

含电动汽车的风光柴储独立型微电网容量优化配置

郑 建¹, 赖欢欢¹, 郑 伟², 奚洪磊¹, 周震宇¹, 戚 峰¹, 俞 凯¹, 杨剑友¹

(1. 国网温州供电公司 电力调度控制中心,浙江 温州 325000;2. 国网温州供电公司 变电检修中心,浙江 温州 325000)

摘要:考虑电动汽车负荷的影响,提出了一种计及电动汽车的含风光柴储微电网容量优化配置方法。给出了微电网中负荷、风电、光伏系统、电池储能和柴油发电的建模方法,在考虑测试系统动态的情况下,以微电网系统总成本最小化为目标,采用灰狼算法对风机、光伏系统、电池储能和柴油发电机进行容量优化。以某实际17节点微电网为例进行仿真,仿真结果表明,微电网系统中的负荷尽可能通过分布式新能源来提供,有效减少了温室气体的排放,同时使微电网系统的总成本达到最小,系统按照所提方法优化设计,能够经济可靠地供应负荷。

关键词:电动汽车;风光柴储;微电网;容量优化;灰狼算法

Capacity optimization configuration of WT-PV-DE-BES independent microgrid with electric vehicles

ZHENG Jian¹, LAI Huanhuan¹, ZHENG Wei², XI Honglei¹, ZHOU Zhenyu¹, QI Feng¹, YU Kai¹, YANG Jianyou¹

(1. Electric Power Dispatching Control Center of Wenzhou Power Supply Company, Wenzhou 325000, China;
2. Substation Maintenance Center of State Grid Wenzhou Power Supply Company, Wenzhou 325000, China)

Abstract: Considering the influence of electric vehicle load, a capacity optimization configuration method of micro-grid with WT-PV-DE-BES considering electric vehicles is proposed. The modeling methods of load, wind power, photovoltaic system, battery energy storage and diesel power generation in the microgrid are presented. Considering the dynamic characteristics of the test system, the Grey Wolf Optimizer is used to optimize the capacity of wind turbine, photovoltaic system, battery energy storage and diesel generator with the goal of minimizing the total cost of the micro grid system. Taking an actual 17 nodes microgrid as an example, the simulation results show that the load in the microgrid system is provided by distributed new energy as far as possible, which effectively reduces greenhouse gas emissions, while minimizing the total cost of the microgrid system. The system can supply load economically and reliably according to the proposed method.

Key words: electric vehicle; WT-PV-DE-BES; microgrid; capacity optimization; Grey Wolf optimizer

0 引言

近期全球性的能源供应问题,进一步凸显了加快能源转型升级的必要性和紧迫性^[1]。加速构建以新能源为主体的新型电力系统,是重塑能源体系的根本路径。然而新能源具有随机性和波动性,随着新能源接入规模的增加,将使电网的网损增大、电能质量下降^[2],影响电网的安全稳定运行。在此背景下,微电网相关技术逐渐兴起,通过微电网技术促使新能源友好接入电网成为当下的研究热点。新能源配套储能装置可以改善发电输出特性,解决新能源发电与负荷需求匹配程度低的问题^[3]。储能

技术可以分为多种不同类型,其中最常用的是电池储能(battery energy storage, BES)系统^[4]。电池储能的成本与其容量密切相关,并且其寿命周期有限^[5],因此仅使用分布式新能源和电池储能以100%的可靠性满足负荷需求将产生极高的成本。通过分布式新能源、储能和可调度备用电源(如柴油发电机)共同部署,可以有效且经济地供应负荷^[6]。

传统汽车使用化石燃料并排放温室气体,包括二氧化碳和氮氧化物等^[7]。近年来,电动汽车由于其生态友好性,已获得了学术界和工业界的广泛关注。随着电动汽车的不断改进,其在电力系统中的渗透率将逐步增加,未来电网的电力负荷将明显不同于目前没有电动汽车的电网^[8]。因此,在微电网规划和设计阶段应充分考虑电动汽车的负荷特性。

目前,针对含分布式新能源和储能的微电网的

收稿日期:2024-04-15;修回日期:2024-05-21
基金项目:国网浙江省电力有限公司科技项目(5211WZ23000A)

规划设计，国内外学者已经进行了一定的研究。文献[9]基于成本最小化、可靠性最大化和温室气体排放最小化的目标，提出了光伏、风机、电池储能及超级电容器的容量优化方法。文献[10]以成本最小化和客户满意度最大化为成本函数，并使用混合整数线性规划来求解优化问题。文献[11]综合采用功率型储能和能量型储能，提出一种面向微网群的混合储能容量优化配置方法。文献[12]以用能成本最低为目标，综合考虑光伏出力、负荷需求和分时电价，建立了光储系统联合容量配置模型。然而，这些研究没有考虑到电动汽车充放电对微电网的影响。

