

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.028

考虑多目标功率分配的储能能量管理策略研究

尹翔¹, 余丹², 张效俊¹, 崔福海¹, 何蕾¹, 夏远德¹, 王哲³

(1. 国网新疆电力有限公司, 乌鲁木齐 830000; 2. 电力规划设计总院, 北京 100120; 3. 北方工业大学储能技术工程研究中心, 北京 100144)

摘要: 为了提高储能换电柜管理策略效率,促进其高效利用,提出了一个基于人工鱼群算法的多目标功率分配能量管理策略。首先,建立了换电柜系统模型,其次,建立了考虑电池电量、储能换电柜运行成本的多目标功率分配数学模型,然后运用具有收敛速度快、效率高等优点的人工鱼群算法求解该模型。通过仿真表明,该策略能够实现储能换电柜的功率分配,降低运行成本,提高运行效率。

关键词: 储能换电柜; 功率分配策略; 人工鱼群算法; 多目标数学模型

Research on Energy Management Strategy for Energy Storage Considering Multi-objective Power Allocation

YIN Xiang¹, YU Dan², ZHANG Xiaojun¹, CUI Fuhai¹, HE Lei¹, XIA Yuande¹, WANG Zhe³

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 2. Electric Power Planning and Design Institute, Beijing 100120, China; 3. Energy Storage Technology Engineering Research Center, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: For improving the efficiency of energy storage and battery swapping cabinet management strategy and promote its efficient utilization, a multi-objective power allocation energy management strategy based on artificial fish swarm algorithm is proposed. First, the system model of the battery swapping cabinet is set up. Then, the multi-objective power allocation mathematical model considering the battery power and the operating cost of the energy storage and battery swapping cabinet is set up. After that, the artificial fish group algorithm with such advantages as fast convergence speed and high efficiency is used to solve the model. It is shown by simulation that this strategy can achieve power distribution of the energy storage and battery swapping cabinet, reduce operation cost and improve operation efficiency.

Key words: energy storage battery swapping cabinet; power distribution strategy; artificial fish swarm algorithm; multi-objective mathematical model

0 引言

2020年以来,国家相关部门对换电模式给予了明确支持。2020年4月,财政部等四部委联合发布的《关于完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》中,明确提出鼓励“车电分离”新型商业模式的发展^[1-2]。全国两会期间,作为新基建的重要组成部分,换电站首次被写入《政府工作报告》中^[3]。此

后,2021年11月发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》中更是明确指出,鼓励开展换电模式应用,加强充换电等基础设施建设是新能源汽车产业未来15年发展的重点方向之一^[4-7]。在国家政策和“双碳”战略推动下,补电速度快、效率高的换电模式成为当前新能源汽车和两轮电动车市场的热点,受到了电动车行业的高度关注^[8-12]。近年来,快递、外卖等配送服务行业快速发展,使得电动车

收稿日期:2025-11-17; 修回日期:2026-01-28

基金项目:国网新疆电力有限公司科研项目(新型电力系统下沙戈荒能源基地共享储能规划方法研究)。

Project Supported by State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd.(Research on Planning Methods for Shared Energy Storage in Sandy, Gobi, and Desert Energy Bases Under the New Power System).

换电需求始终处于上升趋势,每年以2 500~5 000万辆的速度增长,加之GB/T 40032—2021《电动汽车换电安全要求》^[13]等新国标的落地为两轮换电提供了重要基础,两轮电动车换电模式将成为未来重要发展趋势。

如今,随着越来越多的企业和用户目光转向换电,换电模式不断成熟,并逐步在制造工厂、工业园区、码头、矿山等各类场景中落地^[14-17]。相比之下,换电模式在城市物流配送领域的发展却略显缓慢,而提高换电柜运行效率、安全保障等因素是发挥其商业价值亟需解决的关键问题。因此,对储能换电柜功率分配问题进行深入研究显得尤为重要。

目前针对储能换电的功率分配问题,已有部分学者进行研究,文[18]以总运营成本最低为优化目标为目标制定控制策略,建立了电池组白天和夜间有序充电二次规划模型,并通过改进遗传算法求解总运营成本和相应的动力电池组匹配关系,并通过仿真验证了该模型的有效性,但遗传算法运行效率低,运行时间长;在着重分析换电需求特性后,文[19]建立了以每时段各状态的电池充电数量为控制变量的换电站有序充电模型,利用3种优化算法对其进行求解,结果表明改进布谷鸟算法收敛速度最快,且利用改进布谷鸟算法求解文中提出策略可在较短时间内计算出换电站获得的经济收益,但由于考虑因素较多,模型较为复杂;为了解决实际应用中预测误差累积问题,文[20]设计了换电站实时调度策略,采用带基线的蒙特卡洛策略梯度方法对其进行求解,通过仿真验证出所提策略能对电网负荷起到一定的削峰填谷作用,但蒙特卡洛算法本身需要大量历史数据,且所建立模型较为复杂,增加了算法求解的难度。上述关于储能换电柜控制策略在实用性方面还需进行进一步优化。

