

基于改进模拟退火遗传算法的高速公路服务区自洽能源系统高能效优化

李艳波¹, 李若尘¹, 史博², 陈俊硕¹

(1. 长安大学能源与电气工程学院, 710064, 西安;

2. 河南交通投资集团有限公司运营管理中心, 450016, 郑州)

摘要: 针对高速公路自洽能源系统高能效优化的问题, 基于改进模拟退火遗传算法(SA-GA), 提出了一种综合考虑经济目标和环保目标的自洽能源系统高能效优化运行策略。首先根据高速公路服务区自洽能源系统中各电力单元特性, 建立一种综合考虑系统经济性和环保性的能效目标函数; 其次根据高速公路服务区自洽能源系统的分类, 建立了不同类型系统对应的约束条件; 为避免遗传算法易陷入局部最优的缺陷, 引入模拟退火算法, 对改进后的 SA-GA 算法采用降温函数, 寻找全局最优解; 利用新疆某高速公路服务区自洽能源系统发电和负荷数据, 并在传统服务区负荷的基础上进一步考虑新能源汽车充电站的影响。测试函数测试结果表明: SA-GA 算法在求解速度和稳定性方面有明显提升, 改进 SA-GA 算法对夏季、冬季典型日能效优化的结果, 相较于遗传算法, 在寻优精度提升约为 20.33%。

关键词: 交通能源融合; 自洽能源系统; 高能效; 充电站; 模拟退火算法; 遗传算法

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202401019 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0197-12

Optimization of High Energy Efficiency for Self-Consistent Energy System in Highway Service Area via Simulated Annealing Algorithm-Genetic Algorithm

LI Yanbo¹, LI Ruochen¹, SHI Bo², CHEN Junshuo¹

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Operation Management Center, Henan Transportation Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: To solve the problem of high-efficiency optimization of highway self-consistent energy system (SCES) by utilizing an improved simulated annealing genetic algorithm (SA-GA) with a comprehensive consideration on the economic and environmental targets based on an energy-efficient optimization strategy for SCES. Firstly, an objective function is established to consider the energy efficiency from economic and environmental perspectives, taking into account the characteristics of each power unit within the SCES in the highway service area. Secondly, constraints corresponding to different types of systems are established based on the classification of SCES in highway service areas. The simulated annealing algorithm is incorporated into the solution of the objective function to avoid the defect that the genetic algorithm tends to fall into the local opti-

收稿日期: 2023-04-25。 作者简介: 李艳波(1980—), 男, 副教授; 陈俊硕(通信作者), 男, 讲师, 硕士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB1600200); 陕西省重点研发计划资助项目(2021KW-13); 河南省交通运输厅科技项目(2021G10)。

网络出版时间: 2023-09-22 网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230921.1142.002>

num. The improved SA-GA algorithm incorporates a cooling function, allowing for the accurate identification of the global optimal solution. By leveraging the generation and load data of the SC-ES in the highway service area in Xinjiang, China, along with considering the influence of new energy vehicle charging stations in addition to the load from traditional service areas. Finally, the test results show that the evaluation of various test functions demonstrates that the SA-GA algorithm significantly improves both solution speed and stability. The SA-GA algorithm is employed to compute energy efficiency optimization results for typical days in summer and winter, to obtain an effective operation strategy for the service area. Simulation results demonstrate that the proposed SA-GA algorithm improves optimization accuracy by 20.33% in comparison to the genetic algorithm.

Keywords: integration of energy and transportation; self-consistent energy system; high energy efficiency; charging station; simulated annealing algorithm; genetic algorithm

在我国“双碳”目标背景下,交通能源融合成为能源系统和交通系统一种新的发展模式^[1]。交通碳排放作为仅次于能源领域和工业领域碳排放的第三大排放源,在中国约占10%,在中国终端碳排放的占比达到15%,过去9年年均增速高于5%^[2]。目前,我国公路交通的建设规模仍在不断发展壮大。随着交通运输需求量的不断提升,公路交通对于社会经济保障作用更加突出,用能需求也不断增长,公路交通负荷的电气化普及度越来越高^[3]。国家发展和改革委员会表示,力争到2025年,国家生态文明试验区、大气污染防治重点区域的高速公路服务区快充站覆盖率不低于80%,其他地区不低于60%^[4]。截至2022年10月31日,全国已有3976个高速公路服务区建成充电桩16721个^[5],但由于我国多数高速公路服务区较为老旧,现有电力能源供应仅能支撑服务区基本负荷,无法满足充电、换电站的电力需求。加之多数服务区位置偏僻,远离主要配电网,若为充电站建设远距离供电专线,经济成本巨大^[6-7]。高速公路服务区现有的可再生能源发电成本低,环境污染小,但因其发电具有间歇性、波动性以及不稳定性缺陷^[8-9],导致存在弃风率、弃光率较大的现象^[10]。构建高速公路自洽能源系统(SCES),实现高速公路自洽能源系统的高能效优化,成为了公路交通能源融合的必然选择和有效手段。

高速公路自洽能源系统主要由“源-网-储-荷”四大部分构成,如图1所示。其中电源侧主要分为高速公路两侧沿线发电和服务区发电两部分,公路沿线风、光伏发电设施主要分布在隧道间隔、边坡、匝道等场景;服务区风、光伏发电设施主要布置在建筑屋顶、停车棚等场景。

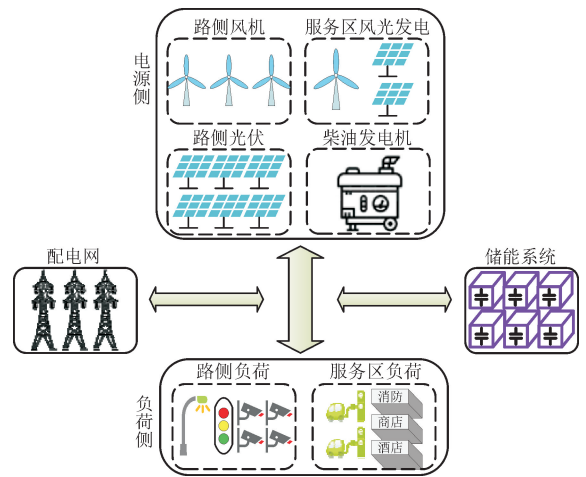


图1 高速公路自洽能源系统结构图

Fig. 1 Schematic of self-consistent energy system of expressway

文献[11]结合交通系统和能源系统未来发展趋势,提出包含区域、城镇/地区、终端3层的能源交通一体化系统(IETS)的发展架构。文献[12]提出了交通系统与电力系统融合发展架构,并通过搭建多级能量管理系统,实现了交通与电力系统之间横向多源与纵向“源-网-荷-储”协调。文献[13]提出我国在能源转型时,高比例新能源接入带来的不确定性,从风险建模、评估、分析和决策4个方面对关键问题进行了论述。文献[14]调研了当前新建和已投运的微电网示范工程,归纳了微网模型搭建和运行控制方法两方面的研究成果。文献[15]针对近海海岛微电网场景,以最小化日前24h从外部购买能源总成本为目标函数,综合考虑各部分约束条件,建立了日前调度模型。文献[16]对IEEE 118节点标准测试系统和我国某电网进行分析,提出实时优化调度模型和动态积极性求解算法,进一步提高了电网运行

