

# 工业园区混合能源优化配置方法应用与实践

马超, 夏雪, 谯宗, 李嘉逸

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

**摘要:** 为了充分挖掘多能源之间的互补潜力, 使工业园区混合能源系统的配置方式由传统粗放式转变为精确优化配置并降低系统配置方案的保守性, 基于粒子群联合 CPLEX 求解算法对工业园区的系统配置和运行调度方案进行分析优化, 并以某生物园区为例进行了实例分析, 得到了目标函数下的最优设计方案和运行策略。仿真分析结果表明, 优化配置方法的应用能够协调冷热电多种能源的混合利用, 提升系统的综合经济性。同时, 为工业园区能源供应项目的规划、设计提供参考性支撑, 丰富设计手段。

**关键词:** 工业园区; 粒子群算法; CPLEX; 冷热电; 优化配置

中图分类号: TK01 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)02-0062-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.02.013

## Application and Practice of Optimal Configuration Method of Hybrid Energy in Industrial Park

Ma Chao, Xia Xue, Qiao Zong, Li Jiayi

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to fully excavate the potential in complementarity between multiple energy sources, the configuration of the hybrid energy system in industrial park is transformed from traditional extensive type to accurate optimization, and the conservatism of system configuration scheme is reduced. Based on PSO and CPLEX algorithm, the system configuration and operation scheduling of industrial parks are analyzed and optimized. A biological park is taken as an example for analysis, and the best design and operation strategies under the objective function are obtained. The simulation results show that the application of the proposed optimal configuration method can coordinate the utilization of various kinds of energy sources and enhance the comprehensive energy economic benefit of the system. At the same time, it provides a reference support for the planning and design of energy supply projects in industrial parks, and enriches design methods.

**Key words:** industrial park; particle swarm optimization; CPLEX; cooling heating and power; optimal configuration

## 0 引言

工业园区是以工业负荷为主的复杂能源系统, 涵盖多种产能及用能主体, 涉及电、冷、热等多种能源的生产、转移和利用。工业园区负荷具有需求量大、负荷特性复杂、供电可靠性要求高的特点。随着分布式可再生能源和清洁能源发电的高渗透率应用、多元化储能设备规模化推广, 用户通过智能化手段参与需求响应, 各类能源供应系统耦合互补, 社会综合能效进一步提升, 促使工业园区的用能向更加绿色、高效的方向转变。如何统一对园区用能优化, 提高系统的运行效率和经济环境效益将是未来工业

园区规划设计的重点<sup>[1-5]</sup>。

现有研究多针对带有电热联产系统的综合能源系统。文献[6-7]研究了以能量集线器最小运行费用为优化目标, 采用鲁棒优化算法计及负荷需求的不确定性, 最终对调度方案从经济性、可靠性、清洁性角度加以设计。文献[8]中建立了冷热电联供系统的经济优化调度模型, 并采用 Hessian 矩阵迭代的内点法对模型进行求解, 进而对系统开展优化规划。在文献[9-12]中, 应用了带约束的粒子群算法对多目标规划模型进行求解。文献[13]建立了含有风机、光伏发电、冷热电联供以及蓄能系统的 CCHP 系统, 以能源利用率最大和系统运行成本最小为优化目标进行设计。文献[14]提出一种双层

优化配置模型,用于应对多能源的运行复杂性。

综合来看,目前对混合能源系统的研究偏重于理论分析,存在优化配置变量多、模型理论化等问题,为实际工程的求解带来了很多问题,缺乏在实际工程中应用的可操作性。下面基于具有冷、热、电需求的分布式能源系统,首先通过传统配置方式的粗放式分析确定设备集,然后构建同时优化系统配置和运行方案的非线性混合整数规划模型,综合考虑系统投资费用、方案年运行费用指标,即从经济性的角度对系统的设备容量和运行策略进行了优化配置分析,实现园区规划设计的经济性最大化。

## 1 优化配置模型与方法

研究可知,园区供能有:冷热电联供运行模式,即燃气分布式能源供能用于满足园区内的冷热电负荷需求,地区电网作为有益补充;热电联产运行模式,即采用燃气分布式能源供能用于满足园区内的冷热负荷需求,发电上网。不同的供能运行模式将对应不同的优化配置结果,下面主要对冷热电联供的运行模式进行阐述。

