

能源互联网及优化运行调度简述

杨济如¹, 高赐威¹, 苏卫华²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网上海市电力公司松江供电公司, 上海 201600)

摘要:能源互联网能够综合利用多种能源,利用能量输送路径的冗余性进行优化调度,提高能源利用率和运行经济性。在梳理能源互联网基本运作机制与架构设计的基础上,阐述了能源互联网的4类优化运行调度模型,分别是稳态运行的基本模型、考虑能源差异性的暂态模型、考虑能源相似性的统一模型及考虑系统随机性的优化模型,并对各类优化调度模型的应用场景、建模特点、求解方法等进行了介绍。

关键词:能源互联网;多能系统;优化运行;调度模型

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)01-0049-07

0 引言

目前,能源危机的加重及能源供需多样性的发展引发了对于单能源系统弊端的思考:单能源系统束缚了需求的可变性与系统的灵活性,限制了能量的自由流动,不仅损害了能量利用效率,而且降低了系统供能经济性。可见,唯有将能源系统与单一的能源形式解绑,才能改善能源危机的窘境。

相较于单能源系统,能源互联网能够提高系统弹性,降低特定能源的依赖性与供能风险;具备更多的调度方案,能够灵活地保持更高的能量利用率;在形式、地域等因素影响下出现能源价格差异时,能源互联网也能充分利用多能流形式降低运行成本^[1-2]。

目前世界各国已涌现出多样化的能源互联与综合利用的研究与实践。美国提出了综合能源系统的开发计划,欧盟制定了跨能源、交通、农业、化学等多领域的互联政策^[3]。丹麦计划通过电、热、气的综合应用来实现能源网络所需的灵活性^[4]。德国“E-Energy”项目分别开展了6项具有不同针对性的能源互联交易试点。为推进能源互联网发展,中国国家发改委也发布了《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》,计划在2025年初步建成设备智能、多能协同、信息对称、供需分散、系统扁平、交易开放的能源互联网产业体系。

1 能源互联网基本概念

能源互联网是利用人类生产生活用能需求的多样性、转换性、替代性,将化石燃料、可再生能源、

需求侧资源及其他类型一次能源直接利用或间接多次转换为二次能源利用,并利用储能技术存储过程性能源的混合动力系统。能源互联网是包括能源生产、输送、调配、存储、使用的完整系统,具有多能、互动、分散、开放、信息化等特点。

1.1 能源互联网运作机制

一般将能量的传输、存储及转换作为能源互联网的基本组成环节。如图1所示,能源互联网将待用的能源按照一定的优化条件分配到系统存储、传输和转换环节中,满足各传输网络上的负荷要求。

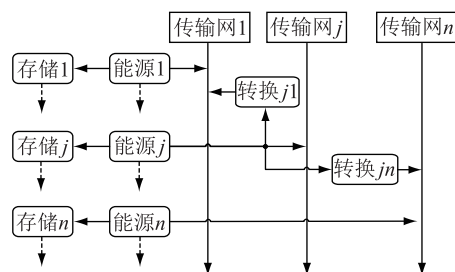


图1 能源互联网运作机制

Fig.1 The operation mechanism of the energy Internet

其中,能源的传输技术决定了能源是否构成传输网络,在长时期的发展过程中社会生产生活用能主要依赖的能源为电、气、热等,而不利于传输的化石能源、核能等通常就地消纳或转换为其他类型能源,在能源互联的趋势下也有更多新型传输技术的出现,如利用液化天然气作为高温超导电缆的冷却工质,同路传输天然气和电力^[5]等。能源的转换技术则是支撑能源互联的关键,包括常规发电机组、冷热电联供、电转气等,将不易传输的能源转换为易传输能源入网,将不便利用能源转换为易利用的传输类型,有利于能源互联网中能源的梯级利用,

提高能量利用率。目前能源的转换效率不断提高,冷热电联供系统的能源综合利用率一般可达 80% 以上^[6],电电气装置根据不同的技术类型能源转化效率在 70%~95%。能源的存储技术包括电池、储热、抽蓄电站等设备,目前过程性能源的存储如电能存储仍是发展中的技术难题,成本过高往往是众多现有能源系统无法使用储能的主要原因。

