

园区综合能源系统规划及优化配置方案

郇嘉嘉¹, 赵瑾², 曾诚玉³, 刘洪⁴, 李吉峰⁴, 牛纪德⁵

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东省广州市 510080; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044; 3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082; 4. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市南开区 300072; 5. 中低温热能高效利用教育部重点实验室(天津大学), 天津市南开区 300072)

Integrated Energy System Planning in Parks and Optimal Allocation Schemes

HUAN Jiajia¹, ZHAO Jin², ZENG Chengyu³, LIU Hong⁴, LI Jifeng⁴, NIU Jide⁵

(1. Power System Planning Research Center of Guangdong Power Grid Co. Ltd., Guangzhou 510080, Guangdong Province, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China; 4. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China; 5. Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, MOE (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China)

摘要: 综合能源系统的优化配置直接影响到投资效益和运行效率, 是综合能源系统规划的关键之一。该文面向园区级综合能源系统, 对影响规划的内外主要因素进行定量分析; 在此基础上, 提出一种以园区综合能源系统全寿命周期等值年成本为目标的优化配置方法, 并以我国南方某园区能源站为例, 进行系统优化配置。通过对不同供电设计方案的对比分析, 提出合理的优化配置方案, 为园区综合能源系统规划提供技术支撑。

关键词: 园区综合能源系统; 规划; 定量分析; 优化配置; 方案对比

Abstract: The optimal allocation of integrated energy system directly affects the efficiency of investment and operation, which is one of the keys of integrated energy system planning. This paper analyzed the main internal and external factors affecting the planning for the park level comprehensive energy system. On the basis, an optimal allocation method with the equivalent annual cost of the whole life cycle of the park's comprehensive energy system as the target was proposed, and an energy station in a park in south China was taken as an example to optimize the allocation of the system. Through the comparative analysis of different energy supply design schemes, a reasonable optimal allocation scheme was proposed to provide technical support for the planning of the park's integrated energy system.

基金项目: 南方电网公司科技项目 (GDKJQQ20161202)
Technical Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GDKJQQ20161202)

rated energy system.

Keywords: integrated energy system in parks; planning; quantitative analysis; optimal allocation; scheme contrast

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0246

0 引言

综合能源系统的构建是促进可再生能源消纳、实现多种形式能源协调运行、提高能源使用效率、增强能源梯级利用的重要途径。电网公司现正积极推进综合能源的示范试点工程, 通过构建电/气/热(冷)等多种类型能源系统有机耦合与综合利用的物理平台, 充分发挥不同能源形式的互补特性和协同效应, 实现能源系统资源优化配置, 提升系统灵活性, 提高可再生能源消纳能力和系统综合能效。

目前综合能源系统存在能源利用率低、本身的高效优势无法发挥、运营受限和费用增加等问题。主要原因是用户能量品质需求与能源供应之间不匹配、不均衡。综合能源规划技术作为综合能源系统建设、运行的基础与关键之一^[1], 是解决这一问题的重要途径。为此, 已有专家学者在这方面取得初步成果。文献^[2]提出一种多能系统协调优化规划的框架, 指出多能系统优化规划的目标函数及约束条件需考虑的因素; 文献^[3]

从基本的规划模型、能源生产环节的规划、源-网环节的协同规划、能源消费环节的规划、规划模型的求解方法这几个方面对能源互联网的规划进行了分析和探讨。文献 [4] 针对综合能源系统需求进行深入分析基于多场景规划的理念, 设计了针对区域级综合能源系统的规划方法; 文献 [5] 提出了一种基于改进型 Kriging 模型的综合能源系统规划方法。另外, 还有研究提出了电力-天然气系统联合规划的框架 [6-9], 考虑了配电线路、燃气管道的规划和运行。

已有研究成果在综合能源规划时综合考虑了各方因素, 但针对影响因素对规划结果的影响程度缺少定量分析。本文针对园区综合能源系统, 对影响规划结果的内外主要因素进行分析, 同时, 以综合能源全寿命周期等年值成本为目标, 提出一种面向园区综合能源系统的优化配置框架。