综上所述,当前对于储能换电柜控制策略在实用性方面的研究较少,需要进一步优化。因此文中提出了一种换电柜有序充电策略,首先以运行充电电费最低和负荷峰谷值最低为目标函数建立了充电模型,然后通过全局寻优能力较好的人工鱼群算法对模型进行优化求解,最后通过MATLAB/Simulink对模型进行仿真,并与无序充电策略进行对比,仿真结果证明了该策略能够实现储能换电柜的功率分配,降低运行成本,有效提高了运行效率。

1 储能换电柜系统结构

典型储能换电柜结构示意图见图1。由图1可

知,该储能系统由2个储能换电柜构成,每个储能换电柜共有12个可换电储能电池。

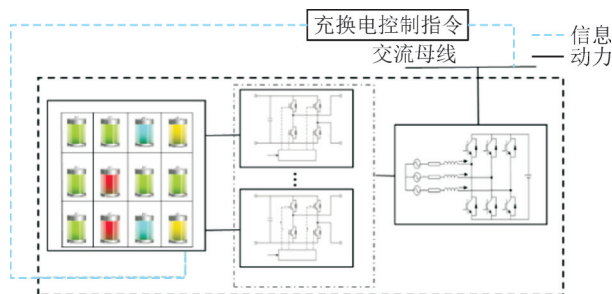


图1 储能换电柜系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy storage battery swapping cabinet system

2 储能换电柜能量管理模型研究

2.1 储能换电柜策略

文中研究的有序充电策略假设每小时集中换电,且处于能够满足各电池充电1 h即能充满的理想状态下,考虑电网侧负荷量,在负荷高峰时段对所有电池进行快充,在满足用户换电需求的前提下尽可能减轻电网的负荷量;在非电网负荷高峰时段内,考虑分时电价,和电价高峰因素,以此实现换电站电池的有序充电策略。

根据上述假定条件及所考虑的方面,文中采用的总体控制策略如下:

- 1)在电网负荷高峰期时段内,所有电池采用快充充电方式;
- 2)在非电网负荷高峰时段内,考虑分时电价,在电价高峰时,优先对电量较高的电池进行快充,且在电池SOC充至80%后采用慢充方式,其余电池均慢充;
- 3)在电价低谷时,对所有电池进行慢充。

采用人工鱼群算法对上述策略就进行求解,可获得换电柜内各换电仓在各小时需要的待充功率数值。

2.2 储能换电柜有序充电模型

2.2.1 电池荷电状态

电池的荷电状态的定义是电池剩余容量与电池满容量的比值,由文[21]知,电池荷电状态的计算方式为

$$SOC_{ij} = \frac{Q_{ij}^s}{Q_{ij}^z} \quad (1)$$

式(1)中: Q_{ij}^s 为第 i 个电池柜中第 j 个电池的剩余容量; Q_{ij}^z 为第 i 个电池柜中第 j 个电池的额定容量。

2.2.2 电池充电功率范围

文中各电池柜中的换电电池每小时充电功率通过人工鱼群算法求解多目标分配模型获得, t 时段各电池柜中电池的充电功率为

$$P_{ch}^t = \sum_{i=1}^2 P_{ij}^t \sum_{j=1}^{12} P_{ij}^t \quad (2)$$

式(2)中: P_{ch}^t 为 t 时刻各电池柜中电池总充电功率; P_{ij}^t 为 t 时刻第 i 个电池柜中第 j 个电池的充电功率。

2.3 储能系统多目标功率分配模型

考虑到某地区电网侧负荷高/非高峰, 电价高峰、平段和低谷以及电池电量, 储能换电柜多目标功率分配模型主要以储能换电柜充电电费最低和电池 SOC 一致性为目标, 下文将依次进行分析。

2.3.1 目标函数1(负荷峰谷值最低)

$$F = \sum_{r=1}^{24} (P_{\max} - P_{\min}) \quad (3)$$

式(3)中: $P_{\max}$ 为该日储能换电柜最高充电功率; $P_{\min}$ 为该日储能换电柜最低充电功率。

2.3.2 目标函数2(运行充电电费最低)

根据所提出的控制策略, 以换电柜各换电仓电池充电功率需求量为输入, 建立换电站充电总日费用最小的目标函数。

当时间段处于 C_1 情形时, 充电策略的目标函数为

$$\begin{cases} M_C = \left[\frac{(0.8C - x)^2}{p_{\text{fast}}} + \frac{(0.2C)^2}{p_{\text{slow}}} \right] \cdot m(h) \\ M = \sum_{h=1}^{24} M_C + M_p \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: M_C 为 1 h 内充电费用; p_{fast} 为快充功率; $m(h)$ 为分时电价; M 为换电站日总充电费用; M_p 为每日运维成本。