在提高系统能源利用的效率,达到更高经济效益的同时,依据互联目标的不同其实施方式也存在区别,如表 1 所示,可将能源互联网的运作机制分为 3 种类型。

表 1 能源互联网运作机制分类
Table 1 Three types of the operation mechanism of the energy Internet

序号	实施方式	目标	实例
1	其他能源辅助完成能源利用	弥补能源利用上的缺陷	将不便储存的电能转化为天然气储存或使用、抽蓄电站
2	无法使用的能源转化形式加以利用	利用原本将被废弃的能源,降低能源浪费	热电联产或利用储能设备消纳风电
3	多种能源整体优化互联	利用互补性、替代性和转换性,实现能源的梯级利用	冷热电联供系统等综合能源系统

1.2 能源互联网架构设计

能源互联网中源节点与荷节点分别为能量的输入和输出节点,源荷节点为不同质的能源网络之间的耦合节点。根据互联的紧密程度主要存在 3 种能源互联网架构:通过源荷节点互联的单向耦合互联架构、双向耦合互联架构及完全耦合架构。

单向耦合互联架构一般是由现有能源体系的自然要求衍生出来的被动互联,仅存在“源-荷”对应关系而各网络的运行互不影响。各网络相对独立,能源互联网的荷网络如同一个黑箱,系统并不关心其内部运行,只了解其负荷需求并反馈给源网络,即荷网络能量的潮流、价格等因素能够反映在其需求上从而影响源网络的运行调度,而源方网络的调度、交易情况并不会改变荷网络的运行。因此这种架构中能源网络的联系是单向影响的,源荷网络并不会协同运行。例如电热互联^[7]的网络运行,其中热网络作为电力网络的负荷,建立分解网络模型,仅考虑电力网络的优化运行调度,而忽略热水网络的调度。文献[8]仅以一个源荷节点作为电气互联网络的输入-输出端口,求解网络的最优潮流。

在双向耦合互联架构中各能源网络则互为源荷,源荷节点可容纳不同质能源双向交流,每个能源网络兼具源网络与荷网络的作用,不同能源网络

之间互相影响、协同运行,通常是为提高能源的利用效率、提升市场活跃度和提高经济效益而产生的主动互联。由于双向耦合的互联架构能够在传统能源网络基础上,建立起多种异质能源网络的紧密联系,从而成为了主流研究方向。目前已出现众多较完整的架构模型,主要可分为两种类型:以信息为中心的能源互联网架构与基于能源集成模块的能源互联网架构。以信息为中心的能源互联网架构注重能量流与信息流的融合,体现了信息-能源设施一体化的趋势;基于能源集成模块的能源互联网架构则以能源网络为物理实体,以信息网络控制能源网络,例如基于能源集线器(energy hub)^[9]、能源细胞(energy cell)、能源中心(energy center)^[10]等能源集成模块的架构类型,更加注重对于能源网络的设计。

通过源荷节点互联的单双向耦合架构通常以现有网络为基础,利用相关能源模块的设计作进一步的网络互联与功能扩展。除此以外,一些研究试图打破现有能源网络的框架,重构一个完全耦合的新型统一能量体系。例如文献[11]以统一形式的能量表达式为基础与前提,提出了能量网络的传递规律,建立了统一能量的网络方程。完全耦合的互联一般属于为实现能源的无差别流通和自由交易而产生的主动互联。

2 能源互联网优化运行调度

系统内部多样的能源流动路径创造了自由度较高的运行方案,内部路径的冗余性为系统的优化调度提供可能性。目前已有许多能源互联网优化运行调度的研究。

2.1 调度模型

2.1.1 基本稳态模型

基本稳态优化模型考虑系统正常运行时的网络及潮流情况,以经济性、环保性、新能源消纳等为优化调度目标。其数学表达如下式所示:

$$\begin{cases} \max f(P) \\ \text{s.t. } L = C_s P, C_s = SC \\ L_{\min} \leq L \leq L_{\max}, P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \\ g(P) \leq c \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(P)$ 表示不同优化目标下的目标函数,例如调度收益、减排效益及新能源入网量等; $L = C_s P$ 为系统能量的运行约束,满足供需守恒; S 为系统各组成部分的开关状态变量, C 为所有部分的耦合系数, C_s 为实际系统耦合系数; $L_{\min} \leq L \leq L_{\max}$ 表示系统输出量满足负荷要求,其中多种能源的需求量会由