本文考虑电动汽车负荷对微电网的影响，提出了一种计及电动汽车的含风光柴储微电网容量优化配置方法。所提的优化方法，在考虑测试系统动态的情况下，将风机、光伏、电池储能和柴油发电机(diesel generator, DE)视为综合电源，在接入位置确定的情况下，以微电网系统总成本最小化为目标，对各电源进行容量优化。以某实际17节点微电网为例进行仿真。

1 系统状态建模

令 $C^t = (P_L^t, P_N^t, P_B^t, S_B^t, P_D^t)$ 表示系统在 t 时的状态。其中， P_L^t 为 t 时的总有功负荷，MW； P_N^t 为 t 时风机和光伏的总出力，MW； P_B^t 为 t 时电池储能的充放电功率，MW； S_B^t 为 t 时电池储能的荷电状态； P_D^t 为 t 时DE的有功出力，MW。

1.1 负荷模型

微电网 t 时的总负荷 P_L^t 可以表示为

$$P_L^t = P_{EV}^t + P_i^t \quad (1)$$

式中： P_{EV}^t 为电动汽车负荷； P_i^t 为非电动汽车负荷。

电动汽车的总数 N_{EV} 可以按下式计算

$$N_{EV} = \sum_a^{a^{\text{th}}} \rho \zeta_a n_H \quad (2)$$

式中： a^{th} 为电动汽车的类型总数； ρ 为渗透水平； ζ_a 为 a 类型电动汽车的百分比； n_H 为微电网中的住宅总数。

电动汽车充电负荷取决于出发和到达时间、每日行驶里程、电动汽车充电器额定功率和电池组容量。假设电动汽车以额定充电功率并保持恒定速率充电。电动汽车出发和到达时间、每日行驶里程和充电时间取决于用户行为^[13]，可以采用对数正态分布进行近似，分别表示如下

$$K^{e,a,d} = \log \text{normal}\left(\frac{27}{8}, \frac{1}{2}\right) \quad (3)$$

$$t_1^{e,a,d} = \log \text{normal}\left(\beta_{d,b}, \sqrt{3}\right) \quad (4)$$

$$t_2^{e,a,d} = \log \text{normal}\left(\beta_{a,r}, \sqrt{3}\right) \quad (5)$$

式中： $K^{e,a,d}$ 为 a 类型的第 e 辆电动汽车在第 d 天的行驶里程； $t_1^{e,a,d}$ 和 $t_2^{e,a,d}$ 分别为 a 类型的第 e 辆电动汽车在第 d 天行驶过程的出发和到达时间； $\beta_{d,b}$ 和 $\beta_{a,r}$ 分别为 a 类型的第 e 辆电动汽车在第 d 天行驶过程的平均出发和到达时间。

根据电动汽车每天行驶的距离，充电所需的能量可按下式计算

$$E^{e,a,d} = E_{EV}^a \mathbf{1}_{(K^{e,a,d} > \delta^a)} + \frac{E_{EV}^a}{\delta^a} K^{e,a,d} \mathbf{1}_{(K^{e,a,d} < \delta^a)} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{1}_{(\cdot)}$ 为指示函数； $E^{e,a,d}$ 为电动汽车充电所需的能量； δ^a 为 a 类型电动汽车的电荷耗尽距离； E_{EV}^a 为 a 类型电动汽车电池组的容量。

电动汽车完全充电所需的时间为

$$t_{\text{ch}}^{e,a,d} = E^{e,a,d} / P_{EV}^a \quad (7)$$

式中： P_{EV}^a 为 a 类型电动汽车的额定充放电功率。

假设电动汽车车主在回家后开始为汽车充电，则电动汽车的充电负荷可以按下式计算

$$P_{\text{ch}}^{e,a,d} (t_{\text{ch}}^{e,a,d} + m) = P_{EV}^a \mathbf{1}_{(m \leq t_{\text{ch}}^{e,a,d})} + P_{EV}^a (t_{\text{ch}}^{e,a,d} - [t_{\text{ch}}^{e,a,d}]) \mathbf{1}_{(m > t_{\text{ch}}^{e,a,d})} \quad (8)$$

$$m = 1, 2, \dots, [t_{\text{ch}}^{e,a,d}] + 1 \quad (9)$$

$$t_{\text{ch}}^{e,a,d} + m \geq t_1^{e,a,d} \quad (10)$$

式中： $P_{\text{ch}}^{e,a,d}$ 为 a 类型第 e 辆电动汽车第 d 天的小时充电负荷； d 可以用小时 t 来转换替代。

t 时电动汽车的荷电状态按下式估计

$$S_{OC, EV}^{e,a,t+\Delta t} = S_{OC, EV}^{e,a,t} + \Delta t \frac{P_{\text{ch}}^{e,a,t}}{E_{EV}^a} \quad (11)$$

