

高比例新能源渗透下计及灵活性资源的交直流混合配电网优化运行

汤小可¹, 嵇岩¹, 孙中旺¹, 杨丹丹¹, 靖知川¹, 姚金明²

(1. 江苏东港能源投资有限公司, 江苏 连云港 222042;

2. 南京邮电大学自动化学院, 江苏 南京 210023)

Optimal Operation of AC/DC Hybrid Distribution Networks Considering Flexibility Resources under High Proportion of New Energy Penetration

TANG Xiaoke¹, JI Yan¹, SUN Zhongwang¹, YANG Dandan¹, JING Zhichuan¹, YAO Jinming²

(1. Jiangsu Donggang Energy Investment Co., Ltd., Lianyungang 222042, Jiangsu, China; 2. College of Automation,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

ABSTRACT: This paper proposes an optimal operation method that comprehensively considers the regulation capacity of regional flexible resources under high-proportion renewable energy penetration. Firstly, for the resources with flexible regulation capacity in the region, an output characteristic model is constructed. Secondly, fully taking into account the limitations of the traditional AC power distribution mode, an optimal operation model is established in the AC-DC hybrid distribution network under high-proportion renewable energy penetration. The chaotic simulated annealing beetle antennae search algorithm is adopted to efficiently solve this multi-variable mixed-integer programming problem. Finally, the proposed model is verified by combining the actual regional resource endowment and the improved IEEE 33-node system. The case study results confirm the rationality and effectiveness of the proposed model.

KEY WORDS: high proportion of new energy; AC/DC hybrid distribution network; flexibility resources; mixed integer programming

摘要: 该文提出一种综合考虑高比例新能源渗透下计及地区灵活性资源调节能力的优化运行方法。首先, 针对区域内具有灵活性调节能力的资源, 构建出力特性模型; 其次, 充分考虑传统交流配电形式存在的局限性, 在高比例新能源渗透下的交直流混合配电网中构建优化运行模型, 并采用混沌模拟

退火天牛须搜索算法对该多变量混合整数规划问题进行高效求解; 最后, 结合地区实际资源禀赋和改进的 IEEE 33 节点系统对所提模型进行验证, 算例结果验证了该模型的合理性和有效性。

关键词: 高比例新能源; 交直流混合配电网; 灵活性资源; 混合整数规划

随着新型配电系统建设的推进, 风能、太阳能等清洁能源接入电网的容量不断增多, 高渗透率分布式新能源并网将成为未来配电网的重要形态, 从而使配电网的结构更加复杂。同时, 相较于常规交流配电网架构, 直流配电系统在兼容光伏发电 (photovoltaic, PV) 等直流型分布式电源以及电动汽车 (electric vehicle, EV) 等直流负载方面展现出显著的技术优势, 能够有效地提升新型电力电子设备并网后系统运行的稳定性^[1-2]。通过先进电力电子变换技术构建的交直流混合配电网, 因其兼具交流系统成熟度高、直流系统效率优的双重特点, 已被学术界和工业界普遍认为是智能配电网的重要发展方向^[3]。

目前, 针对可再生能源系统 (renewable energy source, RES) 大规模接入配电网背景下的规划和运行研究已有一部分研究成果。文献[4]采用线性规划理论, 创建了一个新能源高渗透率下的电源优化规划模型, 该模型通过松弛有功平衡条件, 使得系统在一定程度上具备了有功调节潜力。文献[5]综合

基金项目: 中国南方电网科技项目 (GDKJXM20230432)。

Project Supported by Science and Technology Project of CSG (GDKJXM20230432)。

考虑传统可再生能源的经济投资、运营成本和最大可容纳比例等标准规定,并纳入了系统的惯性和备用容量等限制因素,通过进行逐小时的模拟求解,获得了一种多阶段可再生能源规划方案,该方案具备相当程度的适应性和灵活性。文献[6]在处理高度渗透 RES 整合到电力系统的问题时,考虑到新能源场景出力的不确定性,从电源、电网和负荷需求的角度出发,建立了一个线性化电网扩展规划模型。文献[7]将火电爬坡、机组启停、储能充放电均纳入系统可调节资源,构建了正负灵活性资源约束集合,提出一种发电机组装机容量的协同优化规划模型。文献[8]将不同类型电源出力、电网联络线以及需求响应等可调节资源均纳入考虑范围,但相关研究主要集中在某一类或某几类资源上,其对于相应资源的运行特性、调节能力挖掘不深,同时对计及 EV 充电负荷需求及多种类型可调资源之间协调优化的研究不够全面。

本文首先基于地区微型燃气轮机(microturbine, MT)、可再生能源、储能装置及 EV 充电站出力特性,构建了地区交直流混合配电网数学模型,并挖掘其具备的可调节能力;其次,提出一种以配电网日总运行成本最小为目标的优化运行策略;最后,通过混沌模拟退火天牛须搜索算法对所提模型进行求解。

1 交直流混合配电网元件特性模型

交直流混合配电网的基本组成元件与结构见图 1,主要包括交直流总线、交直流负荷、断路器、RES 以及换流器等,交流总线节点上的直流负荷和直流电源需经过换流器与总线相连,直流节点同理。

