

考虑多元负荷需求响应的综合智慧能源系统协同优化调度

丁斌^{1*}, 邢志坤¹, 王帆¹, 袁博¹, 王翠影², 鲁尔奇²

(1. 国网雄安新区供电公司, 河北省 雄安新区 071700;

2. 上海电力大学电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090)

Collaborative Optimal Scheduling of Integrated Smart Energy System Considering Multi-load Demand Response

DING Bin^{1*}, XING Zhikun¹, WANG Fan¹, YUAN Bo¹, WANG Cuiying², LU Erqi²

(1. State Grid Xiong'an Power Supply Company, Xiong'an 071700, Hebei Province, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

Abstract: Considering the dispatching value of power and heat load in integrated smart energy system management, a cooperative optimal dispatching model and method for integrated energy system considering the demand response of multiple electric loads were proposed. First, the thermal load is added to the optimal scheduling of the integrated smart energy system as a flexible load in the energy system by taking advantage of the fuzzy nature of users' perception of heating comfort and the thermal inertia of the heat network in the transmission process. At the same time, the article integrates the different types of demand response of electric and thermal loads and constructs a comprehensive demand response model for electric and thermal multiple loads. Secondly, the energy quality coefficient is introduced to combine the "quality" and "quantity" of energy, and the optimal energy efficiency of the system is taken as the objective function, and the operation constraints of the electric-thermal system under normal operation conditions, to establish the cooperative optimization scheduling model of the integrated smart energy system. Quantum particle swarm optimization (QPSO) is used to analyze and calculate the model. Finally, an IEEE 9-node system, a 20-node natural gas system and a 6-node thermal system are used as examples to verify the rationality and effectiveness of the proposed model and method.

Keywords: integrated smart energy system; demand response;

基金项目: 国家自然科学基金项目(52007112); 国网河北省电力有限公司科技项目(kj2020-065)。

National Natural Science Foundation of China (52007112); Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. (kj2020-065).

energy coefficient; quantum particle swarm optimization

摘要: 考虑综合智慧能源系统中电负荷和热负荷的可调度价值, 提出了一种考虑电热多元负荷需求响应的综合智慧能源系统协同优化调度模型及方法。首先, 利用用户对供热舒适度感知的模糊性及热网在传输过程中的热惯性, 将热负荷作为能源系统中的柔性负荷加入到综合智慧能源系统的优化调度中。同时, 综合考虑了电负荷与热负荷的不同类型的需求响应, 构建了电热多元负荷综合需求响应模型。其次, 引入能质系数将能量的“质”和“量”相结合, 以系统用能效率最优为目标函数, 考虑正常运行条件下电气热系统运行约束, 建立了综合智慧能源系统协同优化调度模型, 采用量子粒子群算法对模型进行分析计算。最后, 利用IEEE 9节点系统、20节点天然气系统和6节点热系统为算例进行分析, 验证了所建模型及方法的合理性和有效性。

关键词: 综合智慧能源系统; 需求响应; 能质系数; 量子粒子群

0 引言

“双碳”目标下的新型电力系统建设将加快实现可再生能源接入和能源转型^[1-2]。综合智慧能源系统(integrated smart energy system, ISES)利用各个能源子系统在时间空间上的耦合, 实现多能互补、能源梯级利用^[3], 其面向终端用户电、气、热、冷等多种用能需求, 能够协同高效利用常规能源和新能源, 用户侧负荷均可作为柔性负荷参与ISES协同优化调度, 具有协助其他可控资源、调节用能峰谷的潜力^[3]。

目前,一些文献主要针对需求响应(demand respond, DR)及其在ISES中的应用进行研究。文献[4]为降低用电需求的峰均比,建立了一种新的启发式用电需求响应模型,提高了用户的隐私性。文献[5]考虑了消费者行为耦合效应,提出了基于激励的多能源载体综合需求响应模型。文献[6]构建了以系统最低运行费用为目标的电气综合能源系统调度模型。文献[7]考虑了综合需求侧响应在多主体博弈优化调度中的作用,针对区域综合能源系统内的多个主体的利益均衡问题提出了一种两阶段优化策略。文献[8]提出了微网系统的双层调度优化模型。文献[9]采用双层规划模型对综合能源站和电、气、热三网管道的协同优化问题进行建模,上层为规划层,并在下层优化模型中考虑了可中断负荷。文献[10]在对微电网的协同优化中考虑了分时电价对用户侧的激励作用,通过市场手段间接调控用户侧的可控设备,进而改善负荷曲线。需求响应的评价指标体系一般从经济、社会、环境、技术等维度构建,分别评价在需求响应协同下,降低系统调节成本的水平、增加系统灵活性和民生服务水平、促进综合能源系统消纳清洁能源的水平、提高系统稳定性和用能效率等方面。在现有的研究中,文献[11]在构建需求响应评价指标体系时考虑了智能配电网参与需求响应的利益追求;文献[12]考虑了需求响应资源的调用成本以及违约风险;文献[13]将用户满意度考虑在了需求响应的评价指标当中;文献[14]考虑了发、配、用三个环节以及政府机构参与需求响应的多主体需求响应评价指标。但上述研究均没有考虑不同能量转化设备的用能质量。

由上述文献可知,ISES内部存在电、气、热、冷负荷需求,用户自身用能习惯、不同负荷需求选择以及不同需求响应资源的能质效应都直接影响综合智慧能源系统的运行结果,在ISES中将电、气、热、冷负荷作为多元负荷参与需求响应具有重要的现实意义,而目前此类研究较少。针对上述问题,本文考虑了将热负荷作为综合智慧能源系统中的柔性负荷参与到综合智慧能源系统优化调度中,结合电负荷构建综合需求响应,提出了一种包含多类型负荷需求响应的综合智慧能源系统协同优化调度方法。