式中： $S_{OC, EV}^{e,a,t}$ 为电动汽车的荷电状态。

微电网 t 时的非电动汽车负荷取微电网中住宅的实际负荷数据，分辨率为 1 h。

1.2 分布式新能源模型

本系统中的分布式新能源包括风机和光伏。

风机和光伏的总出力可按下式计算

$$P_N^t = N_{WT} P_{WT}^t + N_{PV} P_{PV}^t \quad (12)$$

式中： N_{WT} 和 N_{PV} 分别为风机和光伏板的数量； P_{WT}^t 和 P_{PV}^t 分别为单个风机和光伏板在 t 时输出的有功功率。

单个风机的有功功率可按下式计算^[14]

$$P_{WT}^t = \mathbf{1}_{(v_{ci} < v_t < v_c)} \gamma(v_t) + \mathbf{1}_{(v_t < v_c < v_{co})} P_{WT}^r \quad (13)$$

式中： v_{ci} 、 v_{co} 、 v_t 分别为风机的切入、切出、额定风速； $\gamma(v_t)$ 为近似风力输出随风速变化的函数； P_{WT}^r 为风机的额定输出功率。

单个光伏板的有功功率可按下式计算^[15]

$$P_{\text{pv}}^t = \lambda_{\text{pv}} B_{\text{pv}} H^t (1 - 0.0005(T_{\circ}^t - 25)) \quad (14)$$

式中: λ_{pv} 为光伏板的效率; B_{pv} 为光伏板的面积; H^t 为 t 时的太阳辐射, MW/m²; T_{\circ}^t 为 t 时的大气温度, °C。

令 X^t 为 t 时新能源发电与负荷之差, 则

$$X^t = P_{\text{L}}^t - P_{\text{N}}^t \quad (15)$$

1.3 柴油发电机模型

为了提高系统可靠性和经济性, 系统中采用了 DE 作为备用电源, DE 仅当分布式新能源和电池储能的输出功率不足以满足负荷需求时才供电。DE 的输出功率可按下式计算^[16]

$$P_{\text{D}}^t = (P_{\text{B}}^t - X^t) \mathbb{1}_{(P_{\text{N}}^t - P_{\text{B}}^t < P_{\text{D}}^t)} \quad (16)$$

1.4 电池储能模型

电池储能的输出功率可按下式计算^[17]

$$P_{\text{B}}^t = \left[1_{(0 < X^t < P_{\text{B}}^{\max})} + 1_{(-P_{\text{B}}^{\max} < X^t < 0)} \right] X^t + \left[1_{(X^t > P_{\text{B}}^{\max})} - 1_{(X^t > -P_{\text{B}}^{\max})} \right] P_{\text{B}}^{\max} \quad (17)$$

式中: P_{B}^t 为正表示充电, 为负表示放电。

电池储能储存的能量变化可以按下式计算

$$S_{\text{B}}^{t+\Delta t} = S_{\text{B}}^t + P_{\text{B}}^t \left(1_{(X^t > 0)} \sigma^c + 1_{(X^t > 0)} \frac{1}{\sigma^d} \right) \Delta t \quad (18)$$

式中: σ^c 和 σ^d 分别为电池储能的充电效率和放电效率。

电池储能的生命周期有限, 假设在生命周期结束后, 需要更换电池储能。其年度循环次数的计算公式如下

$$B_{\text{e}} = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=0}^{23} \left[\frac{P_{\text{B}}^{\text{d},t}}{2S_{\text{B}}^{\max}} \right] \quad (19)$$

储能的按年计算寿命为

$$T_{\text{B}} = \left[\frac{T_{\text{c}}}{B_{\text{e}}} \right] \quad (20)$$

式中: T_{c} 为储能生命周期总循环次数。

2 容量优化模型

2.1 目标函数

微电网系统的总成本 C 可按下式计算

$$C = C_{\text{N}} + C_{\text{B}} + C_{\text{D}} - C_{\text{er}} \quad (21)$$

式中: C_{N} 、 C_{B} 、 C_{D} 分别为分布式新能源、电池储能和柴油发电机的成本; C_{er} 为减排效益成本。

分布式新能源的成本可以分为初始投资成本和运行维护成本, 计算公式如下

$$C_{\text{N}} = C_{\text{pv}}^c N_{\text{pv}} P_{\text{pv}}^r + C_{\text{wt}}^c N_{\text{wt}} P_{\text{wt}}^r + \sum_{l=1}^{n_l} \frac{C_{\text{pv}}^{\text{om}} N_{\text{pv}} P_{\text{pv}}^r + C_{\text{wt}}^{\text{om}} N_{\text{wt}} P_{\text{wt}}^r}{(1+\theta)^{l-1}} \quad (22)$$

式中: C_{pv}^c 和 C_{wt}^c 分别为光伏和风机单位功率的初始投资成本; $C_{\text{pv}}^{\text{om}}$ 和 $C_{\text{wt}}^{\text{om}}$ 分别为光伏和风机单位功率的