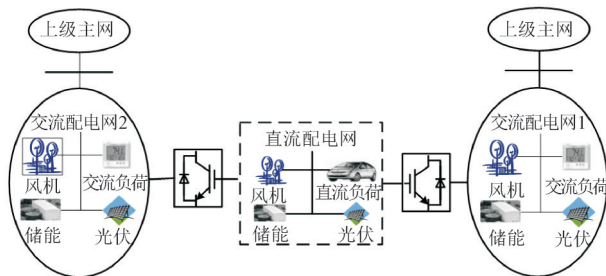


图1 交直流配电网结构

Fig.1 Structure of AC/DC distribution networks

1.1 微型燃气轮机特性模型

微型燃气轮机的基本特性方程为

$$P_{MT}(t) = L_{MT} \beta_{MT} (Q_{MT}^{OUT}(t) - Q_{MT}^{IN}(t)) \quad (1)$$

式中: $P_{MT}(t)$ 为 MT 第 t 时段的出力; L_{MT} 为进入 MT 的空气质量流量; β_{MT} 为燃气轮机实际效率; $Q_{MT}^{OUT}(t)$ 、 $Q_{MT}^{IN}(t)$ 分别为 MT 出口、进口的热量。

MT 实际出力需要小于机组最大出力限值,同时还需要满足机组爬坡约束。

$$0 \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{\max} \quad (2)$$

$$\Delta P_{MT}^{\min} \leq P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \leq \Delta P_{MT}^{\max} \quad (3)$$

式中: $P_{MT}^{\max}$ 为 MT 机组最大出力上限; $\Delta P_{MT}^{\min}$ 、 $\Delta P_{MT}^{\max}$ 分别为 MT 爬坡约束的下限、上限^[9]。

1.2 可再生能源特性模型

风机(wind turbine, WT)的数学模型为

$$P_{WT}(t) = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (4)$$

式中: $P_{WT}(t)$ 为风机在第 t 时段的输出功率; ρ 为空气密度; S 为 WT 扫过的区域; V 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为 WT 性能系数; λ 为 WT 叶尖转速比; β 为俯仰角。

光伏(photovoltaic, PV)发电的输出功率 $P_{PV}(t)$ 为

$$P_{PV}(t) = [1 + K_t(T_c - T_{sc})] \frac{G_0}{G_{sc}} P_{sc} \quad (5)$$

式中: K_t 为 PV 组件中的功率温度系数; T_c 为 PV 组件实际工作情况下的温度; T_{sc} 为标准环境下 PV 机组板面的温度; G_0 为实际光照强度; G_{sc} 为标准环境光照强度; P_{sc} 为标准环境下的 PV 发电最大输出功率。

作为间歇性可再生能源发电单元,风力发电机和光伏阵列在任意运行时段 t 的实际输出功率 $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 均需满足不等式约束,即不得超过其预测最大出力上限。

$$\begin{cases} P_{WT}(t) \leq P_{WT}^{\max}(t) \\ P_{PV}(t) \leq P_{PV}^{\max}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{WT}^{\max}(t)$ 、 $P_{PV}^{\max}(t)$ 分别为 WT、PV 在 t 时段的最大出力预测值。

1.3 储能装置特性模型

通常储能装置(energy storage system, ESS)的容量大小由其电荷状态来体现,且其电量与时间有关。电池充放电功率为

$$\begin{cases} C_0^t = C_0^{t-1} + P_B^t \Delta t \eta_c \\ C_0^t = C_0^{t-1} + P_F^t \Delta t \eta_f \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_0^t 为储能装置 t 时段的电量; C_0^{t-1} 为储能装置 $t-1$ 时段的电量; P_B^t 、 P_F^t 分别为充电、放电的功率变化量; η_c 、 η_f 分别为充电、放电的效率。

ESS 输出功率必须在最大、最小功率限制的范围内变动。

$$P_{ESS,i,t,\min} \leq P_{ESS,i,t} \leq P_{ESS,i,t,\max} \quad (8)$$

式中: $P_{ESS,i,t,\max}$ 、 $P_{ESS,i,t,\min}$ 分别为 t 时段节点 i 的储能设备允许出力的上、下限。

1.4 电动汽车充电站模型

EV 起始充电时间遵循正态分布, 具体的概率密度函数为

$$f_s(s) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(s - u_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & (u_s - 12) < s \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(s + 24 - u_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & 0 < s \leq (u_s - 12) \end{cases} \quad (9)$$

式中: s 为起始充电时间; u_s 为起始充电时间的数学期望, 且 $u_s = 17.6$; σ_s 为起始充电时间的标准差, 且 $\sigma_s = 3.4$ 。

日行驶里程的随机特性可通过以下概率密度函数进行数学描述。

$$f_D = \frac{1}{x\sigma_D \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] \quad (10)$$

式中: x 为日行驶里程; μ_D 为行驶里程的数学期望, 且 $\mu_D = 3.2$; σ_D 为行驶里程的方差, 且 $\sigma_D = 0.8$ 。

EV 充电时长的概率分布函数可推导为

$$f_{T_c} = \frac{1}{1.61 \times 0.15} \int_2^3 \frac{1.61 \times 0.15}{x\sigma_D \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln x - \ln 1.61 - \ln 0.15 + \ln \rho - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] d\rho, x > 0 \quad (11)$$

EV 充电站 t 时段的充电功率 $P_{EV,t}$ 的计算公式为

$$\begin{cases} P_{EV,t} = \sum_{k=1}^{N_{SC,t}} \frac{P_{SC,k,t}}{\eta_{SC}} \\ P_{SC,k,t} = P_{SCN} \omega_{SC,k,t} \\ 0 \leq N_{SC,t} \leq N_{SC,\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{SC,k,t}$ 为 t 时段第 k 个慢充用户的充电功率; η_{SC} 为 EV 充电站内慢充机的充电效率, 本文取 95%; P_{SCN} 为慢充机的额定功率; $\omega_{SC,k,t}$ 为 0-1 状态变量, 表示 t 时段第 k 个慢充用户的充电情况, 若正在充电则取值为 1, 否则为 0; $N_{SC,t}$ 为 EV 充电站在时刻 t 正在为慢充用户提供充电服务的数量; $N_{SC,\max}$ 为 EV 充电站允许连接的慢充用户的最大数量。