1 电热多元负荷综合需求响应模型

1.1 电负荷需求响应模型

综合能源系统的电力负荷需求侧响应策略主要有

下面2种形式:基于峰谷的激励型策略和基于峰谷的电价型策略^[15]。峰谷电价型策略应用较为常见,分时电价基于价格的需求响应常使用电价弹性矩阵^[16],通过比较系统用电量与相应的价格变化得到系统电力负荷的电价弹性系数:

$$\eta = \frac{\Delta q}{\Delta p} \cdot \frac{p}{q} \quad (1)$$

式中: Δq 和 Δp 分别为电量 q 和电价 p 的相对增量。

需求侧电量电价弹性矩阵 E_d 为

$$E_d = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \cdots & \eta_{1n} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \cdots & \eta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{m1} & \eta_{m2} & \cdots & \eta_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: η_{ii} 表示自弹性系数; η_{ij} 表示交叉弹性系数。

需求侧响应后总的电量 q_z 为

$$q_z = q_t + \Delta q_t = [q_1 \cdots q_t] + [q_1 \cdots q_t] E_d \begin{bmatrix} \Delta p_1 & \cdots & \Delta p_t \\ p_1 & & p_t \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

式中: q_t 为 t 时段需求侧响应前负荷电量; Δq_t 为需求侧响应后负荷电量变化值。

负荷的变化量由用电量的变化量计算得出:

$$L_c(t) = \begin{cases} \left(1 + \frac{\Delta Q_{on}}{\Delta T_{on} Q_{on}}\right) L_0(t), t \in T_{on} \\ \left(1 + \frac{\Delta Q_{mid}}{\Delta T_{mid} Q_{mid}}\right) L_0(t), t \in T_{mid} \\ \left(1 + \frac{\Delta Q_{off}}{\Delta T_{off} Q_{off}}\right) L_0(t), t \in T_{off} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $L_0(t)$ 、 $L_c(t)$ 分别表示 t 时刻实施峰谷电价前后的负荷; Q_{on} 、 Q_{mid} 和 Q_{off} 分别表示系统在用电高峰时段、平时段、低谷时段的用电量; ΔQ_{on} 、 ΔQ_{mid} 和 ΔQ_{off} 分别表示系统在用电高峰时段、平时段、低谷时段的用电量变化量; T_{on} 、 T_{mid} 和 T_{off} 分别表示系统所处的用电高峰时段、平时段、低谷时段; ΔT_{on} 、 ΔT_{mid} 和 ΔT_{off} 分别表示系统所处的用电高峰时段、平时段、低谷时段的持续时间。

1.2 热负荷需求响应模型

一般而言,热力管网和采暖建筑物具有一定的热惯性^[17]。由于供热管道中热水的传输时延,用户侧的温度变化明显慢于热源的温度变化。本文采用自回归滑动平均(auto regression moving average, ARMA)模型^[18-20]模拟供热系统温度的动态特性,其数学表达式为

$$T_h(t) = \sum_{j=0}^J \alpha_j T_n(t-j) + \sum_{j=0}^J \beta_j T_g(t-j) + \sum_{j=0}^J \gamma_j T_w(t-j) \quad (5)$$

$$T_n(t) = \sum_{j=0}^J \theta_j T_n(t-j) + \sum_{j=0}^J \phi_j T_g(t-j) + \sum_{j=0}^J \omega_j T_w(t-j) \quad (6)$$

式中: $T_g(t)$ 、 $T_h(t)$ 、 $T_n(t)$ 、 $T_w(t)$ 分别为 t 时段热网供水温度、回水温度、室内温度、室外温度; α 、 β 、 γ 、 θ 、 ϕ 、 ω 为热惯性物理参数; J 为供热系统中传热的时延大小。

假设热负荷的主要形式为用户采暖, 为保证用户的舒适度, 室内温度可由下式表示:

$$T_{n,t+1} = T_{n,t}K + (RQ_t^{\text{load}} + T_{w,t})(1-K) \quad (7)$$

式中: $T_{n,t}$ 和 $T_{w,t}$ 分别为 t 时刻室内温度和室外温度; $K=e^{-\Delta t/\tau}$ 为环境温度衰减过程; Q_t^{load} 为时刻 t 建筑从热网中获取的热功率; Δt 为调度时间步长; $\tau=RC_{\text{air}}$, R 为建筑墙体的等效热阻, C_{air} 为建筑的等效热容。

在给定环境下, 根据室内温度计算供暖功率:

$$Q_t^{\text{sup}} = \frac{1}{R} \left(\frac{T_{n,t+1} - T_{n,t}}{1-K} - T_{w,t} \right) \quad (8)$$

在一定温度范围内考虑人体的舒适度, 则室内温度应满足如下约束:

$$T_{\min} \leq T_{n,t} \leq T_{\max} \quad (9)$$

式中: T_{\min} 和 T_{\max} 分别为能够满足人体舒适度需要的最低室温 and 最高室温, $^{\circ}\text{C}$ 。

2 综合智慧能源系统模型

2.1 综合智慧能源系统结构

本文的综合智慧能源系统主要包括4个部分。

①能源供应部分: 分布式光伏, 分布式风电, 电网, 天然气网; ②转换部分: 电制冷 (electric conditioner, EC), 燃气锅炉 (gas boiler, GB), 热电联产设备 (combined heat and power, CHP), 吸收式制冷设备 (absorption refrigeration, AR); ③存储部分: 蓄电池 (battery), 储热罐 (heat storage tank, HST), 水蓄冷 (water cooling storage, WCS); ④负荷部分: 电负荷, 热负荷, 冷负荷。本文的综合智慧能源系统具体结构如图1所示。

2.2 关键设备模型

1) 光伏发电模型。

$$P_{\text{pv}} = P_{\text{stc}} \frac{G}{G_{\text{stc}}} (1 + \varepsilon(T_s - T_{\text{stc}})) \quad (10)$$

$$T_s = T_a + 0.0138(1 + 0.031T_a)(1 - 0.042u)G \quad (11)$$

式中: P_{pv} 为光伏出力, kW; G 为光照强度, kW/m^2 ; T_s 为光伏面板表面温度, $^{\circ}\text{C}$; P_{stc} 、 G_{stc} 和 T_{stc} 分别为标