于能量转化而存在一定的弹性; $P_{\min} \leq P \leq P_{\max}$ 表示系统的输入量满足能源供应的约束; $g(P) \leq c$ 表示其他不等约束,包括网络约束、设备约束等。

目前已有许多典型调度场景下的优化模型,例如多能输入的居民能源互联系统^[12],利用冷热电联供、蓄电池及储能等设备,结合电动汽车充放电调控及需求响应技术^[13-14],建立供电用电两侧的能源互联优化调度模型,探究居民用能转化性、互补性对系统调度和废气排放的影响。在热电互联的场景下,以传统热电联供为基础,提出引入灵活热源^[15]、旁路补偿供热、电加热补偿、储能补偿供热^[16-18]、区域性供热网接入^[19]等多样化电热互联方案。此外,利用电转气^[20]、电锅炉储热^[15]等新能源转化、利用与存储的方案,在用电低谷消纳新能源的同时,也能够完成平抑新能源出力波动^[21]、削峰填谷^[20]等调度要求,降低系统运行难度。

基本稳态模型考虑能源互联网在正常情况下的稳定运行情况,建模的变化集中在能源构成、网络结构等方面,主要适用于多能能源集成商对于综合能源网络的规划设计,统筹安排能源从生产(购入)到供应(卖出)的路径与计划,有利于提高能源集成商的投资回报率。

2.1.2 考虑能源差异性的暂态模型

不同能源的能量传递过程存在较大的差异性,例如传递介质流速不同造成各种能源基础设施的动态变化过程可能从几毫秒到几小时不等。例如电能几乎是瞬间传播的,而燃气在管道内的流动则缓慢得多,对于燃气的操作需要更长的反应时间,且储存在管道中的大量燃气无法忽视。在严格处理时需要计及各能源网络不同时间尺度上的变化。在其数学表达式中,通常用变量来表示网络约束的状态量,用偏微分方程来表示流体的连续运动方程,考虑暂态的调度模型在约束条件上更加复杂。

例如,文献[22]建立了详细的气网模型,分别描述了燃气在管段中的运动、管存、压缩机及储气罐等装置的状态变化,在考虑燃气变化特性的同时建立多时段的联合优化模型。文献[23]研究了天然气负荷波动造成的分钟级乃至小时级的缓慢瞬态过程,利用分布参数和时变的状态变量将天然气通过管道的瞬时流动状态描述为沿管道轴线上的一维运动状态,建立描述天然气管道方程的偏微分方程,并采用隐式有限差分法近似求解以保证天然气的运动在空间与时间维度上保持耦合。文献[24]建立瞬态气体流动分析模型,用状态方程、连续性方程和运动方程表现管段内的瞬态气体流动

特征,将压力和流量用管道和时间联系起来,并通过一个有限差分方程求解。

传统的热网模型一般采用统计方法或数据挖掘方法建模,如时间序列分析和神经网络方法,在未知热网系统内部物理特性时通过数据测量进行参数的估计与验证,这种方法使用简单,但是对网络结构、条件的变化适应性差。热网的物理模型则能够明确描述传热的各环节,且对系统变化的适应性强。文献[25]考虑热水网络温度变化的延迟性和储热性,建立了热水网络的水泵、热交换器、发电机组等的温度动力学模型。文献[19]计及热力网络本身的传热损耗、输送延时和容量限制等特点的影响,细化了热网模型,建立了电热能源集成系统运行优化模型,并通过算例分析了热网特点对系统运行的影响,证明了网络精细化建模对能源互联网优化运行的必要性。

能源的差异性是阻碍单能源网络向能源互联网络发展的主要阻碍,考虑能源差异性的暂态模型计及不同能源在自身特性、流动速率、网络结构等方面的特点,对不同能源建立详细的网络模型,在能源互联网的优化调度运行方面提高了精确度。

2.1.3 考虑能源相似性的统一模型

利用能源网络的相似性,可提出适用于多种异质能源的网络求解方法并对能源互联网系统进行统一的最优能量流求解,例如建立类似于电网潮流计算的方法求解天然气的流动,利用基尔霍夫第一定律求解气网的潮流稳态^[26]。在考虑能源相似性情况下,建立统一能量的网络方程进行潮流计算。利用广延量传递的普遍化方程,沿线(管)路积分得到能阻的表达式为:

$$R = \begin{cases} \frac{L}{KA} & K \text{ 为定值} \\ \frac{L}{\lambda A} & K \text{ 不定} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R 为能阻,表征阻碍能量传递的强度; L 为传递线路的长度; K 为广延量传递系数; A 为广延量经过的截面面积; λ 为能量传递系数, $\lambda = KX$ (恒定); X 为强度量。