当时间段处于 C_2 情形时, 充电策略的目标函数为

$$\begin{cases} M_C = \frac{x}{p_{\text{slow}}} \cdot x \cdot m(h) \\ M = \sum_{h=1}^{24} M_C + M_p \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, p_{slow} 为慢充功率。

当时间段处于 C_3 情形时, 充电策略的目标函数为

$$\begin{cases} M_C = \left[\frac{(0.8C - x)^2}{p_{\text{fast}}} + \frac{(0.2C)^2}{p_{\text{slow}}} \right] \cdot m(h) \\ M = \sum_{h=1}^{24} M_C + M_p \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, C 为电池最大功率需求。

2.4 储能换电柜约束条件

1) 储能换电柜充电约束

$$P_{ch_ij}^{\min} \leq P_{ij}^t \leq P_{ch_ij}^{\max} \quad (7)$$

式(7)中: $P_{ch_ij}^{\min}$ 为第 i 个换电柜中第 j 个换电电池充电功率最小值; P_{ij}^t 为第 i 个换电柜中第 j 个换电电池待充电功率; $P_{ch_ij}^{\max}$ 为第 i 个换电柜中第 j 个换电电池充电功率最大值。

2) 储能换电柜总充电约束

$$0 \leq P_{t_1} \leq P_{t_1}^{\max} \quad (8)$$

式(8)中: P_{t_1} 为 t_1 时刻储能换电柜总充电功率; $P_{t_1}^{\max}$ 为 t_1 时刻储能换电柜允许的最大充电功率。

3) 储能电池电量约束

$$SOC_{\min} \leq SOC_{ij} \leq SOC_{\max} \quad (9)$$

式(9)中: $SOC_{\min}$ 为换电电池电量的最小值; SOC_{ij} 为第 i 个换电柜中第 j 个换电电池的电量; $SOC_{\max}$ 为换电电池电量的最大值。

3 储能换电柜有序充电控制策略

3.1 储能换电柜有序充电控制策略分析

储能换电电池的有序充电控制策略可通过储能换电柜中的逻辑管理单元等设备来实现, 该策略可保证能够满足用户的换电需求情况下尽可能花费较少的充电费用, 合理为换电电池充电, 提高储能换电柜运行的经济性和可靠性。

文中通过分析某市某地区储能换电柜充电需求量对其有序充电控制策略展开分析, 具体见图2。

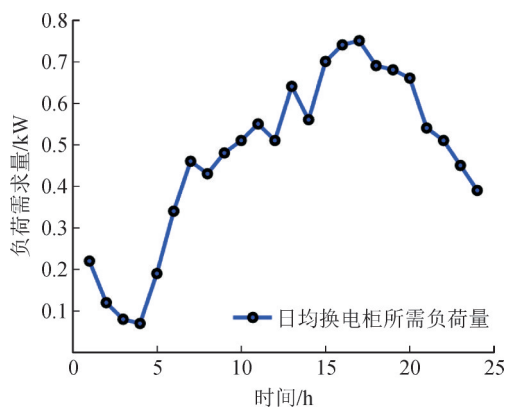


图2 日均换电柜所需负荷量

Fig. 2 Schematic diagram of daily load required for battery cabinet swapping

通过数据可以看出, 电动物流车换电柜的充电功率需求量在中午 11-13 时和晚间 15-17 时较高, 此时换电需求较大, 电池 SOC 较低; 在早上 7-11 时、下