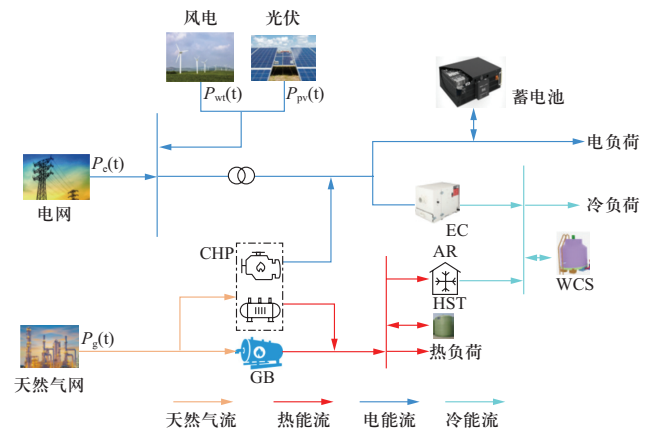


图1 综合智慧能源系统结构

Fig. 1 The structure of the ISES

准测试条件下的最大出力、光照强度、光伏面板表面温度; ε 为光伏面板温度系数; T_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; u 为风速, m/s 。

2) 风力发电模型。

风力发电出力与风速相关, 其数学模型如下:

$$P_{\text{wt}} = \begin{cases} 0, & u < u_{\text{ci}} \text{ 或 } u \geq u_{\text{co}} \\ f(u), & u_{\text{ci}} \leq u < u_r \\ P_r, & u_r \leq u < u_{\text{co}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{wt} 为风机出力, kW; P_r 为风机额定出力, kW; u_{ci} 、 u_{co} 、 u_r 分别为切入风速、切出风速、额定风速, m/s 。 $f(u)$ 为降额出力曲线, 通过三阶多项式拟合:

$$f(u) = \frac{u^3}{u_r^3 - u_{\text{ci}}^3} P_r - \frac{u_{\text{ci}}^3}{u_r^3 - u_{\text{ci}}^3} P_r \quad (13)$$

3) 热电联产机组模型。

微型燃气轮机 (微燃机) 和余热锅炉是热电联产系统的核心装置^[21]。燃气轮机可将天然气转化为电能, 其发电产生的余热经余热锅炉回收供给热负荷, 提高了能源利用效率。其数学模型为

$$Q_t^{\text{MT}} = \frac{P_t^{\text{MT}}(1 - \eta_t^{\text{MT}} - \eta_{\text{L}})}{\eta_t^{\text{MT}}} \quad (14)$$

$$Q_t^{\text{MT-h}} = Q_t^{\text{MT}} \eta_{\text{h}} C_{\text{oph}} \quad (15)$$

式中: Q_t^{MT} 为微燃机产出烟气中含有的余热热量; P_t^{MT} 、 η_t^{MT} 分别为 t 时段微燃机的输出电功率和发电效率; η_{L} 为微燃机的散热损失率; $Q_t^{\text{MT-h}}$ 为 t 时段余热回收装置制热量; C_{oph} 、 η_{h} 分别为余热回收装置的制热系数和烟气回收率。

4) 燃气锅炉模型。

燃气锅炉可参与系统调峰, 为部分热负荷提供热能^[22], 其数学表达式为

$$Q_{GB} = \eta_{GB} F_{GB} \quad (16)$$

式中： Q_{GB} 为燃气锅炉产热量； η_{GB} 为燃气锅炉的产热效率； F_{GB} 为燃气锅炉耗气量。

5) 电制冷机组模型。

电制冷机将电能转化为冷能，其数学模型可表示为

$$C_{EC,t}^{out} = C_{OPEC} P_{EC,t}^{in} \quad (17)$$

式中： C_{OPEC} 为电制冷机的制冷系数，取值为3.5； $C_{EC,t}^{out}$ 、 $P_{EC,t}^{in}$ 分别为 t 时段电制冷机输出的冷量和消耗的电量。

6) 吸收式制冷机模型。

通过二次利用系统内能源生产设备产生的余热和废热，吸收式制冷设备可以提高综合智慧能源系统的用能效率，其工作特性表示为

$$C_{AR,t}^{out} = C_{OPAR} P_{AR,t}^{in} \quad (18)$$

式中： C_{OPAR} 为吸收式制冷机的制冷系数，取值为0.7； $C_{AR,t}^{out}$ 、 $P_{AR,t}^{in}$ 分别为 t 时段吸收式制冷机输出的冷量和消耗的热量。

7) 储能系统模型。

储能装置可以实现能量在时间维度的转移^[23-24]，其动态数学模型可表示为

$$E_x^{t+1} = E_x^t (1 - \delta_x) + \left(P_{x,c}^t \eta_{x,c} - \frac{P_{x,d}^t}{\eta_{x,d}} \right) \Delta t \quad (19)$$

式中： x 代表能量类型，电、热、冷能下标分别用es、hs、cs表示； E_x^{t+1} 为充/放能后的储能量； E_x^t 为充/放能前的储能量； δ_x 为储能系统能量损失率； $P_{x,c}^t$ 为 t 时刻充能功率； $P_{x,d}^t$ 为 t 时刻放能功率； $\eta_{x,c}$ 和 $\eta_{x,d}$ 分别为充能和放能效率。

3 综合智慧能源系统协同优化调度

传统能量效率分析将不同能源的能量进行简单叠加，忽视了能量的品质差异，无法准确衡量ISES的能量利用水平。综合智慧能源系统耦合了电、气等多种异质能源，需要将其折算到同一能级水平进行能效分析。因此，本文在目标函数中引入“能质系数”消除异质能源的品味差异对能效分析的影响。

