

考虑环境因素的多能源系统交直流混合供能优化策略

缪 妙, 李 勇, 曹一家, 王姿雅, 邹 尧, 乔学博

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410000)

摘要: 有效提高能源利用率、促进新能源消纳以及减少环境污染成本是当下发电用电企业十分关注的问题。提出并建立了一种多能源系统交直流混合并网供能优化模型, 实现了电能的交直流柔性变换与多能源的综合利用。综合分析了能源局域网内交直流系统供电特性, 结合供热系统供热特性、储能装置的充放特性以及煤炭的全生命周期, 考虑功率平衡约束、各装置运行约束以及环境成本约束。利用 GAMS 优化软件求得调度周期内, 传统交流并网模型和所搭建模型各系统的最佳出力及总运行成本, 将两者的运行结果从供电供热等方面比较, 验证了所述模型在减少运行成本、降低有害气体排放量以及削减煤耗量方面的优势。

关键词: 能源互联网; 交直流混合网络; 新能源; 经济调度; 环境保护

0 引言

伴随经济发展所带来的能源短缺问题以及环境污染问题, 日益成为关注的焦点。为更好地提高能源利用效率, 向“环境友好型”社会转型, 能源互联网的概念在近年来进入人们的视野^[1]。能源互联网的发展目标主要以能源市场化、高效化与绿色化为主, 旨在打破传统能源系统中不同能源系统孤立规划和运行的壁垒, 建立开放互联的综合能源系统^[2]。本着“有效集成, 高度协同, 积极互动”的原则, 将多种能源系统(如电、气、热网)相互联结^[3], 以达到提高能效的目的。对能源的使用逐渐从以化石能源为主向风能、太阳能等可再生能源以及天然气等清洁能源多样化发展。这些分布式电源作为重要的能源供给方式在家庭、楼宇、工厂供电中得以应用。

另外, 随着电力电子技术的快速发展, 在推进供能种类多样化的同时, 也促进了电网结构与用户用电方式的巨变^[4-5]。网络内常见的分布式电源(如光伏电池、燃料电池)多为直流电源, 家庭用户中很多电气设备本质上就是采用直流电驱动, 例如 LED 照明灯、电动车等, 工业电解同样需要大功率的直流电。当面临电源与负荷都存在交流与直流两种方式时, 将直流分布式电源与储能装置接入直流侧将节省大量的换流环节, 可降低能量损耗^[6]。与此同时,

供能方式的选择会影响到系统运行成本与有害气体的排放量。

文献[7]提出考虑污染气体排放的热电联供优化运行方法, 主要基于微型燃气轮机的发电与制热效率以及污染排放特性进行优化问题研究, 文献一方面没有考虑多种负荷类型, 另一方面只对交流系统供电情况进行了优化运行分析; 文献[8]通过比较不同类型储能装置的混合电力系统并网经济调度运行结果, 总结出铅酸蓄电池是投资最低最优的选择, 但文献只考虑了交流母线并网, 且缺乏对环境污染的惩罚成本; 文献[9]建立了含光伏和蓄能的冷热电联供模型, 主要针对楼宇建筑供能, 考虑的能源种类较少, 且未考虑机组供能造成的环境污染问题。本文所搭建的交直流混合并网供能优化模型在针对工业园区供能时考虑了燃煤锅炉煤炭全生命周期的环境排放。

本文以分布式能源互联网优化运行作为研究对象, 首先搭建了一种多能源系统的经济调度结构图, 并针对模型中各个模块建立了相应的数学模型; 综合考虑分布式电源的出力特性、功率限制等运行约束, 建立交直流混合并网运行时的能量流动模型, 采用 GAMS 优化软件求得网内各单元最佳出力、运行成本以及环境成本, 并与另一种交直流独立系统并网模型进行比较分析。

1 能源局域网交直流混合并网数学模型

目前, 大多是对一定范围内的多能源系统进行统一调度, 形成局域能源互联网。本文研究生态工

收稿日期: 2017-09-05; 修回日期: 2017-12-23。

上网日期: 2018-01-16。

国家自然科学基金资助项目(51520105011); 湖南省科技重大专项(2015GK1002); 湖湘青年英才项目(2015RS4022)。

业园区部分厂区所构成的能源局域网,其多能源系统交直流混合并网经济调度结构图如图1所示。网内主要包括光伏电池(photovoltaic cell, PV)、风电机组(wind turbine, WT)、燃料电池(fuel cell, FC)、燃气轮机(gas turbine, GT)、燃煤锅炉(coal fired boiler, CFB)、电锅炉(electric boiler, EB)、储能装置(energy storage, ES)等单元。其中,光伏电池和燃料电池作为直流电源,而风电机组和燃气轮机作为交流电源;另外,燃气轮机和溴冷机、燃煤锅炉以及电锅炉构成了供热系统。能源局域网与交直流外网、天然气传输网、热网络以及煤炭运输网相连接,共同组成多能源系统交直流并网模型。

