

多目标优化的园区级低碳综合能源系统运行策略

涂春雷，毛知新

(中国电建集团江西省电力建设有限公司，江西 南昌 310003)

摘要：低碳背景下，为解决工业园区能源需求和碳排放双重压力，构建由分布式可再生能源和清洁能源组成的低碳综合能源系统，首先建立园区低碳综合能源的源网荷储元件的数学模型，然后从技术、经济、能效和环境维度分析园区级低碳综合能源的源网荷储协同优化控制，最后设计自治、经济、低碳、高效和综合的运行策略，满足不同利益主体的目标需求。

关键词：低碳能源系统；源网荷储协同优化；运行策略；优化目标

Multi-objective optimization operation strategy of park level low carbon comprehensive energy system

TU Chunlei, MAO Zhixin

(China Power Jiangxi Electric power Construction Co.,Ltd., Nanchang 330001, China)

Abstract: Under the low-carbon target, in order to solve the dual pressure of energy demand and carbon emissions in the industrial park, and build a low-carbon integrated energy system consisting of distributed renewable energy and clean energy. First, establish a mathematical model of the source, network, load and storage elements of low-carbon integrated energy in the park. Then, analyze the source, network, load and storage collaborative optimization control of low-carbon integrated energy in the park from the technical, economic, energy efficiency and environmental dimensions, and design autonomy, economy Low carbon, efficient and comprehensive operation strategies to meet the target needs of different stakeholders.

Key words: low carbon energy system; source network load storage collaborative optimization; operation strategy; optimization objectives

0 引言

“双碳”目标下，党的“二十大”报告提出：积极稳妥推进碳达峰、碳中和，加快规划建设新型能源体系。各地都在大力发展光伏、风电和环境能等低碳可再生能源，能源结构进一步转型。由可再生能源为主体构成的微电网、能源

互联网和综合能源服务等产业迅速崛起，空调系统、电动汽车等随机性柔性用电设备快速普及，增强了能源供给侧的随机性和间歇性，使其稳定性和可控性下降^[1-4]。由多种能源构成的多能互补综合能源系统是现代低碳能源系统的物理基础^[5-7]，在满足区域用户多元化能源需求的同时，就地生

产和消纳分布式可再生能源,提高能源的综合利用效率,减少传统不可再生能源的使用,降低温室气体排放,有利于环境保护,有明显的社会和环境效益^[8-10]。在多能互补综合利用的基础上,结合区域低碳发展实际需要,构建源网荷储协同优化的区域能源协同控制系统,实现能源系统源网荷储友好互动和梯级利用,是园区级低碳能源系统研究和重要方向^[11-14]。

在区域终端,分布式能源构成的园区级低碳综合能源是解决能源和环境双重压力的最佳选择,横向多种能源互补供能,纵向源网荷储友好互动协同优化,提高了能源供应和使用的经济性^[15-22]。生物质、热泵和分布式天然气冷热电三联供技术的发展和运用,促进了用户侧冷、热、电、气多能互补综合能源的发展^[23-26]。

多种间歇性、波动性能源和时变柔性负荷构成的区域综合能源系统,在规划、建设和运营过程中,需综合考虑系统的技术性、稳定性、经济性、能源利用效率和环保性,而这些指标既相互关联又互相矛盾^[27-29],如何协调优化运行成为研究的重点。目前,已有许多学者对园区级综合能源系统规划设计和优化运行进行了研究。研究了用户侧冷热电负荷需求响应,并建立了优化运行模型。在物理数学模型基础上,研究优化运行控制策略,提高园区低碳能源系统的安全性和稳定性。在规划层面,研究低碳综合能源的定址定容规划、设计和耦合运行^[30-32]。运行效率方面,集中在低碳综合能源多能互补集成优化的控制策略的研究。在能量管理等方面^[33-35],综合考虑风光储荷等的随机性和间歇性,结合需求侧响应特性,应用粒子群算法和差分进化等算法,建立区域低碳综合能源经济运行的随机优化模型和基于母线的通用模型^[36-39]。通过不同数学模型和经济分析工具研究低碳综合能源的经济性,分析冷热电联供系统不同运行方式的能效差异^[40-44]。环境因素的影响也是低碳综合能源的研究对象之一,在目标函数中加入污染气体排放惩罚函数等可以建立起低碳综合能源的经济调度模型^[45-47]。

随着云大物移智链等新兴技术在能源行业深入应用,大规模可再生能源、储能和柔性负荷的分布式应用和协同管控成为区域能源系统规划和运行管理的研究重点^[48]。园区级低碳综合能源系统中包含源网荷储等多个环节^[49-52],其运行涉及技术、经济、节能、环保和能效等多方面因素,有必要在分析研究源网荷储各环节特性的基础上,建立综合能源系统协同优化控制模型,满足实际场景的多目标优化运行需求。区域综合能源系统的技术性、环保性、可靠性和电能质量等目标之间存在相关性和矛盾性,如何协调不同目标,使得系统能够最大程度兼顾多个目标仍是该领域面临的关键问题^[53-55]。