2 配电网优化调度模型

本文利用交直流混合配电网 WT、PV 和 EV 充电站等灵活性资源的调节能力, 构建了交直流混合配电网优化调度模型, 并采用优化算法进行求解。该模型的控制变量主要包含交直流混合配电网中 MT、WT、PV 以及 ESS。所提方法在实现电网峰谷差有效调节的同时, 能够降低系统运行成本; 此外, 交直流混合配电网优化调度模型的求解算法具有良好的求解性能。

2.1 目标函数

交直流混合配电网优化调度模型以配电网日总运行成本最小为目标函数, 即

$$\min C = C_{\text{oper}} \quad (13)$$

式中: C_{oper} 为交直流混合配电网日运行总成本。

配电网的日总运行成本 C_{oper} 主要由 4 部分构成: 配电网与上级主网之间的基本负荷购电成本 C_{pur} 、微型燃气轮机的日常运行费用 C_{MT} 、储能系统的日调度成本 C_{ESS} 、系统运行过程中产生的日损耗成本 C_{loss} 。

$$C_{\text{oper}} = C_{\text{pur}} + C_{\text{MT}} + C_{\text{ESS}} + C_{\text{loss}} \quad (14)$$

1) 配电网与上级主网的基本负荷日购电成本

$$C_{\text{pur}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{pur}}(t) P_{\text{pur}}^{\text{load}}(t) \Delta T \quad (15)$$

式中: $c_{\text{pur}}(t)$ 为 t 时段电价; $P_{\text{pur}}^{\text{load}}(t)$ 为配电网 t 时段的基本负荷需求。

2) 微型燃气轮机日运行成本

$$C_{\text{MT}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [a P_{\text{MT},i}^2(t) + b P_{\text{MT},i}(t) + c] \quad (16)$$

式中: $P_{\text{MT},i}(t)$ 为 t 时段节点 i 的 MT 机组实际出力; a 、 b 、 c 均为 MT 的运行成本系数; T 为总时段数; N 为微型燃气轮机数。

3) ESS 日调度成本

$$C_{\text{ESS}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{ESS}} (P_{\text{ESS}}(t) \Delta T)^2 \quad (17)$$

式中: c_{ESS} 为 ESS 调度成本系数; $P_{\text{ESS}}(t)$ 为 t 时刻储能功率; ΔT 为每个调度时段的时长。

4) 配电网日网损成本

$$C_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T c_{\text{pur}}(t) \cdot R_{mn} \left(\frac{P_{mn}^2(t) + Q_{mn}^2(t)}{V_m^2(t)} \right), \quad (18)$$

$$\forall m, n \in \Omega_{\text{net}}$$

式中: $P_{mn}(t)$ 、 $Q_{mn}(t)$ 分别为 t 时段支路有功、无功潮流; R_{mn} 为支路 $m-n$ 的电阻; Ω_{net} 为配电网节点集合;

$V_m^2(t)$ 为 t 时刻节点 m 的电压。

2.2 约束条件

本文所构建的交直流配电网优化调度模型,其约束条件主要涵盖3个方面:交流与直流系统的潮流平衡约束、电压源换流器(voltage source converter, VSC)的运行约束和配电网安全稳定约束。

2.2.1 交流配电网支路潮流约束

根据交流配电网 dist-flow 方法构建的支路潮流模型为

$$\begin{cases} \sum_{v \in \gamma(n)} P_{nv}(t) = P_{mn}(t) - R_{mn} |I_{mn}(t)|^2 - P_n(t) \\ \sum_{v \in \delta(n)} Q_{nv}(t) = Q_{mn}(t) - X_{mn} |I_{mn}(t)|^2 - Q_n(t) \\ P_n(t) = P_{\text{load}}^n(t) + P_{\text{EV}}^n(t) - P_{\text{DG}}^n(t) \\ Q_n(t) = Q_{\text{load}}^n(t) - Q_{\text{DG}}^n(t) \\ |V_n(t)|^2 = |V_m(t)|^2 - 2(P_{mn}(t)R_{mn} + Q_{mn}(t)X_{mn}) + \\ (R_{mn}^2 + X_{mn}^2) |I_{mn}(t)|^2 \\ |I_{mn}(t)|^2 = (P_{mn}^2(t) + Q_{mn}^2(t)) / |V_m(t)|^2 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{nv}(t)$ 为 t 时刻节点 n 与相邻节点之间的有功功率; $Q_{nv}(t)$ 为 t 时刻节点 n 与相邻节点之间的无功功率; $P_n(t)$ 为节点 n 的有功功率; $Q_n(t)$ 为节点 n 的无功功率; $I_{mn}(t)$ 为 t 时段支路 $m-n$ 的电流; X_{mn} 为支路电抗; $\gamma(n)$ 为在交流配电网中,将 n 节点作为始端的支路末端节点集合; $\delta(n)$ 为以节点 n 为末端的支路始端节点集合; $P_{\text{load}}^n(t)$ 、 $P_{\text{EV}}^n(t)$ 、 $P_{\text{DG}}^n(t)$ 分别为节点 n 在 t 时段的有功负荷、EV 充电站有功需求、可再生能源的有功出力; $Q_{\text{load}}^n(t)$ 、 $Q_{\text{DG}}^n(t)$ 分别为节点 n 在 t 时段的无功负荷、可再生能源的无功出力; $P_n(t)$ 为 t 时段节点 n 处的有功功率; $Q_n(t)$ 为 t 时段节点 n 处的无功功率; $V_n(t)$ 为 t 时段节点 n 处的电压幅值; X_{mn} 为支路 mn 的电抗。

