

引用格式:朱显辉,张尧,师楠,等.计及渗透率约束的风光火储系统容量优化及规律研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):74-83.

Citation: ZHU Xianhui, ZHANG Yao, SHI Nan, et al. Study on capacity optimization and law of wind-solar-thermal-storage system with permeability constraint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 74-83.

计及渗透率约束的风光火储系统容量 优化及规律研究

朱显辉¹, 张尧¹, 师楠², 药冰倩¹, 崔世炜¹

(1. 黑龙江科技大学电气与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:为探索不同风光渗透率对风光火储系统容量配置及系统运行的影响规律,以风光火储联合发电系统为例,构建了考虑渗透率约束与火储联合控制的3层容量优化模型。首先,将黄金搜索优化(golden search optimization, GSO)算法引入容量优化配置求解中,给出不同渗透率约束下系统最佳容量配置,求得系统运行指标数据结果;然后,对所得结果进行最小二乘法曲线拟合,得到系统的经济性、可靠性和稳定性与不同渗透率之间的变化曲线;最后,系统地分析了曲线趋势变化的主要原因,可为风光等可再生能源系统容量优化配置及运行规划提供借鉴。

关键词:容量优化;拟合规律;风光火储;渗透率约束;黄金搜索优化

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.007 **中图分类号:** TM715 **文章编号:** 1673-9140(2024)01-0074-11

Study on capacity optimization and law of wind-solar-thermal-storage system with permeability constraint

ZHU Xianhui¹, ZHANG Yao¹, SHI Nan², YAO Bingqian¹, CUI Shiwei¹

(1. School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Exploring the influence law of different photovoltaic penetration rates on the capacity allocation and operation of wind-solar-fire storage systems, a three-layer capacity optimization model considering penetration rate constraints and integrated control of thermal storage is constructed, using a wind-solar-thermal-storage combined generation system as an example. Firstly, introducing the golden search optimization (GSO) algorithm into the solution of capacity optimization configuration, the best capacity configuration of the system under different penetration rate constraints is provided, and the resulting data of system operation indicators is obtained. Then, the obtained results are subjected to a least squares curve fitting, yielding curves depicting the variations of system economics, reliability, and stability with different penetration rates. Finally, the main reasons for the trend changes in the curves are systematically analyzed, providing insights for the optimization and planning of capacity allocation and operation planning of renewable energy systems such as wind and solar.

Key words: capacity optimization; fitting law; wind-solar-thermal-storage; permeability constraint; GSO

为应对化石能源枯竭、缓解温室效应,中国提出了“双碳”发展远景,力图在2030年前和2060年前分别实现碳达峰和碳中和^[1]。加大风光等可再生

能源在能源供给中的比重,进一步提高可再生能源在电网中的渗透率,是贯彻和落实“双碳”目标的主要手段,也是实现能源自给和保证能源安全的重要

收稿日期:2022-11-22;修回日期:2023-07-16

基金项目:国家自然科学基金(51677057);黑龙江省省属高校基本科研业务费项目(2019-KYYWF-0730);黑龙江普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2017144)

通信作者:张尧(1999—),男,硕士研究生,主要从事新能源建模技术与应用研究;E-mail:zy1696159783@163.com

途径^[2-8]。

截至2021年年底,中国非化石能源发电装机容量为111 845万千瓦,占总装机容量的47.0%^[2]。可再生能源的随机性和不确定性已经给电网的稳定运行带来了大量挑战。风光等可再生能源在电网中的比重逐年增加,势必给电力系统建设带来更多亟待解决的新问题。

系统容量优化配置作为系统建设的重要前提,引起了学者的广泛研究。文献[9]归纳了可再生能源系统容量优化思路,梳理出容量优化的约束条件和目标函数。文献[10]重点对粒子群算法、鲸鱼算法等人工智能算法在容量优化及运行调度等非线性规划问题中的适用性进行阐述。针对高比例风光渗透率系统容量优化研究,多采用优化储能的方式消纳^[11-12],但渗透率的提高不仅对系统容量配置结果产生巨大影响,同时对系统运行也带来了新的挑战。文献[13]提出了一种基于高维电力系统运行数据的数据驱动方法,分析了高可再生能源渗透率对电力系统运行模式的影响。文献[14]面向极高比例可再生能源系统,针对供需平衡等方面的关键问题进行了分析。文献[15]系统分析了高比例可再生能源并网对新型电力系统在安全及可靠性等方面的挑战和影响。文献[16]立足于高比例可再生能源系统,展望了电网在运行、规划等方面面临的关键科学问题。文献[17]则从经济和技术层面出发,对100%可再生能源电力系统的可行性进行了讨论。

围绕着“双碳”目标,文献[13-17]仅对一定区间高比例可再生能源并网的关键问题进行了探索和展望。考虑到事物发展的渐进性规律,风光高比例并网过程不可能一蹴而就。因此,上述研究成果无法为可再生能源不同比例并网过程提供全阶段的支撑和借鉴。

现阶段发电方式仍以火力发电为主,风光渗透率的提高势必会撬动火力发电的优势地位。因此,在系统层面研究不同风光比重的影响规律,不仅可为新型电力系统建设提供思路,也可“双碳”目标的实现奠定基础^[18]。

为此,本文将以风光火储联合发电系统为研究对象,采用黄金搜索优化(golden search optimizer, GSO)算法,研究不同风光渗透率约束下风光火储系统的最佳容量配置,找到系统经济成本、负荷缺电率、出力波动率、风光利用率和碳排放量的变化趋势,给出相应的拟合规律,以期在不同渗透率下

独立风光火储系统建设发展提供系统性借鉴。

1 独立风光火储系统模型

风光火储系统主要由风力发电机、光伏阵列、火电机组、储能电池、AC-DC-AC整流逆变装置、DC-AC逆变器、AC-DC整流器和交流负载构成。其中,风力发电机发出交流电,通过整流逆变装置接入交流母线,光伏阵列和储能电池输出直流电,所以需通过逆变装置接入交流母线,具体结构如图1所示。