目前的研究大多集中在园区低碳综合能源系统的单一方面,未能从整个系统的运行进行分析研究。本文以国家能源局某能源互联网示范项目为基础,以低碳园区建设为目标,结合用户节能降碳、绿色发展和经济运行的实际需要,秉承能源-经济-环境深度融合原则,分析园区级区域能源系统源网荷储能源链各环节特性,研究源网荷储协同优化控制策略,从能源系统安全稳定、经济、能源利用效率和低碳环保等角度进行综合分析,构建了低碳、经济、高效、自治和优化五种不同的优化运行模式,不同的目标用户可根据需要进行模式选择。经过现场验证,满足不同目标用户的需求。

1 低碳综合能源系统模型

多能互补低碳综合能源系统作为未来区域能源综合利用的发展方向,在现代能源系统建设中得到了越来越多的研究和应用。由能源生产和转换设备、能源传输网络、不同类型负荷以及多种储能方式构成的低碳综合能源系统结构如图1所示。

1.1 能源生产和转换设备

本研究的区域级低碳综合能源系统的能源生产和转换设备主要包括光伏、风电、天然气和地(水、空气)源热泵等。

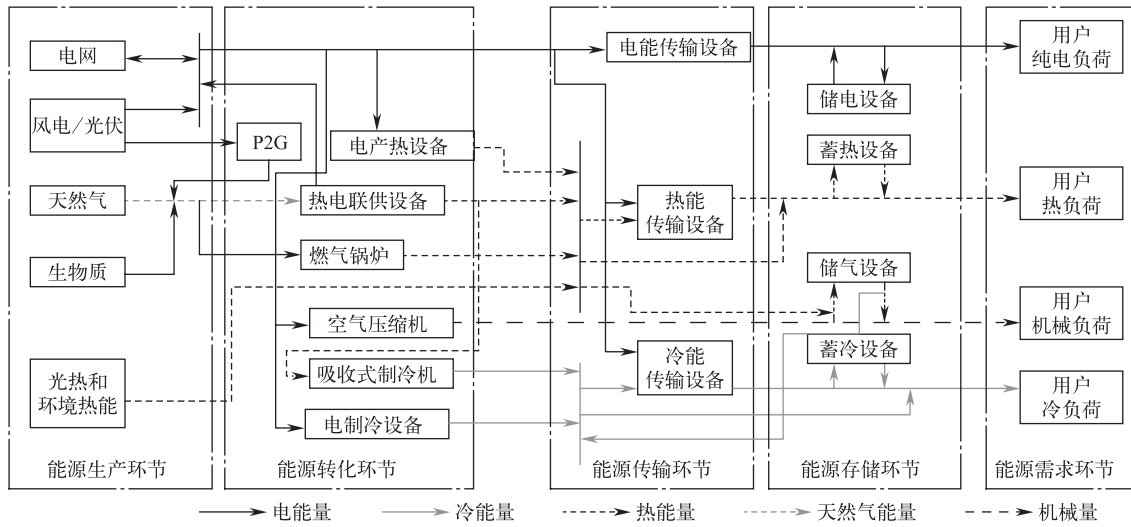


图1 多能互补园区低碳综合能源系统系统架构

Fig. 1 System architecture of low carbon integrated energy system in multi-energy complementary park

(1) 分布式光伏

分布式光伏是通过半导体技术将太阳光能转换成电能的设备，其发电出力受温度和太阳光照的影响，在标准测试条件下，分布式光伏功率输出表达式为

$$P_{PV} = P_{STC} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (1)$$

式中， P_{STC} 为光伏最大输出功率； $\bar{G}_T$ 为平均时长下太阳能的辐射强度； $\bar{G}_{T,STC}$ 为太阳能辐射强度； α_p 为功率的温度系数； T_c 为当前时间的光伏电池温度； $T_{c,STC}$ 为光伏电池温度。

(2) 分散式风电

分散式风电的功率输出与风速的立方成正比，风电的功率输出表达式为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p A v^3 \quad (2)$$

式中， P_m 为风机的功率输出； C_p 为风力发电设备的性能系数； ρ 为当地空气密度； A 为风机叶片扫过的面积； v 为风速。

(3) 分布式天然气冷热电三联供

分布式天然气冷热电三联供系统的主要能源转换设备及数学模型如下。

1) 燃气机组。微型燃气轮机是将天然气转换成电能和高温余烟热能的主要设备。其能流耦合转换数学模型为

$$P_{GT}^e = F_{GT}^g \eta_{GT} \times LHV \quad (3)$$

$$P_{GT}^h = \frac{P_{GT}^e (1 - \eta_{GT} - \eta_{loss})}{\eta_{GT}} \quad (4)$$

$$\eta_{GT} = a + b \frac{P_{GT}^e}{P_{GT,N}} + c \left(\frac{P_{GT}^e}{P_{GT,N}} \right)^2 + d \left(\frac{P_{GT}^e}{P_{GT,N}} \right)^3 \quad (5)$$