午13-17时和晚间17-21时电池SOC和电功率需求
量中等,此时换电量适中;在晚间21时-早上7时之
间,电池SOC较高,换电柜的充电功率需求量较低,

此时换电需求较少。
考虑到电网侧负荷、分时电价和电池电量等因
素,文中采用的换电柜总体控制策略见图3。

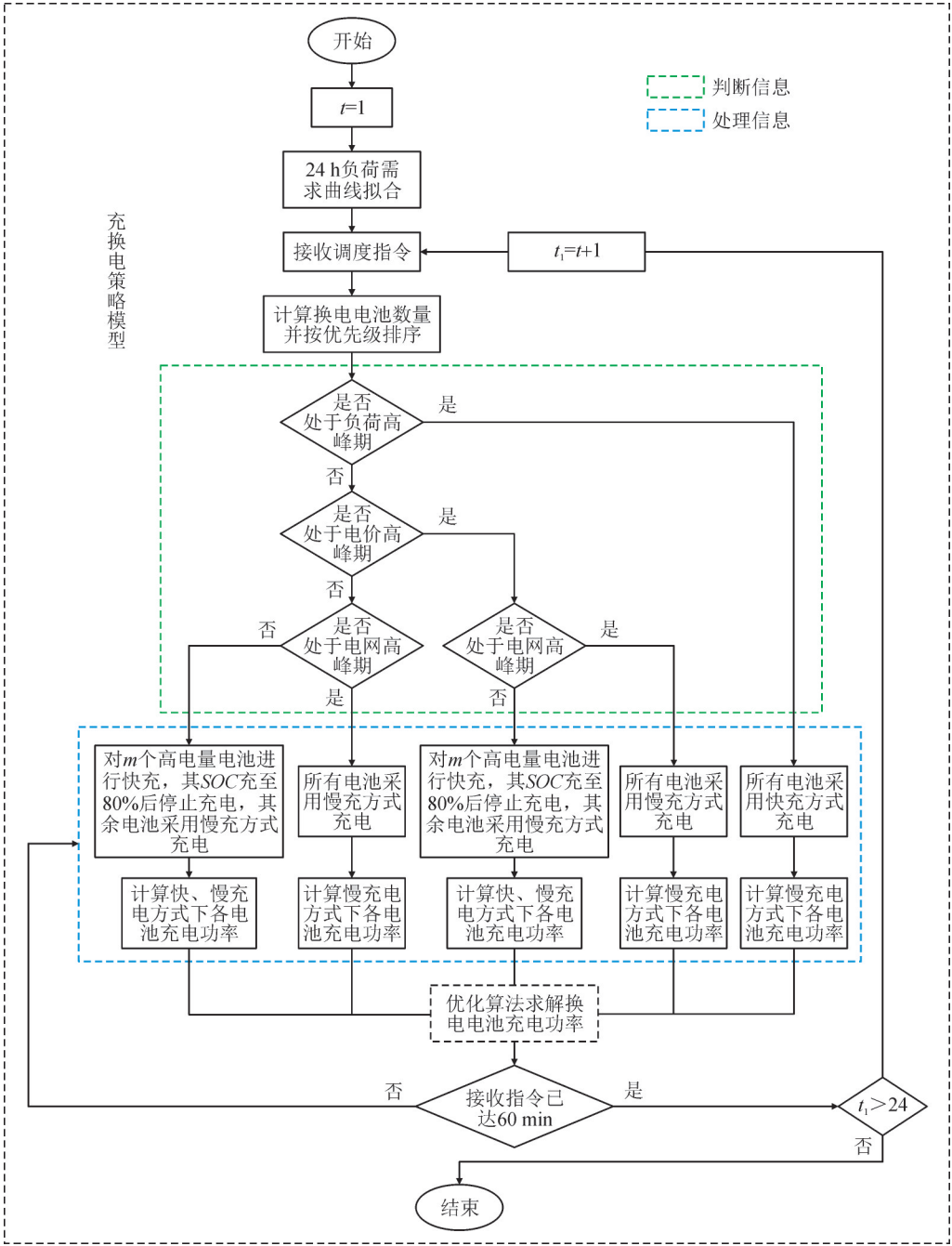


图3 储能换电柜系统控制策略流程图

Fig. 3 Flowchart of the control strategy of the energy storage and battery swapping cabinet system

文中研究的电动物流车有序充电策略假设每
小时集中换电,且处于能够满足各电池充电1h即
能充满的理想状态下,考虑电网侧负荷量,在负荷
高峰时段对所有电池进行快充,在满足用户换电需
求的前提下尽可能减轻电网的负荷量;在非电网负
荷高峰时段内,考虑分时电价,和电价高峰因素,以
此实现换电站电池的有序充电策略。分时电价和
负荷情况见表1。

表1 某市24小时电价表

Table 1 24-hour electricity price table in a city

序号	时间段	电价/[元·(kWh) ⁻¹]
1	01:00-08:00	0.338
2	08:00-15:00	0.618
3	15:00-21:00	0.454
4	21:00-01:00	0.338

根据上述假定条件及所考虑的方面,文中采用

的总体控制策略如下:

首先根据以往经验拟合出储能换电柜 24 h 内需求曲线,然后再进行如下 3 种情况的判断:

C₁,当前时间段处于负荷高峰期时,储能换电柜中所有电池均以快充方式进行充电。

C₂,当前时间段处于负荷和电价非高峰期时,储能换电柜中所有电池均以慢充方式进行充电。

C₃,当前时间段处于负荷非高峰期且电价处于高峰期时,优先对电量较高的电池进行快充,且在电池 SOC 充至 80% 后采用慢充方式,其余电池均慢充;在电价低谷时,对所有电池进行慢充。

根据上述 3 种不同情况,采用人工鱼群算法计算不同充电方式下各小时各电池的待充电功率,直至计算到 24 h 后结束运算。

3.2 储能换电柜控制策略求解

为了获得上述控制策略所得结果,文中采用人工鱼群算法对其进行求解。该方法以储能换电柜充电电费最低和电池 SOC 一致性作为最优人工鱼的食物浓度,以各电池柜中各电池的待充电功率作为算法中最优人工鱼所在位置。

人工鱼群算法流程如下^[22-24]:

步骤 1,初始化设置,包括种群规模、每条人工鱼的初始位置、人工鱼的视野 v 、步长 s 、拥挤度因子、重复次数。

步骤 2,计算初始鱼群各个体的适应值,取最优人工鱼状态及其值赋予记录。

步骤 3,通过聚群行为移动人工鱼群位置,并计算、记录所有人工鱼所在位置的食物浓度。

步骤 4,通过追尾行为移动人工鱼群位置,并计算、记录所有人工鱼所在位置的食物浓度。

步骤 5,将聚群行为和追尾行为中最高食物浓度的位置更新为局部最优解。

步骤 6,将局部最优解和全局最优解中最高食物浓度的位置更新为全局最优解。

步骤 7,达到迭代次数时输出当前全局最优解。

其中,人工鱼通过聚群行为,即通过靠近群体来避开危险。设某个人工鱼当前状态为 Z_i ,每次迭代中它都会探索邻域内鱼的数量及其所在中心位置 Z_c ,如果鱼数量较多的中心位置对应的食物浓度高于当前所在位置的食物浓度,且该位置不拥挤,则这个人工鱼向鱼群中心位置 Z_c 移动,移动位置为

$$Z_n = Z_i + \frac{s \cdot \gamma}{\|Z_c - Z_i\|} \cdot (Z_c - Z_i) \quad (10)$$

式(10)中: s 为移动步长; γ 为[0,1]之间的随机数。

人工鱼通过追尾行为,即跟随已找到食物的鱼来获取食物。如果鱼数量较多的位置中最高食物浓度高于当前所在位置的食物浓度,且该位置不拥挤,则这个人工鱼向鱼群中心位置 Z_c 移动,移动位置为

$$Z_n = Z_i + \frac{s \cdot \gamma}{\|Z_{\max} - Z_i\|} \cdot (Z_{\max} - Z_i) \quad (11)$$

式(11)中, $Z_{\max}$ 为鱼数量较多的位置中最高食物浓度。

人工鱼通过觅食行为,即通过视觉来判断水中食物浓度,进而靠近食物。人工鱼在其感知范围内选择一个状态 Z_j ,如果 Z_j 对应的食物浓度大于当前状态食物浓度,则向该方向前进,移动位置可用公式来表示。如果 Z_j 对应的食物浓度小于等于当前状态食物浓度,则随机选择一个状态并且向该方向前进,移动位置为:

$$Z_n = Z_i + \frac{s \cdot \gamma}{\|Z_j - Z_i\|} \cdot (Z_j - Z_i) \quad (12)$$

$$Z_n = Z_i + 2 \cdot \text{rand}[1, \text{length}(Z_i) - 1] \cdot v \quad (13)$$

式(13)中, v 为人工鱼的视野。

人工鱼群因为只需比较目标函数值,对目标函数的要求不高,且容错能力强,具备较好的全局寻优能力,能快速跳出局部最优点,鲁棒性强。因此能够准确的分析本研究的目标函数,而且因其求解速度快、精度高,可高效解决多目标多约束条件的非线性场景,文中研究的储能换电柜场景,就是利用人工鱼群算法有效解决了内层控制策略、外层目标函数策略的非线性多约束条件的数学模型。

4 储能换电柜功率分配策略仿真分析

利用 MATLAB/Simulink 仿真软件搭建换电柜的运行模型,将功率分配算法求解出的储能换电柜各换电电池的待充电功率数据导入此运行模型中,模拟储能换电柜实际运行情况,计算换电站直流侧电流电压与交流侧线电压/电流与相电压/电流实时数值,进一步验证退役电池状态估计、控制策略及优化算法等工作的准确性,调节电路中各电气设备/元器件的参数,也可为将来储能换电柜设备选型及参数设定范围提供借鉴。文中所搭建的退役电池换电柜仿真模型总体示意图见图 4。

