

计及电池使用寿命的电动汽车充电站储能容量配置方法

李文超¹, 童亦斌^{1,2}, 张维戈^{1,2}

(1. 国家能源主动配电网技术研发中心, 北京交通大学, 北京 100044;

2. 北京电动车辆协同创新中心, 北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 电动汽车充电站接入配电网不但增加电网的扩容压力, 而且充电站较大的负荷峰谷差造成设备利用率低。通过配置储能电池可有效降低负荷峰谷差, 提高设备利用率。但储能电池的容量决定投入的成本, 需要寻找最合适的容量达到成本最低的目标。由于储能电池寿命影响电池更换时间, 需要准确估算储能电池在频繁不规则充放电状态下的寿命周期。本文采用雨流计数法统计电池工作周期内的充放电深度, 并根据等效循环寿命曲线建立电池寿命损耗模型。以充电站日成本最低为目标, 综合考虑充电站配电网的投资成本、储能系统的投资成本、维护成本及整体的运行成本, 利用粒子群优化算法求解最优容量, 最后对比不同类型充电站在不同场景下配置储能的价值。

关键词: 电动汽车充电站; 电池寿命; 优化算法; 容量配置

DOI: 10.12067/ATEEE1806055

文章编号: 1003-3076(2019)04-0055-09

中图分类号: TM73;U469.72;TM912

1 引言

近年来环境污染问题严重、化石能源紧缺, 燃油汽车的发展已到达瓶颈, 电动汽车以零排放、高效率、运行灵活等特点受到广泛关注, 电动汽车充电站的需求也随之增加。电动汽车充电负荷与原配电网负荷叠加, 再度增加电网压力。根据充电站的实际数据可知负荷高峰持续时间较短, 充电站配电容量过高或过低都是不合理的。而加入储能电池系统(Battery Energy Storage System, BESS)可以有效降低负荷峰值, 提高日负荷率, 并降低充电站的配电容量。

储能电池容量受配置目标、成本以及储能电池寿命等因素影响, 当配置的容量较高, 可能会造成利用率较低; 当配置的容量较低, 则可能达不到目标值。在综合成本计算中, 关键是投资成本以及储能电池的寿命(即更换时间), 不同容量的投资成本、更换时间不同, 日成本可以有效综合投资成本和更换时间两个因素。因此如何在计及电池寿命的同时保证日成本最低成为充电站储能配置的关键。

国内外学者对储能电池的合理配置均展开大量研究。文献[1]针对公交车充电站建立日成本最低

的目标函数, 在不同削峰目标下, 对储能电池容量进行优化配置, 但未考虑储能电池的寿命影响因素。文献[2]提出负荷侧 BESS 恒功率充放电策略, 建立储能系统经济价值评估模型, 并计算出最优 BESS 容量配置, 但未考虑储能电池的寿命。文献[3]提出一种电力需求侧规模储能经济评估的方法, 结合政府补贴和峰谷价差, 利用削峰填谷来提高经济性, 证明储能可以有效提高经济性。文献[4]通过分析证明合理的光伏和储能配置可以提高配电网系统的运行经济性。

文献[5]采用加权系数法建立了不同荷电状态(State of Charge, SOC)下储能系统寿命损耗模型。文献[6]利用锂电池充放电深度以及循环次数评估其寿命, 但评估方法复杂、冗余、缺乏适用性。

本文以出租车和公交车充电站为研究对象, 从已运行的充电站和未来规划建设的充电站两种场景配置 BESS, 并对比两种类型充电站配置储能的价值。采用雨流计数法提取一个工作周期内的充放电深度并建立电池等效循环寿命模型。在此基础上, 建立电动汽车充电站 BESS 容量配置模型, 目标函数是日成本最低, 约束条件为储能电池的出力、储能

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900500)

作者简介: 李文超(1994-), 女, 江苏籍, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与新能源发电;

童亦斌(1969-), 男, 浙江籍, 副教授, 硕士, 研究方向为电力电子、新能源发电和主动配电网技术。

电池 SOC 的范围以及网侧功率的波动范围等。利用粒子群算法求解最优容量。通过算例分析可知,在两种场景下同时配置储能电池,公交车充电站比出租车充电站的经济性更优,但是两者都能达到削峰、减少配电容量的目标。

2 电动汽车充电站 BESS 容量配置模型

2.1 BESS 利用模式

在电动汽车充电站中配置 BESS,利用场景分两种:①已投入运行的充电站,利用 BESS 实现削峰填谷、减缓扩容;②规划建设的充电站,利用 BESS 减少充电站配电建设投资,并降低配电容量。