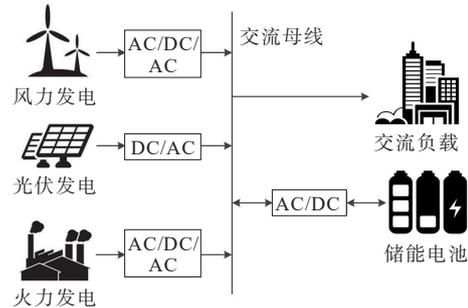


图1 风光火储系统结构

Figure 1 Structure of wind-solar-thermal-storage system

1.1 风力发电机模型

系统中风力发电机的输出功率与风力机轮毂位置平均风速呈非线性关系^[19],其函数关系为

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v(t) \leq v_{in} \\ P_{nWT} \frac{v(t) - v_{in}}{v_n - v_{in}}, & v_{in} < v(t) \leq v_n \\ P_{nWT}, & v_n < v(t) \leq v_{out} \\ 0, & v_{out} < v(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{WT}(t)$ 为 t 时刻风力发电机输出功率; P_{nWT} 为风力发电机额定功率; v_{in} 为切入风速; v_n 为额定风速; v_{out} 为切出风速。

1.2 光伏发电模型

光伏阵列由光伏电池组成,光伏电池的输出功率受辐照度和环境温度的影响,在标准额定条件下组件的输出功率为

$$P_{PV}(t) = P_{nPv} \frac{I_c(t)}{I_N} (1 + \lambda(T_c(t) - T_N)) \quad (2)$$

式中, $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻光伏阵列输出功率; P_{nPv} 为标准测试条件下光伏电池额定功率; λ 为光伏电池功率温度系数; I_N 、 T_N 为标准测试条件下的辐照度和环境温度; $I_c(t)$ 、 $T_c(t)$ 为 t 时刻辐照度和环境温度。

1.3 蓄电池充放电模型

蓄电池作为系统的储能单元,其充放电功率由

系统内能量联合控制策略决定,同时,为约束蓄电池出现过充或过放而影响其寿命,一般采用荷电状态(state of charge, SOC)参数来表示蓄电池电量状态^[20],计算方法为

$$S_{\text{SOC}} = \frac{E_{\text{CAP}}}{E_{\text{nBS}}} \quad (3)$$

式中, E_{CAP} 为蓄电池储存容量; E_{nBS} 为蓄电池额定容量。

当风光出力与火电机组在满足负载需求后仍有功率余量时,蓄电池进行充电,此时蓄电池荷电状态为

$$S_{\text{SOC}}(t) = S_{\text{SOC}}(t-1)(1-\alpha) + \frac{P_{\text{BS}}^{\text{in}}(t)\Delta t\eta_{\text{bs}}^{\text{in}}}{E_{\text{nBS}}} \quad (4)$$

当风光出力与火电机组不能满足负载需求时,蓄电池进行放电,此时蓄电池荷电状态为

$$S_{\text{SOC}}(t) = S_{\text{SOC}}(t-1)(1-\alpha) + \frac{P_{\text{BS}}^{\text{out}}(t)\Delta t}{E_{\text{nBS}}\eta_{\text{bs}}^{\text{out}}} \quad (5)$$

式(4)、(5)中, $S_{\text{SOC}}(t)$ 、 $S_{\text{SOC}}(t-1)$ 分别为 t 时刻及 $t-1$ 时刻蓄电池荷电状态量; $P_{\text{BS}}^{\text{in}}(t)$ 、 $P_{\text{BS}}^{\text{out}}(t)$ 分别为蓄电池 t 时刻充放电功率(充电为正,放电为负); $\eta_{\text{bs}}^{\text{in}}$ 、 $\eta_{\text{bs}}^{\text{out}}$ 分别为蓄电池充放电效率; α 为蓄电池自放电率,取 0.01%。

2 3层容量优化模型

在考虑系统内部渗透率约束进行容量优化时,储能单元与火电机组出力对容量优化结果影响较大,为综合考虑系统内部储能单元与火电机组出力对风光火储系统容量优化结果的影响,构建了包含火储联合协调控制与火电机组功率分配在内的3层容量优化模型,具体结构如图2所示。

为明确数据处理流程与方法,将容量优化模型分为3层,上层模型为含有渗透率约束的风光储容量配置模型,将符合约束条件的风光储容量配置传递给中层;中层通过上层传递的风光储容量配置,计算风光火储系统净负荷值,通过火储联合控制策略,确定各时刻储能充放电功率与火电机组总出力,将火电机组总出力传递给下层;下层以火电机组总运行成本最优为目标函数,对3个火电机组的出力进行优化。

在下层优化得到各火电机组出力后,将其传递给中层;中层接收到下层反馈数据后结合储能充放电功率一起反馈给上层;上层对中层反馈的信息进

行计算,以风光火储联合发电系统总成本最优为目标函数对风光储容量进行迭代优化,从而得出最佳容量配置。

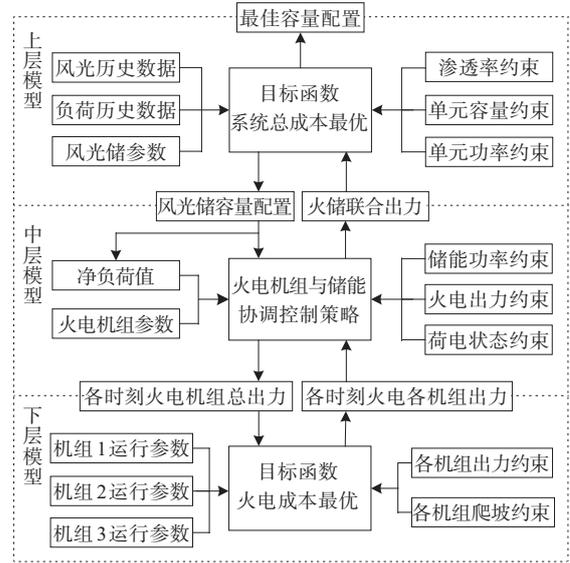


图2 多层容量优化模型结构

Figure 2 Multi-layer capacity optimization model structure

2.1 上层目标函数

上层以独立风光火储系统成本最优为目标函数,其中包括系统内各单元投资建造成本、运行维护成本、补贴收益、火电机组运行成本及可靠性成本,目标函数如下:

$$C_{\text{inv}} = \sum_{i=1}^3 E_{\text{ins}}^i C_{\text{ins}}^i \frac{\alpha_i (1 + \alpha_i)^{\beta_i}}{(1 + \alpha_i)^{\beta_i} - 1} \quad (6)$$

$$C_{\text{run}} = \sum_{i=1}^3 C_r^i E_r^i \quad (7)$$

$$C_{\text{rel}} = \delta_1 \sum_{t=1}^T E_{\text{los}}(t) + \delta_2 \sum_{t=1}^T E_{\text{dis}}(t) \quad (8)$$

$$\min F_1 = \min(C_{\text{inv}} + C_{\text{run}} + C_{\text{run}}^{\text{th}} + C_{\text{rel}}) \quad (9)$$