将电能网络类比到流体网络提出广义基尔霍夫定律。完全耦合互联架构下,对各异质能源网络节点统一编号,基于能量网络的传递规律与网络方程,可建立网络关联矩阵、广延量流量矩阵、回路矩阵及强度量差值矩阵,根据广义基尔霍夫定律和支路特性列方程组求解能量流^[11]。

在最优能量流分析方面,文献[27]采用牛顿法

建立一种能源互联系统的稳态能量流模型,分析了各随机变量的概率分布,并采用蒙特卡洛模拟法求解系统的概率能量流。文献[28]计及随机变量相关性对最优潮流计算的影响,建立考虑相关性的电气互联系统最优潮流计算模型,并采用原对偶内点法求解该非线性规划问题,给出联合运行优化的控制策略,并分析不同相关系数的影响。类似于电力系统经济运行的等耗量微增率准则,文献[29]推导出一种与能源载体的边际成本相关的通用最优调度准则,适用于多种传输介质。

考虑能源相似性的优化调度模型从深层次挖掘能量的本质,力图建立适用于各种形式能源的具备统一特性的能量网络,有助于彻底打破能源类型的壁垒,形成容纳多种特性能量自由转换、流动的能源互联网。

2.1.4 考虑系统随机性的优化模型

目前对系统随机性的处理体现在优化模型的目标、约束、求解等多方面。

在目标函数的处理上可以考虑引入可靠性指标或偏差惩罚项,文献[30]提出一种针对包含风能的综合能源系统的随机优化方法,在安全运行中引入可靠性指标例如损失负荷期望值和未提供的预期能量等,利用合适的场景生成方法为风电和负荷的随机性以及设备随机中断等建立不确定性模型。

在约束的处理上,文献[28]对风速和电、气负荷进行随机性建模,利用基于 Nataf 变换方法处理电网与气网的随机变量,使非正态的相关随机变量转变为不相关的标准正态分布随机变量。

在模型求解的处理上可以利用概率分布或多阶段规划等方法,文献[27]研究系统注入的能量的不确定性,利用蒙特卡洛模拟法生成各状态变量的概率分布,利用概率潮流的思想,求解网络的最优概率能量流。文献[31]对一个包含风电、储能和需求响应的系统进行优化,在随机性环境下建立了关于系统建设、操作、可靠性及排放的成本函数,提出一个两阶段随机规划,在第一阶段以不受随机情况影响的变量为决策变量,在第二阶段以风电出力、价格及需求等随机变量为决策变量,并通过大量算例分析得出不确定性对系统运行的影响及系统各组成部分对于多种不确定性的响应方式。

考虑系统随机性的优化模型一方面能够在普通的优化调度模型基础上增强其对于负荷、出力波动的包容性,提高系统的坚强性,另一方面也能够利用多种能源之间的转化增强系统对随机性的处理能力,能够充分体现能源互联网消纳更多可再生

能源的特性与优越性。

2.2 求解方法

能源互联网的优化调度问题涉及多个能源网络之间的协同优化,是典型的非线性规划问题,其求解思路基本可分为两种:联合优化及主从优化,联合优化力求直接求解能源互联网的优化问题,主从优化则通过主问题与子问题将优化进行解耦,两种求解思路各有其常用的方法,有时也会交叉使用。

2.2.1 联合优化

联合优化中往往利用一些成熟的优化求解器来简化求解,如在 MATLAB 下调用 CPLEX^[17]或使用 IBM ILOG CPLEX^[19],文献[20]采用 GAMS 优化软件中的基于内点法的 IPOPT 求解器对该优化问题进行求解,文献[22]利用 Dash Xpress-SLP 连续线性规划求解器求解多时段的电气混合模型。