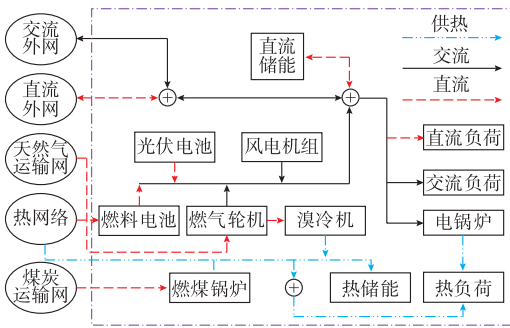


图1 能源局域网交直流混合并网经济调度结构
Fig.1 Structure of hybrid AC/DC on economic dispatch for local area energy network

1.1 直流电源系统

本文考虑的能源局域网中的直流电源系统主要包含了光伏电池和燃料电池。鉴于光伏电池的输出功率取决于环境因素,如光照强度、温度等,具有较大随机性,因此系统仿真时在典型日光伏电池输出功率预测数据的基础上增加预测误差 σ ,且假设 σ 呈正态分布^[10],并根据其概率密度函数生成了不同的光伏出力场景。

本文采用质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC),以天然气作为一次能源,发电效率较高且排放气体仅为二氧化碳。

t 时段燃料电池的天然气消耗成本与其电功率输出特性^[7]为:

$$C_{FC}(t) = p_{NG} \frac{\int_t^{t+1} O_{FC}(t) dt}{\xi_{FC} G_{LHV}} \quad (1)$$

式中: $C_{FC}(t)$ 和 $O_{FC}(t)$ 分别为 t 时段燃料电池的燃料成本和输出功率; ξ_{FC} 为燃料电池发电效率,发电效率根据燃料电池种类而有所不同,一般为0.4~0.65,本文取0.6; G_{LHV} 为天然气低热值,取值 $9.7(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$; p_{NG} 为单位天然气的价格,本文取值为 $3.5 \text{元}/\text{m}^3$ 。

1.2 交流电源系统

交流电源系统主要包含风电机组和燃气轮机。与光伏电池类似,风电机组的出力与所处环境因素(如风速等)有关,具有较大的随机性与波动性,因此基于典型日的风电机组出力曲线,并结合相应的预测误差,生成了多个风电机组出力场景。

燃气轮机是一种依靠燃料与空气混合燃烧生成高温高压燃气推动轮轴上叶轮旋转的机械装置。 t 时段燃气轮机所消耗的天然气成本与其输出功率的关系特性^[10]为:

$$C_{GT}(t) = p_{NG} \frac{\int_t^{t+1} O_{GT}(t) dt}{\xi_{GT}(t) G_{LHV}} \quad (2)$$

式中: $C_{GT}(t)$ 和 $O_{GT}(t)$ 分别为 t 时段燃气轮机的燃料成本和输出功率; ξ_{GT} 为燃气轮机发电效率,本文取0.34。

燃气轮机的启停成本为:

$$C_{ss}(t) = c_{ss} |K_{ss}(t) - K_{ss}(t-1)| \quad (3)$$

$$K_{ss}(t) = \begin{cases} 1 & O_{GT}(t) > 0 \\ 0 & O_{GT}(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $C_{ss}(t)$ 为 t 时段燃气轮机的启停费用; c_{ss} 为机组单位启停费用; $K_{ss}(t)$ 为 t 时段燃气轮机启停状态。

1.3 供热系统

燃气轮机一方面由天然气燃烧产生的高品质热能驱动发电^[11],另一方面所排出的高温余热烟气由溴冷机处理后用于供暖。其供热数学模型为:

$$h_{GT}(t) \xi_{GT} = O_{GT}(t) (1 - \xi_{GT} - \xi_L) \quad (5)$$

$$H_{GT}(t) = h_{GT}(t) \xi_H H_{coe} \quad (6)$$

式中: $h_{GT}(t)$ 为 t 时段燃气轮机排放的烟气余热; ξ_L 为收集烟气过程中的热量损失率; $H_{GT}(t)$ 为 t 时段溴冷机的制热量; H_{coe} 和 ξ_H 分别为溴冷机制热系数和烟气回收率。