1 影响因素分析

1.1 系统外部影响因素

影响综合能源系统规划的外部因素主要是价格体系的变化, 主要包括新能源发电上网政策、分时电价政策、燃料价格变化以及排放成本内部化等。

1.1.1 新能源发电上网政策

本文研究的对象主要是园区级综合能源系统, 涉及到的发电上网设备主要以风机、光伏为代表的分布式新能源为主。

上网电价及上网补贴电价直接决定了可再生能源系统的经济性, 从而决定了该系统投资的可行性。本文以光伏发电上网电价为例说明上网电价对系统投资经济性的影响。图 1 所示为不同光伏发电上网电价下, 系统资本内部收益率随发电利用小时数的变化情况。可见, 在相同发电利用小时数的情况下, 上网电价越高, 内部收益率越大, 系统经济性越好。当光伏上网电价为 1.2 元/kW·h 时, 发电利用小时数只要达到 1 040 h 左右, 则系统收益率大于基准收益率, 而 1.1 元/kW·h 时, 发电利用小时数需要达到 1 100 h 时, 系统收益率大于基准收益率。由此可见, 发电上网电价是决定系统投资可行性的重要因素。

1.1.2 分时电价政策

近几年由于具有随机性、波动性、间歇性的

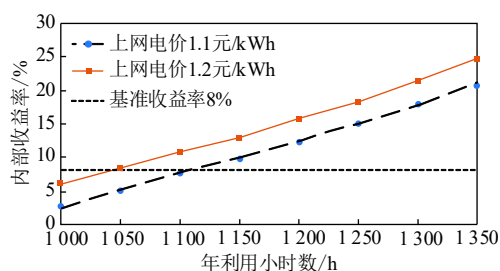


图 1 分布式光伏发电资本内部收益率

Fig. 1 Internal rate of return on capital for distributed photovoltaic power generation

风电、光伏等新能源大量接入, 给系统安全稳定运行带来压力。为保障系统的安全稳定运行, 往往需要常规机组配合并增加备用容量, 从而增加了系统投资成本。需求侧资源是除常规机组外的另一重要资源, 需求响应是调用需求侧负荷的重要手段, 可在不同的时间尺度上参与系统运行。为了更加充分消纳风电等新能源, 可根据各项需求响应措施时间尺度进行合理配置。电价手段尤其是分时电价因调整范围广、幅度大、实施时间长, 可作为需求响应措施的基础。因此, 在上述背景下, 有关部门提出分时电价政策。

分时电价政策除了会对用户的用能行为产生影响, 也会对综合能源系统的运行与规划配置产生影响。由于综合能源系统通常会选择以经济性最优作为运行目标, 因此分时电价政策会对综合能源系统内储能设备的运行策略产生影响, 通常用户在分时电价政策下会选择“低储高发”的储能运行策略。另外, 考虑到运行费用同样是综合能源系统规划总成本的一部分, 分时电价政策会对系统内储能设备与用户用能行为产生影响, 从而影响综合能源系统的规划。

1.1.3 燃料价格变化

天然气是综合能源系统对外的主要燃料需求之一, 天然气价格的变化也会影响综合能源系统的运行配置, 当天然气价格较高时, 系统会更多地选择通过电制冷、电制热的方式满足系统内部的冷热负荷需求; 当天然气价格较为便宜时, 系统会更多地选择燃气冷热电三联供系统、燃气热泵等设备满足系统内的用能需求。

以天然气价格为例, 对系统规划运行的影响进行分析。在固定市政电力价格及上网电价条件下, 测试天然气价格变动对系统规划及运行的影响。通过对燃气价格进行敏感性分析, 得到不同

燃气价格下，系统设备配置种类及容量均发生变化。如图 2 所示为不同燃气价格下的能源设备配置情况。当燃气价格为 3 元/m³时，燃气锅炉供热成本要远低于电锅炉供热成本，因此系统不会配置电锅炉。当燃气价格为 4 元/m³及 5 元/m³时，系统会配置相同种类的设备；不同的是，燃气价格增长到 5 元/m³ 时，系统热储能容量配置增加而燃气锅炉配置容量降低，燃气锅炉容量降低 14% 左右，而电锅炉容量及储能系统容量增加 12% 及 190% 左右。当燃气价格继续增加到 6 元/m³ 时，燃气锅炉供热成本要远高于电锅炉供热成本，因此系统不会配置燃气锅炉及燃气内燃机组。虽然当燃气价格为 4 元/m³ 及 5 元/m³ 时，系统配置类型一致，但两者的运行策略存在较大差异。