的安全性。文献[17-21]对不同类型的微电网系统基于 TOPSIS 法进行了储能配置优化,并通过分层粒子群算法(HPSO)、和谐遗传混合算法(HS-GA)、模糊粒子群算法以及改进禁忌搜索遗传算法对微电网系统的环保性、经济性、可靠性进行了优化调度。

上述文献中所述微电网系统应用场景较为丰富,但并没有和交通领域充分融合,与公路交通相融合的自洽能源系统方面的研究在国内尚鲜见报道。本文针对高速公路服务区自洽能源系统,提出了一种基于模拟退火算法-遗传算法(SA-GA)混合优化算法的优化调度策略,并分别在夏、冬两季典型日进行优化调度,以进一步降低自洽能源系统的运行成本,实现系统高能效的优化目标。

1 自洽能源系统电力单元模型

本文所述自洽能源系统中依靠风力发电与光伏发电作为主要的电能来源,但二者发电量存在波动性与不稳定性,因而在系统中需要加入柴油发电机作为备用电源,蓄电池组作为储能单元,进一步保障系统运行可靠性。系统可以依靠自身电力单元离网独立运行,也可以和电网连接实现并网运行,根据自洽能源系统的发电量以及主网的分时电价进行购电或是售电,从而通过提高系统的经济性实现自洽能源系统高能效的指标^[22]。本节分别介绍风力发电、光伏发电、柴油发电机以及蓄电池的数学模型。

1.1 风力发电模型

风力发电机输出功率 P_{WT} 与实时风速 v 之间的数学模型为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci} \\ av^2 + bv + c, & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r, & v_r < v \leq v_{co} \\ 0, & v > v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_r 为风力发电机额定输出功率; v_r 为额定风速; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切出风速; a 、 b 、 c 为工作特性参数。

1.2 光伏发电模型

光伏发电输出功率 P_{PV} 主要受环境温度和光照强度的影响,表达式为

$$P_{PV} = f_{PV} P_{rated} \frac{A}{A_S} [1 + \alpha_P (T - T_{STC})] \quad (2)$$

式中: f_{PV} 为光伏发电系统功率降额因数,一般取 0.9; P_{rated} 为光伏发电系统额定功率,kW; A 为实际辐照度,kW/m²; A_S 为标准测试条件下辐照度,kW/m²; α_P 为功率温度系数,%/°C; T 为实际表面

温度,°C; T_{STC} 为标准测试条件温度,取 25 °C。

1.3 柴油发电机模型

柴油发电机耗油量 F 与其输出功率 P_{gen} 之间的数学关系为

$$F = \alpha Y_{gen} + \beta P_{gen} \quad (3)$$

式中: Y_{gen} 为柴油电机额定功率,kW; α 为电机在额定功率下空载运行的耗油量,L/(kW·h); β 为燃料曲线斜率。

1.4 蓄电池模型

自洽能源系统的储能单元由铅酸蓄电池组成,参考最为经典的 KiBaM 模型^[23]。结合电池模型和最大充电电流以及最大充电速率,得到蓄电池最终的充放电功率限制模型为

$$\begin{cases} P_{cmax} = \min(P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}) / \eta_c \\ P_{dmax} = \eta_d P_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{cmax} 为蓄电池最大允许充电功率,kW; P_{dmax} 为蓄电池最大允许放电功率; P_{c1} 为蓄电池初始时刻的最大允许充电功率; P_{c2} 为蓄电池最大充电电流约束下最大允许充电功率; P_{c3} 为蓄电池最大充电速率约束下最大允许充电功率; P_d 为蓄电池初始时刻的最大允许放电功率; η_c 为蓄电池充电效率; η_d 为蓄电池放电效率。

2 自洽能源系统高能效优化

为进一步提高自洽能源系统的经济性,实现高能效的运行目标,本文设计了相关目标函数以及约束条件,并区分了 4 种应用场景下的系统运行策略。

2.1 目标函数

本文设置的目标函数分为自洽能源系统经济成本函数和环境污染成本函数两部分,这两部分共同构成了实现系统高能效的综合成本函数。

2.1.1 经济成本

自洽能源系统的经济成本主要由风力发电成本、光伏发电成本、柴油电机发电及运维成本、蓄电池运行维护成本和向主网购电成本及售电收益组成,计算公式为

$$C_1 =$$

$$\sum_{i=1}^{24} [C_{WT}(i) + C_{PV}(i) + C_{gen}(i) + C_{bat}(i) + C_{grid}(i)] \quad (5)$$

第 i 小时风力发电成本 $C_{WT}(i)$ 为

$$C_{WT}(i) = c_{WT} P_{WT}(i) \quad (6)$$

式中: c_{WT} 为风力发电成本系数; $P_{WT}(i)$ 为第 i 小时的风力发电量。

第 i 小时光伏发电成本 $C_{PV}(i)$ 为

$$C_{PV}(i) = c_{PV} P_{PV}(i) \quad (7)$$

式中: c_{PV} 为光伏发电成本系数; $P_{PV}(i)$ 为第 i 小时的光伏发电量。

第 i 小时柴油发电机发电成本及运行维护成本 $C_{gen}(i)$ 为

$$C_{gen}(i) = c_{gen1} [\alpha Y_{gen} + \beta P_{gen}(i)] + c_{gen2} P_{gen}(i) \quad (8)$$

式中: c_{gen1} 为燃料单位成本系数; c_{gen2} 为柴油电机单位运行维护成本系数; $P_{gen}(i)$ 为第 i 小时的柴油发电机的发电量。

第 i 小时蓄电池运行维护成本 $C_{bat}(i)$ 为

$$C_{bat}(i) = c_{bat} [P_{charge}(i) + P_{discharge}(i)] \quad (9)$$

式中: c_{bat} 为蓄电池单位功率运行维护成本系数; $P_{charge}(i)$ 为第 i 小时蓄电池充电量; $P_{discharge}(i)$ 为第 i 小时蓄电池放电量。

第 i 小时自洽能源系统购电售电成本 $C_{grid}(i)$ 为

$$C_{grid}(i) = c_{price}(i) P_{grid}(i) \quad (10)$$

式中: $c_{price}(i)$ 为自洽能源系统所在地区的分时电价; $P_{grid}(i)$ 为第 i 小时系统和主网的功率交互量, $P_{grid}(i) > 0$ 表示从主网购电, $P_{grid}(i) < 0$ 表示向主网售电。

2.1.2 环境成本

自洽能源系统的环境成本主要包括柴油电机发电以及和主网进行电能交互量的主网发电环境成本, 计算公式如下

$$C_2 = \sum_{n=1}^k c_k (\gamma_{kgen} P_{gen} + \gamma_{kgrid} P_{grid}) \quad (11)$$

