了典型流程工业用能特征的描述方式。然后, 梳理了流程工业综合能源系统灵活调控的主要手段, 包括热电联产系统调度、用电设备直接控制和非用电设备的间接调控。在此基础上, 分析了面向电力系统需求的流程工业用电灵活性指标及其评估方法。考虑到不同工业用户的特征差异和协同潜力, 给出了依托负荷聚合商的多用户聚合交易框架, 以及用户、电力系统和市场的交易流程。最后, 对灵活性分析领域待研究方向进行了总结和展望。

关键词: 综合能源系统运行; 用电灵活性; 流程工业; 多用户聚合

中图分类号: TM741

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2021)12-1212-09

A Perspective on Electricity Flexibility of Integrated Energy Systems in Processing Industries

Xu Xiandong, Shan Wenliang, Cai Yunfan, Yu Xiaodan, Jia Hongjie

(Key Laboratory of Smart Energy & Information Technology of Tianjin Municipality, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Along with the integration of interruptible renewable generation such as wind and solar, operational flexibility is essential to the power grid. Processing industries, accounting for a large share of the load in the power grid, have great potentials in providing such flexibility by regulating their energy use. Unlike residential and commercial users, attaining the flexibility of processing industries is a great challenge due to the complex interactions between multi-energy systems and industrial processes. This study presented models of processing industries to address this issue by characterizing the interactions between various energy and material flows. Three main flexibility resources of industrial integrated energy systems are reviewed from three aspects: dispatch of combined heat and power units, direct control of electric loads, and indirect control through regulating manufacturing processes that are not driven by electricity. Indices and an evaluation framework for flexibility quantification of industrial integrated energy systems are discussed. Considering the differences in energy consumption features and flexibility provision potentials of various industrial sites, a market framework is presented for the trading and aggregation of multiple users through load aggregators. Finally, future directions for flexibility analysis of industrial integrated energy systems are summarized and prospected.

Keywords: integrated energy systems operation; electricity flexibility; processing industries; load aggregation

传统电力系统一般以火电、水电之类常规电源灵活出力调控来应对用户侧电力需求的不确定性。随

着风、光等间歇性可再生能源接入比例的提升以及传统火电厂的逐渐退出, 不确定性增加与灵活性不足所

收稿日期: 2021-06-30; 修回日期: 2021-07-24.

作者简介: 徐宪东(1987—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 徐宪东, xux27@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52061635103, 5210070140, 51625702).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52061635103, No. 5210070140, No. 51625702).

带来的矛盾不断凸显^[1]。2016年和2019年澳大利亚、阿根廷及英国等可再生能源发电容量占比较高的国家相继出现电厂脱网后,电力系统调控能力不足,进而造成的大范围停电事故,导致铁路、公路、供水等基础设施受到影响。尽管通过新建电厂以及储能电站从技术上能够解决这样的矛盾,但往往也伴随着潜在的环境影响、大量的投资以及较长的建设周期。因此,有必要挖掘现有资源的灵活性,避免重复投资造成的浪费。研究表明,通过用户侧资源的调控与现有发电厂和电网协同,能够有效提高电力系统的灵活性^[2]。其中,流程工业用户占我国全社会总用电量的40%以上^[3],自动化程度高,具有提供灵活性的良好基础^[4],且大多采用大规模生产方式,相比于空调之类的小容量负荷具有更强的调控能力。

流程工业生产过程往往包含多种复杂的物理和化学变化,其供能系统可能涉及电力/燃料/蒸汽等多种能源,并与生产过程紧密耦合。这种多系统耦合特征使得流程工业用户有能力充分利用不同能源和物质各自的秉性,如副产燃料的存储、温控负荷的热惯性及生产流程的可调度性等,进行全系统协同,控制与外部电网的功率和能量交互。以钢铁工业为例,大型钢厂自备电厂和电弧炉容量可达到百MW以上。充分挖掘二者灵活性能够实现与电网的双向互动,对支撑高比例可再生能源接入电网意义重大。

参考国内外灵活性相关研究^[5-6],本文对流程工业综合能源系统用电灵活性(以下简称灵活性)作如下解读:在外部信号作用下,用户通过改变自身能源产/消行为(电/气/副产燃料/热等)调控与外部电网交互功率的能力,这种能力既可以来自供能系统的多能协同,也可以来自生产调度对供能系统的间接作用。对电网来说,工业用户为满足电网调频/调峰/短期备用等需求所做的调整皆视为灵活性服务。根据自身物理性质的不同,用户提供不同服务的能力也不尽相同。在使用工业用户灵活性时相关的量化评估问题亟需研究。