运营维护成本; l 为年; n_l 为运行总年数; θ 为折现率。

电池储能的成本取决于额定功率和额定容量, 可以分为初始投资成本、运行维护成本和更换成本, 计算公式如下

$$C_{\text{B}} = C_{\text{B}}^c S_{\text{B}}^r + C_{\text{B}}^p P_{\text{B}}^r + \sum_{l=1}^{n_l} \frac{C_{\text{B}}^{\text{am},c} S_{\text{B}}^r + C_{\text{B}}^{\text{am},p} P_{\text{B}}^r}{(1+\theta)^{l-1}} + \sum_{l_l}^{n_l-T_{\text{B}}} \frac{C_{\text{B}}^c S_{\text{B}}^r + C_{\text{B}}^p P_{\text{B}}^r}{(1+\theta)^{l_l}} \quad (23)$$

$$l_{\text{B}} = T_{\text{B}}, 2T_{\text{B}}, \dots, n_l - T_{\text{B}} \quad (24)$$

式中: C_{B}^c 和 C_{B}^p 分别为电池储能的单位容量和单位功率的初始投资成本; $C_{\text{B}}^{\text{am},c}$ 和 $C_{\text{B}}^{\text{am},p}$ 分别为电池储能的单位容量和单位功率的运营维护成本; 第 3 项为电池储能的更换成本。

柴油发电机的成本分为初始投资成本、更换成本和运行维护成本, 可按下式计算

$$C_{\text{D}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{D}}} C_{\text{D}}^{c,i} P_{\text{D}}^{r,i} + \sum_{i=1}^{n_{\text{D}}} \sum_{s=\psi_{\text{D}}^i}^{n_{\text{D}}-\psi_{\text{D}}^i} \frac{1}{(1+\theta)^s} C_{\text{D}}^{c,i} P_{\text{D}}^{r,i} + \sum_{i=1}^{n_{\text{D}}} \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^s \frac{N_{\text{run}}^i M_{\text{D}}^i}{(1+\theta)^{j-1}} (\alpha^i p_{\text{D}}^{i,t} + \varpi^i P_{\text{D}}^{r,i}) f_{\text{P}} \quad (25)$$

$$s = \psi_{\text{D}}^i, 2\psi_{\text{D}}^i, 3\psi_{\text{D}}^i, \dots, n_l - \psi_{\text{D}}^i \quad (26)$$

式中: $C_{\text{D}}^{c,i}$ 为第 i 台柴油发电机的单位功率成本; $P_{\text{D}}^{r,i}$ 为第 i 台柴油发电机的额定功率; n_{D} 为柴油发电机的台数; p_{D}^i 为第 i 台柴油发电机的输出功率; ψ_{D}^i 为第 i 台柴油发电机的生命周期; N_{run}^i 为第 i 台柴油发电机的总运行时间; M_{D}^i 为第 i 台柴油发电机单位运行时间的运营维护成本; f_{P} 为油价; α^i 为第 i 台柴油发电机的燃油曲线斜率系数; ϖ^i 为第 i 台柴油发电机的燃油曲线截距系数。

当使用化石燃料发电机发电时, 会产生温室气体, 减小温室气体产生损害的成本称为校正成本。本文参考文献[18]中给出的温室气体排放参数, 如表 1 所示。

表 1 温室气体排放参数

Table 1 Greenhouse gas emission parameters

温室气体	CO ₂	CO	SO ₂	NO _x
排放量/(kg·MWh ⁻¹)	1 000.7	1.55	9.993	6.46
校正成本/(元·kg ⁻¹)	0.025 8	1.116 5	6.768 8	9.001 7

如果使用新能源代替化石燃料发电机发电, 可以节约校正成本, 节约出的成本称为减排效益成本, 计算公式如下

$$C_{\text{er}} = \sum_{j=1}^{n_l} \sum_{r=1}^4 \sum_{t=1}^n \frac{[(P_{\text{N}}^t - P_{\text{B}}^t) \mathbb{1}_{(X^t < 0)} + P_{\text{N}}^t \mathbb{1}_{(X^t \geq 0)}] Z^r Z_{\text{C}}^r}{(1+\theta)^{t-1}} \quad (27)$$

式中: Z^r 为第 r 类温室气体的排放量; Z_{C}^r 为第 r 类温室气体的单位校正成本。

本文以微电网系统的总成本最小为目标, 目标

函数如下

$$\min J = \sqrt{(C_N + C_B + C_D - C_{er})^2} \quad (28)$$

2.2 约束条件

本文所提的计及电动汽车的风光柴储微电网优化优化模型需要满足以下约束条件。

(1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i - V_i \sum_{j=1}^{N_d} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i - V_i \sum_{j=1}^{N_d} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (29)$$

式中： P_i 和 Q_i 分别为第 i 个节点的有功功率和无功功率； V_i 和 V_j 分别为第 i 个节点和第 j 个节点的节点电压； B_{ij} 、 G_{ij} 和 δ_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的电导、电纳和电压相角。

(2) 分布式新能源系统约束

$$N_{PV}^{\min} \leq N_{PV} \leq N_{PV}^{\max} \quad (30)$$

$$N_{WT}^{\min} \leq N_{WT} \leq N_{WT}^{\max} \quad (31)$$

式中： N_{PV}^{\max} 和 N_{PV}^{\min} 分别为光伏板数量的上限和下限； N_{WT}^{\max} 和 N_{WT}^{\min} 分别为风机数量的上限和下限。