式中， P_{GT}^e 为微型燃气轮机的实际输出功率； $P_{GT,N}$ 为微型燃气轮机的额定功率； LHV 为天然气的低位热值； F_{GT}^g 为天然气耗量； P_{GT}^h 为高温烟气余热； η_{GT} 为燃气轮机效率； η_{loss} 为热损失效率； a 、 b 、 c 和 d 为燃气轮机效率系数。

2) 燃气热水锅炉。燃气锅炉 (Gas-fired Boiler, GB) 数学模型为

$$F_{GB}(t) = \frac{P_{GT}^h(t)}{LHV \times \eta_{GB}} \quad (6)$$

式中， P_{GT}^h 为燃气锅炉实际输出热功率； F_{GB} 为燃气锅炉实际输入燃气流量； η_{GB} 为燃气锅炉热效率。

3) 余热锅炉。余热回收锅炉 (Heat-recovery Boiler, HB) 能流耦合转换数学模型为

$$P_{HB}^h(t) = [P_{GB}^h(t) + LHV \times F_{HB}(t)] h_{HB} \quad (7)$$

式中， P_{HB}^h 为余热锅炉出力； F_{HB} 为补燃天然气流量； h_{HB} 为余热锅炉热效率。

4) 制冷机组。常用的溴化锂吸收式制冷机 (Lithium-bromide Refrigeration, LR) 的能流

转换模型为

$$P_{LR}^c(t) = P_{LR}^h(t) \times \text{COP}_{LR} \quad (8)$$

式中, P_{LR}^h 为制冷机输入热功率; P_{LR}^c 为制冷机输出冷功率; COP_{LR} 为制冷机的制冷系数。

(4) 热泵

常用的热泵包括地(水、空气)源热泵,其制冷、制热数学模型可描述为

$$Q_{HP,c}(t) = C_{OP,c} P_{HP}(t) \quad (9)$$

$$Q_{HP,h}(t) = C_{OP,h} P_{HP}(t) \quad (10)$$

式中, $P_{HP}(t)$ 、 $Q_{HP,c}(t)$ 和 $Q_{HP,h}(t)$ 分别为 t 时段热泵输入的电、制冷和制热功率; $C_{OP,c}$ 、 $C_{OP,h}$ 分别为热泵的制冷和制热系数。

1.2 能源传输网络

工业园区低碳能源系统的能源网络包括热力网、天然气网和配电网等。

(1) 热力网

园区热力网络的功率平衡方程为

$$P_H^S = \sum_{i=1}^{n_h} P_{H,i}^D + \sum_{i,j=1}^{n_h} P_{H,ij}^L \quad (11)$$

式中, n_h 为供热网络节点数。

(2) 天然气网

天然气传输管道中气体流量的模型可描述为

$$f_{ij}^L = k_{ij}^L \text{sign}(p_i, p_j) \sqrt{\text{sign}(p_i, p_j)(p_i^2 - p_j^2)} \quad (12)$$

式中, f_{ij}^L 为节点 i 、 j 间的天然气流量; k_{ij}^L 为管道常数; p 为节点压力; $\text{sign}(p_i, p_j)$ 为管道中气体的流动方向,具体取值为

$$\text{sign}(p_i, p_j) = \begin{cases} +1 & p_i > p_j \\ -1 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

(3) 配电网

由分布式能源构成的园区主动配电网的节点功率平衡方程为

$$P_{E,i}^G = P_{E,i}^D + V_i \sum_{j=1}^{n_e} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (14)$$

$$Q_{E,i}^G = Q_{E,i}^D + V_i \sum_{j=1}^{n_e} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (15)$$

式中, i 为节点; $P_{E,j}^G$ 为发电机注入的功率; $Q_{E,i}^G$ 为负载消耗的有功功率 $P_{E,j}^D$ 、无功功率 $Q_{E,i}^D$ 与传输线上的功率之和; V 为电压幅值; n_e 为电网节点

数; G 、 B 分别为电导及电纳; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 的相角差。

1.3 不同类型负荷

工业园区的负荷除了传统的照明负荷、办公设备、空调负荷和工业负荷外,还包括电动汽车、热泵等随机性柔性负荷,根据其性能和响应特性差别可分为以下三类。

(1) 可离散调节负荷

部分工业负荷的起停需要一定的稳定时间,这种可离散调节负荷的数学模型为

$$P'_{LD,i} = P'_{LD,i}^{t-1} - (1 - x'_i) \Delta P'_{LD,i} \quad (16)$$

式中, $P'_{LD,i}$ 为在 t 时段负荷 i 的负荷量; $\Delta P'_{LD,i}$ 为在 t 时段负荷 i 的调节量; x'_i 为负荷的调节状态。

(2) 可转移负荷

根据需要调配用电时段的可转移负荷,数学模型可描述为

$$P'_{Lt,j} = P'_{Lt,j}^{t-1} + x'_j \Delta P'_{Lt,j} \quad (17)$$

式中, $P'_{Lt,j}$ 为在 t 时段负荷 j 的负荷量; $\Delta P'_{Lt,j}$ 为在 t 时段负荷 j 的转移量; x'_j 为负荷启动状态。