本文首先简述了流程工业的用能特征,并从模型构建的角度分析了流程工业涉及的多能耦合特征,以及供能与生产交互带来的能量-物质流耦合特征。其次,对于工业热电联产系统优化、用电负荷聚合调控以及生产流程优化调度3个角度分析了工业综合能源系统的调控潜力。最后,对流程工业综合能源系统灵活性评估与提升有待研究的内容进行了讨论,以期破解复杂流程工业用电灵活性分析面临的一些重点问题与难点。

1 流程工业用户用能特征

1.1 系统基本结构

流程工业用户的能源系统具有类型多样、结构各异、用能/产能特征丰富、能量耦合关系繁杂等特点。通过对钢铁、石化、造纸等几类常见流程工业系统结构分析可知,流程工业用户供能和生产系统常具有图1所示结构,其中供能系统的调控依靠电力/燃料/蒸汽等多系统协同完成,而生产过程则通过改变其能源产/消行为(即生产用能和副产燃料)影响供能系统的调控,二者的耦合使得流程工业用电特征及其终端供能系统运行机理与一般用户差异较大^[6]。

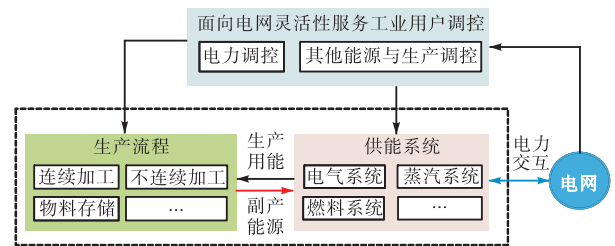


图1 典型流程工业用户供能与生产系统结构

Fig.1 Schematic diagram of energy supply and production systems of typical processing industries

根据实际系统中各环节用能特征的不同,将其灵活性分为如下3类(见图2):第1类为具有平滑电功率调节能力的资源,如工业热电联产;第2类为具有用电时间平移和开关特征的资源,如轧钢;第3类为非电存储类资源,如煤气柜等副产燃料存储。

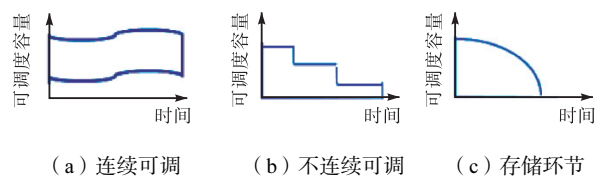


图2 典型流程工业环节灵活性特征

Fig.2 Flexibility characteristics of typical processing industries

1.2 供能系统多能源交互

工业用户供能系统可能涉及电/气/热/冷等多种能源系统,在综合能源系统、能源互联网等概念的推动下,相应的多系统耦合模型研究已有了长足的发展。对于能源转换单元,比较有代表性的包括描述能源转换单元的能源集线器模型^[7]、综合能源的矩阵化标准建模方法^[8]、耦合矩阵非线性环节的线性处理方法等^[9],有效降低了多能源系统统一建模的难度;对能源网络来说,交互求解^[10]和多网络统一求解^[11]两

种方法为多能源系统的分析奠定了基础,统一能路理论^[12]和广义电路分析理论^[13]进一步给出了能量流的共性,使得不同能源系统能够在统一的框架和模型结构上进行描述,给多能源系统的分析提供了解决思路,而多时间尺度和数据驱动分析方法给多能源系统在不同时间动态上的特征刻画提供了理论基础^[14-16]。

1.3 供能系统与生产过程交互

工业生产过程存在复杂的能源产/消过程、且环节构成丰富,这使得供能系统与生产过程的耦合性较强^[6],灵活性分析需要将二者放在同一框架下考虑,以更加全面地刻画系统行为特征。对此,现有研究主要从能量-物质流建模角度入手,通过对生产过程能源产/消与物质进/出建立耦合模型,使能源系统能够感知并处理生产过程发生的变化,从而以数学方法呈现生产过程物质与能量流的融合特征,刻画出二者在多时间尺度下的相互影响^[17],如文献[18]提出了用于描述能量-物质流耦合关系的矩阵化标准模型,并以钢厂为例研究了一段时间范围内钢铁产量对应的能耗和原材料消耗的关系;文献[19]将该模型用于描述炼油厂的能量-物质流耦合关系及其对能量管理系统的支撑;文献[20-21]分别建立了电解铝厂和沥青罐的动态模型,相当于是将物质流模型作了一个近似模拟,用于评估其参与电网频率响应的能力;文献[22]从过程控制的角度,研究了钢铁工业生产多个环节用能特征的聚合动态模型。