式(6)~(9)中, C_{inv} 为风光储等值年投资建设成本; C_{run} 为风光储运行维护成本; $C_{\text{run}}^{\text{th}}$ 为火电运行成本; C_{rel} 为系统可靠性成本; E_{ins}^i 为风光储装机容量; C_{ins}^i 为风光储投资建设成本系数; α_i 为贴现率; β_i 为风光储设备使用寿命; C_r^i 为风光储运行维护成本系数; E_r^i 为风光发电量及储能充放电电量; $E_{\text{los}}(t)$ 、 $E_{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时刻系统负荷缺电量及弃风弃光量; T 为系统运行时间; δ_1 、 δ_2 分别为系统失负荷及弃风弃光惩罚系数。

2.2 上层约束条件

上层约束条件包括渗透率约束、单元容量约束和单元功率约束,风光渗透率满足:

$$S_{\text{SCPE}} = E_{\text{wv}}/E_{\text{load}} \quad (10)$$

式中, S_{SCPE} 为风光渗透率; E_{wv} 为风光可输出总电量; E_{load} 为负荷需求总电量。

单元容量约束可表示为

$$\begin{cases} E_{WT}^{\min} \leq E_{WT} \leq E_{WT}^{\max} \\ E_{PV}^{\min} \leq E_{PV} \leq E_{PV}^{\max} \\ E_{BS}^{\min} \leq E_{BS} \leq E_{BS}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, E_{WT} 、 E_{PV} 、 E_{BS} 分别为风光储装机容量; E_{WT}^{\min} 、 E_{WT}^{\max} 分别为风力发电机装机容量最小、最大值; E_{PV}^{\min} 、 E_{PV}^{\max} 分别为光伏装机容量最小、最大值; E_{BS}^{\min} 、 E_{BS}^{\max} 分别为储能电池装机容量最小、最大值。

单元功率约束可表示为

$$\begin{cases} P_{WT}^{\min} \leq P_{WT}(t) \leq P_{WT}^{\max} \\ P_{PV}^{\min} \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV}^{\max} \\ P_{BS}^{\min} \leq P_{BS}(t) \leq P_{BS}^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_{WT}^{\min} 、 P_{WT}^{\max} 分别为风力发电机最小、最大出力; P_{PV}^{\min} 、 P_{PV}^{\max} 分别为光伏最小、最大出力; P_{BS}^{\min} 、 P_{BS}^{\max} 分别为储能电池最小、最大出力; $P_{BS}(t)$ 为储能电池 t 时刻的充放电功率(充电为正, 放电为负), 且满足在同一时刻只能充电或放电, 如下:

$$\begin{cases} P_{BS}(t) = P_{BS}^{\text{in}}(t) - P_{BS}^{\text{out}}(t) \\ P_{BS}^{\text{in}}(t) P_{BS}^{\text{out}}(t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中, $P_{BS}^{\text{in}}(t)$ 、 $P_{BS}^{\text{out}}(t)$ 分别为储能电池 t 时刻充电功率及放电功率。

2.3 中层调度模型

风光火储系统中配置有储能单元来平抑风光出力波动并采用火电机组作为补充发电, 因此需要通过控制策略对储能单元及火电机组总出力进行功率分配。在中层调度层, 首先根据上层给出的风光储容量配置计算得出 t 时刻系统净负荷值 $P_{\text{net}}(t)$:

$$P_{\text{net}}(t) = P_{\text{load}}(t) - (P_{WT}(t) + P_{PV}(t)) \quad (14)$$

在求得系统净负荷值后, 按照图3所示控制策略, 给出储能充放电功率及火电机组总出力。受火电机组爬坡约束, 首先由火电机组总最小出力供给负荷, 若火电机组不能满足负荷需求, 则调用储能资源供给负荷, 若储能资源仍不能满足负荷需求, 则由火电机组作为补充发电。

在调度过程中需满足功率平衡约束。可表示为

$$P_{\text{net}}(t) = P_{\text{TH}}(t) + P_{\text{BS}}(t) + P_{\text{los}}(t) + P_{\text{dis}}(t) \quad (15)$$

式中, $P_{\text{TH}}(t)$ 为 t 时刻火电机组总出力; $P_{\text{los}}(t)$ 为 t 时刻失负荷功率; $P_{\text{dis}}(t)$ 为 t 时刻弃电功率。

为避免储能电池充放电功率过高或过低对其寿命的影响, 需考虑储能荷电状态约束, 约束满足:

$$S_{\text{SOC}, \min} \leq S_{\text{SOC}}(t) \leq S_{\text{SOC}, \max} \quad (16)$$

式中, $S_{\text{SOC}, \min}$ 、 $S_{\text{SOC}, \max}$ 分别为储能电池荷电状态最小、最大值。

火电机组总出力也需满足出力约束, 可表示为

$$P_{\text{TH}}^{\min}(t) \leq P_{\text{TH}}(t) \leq P_{\text{TH}}^{\max}(t) \quad (17)$$