(3) 可连续调节负荷

自备电厂等可连续调节负荷的数学模型为

$$P'_{Lc,k} = \sum_{n=1}^{N_{G,k}} x'_k P'_{G_{n,k}} \quad (18)$$

式中, $P'_{Lc,k}$ 为在 t 时段负荷 k 的负荷量; $N_{G,k}$ 为自备电厂 k 的机组台数; x'_k 为在 t 时段机组 k 的运行状态; $P'_{G_{n,k}}$ 为在 t 时段机组 n 的有功出力。

1.4 多种形式储能

(1) 电储能

电储能能在用户侧主要起平抑可再生能源的波动和削峰填谷的作用,在微电网孤网运行时可作为启动电源,并承担调频功能,其储能容量与充放电功率和充放电效率有关,其相互关系可描述为

$$E_{ESS}(t) = E_{ESS}(t-1) + [\eta_{ele,store} P_{ele,store}(t) - \frac{P_{ele,release}(t)}{\eta_{ele,release}}] \Delta t \quad (19)$$

式中, $E_{ESS}(t)$ 为时段 t 储电容量; $P_{ele,store}(t)$ 、 $P_{ele,release}(t)$ 、 $\eta_{ele,store}$ 和 $\eta_{ele,release}$ 分别为时段 t 的充放

电功率和效率。

(2) 热储能

热储能的容量与功率及热效率等之间的关系可表示为

$$H_{\text{TES}}(t) = H_{\text{TES}}(t-1) + [\eta_{\text{h,store}} P_{\text{h,store}}(t) - \frac{P_{\text{h,release}}(t)}{\eta_{\text{h,release}}}] \Delta t \quad (20)$$

(3) 气储能

气储能的储气量与充放气功率和前一时段的储气量的数学模型为

$$Q_{\text{GES}}(t) = Q_{\text{GES}}(t-1) + [\frac{\eta_{\text{gas,store}} P_{\text{gas,store}}(t)}{H_{\text{CVNG}}} - \frac{P_{\text{gas,release}}(t)}{\eta_{\text{gas,release}} H_{\text{CVNG}}}] \Delta t \quad (21)$$

式中, $Q_{\text{GES}}(t)$ 为时段 t 储气容量; $P_{\text{ele,store}}(t)$ 、 $P_{\text{ele,release}}(t)$ 、 $\eta_{\text{ele,store}}$ 和 $\eta_{\text{ele,release}}$ 分别为时段 t 的充放气功率和效率。

2 园区低碳综合能源优化目标

园区低碳能源的主要目标是在保证能源供需平衡的基础上, 根据不同利益体的要求满足经济目标、低碳目标和能效目标, 并能平衡各目标, 实现综合目标。

2.1 区域能源技术目标

技术目标是保证园区低碳综合能源系统稳定、可靠运行的基础, 目标函数是使电网运行优化, 保证系统运行的各项技术参数达到最优, 最大可能消纳可再生能源, 最小化与电网的功率交换, 提高系统运行自治性, 保证能源安全稳定供应。

2.2 经济目标

经济目标在保证系统性能的前提下, 选择使总体成本最小或收益最大化, 包括燃料、运维等在内的总体成本最小或收益最大化。

2.3 低碳目标

为保证区域低碳能源系统的温室气体排放量最小化, 低碳目标下, 低于某具体排放水平的分布式能源优先调度, 分布式能源调度完全由排放指标决定。

2.4 效率目标

效率目标是园区级综合能源系统供能元素多、负荷类型多, 能源效率包括一次能源和二次能源的综合利用效率。

2.5 综合目标

综合目标为解决多目标优化调度不同目标之间的相关性及矛盾, 应用分量加权和法平衡技术、经济、效率和环境因素之间的影响, 根据各因素在利益平衡中的权重, 实现整体目标最优化。

3 优化运行策略

园区低碳综合能源系统的运行, 首先必须保证能源系统的安全稳定运行, 能源持续供给并保持供需平衡; 在此基础上, 不同的目标用户追求不同的利益, 本文从分析区域能源系统安全稳定运行的基础上, 研究区域能源系统的经济性、环保性和能源利用效率, 并应用分量加权和法平衡四者之间的矛盾, 实现能源系统的多目标优化运行。区域能源系统经济、技术、效率 and 环境的相互关系如图2所示。

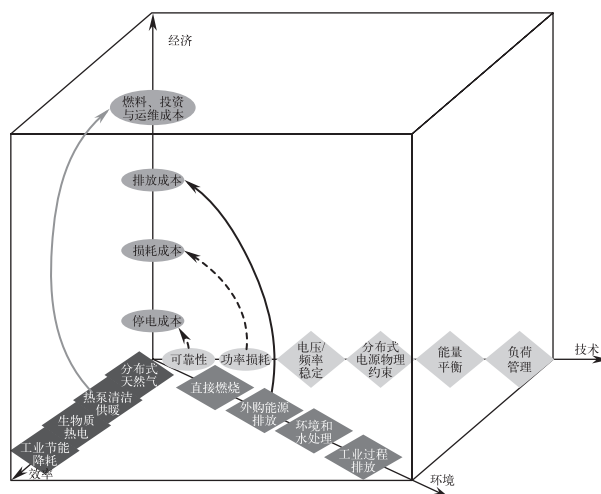


图2 园区低碳综合能源系统运行策略

Fig. 2 Operation strategy of low carbon integrated energy system in the park

3.1 自治运行模式

技术是保证园区低碳综合能源系统安全、稳定和可靠运行的基础, 大量分布式能源的接入,

使区域能源系统的稳定性和可控性下降，为了最大限度地实现分布式能源的就地生产和消纳，保证系统电压频率稳定和供需平衡，最小化使用大电网等外部二次能源，实现自治运行。其目标函数为