园区冷热电混合能源系统的优化配置模型是以经济为目标,经济目标是使整个规划期内系统的总投资运行费用的年费用最小。

### 1.1 优化目标函数

经济目标函数可选择系统总的投资运行等年值费用,该费用由设备初始投资和工业园区混合能源系统年运行费用两部分构成。

$$f_c = C_C^{\text{ann}} + C_{\text{TEI}}^{\text{ann}} \quad (1)$$

式中: $f_c$ 为能源系统总的投资运行等年值费用; $C_C^{\text{ann}}$ 为设备初始投资折合年费用; $C_{\text{TEI}}^{\text{ann}}$ 为能源系统运行年费用。

工业园区混合能源系统内的运行年费用包括年购电费用、年运行维护费用以及年运行所需燃料费用,可表示为

$$C_{\text{TEI}}^{\text{ann}} = C_{\text{ONM}}^{\text{ann}} + C_{\text{fuel}}^{\text{ann}} + C_{\text{grid}}^{\text{ann}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{TEI}}^{\text{ann}}$ 为能源系统运行年费用; $C_{\text{ONM}}^{\text{ann}}$ 、 $C_{\text{fuel}}^{\text{ann}}$ 、 $C_{\text{grid}}^{\text{ann}}$ 分别为年运行维护费用以及年消耗燃料费用、年购电费用。

设备初始投资等年值费用数学表达式为

$$C_C^{\text{ann}} = \sum_i C_{1,i} r_{\text{CR},i} = \sum_i C_{1,i} \frac{r(1+r)^{l_i}}{(1+r)^{l_i} - 1} \quad (3)$$

式中: $C_{1,i}$ 为第*i*个设备初始投资费用,一般与设备容量相关; $r_{\text{CR},i}$ 代表资金回收系数; $r$ 为贴现率; $l_i$ 为第*i*个设备的运行寿命期望值。

设备的年运行维护费用可表示为

$$C_{\text{ONM}}^{\text{ann}} = \sum_i C_{\text{ONM},i}^{\text{ann}} \quad (4)$$

式中, $C_{\text{ONM},i}^{\text{ann}}$ 为第*i*个设备的年运行维护费用,依据不同情况的,可以表达为不同的形式。

设备年消耗燃料费用主要指 DGs 的年消耗燃料费用,与 DGs 年发电量成正比,其数学表达式为

$$C_{\text{fuel}}^{\text{ann}} = \sum_i C_{\text{fuel},i}^{\text{ann}}$$

$$C_{\text{fuel},i}^{\text{ann}} = c_{\text{fuel},i} F_i^{\text{ann}} = c_{\text{fuel},i} \frac{W_{E,i}^{\text{ann}}}{\mu_i} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{fuel},i}^{\text{ann}}$ 为第*i*个 DGs 的年发电消耗燃料费用; $c_{\text{fuel},i}$ 为第*i*个 DGs 发电所需燃料的单位热值费用,元/kWh; $F_i^{\text{ann}}$ 为第*i*个 DGs 年发电消耗的燃料热能,kWh,其大小等于第*i*个 DGs 年发电量 $W_{E,i}^{\text{ann}}$ 与其发电效率 $\mu_i$ 的比值。

工业园区混合能源系统向电网的购电费用的构成和区域电价机制有关,一般可归纳为基本容量、功率、电度(电量)3类费用。

$$C_{\text{grid}}^{\text{ann}} = C_f^{\text{ann}} + C_d^{\text{ann}} + C_e^{\text{ann}} \quad (6)$$

式中, $C_{\text{grid}}^{\text{ann}}$ 、 $C_f^{\text{ann}}$ 、 $C_d^{\text{ann}}$ 、 $C_e^{\text{ann}}$ 分别为年总购电总费用、基本容量费用、功率费用和电度费用。