图 4 中,左上方的框内代表了电池换电站交流侧电路的仿真模型;下方主要为换电电池接收到功率需求指令后通过与交流侧电路配合进行充放电的模型。

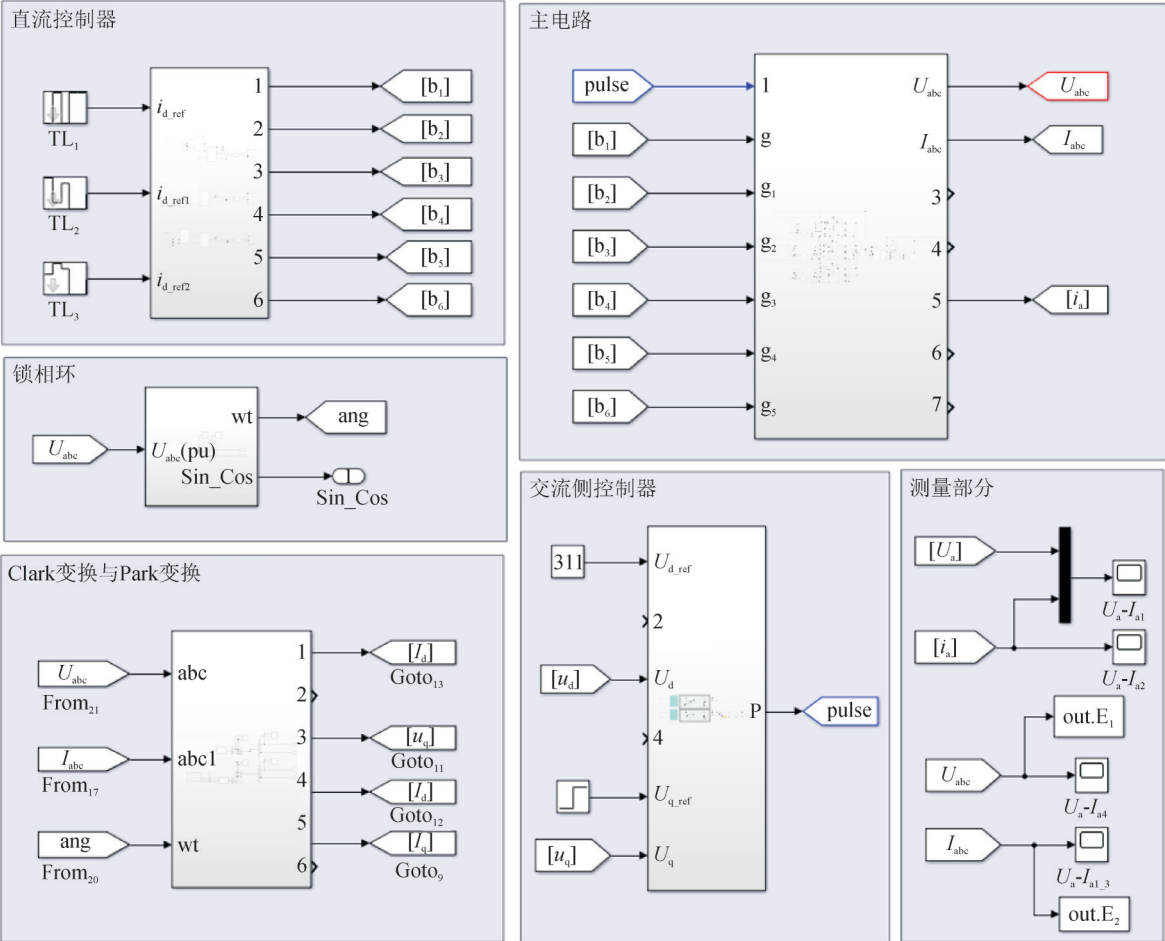


图4 电池换电柜仿真模型总体示意图

Fig. 4 General schematic diagram of the simulation model of the battery swapping cabinet

实际动力电车换电柜中有12个换电电池,考虑到Simulink仿真运行速度问题,本课题采用实际与电动物流车换电柜按4:1情况搭建仿真模型,仿真步长设置为2.5 s。

4.1 换电柜功率仿真模型搭建

将各电池各小时待充功率指令作为模型输入通过直流侧功率—电流双闭环控制连接到直流电路中,再通过交流侧电压—电流双闭环控制连接到交流电路中,最后通过LC滤波电路后接入380 V交流电网中。其中,直流子电路采用的是buck-boost升降压斩波电路,符合实际要求,见图5。

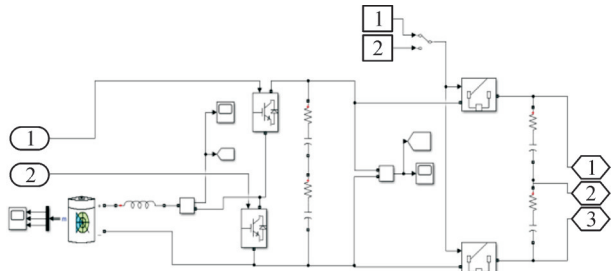


图5 直流子电路(升降压斩波电路)

Fig. 5 DC sub-circuit(lift-pressure chopper circuit)

文中设置的储能换电柜单闭环模型控制电路图见图6,控制模式采用PI控制。退役电池换电柜双闭环模型控制电路图见图7,控制模式采用PI控制。换电柜模型中直流侧采用功率—电流双闭环控制,交流侧采用电压—电流双闭环控制。

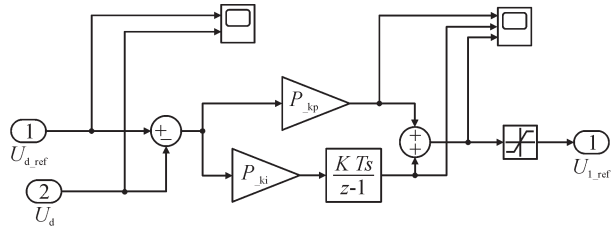


图6 退役电池换电柜单闭环模型控制图

Fig. 6 Control diagram of the single closed-loop model of the retired battery swapping cabinet