除现有的优化软件以外,智能算法思路简单、使用便利,在对优化求解的速度要求不高时也是很好的求解方法,文献[32]利用改进的智能单粒子算法将同一时段同类型机组出力组成子矢量分别更新迭代,实现动态调节,文献[33]将动态目标引入粒子群算法,实现多目标的粒子群优化,文献[15]利用引入精英保留策略的遗传算法求解经济调度问题,在已知出力的情况下形成相对最优的储放热计划,进而修改问题元素并返回适应度。出于问题求解的需要,很多研究对于非线性方程采取了线性化处理。通过分段进行线性化处理是常用的方法,文献[19]将成本函数进行分段线性化处理,使问题转化为一个 0-1 整数规划问题。文献[34]建立了气网的气流运动方程,将非线性的一般流体方程进行分段线性化处理,从而形成一个能够达到全局最优的混合整数非线性规划问题。

联合优化的求解思路是整体的,在一次问题的求解中解决多个网络中的优化,并兼顾到网络之间的互相影响,其中智能算法由于其求解速度和精度的影响,相对来说更适合求解较为简单的模型,对于复杂的网络模型可以选取适合的求解器求解。

2.2.2 主从优化

能源互联网的主从优化求解方法,关键在于主从问题的设置。文献[13]针对于储热式热电机组与电锅炉联合系统设置电锅炉供热比例子问题与经济调度主问题,不断迭代形成最优电锅炉供热比例以及最经济调度计划结果,求解弃风消纳协调调度的最优方案。电热系统的主从优化通常考虑包含电网和气网调度两个子问题的双层优化,文献[35]利用拉格朗日松弛算法迭代计算外层电能的

调度,内层通过梯度下降法求解热计算的非线性优化问题,在求解中外层优化将热约束条件传递到内层优化中;文献[23]从独立系统运营商(ISO)的角度运行,以电网为上层调度,其气负荷由下层的气网调度进行优化,并反馈到电网调度。Benders分解算法将具有复杂变量的问题分解为线性规划和整数规划,用割平面的方法分解出主问题与子问题,通过迭代的方法求解出全局最优解,是电力系统运行规划中很常用的算法。文献[36]提出一种Benders分解算法,将热、电经济调度问题分解为主问题和子问题,子问题产生新的不等式约束添加到主问题的约束中,不断迭代直到找到一个收敛的最优解。文献[37]则是在主问题中对网络约束进行拉格朗日松弛并且根据系统越限情况更新乘子,分解为各机组的子问题,利用动态规划方法求解最优解。

主从优化方法的求解思路是对模型的拆分,将复杂的问题根据其主从关系进行拆解,分别求解以降低问题的求解难度。由于能源互联网中存在多个网络的互联,容易想到将各网络的优化拆分,更加适合建模精确、网络复杂的问题。

能源互联网的运行优化问题求解方法种类繁多,上述分类综合各方法特点进行阐述,并不能详尽地列举所有方法,其他例如动态实时预测与反馈的滚动优化算法^[32]、结合牛顿法和内点法的进化算法^[38-40]及和声算法^[41]等,均是根据其问题与建模特点而提出的具有针对性的求解方法。

3 结语

文中结合能源互联网的国内外研究现状,阐述了能源互联系统在运行调度方面的研究现状,分别对能源互联网在稳态情况下和考虑能源差异性、相似性、系统随机性的优化调度模型进行了分析。国外对于能源互联网的基础架构设计与支撑设备研究起步较早,相对来说国内对能源互联网的探索仍处于初级阶段,而能源互联网可以合理优化能源使用,充分提高系统经济性,在国内需要加快相关的研究与推广。针对目前国内外的研究现状,提出以下3点建议。

(1) 能源互联网的终极目标在于建立一个无差别能量流动网络。一方面,目前对于异质性能源的统一调度建模还仅仅停留在理论层面,缺乏具备实际意义的完全耦合的能源互联网模型,还需要在相关领域进行深入研究;另一方面,传统的能源网络建设成熟、体制健全,在能源互联网的现实运行调

度中,需要充分考虑到原有架构的影响,通过自然过渡达到统一调配不同体系的资源、设备及人力的调度目标。

(2) 能源互联网对于可再生能源的发展有一定促进作用,能源互联网优化调度下的新能源消纳和平抑新能源出力波动的潜力评估将是未来的发展方向之一。

(3) 能源互联网的能源转换环节可以存在于源侧与负荷侧,而目前的优化调度主要考虑源侧的能源转换环节。负荷侧的能源转换可以认为是能源互联网背景下的新型需求响应,对于包含多能需求响应的能源互联网优化调度的研究是未来的发展方向之一。