电锅炉——供热系统组成部分之一。电锅炉是将电能转化为热能,在当前的系统中,在电价相对较低时,增加电负荷的使用从而减少天然气能源的消耗,一定程度上起到填谷的作用。电锅炉的电热转换^[7]特性为:

$$H_{EB}(t) = O_{EB}(t) \xi_{E \rightarrow H} \quad (7)$$

式中: $O_{EB}(t)$ 和 $H_{EB}(t)$ 分别为 t 时段电锅炉消耗的电量和产生的热能; $\xi_{E \rightarrow H}$ 为电锅炉将电能转化为热能的效率。

燃煤锅炉——供热系统另一组成部分。其所产生的热量同消耗燃料煤炭成本关系的数学模型为:

$$C_{CFB}(t) = p_{coal} \frac{\int_t^{t+1} H_{CFB}(t) dt}{\xi_{CFB} C_{LHV}} \quad (8)$$

$$M_{\text{coal}}(t) = \frac{H_{\text{CFB}}(t)}{\xi_{\text{CFB}} C_{\text{LHV}}} \quad (9)$$

式中: $C_{\text{CFB}}(t)$ 和 $H_{\text{CFB}}(t)$ 分别为 t 时段燃煤锅炉的燃料成本和输出的热功率; p_{coal} 为标准煤的价格, 定为 700 元/t, 国内将每千克含热 29 306 kJ 定为标准煤, 也称标煤; C_{LHV} 为标煤的燃烧低热值, 取值 8.14(kW·h)/kg; ξ_{CFB} 为燃煤锅炉的热效率, 国内的工业锅炉效率通常为 50%~70%, 一般实际运行热效率在 60%~80% 左右, 本文取值 70%; $M_{\text{coal}}(t)$ 为 t 时段燃煤锅炉的煤耗量。

1.4 储能系统

本文涉及的储能系统主要包括电储能和热储能装置。储电装置能够快速吸收或释放电能, 一方面能够有效弥补网络中可再生能源的随机性造成的输出不稳定^[3], 同时, 在其发电量较大时促进新能源就地消纳; 另一方面在一定程度上达到削峰填谷的目的, 从而协调网络内“源-荷”间的不均衡^[2]。

本文采用蓄电池容量与充放电功率特性^[10]为:

$$E_{\text{SB}}(t) - E_{\text{SB}}(t-1) = \left(O_{\text{SB-ch}}(t) \xi_{\text{SB-ch}} - \frac{O_{\text{SB-dis}}(t)}{\xi_{\text{SB-dis}}} \right) \Delta t \quad (10)$$

式中: $E_{\text{SB}}(t)$ 为 t 时段蓄电池的容量; $O_{\text{SB-ch}}(t)$, $O_{\text{SB-dis}}(t)$ 和 $\xi_{\text{SB-ch}}$, $\xi_{\text{SB-dis}}$ 分别为 t 时段蓄电池充、放电功率和效率。

热储能装置在一定程度上解耦了热负荷与燃气轮机出力, 本文选用蓄热罐作为储热装置, 其容量与吸放热的动态模型^[12-13]为:

$$E_{\text{HES}}(t) - E_{\text{HES}}(t-1) = \left(H_{\text{HES-ch}}(t) \xi_{\text{HES-ch}} - \frac{H_{\text{HES-dis}}(t)}{\xi_{\text{HES-dis}}} \right) \Delta t \quad (11)$$

式中: $E_{\text{HES}}(t)$ 为 t 时段蓄热罐的容量; $H_{\text{HES-ch}}(t)$, $H_{\text{HES-dis}}(t)$ 和 $\xi_{\text{HES-ch}}$, $\xi_{\text{HES-dis}}$ 分别为 t 时段蓄热罐吸、放热功率和效率。

1.5 煤炭运输系统

为了综合考虑燃煤锅炉消耗煤炭所造成的环境影响, 将煤炭的全生命周期中包括煤炭开采、运输以及燃烧供热三个时期产生的环境排放计入环境成本^[14]。由于煤炭在开采和运输过程中所造成的环境污染治理问题处理方法不够完善, 将其定为污染排放的惩罚成本, 而煤炭在燃烧过程中排放烟气的污染问题定为环境排放的治理成本。

煤炭准备时期(开采+运输)的环境排放惩罚成本与煤耗量的关系为:

$$C_{\text{GP}}(t) = \sum_{X=0}^2 p_X g_{\text{coe}}^X M_{\text{coal}}(t) \quad (12)$$

式中: $C_{\text{GP}}(t)$ 为 t 时段煤炭准备时期环境排放惩罚

成本; $X=0, 1, 2$ 分别代表排放烟气的种类 CO_2 , SO_2 , NO_x ; p_X 为烟气的惩罚价格; g_{coe}^X 为煤炭准备阶段烟气排放系数, 分别为 0.102, 0.224, 0.379。