(3) 电池储能系统约束

$$P_B^{\min} \leq |P_B^t| \leq P_B^{\max} \quad (32)$$

$$S_B^{\min} \leq |S_B^t| \leq S_B^{\max} \quad (33)$$

式中： P_B^{\max} 和 P_B^{\min} 分别为电池储能输出功率的上限和下限； S_B^{\max} 和 S_B^{\min} 分别为电池储能储存能量的上限和下限。

(4) 柴油发电机约束

$$P_D^{\min} \leq P_D^t \leq P_D^{\max} \quad (34)$$

式中： P_D^{\max} 和 P_D^{\min} 分别为DE输出功率的上限和下限。

(5) 电动汽车负荷约束

$$S_{OC, EV}^{a, \min} \leq S_{OC, EV}^{e, a, t} \leq S_{OC, EV}^{a, \max} \quad (35)$$

$$0 \leq P_{ch}^{e, a, d} \leq P_{ch}^{a, \max} \quad (36)$$

式中： $S_{OC, EV}^{a, \min}$ 和 $S_{OC, EV}^{a, \max}$ 分别为电动汽车的荷电状态的上限和下限； $P_{ch}^{a, \max}$ 为 a 类型电动汽车的充电负荷上限。

(6) 节点电压偏差约束

$$\left| \frac{V_i - V_{iN}}{V_{iN}} \right| \leq R_i \quad (37)$$

式中： V_{iN} 为节点 i 的额定电压； R_i 为节点 i 可承受的最大电压偏差。

(7) 线路功率约束

$$P_l \leq P_{l\max} \quad (38)$$

式中： P_l 为线路 l 的有功功率； $P_{l\max}$ 为线路 l 允许的最大有功功率。

2.3 模型求解

本文拟采用灰狼算法 (grey wolf optimizer,

GWO) 对所提目标函数进行优化求解。

2.3.1 算法基本原理

灰狼种群内部分为 4 个等级，狼的等级从高到低分别为 α 、 β 、 δ 和 ω 。 ω 听从 α 、 β 和 δ 的指挥进行狩猎和捕食，捕食的过程分为 3 个步骤：包围、猎捕和攻击，最终捕捉到猎物， α 是种群的最优解。

2.3.2 优化求解流程

具体步骤如下：

(1) 初始化种群为 $X_i (i=1, 2, \dots, N)$ (N 为种群个体数)，其中 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i5})$ ($x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i5}$ 分别为风机的总容量、光伏系统的总容量、电池储能的额定功率和额定容量、柴油发电机的容量)；

(2) 初始化控制因子 \vec{a} 、收敛因子 \vec{A} 和摇摆因子 \vec{C} ，令迭代次数 $m=1$ ，计算种群中每只灰狼的适应度值，其中种群的最优解作为 α ，其位置为 \bar{X}_α ，种群的次优解作为 β ，其位置为 \bar{X}_β ，种群的第三优解作为 δ ，其位置为 \bar{X}_δ ；

(3) 更新灰狼种群的位置，更新 \vec{a} 、 \vec{A} 和 \vec{C} ，根据每只灰狼的新位置进行潮流计算，并判断是否满足约束，不满足约束的灰狼需要进行一定的惩罚，计算每只灰狼对应的微电网系统的总成本，并转换为适应度值，更新 α 、 β 、 δ 的位置， $m=m+1$ ；

(4) 判断 m 是否达到最大迭代次数，是则进入步骤(5)，否则返回步骤(3)；

(5) 输出 \bar{X}_α 。

3 算例分析

将本文所提的优化模型应用于某 17 节点实际微电网，微电网的拓扑如图 3 所示。图中交流电源为分布式新能源、电池储能和柴油发电机耦合形成的综合电源，综合电源接入位置为 1 号节点。

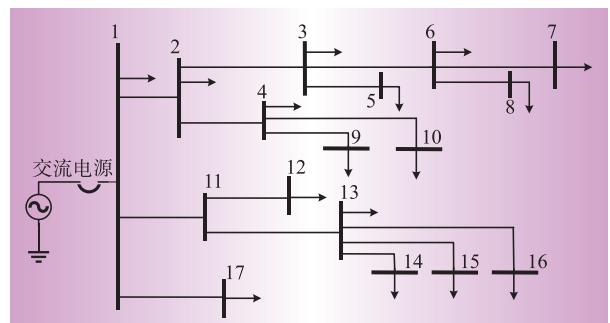


图 3 17 节点实际微电网拓扑

Fig. 3 Topology of an actual microgrid with 17 nodes

本文选取了 3 种电动汽车。3 种电动汽车的充电器额定功率和电池组容量如表 2 所示。

表2 电动汽车参数

Table 2 Electric vehicle parameters

电动汽车类型	电池组容量/kWh	充放电功率/kW	最大行驶里程/km
比亚迪汉EV	85.40	7.00	715
零跑C01	78.54	11.22	606
特斯拉S	100.00	10.00	652