4.2 换电柜功率仿真运行结果

人工鱼群优化算法求解过程的收敛曲线图见图8,从图8可看出,该算法收敛速度较快,且精度较优。通过试验结果表明该算法在迭代近40次时可实现数学模型的求解。

差。该控制策略与现有控制策略相比,既平滑了功率曲线又降低了42.19%的用电成本。

3)文中采用人工鱼群优化算法求解内层控制策略、外层目标函数的非线性多约束条件的数学模型,通过试验结果表明该算法在迭代近40次可实现数学模型的求解。

4)文中所提出的功率分配策略对于退役动力电池应用在储能换电柜中具有一定的参考价值。为进一步优化文中所提策略,可在下一步研究中对两个换电柜中各换电电池的充电进行优先级排序,使得储能换电柜运营更加有序。

参考文献:

- [1] 财政部. 发展改革委关于进一步完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知[J]. 中华人民共和国财政部文告, 2019(4):29-30.
Ministry of Finance. Notice on further improving the financial subsidy policy for the promotion and application of new energy vehicles[J]. Gazette of the Ministry of Finance of the People's Republic of China, 2019(4):29-30.
- [2] 胡 斌. 新能源汽车换电商业模式盈利优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2021.
HU Bin. Study on the profit optimization of the new energy vehicles' battery-swap business model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [3] 佚名. 第十四届全国人民代表大会第三次会议关于政府工作报告的决议[J]. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报, 2025(2):205.
Anon. Resolution of the third session of the fourteenth national people's congress on the report on the work of the government[J]. Gazette of the Standing Committee of the National People's Congress of the People's Republic of China, 2025(2):205.
- [4] 佚名. 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(31):16-23.
Anon. Circular of the general office of the state council on printing and issuing the development plan of new energy automobile industry(2021-2035)[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2020(31):16-23.
- [5] 刘嘉彦, 李祖坤, 李 畅, 等. 电动汽车与电力—交通耦合网互动:综述与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5):12-24.
LIU Jiayan, LI Zukun, LI Chang, et al. Interaction between electric vehicles and power-transportation coupled networks: Current status, challenges and development trends[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5):12-24.
- [6] 于霄宇, 纪正森, 嵇 灵, 等. 双碳目标下我国电动汽车碳减排贡献潜力分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(2):25-31.
YU Xiaoyu, JI Zhengsen, JI Ling, et al. Analysis on carbon emission reduction potential of electric vehicles in china under goal of carbon neutrality and carbon peaking[J]. Smart Power, 2024, 52(2):25-31.
- [7] 刘 祺, 王承民, 谢 宁, 等. 新型配电系统中考虑电动汽车差异化行为特性的充换电站规划方法[J]. 智慧电力, 2024, 52(9):18-24.
LIU Qi, WANG Chengmin, XIE Ning, et al. Charging and swapping stations planning method considering differentiated behavior characteristics of electric vehicles in new distribution system[J]. Smart Power, 2024, 52(9):18-24.
- [8] 钱 康, 李东森, 王佐君, 等. 考虑用户多样化需求的电动汽车集群调节能力评估研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(11):81-88.
QIAN Kang, LI Dongsen, WANG Zuojun, et al. Regulation capability evaluation of electric vehicle cluster considering diversification requirements for users[J]. Smart Power, 2024, 52(11):81-88.
- [9] 冯 雨, 汪冬梅, 梁艳萍. 新能源汽车扁线电机绕组设计及其损耗分析[J]. 大电机技术, 2025(3):24-30.
FENG Yu, WANG Dongmei, LIANG Yanping. Winding design and loss analysis of flat wire motors for new energy vehicles[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(3):24-30.
- [10] 葛少云, 孙 睿, 刘 洪, 等. 内嵌运行优化与动力电池梯次利用的光储充换电站多阶段规划[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10):149-156.
GE Shaoyun, SUN Rui, LIU Hong, et al. Multi-stage planning of charging and battery swapping station with photovoltaic and energy storage considering embedded operation optimization and cascaded utilization of electric vehicle batteries[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10):149-156.
- [11] 何国彬, 杨金新, 施铭涛, 等. 基于多目标蜉蝣算法的电动汽车充电站联合储能系统最优规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(15):95-102.
HE Guobin, YANG Jinxin, SHI Mingtao, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations integrated with energy storage systems based on multi-objective mayfly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15):95-102.
- [12] 庞松岭, 赵海龙, 张晨佳. 计及充电需求差异的电动汽车充电设施协同优化配置[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12):171-177.
PANG Songling, ZHAO Hailong, ZHANG Chenjia. Collaborative optimization configuration of electric vehicle charging facilities considering differences in charging demand[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12):171-177.
- [13] 电动汽车换电安全要求:GB/T 40032—2021[S]. 2021.
Electrical changing safety requirements for electric vehicles: GB/T 40032—2021[S]. 2021.
- [14] 张美霞, 付御临, 杨 秀. 基于电动汽车充换电需求时空分布的充换电设施规划[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1):126-137.
ZHANG Meixia, FU Yulin, YANG Xiu. Planning of charging and battery swapping facilities based on spatio-temporal distribution of charging and battery swapping demand of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1):126-137.
- [15] 胡 斌. 新能源汽车换电商业模式盈利优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2021.
HU Bin. Study on the profit optimization of the new energy vehicles' battery-swap business model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