煤炭燃烧供热时期的环境排放治理成本与供热功率的关系为:

$$C_X(t) = \sum_{X=0}^2 c_X g_{\text{eff}}^X H_{\text{CFB}}(t) \quad (13)$$

式中: $C_X(t)$ 为 t 时段煤炭燃烧环境排放治理成本; g_{eff}^X 为燃煤锅炉各烟气排放系数; c_X 为各类烟气的治理单价。

2 能源互联网混合上网经济性模型

2.1 目标函数

本文研究的交直流混合并网模型经济优化调度的目标主要是在网络运行约束下, 协调各单元模块出力, 在一定环境污染气体排放约束的基础上, 实现总成本最优。

$$\min C_{\text{total}} = \sum_{t=0}^{23} (C_{\text{OPEX}}(t) + C_{\text{ENEX}}(t) + C_{\text{OISEX}}(t) + C_{\text{GP}}(t) + C_{\text{ss}}(t)) \Delta t \quad (14)$$

$$C_{\text{OPEX}}(t) = C_{\text{FC}}(t) + C_{\text{GT}}(t) + C_{\text{CFB}}(t) \quad (15)$$

$$C_{\text{ENEX}}(t) = C_{\text{NO}_x}(t) + C_{\text{SO}_2}(t) + C_{\text{CO}_2}(t) \quad (16)$$

$$C_{\text{OISEX}}(t) = C_{\text{PE}}(t) - C_{\text{SE}}(t) \quad (17)$$

式中: C_{total} 为总的运行成本; $C_{\text{OPEX}}(t)$, $C_{\text{ENEX}}(t)$, $C_{\text{OISEX}}(t)$ 分别为 t 时段网络内各设备的燃料成本、治理尾气的环境治理成本、与交直流母线联络产生的成本; $C_{\text{PE}}(t)$ 和 $C_{\text{SE}}(t)$ 分别为 t 时段购电和售电情况; $C_{\text{NO}_x}(t)$, $C_{\text{SO}_2}(t)$, $C_{\text{CO}_2}(t)$ 为 t 时段设备供热供电而排放烟气的环境治理成本。

2.2 约束条件

交直流混合上网模型在运行时主要满足功率平衡、热平衡以及各模块单元的运行约束。

1) 交流负荷功率平衡约束

$$P_{\text{ACLload}}(t) + O_{\text{EB}}(t) + P_{\text{acOES}}(t) + O_{\text{SB2-ch}}(t) = O_{\text{ac}}(t) + O_{\text{SB2-dis}}(t) \quad (18)$$

$$P_{\text{acOES}}(t) = P_{\text{acOES-PE}}(t) - P_{\text{acOES-SE}}(t) \quad (19)$$

$$O_{\text{ac}}(t) = a_1(t)(O_{\text{GT}}(t) + O_{\text{WT}}(t)) + b_1(t)(O_{\text{FC}}(t) + O_{\text{PV}}(t)) E_{\text{eff}}^{\text{DA}} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{ACLload}}(t)$, $P_{\text{acOES}}(t)$, $O_{\text{SB2-ch}}(t)$, $O_{\text{SB2-dis}}(t)$, $P_{\text{acOES-PE}}(t)$, $P_{\text{acOES-SE}}(t)$ 分别为 t 时段交流负荷、能源局域网与交流外部电网的联络功率、交流系统中蓄电池的充放电功率、向交流电网购电量和向交流电网售电量; $O_{\text{ac}}(t)$ 为 t 时段由交直流混合网络内部电源向交流负荷所供电功率; $E_{\text{eff}}^{\text{DA}}$ 为直流转换为交流的效率; $a_1(t)$ 为 t 时段交流系统向交流负荷供电的比例系统; $b_1(t)$ 为 t 时段直流系统向交流负荷

供电的比例系统。

2) 直流负荷功率平衡约束

$$P_{\text{dcLoad}}(t) + P_{\text{dcOES}}(t) + O_{\text{SB1-ch}}(t) = O_{\text{dc}}(t) + O_{\text{SB1-dis}}(t) \quad (21)$$

$$P_{\text{dcOES}}(t) = P_{\text{dcOES-PE}}(t) - P_{\text{dcOES-SE}}(t) \quad (22)$$

$$O_{\text{dc}}(t) = a_2(t)(O_{\text{GT}}(t) + O_{\text{WT}}(t))E_{\text{eff}}^{\text{A-D}} + b_2(t)(O_{\text{FC}}(t) + O_{\text{PV}}(t)) \quad (23)$$