式中: k 为环境污染物种类, 如 CO_2 、 CO 、 SO_2 及 NO_x 等; c_k 为处理 k 类环境污染物的成本系数; γ_{kgen} 和 γ_{kgrid} 分别为柴油电机和主网单位发电量产生 k 类环境污染物的系数; P_{gen} 为柴油电机发电量; P_{grid} 为从主网购电量。

2.1.3 综合成本

自洽能源系统的综合成本是实现系统高效的目标函数, 需要对经济成本和环境成本进行综合优化, 通过向两种成本函数进行权重分配实现综合成本的目标函数公式为

$$\min C = \omega_1 C_1 + \omega_2 C_2 \quad (12)$$

式中: C 为自洽能源系统综合成本; ω_1 和 ω_2 分别为经济成本和环境成本的权重值, $\omega_1 + \omega_2 = 1$, 具体权重可以根据优化需求调节。

2.2 约束条件

为保证自洽能源系统在安全可靠运行的前提

下, 以最低的综合成本运行, 实现系统的高能效优化目标, 需要对系统中各个组成部分设置一定的约束条件, 主要包括系统功率平衡约束、电源输出功率约束、主网能量交互约束、蓄电池充放电功率约束及容量约束。

2.2.1 功率平衡约束

自洽能源系统中存在“源网储荷”众多电力单元, 而电能在这些单元之间存在功率平衡约束, 需要各个单元功率满足如式(13)所示的约束条件

$$P_{load}(i) = P_{WT}(i) + P_{PV}(i) + P_{gen}(i) + P_{bat}(i) + P_{grid}(i) \quad (13)$$

2.2.2 电源输出功率约束

本系统中发电单元为风力发电机、光伏电源以及柴油发电机。为保证系统安全可靠运行, 这些发电单元的发电功率需要满足如式(14)所示的约束条件

$$\begin{cases} P_{WT,min} \leq P_{WT}(i) \leq P_{WT,max} \\ P_{PV,min} \leq P_{PV}(i) \leq P_{PV,max} \\ P_{gen,min} \leq P_{gen}(i) \leq P_{gen,max} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{WT,min}$ 、 $P_{WT,max}$ 、 $P_{PV,min}$ 、 $P_{PV,max}$ 、 $P_{gen,min}$ 、 $P_{gen,max}$ 分别为各发电单元安全可靠运行时的最小以及最大发电功率。

2.2.3 电网能量交互约束

在自洽能源系统与主网并网运行时, 为提高系统的经济性, 可以结合电网的实时电价以及系统中的功率盈亏, 与电网进行适当的功率交互。当功率交互时, 同样需要满足一定的约束条件, 如式(15)所示

$$P_{grid,min} \leq P_{grid}(i) \leq P_{grid,max} \quad (15)$$

式中: $P_{grid,min}$ 、 $P_{grid,max}$ 分别为自洽能源系统与电网电力传输的最小、最大功率约束。

2.2.4 蓄电池充放电功率及容量约束

蓄电池作为系统的储能单元, 具有“削峰填谷”以及作为系统故障时备用电源的作用, 是提高自洽能源系统经济性, 实现高效优化的重要部分。蓄电池在充放电工作时, 充放电功率约束以及保障自身安全可靠运行时的容量约束为

$$\begin{cases} P_{bat,min} \leq P_{bat}(i) \leq P_{bat,max} \\ S_{OCmin} \leq S_{OC}(i) \leq S_{OCmax} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{bat,min}$ 、 $P_{bat,max}$ 为蓄电池充放电最小最大功率; $S_{OC}(i)$ 、 S_{OCmin} 、 S_{OCmax} 分别为蓄电池实时荷电状态以及工作时允许最小最大荷电状态。

2.3 运行策略

将高速公路自洽能源系统根据电网属性和负荷

属性分为 4 类,如表 1 所示,针对不同类型的系统设置相应的运行模式。

表 1 高速公路自洽能源系统分类

Table 1 Classification of highway SCES

类型	电网属性	负荷属性
1	强电网	大负荷
2	强电网	小负荷
3	弱电网	小负荷
4	无电网	小负荷

类型 1 的应用场景主要有靠近枢纽变电站的特长隧道供电站、集中式电动汽车充电站、大型服务区等。强电网条件为自洽能源系统提供了并网运行的条件,大负荷的属性分布式电源发电提供了消纳空间。这种应用场景下分布式电源发电量无法满足大负荷的需求,需要电网提供能量支持,系统采用“全额自用,网电补缺”模式运行。

类型 2 的应用场景主要有靠近枢纽变电站的高速公路沿线、小型服务区等。小负荷属性使得可再生能源发电在提供负荷消纳后仍有大量的剩余,剩余电量通过强电网接入电网,系统采用“上网为主,自用为辅”模式运行。

类型 3 的应用场景主要有远离枢纽变电站的高速公路沿线、服务区等。弱电网条件使得经自洽能源系统自身消纳后剩余的较大电量无法及时接入电网,需要通过适当的储能对系统能量进行一定调节,系统采用“适度储能,提升外送”模式运行。

类型 4 的应用场景主要有偏远地区的高速公路沿线小隧道、服务区、收费站等。无电网条件使得自洽能源系统只能离网运行,需要储能系统调节可再生能源发电在时间尺度上的不平衡,系统采用“储能调节,发用平衡”模式运行。

在使用算法程序进行仿真计算时,可以结合不同系统的实际控制策略需求以及具体电力单元的运行约束,通过对目标函数的修改以及多种约束条件的调整实现对不同类型系统仿真模型的修改,进一步实现对不同类型自洽能源系统及其在不同运行模式下的高能效优化。

3 SA-GA 算法的改进

3.1 遗传算法

遗传算法(GA)基于自然选择原理和遗传机制,通过模拟自然界物种的进化过程对目标进行优化^[24-25]。算法通过选择、交叉、变异 3 种算子不断提高子代种群的环境适应度,以这种方式进化并最终