2 流程工业综合能源系统灵活调控方法

流程工业综合能源系统灵活调控的核心问题在于如何在给定的运行边界范围内,考虑多种不确定性因素的影响,分析直接和间接用能环节的交互,进而实现对供能系统及相关生产过程的协同优化。研究对象主要涉及以热电联产为代表的供能系统调控、用电设备的直接调控以及生产流程优化带来的间接调控。

2.1 工业热电联产系统优化调度

这类方法的主要思路是以满足生产用能为约束条件,构建供能系统优化模型,对热电联产设备及其相应的蒸汽和燃料系统进行调控。比如,文献[23]提出了一种用于工业热电联产系统以及副产燃料系统的灵活调度模型,分析了该系统在分时电价环境下降低系统用电成本的有效性。考虑系统状态的不确定性,文献[24-26]评估了包括工业蒸汽发电系统用于优化调度和辅助服务的灵活性。考虑模型参数的不确

定性。文献[27]建立了污水处理厂的随机动态模型,并分析了随机变量对工业热电联产系统灵活性的影响。考虑到工业用能对电网灵活性的约束,文献[28]分析了热电联产系统与供热管网协同给系统灵活性提升带来的潜力。

2.2 基于用电负荷聚合后的系统运行优化

这类方法的主要思路是通过对待用电特征进行分析,建立相应的主导动态模型,根据设备运行状态和可调控性,基于一定规则进行调控,如文献[29]利用负荷序列化算法研究了工业电加热系统参与电力系统调频的可行性。考虑到负荷的随机特性,文献[30]研究了多个负荷聚合后的可调控能力;对于多台设备参与电网运行的情况,文献[31-33]建立了工业用户关键用电环节及其参与电力系统调度的鲁棒优化模型,评估了其参与风光消纳和电网调度的能力和效益,以及对于自身运行成本的影响。对于工业负荷调控的低颗粒度问题,文献[34]研究了水泥厂快速开断调节与储能的协同运行,验证了具有多颗粒度的设备协同提供调频服务或本地负荷跟踪的可能性。

2.3 基于资源-任务网络的生产流程优化

这种方法主要是针对生产过程用能的灵活性分析,其主要思想是建立各个生产环节之间的顺序/选择/并发关系,从生产调度角度研究生产过程用能可调整空间,通过用电环节与其他非用电环节的协同优化,评估生产流程用电调控的灵活性,如文献[35]构建了针对电弧炉的资源-任务网络模型,用于平抑钢铁生产过程用电波动和降低用电成本。文献[36]在此基础上研究了钢厂用能灵活性用于电力系统短期备用的可行性。考虑生产调度对于设备寿命的影响,文献[37]将电极损耗引入到上述模型中。文献[38]用连续时间模型近似模拟了生产流程用能行为,建立了一种考虑系统用能成本的生产调度方法,使得资源网络模型的优化求解效率显著提高。根据电网对于灵活性服务时间尺度的不同要求,文献[39]研究了工业负荷在月和日尺度上的可调控能力,文献[40]进一步分析了工业用户生产流程日间调整对促进新能源消纳和维持电力系统供需平衡的作用。这类方法比较适合分析低时间颗粒度的灵活性服务,对于调频之类短期动态响应的分析则难以奏效。

目前已有方法对于配电网耦合下的多设备灵活性聚合有较好的求解效果,但是对于流程工业用户来说,发电设备和各生产环节除电网之外,还可能存在蒸汽/副产燃料等多个具有不同特征的网络耦合,对多能源网络及生产过程进行综合分析是保障工业综

合能源系统安全的重要组成部分。

3 面向电力系统需求的灵活性评估

3.1 电力系统灵活性指标

从电力系统需求的角度,常用的关键指标包括响应速度、响应幅度、可持续时间以及被调控后的恢复时间^[41-43],这几个指标一定程度上反映了个体的动态特性,对类似调频的运行灵活性服务评估已有广泛应用^[44]。在典型灵活性指标基础上,文献[45]从电力系统需求角度对灵活性指标进行了扩展,提出使用工作范围、爬坡率、启动和关闭时间、最小启动和关闭时间来评估发电机组的灵活性。文献[46]提出了一种基于层次分析法的发电柔性实时测量技术,将发电机组的最小功率、爬坡能力、循环负荷率以及发电机组的可控性作为灵活性指标。文献[47]从发电和负荷全系统角度提出了电力系统灵活性的5个特征:方向性、多时空特性、状态相依性、双向转化性及概率特性。文献[48]参考电力系统的运行特征,提出配电系统的物理、信息和市场3个层面的灵活性。文献[49]从调度角度,在考虑负荷平衡、线路潮流约束及灵活性资源调控能力的条件下,将最大上/下调节能力等10个指标作为含可再生能源电力系统的灵活性评价指标。文献[50]考虑不确定变量预测误差适应程度对于灵活性评估结果的影响,提出了一种基于时序方向矩阵的配电网灵活性评估方法。