$$a_1(t) + a_2(t) = 1 \quad (24)$$

$$b_1(t) + b_2(t) = 1 \quad (25)$$

式中: $P_{\text{dcLoad}}(t)$, $P_{\text{dcOES}}(t)$, $P_{\text{dcOES-PE}}(t)$, $P_{\text{dcOES-SE}}(t)$, $O_{\text{SB1-ch}}(t)$, $O_{\text{SB1-dis}}(t)$ 分别为 t 时段直流负荷、能源局域网与直流外部电网的交互功率、向直流通网购电量、向直流通网售电量和直流系统中蓄电池充放电功率; $O_{\text{dc}}(t)$ 为 t 时段能源局域网内部电源向直流负荷所供电功率; $E_{\text{eff}}^{\text{A-D}}$ 为将交流转换为直流的效率; $a_2(t)$ 为 t 时段交流系统向直流负荷供电的比例系数; $b_2(t)$ 为 t 时段直流系统向直流负荷供电的比例系数。

3) 热平衡约束

$$\frac{H_{\text{Load}}(t)}{H_{\text{web}}^{\text{eff}}} = H_{\text{GT}}(t) + H_{\text{EB}}(t) + H_{\text{CFB}}(t) + H_{\text{HES-dis}}(t) - H_{\text{HES-ch}}(t) + H_{\text{web}}(t) \quad (26)$$

式中: $H_{\text{Load}}(t)$ 为 t 时段能源局域网内采暖负荷; $H_{\text{web}}(t)$ 为 t 时段外部热网络向能源局域内网供热; $H_{\text{web}}^{\text{eff}}$ 为热源由供应点传送至负荷处的效率, 为方便计算, 因负荷点距离供应点不同造成损耗忽略不计。

4) 与电、热网络交互功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{acOES-PE}}(t) \leq P_{\text{acOES-PE}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{acOES-SE}}(t) \leq P_{\text{acOES-SE}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{dcOES-PE}}(t) \leq P_{\text{dcOES-PE}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{dcOES-SE}}(t) \leq P_{\text{dcOES-SE}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (27)$$

$$0 \leq H_{\text{web}}(t) \leq H_{\text{web}}^{\text{max}} \quad (28)$$

式中: $P_{\text{acOES-PE}}^{\text{max}}$, $P_{\text{acOES-SE}}^{\text{max}}$ 和 $P_{\text{dcOES-PE}}^{\text{max}}$, $P_{\text{dcOES-SE}}^{\text{max}}$ 分别为能源局域网向交流和直流通网购电、售电的最大值; $H_{\text{web}}^{\text{max}}$ 为外部热网络向能源局域网供热的最大值。

5) 蓄电池储能约束

$$\begin{cases} E_{\text{SB}}(23) = E_{\text{SB}}(0) \\ E_{\text{SB}}^{\text{min}} \leq E_{\text{SB}}(t) \leq E_{\text{SB}}^{\text{max}} \\ 0 \leq O_{\text{SB-ch}}(t) \leq O_{\text{SB-ch}}^{\text{max}} \\ 0 \leq O_{\text{SB-dis}}(t) \leq O_{\text{SB-dis}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $E_{\text{SB}}^{\text{min}}$ 和 $E_{\text{SB}}^{\text{max}}$ 分别为蓄电池充放容量最小和最大值; $O_{\text{SB-ch}}^{\text{max}}$ 和 $O_{\text{SB-dis}}^{\text{max}}$ 分别为蓄电池充、放电最大值。

6) 燃气轮机安全约束

$$\left| \frac{O_{\text{GT}}(t) - O_{\text{GT}}(t-1)}{\Delta t} \right| \leq \max \left(\frac{dO_{\text{GT}}(t)}{dt} \right) \quad (30)$$

$$0 \leq O_{\text{GT}}(t) \leq O_{\text{GT}}^{\text{max}} \quad (31)$$

式中: $O_{\text{GT}}^{\text{max}}$ 为燃气轮机运行时的最大功率, 本文燃气轮机最大功率定为 750 kW, 燃气轮机输出功率上下坡度最值分别为 120 kW 和 -120 kW。

7) 蓄热罐储热约束

$$\begin{cases} E_{\text{HES}}(23) = E_{\text{HES}}(0) \\ E_{\text{HES}}^{\text{min}} \leq E_{\text{HES}}(t) \leq E_{\text{HES}}^{\text{max}} \\ 0 \leq H_{\text{HES-ch}}(t) \leq H_{\text{HES-ch}}^{\text{max}} \\ 0 \leq H_{\text{HES-dis}}(t) \leq H_{\text{HES-dis}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $E_{\text{HES}}^{\text{min}}$ 和 $E_{\text{HES}}^{\text{max}}$ 分别为蓄热罐吸热、放热容量最小和最大值; $H_{\text{HES-ch}}^{\text{max}}$ 和 $H_{\text{HES-dis}}^{\text{max}}$ 分别为蓄热罐吸热、放热功率最大值。