满足进化的终止条件。遗传算法的缺点是局部搜索能力差,容易陷入“早熟”而无法寻找到最优解^[26]。遗传算法流程如图 2(a)所示。

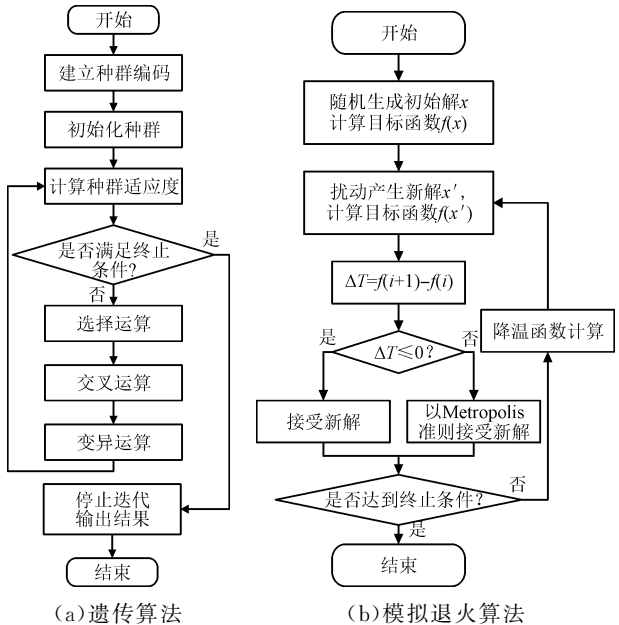


图 2 算法流程图
Fig. 2 Algorithm flowchart

3.2 模拟退火算法

模拟退火算法(SA)来源于模拟固体退火过程的热平衡问题,是一种基于概率的随机寻优算法^[27-28]。在搜索全局最优解的过程中,不仅接受更优解,还以 Metropolis 准则在一定概率 P 上接受较差解, P 的计算公式为

$$P = \begin{cases} 1, & f(i+1) \leq f(i) \\ \exp\left(-\frac{f(i+1) - f(i)}{T_i}\right), & f(i+1) > f(i) \end{cases}$$

(17)

式中: $f(i)$ 为第 i 代函数值; T_i 为当前温度。

随着算法接近全局最优,概率 P 逐渐趋近于 0,接受较差解使得算法有可能跳出局部最优,从而搜索到全局最优解。若初始温度设置足够高,退火过程足够慢,算法越容易找到全局最优解,但寻优速度越慢。模拟退火算法流程如图 2(b)所示。

3.3 SA-GA 算法

本文基于 MATLAB 仿真平台,对遗传算法进行改进,结合模拟退火算法实现了一种改进的 SA-GA 算法。本算法在遗传算法的基础上引入了模拟退火算法以一定概率接受较差解的思想,以及降温函数 $T_{i+1} = aT_i$,其中降温系数 $a \in (0, 1)$ 决定算法性能,当取值趋近 0 时,迭代速度快但准确性差;当

取值趋近于 1 时,准确性高但迭代速度缓慢。
SA-GA 算法流程如图 3 所示。

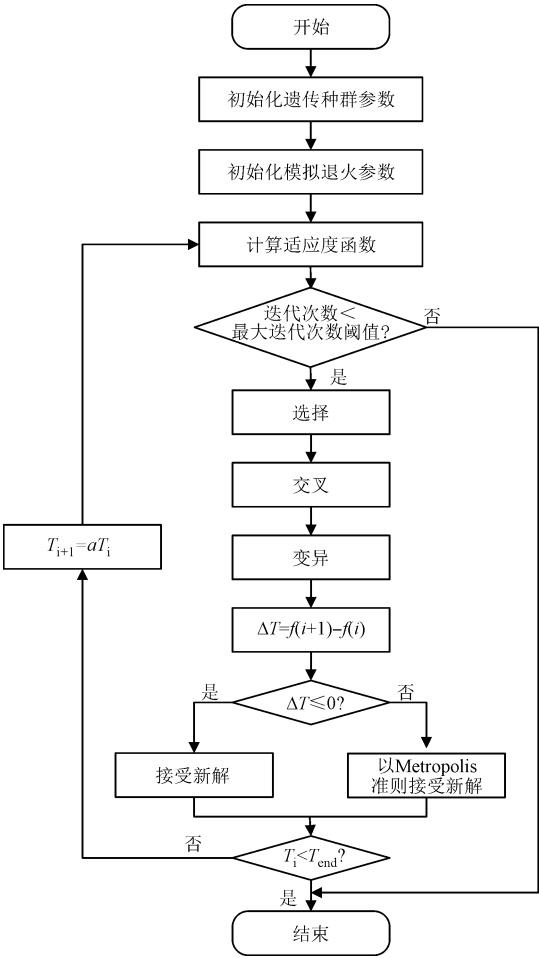


图 3 SA-GA 算法流程图
Fig. 3 Flowchart of SA-GA algorithm

3.4 算法测试

为验证提出的 SA-GA 优化算法的性能,本文选取 Sphere 函数、Rastrigin 函数和 Shubert 函数 3 种测试函数进行测试,测试函数表达式如表 2 所示。

表 2 测试函数

Table 2 Test functions

函数名	函数表达式
Sphere 函数	$f(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2$
Rastrigin 函数	$f(x) = \sum_{i=1}^D [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$
Shubert 函数	$f(x) = \left[\sum_{i=1}^5 i \cos((i+1)x_1 + i) \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^5 i \cos((i+1)x_2 + i) \right]$

Sphere 函数为单峰函数, Rastrigin 函数和

Shubert 函数为多峰函数,单峰函数可以测试算法收敛精度,多峰函数可以测试算法寻优能力。分别使用 3 种测试函数对 PSO、SA、GA 以及 SA-GA 共 4 种算法进行测试,得到测试结果分别如图 4~图 6 所示。

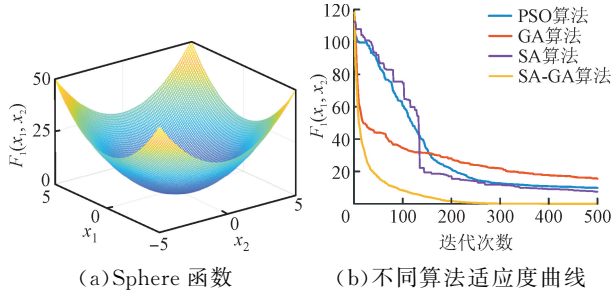


图 4 Sphere 函数测试结果
Fig. 4 Test results of Sphere function

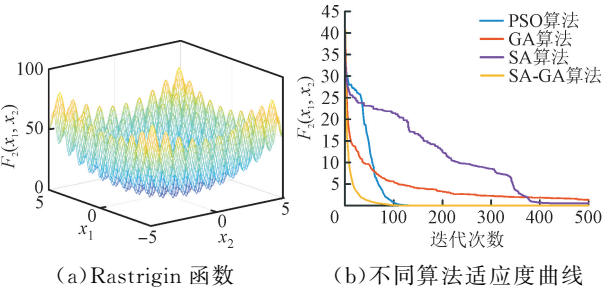


图 5 Rastrigin 函数测试结果
Fig. 5 Test results of Rastrigin function

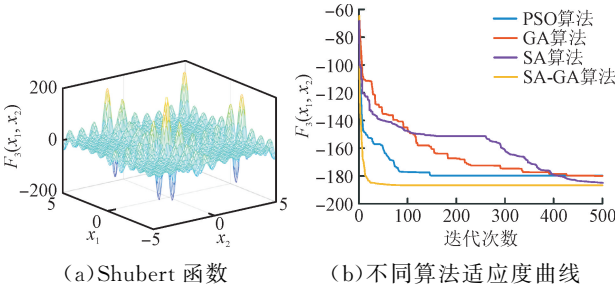


图 6 Shubert 函数测试结果
Fig. 6 Test results of Shubert function

由图 4 可知, Sphere 函数有唯一全局最小值 $f(x^*)=0$,在测试结果中,除 GA 算法外其余算法均能寻得全局最优;SA 算法能寻得全局最优但收敛速度较慢,而 SA-GA 算法能够以最快速度寻得全局最优。由图 5 可知, Rastrigin 函数是典型的非线性多峰函数,除一个全局最小值 $f(x^*)=0$ 外,还有大量的局部最小值,能够检测算法跳出局部极值的能力;测试结果中除 SA-GA 算法外其余算法均陷入不同的局部极值,未能寻得全局最优。由图 6 可知, Shubert 函数有多个全局最小值 $f(x^*)=-186.7309$ 和多个局