3.1 能质系数及用能效率模型

能源的高效利用要从数量和能量品质上考虑^[25]，将能量“质”和“量”相结合，才能科学表征能量的利用程度。文献[26]将不同能源对外所能够做的功与

其总能量的比值定义为不同能源的能质系数，其表达式为

$$\lambda = \frac{W_{e,avi}}{W_{e,total}} \quad (20)$$

式中： $W_{e,avi}$ 为系统中同种能源可以转化为功的部分能源； $W_{e,total}$ 为该种能源在系统中的总量。

在综合智慧能源系统中，一般认为电能与机械能具有同等能量品质^[27]，可作为衡量其他能量的标准，可取电能的能质系数为1：

$$\lambda_e = \lambda_m = 1 \quad (21)$$

式中： λ_e 为电能的能质系数； λ_m 为机械能的能质系数。

将不同能源的品位通过能质系数联系起来，将各种能源换算为等效电能，考虑季节温度的影响，本文取夏季的参考温度为29.2℃，冬季参考温度为-1.1℃。根据上述设定可以计算出系统其他形式能源的能质系数，如表1所示。

表1 能源能质系数表
Table 1 Energy quality factors

名称	夏季能质系数	冬季能质系数
燃气	0.63	0.65
热水	0.1~0.2	0.2~0.3
蒸汽	0.2~0.35	0.3~0.4
热负荷		0.1
冷负荷		0.07

本文提出一种能效目标函数的用能效率模型：

$$\eta_1 = \frac{\sum_{t=0}^T (L_e(t) + L_h(t) + L_c(t))}{\sum_{t=0}^T (P_e(t) + P_g(t))} \quad (22)$$

式中： $L_e(t)$ 、 $L_h(t)$ 、 $L_c(t)$ 分别为 t 时刻的电负荷需求、热负荷需求、冷负荷需求； $P_e(t)$ 、 $P_g(t)$ 分别为 t 时刻的电能输入、天然气输入。

3.2 目标函数

该ISES的优化运行是在满足供电、供热、供冷平衡约束，与电网、气网的交互功率约束以及能量转换设备和储能设备的运行约束条件下，通过调整ISES中关键设备的调度计划，使系统用能质量和效率达到最优。因此，本文在用能效率的基础上引入能质系数，用以综合评价需求响应的能效水平。目标函数的表达式为

$$\max \eta_2 = \frac{\sum_{t=0}^T (L_c(t)\lambda_c + L_h(t)\lambda_h + L_c(t)\lambda_c)}{\sum_{t=0}^T (P_c(t)\lambda_c + P_g(t)\lambda_g)} \quad (23)$$

式中: λ_c 、 λ_g 、 λ_h 、 λ_c 分别为电能能质系数、天然气能质系数、热能能质系数、冷能能质系数。

本文同时也考虑到系统焓经济成本 (exergic economic cost, EEC), 将系统中的电、冷、热看作系统能源服务的产品, 可以计算综合智慧能源系统所付出的经济成本:

$$E_{EC} = \frac{c_c E_{xc}^i + c_g E_{xg}^i + c_{re} E_{xre}^i + Z}{E_{xc}^o + E_{xc}^o + E_{xh}^o} \quad (24)$$

式中: c_c 、 c_g 、 c_{re} 分别为该系统模型的输入电能、天然气、可再生能源的焓的单位成本; E_{xc}^i 、 E_{xg}^i 、 E_{xre}^i 分别为单位时间内该系统模型输入电能、天然气、可再生能源的焓; Z 为系统内设备和运维成本; E_{xc}^o 、 E_{xc}^o 、 E_{xh}^o 分别为该系统模型的输出电能、冷量、热量的焓。

3.3 约束条件

本文构建的考虑多元负荷需求响应的综合智慧能源系统协同优化调度模型, 除了需要考虑第1.1节和第1.2节中的约束条件及潮流约束, 还需要考虑以下约束, 其中供电、供热、供冷平衡约束作为等式约束, 能量转换设备约束、储能系统约束、功率交互约束以及可再生能源约束作为不等式约束, 并引入第1章中的需求响应。

1) 供电平衡约束。

$$P_{re}(t) + P_c(t) + P_{CHP}(t) + P_s(t) = P_L(t) + P_{EC}(t) \quad (25)$$

式中: $P_{re}(t)$ 为 t 时段光伏和风电经变压器的出力值; $P_c(t)$ 为 t 时段从电网经变压器输入至ISES的电功率; $P_{CHP}(t)$ 为 t 时段CHP的电功率; $P_s(t)$ 为 t 时段电储能装置的出力值; $P_L(t)$ 为 t 时段需求侧负荷总功率; $P_{EC}(t)$ 为 t 时段输入到电制冷机组的电功率。

2) 供热平衡约束。

$$H_{GB}(t) + H_{CHP}(t) + H_s(t) = H_L(t) + H_{AR}(t) \quad (26)$$

式中: $H_{GB}(t)$ 、 $H_{CHP}(t)$ 分别为GB、CHP在 t 时段的热功率; $H_s(t)$ 为 t 时段热储能装置的出力值; $H_L(t)$ 为 t 时段需求侧热负荷量; $H_{AR}(t)$ 为 t 时段分配到AR中的热功率。

3) 供冷平衡约束。

$$C_{EC}(t) + C_{AR}(t) + C_s(t) = C_L(t) \quad (27)$$

式中: $C_{EC}(t)$ 、 $C_{AR}(t)$ 分别为 t 时段EC和AR设备的供冷功率; $C_s(t)$ 为 t 时段水蓄冷的出力值; $C_L(t)$ 为 t 时段冷负荷需求量。

4) 能量转换设备约束。

能量转换设备包括CHP、GB、EC、AR, 其运行需满足式(14)–(18), 所有设备均需工作在允许范围内, 出力不可超过其最大功率。 P_{CHP}^{\max} 、 H_{CHP}^{\max} 、 H_{GB}^{\max} 、 C_{EC}^{\max} 、 C_{AR}^{\max} 分别为热电联产机组产电、产热、燃气锅炉产热、电制冷产冷、吸收式制冷机产冷的最大功率, 则 t 时段各设备出力需满足如下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{CHP}^t \leq P_{CHP}^{\max} \\ 0 \leq H_{CHP}^t \leq H_{CHP}^{\max} \\ 0 \leq H_{GB}^t \leq H_{GB}^{\max} \\ 0 \leq C_{EC}^t \leq C_{EC}^{\max} \\ 0 \leq C_{AR}^t \leq C_{AR}^{\max} \end{cases} \quad (28)$$