$$\min_{P,u} \sum_{t=1}^T \{P_{\text{dbuy}}^t - P_{\text{dsell}}^t\} \quad (22)$$

自治运行模式的约束条件主要包括如下内容。

(1) 能源供需平衡

$$P_t^{\text{TL}} + \sum_{n=1}^N P_t^{\text{RE}_n} = L_t^{\text{E}} + \sum_j P_t^j \quad (23)$$

$$\sum_j Q_t^j = L_t^{\text{H}} \quad (24)$$

式中， L_t^{E} 为 t 时段电负荷需求； P_t^j 为 t 时段第 j 种制（储）热（冷）设备的供电功率； Q_t^j 为 t 时段第 j 种供（储）热设备的热量输出； L_t^{H} 为 t 时段热能需求； Q_t^j 为 t 时段第 j 种供（储）冷设备的供冷量； L_t^{C} 为 t 时段冷负荷需求。

(2) 功能设备运行约束

$$Q_{\min}^j \leq Q_t^j \leq Q_{\max}^j \quad (25)$$

$$-\Delta Q_{\text{down}}^j \leq Q_t^j - Q_{t-1}^j \leq Q_{\text{up}}^j \quad (26)$$

式中， $Q_{\max}^j$ 、 $Q_{\min}^j$ 分别为第 j 种供（储）热（冷）设备的输出上下限； ΔQ_{down}^j 、 Q_{up}^j 为第 j 种设备允许的爬坡速度。

(3) 储能设备运行约束

$$W_t^k = (1-\varepsilon)W_{t-1}^k + \sum_k Q_t^k \quad (27)$$

$$W_{\min}^k \leq W_t^k \leq W_{\max}^k \quad (28)$$

式中， W_t^k 为 t 时段第 k 类储能设备的储能量，若 $Q_t^k > 0$ ，则为第 k 类储能设备的储量，否则为第 k 类储能设备的放能量； $W_{\max}^k$ 、 $W_{\min}^k$ 分别为第 k 类储能设备的容量上下限。

(4) 分布式电源功率约束

$$P_{t,\min}^{\text{RE}_n} \leq P_t^{\text{RE}_n} \leq P_{t,\max}^{\text{RE}_n} \quad (29)$$

式中， $P_{t,\min}^{\text{RE}_n}$ 和 $P_{t,\max}^{\text{RE}_n}$ 分别是第 n 种分布式能源功率的最小和最大值。

(5) 分布式电源爬坡速率

$$\begin{aligned} P_t^{\text{RE}_n} - P_{t-1}^{\text{RE}_n} &\leq R^{\text{U}} \Delta t & P_t^{\text{RE}_n} &\geq P_{t-1}^{\text{RE}_n} \\ P_t^{\text{RE}_n} - P_{t-1}^{\text{RE}_n} &\geq -R^{\text{D}} \Delta t & P_t^{\text{RE}_n} &< P_{t-1}^{\text{RE}_n} \end{aligned} \quad (30)$$

式中， R^{D} 和 R^{U} 分别为调度分布式电源爬坡速率下（上）限。

(6) 电网有功约束

$$P_{i,\min}^{\text{TL}} \leq P_{i,t}^{\text{TL}} \leq P_{i,\max}^{\text{TL}} \quad (31)$$

式中， $P_{i,\max}^{\text{TL}}$ 和 $P_{i,\min}^{\text{TL}}$ 分别是节点 i 允许传输功率的上下限； $P_{i,t}^{\text{TL}}$ 为 t 时刻节点的有功功率。

(7) 电网节点电压约束

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max} \quad (32)$$

式中， $V_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 的电压值； $V_i^{\max}$ 和 $V_i^{\min}$ 分别为节点的电压上下限。

(8) 热网流量约束

$$F_{i,\min}^{\text{H}} \leq F_{i,t}^{\text{H}} \leq F_{i,\max}^{\text{H}} \quad (33)$$

式中， $F_{i,\max}^{\text{H}}$ 和 $F_{i,\min}^{\text{H}}$ 分别为节点 i 的流量上下限； $F_{i,t}^{\text{H}}$ 为 t 时刻节点 i 的流量。

(9) 供冷网络流量约束

$$F_{i,\min}^{\text{C}} \leq F_{i,t}^{\text{C}} \leq F_{i,\max}^{\text{C}} \quad (34)$$

式中， $F_{i,\max}^{\text{C}}$ 和 $F_{i,\min}^{\text{C}}$ 分别为冷网节点 i 的上下限； $F_{i,t}^{\text{C}}$ 为 t 时刻节点 i 的流量。