式中, $P_{\text{TH}}^{\min}(t)$ 为火电机组总出力最小值; $P_{\text{TH}}^{\max}(t)$ 为火电机组总出力最大值, 可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{TH}}^{\min}(t) = \max \left\{ \sum_n P_{\text{TH}n}^{\min}, \sum_n (P_{\text{TH}n}(t-1) - P_{\text{TH}n}^{\text{cli}}) \right\} \\ P_{\text{TH}}^{\max}(t) = \min \left\{ \sum_n P_{\text{TH}n}^{\max}, \sum_n (P_{\text{TH}n}(t-1) + P_{\text{TH}n}^{\text{cli}}) \right\} \end{cases} \quad (18)$$

式中, N 为火电机组数量; $P_{\text{TH}n}^{\min}$ 、 $P_{\text{TH}n}^{\max}$ 分别为第 n 个火电机组最小、最大出力; $P_{\text{TH}n}(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻第 n 个火电机组功率大小; $P_{\text{TH}n}^{\text{cli}}$ 为第 n 个火电机组的最大爬坡量。

2.4 下层目标函数

下层优化模型以火电运行成本最低为目标函数, 求得火电机组最佳出力分配, 目标函数如下:

$$C_{\text{run}}^{\text{th}} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (a_n P_{\text{TH}n}(t)^2 + b_n P_{\text{TH}n}(t) + c_n) \quad (19)$$

$$\min F_2 = \min C_{\text{run}}^{\text{th}} \quad (20)$$

式中, N 为火电机组数量; a_n 、 b_n 、 c_n 为第 n 组火电机组燃料成本系数。

2.5 下层约束条件

下层模型约束条件包括各火电机组出力约束及爬坡约束:

$$P_{\text{TH}n}^{\min} \leq P_{\text{TH}n}(t) \leq P_{\text{TH}n}^{\max} \quad (21)$$

$$-P_{\text{TH}n}^{\text{cli}} \leq P_{\text{TH}n}(t) - P_{\text{TH}n}(t-1) \leq P_{\text{TH}n}^{\text{cli}} \quad (22)$$

式中, $P_{\text{TH}n}^{\min}$ 、 $P_{\text{TH}n}^{\max}$ 分别为第 n 组火电机组出力最小、最大值, 可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{TH}n}^{\max}(t) = \min \{ P_{\text{TH}n}^{\max}, P_{\text{TH}n}(t-1) + P_{\text{TH}n}^{\text{cli}} \} \\ P_{\text{TH}n}^{\min}(t) = \max \{ P_{\text{TH}n}^{\min}, P_{\text{TH}n}(t-1) - P_{\text{TH}n}^{\text{cli}} \} \end{cases} \quad (23)$$

3 火储联合控制策略

优化模型中层对储能充放电功率和火电机组出力进行分配, 具体控制策略如图3所示。

在火储联合调度中, 采用优先调度系统储能资源的策略, 火电机组仅作为补充发电。但考虑到火电机组存在爬坡约束, 避免火电机组出力浪费, 在调度储能资源之前, 先对 t 时刻火电机组最低出力 P_{TH}^{\min} 加以利用。

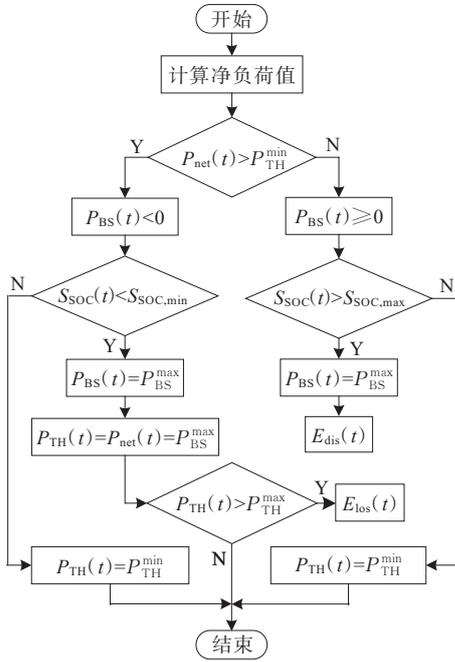


图3 中层控制策略

Figure 3 Middle-level control strategy

首先根据上层传递的风光储容量及负荷数据计算得出 t 时刻系统的净负荷值 $P_{\text{net}}(t)$ 。当 $P_{\text{net}}(t) \leq P_{\text{TH}}^{\min}(t)$ 时,风光出力及火电机组总最小出力能够满足负荷需求,储能电池进行充电,吸收系统内多余电量。此时,若储能电池可充电容量大于等于系统多余电量,则储能电池对多余电量进行吸收,系统无失负荷量及其弃风弃光量;若储能电池可充电容量小于系统多余电量,则储能电池吸收至荷电状态上限,系统存在弃风弃光量。

当 $P_{\text{net}}(t) > P_{\text{TH}}^{\min}(t)$ 时,风光出力及火电机组总最小出力不能满足负荷需求,储能电池需进行放电。此时,若储能电池可放电容量大于等于负荷剩余需求电量,则储能电池放电,系统无失负荷量及弃风弃光量;若储能电池可放电容量小于负荷剩余需求电量,则储能电池放出可放电容量,并由火电机组提供剩余需求电量,若火电机组在最大出力约束下能够满足负荷剩余电量需求,则系统无失负荷及弃风弃光量;若火电机组不能满足负荷剩余电量需求,则系统存在失负荷量。

4 模型求解方法

在对多层容量优化模型进行求解时,采用GSO算法对上层模型进行求解,得到最佳风光储容量配置,并采用改进粒子群算法对下层模型进行求解^[21],给出各时刻各火电机组出力。

GSO算法是一种简单有效的全局优化方法^[22],结合了粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法和正弦余弦优化算法(sine cosine algorithm, SCA)的一些主要优点,使用正弦和余弦函数代替PSO速度更新中简单的随机值,提高了算法全局搜索的能力,避免陷入局部最优,并使用单峰测试函数和多峰值测试函数证明了GSO算法良好的探索和开发能力。

GSO算法涵盖了探索和开发2个阶段,可以在这2种矛盾的能力之间提供良好的平衡,共分为3个主要部分,包括种群初始化、种群评估和更新当前种群,具体步骤如图4所示。

1) 种群初始化。在搜索空间以一组随机生成的对象开始搜索过程,初始化满足:

$$L_i = L_i^{\text{low}} + r(L_i^{\text{up}} - L_i^{\text{low}}), i=1, 2, \dots, N$$