5) 储能系统约束。

$$\begin{cases} P_x^{\min} \leq P_{x,c}(t) \leq P_x^{\max} \\ P_x^{\min} \leq P_{x,d}(t) \leq P_x^{\max} \\ E_x^{\min} \leq E_x(t) \leq E_x^{\max} \\ P_{x,c}(t)P_{x,d}(t) = 0 \\ E_x(0) = E_x(t_0) \end{cases} \quad (29)$$

式中: P_x^{\max} 、 P_x^{\min} 表示储能装置的充放能上下限; E_x^{\max} 、 E_x^{\min} 分别为储能装置的最大、最小容量。储能装置的充、放能过程不能同时发生, 并且经过1个调度周期后储能装置的能量回到初始状态。

6) 与电网功率交互约束。

$$P_e^{\min} \leq P_c(t) \leq P_e^{\max} \quad (30)$$

式中: P_e^{\max} 和 P_e^{\min} 分别为电网售电功率的最大、最小值。

7) 与气网功率交互约束。

$$P_g^{\min} \leq P_g(t) \leq P_g^{\max} \quad (31)$$

式中: P_g^{\max} 和 P_g^{\min} 分别为与气网售气功率的最大、最小值。

8) 可再生能源约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{pv}(t) \leq P_{pv}^{\max} \\ 0 \leq P_{wt}(t) \leq P_{wt}^{\max} \end{cases} \quad (32)$$

式中: P_{pv}^{\max} 和 P_{wt}^{\max} 分别为光伏电站和风电机组出力的最大值。

3.4 求解方法

本文利用量子粒子群 (quantum particle swarm optimization, QPSO) 算法进行计算, 其求解步骤如图2所示。通过引入量子云, 克服了传统粒子群算法设置参数过多、容易陷入局部最优的问题^[28]。

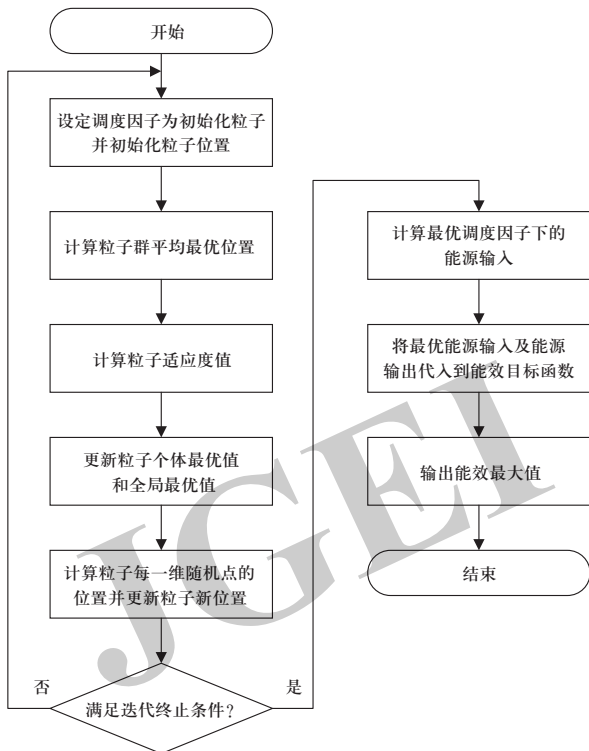


图2 QPSO算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the QPSO algorithm

假设粒子群中的粒子数量为 m ，迭代次数为 k ，则采用量子粒子群算法优化系统调度策略的具体步骤如下。

1) 初始化粒子群。设置迭代次数为 k ，粒子数量为 m ，最大迭代次数为 k_{\max} 。每个粒子的位置向量表示一组综合能源系统调度策略的潜在最优解，首先随机初始化粒子的初始位置 $X_i(0)$ ：

$$X_i(0) = [x_{i,1}(0), x_{i,2}(0), \dots, x_{i,D}(0)] \quad (33)$$

2) 令各粒子局部最优位置 $P_i(0)=X_i(0)$ ，并根据调度策略的最优解确定粒子群的全局最优位置 $P_G(0)$ ：

$$P_G(0) = \min \{X_1(0), X_2(0), \dots, X_m(0)\} \quad (34)$$

3) 计算各个粒子的适应度。根据第3.2节中设立的综合能效评价指标来建立粒子适应度函数，并计算各个粒子的适应度：

$$f(X_i) = \eta_{2,i} \quad (35)$$

4) 在每次迭代中更新每个粒子新的局部最优位置 $P_i(k)$ ：

$$P_i(k) = [P_{i1}(k), P_{i2}(k), \dots, P_{id}(k), \dots, P_{iD}(k)] \quad (36)$$

$$P_{id}(k) = (x_1 P_{id}(k) + x_2 P_{Gd}(k)) / (x_1 + x_2) \quad (37)$$

式中： $P_{id}(k)$ 为表示粒子位置的坐标； D 为粒子的维数； x_1 和 x_2 为 $[0,1]$ 区间内的随机数。

5) 根据各粒子新的局部最优位置，更新在第 k 次迭代时粒子群的全局最优位置 $P_G(k)$ ，即综合能源系统各设备的出力为

$$P_G(k) = \min \{P_1(k), P_2(k), \dots, P_m(k)\} \quad (38)$$

6) 根据式(39)计算第 k 次迭代时粒子群的平均最优位置 $M_{\text{best}}(k)$ ：

$$M_{\text{best}}(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i(k) \quad (39)$$

7) 根据式(40)更新每个粒子的新位置 $X_i(k+1)$ ：

$$X_i(k+1) = P_i(k) \pm \beta |M_{\text{best}}(k) - X_i(k)| \ln\left(\frac{1}{u}\right) \quad (40)$$