(10) 气网流量约束

$$F_{i,\min}^{\text{G}} \leq F_{i,t}^{\text{G}} \leq F_{i,\max}^{\text{G}} \quad (35)$$

式中， $F_{i,\max}^{\text{G}}$ 和 $F_{i,\min}^{\text{G}}$ 分别为气网节点 i 的最小和最大流量； $F_{i,t}^{\text{G}}$ 为节点 i 在 t 时刻的流量。

(11) 热电耦合约束

$$\frac{\sum_{m=1}^M Q_m}{\sum_{n=1}^N P_n} \geq \tau \quad (36)$$

式中， Q_m 和 P_n 分别为机组的热和电产量； τ 为机组年均热电比基准值。

3.2 经济优先模式

经济性是能源系统商品属性的具体体现，包括分布式能源和配电网运维、燃料等成本以及与配电网的功率交互费用，园区低碳综合能源系统经济性目标的最优化模型为

$$\min_{P,u} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} (f_{i,g}^t + f_{i,\text{OM}}^t + f_{i,\text{DEP}}^t) + f_{\text{dbuy}}^t - f_{\text{dsell}}^t \right\} \quad (37)$$

$$L_c = W_c + (1 - \gamma_c) D_c - \gamma_c S_c / \eta_{s,c} \quad (47)$$

式中, W_e 、 W_h 和 W_c 为电、热和冷的供应量; E_{e-h} 、 E_{e-c} 分别为制热(冷)设备的耗电量; $E_{hp,m}$ 为能量 m 传输过程的耗电量; H_{h-c} 为热制冷所消耗的热能; γ_e 、 γ_h 和 γ_c 分别为电、热和冷储能装置的状态,1表示储能,0表示放能; $\eta_{s,e}$ 、 $\eta_{s,h}$ 和 $\eta_{s,c}$ 分别为电、热和冷储能装置的效率。

3.5 综合优化模式

园区低碳能源系统的经济性、环保性和节能性之间存在相关性且相互矛盾,同时考虑是一个多目标优化问题,采用分量加权和法的优化模型如下

$$\min_{P,u} (\alpha f_{\text{operation}} + \beta E_{\text{emission}} + \gamma P_{\text{inter}} + \lambda \eta_{\text{loss}}) \quad (48)$$

式中, $f_{\text{operation}}$ 为能源系统运行管理成本; E_{emission} 为能源系统温室气体排放总量; P_{inter} 为与配电网交互的功率; η_{loss} 为能源使用过程中的损失率, $\eta_{\text{loss}} = 1 - \eta_{\text{IES}}$; α 、 β 、 γ 和 λ 分别为园区低碳综合能源系统运行成本、温室气体排放量、与电网交互功率和能源损失率的权重系数。

4 案例分析

本研究应用于江西省某经济开发区,建立包括BIPV建筑一体化光伏、地源热泵、分布式天然气冷热电三联供、储能、充电桩和配电网等构成的园区级低碳能源系统。

4.1 综合能源系统概述

园区综合能源系统实现物理信息社会深度融合,物理系统是能源系统的基础,包括能源生产、转换、传输、存储和使用全能源链所有设备;信息系统是能源数字化的基础,实现能源数据信息交互与共享以及源网荷储协同控制;社会系统是能源系统价值的体现,包括需求侧管理、能量交易和双碳监管等高级应用。

通过分层分布式设计,综合利用新能源技术、能源互联网技术,构建园区综合能源服务体系。系统架构如图4所示。

在物理层,按能源-经济-环境深度融合规划设计原则,在9栋楼房分布式安装9.36 MWp

BIPV分布式光伏、4 MW分布式天然气、5 MW地源热泵、1 MW/4 MW·h磷酸铁锂电池储能和50个充电桩,构建分布式和集中式能源协调互补的供能方式,满足电、热、冷负荷需求,实现终端用户的用能优化。

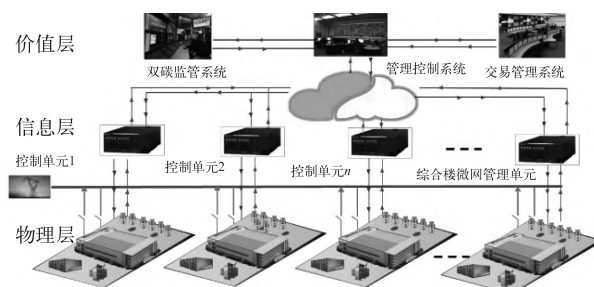


图4 园区综合能源系统架构图

Fig. 4 Architecture of integrated energy system in the park

在信息层,包括各种信息采集、分析和通信装置,实时收集现场的能源数据和气候等信息,实时地对所有数据进行清洗、刷选、分析和处理。

在价值层,在信息层基础上,通过大数据、云计算和区块链技术构建综合能源管理系统、双碳监管系统和交易管理系统等。提供多元化的综合能源服务,实现清洁能源有效利用,提升能源整体利用效率。