(24)

式中, L_i 为第 i 个对象在搜索空间中的位置; L_i^{up} 、 L_i^{low} 分别为第 i 个对象的上界和下界; r 为 0~1 的随机值。

2) 人口评价。计算各个对象的目标函数值,并根据目标函数选出最佳对象。

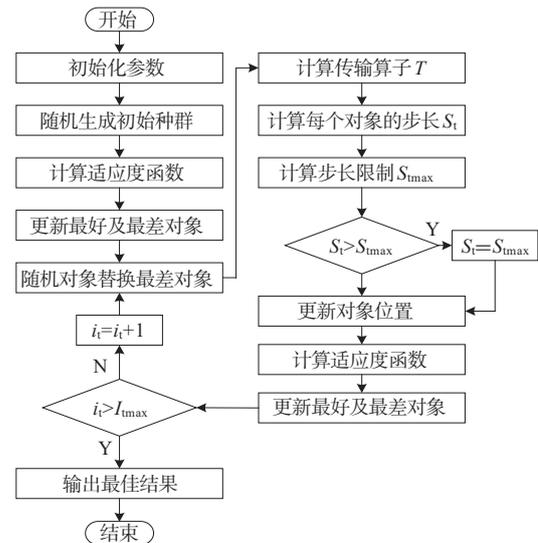


图4 GSO算法流程

Figure 4 GSO flow chart

3) 更新最差对象。在这一步骤中,根据对象的适应度进行排序,并且适应度最差的对象将通过随机解决方案进行更改。

4) 步长计算。GSO算法在迭代过程中通过步长 S_i 将对象移向最佳位置, S_i 将随机生成并在迭代过程中使用式(25)进行更新:

$$S_{ii}(t+1) = TS_{ii}(t) + C_1 \cos(r_1)(O_{besti} - L_i(t)) + C_2 \sin(r_2)(O_{gbesti} - L_i(t)) \quad (25)$$

式中, C_1 、 C_2 为加速常数,影响对象位置行动轨迹; r_1 、 r_2 为0~1的随机数; O_{besti} 、 O_{gbesti} 分别为第*i*个对象最佳个体位置和所有对象最佳位置; T 为转移算子,将搜索从探索转换为开发,以提高搜索性能并控制早期迭代中的全局搜索与晚期迭代中的局部搜索之间的平衡,可以计算如下:

$$T = 100 \times \exp\left(-20 \times \frac{i_t}{I_{tmax}}\right) \quad (26)$$

式中, i_t 为当前迭代次数; i_{tmax} 为迭代最大值。

5) 步长限制。在迭代过程中,算法通过步长调整对象在搜索空间中各个维度的运动,为了避免出现随机步长引起的爆炸和发散,引入了合理的间隔来限制对象的运动,步长限制为

$$-S_{tmax} \leq S_{ti} \leq S_{tmax} \quad (27)$$

式中, S_{tmax} 是允许的最大步长,它定义了一个对象在迭代过程中可以在其位置上运动的最大距离:

$$S_{tmax} = 0.1 \times (L_i^{up} - L_i^{low}) \quad (28)$$

6) 更新对象位置。空间中的各个对象在搜索空间朝全局最优移动,位置更新满足:

$$L_i(t+1) = L_i(t) + S_{ti}(t+1) \quad (29)$$

5 系统评价指标

为探求不同风光渗透率下,风光火储系统容量配置在经济性、可靠性、稳定性及碳减排效益方面的变化规律,将对不同风光渗透率下系统总成本、负荷缺电率、系统出力波动性、风光利用率和碳排放量进行研究。其中,系统总成本包括风力发电机、光伏阵列和储能电池产生的等值年投资建设成本、运行维护成本及火电机组运行成本和可靠性成本。

系统负荷缺电率 R_{los} 反映了系统可靠性,即系统无法满足负荷需求产生的负荷缺电越多,负荷缺电率越大,系统可靠性越低^[23],可表示为

$$R_{los} = \frac{\sum_{t=1}^T E_{los}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t) \Delta t} \quad (30)$$

风光火储系统的出力波动率 R_{rel} 反映了系统内可再生能源不确定性导致的电源总出力的波动情况,从而体现系统的稳定性^[24]。系统出力波动率越小,系统稳定性越高,满足如下公式:

$$R_{rel} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} |P_z(t+1) - P_z(t)|}{\sum_{t=1}^T P_z(t)} \quad (31)$$

式中, $P_z(t+1)$ 、 $P_z(t)$ 分别为 $t+1$ 和 t 时刻系统总出力。

采用各渗透率下系统风光利用率 R_{adv} 和碳排放量 E_c 衡量系统碳减排效果。风光利用率越大,碳排放量越小,系统碳减排效益越高,风光利用率满足如下公式:

$$R_{adv} = \frac{\sum_{t=1}^T E_{dis}(t)}{\sum_{t=1}^T (P_{WT}(t) + P_{PV}(t)) \Delta t} \quad (32)$$

$$E_c = \sigma \sum_{t=1}^T P_{TH}(t) \Delta t \quad (33)$$

式中, σ 为火电碳排放系数,取 $0.92 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ^[25]。

6 算例分析及规律研究

6.1 算例数据及参数

以东北某地气象数据及负荷数据作为风光火储系统输入数据。采用皮尔森相关系数,选取每月中气象数据、负荷数据与平均日变化曲线最小的典型日数据^[26],采样时长为288 h,步长为1 h。

为满足负荷需求,系统内风力发电机、光伏阵列和储能电池选用文献[25]所提型号。同时系统内安装有3组火电机组作为补充发电,火电机组参数参考文献[27]。

6.2 算法求解对比

为验证GSO算法在容量优化求解问题中的优越性,采用GSO、PSO和SCA这3种算法对模型进行求解。设置系统渗透率为40%,种群数量为100,迭代次数为50,求解结果如图5所示。