流程工业综合能源系统的分析需要考虑系统中存在的复杂能源产/消过程及物质-能量耦合关系,包括能源系统对生产过程变化的感知以及生产过程中物质与能量的交互。其灵活性既涉及供能系统自身和用电环节自身的调控能力/特性,也受到企业订单和生产调度计划的影响。因此,上述指标还需进一步深入,充分考虑工业过程的行为特征,从而实现对其最大灵活性有效描述,如水泥球磨机具备离散快速开断调节环节^[34],在分析其灵活性时,需要充分考虑离散行为,引入注入颗粒度之类指标,以保证用户评估结果满足灵活性服务市场的偏差需求。此外,还需考虑供能系统于工业过程的耦合程度,如长流程钢厂内部生产系统与蒸汽发电系统存在着紧密的双向交互,而水泥厂之类用户的自备电厂与其生产过程则相对独立,二者仅存在着能量上的交互。

在满足上述需求前提下,用户在为不同灵活性市场提供服务时需要可对调度资源进行优化,包括设备可调度时间表、燃料市场价格、可再生能源预测结果以及可以参与的市场服务。优化过程包括两个主要

阶段:①根据用能需求以及天然气和电力价格,计算工业综合能源系统的运行基线;②计算在系统运行约束范围内的可调度容量,进而根据基线,评估用户可为不同市场提供的灵活性大小,如图3所示。站在市场的角度,灵活性服务必须确保用户能够获取足够收益来补偿其提供服务的成本。用户可根据市场规则、成本和收入预期决定在不同市场进行交易的容量^[51]。

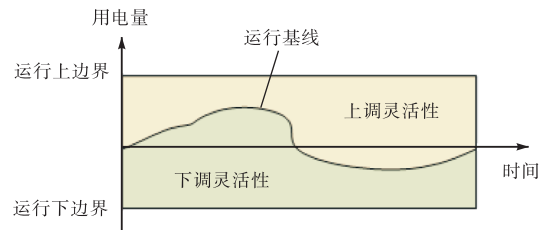


图3 用电灵活性边界示意

Fig.3 Schematic diagram of electricity flexibility boundaries

3.2 灵活性指标计算方法

灵活性在电力系统中关联着不同时空属性^[52-53],对于某一个系统来说,可表述为其中多个设备可调控能力在时间和空间上的叠加。求解这类问题的一种常见思路是采用自下而上的方法:首先获取个体设备的主导动态模型,评估其可调控能力边界;进而对给定需求下多个设备的调控能力进行叠加,获取全系统的灵活性。其中不仅涉及响应速度、不确定性、灵活调节措施和边际成本等基本评价要素,同时还要考虑传输网络和系统操作约束以及发电机组出力区间、爬坡率和线路容量约束,用电负荷最大允许波动区间等^[54]。

从计算分析角度来说,灵活性边界精确刻画是一个NP难问题^[55],求解难度较高,一种常见的解决方案是利用相似多面体近似灵活运行区域,构建相应的鲁棒优化模型进行求解。例如,文献[56]提出用外切多面体和内接多面体分别近似系统灵活性的上下边界,将灵活性边界的求解问题分别转换为相似多面体的最大最小值问题。文献[57]进一步提出用齐诺多面体提高灵活性评估求解效率,同时考虑了聚合灵活性执行过程中各环节灵活性服务再分配的可执行性。实际系统中各个体之间通过电网相互连接,在求解多环节聚合灵活性时还需要考虑线路的潮流约束。文献[58]在考虑电网约束的前提下评估了多个设备聚合后的有功和无功可调度能力。文献[59]在上述灵活性求解模型的基础上引入了配网三相潮流的线性化模型,并给出了基于超盒填充的自适应鲁棒优化模型。针对储能等具有状态时变特性的环节,文献[60]

提出了一种基于先验知识的时间解耦方法对超盒填充方法进行了改进.