2.2.2 直流配电网支路潮流约束

采用直流配电网 dist-flow 方法所构建的支路潮流模型为

$$\begin{cases} \sum_{v \in \kappa(n)} P_{\text{DC},nv}(t) = P_{\text{DC},mn}(t) - \\ R_{\text{DC},mn} |I_{mn}(t)|^2 - P_{\text{DC},n}(t) \\ P_{\text{DC},n}(t) = P_{\text{load}}^{\text{DC},n}(t) + P_{\text{EV}}^{\text{DC},n}(t) - P_{\text{DG}}^{\text{DC},n}(t) \\ |V_{\text{DC},n}(t)|^2 = |V_{\text{DC},m}(t)|^2 - 2P_{\text{DC},mn}(t)R_{\text{DC},mn} + \\ R_{\text{DC},mn}^2 |I_{\text{DC},mn}(t)|^2 \\ |I_{\text{DC},mn}(t)|^2 = P_{\text{DC},mn}^2(t) / |V_{\text{DC},m}(t)|^2 \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\kappa(n)$ 为在直流配电网中,将 n 节点作为始端的支路末端节点集合; $P_{\text{DC},mn}(t)$ 为直流支路 $m-n$ 在 t 时段的有功功率; $R_{\text{DC},mn}$ 为直流支路 $m-n$ 的电阻;

$P_{\text{load}}^{\text{DC},n}(t)$ 为 t 时段直流节点 n 负荷的有功需求; $P_{\text{EV}}^{\text{DC},n}(t)$ 、 $P_{\text{DG}}^{\text{DC},n}(t)$ 分别为直流节点 n 在 t 时段 EV 充电站和可再生能源的有功需求及出力; $P_{\text{DC},n}(t)$ 为 t 时段节点 n 流出的有功功率; $V_{\text{DC},m}(t)$ 为 t 时段直流节点 n 的电压幅值; $I_{\text{DC},mn}(t)$ 为 t 时段直流支路 $m-n$ 的电流幅值。

2.2.3 电压源换流站运行约束

VSC 换流站的结构见图 2,其内部损耗可通过等效阻抗 Z_{VSC} 进行建模与表征,从而反映其在实际运行过程中的能量损耗特性。

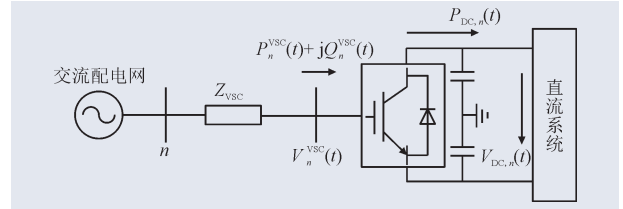


图2 VSC换流站等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of a VSC converter station

图2中,VSC换流站的输入有功功率 $P_n^{\text{VSC}}(t)$ 与直流输出有功功率 $P_{\text{DC},n}(t)$ 相等,即

$$P_n^{\text{VSC}}(t) = P_{\text{DC},n}(t) \quad (21)$$

另外,VSC正常运行还需要满足如下条件。

$$V_n^{\text{VSC}}(t) = \frac{\sqrt{3}}{3} \mu M_n(t) V_{\text{DC},n}(t) \quad (22)$$

式中: $V_n^{\text{VSC}}(t)$ 、 $V_{\text{DC},n}(t)$ 分别为 t 时段节点 n 在 VSC 换流站输入的基准相电压和输出的直流电压幅值; μ 为直流电压利用度,本文考虑采用正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM), μ 取 0.866; $M_n(t)$ 为 VSC 调制度,在 0~1 之间取值。

2.2.4 配电网安全运行约束

$$\begin{cases} -P_{\text{pur}}^{\text{max}} \leq P_{\text{pur}}(t) - P_{\text{pur}}(t-1) \leq P_{\text{pur}}^{\text{max}} \\ V_i^{\text{min}} \leq V_i(t) \leq V_i^{\text{max}} \\ -Q_{n,\text{max}}^{\text{VSC}} \leq Q_n^{\text{VSC}}(t) \leq Q_{n,\text{max}}^{\text{VSC}} \\ P_{mn}^2(t) + Q_{mn}^2(t) \leq \bar{S}_{mn}^2 \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\bar{S}_{mn}^2$ 为支路 $m-n$ 视在功率限值; $P_{\text{pur}}^{\text{max}}$ 为交互功率限值; V_i^{max} 、 V_i^{min} 分别为节点电压上、下限; $S_{n,\text{max}}^{\text{VSC}}(t)$ 为 VSC 允许通过的最大载流量; $Q_{n,\text{max}}^{\text{VSC}}$ 为 VSC 无功功率调节上限。

3 模型求解

3.1 天牛须算法原理

天牛须算法是一种利用天牛搜索食物模式形

成的算法。该算法通过气味浓度决定行动的方向:若较强的气味从左边而来,则天牛向左移动;若较强的气味从右边而来,则天牛向右移动。由于天牛拥有比自身更长的触角,大大提升了搜索范围,故天牛须算法具有个体数量少、计算时间快的优势。