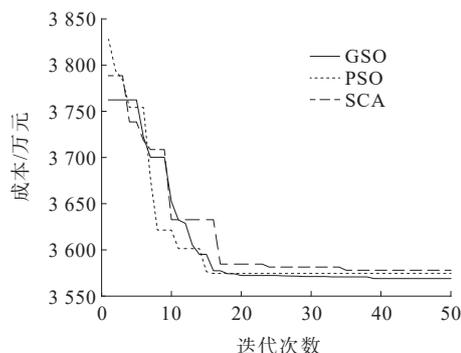


图5 3种算法求解过程

Figure 5 Three algorithms solving procedure

经算例检验,3种算法均能得到满足条件的容量配置,GSO算法在容量优化模型求解问题上,相较于PSO算法和SCA算法,其收敛速度和收敛精度综合表现更加优秀,并且收敛精度表现最佳。SCA算法求解最优成本为3 578万元,PSO算法求解最优成本为3 574万元,GSO算法求解最优成本最低为3 569万元。

为展示风光火储系统容量优化过程中系统内各单元的出力情况,给出了GSO算法所得容量配置下,渗透率为40%时的系统净负荷曲线及火电机组出力,具体如图6所示。

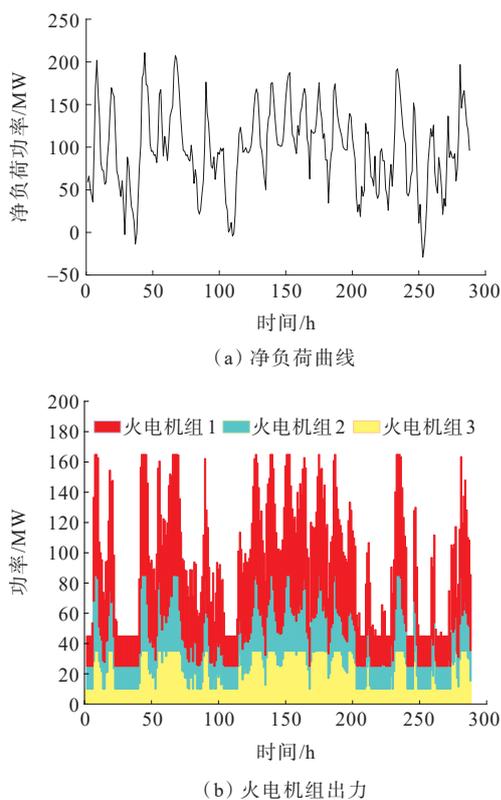


图6 净负荷曲线及火电机组出力

Figure 6 Net load curve and output of thermal power unit

6.3 不同渗透率下系统规律研究

设置不同渗透率约束,并采用GSO算法求解不同渗透率约束下系统最佳容量优化配置,具体容量配置结果见表1。

随着系统内风光渗透率约束不断增大,系统内可再生能源及储能电池装机容量有较大增长,可再生能源出力的不确定性和波动性对系统影响逐步加深^[28]。为全面分析渗透率约束变化对系统容量优化配置经济性、可靠性、稳定性和碳减排效益的影响,给出不同渗透率约束下系统各项评价指标数值,具体数值见表2。

表1 风光储容量配置结果

Table 1 Wind storage capacity configuration results

渗透率/ %	风电装机容量/ MW	光伏装机容量/ MW	储能装机容量/ (MW·h)
20	76	51.00	10
30	92	95.50	36
40	144	98.25	229
50	163	108.50	456
60	218	144.75	730
70	290	122.75	1 051
80	298	183.50	1 488

表2 不同渗透率下系统评价指标数值

Table 2 System evaluation indices under different permeabilities

渗透率/%	F_1 /万元	$R_{los}/\%$	$R_{rel}/\%$	$R_{adv}/\%$	E_c/t
20	3 365	1.78	6.08	99.92	25 549
30	3 334	1.58	6.39	99.62	22 724
40	3 569	1.06	8.26	98.84	18 417
50	4 397	0.74	10.87	96.29	14 633
60	5 530	0.71	13.00	93.42	11 384
70	7 290	0.55	15.64	88.91	8 596
80	9 151	0.47	17.44	85.91	4 919

由表1、2可知,渗透率约束的变化对于风光火储系统容量配置结果以及系统经济性、可靠性、稳定性和碳减排效益均有较大影响,进一步分析其配置结果及系统评价指标,采用最小二乘法拟合不同渗透率约束下系统评价指标变化规律,结果如图7~11所示。

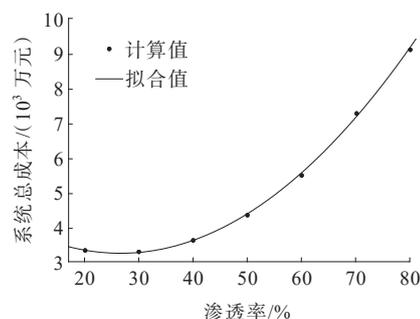


图7 系统总成本拟合曲线

Figure 7 System total cost fitting curve

如图7所示,拟合确定系数为0.999 4,拟合效果良好,系统总成本的多项式拟合结果为

$$y_1 = 2.074x^2 - 110.4x + 4 755 \quad (34)$$

如图8所示,拟合确定系数为0.974 4,拟合效果良好,系统负荷缺电率的多项式拟合结果为

$$y_2 = 0.355 \times 10^{-3}x^2 - 0.058x + 2.86 \quad (35)$$

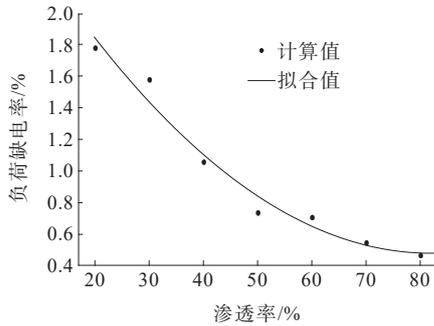


图8 负荷缺电率拟合曲线

Figure 8 Load loss rate fitting curve

如图9所示,拟合确定系数为0.999 4,拟合效果良好,系统出力波动率的多项式拟合结果为

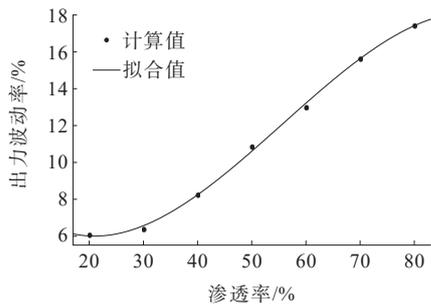
$$y_3 = -7.306 \times 10^{-5} x^3 + 0.012x^2 - 0.415x + 10.02 \quad (36)$$