参考文献:

- [1] 金艳鸣,谭雪,焦冰琪,等. 基于可计算一般均衡模型的全局能源互联网经济社会效益分析[J]. 智慧电力,2018,46(5):1-7.
JIN Yanming, TAN Xue, JIAO Bingqi, et al. Study on economic and social benefits of global energy internet based on computable general equilibrium model[J]. Smart Power, 2018,46(5):1-7.
- [2] 夏彦辉,董宸,李鹏,等. 一种基于天然气发电的园区能源互联网构建方案[J]. 智慧电力,2017,45(11):19-23,56.
XIA Yanhui, DONG Chen, LI Peng, et al. Construction scheme for park energy internet based on natural gas power generation [J]. Smart Power, 2017,45(11):19-23,56.
- [3] HOLMES J. A more perfect union: energy systems integration studies from Europe [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2013, 11(5):36-45.
- [4] OMALLEY M, KROPOSKI B. Energy comes together: the integration of all systems [Guest Editorial][J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2013, 11(5):18-23.
- [5] 张杨,厉彦忠,谭宏博,等. 天然气与电力长距离联合高效输送的可行性研究[J]. 西安交通大学学报,2013,47(9):1-7.
ZHANG Yang, LI Yanzhong, TAN Hongbo, et al. Efficient long-distance energy transmission conception[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(9):1-7.
- [6] 王明友,程新红,黄艳,等. 燃气冷热电三联供与地源热泵的联合应用[J]. 暖通空调,2012,42(8):64-67.
WANG Mingyou, CHENG Xinhong, HUANG Yan, et al. Application of combined cooling heating and power and ground-source heat pump systems[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2012, 42(8):64-67.
- [7] LIU X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Energy Procedia, 2014, 61:155-159.
- [8] AN S, LI Q, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES. IEEE, 2004:138-143.

- [9] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1):145-155.
- [10] 李杨, 刘伟佳, 赵俊华, 等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3680-3688.
LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3680-3688.
- [11] 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10):66-76.
CHEN Haoyong, WEN Junzhong, WANG Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10):66-76.
- [12] BRAHMAN F, HONARMAND M, JADID S. Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system [J]. Energy & Buildings, 2015, 90:65-75.
- [13] 吕海博, 郭旗, 刘国峰. 电动汽车充电桩信息维护管理系统的设计与应用[J]. 供用电, 2018, 35(3):86-92, 16.
LYU Haibo, GUO Qi, LIU Guofeng. Designing and implementation of electric vehicle charging piles information maintenance and management system [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(3):86-92, 16.
- [14] 宣宁平, 钟成元, 朱乾龙, 等. 计及电动汽车充电负荷的微电网优化配置研究[J]. 供用电, 2018, 35(4):26-31.
XUAN Ningping, ZHONG Chengyuan, ZHU Qianlong, et al. Optimal allocation of microgrid with integration of electric vehicles charging load[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(4):26-31.
- [15] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15):4072-4080.
CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(15):4072-4080.
- [16] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5):79-85.
LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Optimal operating strategy of integrated power system with wind farm, CHP unit and heat storage device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5):79-85.
- [17] 于婧, 孙宏斌, 沈欣炜. 考虑储热装置的风电-热电机组合优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6):139-145.
YU Jing, SUN Hongbin, SHEN Xinwei. Optimal operating strategy of integrated power system with wind farm, CHP unit and heat storage device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):139-145.
- [18] 陈璟华, 梁丽丽, 郭壮志, 等. 有效消纳风电的储热与储能装置热-电联合系统[J]. 陕西电力, 2017, 45(5):69-74.
CHEN Jinghua, LIANG Lilil, GUO Zhuangzhi, et al. Wind power accommodated electricity-heat combined system with thermal storage and energy storage device[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5):69-74.
- [19] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3596-3604.
GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(14):3596-3604.
- [20] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 计及电转气的电-气互联综合能源系统削峰填谷研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16):4601-4609.
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2017, 37(16):4601-4609.
- [21] 吴杰, 丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3):7-12.
WU Jie, DING Ming. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using self-adaptive wavelet packet decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3):7-12.
- [22] CHAUDRY M, JENKINS N, STRBAC G. Multi-time period combined gas and electricity network optimisation [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7):1265-1279.
- [23] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow [J]. Chaos, 2011, 21(2):531.
- [24] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4):1234-1244.
- [25] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1):12-22.
- [26] LI Q, AN S, GEDRA T W. Solving natural gas loadflow problems using electric loadflow techniques [J]. Proc of the North American Power Symposium, 2003.
- [27] 陈胜, 卫志农, 孙国强, 等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24):6331-6340.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the Chinese Society for