采用1.1节的电动汽车负荷模型,模拟得到微电网系统全年的电动汽车负荷,并叠加微电网中住宅的实际非电动汽车负荷数据,得到微电网系统全年的总负荷。

为减小模型计算量,采用k-means聚类算法,输入微电网总负荷和节点1历史风速、辐照度数据,以一天为基本单元,聚类得到微电网总负荷和节点1风速、辐照度的4组典型场景,分别如图4—图6所示。

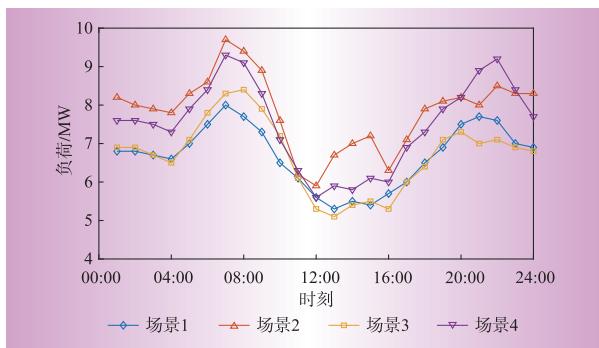


图4 微电网系统总负荷典型场景

Fig. 4 Typical scenarios of total load in microgrid systems

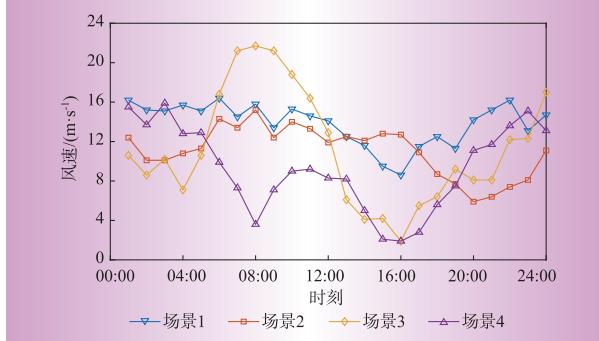


图5 节点1风速典型场景

Fig. 5 Typical scenarios of wind speed at node 1

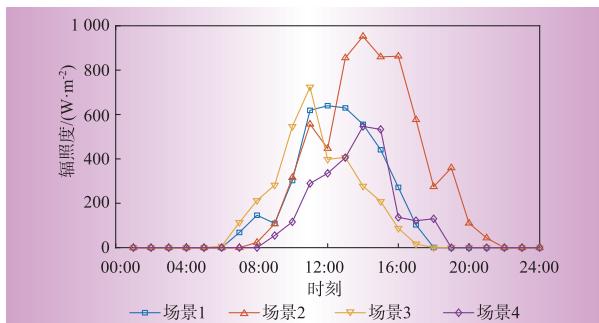


图6 节点1辐照度典型场景

Fig. 6 Typical scenarios of irradiance at node 1

每一组典型场景的概率如表3所示。

表3 各组典型场景的概率

Table 3 Probability of typical scenarios in each group

典型场景编号	概率
1	0.334 246 57
2	0.210 958 92
3	0.323 287 67
4	0.131 506 84

其他相关参数如表4所示。

表4 相关参数

Table 4 Related parameters

参数	数值
风机单位功率初始投资成本/(元·kW ⁻¹)	8 400
光伏单位功率初始投资成本/(元·kW ⁻¹)	4 200
电池储能单位功率初始投资成本/(元·kW ⁻¹)	2 500
电池储能单位容量初始投资成本/(元·kWh ⁻¹)	2 000
电池储能循环次数/次	6 000
柴油发电机单位功率初始投资成本/(元·kW ⁻¹)	800

以微电网系统的总成本最小为目标,在图7—图9给出的4组典型场景下,分别使用灰狼算法、粒子群算法和遗传算法求解所提的优化模型,3种算法求得的微电网系统的总成本全局最佳值随迭代次数的变化如图7所示。从图7中可以观察到,灰狼算法迭代到50代左右就已经收敛,而粒子群算法和遗传算法分别迭代到80代和120代左右才收敛,说明灰狼算法比粒子群算法和遗传算法收敛速度更快。

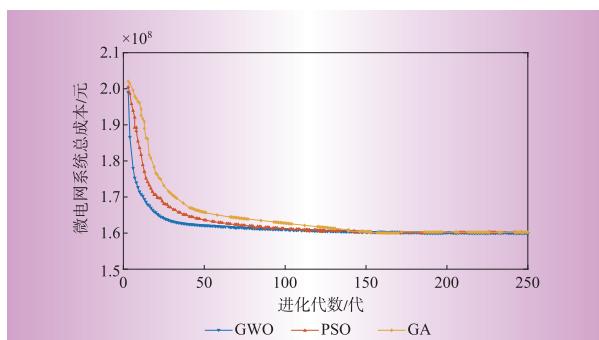


图7 微电网系统的总成本全局最佳值随迭代次数的变化

Fig. 7 The change of the global optimal value of the total cost of the microgrid system with the number of iterations