图9 系统出力波动率拟合曲线

Figure 9 Fitted curve of system output fluctuation

如图10所示,拟合确定系数为0.992 6,拟合效果良好,系统出力波动率的多项式拟合结果为

$$y_4 = -0.390 \times 10^{-2} x^2 + 0.144x + 98.8 \quad (37)$$

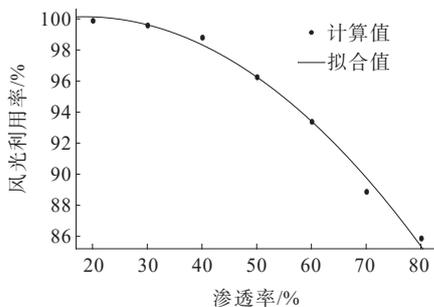


图10 风光利用率拟合曲线

Figure 10 Wind power photovoltaic utilization rate fitting curve

如图11所示,拟合确定系数为0.997 8,拟合效果良好,系统碳排放量多项式拟合结果为

$$y_5 = 0.524x^2 - 399.5x + 3.363 \times 10^4 \quad (38)$$

基于当前风光渗透率的实际水平,结合双碳目标的发展规划,同时兼顾后文分析的方便,将渗透率分为中比例(10%~30%)、高比例(30%~50%)和极高比例(50%~100%)3个阶段^[29]。

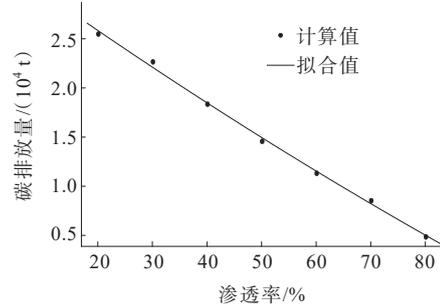


图11 碳排放量拟合曲线

Figure 11 Carbon emission fitting curve

在中比例渗透率阶段,可再生能源出力波动性和间歇性对系统影响较小。系统对风光能源利用程度较高,出力波动率较小,稳定性较高,火电出力在负荷供电中占比较大,系统经济成本支出受火电机组出力减小影响呈下降趋势,但在可靠性和碳减排效益方面表现较差。

在高比例渗透率阶段,系统内可再生能源出力波动性和间歇性对系统影响愈发强烈。系统稳定性降低,弃风弃光量逐渐增加,也导致了火电机组出力大幅减少。同时,为满足负荷需求,减小弃风弃光量,系统储能配置容量增长显著,这也导致了经济成本的快速增长,其中风电装机容量增加了71 MW,光伏装机容量增加了13 MW,储能装机容量增加了420 MW·h,经济成本增加了1 063万元,出力波动率增长了4.48%,风光利用率下降了3.33%。但在系统稳定性和碳减排效益方面,系统负荷缺电率和碳排放量都呈下降趋势,其中负荷缺电率下降了0.84%,碳排放量减少了8 091 t。

在极高比例渗透率阶段,可再生能源出力的波动性和间歇性对系统经济性和稳定性都产生了严重影响。在此阶段,风光储装机容量大于负荷峰值,系统经济成本急剧增加,出现大量弃风弃光,此时,风光出力对火电机组出力的影响变小,火电机组出力减小趋势渐缓。以渗透率50%~80%为例,系统风电装机容量增加了135 MW,光伏装机容量增加了75 MW,储能装机容量增加了1 032 MW·h,经济成本增加了4 754万元,出力波动率提高了6.54%,风光利用率下降了10.38%,与此同时,系统负荷缺电率减小了0.27%,碳排放量减小了9 714 t。

7 结语

本文针对不同渗透率约束对风光火储系统容量优化配置结果与系统经济性、可靠性、稳定性和

碳减排效益的影响进行研究,得到了以下结论:

1) 首次引入了GSO算法对系统容量优化模型进行求解,经对比分析,其在模型求解中收敛速度和收敛精度上综合表现优异;

2) 构建了风光火储系统多层容量优化配置模型,综合考虑了火电机组与储能的调度策略,给出了不同渗透率约束下的最优容量配置;

3) 采用了最小二乘法对系统评价指标进行拟合分析,给出了相应的数学关系,明确了系统渗透率提高导致经济成本上升,稳定性下降,碳减排效益提高的变化规律。

参考文献:

- [1] 郑洁云,宋倩芸,吴桂联,等.基于Q学习的区域综合能源系统低碳运行策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(2):106-115+128.
ZHENG Jieyun, SONG Qianyun, WU Guilian, et al. Low-carbon operation strategy of regional integrated energy system based on the Q learning algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 106-115+128.
- [2] 吴珊,边晓燕,张菁娴,等.面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J].电工技术学报,2023,38(6):1662-1677.
WU Shan, BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662-1677.
- [3] 李蕊睿,李奇,蒲雨辰,等.计及功率交互约束的含电-氢混合储能的多微电网系统容量优化配置[J].电力系统保护与控制,2022,50(14):53-64.
LI Ruirui, LI Qi, PU Yuchen, et al. Optimal configuration of an electric-hydrogen hybrid energy storage multi-microgrid system considering power interaction constraints[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 53-64.
- [4] 薛成,曹戈,王争冕,等.基于鲸鱼群算法的交直流混联系统无功电压控制方法研究[J].电网与清洁能源,2023,39(9):67-73.
XUE Cheng, CAO Ge, WANG Zhengmian, et al. Research on the reactive power and voltage control method for AC-DC hybrid systems based on the whale swarm algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 67-73.
- [5] 王劲菁,任茂鑫,曹培,等.基于随机矩阵理论的状态监测数据关联分析方法[J].高压电器,2023,59(11):155-161+171.
WANG Shaojing, REN Maoxin, CAO Pei, et al. Correlation analysis method of condition monitoring data based on random matrix theory[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 155-161+171.
- [6] 和萍,宫智杰,靳浩然,等.高比例可再生能源电力系统调峰问题综述[J].电力建设,2022,43(11):108-121.
HE Ping, GONG Zhijie, JIN Haoran, et al. Review of peak-shaving problem of electric power system with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 108-121.
- [7] 梁琛,王维洲,马喜平,等.基于随机潮流的高比例新能源接入配电网的极限线损分析[J].智慧电力,2022,50(12):34-40+78.
LIANG Chen, WANG Weizhou, MA Xiping, et al. Analysis on limit line loss in high proportion of renewable energy distribution network based on stochastic power flow[J]. Smart Power, 2022, 50(12): 34-40+78.
- [8] 但扬清,王蕾,郑伟民,等.高比例可再生能源接入背景下电网承载能力鲁棒提升策略[J].中国电力,2023,56(9):104-111.
DAN Yangqing, WANG Lei, ZHENG Weimin, et al. Robust improvement strategy for power grid hosting capacity with integration of high proportion of renewable energy[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 104-111.
- [9] 邢鹏翔,张世泽,曾梦迪,等.多能源混合微网容量优化配置研究综述[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(3):375-383.
XING Pengxiang, ZHANG Shize, ZENG Mengdi, et al. Review of configuration optimization for hybrid microgrid with multiple energy resources[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(3): 375-383.
- [10] 王一凡,王辉,李旭阳,等.电氢混合储能微电网容量配置优化的研究综述[J].广西师范大学学报(自然科学版),2022,40(6):18-36.
WANG Yifan, WANG Hui, LI Xuyang, et al. Survey of capacity allocation of microgrid hybrid energy storage system based on hydrogen energy storage[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2022, 40(6): 18-36.
- [11] 林俐,李北辰,孙勇,等.基于高比例新能源消纳的抽水蓄能容量多时间尺度迭代优化配置模型[J].电网与清洁能源,2021,37(1):104-111.
LIN Li, LI Beichen, SUN Yong, et al. Multi-time-scale iterative optimal configuration model of pumped storage capacity based on accommodation of high share new energy[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 104-111.
- [12] 付爱慧,张峰,张利,等.考虑爬坡功率有限平抑的高渗透率光伏电网储能配置策略[J].电力系统自动化,2018,42(15):53-61+185.
FU Aihui, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Capacity optimization strategy of energy storage system for power grid with high penetration of photovoltaic considering limited smoothing of photovoltaic ramping power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 53-61+185.

- [13] HOU Q C, DU E S, ZHANG N, et al. Impact of high renewable penetration on the power system operation mode: a data-driven approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 731-741.
- [14] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 3-16.
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3-16.
- [15] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [16] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [17] DENHOLM P, ARENT D J, BALDWIN S F, et al. The challenges of achieving a 100% renewable electricity system in the United States[J]. Joule, 2021, 5(6): 1331-1352.
- [18] 梅书凡, 檀勤良, 代美. 考虑风光出力季节性波动的储能容量配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 51-57.
MEI Shufan, TAN Qinliang, DAI Mei. Energy storage capacity configuration considering seasonal fluctuation of wind and photovoltaic output[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 51-57.
- [19] 宋扬, 石勇, 刘宝泉, 等. 基于改进麻雀搜索算法的机场微电网优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 33-40.
SONG Yang, SHI Yong, LIU Baoquan, et al. Optimal dispatching strategy of airport microgrid based on the improved sparrow search algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 33-40.
- [20] 禹海峰, 黄婧杰, 蒋诗谣, 等. 计及储能使用年寿命的风电场整体性储能配置[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 152-160.
YU Haifeng, HUANG Jingjie, JIANG Shiyao, et al. The overall energy storage configuration of wind farms considering the service life of electric energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 152-160.
- [21] 邓剑波, 马瑞, 胡振文, 等. 基于改进粒子群算法的冷热电联供微网优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 35-42.
DENG Jianbo, MA Rui, HU Zhenwen, et al. Optimal scheduling of micro grid with CCHP systems based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 35-42.
- [22] NOROOZI M, MOHAMMADI H, EFATINASAB E, et al. Golden search optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2022, 10: 37515-37532.
- [23] 朱显辉, 胡旭, 师楠, 等. 考虑氢储动态效率的电氢耦合微网长期容量优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1128-1139.
ZHU Xianhui, HU Xu, SHI Nan, et al. Long-term capacity optimization of electrohydrogen coupled microgrid considering dynamic efficiency of hydrogen storage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1128-1139.
- [24] 马榕谷, 陈洁, 赵军超, 等. 非并网风氢互补系统的容量多目标优化[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 422-429.
MA Ronggu, CHEN Jie, ZHAO Junchao, et al. Multi-objective optimization for capacity of non-grid-connected wind/hydrogen hybrid power system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(2): 422-429.
- [25] 肖勇, 赵云, 涂治东, 等. 基于改进的皮尔逊相关系数的低压配电网拓扑结构校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 37-43.
XIAO Yong, ZHAO Yun, TU Zhidong, et al. Topology checking method for low voltage distribution network based on improved Pearson correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 37-43.
- [26] 曹建伟, 穆川文, 孙可, 等. 考虑碳交易的区域电网风光储容量配置优化方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(12): 1091-1096+1105.
CAO Jianwei, MU Chuanwen, SUN Ke, et al. Optimal configuration method of wind-photovoltaic-storage capacities for regional power grid considering carbon trading[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(12): 1091-1096+1105.
- [27] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑火电调峰主动性与需求响应的含储能电力系统优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1674-1684.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal dispatch of power system with energy storage considering deep peak regulation initiative of thermal power and demand response[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1674-1684.
- [28] LIU J Z, WANG Q H, SONG Z Q, et al. Bottlenecks and countermeasures of high-penetration renewable energy development in China[J]. Engineering, 2021, 7(11): 1611-1622.
- [29] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.