8) 煤耗量约束

$$M_{\text{coal}}(t) \leq M_{\text{coal}}^{\text{max}} \quad (33)$$

式中: $M_{\text{coal}}^{\text{max}}$ 为 t 时段的煤耗量上限, 为实现保护环境的目标, 将其设定为 100 kg。

3 算例分析

本文选取某工业园区内的水泥厂中碎石机与窑炉驱动器这两种交直流负荷以及采暖负荷作为研究对象, 其负荷曲线如附录 A 图 A1 所示。以此负荷为研究基础, 采用非线性规划方法, 建立能源局域网交直流混合并网供能模型。

本文建立的模型内各设备相应参数如下: $\xi_{\text{L}} = 0.03$, $H_{\text{coe}} = 1.2$, $\xi_{\text{h}} = 0.9$, $E_{\text{eff}}^{\text{A-D}} = E_{\text{eff}}^{\text{D-A}} = 0.9$, $\xi_{\text{E-H}} = 0.8$; $\xi_{\text{SB-ch}} = \xi_{\text{SB-dis}} = 0.9$, $\xi_{\text{HES-ch}} = \xi_{\text{HES-dis}} = 0.9$, 治理 NO_x , SO_2 , CO_2 这三类烟气的价格分别为 8, 6, 0.023 元/kg, 而惩罚这三类烟气的价格分别为 12, 6, 8 元/kg。各设备污染物排放系数如附录 B 表 B1 所示。

采用分时电价, 谷时段为 0~6 h, 售电价格为 0.13 元/(kW·h), 购电价格为 0.17 元/(kW·h); 峰时段为 11~15 h, 19~22 h, 售电价格为 0.65 元/(kW·h), 购电价格为 0.83 元/(kW·h); 平时段为 7~10 h, 16~18 h 和 23 h, 售电价格为 0.38 元/(kW·h), 购电价格为 0.49 元/(kW·h)。

冬季典型日风电机组和光伏电池的出力预测曲线如图 2 所示, 并分别将风电机组和光伏电池出力预测值的 15% 和 20% 作为其概率密度函数的标准差, 由此生成若干场景。

为验证多能源系统交直负荷混合上网模型的优势, 选取以下两种调度方式进行比较分析, 如图 3 所示。

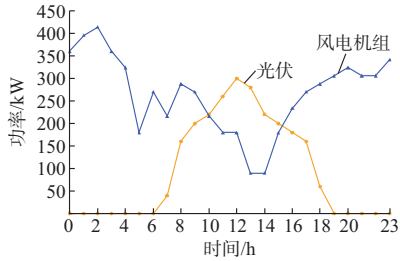
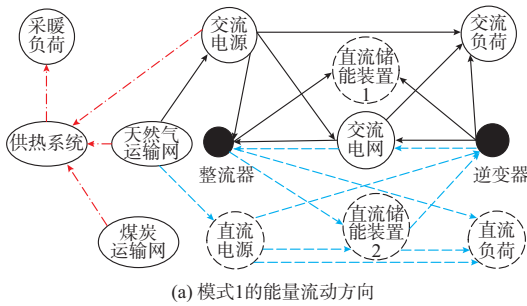
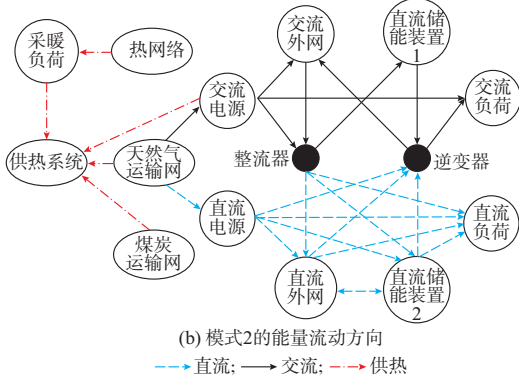


图2 风电机组与光伏出力预测曲线
Fig.2 Forecast curves of photovoltaic and wind turbine output



(a) 模式1的能量流动方向



(b) 模式2的能量流动方向

图3 两种模式的能量流动方向

Fig.3 Energy flow directions in two different modes

1) 模式1是传统交直流负荷供能方法,其能量流向如图3(a)所示。网络内部只能由交直流电源系统分别向交直流负荷供电,且只通过交流母线并网。网络外部由煤炭运输网及天然气运输网提供燃料。

2) 模式2是本文提出的交直流系统联合供能方法,其能量流向如图3(b)所示。网络内部交直流电源不仅可对各自的交直流负荷供电,也可通过整流或逆变器向不同性质的负荷供电,交直流系统分别通过交直流母线并网。网络外部一方面由煤炭运输网及天然气运输网提供燃料,另一方面可由热网络向能源局域网内部供热。