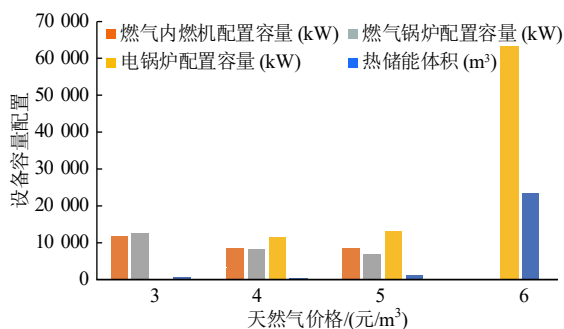


图 2 能源设备配置

Fig. 2 Energy equipment configuration

综上所述，可以发现价格政策是影响综合能源系统设计的重要边界条件，在进行综合能源系统规划设计时，要全面考虑各方面的价格政策、能源补贴政策等。

1.1.4 排放成本内部化

随着环境问题的日益凸显，世界各国对环境保护越来越重视。我国经济的快速发展仍以牺牲部分环境和资源为代价，环境污染治理压力日益增大，每年的环境治理投资逐年增加，环境问题已经成为制约我国经济发展的主要瓶颈之一。环境污染问题的产生是由于环境成本的外部性，因此，解决环境问题的关键是解决外部环境成本内部化的问题。

目前从实践及理论界的研究来看，排放成本内部化实现途径包括：环境税、排污收费、排污权交易、环境管理体系以及环境标志等。其中，环境税、排污收费、排污权交易等都属于命令控制型环境成本内部化实现途径，而环境管理体系

和环境标志等属于企业主动型排放成本内部化实现途径。理论上关于排放成本内部化实现途径的研究成果已经很多，在实践中的应用也较为广泛。

在规划环节考虑排放成本内部化因素会对设备的选型与配置产生一定的影响，综合能源系统运营商会更多地考虑以风机、光伏为代表的分布式电源以及以燃气分布式能源系统为代表的清洁能源；同时，注重能源的梯级利用，提升能源的利用效率。

1.2 系统外部影响因素

1.2.1 区域负荷时序特征

热电联供机组作为多能耦合系统中的重要设备，运行经济性不仅受到天然气价格等外部因素的影响，同样受到热电负荷时长的影响。电负荷作为基础负荷，一般全年不中断。如果电负荷存在时，热/冷负荷也同样存在，那么燃气发电时的伴随热就可以得到充分利用，设备总效率显著提高，系统运行经济性有效改善。为此，需要探究全年存在电负荷时，热/冷负荷时长对燃机配置的影响。

测试结果如图 3 所示。当热负荷只有 6 个月时，系统并不会配置燃气内燃机；当热负荷时长增加到 8 个月时，系统会配置小型燃机机组。随着热负荷时长的增加，燃机配置容量增加，而电锅炉配置容量逐渐降低。由于全年存在电负荷，燃气内燃机发电的同时必然伴随热量的产出，而只有电负荷没有热负荷时，燃气内燃机的热量耗散在大气中，系统综合效率降低，因而燃气内燃机供能就不经济。热电负荷不平衡率越大，造成热浪费的现象越严重。因此，只有在热电负荷匹配时，才会考虑配置燃气内燃机进行供电及供热。由此可见，不同负荷的负荷特征同样会影响系统设备配置。

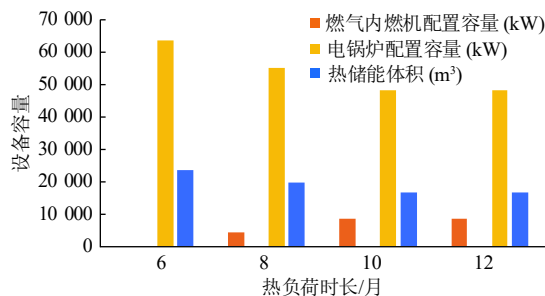


图 3 不同热负荷时长下的系统设备配置

Fig. 3 System equipment configuration under different heat load duration

1.2.2 热电比

综合能源系统的装机容量与集中能源系统相比很小,而常用发电机组的效率是随着容量的减小而降低的,因此系统的热回收利用量要大于因发电效率降低而减少的发电量,才能在能的数量上使其与常规的燃气电厂效率持平。但从能量的品质上考虑,电能是高品质能量,用降低发电效率来提高供热量的方式是不合理的;供热量和发电量应该存在一定的比例范围,这也要求热/电负荷应该处于一定比例才会达到供需的良好匹配。《分布式供能系统工程技术规范》中规定分布式能源系统的年平均热电比不应小于75%。