3.3 计及供能-生产协同的灵活性评估方法

在分析流程工业用电灵活性对电力系统的支撑作用时,涉及发电和用电的双向调控,其边界的获取需要充分考虑供能系统和生产系统的协同,如图 4 所示.

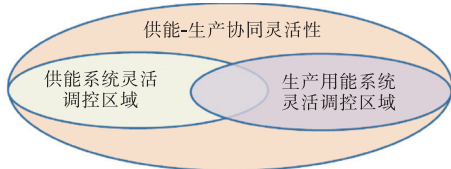


图 4 用电灵活性提升方法示意

Fig.4 Schematic diagram of electricity flexibility enhancement

以钢铁厂为例,流程工业综合能源系统的灵活性评估首先需根据电力系统需求,对烧结/炼钢/再热/热轧等环节用能特征进行分析,构建考虑连续-离散混杂动态特征的供能-生产系统混杂模型,用于评估电力、能源与物质的交互影响,及各环节的灵活可调区域.进而,供能系统的灵活性在考虑发电设备运行约束以及相关管网/锅炉/燃气供应系统多能源耦合约束的条件下,对多台蒸汽发电设备在给定服务时间段的可调控范围叠加来描述.根据各环节灵活性特征,构建考虑多能源系统和生产过程能源产/消不确定约束的多环节灵活性聚合模型,采用上述鲁棒优化等方法近似求解系统灵活性边界.最后,考虑不同灵活性市场的指标要求(如服务启动时间、服务保持时间、设备爬坡速度),对用户面向不同灵活性服务的能力进行量化评估.

4 基于多用户聚合的灵活性提升策略

类似小容量分布式电源,工业用户接入电网提供灵活性服务时,可能由于容量和调节能力限制而遇到市场准入障碍(如最小投标容量限制^[61]).此外,由于灵活性服务并非工业综合能源系统的核心业务,需要关注其对核心业务(即本地能源供给)收益的影响.

在电力市场化背景下,解决上述问题的一种有效方式是用户与负荷聚合商合作.通过建立聚合平台,收集电力市场的需求以及用户可调度容量特征,聚合多个工业综合能源系统的优势,负荷聚合商可以提供“自底向上”的灵活性,与其他市场参与者(如大型电厂)在同一框架下竞争,为用户带来收益^[62].聚合

商可以是能源供应商、电网公司或第三方公司等电力市场参与方^[63].

用户、聚合平台以及市场之间可采用如图 5 所示的形式进行交互,具体流程如下:①聚合平台根据对电力系统负荷和发电可用容量的预测结果,生成未来一个交易周期多能源市场价格预测信号,并下发给用户;②用户根据能源价格信号对自身调度信号进行运行优化,进而向聚合平台上传其灵活性大小和边际成本;③聚合平台对多个用户需求和灵活性进行综合评估,优化参与外部能量和辅助服务市场的投标容量;④运营商将竞价结果下达给聚合平台;⑤平台根据投标结果,在其投资组合中调度相关资源,提供相应服务;⑥聚合平台参与市场服务获利;⑦用户预根据预先签订合同与聚合平台分配相应的收益.

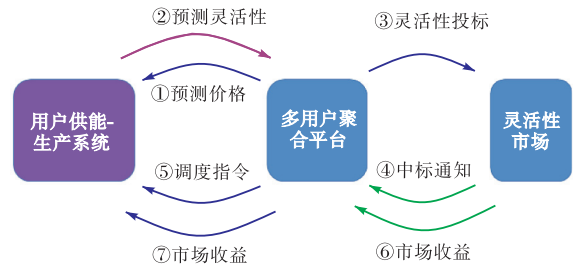


图 5 用户、聚合平台及市场的互动形式

Fig.5 Interactions between users, aggregation platform, and markets

完成上述聚合的一个关键是如何在参与方之间公平和透明地分配投资收入.目前已有方法是由聚合商实施动态收益分享来自备用容量和参与调控能量(如调频服务的容量和里程)的收益^[64].灵活性聚合的另一个关键问题是,由于不满足服务市场要求而受到的惩罚较低,并且灵活性服务被激活概率较低的情况下,参与方可能会忽略备用规则的要求而增加投标量,以获取额外收益.