本文利用 GAMS 软件中 CONOPT 求解器对模型的优化求解,两种模式下求解时间分别为 25.99 s 和 18.299 s,模式2 相较模式1 求解时间更

少,效率更高。

两种模式下各个机组的出力以及储能装置的充放电情况见附录 A 图 A2 和图 A3,两种模式下系统向电网购售电情况如图 4 所示,图 4 中 $P_{1acOES1}$ 和 $P_{2acOES1}$ 分别表示模式 1 下直流和交流系统向交流电网购售电量; P_{dcOES2} 和 P_{acOES2} 分别为模式 2 下能源局域网与直流和交流外部电网的交互功率。

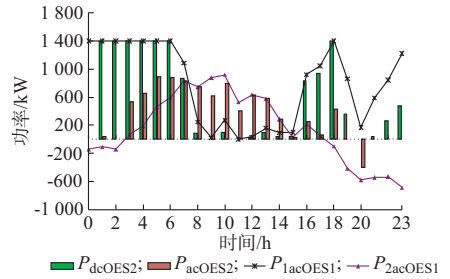


图4 两种模式下向电网购电售电曲线
Fig.4 Curves of purchasing power from grid and selling power to grid in two different modes

从附录 A 图 A1 所示交直流负荷曲线、图 A2 和图 A3 所示的各发电单元出力曲线和图 4 向电网购售电曲线结果可知,在电价谷时段,燃气轮机处于满发状态,其供电量多于交流负荷,在传统模式 1 情况下,多余的能量用于储能装置充电,且不经济地卖给电网;由于直流负荷需求较大,燃料电池投入运行,供电缺额仍需通过电网购电弥补。另外,由于此时购电量达到上限,没有余量为蓄电池充电,只能在电价较高的 7~10 h 为其充电。在模式 2 的情形下,燃气轮机过剩的电量经过整流供给直流负荷,并且在电价低时为蓄电池充电,减少系统向外网的购电量,降低成本的同时,提高了新能源在系统内部消纳率,并减少有害气体的排放。

两种模式下燃煤锅炉和热储能装置输出曲线如图 5 所示。图中变量下标 1,2 表示模式 1,2 下对应的物理量。SO₂, NO_x, CO₂ 气体治理费用以及煤耗量如表 1 所示。

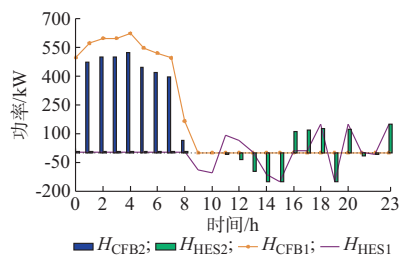


图5 两种模式下燃煤锅炉与热储能输出曲线
Fig.5 Output curves of coal fired boiler and heat storage in two different modes

表 1 两种模式下 SO₂, NO_x, CO₂ 气体治理费及煤耗量
Table 1 Emission cost of SO₂, NO_x, CO₂ and coal consumption in two modes

类型	治理费/(元·d ⁻¹)			煤耗量/ (kg·d ⁻¹)
	SO ₂	NO _x	CO ₂	
模式 1	362.183	420.417	1000.082	710.190
模式 2	223.508	259.444	940.298	438.330
变化率/%	38.28	38.28	5.97	38.28

由附录 A 图 A1 和图 5 所示的热力负荷及其供应结果可得出如下结论。

1) 在 0~7 h 时间段,热负荷远高于交流负荷,此时段电价相对较低,因燃气轮机在供电的同时可供热,故其以最大功率工作,另外此时热网也向负荷供热,从而削减了燃煤锅炉的出力。因此,如表 1 数据所示,煤耗量、SO₂ 与 NO_x 气体的治理费用均减少了 38.28%。

2) 两种模式下,燃气轮机全天的发电量基本一致,一方面是以热定电,在热负荷基本高于电负荷的情况下,燃气轮机出力相同;另一方面燃气轮机对天然气的利用率因其可同时供电与供热而明显高于其他设备。在 9~12 h 时间段,燃气轮机已经最大功率运行,传统模式 1 不能向外网购热,热储能装置蓄热罐投入运行,而所建立模式 2 可由外网对内部供热。

最后,模式 1 和模式 2 分别在供电和供热方面的区别,导致两种模式总运行费用的不同,两者的总运行费用分别为 3.81 万元/d 和 3.49 万元/d,可见,本文建立的供能方式比传统方式降低成本 8.4%。

4 结语

本文提出并建立多能源系统交直流混合并网模型,考虑功率平衡、运行场景和储能装置等约束条件,以实现系统经济运行并提升综合能源利用率。本文从供电与供热两方面分析比较本文提出的供能策略与传统供能模式的优化结果,由此表明,在分时电价以及储能装置的协同作用下,多能源系统交直流混合并网模型在减少总运行成本、削减化石能源使用以及环境友好等方面均具有一定优势。

之后的研究将深入探究系统中各机组的电气特性,多方面考虑运行与环境等成本,细化数学模型,提高算法性能,优化整体模型,进一步促进新能源的消纳能力。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] 刘振亚.全球能源互联网[M].北京:中国电力出版社,2015:199-377.