4.2 控制策略实现

微电网集群的智能配电网的控制采用分层分布式控制方式,设备层由分布式能源、储能和充电桩的控制装置控制;微电网控制层,各微电网由微电网控制器连通上下进行协调控制,接收集控中心及能量管理系统的控制指令,对设备层的控制装置进行控制;中央自主管理控制器(能量管理控制系统)负责微电网群的能量管理与协调控制。通过分层分布式的智能控制与优化协同,使智能配电网实现区域自治、集群自律和协同优化等功能。

不同的利益体根据自身的需要,可在运行界面选择不同的运行模式,如系统运营商选择自治运行模式,环境监管机构选择低碳运行模式。通常情况下,系统运行选择综合优化模式。

综合优化模式,通过控制变量法设计不同权重比多组优化实验,采用归一化线性加权法进行多目标优化,获取最优权重比。

项目投产后,用户的用电成本较电网下降3.4分/(kW·h),体现了项目的经济性。每年节约标准煤2 455 t,减少CO₂排放6 552 t,NO_x减排16 t,SO₂减排49 t。有利于园区节能减排和绿色发展。

5 结束语

本文针对园区级区域能源系统提出多目标优化的运行控制策略。

1) 针对园区冷、热、电、气等多种能源需求,根据能源-经济-环境融合原则,构建由分布式清洁能源和储能等构成的多能互补能源系统,并分析其特性。

2) 根据不同目标用户的需求,研究综合能源系统技术、经济、能效和环保性控制目标和约束条件。

3) 构建自治、经济、能效、低碳和优化运行模式。

4) 为用户降低用电成本3.4分/(kW·h),每年减排6 552 t CO₂。通过现场应用,验证了该研究的可行性,为园区级低碳能源系统的运行优化提供了技术支持。

参考文献

[1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.

[2] 方绍凤,周任军,许福鹿,等.考虑电热多种负荷综合需求响应的园区微网综合能源系统优化运行[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(1):50-57.

[3] 王绍民,陈力力,李昭赫,等.可再生能源与热电联合响应的区域多能源电网集群运行优化模型[J].可再生能源,2020,38(4):554-560.

[4] 潘华,梁作放,肖雨涵,等.多场景下区域综合能源系统的优化运行[J].太阳能学报,2021,

42(1):484-492.

- [5] 程耀华,张宁,康重庆,等.低碳多能源系统的研究框架及展望[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4060-4069.
- [6] 李嘉祺,陈艳波,陈来军,等.工业园区综合能源系统低碳经济优化运行模型[J].高电压技术,2022,48(8):3190-3200.
- [7] 朱建全,刘海欣,叶汉芳,等.园区综合能源系统优化运行研究综述[J].高电压技术,2022,48(7):2469-2482.
- [8] 吴笑民,郭雨,郑景文,等.多能互补智慧园区能源系统优化运行方法[J].高电压技术,2022,48(7):2545-2553.
- [9] 刘至纯,李华强,王俊翔,等.基于多时间尺度综合需求响应策略的综合能源系统优化运行[J].电力建设,2022,43(9):54-65.
- [10] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等.能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J].电网技术,2016,40(1):114-124.
- [11] 郭健,曹军威,杨洋,等.面向用户需求的区域能源互联网价值形态研究框架及应用分析[J].电网技术,2020,44(2):493-504.
- [12] 赵海彭,苗世洪,李超,等.考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究[J].中国电机工程学报,2022,42(2):573-589.
- [13] 张涛,霍然,刘景,等.基于柔性互联技术的含高渗透率新能源配电网多目标优化运行[J].智慧电力,2021,49(9):1-7,55.
- [14] 陈永龙,朱金大,杨冬梅,等.基于多方利益博弈的园区级综合能源系统经济优化运行技术研究[J].高电压技术,2021,47(1):102-112.
- [15] 丁涛,牟晨璐,别朝红,等.能源互联网及其优化运行研究现状综述[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4318-4328.
- [16] 郭创新,王惠如,张伊宁,等.面向区域能源互联网的“源-网-荷”协同规划综述[J].电网技术,2019,43(9):3071-3080.
- [17] 周长城,马溪原,郭晓斌,等.基于主从博弈的工业园区综合能源系统互动优化运行方法[J].电