电效率为机组发电功率与燃气消耗率的比值,总效率为机组发电功率加机组产热功率之和与燃气消耗率的比值。如图4所示,在一定发电效率之下,热电比越高,总效率越高,要求余热的利用程度越高,热损失越小;在一定的总效率下,随着发电效率的提高,热电比将逐渐降低,这将有利于能源品质的提高,而且热电比值过高,也会限制高效发电机组原动机的使用。因此,热电比是影响热电机总效率的关键指标,在综合能源系统规划分析时,应综合区域全年动态热电比的分布,优化选择合适的机组实现供需匹配。

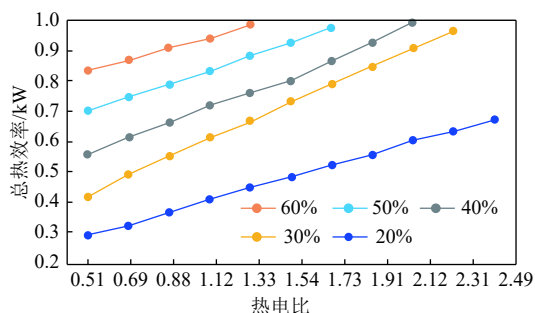


图4 不同发电效率下的总热效率与热电比的关系
Fig. 4 Relationship between total thermal efficiency and thermoelectric ratio under different generation efficiency

除热电联供机组的热电比外,系统中其他设备的能源转换效率、储能设备的充放效率等性能参数也会影响综合能源系统配置。

2 园区综合能源系统优化配置

2.1 优化配置模型

综合能源系统优化配置方法的结构框架如图5所示。

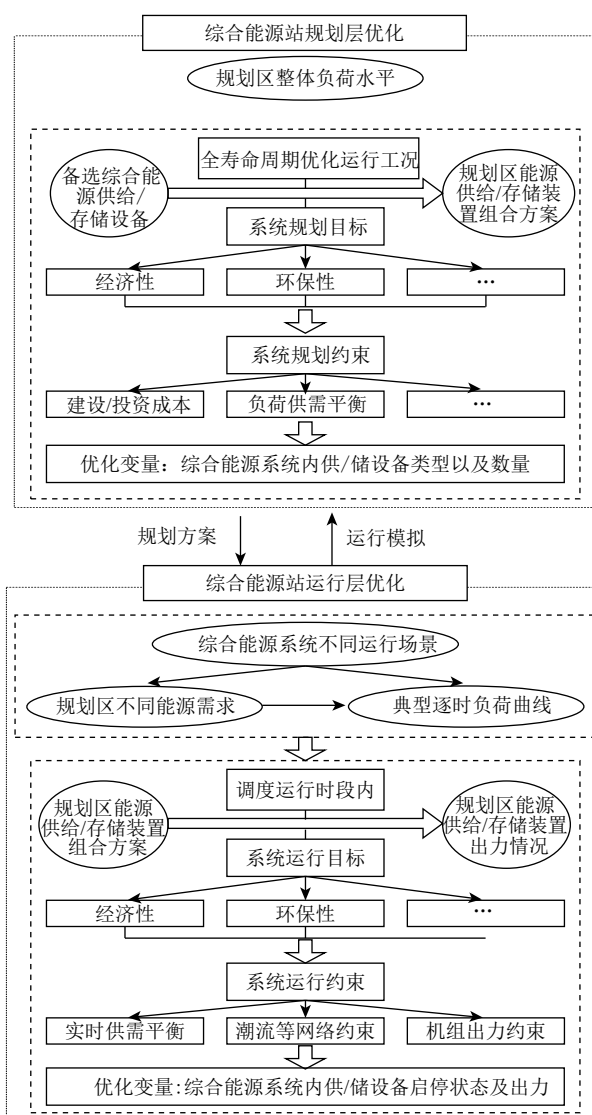


图5 综合能源系统优化配置结构框架

Fig. 5 Structural framework for optimal allocation of integrated energy system

结合上述影响因素分析,建立综合能源系统全寿命周期等年值成本模型作为规划优化目标函数:

$$C_{LCC} = C_1 \frac{r(1+r)^{N_{ms}}}{(1+r)^{N_{ms}} - 1} + C_2 - C_3 \frac{r}{(1+r)^{N_{ms}} - 1} \quad (1)$$