- Electrical Engineering, 2015, 35(24):6331-6340.
- [28] 孙国强, 陈霜, 卫志农, 等. 计及相关性的电一气互联系统概率最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2015(21):11-17.
SUN Guoqiang, CHEN Shuang, WEI Zhinong, et al. Probabilistic optimal trend of electrical-gas interconnected systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(21):11-17.
- [29] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1):145-155.
- [30] DOLATABADI A, MOHAMMADI-IVATLOO B, ABAPOUR M, et al. Optimal stochastic design of wind integrated energy hub[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, PP(99):1-1.
- [31] PAZOUKI S, HAGHIFAM M R. Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 80:219-239.
- [32] 宋卓然, 赵琳, 张子信, 等. 热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24):110-116.
SONG Zhuoran, ZHAO Lin, ZHANG Zixin, et al. Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24):110-116.
- [33] 陈晓波. 多能互补热电联产系统运行调度优化研究[D]. 浙江大学, 2017.
CHEN Xiaobo. Study on the optimal scheduling of the cogeneration system[D]. Zhejiang University, 2017.
- [34] CORREA-POSADA C M, SANCHEZ-MARTIN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):3347-3355.
- [35] GUO T, HENWOOD M I, VAN OOIJEN M. An algorithm for combined heat and power economic dispatch [J]. Power Systems IEEE Transactions on, 1996, 11(4):1778-1784.
- [36] ABDOLMOHAMMADI H R, KAZEMI A. A benders decomposition approach for a combined heat and power economic dispatch[J]. Energy Conversion & Management, 2013, 71(1):21-31.
- [37] SHAHIDEHPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5):1042-1056.
- [38] UNSIHUAY C, LIMA J W M, SOUZA A C Z D. Modeling the integrated natural gas and electricity optimal power flow[C]// Power Engineering Society General Meeting. IEEE, 2007:1-7.
- [39] WONG K P, ALGIE C. Evolutionary programming approach for combined heat and power dispatch[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 61(3):227-232.
- [40] 李虎成, 袁宇波, 张小易, 等. 全球能源互联网下的受端大电网柔性控制策略探讨[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(3):10-12.
LI Hucheng, YUAN Yubo, ZHANG Xiaoyi, et al. The flexible control strategy study of receiving end large power grid under global energy connection [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3):5-9.
- [41] KHORRAM E, JABERIPOUR M. Harmony search algorithm for solving combined heat and power economic dispatch problems[J]. Energy Conversion & Management, 2011, 52(2):1550-1554.

作者简介:



杨济如

杨济如(1994),女,硕士在读,研究方向为需求侧管理、能源互联网(E-mail:213122147@seu.edu.cn);

高赐威(1977),男,教授,博士生导师,研究方向为电力市场、电力需求侧管理及需求响应、电力规划、电动汽车接入电网(E-mail:ciwei.gao@seu.edu.cn);

苏卫华(1977),男,硕士,高级工程师,从事电网规划、负荷预测工作。

A brief review to the energy internet and its optimal scheduling

YANG Jiru¹, GAO Ciwei¹, SU Weihua²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast university, Nanjing 210096, China;

2. Songjiang Power Supply Company, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 201600, China)

Abstract: The energy Internet can utilize a variety of energy sources comprehensively, optimize the scheduling with the redundancy of paths of energy transportation and improve the efficiency and economy. Based on the analysis of the operation mechanism and architecture design, four types of optimal scheduling model are expounded, including the basic model in the steady state, the transient model considering the energy difference, the unified model considering the energy similarity and the model considering the randomness of the system. And the application scenarios, modeling characteristics and solving methods of all kinds of optimization scheduling model are introduced.

Keywords: the energy Internet; integrated energy system; optimized operation; scheduling model

(编辑 方晶)