天牛须算法随机搜索方向后,天牛左右两须之间的距离 b 为

$$b = \frac{r_{ng}(k,1)}{\|r_{ng}(k,1)\|} \quad (24)$$

式中: k 为总的空间维度数; $r_{ng}(k,1)$ 为随机函数。

在空间中随机搜索,实现对天牛接受气味浓度的模拟,即

$$\begin{cases} x_r = x' + d'b \\ x_l = x' - d'b \end{cases} \quad (25)$$

式中: x_r, x_l 分别为天牛须左侧、右侧的搜索位置; x' 为 t 时刻的天牛位置; d' 为左须天牛至右须天牛之间的长度。天牛须的长度一般较大,以防止算法陷入局部最优,而随着搜索步长的增加, d' 随之变小。

天牛闻到的气味与搜索行为之间的关系为

$$x' = x^{t-1} + \delta' b S_{ign}[f(x_r) - f(x_l)] \quad (26)$$

式中: x^{t-1} 为 $t-1$ 时刻的天牛位置; δ' 为 t 时刻天牛的搜索步长; $f(x_l), f(x_r)$ 分别为天牛触角左侧、右侧气味浓度适应度; $S_{ign}(\cdot)$ 为符号函数。

d, δ 的参数更新公式分别为

$$\begin{cases} d' = 0.95d^{t-1} + 0.01 \\ \delta' = 0.95\delta^{t-1} \end{cases} \quad (27)$$

3.2 混沌搜索

混沌是一种非线性自然现象,具有随机性、遍历性、敏感性等特征。其中,遍历性是混沌算法的基本特性,对优化的变量映射至混沌空间形成混沌序列以实现遍历搜索的目的,再往变量取值空间进行优化,可防止算法出现局部最优的问题。混沌序列具有初始值敏感低、全局搜索能力强以及寻优效率高的优势,生成其的数学表达式为

$$X_{k+1} = \begin{cases} \frac{X_k}{z} & 0 < X_k \leq z \\ \frac{1-X_k}{1-z} & z < X_k \leq 1 \end{cases} \quad (28)$$

式中: z 为混沌系数,取值为 0.5; X_k 为第 k 维的混沌序列值。

3.3 模拟退火寻优

由于天牛须算法在处理高维度模型时会变慢,

其精度和全局搜索能力也会降低,本文引入模拟退火算法^[10]改进天牛须算法,在提升算法的准确性后,将其应用于交直流混合配电网优化运行模型中。

模拟退火算法是指,在火源里找出能量最低值作为目标函数最优值,引入随机因素以提升获得较差解的概率,进而提升算法远离局部最优的可能性。求得较差解的概率 p 的计算公式为

$$p = \begin{cases} 1 & f(x') < f(x^{t-1}) \\ \exp\left[-\frac{f(x') - f(x^{t-1})}{T}\right] & f(x') \geq f(x^{t-1}) \end{cases} \quad (29)$$

式中: $f(x')$ 为 t 时刻天牛触角气味浓度; T 为模拟退火温度,该值随着迭代次数的增加而降低。由式(29)可知,随着迭代次数的增加,获得较差解的可能性降低。

3.4 求解过程

本文采用混沌模拟退火天牛须搜索算法(chaos simulated annealing beetle antennae search, CSABAS)^[11-12]对所提模型进行求解,具体过程见图 3。