### 1.2 约束条件

模型的约束条件分为不等式约束和等式约束。等式约束主要为满足用能端逐时对电、冷、热3种能源的需求,即供给能源量等于能源需求量:

$$\begin{aligned} P_{\text{grid}} + P_{\text{ge}} &= P_{\text{req}} + P_x^i \\ Q_{\text{gehot}} + Q_{\text{xhot}}^i &= Q_{\text{reqhot}} \\ Q_{\text{xcool}}^i &= Q_{\text{reqcool}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{grid}}$ 、 $P_{\text{ge}}$ 、 $P_{\text{req}}$ 、 $P_x^i$ 分别为电网购电功率、机组发电功率、电负荷需求、其他供能设备耗电功率; $Q_{\text{gehot}}$ 、 $Q_{\text{xhot}}^i$ 、 $Q_{\text{reqhot}}$ 分别为余热回收装置输出热功率、其他供热设备输出热功率、热负荷需求; $Q_{\text{xcool}}^i$ 、 $Q_{\text{reqcool}}$ 分别为供冷设备输出冷功率、冷负荷需求。

除上述冷热电需求平衡约束外,针对供能设备的运行特性,还可能包含设备运行工况出力约束、各设备的转换效率和能源消耗量等约束条件。

根据上述系统结构描述和优化配置模型,以系统备选设备的数量或容量作为优化变量,采用基于粒子群联合 CPLEX 求解器的算法进行求解,其具体

流程如图1所示。

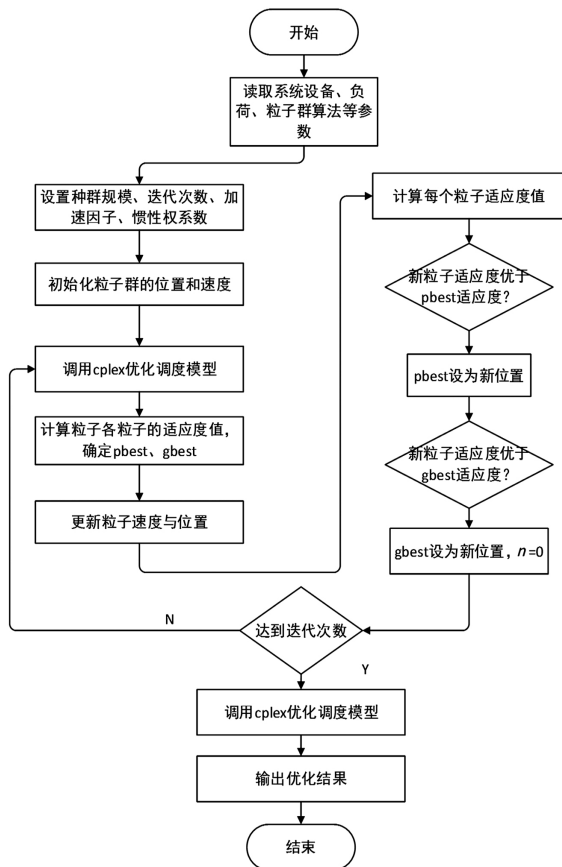


图1 配置优化流程

## 2 工程案例介绍

选取成都市某生物园区为应用对象进行优化研究。为了成功打造绿色低碳能源基础设施,该生物园区拟投资建设天然气分布式能源站及配套使用的天然气管网和配电网项目,为生物园区内的企业、居民和其他单位提供蒸汽、热水、冷水、电力等综合能源服务,在生物园区内构建环保、高效、稳定、便捷的智慧能源保障体系。

由于生物园区存在较大的电负荷,拟通过220 kV变电站与大电网连接,保障园区的电负荷需求。燃气分布式能源供能主要用于满足生物园区内的冷热电负荷需求,地区电网作为园区负荷的有益补充。

### 2.1 电负荷

生物园区近期建设范围为起步区1期、2期,通过选取各负荷分类指标、用地指标,计算出近期生物城的饱和最大负荷为139.55 MW。根据园区典型负荷特征曲线预测得到生物园区的日负荷需求曲线,如图2所示。

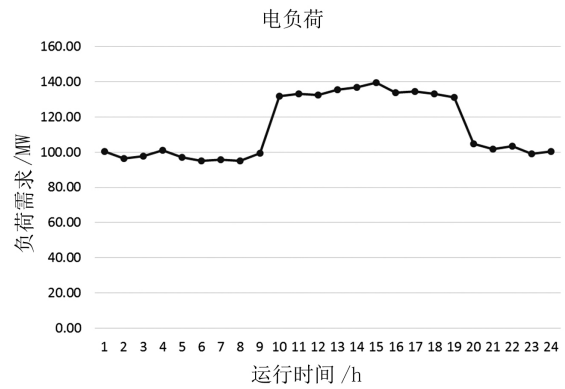


图2 生物园区电负荷

### 2.2 热负荷

供热区域所需热负荷以工业生产性蒸汽热负荷为主,参数为0.7 MPa(g)的饱和蒸汽。考虑由能源站集中供应以利于节能环保。根据收资、调查情况,本项目工业热负荷逐时变化曲线如图3所示。