5 结语

本文以流程工业为例,对工业综合能源系统的灵活性进行了综述.相对于一般用户侧综合能源系统,流程工业综合能源系统一方面需要满足生产过程的能源需求,另一方面生产过程的副产燃料/蒸汽等也会直接影响用户的能源供给.基于能量-物质流模型能够很好地描述供能系统与生产过程之间的交互,帮助运行人员评估参与电网调度对于流程工业综合能源系统的影响.工业用户可以通过热电联产系统优化调度、用电负荷聚合以及基于资源-任务网络的生

产流程优化来调节自身的用电行为,支撑电力系统需求,然而目前这3类资源尚未有效结合,工业用户的灵活性未能得到充分挖掘.未来可考虑在如下方向做进一步探究.

(1) 动态能量-物质流模型: 流程工业的能量-物质流模型构建方法已有初步研究,但对本地管网动态特性考虑不足,对系统连续-离散混杂动态特性的考虑也较为简单,尤其是电力系统灵活性分析需要的系统级动态特性,这成为流程工业用户供能-生产交互分析亟需突破的问题.

(2) 能源-生产多尺度协同下的灵活性提升: 考虑电力系统多尺度的灵活性需求以及工业用户的连续-离散混杂动态特性,现有研究能源系统和生产过程相对独立的调度模型大大限制了工业用户的灵活性,难以充分挖掘工业用户对不同灵活性服务的潜力.如何分析考虑生产过程灵活性的工业用电灵活性边界以及限制工业用电灵活调控的瓶颈环节有待进一步研究.

(3) 市场环境下的灵活性提升: 不同工业用户的用能特征差异使其具有不同灵活调控能力,通过多用户在不同时间尺度上的聚合能够促进整体灵活性的提升.类似工业园区的区域能源系统使得不同工业用户有机会在一定空间范围内聚合参与电力系统的调控.工业用户占据我国电力系统负荷的主体,如何在我国能源和辅助服务市场的发展背景下,探索适合工业综合能源系统灵活性提升方法,对于建设以新能源为主体的新型电力系统具有重要意义.

参考文献:

- [1] 李海波, 鲁宗相, 乔颖. 源荷储一体化的广义灵活电源双层统筹规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 46-54.
Li Haibo, Lu Zongxiang, Qiao Ying. Bi-level optimal planning of generation-load-storage integrated generalized flexibility resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 46-54(in Chinese).
- [2] McPherson M, Stoll B. Demand response for variable renewable energy integration: A proposed approach and its impacts[J]. Energy, 2020, 197: 117205-1-117205-16.
- [3] 国家统计局. 分行业电力消费总量[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C0>, 2021-03-13. National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Total electricity consumption by industry [EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>, 2021-03-13(in Chinese).
- [4] 史俊祎, 文福拴, 崔鹏程, 等. 参与需求响应的工业用户智能用电管理[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 45-53.
Shi Junyi, Wen Fushuan, Cui Pengcheng, et al. Intelligent energy management of industrial loads considering participation in demand response program[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 45-53(in Chinese).
- [5] National Grid. Electricity system flexibility[EB/OL]. <https://www.ofgem.gov.uk/energy-policy-and-regulation/policy-and-regulatory-programmes/electricity-system-flexibility>, 2021-07-24.
- [6] Sun W, Wang Q, Zhou Y, et al. Material and energy flows of the iron and steel industry: Status quo, challenges and perspectives[J]. Applied Energy, 2020, 268: 114946-1-114946-15.
- [7] Geidl M, Koeppel G, Favreperrod P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [8] Wang Y, Zhang N, Zhuo Z, et al. Mixed-integer linear programming-based optimal configuration planning for energy hub: Starting from scratch[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1141-1150.
- [9] Wang Y, Zhang N, Kang C, et al. Standardized matrix modelling of multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 257-270.
- [10] 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]. Proceeding of CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642(in Chinese).
- [11] Liu X, Wu J, Jenkins N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [12] 陈彬彬, 孙宏斌, 吴文传, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(三): 稳态与动态潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4820-4830.
Chen Binbin, Sun Hongbin, Wu Wenchuan, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(III): Steady and dynamic energy flow calculation[J]. Proceeding of CSEE, 2020, 40(15): 4820-4830(in Chinese).
- [13] 陈皓勇, 李明, 邱明, 等. 时变能量网络建模与