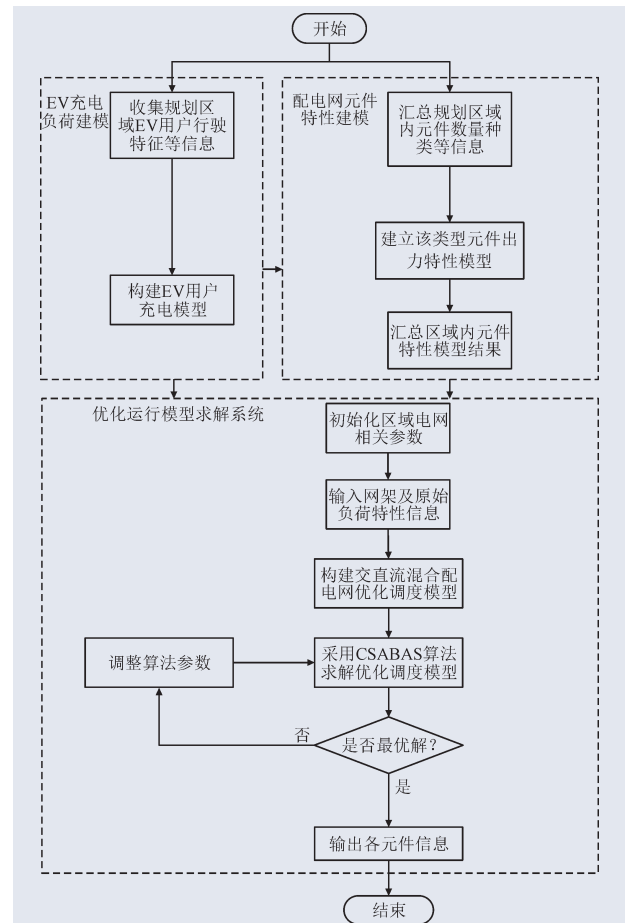


图3 CSABAS算法求解流程

Fig.3 CSA-BAS algorithm solving process

第一阶段:结合规划地区 EV 慢充用户的行驶行为特性,建立 EV 充电负荷需求模型。

第二阶段:针对规划区域内交直流混合配电网的各类型元件分别构建数学模型,主要对其出力特性等特征进行定量分析,为下一阶段做好准备。

第三阶段:在计及 MT、RES、ESS 和 EV 充电站等元件接入的交直流混合配电网中,以日总运行成本最小为目标,构建优化运行模型。

第四阶段:采用 CSABAS 算法对本文提出的优化运行模型进行求解。

4 算例分析

4.1 参数设置

本文采用改进的 IEEE 33 节点系统(见图 4),并结合某区域 EV 实际运营状况进行算例分析。储能装置的容量为 $3 \text{ MW}\cdot\text{h}$,其荷电状态(state of charge, SOC)初始值取 0.6。4 个 VSC 的参数相同,单个容量为 2 MVA , $Z_{\text{VSC}}=0.5+\text{j}1.5 \Omega$ 。地区 EV 慢充用户共有 500 辆电动私家车,均采用交流慢充电桩,额定充电功率为 7 kW 。MT 的装机容量为 250 kW ,ESS 的额定参数为 $200 \text{ kW}/800 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

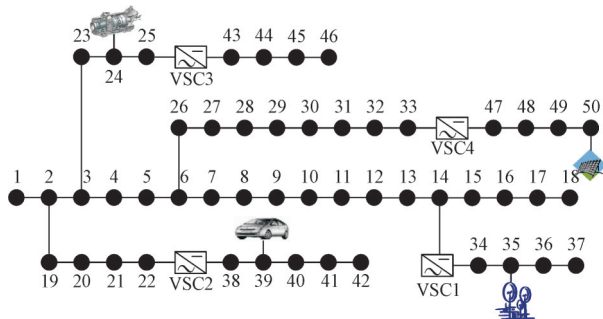


图4 改进的IEEE 33节点系统
Fig.4 Modified IEEE 33-bus system

4.2 结果分析

将优化算法个体分别设置为 MT、WT、PV、ESS 的出力,以交直流混合配电网优化调度模型的日总运行成本为适应度函数,并满足交直流配电网支路潮流约束、换流站和配电网安全约束条件,对模型进行求解;得到最优的 MT、WT、PV、ESS 出力,不断提高迭代次数,记录最佳出力适应度函数误差稳定时的迭代次数和求解时间,实现交直流配电网资源的灵活调节^[13-15]。

求解本文提出的优化调度模型,得到的日综合

成本对比结果见表 1。

表 1 日总综合成本结果
Table 1 Daily total comprehensive cost result

成本类型	成本/元
总成本	87 879
基本负荷日购电成本	65 908
MT 日运行成本	4 853
ESS 日调度成本	799
日网损成本	11 414
日碳排放成本	4 904

由表 1 可知,本文所构建的优化调度模型在降低交直流混合配电网的系统总运行成本与日网损成本方面均表现突出。该优势主要归因于风电、光伏及电动汽车充电站等分布式资源的高效接入与协调优化调度,不仅保障了系统的运行经济性,还显著减少了能量在传输过程中的损耗,进一步凸显了直流配电架构在适应分布式电源与电动汽车充电设施方面的运行优势与经济潜力。同时,从系统成本结构的分析来看,基本负荷日购电成本与碳排放成本在日综合运行成本中仍占据较大比重,这主要由于当前可再生能源在系统中的渗透率较低,其出力尚不足以全面替代配电网与主网之间的功率交换。配电网中各元件的出力分布结果见图 5、图 6。

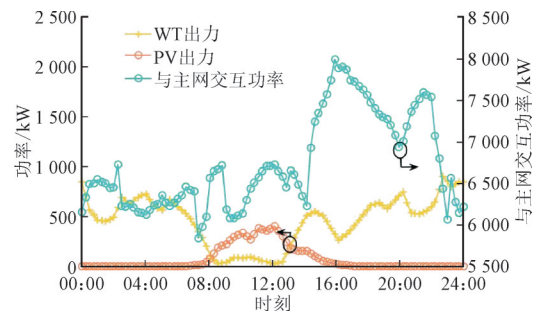


图5 风机与光伏元件优化出力结果
Fig.5 Output optimization results of WT and PV elements

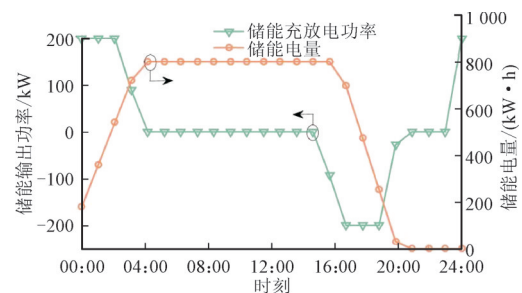


图6 储能单元优化出力结果
Fig.6 Output optimization results of ESS

由图 5 可知,当 WT 出力较低时,系统所需电量

主要由光伏承担;而当 PV 出力较小时,风电功率会增大,风光出力的有效互补有助于减少主网功率波动,以维持电力系统的平衡、可靠。由图 6 可知,储能单元能够根据优化调度需求进行灵活充放电,以满足电力系统对电能的需求,确保系统的稳定运行。