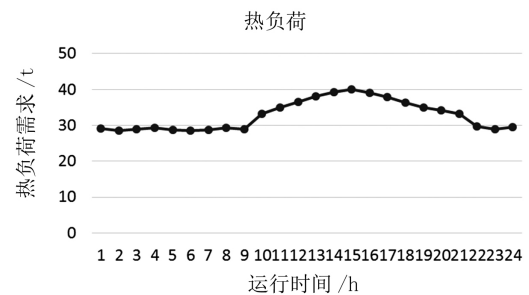


图3 生物园区热负荷

### 2.3 冷负荷

冷负荷主要包括工艺制冷负荷及空调制冷负荷。根据园区收资、调查可知,园区冷负荷主要有工艺制冷及空调制冷负荷需求。在冷负荷调研的过程中,通过业主和用户初步协商,供冷方式采用将制冷蒸汽通过蒸汽管道送往用户侧,在用户侧建造制冷站的方式来满足用户的用冷需求。本项目冷负荷逐时变化曲线如图4所示。

工业园区生产型企业居多,且其倒班轮换的工作机制使得工业园区一般都具有较为稳定的电、热、冷负荷。工业园区各类负荷都比较大,受季节性变化影响较小。

设备选型主要遵照“分配得当、各得所需、温度对口、梯级利用”的原则,合理进行电力、供冷、供热设备的配置,做到按需供给、适时匹配,达到冷热电负荷的相对平衡。同时,综合考虑到工程冷热电需求大,该地区以水电为主的电力结构以及电力“丰裕枯余”、弃水问题突出等因素,为有效扩大天然气应用,统筹协调地区电力行业发展,天然气分布

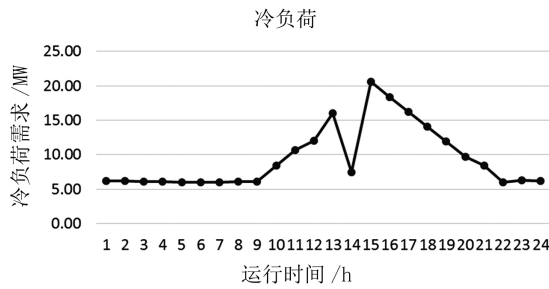


图4 生物园区冷负荷

式能源项目系统配置应首选燃气单循环机组。

通过统筹考虑该地区可用资源潜力、冷热电负荷需求分析以及投资方需求情况,选取燃气轮机组、燃气锅炉、电锅炉、蒸汽型溴化锂制冷机组、电制冷机组为备选设备集进行园区供能优化配置设计,从而满足生物园区的冷、热、电负荷需求。

根据前述备选设备集,建立生物园区供能结构如图5所示。

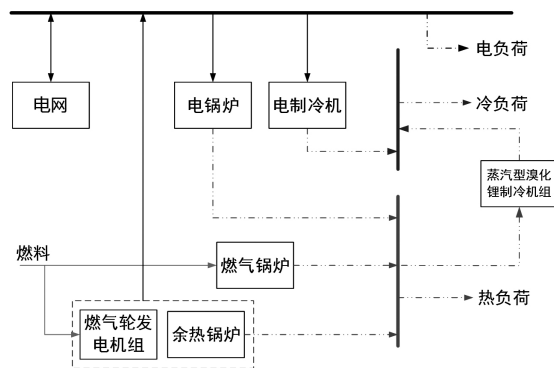


图5 生物园区的供能结构

### 3 仿真分析

#### 3.1 配置参数及边界条件

从园区综合热负荷分析可知,工程设计综合平均负荷为50.9 t/h。通过传统配置方式粗放式分析燃机的发电效率、工程的综合能源利用效率和经济性,工程选取SGT400燃气轮机组作为主要供能设备,并配置燃气锅炉等其他供储能设备进行能源供应。各设备的单位投资建设成本如表1所示。