式中: C_{LCC} 表示某个方案的全寿命周期等年值成本; C_1 表示方案初投资费用; C_2 表示方案年支出费用; C_3 表示方案残值费用; N_{ms} 表示使用寿命; r 表示贴现率,本节取 $r=0.065$ 。

1) 初投资费用。综合能源系统初投资包括设备费用、安装费用和市政配套增容费。

2) 年支出费用。综合能源系统的年支出费用包括运行维护费用、治污费用和购买能源费用(包含新能源发电上网收益)。

3) 残值费用。综合能源系统报废时, 残余材料的费用, 本文按初投资的 5% 计算。

综合能源系统规划约束主要包括系统初期投资成本约束和综合能源最大负荷约束; 系统运行控制约束主要包括负荷供需平衡约束、能源设备运行约束等^[10]。

2.2 模型求解

本文所述的优化配置模型是一种混合整数规划模型, 基于广东电网规划研究中心研发的综合能源系统仿真分析软件对该模型进行求解。综合能源系统仿真分析软件的主界面如图 6 所示, 其功能包括工程管理、工程信息、行业负荷特性、区内用能需求、结构设计、选定方案运行仿真、优化方案容量配置等, 可满足综合能源系统规划工作各阶段工作需求。主要输入的技术参数包括能源价格、设备参数等。



图 6 综合能源系统仿真分析软件

Fig. 6 Integrated energy system simulation and analysis software

3 案例分析

3.1 工程概况

以南方某园区为例, 该区域主要由商业建筑构成。在考虑同时率的情况下, 该片区内的最大电/热/冷负荷分别为 3 645、3 112 和 11 643 kW。结合能源站供应区建筑的属性、最大负荷需求以及广东地区不同类型用户的典型负荷曲线, 能源站供给地区的典型日负荷曲线如图 7 所示。

价格信息方面, 该园区峰谷电价为: 高峰时段 (14:00-17:00、19:00-22:00) 1.334 5 元/kWh; 平段 (8:00-14:00、17:00-19:00、22:00-24:00) 0.820 5 元/kWh; 低谷时段 (0:00-8:00) 0.425 2 元/kWh。风力发电上网电价为 0.57 元/kWh, 光伏发电上网电价为 0.85 元/kWh。天然气供气压力约为 3 kg, 热值为 8 500 kcal/Nm³, 天然气价格为 3.50 元/m³。

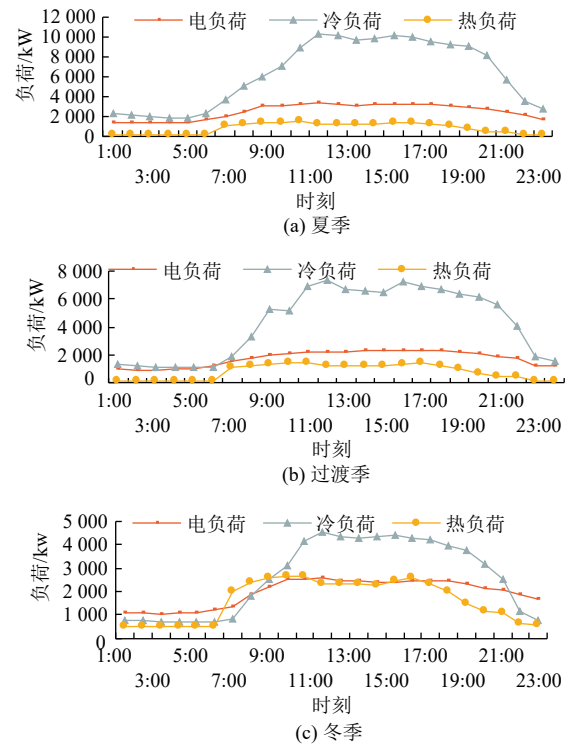


图 7 不同季节典型日负荷曲线

Fig. 7 Typical daily load curves in different seasons

在设备类型方面选择的是目前应用较为广泛、理论模型及运行工况较为明确的设备, 考虑到能源系统内包括电、热、冷 3 种终端能源负荷, 因此, 可以在能源系统内配置燃气轮机对电热负荷进行供给; 配置双工况冷机与溴化锂制冷机对冷负荷进行供给; 配置燃气热泵对热负荷进行供给; 此外, 还有分布式光伏及外部电网对电负荷进行供应与补充。各个能源设备的运行参数如表 1 所示, 设备的运行维护费用比例按设备总值的 3% 计算。由于天然气为清洁能源, 燃烧过程产生微量二氧化硫气体, 治污费用可忽略不计。考虑 3 个配置方案:

情况 1: 选择目前较为常用的燃气冷热电三联供系统 (燃气轮机、溴冷机等) 结合双工况冷机、溴化锂制冷机以及燃气热泵做为能源站规划的待选设备。

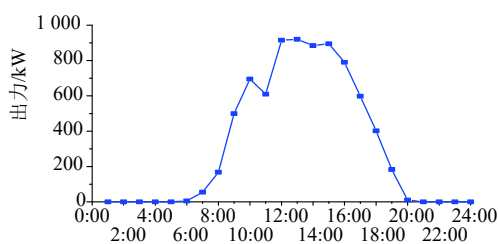
情况 2: 鉴于该园区良好的日照条件, 综合可用面积、发电效率等因素, 在 Case1 的基础上考虑在能源站配置装机容量为 1MW 的光伏, 光伏的预测出力见图 8。

情况 3: 为平衡该园区负荷的峰谷差, 在能源站内配置光伏的情况下进一步配置蓄电池与冰蓄冷 2 种储能设备。其中, 在运行环节将储能设

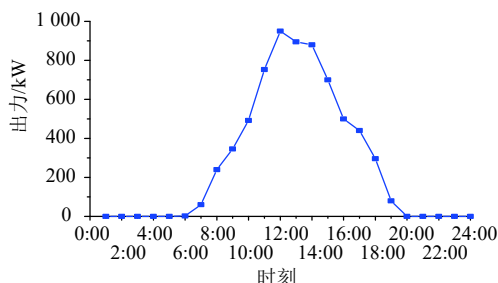
备的初始容量均设定为 50%，蓄电池的最大充放电深度为 50%。

表 1 各能源设备运行参数

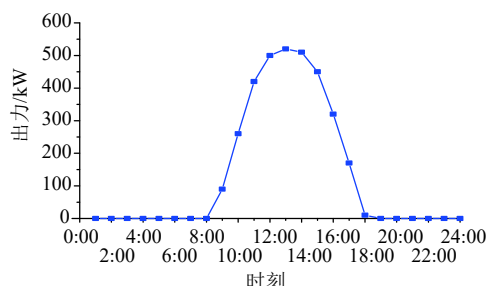
设备	效率	单位容量价格/(元/kW)
燃气轮机	气转电: 0.35	4 000
	气转热: 0.52	
溴化锂制冷机	热转冷: 1	1 200
	制冷水: 4.8	
双工况冷机	制冰: 3.5	700
	气转热: 3.1	
燃气热泵	充电: 0.89	1 000
	放电: 0.95	
蓄电池	蓄冰: 0.89	500
	融冰: 0.91	
蓄冰槽		160



(a) 夏季



(b) 过渡季



(c) 冬季

图 8 光伏典型日出力曲线

Fig. 8 Typical output curves of PV

3.2 能源站配置方案对比分析

基于该区域多能源负荷需求及设备选择情况，

结合上文介绍的规划模型方法，对该区域的能源站进行设备容量的优化配置，设备配置的整体结果及经济性分析如表 2、表 3 所示。

表 2 能源站设备容量优化配置结果

	燃气轮机	溴化锂制冷机	双工况冷机	燃气热泵	蓄冰槽
Case1	4 000	10 000	2 000	7 000	-
Case2	3 000	7 000	5 000	5 000	-
Case3	4 000	7 000	4 000	4 000	8 000

表 3 能源站设备配置经济性分析

	年综合费用	建设费用	年运维费用	购能费用
Case1	2 474.0	317.3	9.5	2 147.2
Case2	2 274.9	286.8	8.6	1 979.5
Case3	2 304.5	283.2	8.5	2 012.8

情况 1 中电力负荷的供给主要依靠能源站内的三联供系统以及市电来完成，电力供给除要满足供能区域内的纯电力负荷外，还要满足双工况冷机供冷的用能需求。热负荷的供给主要由三联供系统以及燃气热泵来完成，由于三联供系统运行在“以热定电”的运行机制下，因此，纯热负荷的供给主要由三联供系统来完成，燃气热泵做为辅助设备支撑，热负荷供给除要满足供能区域内的纯热负荷外，还要满足溴化锂制冷机的制冷用能需求。供能区域内的冷负荷需求量较热负荷需求量较大，且三联供系统运行在“以热定电”运行机制下，因此三联供系统对冷负荷供给能力有限，需要双工况电制冷机的辅助支持。