为了验证本文所提模型的优化效果,将优化前后不同时刻的配电系统整体运行成本进行对比,结果见图 7。由图 7 可知,经过本文方法优化后,配电系统成本降低将近一半,验证了所提方法的经济性。此外,尽管分布式电源(distributed generation, DG)在系统总出力中的占比相对较低,当前可再生能源在配电系统中的渗透程度仍有限;但随着技术进步及政策支持, DG 出力在未来具有较大的提升潜力,可增强系统的清洁性、灵活性。因为分时电价较高,通过增加储能装置的容量,可进一步削减系统运行成本。

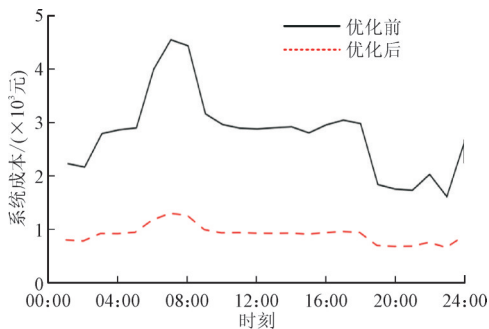


图7 优化前后配电系统成本对比

Fig.7 Cost comparison of the power distribution system before and after optimization

支路有功潮流的变化见图 8。由图 8 可知,支路 34-35 与支路 47-50 在多数时段出现反向有功潮流现象,且其发生时间与图 5 中可再生能源出力曲线的高峰时段基本一致。由此表明,在高可再生能源出力条件下,局部电源供大于需,导致潮流反向,进一步反映了分布式能源接入对系统潮流分布及功率流动方向的显著影响。

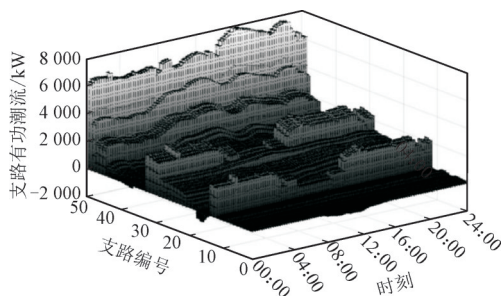


图8 支路有功潮流

Fig.8 Branch active power flow

各 VSC 出力的对比结果见图 9。由图 9 可知, VSC1、VSC3 和 VSC4 出力均在 280~300 kvar 之间。由此表明,在交直流混合配电网中, VSC 设备可作为重要的无功电源,充分发挥其无功功率调节能力,不仅能够提升系统的电压支撑水平,还能增强整体运行的稳定性与调控的灵活性。

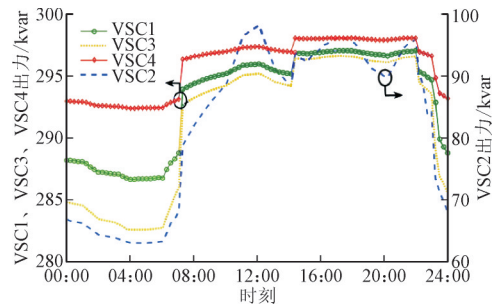


图9 VSC出力对比

Fig.9 VSC output comparison

为验证所提算法的训练效果,将本文提出的混沌模拟退火天牛须搜索算法与常规天牛须搜索算法、粒子群优化算法进行对比分析,相关结果见图 10、表 2。由图 10 可知,本文方法在迭代至第 279 次即实现收敛,且其对应的目标偏差值最低,表现出优越的收敛速度与精度;而常规天牛须搜索算法、粒子群优化算法分别在第 307 次、第 365 次才达到收敛,且偏差值相对较高,整体性能逊色。进一步,由表 2 可知,本文方法在计算时间上也具有明显优势,相较于常规天牛须搜索算法、粒子群优化算法,其求解时间分别减少了 64.2 s、114.67 s。因此,本文所提算法在求解交直流混合配电网优化调度模型中展现出更优的收敛效率与计算性能。

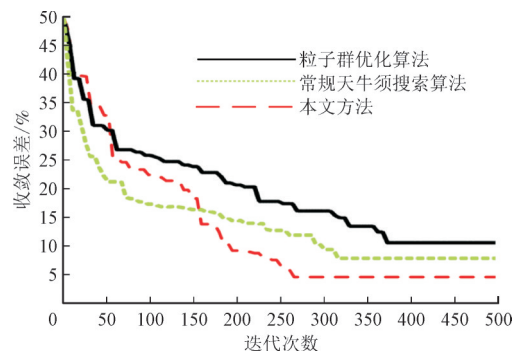


图10 不同方法误差值结果对比

Fig.10 Comparison of error values of different methods

在 20%~80% 范围内,分别设置不同的新能源渗透率水平,基于本文提出的优化运行模型,计算配电系统总运行成本,实验结果见表 3。

表2 不同方法模型求解效果对比
Table 2 Comparison of solution effects of different method models

模型求解方法	迭代次数	计算时间/s
粒子群优化算法	365	245.82
常规天牛须搜索算法	307	192.35
本文方法	279	131.15

表3 不同新能源渗透率下系统运行成本
Table 3 System operating costs under different penetration rates of new energy

新能源渗透率/%	配电网系统运行成本/元
20	58 232
30	69 467
40	87 250
50	102 839
60	126 892
70	149 548
80	168 792

由表3可知,随着新能源渗透率的不断提升,系统整体运行成本逐渐增大,这是由于新能源渗透率越高,系统需要的储能容量会有所提升,除此之外系统的网损也会略有增加。因此,本文所提模型能够很好地适应高渗透率新能源接入,对新型电力系统背景下的交直流混合配电网优化运行具有重大的指导作用。