按照当前电价,设定容量电价和功率电价为0,电度电价采用分时电价。丰枯季节划分:丰水期为6月至10月,枯水期为1月至4月、12月,平水期为5月、11月。销售侧丰枯电价调整为枯水期电价上浮5%,丰水期电价下浮5%。峰谷分时浮动电价继续按高峰时段在丰枯浮动基础上上浮50%,低谷时

段在丰枯浮动基础上下浮50%。该地区天然气价为1.8元每标准立方米,不同季节、不同时段电价如表2所示。

表1 备选供储能设备成本

| 燃气机组<br>(万元/台) | 燃气锅炉<br>(万元/t) | 电锅炉<br>(万元/t) | 蒸汽型溴化锂机<br>(元/kW) | 电制冷机<br>(元/kW) |
|----------------|----------------|---------------|-------------------|----------------|
| 4997           | 13             | 38            | 1500              | 1300           |

注:机组成本包含了余热锅炉投资。

表2 园区购电电价(丰、枯、平期)

| 价格类型        | 价格/元    | 时间段                         |
|-------------|---------|-----------------------------|
| 容量电价        | 0       | -                           |
| 功率电价        | 0       | -                           |
| 电度电价<br>(丰) | 0.374 6 | 23:00 - 7:00                |
|             | 0.749 2 | 11:00 - 19:00               |
|             | 1.123 8 | 7:00 - 11:00, 19:00 - 23:00 |
| 电度电价<br>(枯) | 0.410 2 | 23:00 - 7:00                |
|             | 0.820 3 | 11:00 - 19:00               |
|             | 1.230 5 | 7:00 - 11:00, 19:00 - 23:00 |
| 电度电价<br>(平) | 0.394 3 | 23:00 - 7:00                |
|             | 0.788 6 | 11:00 - 19:00               |
|             | 1.182 9 | 7:00 - 11:00, 19:00 - 23:00 |

#### 3.2 优化配置方案

如前所述,该优化设计问题是一个多变量、多约束的非线性规划问题。这里选粒子群算法予以求解,粒子群个数为100,最大迭代次数1000,个体加速因子设置为2,全局加速因子设置为2。通过求解优化配置模型,得到该系统的优化配置为燃气轮机系统配置2台燃气轮机组(含余热锅炉)配套20 t/h燃气锅炉,1.9 MW电制冷机组,9.2 MW蒸汽型溴化锂机组。

在基础配置之上,考虑在一台燃机或余热锅炉故障或检修停运时,另一台机组满负荷运行可提供约26.05 t/h蒸汽,因此需考虑2台20 t/h的燃气锅炉进行备用。

系统基本运行策略如下:

1) 在非检修月,两台燃机优先满足热负荷需求,不足部分有燃气锅炉补足。冷负荷夜间以余热部分通过蒸汽型溴化锂机组供冷为主,电制冷机制冷为辅。在高峰期,机组热出力都用于热负荷供能,则冷负荷由电制冷机组制冷满足需求。