表5列出了与最佳解决方案相对应的最佳容量,对于电池储能给出了最佳的额定功率和额定容量。

表5 不同电源的最佳容量

Table 5 Optimal capacity of different power supplies

风机/MW	光伏/MW	电池储能/MWh	电池储能/MW	柴油发电机/MW
5	7	18	5	6

根据求得的最佳容量,可以得到分布式新能源、电池储能和柴油发电机的24 h输出功率分别如图8—图10所示。电池储能输出为负值表示正在放电,输出

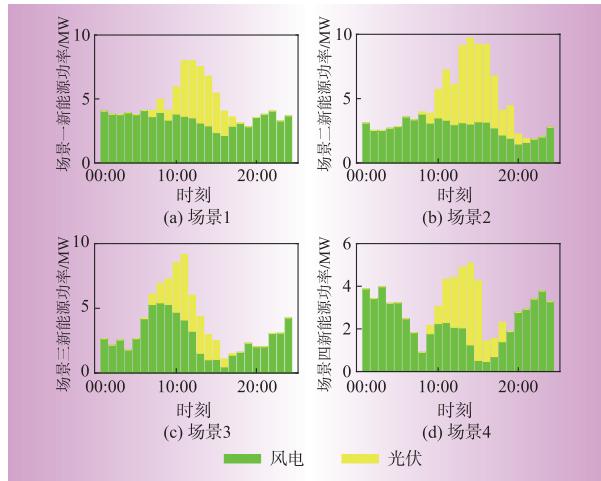


图8 不同场景下分布式新能源输出功率

Fig. 8 Output power of distributed new energy in different scenarios

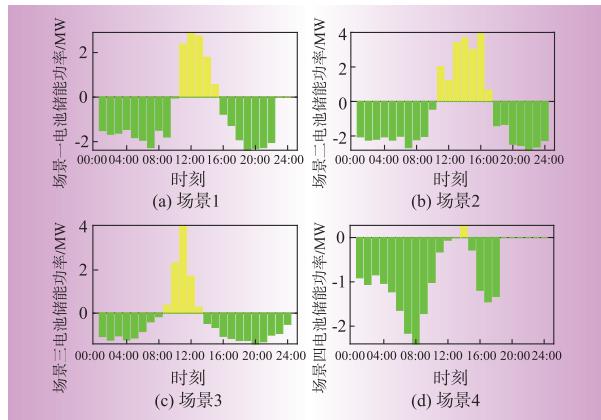


图9 不同场景下电池储能输出功率

Fig. 9 Output power of battery energy storage in different scenarios

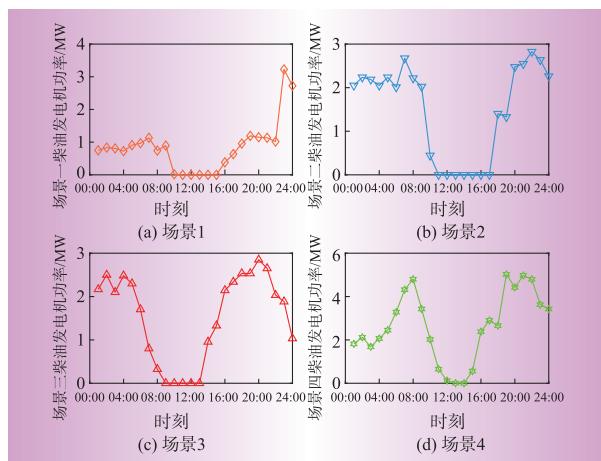


图10 不同场景下柴油发电机输出功率

Fig. 10 Output power of diesel generators in different scenarios

为正值表示正在充电。在00:00—09:00时段,分布式新能源输出不足以提供负荷,电池储能处于放电状态,且柴油发电机发电;在中午时间段,光伏输出功率快速增加,新能源总输出大于负荷,此时电池储能处于充电状态,柴油发电机不发电,输出功率为0;在晚上时间段,光伏输出功率为0,新能源总输出小于负荷,电池储能调整为放电状态,柴油发电机发电,在场景1的23:00—24:00时间段和场景4的19:00—24:00时间段,由于电池储能已完全放电,输出功率为0,柴油发电机增加输出功率以满足负荷。

从仿真结果可以看出,只有当分布式新能源和电池储能的总输出不足以提供负荷时,柴油发电机才用作备用电源。微电网系统中的负荷尽可能通过分布式新能源来提供,新能源发电满足了微电网系统约76%的负荷需求,有效减少了温室气体的排放,同时使微电网系统的总成本达到最小。

4 结束语

本文在微电网中考虑电动汽车充电负载的影响,建立了所有给定发电机组的数学模型,在微电网系统的总成本中考虑了减排效益成本,以微电网系统的总成本最小为目标,采用灰狼算法求解风机、光伏、电池储能和柴油发电机的最佳容量。以某17节点实际微电网为例进行仿真,仿真结果表明,微电网系统中的负荷尽可能通过分布式新能源来提供,有效减少了温室气体的排放,同时微电网系统的总成本达到最小,验证了本文所提优化模型的有效性。D

参考文献:

- [1] 童安怡.中国参与全球能源治理:问题、挑战与回应[D].杭州:浙江大学,2019.
TONG Anyi. China's participation in global energy governance: problems, challenges and responses [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [2] 蒋叶.含风光的配电网储能配置及有功无功协调优化调度研究[D].长沙:湖南大学,2021.
JIANG Ye. Energy storage configuration and coordinated optimization scheduling of active and reactive power in distribution network with Wind-PV [D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [3] 刘畅,卓建坤,赵东明,等.利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):1-18,369.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the

- flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1–18, 369.
- [4] 刘昊然. 计及复杂运行场景的储能系统适用性综合评价方法研究[D]. 吉林:东北电力大学,2021.
- LIU Haoran. Research on comprehensive evaluation method of energy storage system suitability considering complex operation scenarios [J]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021.
- [5] 杨永辉,谢丽蓉,李佳明,等. 基于模糊控制的储能参与一次调频综合控制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(4):38–45.
- YANG Yonghui, XIE Lirong, LI Jiaming, et al. Integrated control strategy of energy storage participating in primary frequency regulation based on fuzzy control [J]. Smart Power, 2023, 51(4):38–45.
- [6] 杜生鑫,金阳. 锂离子电池储能舱风冷散热数值模拟与优化[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6):58–64.
- DU Shengxin, JIN Yang. Numerical simulation and optimization of air cooling heat dissipation of lithium-ion battery storage cabin [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6):58–64.
- [7] 何良策. 电-气综合能源系统环境经济调度研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2020.
- HE Liangce. Research on environmental economic dispatch of integrated electricity and natural gas system [J]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [8] 龚莉莉. 基于利益链的配电网电动汽车充电优化策略研究[D]. 南京:东南大学,2021.
- GONG Lili. Research on optimization charging strategy of electric vehicles in distribution network based on profit chain [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [9] AKRAM U, KHALID M, SHAFI Q S. An innovative hybrid wind-solar and battery-supercapacitor microgrid system—development and optimization [J]. IEEE Access, 2017, 5:25 897–25 912.
- [10] CHEN J. Optimal sizing for grid-tied microgrids with consideration of joint optimization of planning and operation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1):237–248.
- [11] 阮绵晖,郑建平,刘尧,等. 离网直流微网群混合储能容量优化配置方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 99–105.
- RUAN Mianhui, ZHENG Jianping, LIU Yao, et al. Optimization configuration method for hybrid energy storage capacity of independent DC microgrid cluster [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3):99–105.
- [12] 郝思鹏,张前,周宇,等. 分时电价下企业光储系统的容量配置及优化运行[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4):96–103.
- HAO Sipeng, ZHANG Qian, ZHOU Yu, et al. Capacity configuration and optimal operation of enterprise optical storage system under time-shared price [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4):96–103.
- [13] 吴赋章,杨军,林洋佳,等. 考虑用户有限理性的电动汽车时空行为特性[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1 563–1 574.
- WU Fuzhang, YANG Jun, LIN Yangjia, et al. Research on spatiotemporal behavior of electric vehicles considering the users' bounded rationality [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (7) : 1 563–1 574.
- [14] 齐金玲,李卫星,晁璞璞,等. 直驱风机故障穿越全过程的通用电磁暂态建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4):1 428–1 443.
- QI Jinling, LI Weixing, CHAO Pupu, et al. Generic electromagnetic transient modeling method for complete fault ride-through processes of direct-driven wind turbine generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (4):1 428–1 443.
- [15] 郑浩,谢丽蓉,叶林,等. 考虑光伏双评价指标的混合储能平滑出力波动策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9):1 805–1 817.
- ZHENG Hao, XIE Lirong, YE Lin, et al. Hybrid energy storage smoothing output fluctuation strategy considering photovoltaic dual evaluation indicators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (9) : 1 805–1 817.
- [16] 王晨,徐光福,侯炜,等. 弱电网下变电站级微网运行模式平滑切换控制策略[J]. 现代电力, 2021, 38(3): 258–267.
- WANG Chen, XU Guangfu, HOU Wei, et al. Control strategy for smooth switching of substation level microgrid operation mode under weak grid [J]. Modern Electric Power, 2021, 38(3):258–267.
- [17] 蔡福霖,胡泽春,曹敏健,等. 提升新能源消纳能力的集中式与分布式电池储能协同规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20):23–32.
- CAI Fulin, HU Zechun, CAO Minjian, et al. Coordinated planning of centralized and distributed battery energy storage for improving renewable energy accommodation capability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20):23–32.
- [18] 范英. 温室气体减排的成本·路径与政策研究[M]. 北京:科学出版社,2011.
- FAN Ying. Research on the cost, path and policy of greenhouse gas emission reduction [M]. Beijing: Science Press, 2011.

作者简介:

郑建(1996),男,浙江温州人,硕士,助理工程师,研究方向为新能源发电技术;

赖欢欢(1985),女,浙江温州人,硕士,高级工程师,研究方向为智能电网调度;

郑伟(1995),男,浙江温州人,硕士,工程师,主要从事智能变电站检修工作。

(责任编辑 郑 逊)