- 力系统自动化, 2019, 43(7): 74-80.
- [18] 孙瑛爽, 罗聪, 葛乐矣. 基于确定性解法的新能源微电网经济运行优化[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 149-155.
- [19] 吴界辰, 艾欣. 交互能源机制下的电力产消者优化运行[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 1-18.
- [20] 王刚, 陈先龙, 宋艺航, 等. 计及多能需求的综合能源服务商优化运行策略研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 31-38.
- [21] 黄子硕, 何桂雄, 闫华光, 等. 园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 10-18.
- [22] 杨谦, 刘继春, 蒋万泉. 光伏不同渗透率下考虑源网荷储深度互动的电力系统调峰策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 74-84.
- [23] 黄伟, 柳思岐, 叶波, 等. 基于电-热-气混合潮流的园区综合能源系统站-网协同规划[J]. 电力建设, 2019, 40(11): 73-86.
- [24] 吴福保, 刘晓峰, 孙谊嫔, 等. 基于冷热电联供的多园区博弈优化策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 68-75.
- [25] 陶静, 徐武, 李逸琳, 等. 基于多目标算法的冷热电联供型综合能源系统运行优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 200-205.
- [26] 张雨曼, 刘学智, 严正, 等. 光伏-储能-热电联产综合能源系统分解协调优化运行研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2372-2386.
- [27] 白雪婷, 杨瑞琪, 陈泽春, 等. 计及综合需求响应的园区综合能源系统优化运行[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 27-35.
- [28] 薛屹洵, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 面向多能协同园区的能源综合利用率指标[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 117-123.
- [29] 程浩忠, 胡泉, 王莉, 等. 区域综合能源系统规划研究综述 [J] . 电力系统自动化, 2019, 43(7): 2-13.
- [30] 毛知新. 多目标优化的微电网运行模式[J]. 智能电网(汉斯), 2021, 11(3): 209-217.
- [31] 孙元章, 张鹏成, 柯德平, 等. 碳达峰条件下能源互联网系统规划设计与优化运行[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 1-13.
- [32] 祝荣, 任永峰, 孟庆天, 等. 基于合作博弈的综合能源系统电-热-气协同优化运行策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 20-29.
- [33] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305-1315.
- [34] 杨冬梅, 王俊, 杜炜. 考虑源网荷储聚合交易的区域电热综合能源系统优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 28-39.
- [35] 廖宗毅, 万文略, 陈曦, 等. 基于服务商引导的综合能源系统源-荷协同优化方法[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 38-48.
- [36] 赵晓东, 杜小泽, 曾鸣. 商业综合能源系统经济性分析[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(4): 87-92.
- [37] 陶静, 徐武, 李逸琳, 等. 基于多目标算法的冷热电联供型综合能源系统运行优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 200-205.
- [38] 马喜平, 杨燕静, 沈渭程, 等. 基于改进量子粒子群算法的微能源网优化运行[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 47-53.
- [39] 高丙团, 陈晨, 李远梅, 等. 多区域互联综合能源系统的双层博弈优化运行[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(3): 535-545.
- [40] 戚艳, 刘敦楠, 徐尔丰, 等. 面向园区能源互联网的综合能源服务关键问题及展望[J]. 电力建设, 2019, 40(1): 123-132.
- [41] 姚帅, 顾伟, 张雪松, 等. 热网特性对于综合能源系统超短期调度的影响[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 83-90.
- [42] 邓杰, 姜飞, 王文烨, 等. 考虑动态能效模型的园区综合能源系统梯级优化运行[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1027-1039.
- [43] 陈锦涛, 杨苹, 陈滢, 等. 基于综合需求侧响应策略的园区多能源系统优化运行[J]. 可再生能源, 2021, 39(2): 222-228.
- [44] 降国俊, 崔双喜, 樊小朝, 等. 计及综合需求侧

- 响应的电-气综合能源系统协调优化运行[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 43-49.
- [45] 郑超铭, 黄博南, 王子心, 等. 计及网络传输损耗的电热综合能源系统多目标优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 141-149.
- [46] 王琦, 李宁, 顾欣, 等. 考虑碳减排的综合能源服务商合作运行优化策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 131-140.
- [47] 王俐英, 曾鸣, 赵嘉欣, 等. 计及电力需求响应的多能源协同系统优化运行研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 2-9.
- [48] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 面向能源互联网的多能流综合能量管理系统: 设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 122-128, 171.
- [49] 王皓, 艾芊, 甘霖, 等. 基于多场景随机规划和MPC的冷热电联合系统协同优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 57-64.
- [50] 王成山, 吕超贤, 李鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6791-6803.
- [51] 顾洁, 白凯峰, 时亚军. 基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3119-3129.
- [52] 周成, 芮涛, 王群京. 基于模型预测控制的微电网多目标协调优化[J]. 电测与仪表, 2018, 56(22): 44-50.
- [53] 王瑾然, 卫志农, 张勇, 等. 计及不确定性的区域综合能源系统日前多目标优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3496-3506.
- [54] 祁晓敏, 孔力, 熊煌, 等. 源荷储协调的冷热电综合能源系统随机优化运行[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(3): 10-21.
- [55] 朱兰, 牛培源, 唐陇军, 等. 考虑直接负荷控制不确定性的微能源网鲁棒优化运行[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1400-1413.

作者简介

涂春雷 (1988—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为储能、能源互联网及综合能源服务。

(收稿日期: 2022-09-30)

新闻记者证公示信息

根据国家新闻出版署颁布的《新闻记者证管理办法》《国家新闻出版署关于开展2022年度新闻记者证核验工作的通知》(国新出发电[2023]6号)文件要求, 我单位《电气应用》杂志已对换发记者证人员的资格进行严格审核, 现将我单位拟换发新闻记者证人员名单进行公示, 并接受社会监督。

姓名: 史海疆

记者证号: K11524966000003

监督举报电话: 010-88379714

国家新闻出版署监督举报电话: 010-83138953

《电气应用》