5 结论

本文构建了一种综合考虑电动汽车充电站、储能装置、微型燃气轮机及可再生能源接入的交直流混合配电网优化调度模型,算例实验的结果如下。

1) 在WT、PV及EV充电站等灵活性资源的协同优化调度下,结合VSC设备所具备的灵活无功支撑能力,不仅有效削减了系统的峰谷负荷差,还显著降低了能量传输过程中的损耗;同时,配电系统整体运行成本的降幅约为50%,展现出较强的经济性与运行效率。

2) 所提方法在优化模型求解过程中表现出更优的收敛特性,且迭代次数较少、计算速度更快;与常规算法相比,本文方法计算时间分别减少了64.2 s、114.67 s,验证了该方法在求解交直流混合配电网优

化调度问题中具备更优的求解性能和工程应用价值。

参考文献

- [1] 马鑫,郭瑞鹏,王蕾,等.基于二阶锥规划的交直流主动配电网日前调度模型[J].电力系统自动化,2018,42(22):144-153.
MA Xin, GUO Ruipeng, WANG Lei, et al. Day-ahead scheduling model for AC/DC active distribution network based on second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 144-153.
- [2] 陈鹏浩,李慧璇,李猛,等.基于改进人工蜂群算法的直流配电网典型应用场景拓扑结构研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):57-65.
CHEN Penghao, LI Huixuan, LI Meng, et al. Research on the topological structure of typical application scenarios of a DC distribution network based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 57-65.
- [3] 张释中,裴玮,杨艳红,等.交直流混合配电网结构优选和设备容量优化[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2766-2777.
ZHANG Shizhong, PEI Wei, YANG Yanhong, et al. Optimization of AC/DC hybrid distribution network structure and equipment capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2766-2777.
- [4] HEUBERGER C F, DOWELL N M. Real-world challenges with a rapid transition to 100% renewable power systems[J]. Joule, 2018, 2(3): 367-370.
- [5] ZAKERI B, SYRI S, RINNE S. Higher renewable energy integration into the existing energy system of Finland-Is there any maximum limit? [J]. Energy, 2015, 92(3): 244-259.
- [6] FAULSTICH M, FOTH H, CALLIESS C, et al. Pathways towards a 100% renewable electricity system[R]. Berlin: German Advisory Council on the Environment, 2011.
- [7] BERTSCH J, GROWITSCH C, LORENCZIK S, et al. Flexibility in Europe's power sector: an additional requirement or an automatic complement? [J]. Energy Economics, 2016, 53: 118-131.

- [8] MILEVA A, JOHNSTON J, NELSON J H, et al. Power system balancing for deep decarbonization of the electricity sector[J]. *Applied Energy*, 2016, 162: 1001–1009.
- [9] 李嘉龙, 陈雨果, 刘思捷, 等. 考虑碳排放成本的电力市场均衡分析[J]. *电网技术*, 2016, 40(5): 1558–1563.
LI Jialong, CHEN Yuguo, LIU Sijie, et al. Electricity market equilibrium analysis considering carbon emission cost[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(5): 1558–1563.
- [10] 薛蒙蒙, 马永涛, 刘敬浩. 基于模拟退火粒子群算法的认知引擎研究[J]. *计算机工程与科学*, 2016, 38(8): 1640–1646.
XUE Mengmeng, MA Yongtao, LIU Jinghao. Cognitive engine research based on simulated annealing and particle swarm optimization algorithm[J]. *Computer Engineering & Science*, 2016, 38(8): 1640–1646.
- [11] 曹一家, 刘易珠, 阙凌燕, 等. 换电站与电网协调的多目标双层实时充放电调度方法[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(4): 38–42.
CAO Yijia, LIU Yizhu, QUE Lingyan, et al. Multi-objective bi-level real-time charging/discharging dispatch with coordination of BSS and grid[J]. *Electric Power Automation of Equipment*, 2015, 35(4): 38–42.
- [12] 廖列法, 杨红. 天牛须搜索算法研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(12): 54–64.
LIAO Liefu, YANG Hong. Review of beetle antennae search [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(12): 54–64.
- [13] 史昭娣, 朱宁, 李政, 等. 计及源-荷匹配的多区域多类型新能源系统优化规划方法[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(4): 67–76.
SHI Zhaodi, ZHU Ning, LI Zheng, et al. Optimization planning method of multi-region and multi-type renewable energy generation considering source-load matching[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(4): 67–76.
- [14] 周海峰, 徐伟, 沙立成, 等. 考虑新能源不确定性的调度计划安全稳定校核方法[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(3): 63–70.
ZHOU Haifeng, XU Wei, SHA Licheng, et al. Security and stability checking method of dispatching plan considering uncertainty of new energy[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(3): 63–70.
- [15] 马会萌, 李相俊, 吴荣宇, 等. 兼顾新能源消纳和主动支撑电网能力提升的多类型储能容量优化配置[J]. *电力建设*, 2024, 45(6): 111–119.
MA Huimeng, LI Xiangjun, WU Rongyu, et al. Optimal capacity configuration method for multi-type energy storage systems enhancing new energy consumption and actively supporting the grid[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(6): 111–119.

收稿日期: 2023-09-15。 修回日期: 2025-05-21。

作者简介:

汤小可(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为增量配电网政策研究、规划建设和运营管理;

嵇岩(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为增量配电网运维和调度管理;

孙中旺(1994—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为增量配电网变电、调度管理;

杨丹丹(1995—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为增量配电网运维及调度自动化管理;

靖知川(2002—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力市场报价策略、电力市场。

(编辑 卢秀)