式中： u 是服从 $(0,1)$ 分布的随机变量； β 表示扩张因子。

8) 若满足算法的终止条件或 $k=k_{\max}$ ，则算法结束；否则，返回步骤1)。

4 系统算例分析

本文利用IEEE 9节点的配电系统，结合20节点的自然气系统和6节点的热系统，基于第2.1节中的综合智慧能源系统结构示意图，做出综合智慧能源系统接线的实际算例示意图，如图3所示。基于MATLAB 2019b搭建仿真平台，粒子个数 m 设为80，最大迭代次数 k_{\max} 设为300。用能系统所需的能源类型包括3类：电、热、冷，采用以热定电的运行方式。图4至图7分别为典型日24 h负荷以及风电、光伏出力情况，以日为调度周期，采样时间为1 h，共有24个时段进行调度，其中图5表示居民建筑负荷类型，图4和图6表示办公建筑负荷类型，图7为综合智慧能源系统的风光出力。电制冷机组和吸收式制冷设备的最大功率均为2500 kW，其他设备参数如表2所示，储能系统参数如表3所示，峰、谷、平时电价如表4所示。

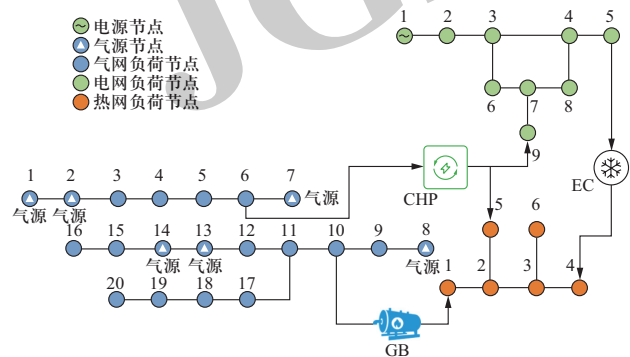


图3 综合智慧能源系统接线示意图

Fig. 3 Wiring diagram of the ISES

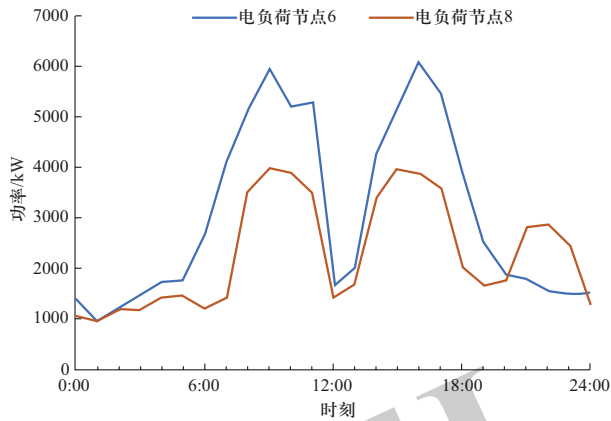


图4 综合智慧能源系统典型日电负荷
Fig. 4 Typical daily power load of the ISES

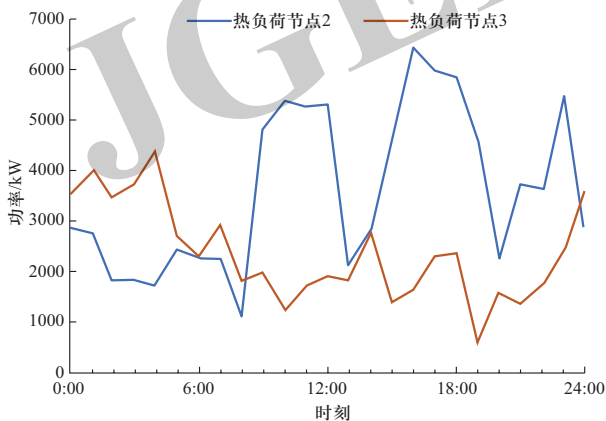


图5 综合智慧能源系统典型日热负荷
Fig. 5 Typical daily heat load of the ISES

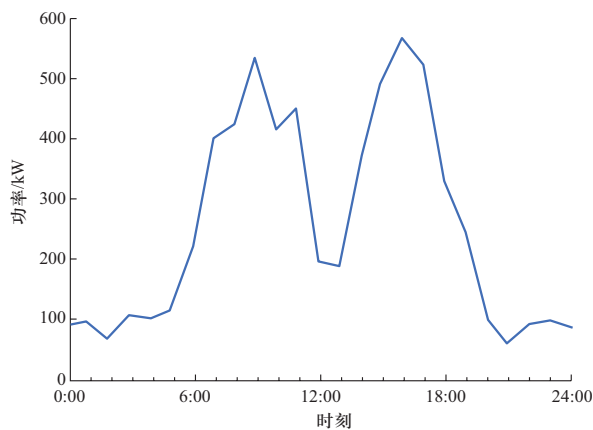


图6 综合智慧能源系统典型日冷负荷
Fig. 6 Typical daily cold load of the ISES

表2 综合智慧能源系统运行参数
Table 2 Operation parameters of ISES

设备	转换类型	转换效率	最大功率/kW
CHP	气→电	0.35	10 000
	气→热	0.45	
GB	气→热	0.9	10 000

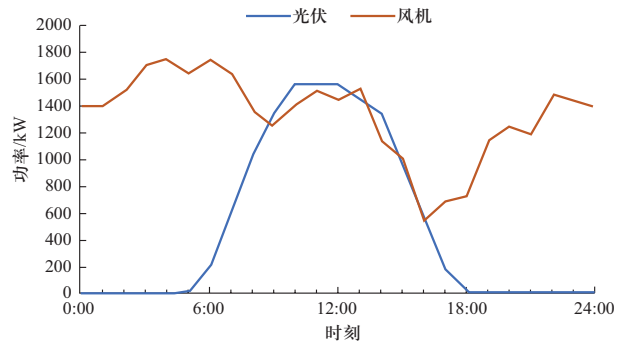


图7 综合智慧能源系统的风光出力
Fig. 7 Wind and PV power output of the ISES

表3 储能系统参数

Table 3 Parameters of energy storage system

参数类型	电储能	储热	储冷
蓄能效率	0.9	0.9	0.9
释能效率	0.9	0.9	0.9
自耗率	0.04	0.04	0.04
储能最大功率/kW	1500	1250	1250
放能最大功率/kW	1500	1250	1250
额定容量/kWh	1800	1800	1800