部最小值,在测试结果中,SA 算法和 SA-GA 算法均寻得了全局最优,但在寻优速度上,SA 算法处于明显劣势。

综合 3 种测试函数结果,改进后的 SA-GA 算法保留了 GA 算法前期寻优速度快的优势,并通过引入降温函数结合 SA 算法寻优精度高的优势,改进了易陷入局部最优的缺陷。相较于传统的 PSO、GA 以及 SA 算法,SA-GA 算法在寻优精度和寻优速度上均有提升,说明了改进的算法是科学、有效的。

4 高效优化实验分析

本文在新疆某高速公路服务区自洽能源系统中应用上述高效优化模型进行仿真实验分析。该高速公路服务区自洽能源系统包括光伏电源、风力电机和小型柴油发电机 3 种分布式电源,由蓄电池构成的储能系统,以及服务区自身用能负荷,系统可实现并网、离网两种运行方式的切换。本服务区负荷较小,可以通过并网离网切换分别模拟类型 3 和类型 4 两种服务区自洽能源系统。其中光伏电源包括 200 块峰值功率为 440 W 的光伏单元,光伏发电额定总功率为 88 kW,风机额定功率为 100 kW。小型柴油发电机额定功率为 50 kW,单位发电量燃料成本约为 0.318 L/(kW·h)。储能系统额定容量为 600 kW·h,其最大放电容量不得超过额定容量的 80%,初始状态为额定容量的 80%。经济成本和环境成本的权重值取 $\omega_1=\omega_2=0.5$ 。

传统的高速公路服务区自洽能源系统基本负荷场景包括照明、消防、供配电、通信、监控系统以及商户经营性用电负荷的基本负荷。随着公路交通能源融合的发展,高速公路服务区正在大量建设电动车的充换电站,这类负荷具有较大的随机波动性,对基本负荷较为规律的负荷曲线更为波动。本服务区内建设的充电桩较为老旧,充电功率较低,为一个输出功率 7 kW 的慢充桩和一个输出功率 30 kW 的快充桩。图 7 为该自洽能源系统夏季冬季典型日服务区基本负荷以及充电站负荷数据堆积柱状图。可以看出,传统服务区基本负荷在昼夜有波动,但整体波动幅度不大;而叠加充电站负荷后,整体变化趋势虽无明显变化,但波动幅度进一步增加。

在系统并网运行时,为进一步提升自洽能源系统经济性,考虑到当地的分时电价,分别在峰谷时段结合系统实际运行情况进行售电购电,根据《国网新疆电力有限公司代理购电工商业用户电价表》,当地分时电价如表 3 所示。

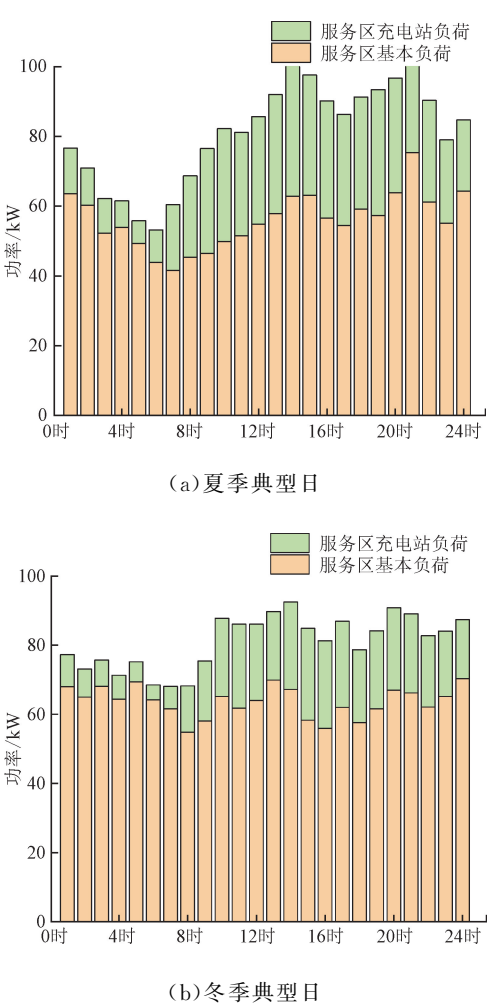


图 7 自洽能源系统基本负荷和充电站负荷逐小时功率
Fig. 7 Hourly power of SCES base load and charging station load

表 3 新疆当地分时电价		
Table 3 Time-of-use electricity prices in Xinjiang, China		
时间	电价/(元·(kW·h) ⁻¹)	时段
0 时—2 时	0.443 607	平时段
2 时—8 时	0.159 779	低谷时段
8 时—11 时	0.727 415	高峰时段
11 时—14 时	0.443 607	平时段
14 时—16 时	0.159 779	低谷时段
16 时—19 时	0.443 607	平时段
19 时—24 时	0.727 415	高峰时段

仿真环境中采用 CPU 为 12th Gen Intel Core i5-12500H 3.10 GHz、内存为 16 GB 的计算机,操作系统为 Windows 11,编译软件为 MATLAB R2021b。实验模拟时,算法参数设置如表 4 所示。