[2] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光.能源互联网:理念、架构与前沿展望[J].电力系统自动化,2015,39(19):1-8. DOI:10.7500/AEPS20150701007.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.

[3] 张小平,李佳宁,付灏.配电能源互联网:从虚拟电厂到虚拟电力系统(英文)[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3532-3540.
ZHANG Xiaoping, LI Jianing, FU Hao. Distribution power & energy internet: from virtual power plants to virtual power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3532-3540.

[4] 宋强,赵彪,刘文华,等.智能直流配电网研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.

[5] 王守相,陈思佳,谢颂果.考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J].电力系统自动化,2017,41(11):85-90. DOI:10.7500/AEPS20160411007.
WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/DC distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-90. DOI: 10.7500/AEPS20160411007.

[6] MACEDOL H, FRANCOJF, RIDER M J, et al. Optimal operation of distribution networks considering energy storage devices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2825-2836.

[7] 顾伟,吴志.考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J].电力系统自动化,2012,36(14):177-185.
GU Wei, WU Zhi. Multi-objective optimization of combined heat and power microgrid considering pollutant emission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 177-185.

[8] THEO W L, LIM J S, ALWIS R W, et al. An MILP model for cost-optimal planning of an on-grid hybrid power system for an eco-industrial park[J]. Energy, 2016, 116: 1423-1441.

[9] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等.融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J].中国电机工程学报,2017,37(2):581-588.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-588.

[10] LI Yong, ZOU Yao, TAN Yi, et al. Optimal stochastic operation of intergrated low-carbon electric power, natural gas and heat delivery system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 273-283.

[11] 李政平.交直流混合微电网运行优化及仿真分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.

[12] 孙杰,张炳达,杨俊鹏.微网热电储能容量配置优化[J].天津理工大学学报,2017,33(2):1-5.
SUN Jie, ZHANG Bingda, YANG Junpeng. Energy storage capacity optimization for micro grid including electricity and heat[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2017, 33(2): 1-5.

[13] 李正茂,张峰,梁军,等.含电热联合系统的微电网运行优化[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3569-3574.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system [J].

Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3574.

- [14] 王长波, 陈永生, 张力小, 等. 秸秆压块与燃煤供热系统生命周期环境排放对比研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(11): 4418-4426.

WANG Changbo, CHEN Yongsheng, ZHANG Lixiao, et al. Life cycle environmental emission comparison of straw briquette fuel and coal fired heat generation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(11): 4418-4426.

能源系统优化运行。E-mail: miao_miao@hnu.edu.cn

李 勇(1982—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 能源/电力系统优化运行控制等。E-mail: yongli@hnu.edu.cn

曹一家(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统安全与控制、大电网智能优化调度、分布式智能系统理论等。

(编辑 孔丽蓓)

缪 妙(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 综合

Optimization Strategy of Multi-energy Hybrid AC/DC Power System Considering Environmental Factors

MIAO Miao, LI Yong, CAO Yijia, WANG Ziya, ZOU Yao, QIAO Xuebo

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China)

Abstract: It's an immediate priority for many entrepreneurs to effectively improve the efficiency of energy utilization and elimination, as well as environmental protection. A multi-energy hybrid AC/DC power supply model is proposed, which realizes AC/DC flexible transformation of electrical energy and comprehensive utilization of multi-energy resources. A comprehensive analysis of the power supply characteristics of AC/DC power system is made, considering constraint of power balance, operation constraints of each appliance and constraint of environmental cost, combined with characteristics of heat-supply system and energy storage system. The optimal output and total operation cost of traditional communication network model are obtained by GAMS optimization software. The operation results of the two models are compared from power supply, heat supply and other aspects, which verifies the advantages of the proposed model in reducing operating costs, harmful gas emissions and coal consumption.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51520105011), Hunan Provincial Major Project of Science and Technology (No. 2015GK1002) and Huxiang Youth Talent Program of Hunan Province (No. 2015RS4022).

Key words: Energy Internet; AC/DC hybrid network; new energy sources; economic dispatch; environmental protection