表4 峰、谷、平时电价参数

Table 4 Parameters of electricity prices

参数	谷时段	平时段	峰时段
时段	00:00—08:00	08:00—09:00 12:00—16:00 19:00—24:00	09:00—12:00 16:00—19:00
电价/(元·(kWh) ⁻¹)	0.25	0.53	0.82

本文针对某地区的电价、天然气价和用能情况,对ISES进行相关优化后,其用能成本、能源利用效率、环境效益都得到了大幅优化。年运行成本降低104.56万元,成本节约率达34.16%;每年节约的能量折合237.9 t标准煤,每年能源消耗节约率达18.6%;优化后系统的可再生能源利用率超过7.04%。

从图8可以看出,经优化后,在电价低谷时段,电负荷主要从外网购电来满足需求,不足部分由CHP提供。在电价较高时段,为降低运行成本,提高系统用能效率,主要由燃气轮机和蓄电池供应电力负荷,且光伏出力被完全消纳,电力不足时从外网购电。此外,在电价高峰时刻储电装置放电以降低运行成本,缓解供电压力。系统电能首先满足电负荷需求,富裕的电力用于驱动电制冷机制冷、储能装置蓄电。

由图9和图10可知,在电价低谷时段,热负荷主要由燃气锅炉提供,冷负荷主要由电制冷机组供给。在电价较高时段,由于热电联产机组发电量较大,产热量较多,热负荷由热电联产机组供给。

加入能质系数后,综合智慧能源系统用能效率最终稳定在76.56%。

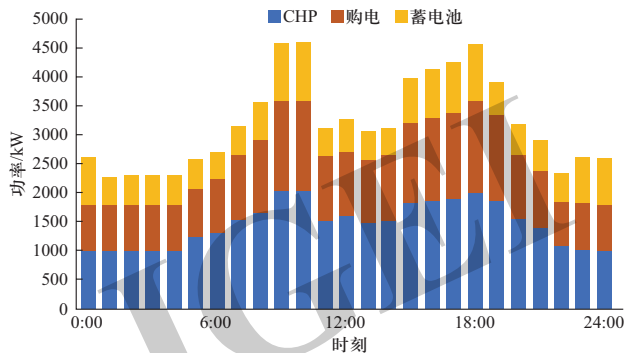


图8 电能调度结果

Fig. 8 Electricity dispatch results

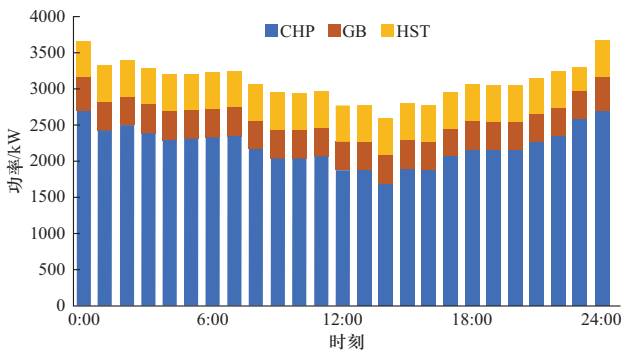


图9 热能调度结果

Fig. 9 Heat energy dispatch results

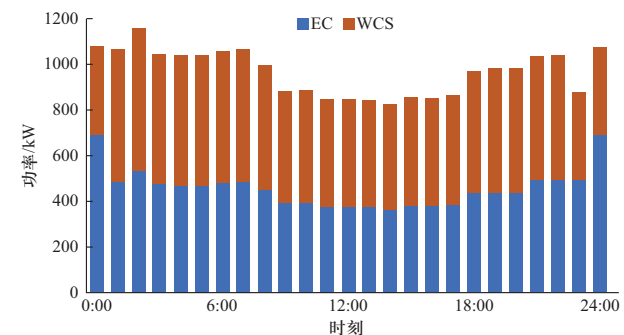


图10 冷能调度结果

Fig. 10 Cold energy dispatch results

5 结论

本文针对需求侧多元负荷的可调度性问题,利用电力负荷价格型需求响应策略、热用户对供热舒适度感知的模糊性、热网的热惯性等供能特性,建立了以

电力负荷和热力负荷为柔性负荷参与优化调度的多元负荷需求响应模型。本文在目标函数中引入“能质系数”作为评价综合智慧能源系统运行效果、提高用能效率的指标。考虑到综合智慧能源系统管理中电热多类型负荷具有一定的可调度价值,文章提出了考虑电热多类型负荷需求响应的综合智慧能源系统优化调度模型。本文未考虑多个综合智慧能源系统之间的互联,未来将进一步研究多综合智慧能源系统之间的优化调度方法。

参考文献

- [1] TIAN H, LIU H Z, MA H, et al. Steady-state voltage-control method considering large-scale wind-power transmission using half-wavelength transmission lines[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(3): 239-250.
- [2] 柯贤波, 郗朝辉, 霍超, 等. 西北电网风电与光伏紧急功率控制系统设计[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(2): 39-45.
KE Xianbo, QIE Zhaohui, HUO Chao, et al. Design of a wind power and photovoltaic emergency power control system for Northwest China Grid[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(2): 39-45(in Chinese).
- [3] 王赞, 陈光, 董晓, 等. 基于工业互联网的智慧能源服务系统架构研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(3): 77-83.
WANG Zan, CHEN Guang, DONG Xiao, et al. Research on the architecture of smart energy service system based on industrial Internet[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 77-83(in Chinese).
- [4] PARIZY E S, BAHRAMI H R, CHOI S. A low complexity and secure demand response technique for peak load reduction[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 3259-3268.
- [5] ZHENG S L, SUN Y, LI B, et al. Incentive-based integrated demand response for multiple energy carriers considering behavioral coupling effect of consumers[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(4): 3231-3245.
- [6] 张伊宁, 何宇斌, 晏鸣宇, 等. 计及需求响应与动态气潮流的电-气综合能源系统优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(20): 1-8.
ZHANG Yining, HE Yubin, YAN Mingyu, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-natural gas system considering demand response and dynamic natural gas flow[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(20): 1-8(in Chinese).
- [7] 徐业琰, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 基于综合需求响应和博弈的区域综合能源系统多主体日内联合优化调度[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2506-2518.
XU Yeyan, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Multi-player intraday optimal dispatch of integrated energy system based on integrated demand response and games[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2506-2518(in Chinese).