表 4 算法参数设置

Table 4 Parameters setting of the algorithm

参数	数值
种群规模	200
交叉概率	0.8
变异概率	0.05
迭代次数	1000
初始温度	100
结束温度	40
降温系数	0.6

该高速公路服务区自洽能源系统夏季和冬季典型日逐小时负荷功率、光伏发电量以及风力发电量分别在 5 月 11 日和 12 月 31 日测得,数据如图 8 所示。

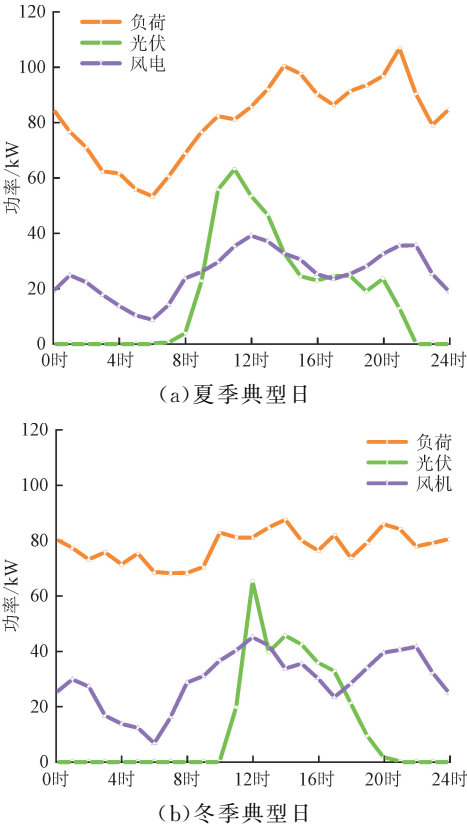


图 8 自洽能源系统负荷光伏风电逐小时功率
Fig. 8 Hourly power of load, photovoltaic, wind of SCES

4.1 离网运行

系统在离网运行时,属于类型 4 的自洽能源系统,此时与大电网的电能交换被切断,不与电网进行购电售电操作,即电网交互成本为 0。在该运行模式下,分别计算夏季、冬季典型日,得到自洽能源系统高能效优化结果如图 9 所示。

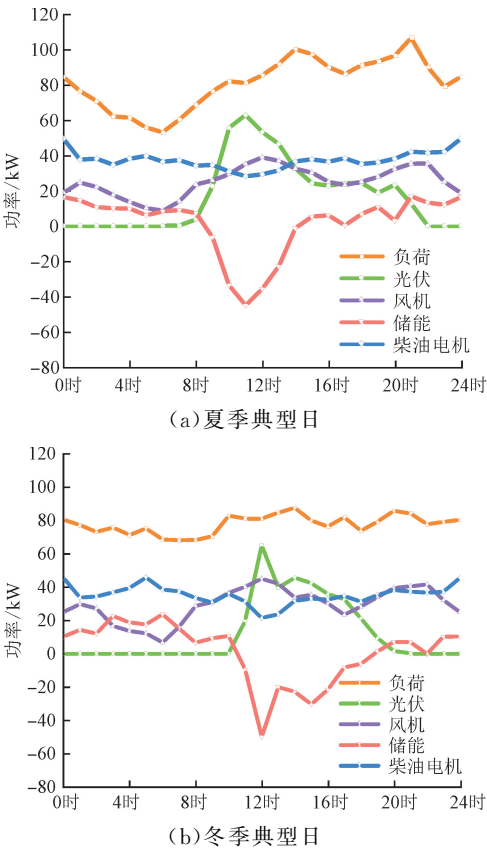


图 9 自洽能源系统离网运行各电力单元出力用能曲线
Fig. 9 The output energy consumption curve of each power unit in the off-grid operation of SCES

由图 9 可知,系统离网运行时由于没有大电网的电力交互,因此系统中光伏与风电在大部分时间内无法满足负荷需求,不足的发电量主要由储能系统和柴油电机补足,但在中午 12 时前后,可再生能源发电量能够保障负荷用电需求时,储能系统进行充电,柴油发电机降低输出功率,维持低功率运行,避免频繁启停产生的损耗。图 9 中,储能系统功率为正时,储能系统放电,可视为电源;功率为负时,储能系统充电,可视为负荷。

4.2 并网运行

系统在并网运行时,属于类型 3 的自洽能源系统,此时与大电网通过购电售电操作进行能量交换,在系统自身无法满足负荷需求,所需运行成本较高,实时电价较低时向大电网购电,甚至将购得多余电能储存在储能系统中;在自身可再生能源发电量较大,实时电价较高时向大电网售电,甚至将储能系统部分电量进行出售,通过这种方式能够进一步降低自洽能源系统的运行成本,提高系统的经济效益。在该运行模式下,分别计算夏季冬季典型日,得到自洽能源系统高能效优化结果如图 10 所示。

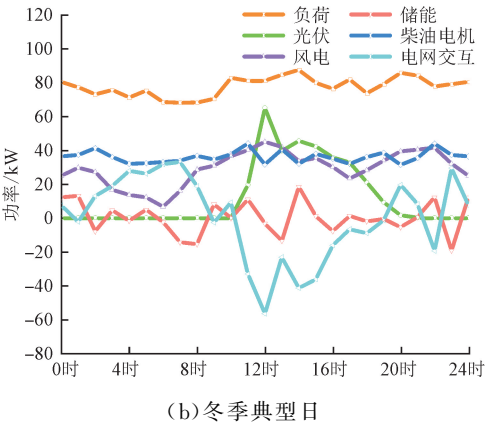
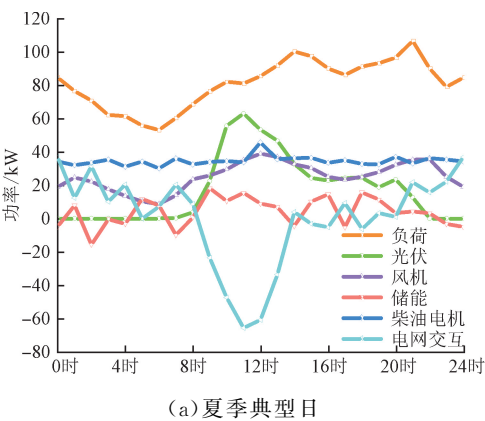
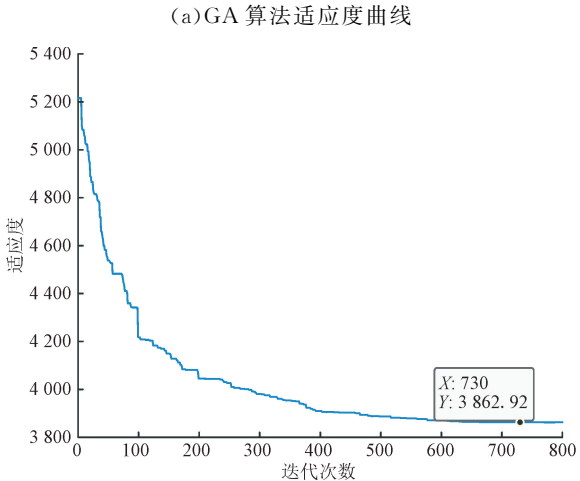
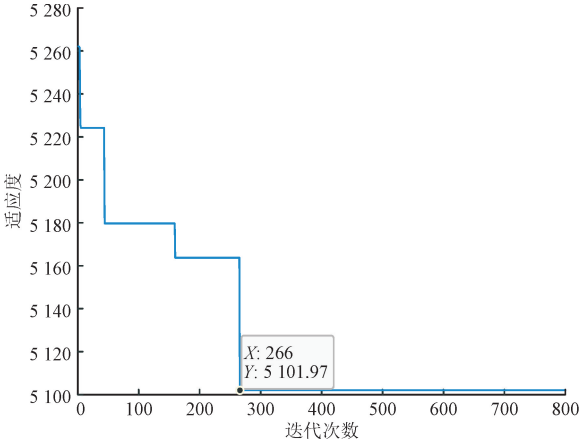