2) 在检修月,由于一台燃机检修停运,另一台机组满负荷运行可提供约26.05 t/h蒸汽,将2台20 t/h的燃气锅炉均投入运行,以满足最大冷热负

荷需求,保障工业园区供能的稳定性和安全性。

图6、图7给出了生物园区非检修月和检修月的供能调度计划方案。

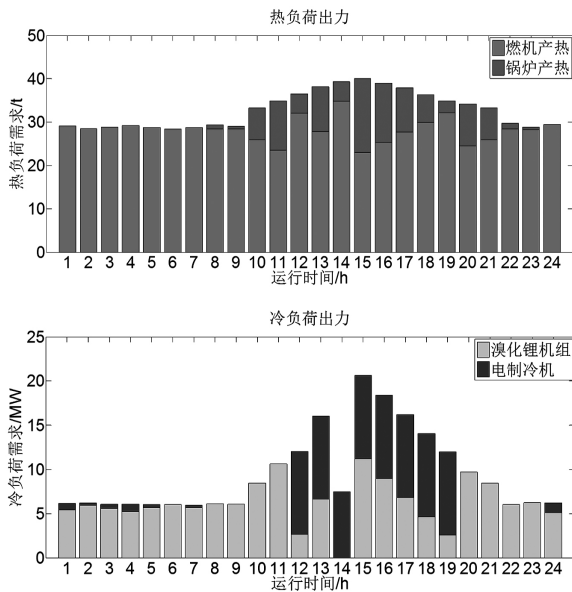


图6 非检修月供冷、热调度计划

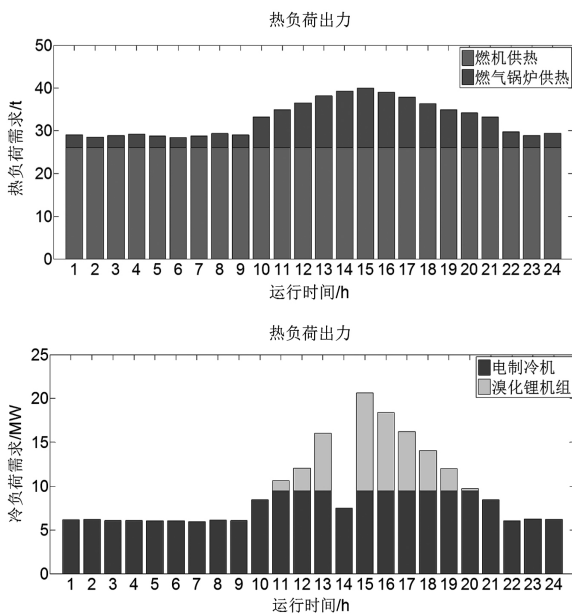


图7 检修月供冷、热调度计划

#### 4 经济性对比

该园区企业居多,一般都具有稳定的电、热和冷负荷,各项负荷都比较大,该园区根据传统配置方法“以热定电”的原则配置设备。配置方案为2台燃气轮机组(含余热锅炉)、2台20 t/h的燃气锅炉、4.8 MW电制冷机组、42 kW蒸汽型溴化锂机组。优化配置方法和传统配置方法的经济性对比结果如表3所示。

表3 优化配置方法与传统方法经济性对比

| 配置方式   | 投资成本<br>/万元 | 运行费用<br>/万元 | 等年值费用<br>/万元 |
|--------|-------------|-------------|--------------|
| 传统配置方式 | 11 265      | 82 975      | 84 344       |
| 优化配置方式 | 12 173      | 80 403      | 81 701       |

由经济性对比可知,传统配置方案更多采用电制冷机组供冷为主,在现行丰枯峰谷电价机制和气价条件下,该方案从电网购电比例相比于优化配置方案更高,导致其运行成本费用增大。冷、热、电耦合的优化配置方案虽然增加了设备投资成本,但达到降低系统年运行费用及总的等年值费用,提高了工程整体的经济性。

#### 5 结语

研究了混合能源系统的规划问题,把混合能源系统设计转化为了非线性规划问题进行求解。建立以投资成本和运行成本最小为目标的优化函数,提出了以粒子群结合 CPLEX 的方法对优化问题进行求解,在备选供能设备中寻找最优配置组合方案。

仿真结果表明,通过对混合能源优化配置方法和典型调度运行策略研究可充分挖掘多能源之间的互补潜力,使工业园区混合能源系统的配置方式由传统粗放式转变为精确优化配置,降低系统配置方案的保守性;通过多种能源混合利用,提升了系统的综合经济性。优化配置方法的应用能够为工业园区能源供应项目的规划、设计提供参考性支撑,丰富了设计手段。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 任洪波,邱留良,吴琼,等. 分布式能源系统优化与设计综述[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 49-55.
- [3] 林世平. 工业园区小型分布式能源系统应用研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2011, 7(2): 103-106.
- [4] 金红光,隋军,徐聪,等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3160.
- [5] 王毅,张宁,康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.

[6] Alessandra Parisio ,Carmen Del Vecchio ,Alfredo Vaccaro. A Robust Optimization Approach to Energy Hub Management [J]. International Journal of Electrical & Energy Systems 2012 42( 1) :98 - 104.

[7] Faeze Brahman ,Masoud Honarmand ,Shahram Jadid. Optimal Electrical and Thermal Energy Management of A Residential Energy Hub , Integrating Demand Response and Energy Storage System [J]. Energy and Buildings , 2015 ,90( 1) : 65 - 75.

[8] 徐青山,曾艾东,王凯,等. 基于 Hessian 内点法的微型能源网日前冷热电联供经济优化调度. 电网技术, 2016 40( 6) : 1657 - 1665.