- University, 2021.
- [16] 袁洪涛, 徐潇源, 严正, 等. 电动汽车集中充换电设施规划和优化运行研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 157-174.
YUAN Hongtao, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Review of centralized EV charging and battery swapping facility planning and optimal scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 157-174.
- [17] 葛乐, 陆颖, 王明深, 等. 考虑用户决策更新的电动汽车充换电负荷预测[J]. 浙江电力, 2025, 44(10): 152-164.
GE Le, LU Ying, WANG Mingshen, et al. EV charging and battery swapping load forecasting considering user decision updating[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(10): 152-164.
- [18] 张帝, 姜久春, 张维戈, 等. 基于遗传算法的电动汽车换电站经济运行[J]. 电网技术, 2013(8): 2101-2107.
ZHANG Di, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Economic operation of electric vehicle battery swapping station based on genetic algorithms[J]. Power System Technology, 2013(8): 2101-2107.
- [19] 黄敏丽, 于艾清. 基于改进布谷鸟算法的电动汽车换电站有序充电策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1075-1083.
HUANG Minli, YU Aiqing. Study on coordinated charging strategy for battery swapping station based on improved cuckoo search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1075-1083.
- [20] 张文昕, 栗然, 臧向迪, 等. 基于强化学习的电动汽车换电站实时调度策略优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 134-141.
ZHANG Wenxin, LI Ran, ZANG Xiangdi, et al. Real-time scheduling strategy optimization for electric vehicle battery swapping station based on reinforcement learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 134-141.
- [21] 闫湖, 胡静, 王哲. 退役动力电池剩余电量状态估计方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021(10): 33-41.
YAN Hu, HU Jing, WANG Zhe. Research on discharge state estimation method of retired power battery[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(10): 33-41.
- [22] 赵丽萍, 张书伟, 张雪岩, 等. 基于随机机会约束规划的面向能源互联网的主动配电网选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 121-129.
ZHAO Liping, ZHANG Shuwei, ZHANG Xueyan, et al. Locating and sizing method for energy interconnection oriented active distribution networks based on stochastic chance constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 121-129.
- [23] 董运昌, 刘世民, 曲朝阳, 等. 计及用户响应电价关联与多主体共赢的电动汽车充放电定价优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 134-142.
DONG Yunchang, LIU Shimin, QU Chaoyang, et al. Charging and discharging pricing optimization of electric vehicles considering correlation of user response to electricity price and win-win results of multi-stakeholder[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 134-142.
- [24] 汪天允, 张浩. 基于人工鱼群算法的电动汽车优化充电策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 33-38.
WANG Tianyun, ZHANG Hao. Optimal charging strategy of electric vehicles based on artificial fish swarm algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 33-38.
- 尹翔(1986—), 男, 硕士研究生, 副高级工程师, 主要研究方向为电网规划设计、储能及新型电力系统研究(通信作者)(E-mail: yinxiang524@sina.com)。
- 余丹(1980—), 女, 硕士研究生, 副高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划设计(E-mail: dyu@eppei.com)。
- 张效俊(1978—), 男, 本科, 副高级工程师, 主要研究方向为电网规划(E-mail: 13639913661@163.com)。
- 崔福海(1978—), 男, 本科, 副高级工程师, 主要研究方向为电网规划(E-mail: 406618668@qq.com)。
- 何蕾(1988—), 女, 本科, 副高级工程师, 主要研究方向为电网建设、经营管理(E-mail: 251005807@qq.com)。
- 夏远德(1988—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电网规划(E-mail: 418176565@qq.com)。
- 王哲(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为退役电池利用(E-mail: 794775011@qq.com)。

(上接第227页)

- [17] 胡俊. 碰撞射流供冷房间热分层模型及性能优化研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
HU Jun. The delstratification model and performance optimization [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [18] 陈佳, 王梦林. 不同网格类型对建筑风环境仿真结果的影响[J]. 土木建筑工程信息技术, 2021, 13(3): 154-159.
CHEN Jia, WANG Menglin. The impact of different mesh types on the outdoor wind environment of buildings[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2021, 13(3): 154-159.
- [19] 丁俊伟. 基于CFD仿真的传感器部署方法研究: 面向室内环境智能化控制[D]. 广州: 广州大学, 2022.
DING Junwei. Research on sensor deployment method based on CFD simulation: Intelligent control for indoor environment[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [20] 张宝斌. 基于CFD分析的散热器百叶窗应用模型研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
ZHANG Baobin. Study on the application model of the radiator shutter based on CFD analysis[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.
- 史亚鑫(1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为变电站室内热湿环境控制、建筑柔性负荷预测与虚拟电厂调控(E-mail: 15230251947@163.com)。
- 刘志坚(1984—), 男, 博士, 教授, 研究方向为建筑环境生物气溶胶、综合能源系统(通信作者)(E-mail: zhijianliu@ncepu.edu.cn)。