图 10 自洽能源系统并网运行各电力单元出力用能曲线
Fig. 10 The output energy consumption curve of each power unit in the grid-connected operation of SCES

由图 10 可知,系统并网运行时引入了同电网之间的功率交互。夜晚缺少光伏发电,自洽能源系统发电量无法满足系统正常运行,存在电力缺额,且实时电价较低时,电网交互功率为正,从电网进行购电;白天风光发电量较大,在满足负荷用电需求的前提下,自洽能源系统发电量有剩余,且实时电价较高时,电网交互功率为负,系统向电网售电。储能系统作为系统主要的应急备用电源,为保障足够的储能容量,不宜进行过度的电力交互,需要以较低功率参与系统运行。

以冬季并网运行场景为例,分别采用经改进后的 SA-GA 算法与传统 GA 算法对自洽能源系统进行高效优化,得到两种算法分别的适应度曲线,如图 11 所示。由图 10 可见,GA 算法在迭代 266 代时寻得适应度函数最优值 5 101.97,改进后的 SA-GA 算法在迭代 730 代时寻得适应度函数最优值 3 862.92。由此可见,改进后的 SA-GA 算法在寻优准确性上有较大优势,改善了 GA 算法容易陷入局部最优的缺陷。分别使用两种算法进行 20 次仿真运行,得到适应度结果如表 5 所示。



(a)GA 算法适应度曲线
(b)SA-GA 算法适应度曲线
图 11 不同算法适应度曲线图
Fig. 11 Fitness curves of different algorithms

在本文所应用的实际案例中,由于高速公路服务区自洽能源系统中的参数以及变量规模并不算大,不同算法虽然迭代次数上有所差异,但实际计算时间也相差并不大。且自洽能源系统的高效优化对计算速度要求并不高,但对计算结果精度以及收敛稳定性有一定要求。因此,在本案例中主要考虑算法的寻优精度以及收敛稳定性。

根据表 5 中仿真结果,在 20 次仿真中 GA 算法获得的解集中仅有 4 次解落在全局最优解附近,而 SA-GA 算法获得的解集中基本全部解落在全局最优解附近。通过仿真结果均值计算可得,在求解准确性方面,SA-GA 算法较 GA 算法约有 20.33% 的提升;通过对比 20 组仿真结果的方差及标准差可知,SA-GA 算法在求解稳定性方面有明显提升。这表明 GA 算法在求解适应度函数时会陷入局部最优解,无法寻得全局最优解,且每次仿真结果会有较大波动,无法得到较为稳定准确的解。而改进后的 SA-GA 算法求得的适应度函数值较为稳定,可以认

为能够较为准确的寻到全局最优解,在寻优准确性和稳定性方面均有较大提升。

表 5 不同算法适应度结果

Table 5 Fitness results of different algorithms

运行次数	适应度	
	SA-GA 算法	GA 算法
1	3 822.39	5 066.51
2	3 783.05	5 250.13
3	3 731.75	4 879.38
4	3 866.42	5 158.44
5	3 846.65	3 901.31
6	3 823.25	4 965.67
7	3 777.82	5 147.88
8	3 815.21	4 993.43
9	3 835.36	3 824.68
10	3 846.51	5 032.46
11	3 962.15	4 984.51
12	3 795.63	4 899.68
13	3 866.91	5 027.31
14	3 824.46	5 197.60
15	4 013.67	3 814.97
16	3 764.75	3 944.68
17	3 799.26	4 981.27
18	3 915.67	5 218.25
19	3 827.68	5 064.87
20	3 796.51	4 937.28
总和	76 715.10	96 290.30
均值	3 835.76	4 814.51

5 结 论

本文建立的高速公路服务区自洽能源系统在传统的服务区微电网系统中引入了充电站负荷,分析了加入充电站负荷后对传统服务区自洽能源系统负荷功率曲线的影响,对系统中典型电力单元建立数学模型,针对高效优化的需求建立出一种基于经济成本且综合了环境成本的优化目标函数,并在此基础上结合系统实际运行情况,确定了一系列的约束条件。将高速公路自洽能源系统分为了 4 种类型,对每种类型提出了相应的运行策略。针对传统的遗传算法容易陷入局部最优解而无法寻得全局最优解的缺陷,在遗传算法的基础上结合了模拟退火

算法,形成了一种 SA-GA 优化算法,在保留遗传算法寻优快的特点基础上改善了容易“早熟”的缺陷。在本文所应用的高速公路服务区自洽能源系统高效优化中相较传统的遗传算法准确性有大约 20.33% 的提升。

本文以新疆某高速公路服务区为研究案例,在后续研究中可以通过更改系统模型来适配更为广泛的自洽能源系统,进一步推广到整个高速公路应用场景。本文应用的高速公路服务区充电站功率较小,现行政策要求建设大功率的快充桩,对服务区负荷会产生更大的影响,需对自洽能源系统进行进一步优化。

参考文献:

[1] 马静,徐宏璐,马瑞辰,等. 能源交通融合下的弹性公路能源系统发展技术要点及展望 [J]. 电网技术, 2023, 47(3): 885-895.
MA Jing, XU Honglu, MA Ruichen, et al. A review on the development of resilient highway energy system under the integration of energy and transportation [J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 885-895.

[2] 刘淳森,曲建升,葛钰洁,等. 基于 LSTM 模型的中国交通运输业碳排放预测 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2574-2582.
LIU Chunsen, QU Jiansheng, GE Yujie, et al. LSTM model-based prediction of carbon emissions from China's transportation sector [J]. China Environmental Science, 2023, 43(5): 2574-2582.

[3] 郑泽东,刘昊,李永东,等. 电气化公路技术研究 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 132-141.
ZHENG Zedong, LIU Hao, LI Yongdong, et al. Electrical highway application [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 132-141.

[4] 发展改革委,能源局,工业和信息化部,等. 发展改革委 能源局 工业和信息化部 财政部 自然资源部 住房城乡建设部 交通运输部 农业农村部 应急部 市场监管总局关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2022(13): 67-70.
Development and Reform Commission, Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Implementation opinions of the Development and Reform Commission, Energy Bureau, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, Ministry of Natural Resources, Ministry of Housing and Urban Rural Development, Ministry of Transport, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