[9] 魏大钧,孙波,赵峰,等. 小型生物质沼气冷热电联供系统多目标优化设计与运行分析 [J]. 电力系统自动化 2015 39( 12) : 7 - 12.

[10] 兰立雄,刘力卿,米增强. 冷电联供系统的多目标运行优化 [J]. 电力系统及其自动化学报 2016 28( 5) :

62 - 68.

[11] 王锐,顾伟,吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化 [J]. 电力系统自动化 2011 35( 8) : 22 - 27.

[12] 顾伟,吴志,王锐. 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 - 186.

[13] 闫占新,刘俊勇,魏震波,等. 多能源等效替代方式及其转移效益模型 [J]. 电网技术 2016 40( 6) : 1620 - 1626.

[14] Li Guo ,Wenjian Liu ,Jiejun Cai ,et al. A Two - stage Optimal Planning and Design Method for Combined Cooling ,Heat and Power Microgrid System [J]. Energy Conversion and Management 2013 74 433 - 445.

作者简介:

马超(1990),硕士研究生、工程师,主要研究方向为智慧能源优化规划设计。

(收稿日期:2019-03-04)

(上接第35页)

[7] Sun C ,Liu D ,Wang Y , et al. Assessment of Credible Capacity for Intermittent Distributed Energy Resources in Active Distribution Network [J]. Energies ,2017 10( 8) :1104.

[8] 崔杨,李焕奇,张节潭,等. 计及功率相关性的光伏电站群置信容量评估方法 [J]. 太阳能学报, 2017 , 38 ( 4) : 1039 - 1044.

[9] 梁双,胡学浩,张东霞,等. 基于随机模型的光伏发电置信容量评估方法 [J]. 电力系统自动化 2012 36( 13) : 32 - 37.

[10] 梁双,胡学浩,张东霞,等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势 [J]. 电力系统自动化 2011 35( 19) : 101 - 107.

[11] 张宁,康重庆,肖晋宇,等. 风电容量可信度研究综述与展望 [J]. 中国电机工程学报 2015 35( 1) : 82 - 94.

[12] 方鑫,郭强,张东霞,等. 并网光伏电站置信容量评估 [J]. 电网技术 2012 36( 9) : 31 - 35.

[13] 刘洁冰,白婕,翟桥柱. 用于风电机组容量评估的容量可信度快速算法 [J]. 西安交通大学学报 2017 51( 6) : 41 - 46.

[14] 暴英凯,王越,唐俊熙,等. 序贯蒙特卡洛方法在电力系统可靠性评估中的应用差异分析 [J]. 电网技术, 2014 38( 5) : 1189 - 1195.

[15] 吴耀武,张联邦,李海英,等. 考虑多风电场出力相关性的风电容量可信度评估方法 [J]. 电力自动化设备 2015 39( 11) : 8 - 12.

[16] 张联邦,韩寒. 基于等可靠性准则的风电场容量可信度评估方法 [J]. 电工电气, 2014( 10) : 7 - 10.

[17] 石一辉,张磊琪,李诚,等. 风电容量可信度及其评估方法 [J]. 自动化与仪器仪表 2014( 10) : 133 - 136.

[18] 杨咏梅,华煌圣,汪华,等. 储能提升风电容量置信度的策略研究 [J]. 应用科技 2017 44( 1) : 18 - 22.

[19] 曲翀,王秀丽,谢绍宇,等. 不同风速模型和可靠性指标对风电可信容量评估的影响 [J]. 电网技术 2013 , 37( 10) : 2896 - 2903.

[20] 杨鸣. 基于蒙特卡罗法的配电系统可靠性分析 [D]. 南京:河海大学,2006.

[21] Wang P , Billinton R. Time Sequential Distribution System Reliability Worth Analysis Considering Time Varying Load and Cost Models [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,1999 ,14( 3) : 1046 - 1051.

[22] 朱静,高亚静,刘建鹏,等. 主动配电网供电能力实时评估方法 [J]. 中国电力 2015 48( 12) : 96 - 102.

[23] Goswami S K , Basu S K , Deb A K , et al. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,1992 ,7( 3) : 1484 - 1491.

作者简介:

陈谦(1979),硕士、高级工程师,主要研究方向为电网规划、电力系统保护与控制。

(收稿日期:2018-11-22)