情况 2 由于光伏发出的电能即可以满足电负荷需求，同时也可以支持双工况电制冷机制冷，因此，配置光伏可以降低系统内安装成本较高的溴冷机的容量，由于溴冷机需要大量的热能进行制冷，并间溴冷机装机容量的降低也间接降低了燃气热泵的需求；另外光伏在运行的过程中不需要一次能源的消耗。综上，配置光伏一方面可以实现清洁能源的有效利用，另外也可以节省能源站的运维与购能费用，应进行积极推广。

情况 3 由于储能设备的购置安装费用较高，而供能区域内的电负荷相对于冷负荷较小，因此，优化的结果中未配置储电设备。配置蓄冷装置，

在电价的谷时刻从外部电网购电，通过双工况电制冷机转换成冷能进行存储，以便在电价峰值时刻减少双工况冷机制冷对电能的需求。蓄冷装置可减少双工况冷机的供冷压力，从而降低装机容量。另外，由于配置储能设备可以使系统的供能运行更加灵活，因此，在一定程度上减少了系统的运维费用。然而，安装蓄冷装置可能会增加系统的购置安装费用，并由于系统选择在电价谷值时刻额外购买电能通过双工况电制冷机为蓄冷设备蓄冷，因此，也会增加一部分购能费用。综合上述分析可知，尽管配置储能设备可以在一定程度上减少系统的运维费用，但是由于目前储能设备的成本较高，建议根据当地需求结合能源价格政策进行技术经济评估后再行配置。

4 结论

本文对影响综合能源系统规划的外部与内部主要因素进行了定量分析，可为园区综合能源系统规划提供借鉴。

在影响因素分析基础上，提出一种综合能源系统优化配置方法，以我国南方某园区能源站为例进行方案设计。通过对比不同方案的配置结果，分析可再生能源和储能设备对能源站配置结果的影响，为该能源站的配置提供技术参考，可为不同地区根据实际情况选择供能方式提供借鉴。

参考文献

- [1] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3828.
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828 (in Chinese).
- [2] 黎静华, 桑川川. 能源综合系统优化规划与运行框架 [J]. 电力建设, 2015, 36(8): 41-48.
LI Jinghua, SANG Chuanchuan. Framework for integrated energy system [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 41-48 (in Chinese).
- [3] 别朝红, 王旭, 胡源. 能源互联网规划研究综述及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6445-6462.
BIE Zhaohong, WANG Xu, HU Yuan. Review and prospect of planning of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6445-6462 (in Chinese).
- [4] 程林, 张靖, 黄仁乐, 等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析 [J]. 电气自动化设备, 2017, 37(6): 282-287.
CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287 (in Chinese).
- [5] 刘迪, 吴俊勇, 林凯骏, 等. 基于Kriging模型的综合能源系统规划方法 [J]. 电网技术, 2019, 43(1): 185-192.
LIU Di, WU Junyong, LIN Kaijun, et al. A planning method of integrated energy system based on Kriging model [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 185-192 (in Chinese).
- [6] 权超, 董晓峰, 姜彤. 基于CCHP耦合的电力、天然气区域综合能源系统优化规划 [J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2457-2466.
QUAN Chao, DONG Xiaofeng, JIANG Tong. Optimization planning of integrated electricity-gas community energy system based on coupled CCHP [J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2457-2466 (in Chinese).
- [7] UNSIHUAY-VILA C, MARANGON-LIMA J W, ZAMBRONI DE SOUZA A C Z, et al. A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1154-1168.
- [8] QIU Jing, DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, et al. Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 1035-1046.
- [9] ZHANG Xiaping, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A S, et al. Security-constrained co-optimization planning of electricity and natural gas transportation infrastructures [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 2984-2993.
- [10] 于波, 孙恒楠, 项添春, 等. 综合能源系统规划设计方法 [J]. 电力建设, 2016, 37(2): 78-84.
YU Bo, SUN Hengnan, XIANG Tianchun, et al. Planning design method of integrated energy system [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 78-84 (in Chinese).

收稿日期：2019-03-27

作者简介：

郇嘉嘉(1983)，女，博士，高级工程师，研究方向为综合能源规划运行，E-mail: winnie5983@126.com；

赵瑾(1995)，女，硕士研究生，研究方向为综合能源规划等。