- [8] 米阳, 李战强, 吴彦伟, 等. 基于两级需求响应的并网微电网双层优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1899-1906. MI Yang, LI Zhanqiang, WU Yanwei, et al. Bi-layer optimal dispatch of grid-connected microgrid based on two-stage demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1899-1906(in Chinese).
- [9] 黄伟, 柳思岐, 叶波. 考虑源-荷互动的园区综合能源系统站-网协同优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 44-53. HUANG Wei, LIU Siqi, YE Bo. Station-network cooperative optimization of integrated energy system for park considering source-load interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 44-53(in Chinese).
- [10] 孙丛丛, 王致杰, 江秀臣, 等. 计及需求响应的并网型微电网协同优化策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 30-37. SUN Congcong, WANG Zhijie, JIANG Xiuchen, et al. Coordinated optimization strategy for grid-connected microgrid considering demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(1): 30-37(in Chinese).
- [11] 曾博, 白婧萌, 郭万祝, 等. 智能配电网需求响应效益综合评价[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1603-1612. ZENG Bo, BAI Jingmeng, GUO Wanzhu, et al. Comprehensive evaluation for benefits of demand response in smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1603-1612(in Chinese).
- [12] 王蓓蓓, 王骥鑫, 李雅超, 等. 区块链环境下考虑信用的需求响应资源交易机制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 30-38. WANG Beibei, WANG Qixin, LI Yachao, et al. Transaction mechanism of demand response resource considering credit in blockchain environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 30-38(in Chinese).
- [13] 孙毅, 刘昌利, 刘迪, 等. 计及滚动评价的居民群需求响应策略[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 34-45. SUN Yi, LIU Changli, LIU Di, et al. Residents demand response strategy considering rolling evaluation[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 34-45(in Chinese).
- [14] 方凯杰, 杨世海, 陈铭明, 等. 多主体参与的电力需求响应效益评价研究[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(5): 24-30. FANG Kaijie, YANG Shihai, CHEN Mingming, et al. Research on benefit evaluation of power demand response with multi-agent participation[J]. Coal Economic Research, 2021, 41(5): 24-30(in Chinese).
- [15] BALLI M F, ULUDAG S, SELCUK A A, et al. Distributed multi-unit privacy assured bidding (PAB) for smart grid demand response programs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4119-4127.
- [16] MCKENNA K, KEANE A. Residential load modeling of price-based demand response for network impact studies[C]// 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016: 1.
- [17] ALIPOUR M, ZARE K, ZAREIPOUR H, et al. Hedging strategies for heat and electricity consumers in the presence of real-time demand response programs[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1262-1270.
- [18] 邹云阳, 杨莉, 冯丽, 等. 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 13-19. ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13-19(in Chinese).
- [19] KONG X Y, LI C, ZHENG F, et al. Improved deep belief network for short-term load forecasting considering demand-side management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1531-1538.
- [20] WANG Y, CHEN Q X, SUN M Y, et al. An ensemble forecasting method for the aggregated load with subprofiles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3906-3908.
- [21] YANG W T, LIU W J, CHUNG C Y, et al. Coordinated planning strategy for integrated energy systems in a district energy sector[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1807-1819.
- [22] SANGSWANG A, KONGHIRUN M. Optimal strategies in home energy management system integrating solar power, energy storage, and vehicle-to-grid for grid support and energy efficiency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5716-5728.
- [23] 熊宇峰, 司杨, 郑天文, 等. 基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 507-516. XIONG Yufeng, SI Yang, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen storage in industrial park integrated energy system based on stackelberg game[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 507-516(in Chinese).
- [24] ZHU X, YANG J, LIU Y, et al. Optimal scheduling method for a regional integrated energy system considering joint virtual energy storage[J]. IEEE Access, 2019, 7: 138260-138272.
- [25] 吴京锴, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 基于能量价值的多能协同园区能源利用效率指标[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 54-62. WU Jingkai, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Energy value based efficiency index of energy utilization for multi-energy cooperative park[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 54-62(in Chinese).
- [26] 刘洪, 赵越, 刘晓鸥, 等. 计及能源品位差异的园区多能源系统综合能效评估[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2835-2843. LIU Hong, ZHAO Yue, LIU Xiaou, et al. Comprehensive energy efficiency assessment of park-level multi-energy system considering difference of energy grade[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2835-2843(in Chinese).
- [27] 胡泉, 尚策, 陈东文, 等. 考虑能量品质的区域综合能源

系统多目标规划方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 22-31.

HU Xiao, SHANG Ce, CHEN Dongwen, et al. Multi-objective planning method for regional integrated energy systems considering energy quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 22-31(in Chinese).

- [28] TU S S, REHMAN O U, REHMAN S U, et al. A novel quantum inspired particle swarm optimization algorithm for electromagnetic applications[J]. IEEE Access, 2020, 8: 21909-21916.

收稿日期: 2022-01-09; 修回日期: 2022-04-22。



丁斌

作者简介:

丁斌(1975), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为大电机及运行, 新能源发电及并网, 电力储能应用等。通信作者, E-mail: ding_b@126.com。

袁博(1988), 男, 硕士, 研究方向为电网规划和设计, E-mail: yuan_bo1988@126.com。

(责任编辑 张宇)

JGEEI

JGEEI