- 分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(3): 243-254.
- Chen Haoyong, Li Ming, Qiu Ming, et al. Modeling and analysis of time-varying energy network[J]. Sci Sin Tech, 2019, 49(3): 243-254(in Chinese).
- [14] Xu X, Jia H, Chiang H D, et al. Dynamic modelling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1212-1221.
- [15] Shahidehpour M, Shen F, Ju P, et al. Singular perturbation for the dynamic modelling of integrated energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(3): 1718-1728.
- [16] Xu X, Li K, Jia H, et al. Data-driven dynamic modelling of coupled thermal and electric outputs of microturbines[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1387-1396.
- [17] Si F, Wang J, Han Y, et al. Cost-efficient multi-energy management with flexible complementarity strategy for energy internet[J]. Applied Energy, 2018, 231: 803-815.
- [18] Sun W, Wang Q, Zheng Z, et al. Material-energy-emission nexus in the integrated iron and steel industry[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213: 112828-1-112828-19.
- [19] Alarfaj O, Bhattacharya K. Material flow based power demand modelling of an oil refinery process for optimal energy management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2312-2321.
- [20] Bao P, Zhang W, Cheng D, et al. Hierarchical control of aluminium smelter loads for primary frequency support considering control cost[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122: 106202.
- [21] Cheng M, Wu J, Galsworthy S J, et al. Power system frequency response from the control of bitumen tanks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1769-1778.
- [22] 涂夏哲, 徐箭, 廖思阳, 等. 考虑过程控制的钢铁工业负荷用能行为分析与功率特性建模[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 114-120.
- Tu Xiazhe, Xu Jian, Liao Siyang, et al. Process controlling based energy consumption behavior analysis and power characteristic modeling for iron and steel industry[J]. Automation of Electric Power System, 2018, 42(2): 114-120(in Chinese).
- [23] Mitra S, Sun L, Grossmann I E. Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under time-sensitive electricity prices[J]. Energy, 2013, 54(2): 194-211.
- [24] Shen F, Zhao L, Du W, et al. Large-scale industrial energy systems optimization under uncertainty: A data-driven robust optimization approach[J]. Applied Energy, 2020, 259: 114199-1-114199-10.
- [25] Xu X, Abeysekera M, Gutsch C, et al. Quantifying flexibility of study of an integrated pulp and paper mill[J]. IET energy systems integration, 2020, 2(2): 124-132.
- [26] Xu X, Sun W, Abeysekera M, et al. Quantifying the flexibility from industrial steam systems for supporting the power grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 36(1): 313-322.
- [27] Junker R G, Kallesøe C S, Real J P, et al. Stochastic nonlinear modelling and application of price-based energy flexibility[J]. Applied Energy, 2020, 275: 115096-1-115096-10.
- [28] Xu X, Lyu Q, Qadrdan M, et al. Quantification of flexibility of a district heating system for the power grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2617-2630.
- [29] Zhou Y, Cheng M, Wu J. Enhanced frequency response from industrial heating loads for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(6): 3388-3399.
- [30] Zhao L, Zhang W. A Unified stochastic hybrid system approach to aggregate modelling of responsive loads[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(12): 4250-4263.
- [31] 邢文, 段斌. 基于负荷转移调度的高耗能企业电能需量控制[J]. 电气技术, 2016, 17(9): 70-76.
- Xing Wen, Duan Bin. Power demanding control for energy-intensive enterprises based on load transfer dispatch[J]. Electrical Engineering, 2016, 17(9): 70-76(in Chinese).
- [32] 王健, 鲁宗相, 乔颖, 等. 高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2115-2124.
- Wang Jian, Lu Zongxiang, Qiao Ying, et al. Research on demand response mechanism of wind power local accommodation utilizing energy-intensive loads[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2115-2124(in Chinese).