- Emergency Department, Market Supervision Administration on further enhancing the service guarantee capacity of electric vehicle charging infrastructure [J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2022(13): 67-70.
- [5] 毛玲, 张钟浩, 赵晋斌, 等. 车-桩-网交融技术研究现状及展望 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6357-6371.
- MAO Ling, ZHANG Zhonghao, ZHAO Jinbin, et al. Research status and prospects of fusion technology of vehicle-charging pile-power grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6357-6371.
- [6] YANG Jun, SU Changqi. Robust optimization of microgrid based on renewable distributed power generation and load demand uncertainty [J]. Energy, 2021, 223: 120043.
- [7] YANG Mao, WANG Jinxin, AN Jun. Day-ahead optimization scheduling for islanded microgrid considering units frequency regulation characteristics and demand response [J]. IEEE Access, 2020, 8: 7093-7102.
- [8] 刘慧文, 王生铁, 刘广忱, 等. 风光柴储微电网容量优化配置的运行策略 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(9): 453-460.
- LIU Huiwen, WANG Shengtie, LIU Guangchen, et al. Operation strategy of optimal capacity configuration for microgrid with WT-PV-DE-BES [J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2022, 43(9): 453-460.
- [9] LI Peidu, GAO Xiaoqing, LI Zhenchao, et al. Effect of the temperature difference between land and lake on photovoltaic power generation [J]. Renewable Energy, 2022, 185: 86-95.
- [10] WANG Yang, CHAO Qingchen, ZHAO Lin, et al. Assessment of wind and photovoltaic power potential in China [J]. Carbon Neutrality, 2022, 1(1): 15.
- [11] 江里舟, 别朝红, 龙涛, 等. 能源交通一体化系统发展模式与运行关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1285-1300.
- JIANG Lizhou, BIE Chaohong, LONG Tao, et al. Development model and key technology of integrated energy and transportation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1285-1300.
- [12] 胡海涛, 郑政, 何正友, 等. 交通能源互联网体系架构及关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 12-24.
- HU Haitao, ZHENG Zheng, HE Zhengyou, et al. The framework and key technologies of traffic energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 12-24.
- [13] 别朝红, 潘超琼, 陈叶, 等. 能源转型下新能源电力系统概率风险评估 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(7): 1-11.
- BIE Chaohong, PAN Chaoqiong, CHEN Ye, et al. Probabilistic risk assessment of new energy power system in the context of energy transition: a review [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(7): 1-11.
- [14] 钱峰, 皮杰, 刘俊磊, 等. 微电网建模与控制理论综述 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(12): 1044-1054.
- QIAN Feng, PI Jie, LIU Junlei, et al. Review of microgrid modeling and control theory [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(12): 1044-1054.
- [15] 徐诗鸿, 张宏志, 林湘宁, 等. 近海海岛多态能源供需自治系统日前优化调度策略 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 15-29.
- XU Shihong, ZHANG Hongzhi, LIN Xiangning, et al. Optimal day-ahead dispatching strategy for polymorphic energy self-consistent system with supply and demand for offshore island [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 15-29.
- [16] 王延纬, 刘凡, 丁涛, 等. 含多分区电力系统能量备用实时优化调度的动态积极集求解算法 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(4): 45-52.
- WANG Yanwei, LIU Fan, DING Tao, et al. Dynamic active set algorithm for real-time energy-reserve optimal dispatch in multi-zonal power system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(4): 45-52.
- [17] 李建林, 谭宇良, 王含, 等. 配网及光储微网储能系统配置优化策略 [J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1893-1902.
- LI Jianlin, TAN Yuliang, WANG Han, et al. Research on configuration optimization of energy storage system in distribution network and optical storage microgrid [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1893-1902.
- [18] DAS G, DE M, MANDAL K K. Multi-objective optimization of hybrid renewable energy system by using novel autonomic soft computing techniques [J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 94: 107350.
- [19] MORADI M H, ABEDINI M, HOSSEINIAN S M. Optimal operation of autonomous microgrid using HSGA [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 77: 210-220.
- [20] CHAOUACHI A, KAMEL R M, ANDOULSI R, et al.

- 计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 50-54.
- GU Hanyu, CHEN Chen. A new algorithm for the computation of low frequency electro-mechanical oscillation modes of large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 50-54.
- [18] MEERBERGEN K, SPENCE A, ROOSE D. Shift-invert and Cayley transforms for detection of rightmost eigenvalues of nonsymmetric matrices[J]. Bit Numerical Mathematics, 1994, 34(3): 409-423.
- [19] 陈亦平, 曹玉磊, 赵利刚, 等. 基于指数变换的电力系统不稳定特征值计算方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 161-168.
- CHEN Yiping, CAO Yulei, ZHAO Ligang, et al. Calculation method for unstable eigenvalue of power system based on exponential transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 161-168.
- [20] CAO Yulei, LI Chongtao, YAN Chenguang, et al. An exponential transform based dual-layer Krylov subspace method for computing unstable modes of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1596-1607.
- [21] ROSTAMI M W, XUE Fei. Robust linear stability analysis and a new method for computing the action of the matrix exponential[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2018, 40(5): A3344-A3370.
- [22] 杜正春, 刘伟, 方万良, 等. 小干扰稳定性分析中一种关键特征值计算的稀疏实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 17-21.
- DU Zhengchun, LIU Wei, FANG Wanliang, et al. A sparse method for the calculation of critical eigenvalue in small signal stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 17-21.
- [23] MOLIER C, VAN LOAN C. Nineteen dubious ways to compute the exponential of a matrix, twenty-five years later[J]. SIAM Review, 2003, 45(1): 3-49.
- [24] ROMMES J, MARTINS N, FREITAS F D. Computing rightmost eigenvalues for small-signal stability assessment of large-scale power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 929-938.
- [25] ROMMES J. Examples from the Brazilian power system[EB/OL]. [2023-03-08]. <http://sites.google.com/site/rommes>.

(编辑 武红江)

(上接第207页)

- al. Multiobjective intelligent energy management for a microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1688-1699.
- [21] XU Meimei, GU Tingyun, QIN Jian, et al. GA based multi-objective operation optimization of power microgrid[C]//2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 103-107.
- [22] SONG Malin, XIE Qianjiao, SHEN Zhiyang. Impact of green credit on high-efficiency utilization of energy in China considering environmental constraints[J]. Energy Policy, 2021, 153: 112267.
- [23] ZHAO Yang, LI Yan, ZHOU Fengyu, et al. An iterative learning approach to identify fractional order Ki-BaM model[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(2): 322-331.
- [24] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(5): 8091-8126.
- [25] 黄明华, 刘广新, 何雅玲, 等. 基于遗传算法的太阳能烟囱发电站结构优化[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(10): 1-10.
- HUANG Minghua, LIU Guangxin, HE Yaling, et al. Structural optimization of solar chimney power plant by a genetic algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(10): 1-10.
- [26] WANG Wentao, TIAN Jun. An improved nonlinear tuna swarm optimization algorithm based on circle chaos map and levy flight operator[J]. Electronics, 2022, 11(22): 3678.
- [27] MAFARJA M M, MIRJALILI S. Hybrid whale optimization algorithm with simulated annealing for feature selection[J]. Neurocomputing, 2017, 260: 302-312.
- [28] 闫群民, 马瑞卿, 马永翔, 等. 一种自适应模拟退火粒子群优化算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(4): 120-127.
- YAN Qunmin, MA Ruiqing, MA Yongxiang, et al. Adaptive simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xidian University, 2021, 48(4): 120-127.

(编辑 亢列梅)