- [33] 晋宏杨, 孙宏斌, 牛涛, 等. 考虑风电与高载能负荷调度不确定性的鲁棒机组组合[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 13-20.
Jin Hongyang, Sun Hongbin, Niu Tao, et al. Robust unit commitment considering uncertainties of wind and energy intensive load dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 13-20(in Chinese).
- [34] Zhang X, Hug G, Kolter Z, et al. Demand response of ancillary service from industrial loads coordinated with energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 951-961.
- [35] Castro P M, Sun L, Harjunkoski I. Resource-task network formulations for industrial demand side management of a steel plant[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(36): 13046-13058.
- [36] Zhang X, Hug G, Harjunkoski I. Cost-effective scheduling of steel plants with flexible EAFs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(1): 239-249.
- [37] Castro P M, Ave G D, Engell S, et al. Industrial demand side management of a steel plant considering alternative power modes and electrode replacement[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(30): 13642-13656.
- [38] Hadera H, Labrik R, Sand G, et al. An improved energy-awareness formulation for general precedence continuous-time scheduling models[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(5): 1336-1346.
- [39] 王孝慈. 工业用户可控能力评估方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
Wang Xiaoci. Research on Evaluation Method of Industrial Demand Response Capacity[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).
- [40] 谭貌. 基于电力需求响应的板坯热轧负荷分析与调度[D]. 长沙: 湘潭大学, 2015.
Tan Mao. Load Analysis and Scheduling for Plate Hot Rolling Based on Electricity Demand Response[D]. Changsha: Xiangtan University, 2015(in Chinese).
- [41] Ulbig A, Andersson G. Analyzing operational flexibility of electric power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 72: 155-164.
- [42] Mohandes B, El Moursi M S, Hatziaegyriou N D, et al. A review of power system flexibility with high penetration of renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3140-3155.
- [43] Xu X, Ming W, Zhou Y, et al. Unlocking the flexibility of combined heat and power for frequency response by coordinative control with batteries[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(5): 3209-3219.
- [44] Zhou Y, Cheng M, Wu J. Enhanced frequency response from industrial heating loads for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(6): 3388-3399.
- [45] Oree V, Sayed Hassen S Z. A composite metric for assessing flexibility available in conventional generators of power systems[J]. Applied Energy, 2016, 177: 683-691.
- [46] Shetaya A A S, El-Azab R, Amin A, et al. Flexibility measurement of power system generation for real-time applications using analytical hierarchy process[C]//IEEE Green Technologies Conference. Austin, USA, 2018: 1-8.
- [47] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-20.
Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20(in Chinese).
- [48] 王成山, 李鹏, 于浩. 智能配电网的新形态及其灵活性特征分析与应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 13-21.
Wang Chengshan, Li Peng, Yu Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 13-21(in Chinese).
- [49] 周光东. 电力系统运行灵活性评价及优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
Zhou Guangdong. Research on Operational Flexibility Evaluation and Optimal Dispatching of Power System[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019(in Chinese).
- [50] 徐正阳, 刘洪, 葛少云, 等. 基于时序方向矩阵的主动配电网运行灵活性评估[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2021, 54(4): 362-373.
Xu Zhengyang, Liu Hong, Ge Shaoyun, et al. Operational flexibility evaluation of active distribution network based on the sequential direction matrix[J]. Journal of

- Tianjin University: Science and Technology, 2021, 54(4): 362-373 (in Chinese).
- [51] Corsetti E, Riaz S, Riello M, et al. Modelling and deploying multi-energy flexibility: The energy lattice framework[J]. *Advances in Applied Energy*, 2021, 2: 100030.
- [52] Heggarty T, Bourmaud J Y, Girard R, et al. Multi-temporal assessment of power system flexibility requirement[J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 1327-1336.
- [53] Xiong B, Predel J, del Granado P C, et al. Spatial flexibility in redispatch: Supporting low carbon energy systems with power-to-gas [J]. *Applied Energy*, 2020, 283: 116201.
- [54] Zhao J, Zheng T, Litvinov E. A unified framework for defining and measuring flexibility in power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(1): 339-347.
- [55] Barot S, Taylor J A. A concise, approximate representation of a collection of loads described by polytopes[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, 84: 55-63.
- [56] Zhao L, Zhang W, Hao H, et al. A geometric approach to aggregate flexibility modelling of thermostatically controlled loads[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(6): 4721-4731.
- [57] Muller F L, Szabo J, Sundstrom O, et al. Aggregation and disaggregation of energetic flexibility from distributed energy resources[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 1205-1214.
- [58] Tan Z, Zhong H, Xia Q, et al. Estimating the robust P-Q capability of a technical virtual power plant under uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4285-4296.
- [59] Chen X, Dall'Anese E, Zhao C, et al. Aggregate power flexibility in unbalanced distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 258-269.
- [60] Cui B, Zamzam A, Bernstein A. Network-cognizant time-coupled aggregate flexibility of distribution systems under uncertainties[J]. *IEEE Control System Letters*, 2020, 5(5): 1723-1728.
- [61] National Grid. Firm frequency response (FFR) interactive guidance[EB/OL]. <https://www.nationalgrideso.com/industry-information/balancing-services/frequency-response-services/firm-frequency-response-ffr?technical-requirements>, 2021-04-01.
- [62] Yazdani-Damavandi M, Neyestani N, Shafie-Khah M, et al. Strategic behavior of multi-energy players in electricity markets as aggregators of demand side resources using a bi-level approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 397-411.
- [63] Jin X, Wu Q, Jia H. Local flexibility markets: Literature review on concepts, models and clearing methods[J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114387.
- [64] Bergha K, Delarue E. Energy and reserve markets: Interdependency in electricity systems with a high share of renewables[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 189: 106537.

(责任编辑: 王晓燕)