2.2 充电站储能电池配置模型影响因素

储能电池配置模型影响因素主要是充电站成本及储能电池寿命。

2.2.1 成本构成

充电站系统成本构成如图 1 所示。配电线路投资成本包括变压器、配电线路及安装等成本;BESS 投资成本包括储能电池、变流器及安装等成本。

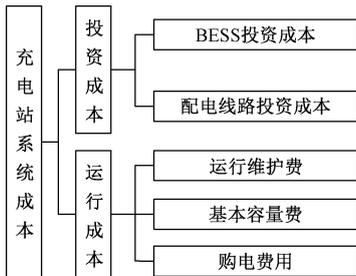


图 1 充电站系统成本构成

Fig. 1 Cost composition of charging station system

2.2.2 储能电池寿命模型

储能电池的寿命受温度、充放电倍率、循环次数、充放电深度 (Depth of Discharge, DOD) 等因素影响,但实际应用场合中这些影响因素是相互耦合的^[7],综合上述影响因素分析储能电池寿命较为复杂。考虑充电站储能电池的环境温度比较稳定,且本文充放电倍率控制在 1C 以内 (C 为电池放电速率的度量, nC 对应的储能电池最大充放电功率为 $P_{batmax} = E_b/n$ (kW), E_b (kW·h) 为电池的容量)。为简化计算,忽略温度以及充放电倍率的影响,本文只考虑 DOD 以及充放电循环次数对电池寿命的影响,根据等效循环寿命曲线建立寿命损耗模型。

储能电池的 DOD 是指电池在完成一个完整的充放电周期后,释放的电量占总电量的比值。一个完整的循环周期是从 $SOC_1 - SOC_2 - SOC_1$, $DOD =$

$|SOC_1 - SOC_2|$ 。某电池原始 SOC-t 曲线如图 2(a) 所示,按照每次充满满放统计充放电次数,计算的电池寿命过短;按照吞吐电量累计充放电次数,计算的电池寿命过长。本文利用雨流计数法提取 DOD 并建立不同 DOD 下的寿命周期模型,将储能电池的投资成本折算入日成本中,合理配置 BESS 容量。雨流计数法示意图如图 2 所示。

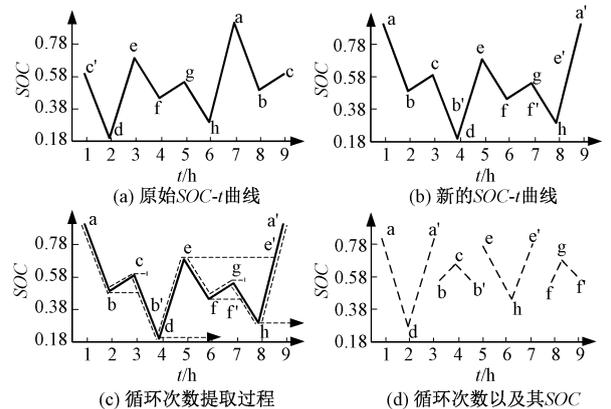


图 2 雨流计数法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rain flow counting method

(1) 雨流计数法计数规则

雨流计数法又称为“塔顶法”,主要用于工程界,尤其是疲劳寿命的计算。利用雨流计数法计算电池 DOD 的步骤如下^[8]。

1) 针对原始 SOC-t 曲线 (图 2(a)) 重新安排 SOC-t 曲线,以 SOC 绝对值最大的点作为起点,得到新的 SOC-t 曲线如图 2(b) 所示。

2) 将新的 SOC-t 的曲线顺时针转过 90°,雨流依次从每个峰或谷的上侧流下,直到对面有一个比开始时更高的峰值 (或更低的谷值) 后停下。

3) 当雨流遇到上层流下的雨时,则停止流动,并构成一个循环,循环次数提取过程如图 2(c) 所示。

4) 根据雨流的起点和终点,记录各自的循环,将循环逐一取出,循环次数以及 SOC 如图 2(d) 所示。

5) 每一雨流的水平长度为该循环的放电深度。

(2) 基于 DOD 估算电池等效循环寿命

已知某磷酸铁锂电池的 DOD 与循环寿命 N_m 的对应数据^[9],如表 1 所示。

表 1 磷酸铁锂电池 DOD 与循环次数的对应关系

Tab. 1 Relationship between DOD and cycles number of

lithium iron phosphate battery

DOD	N_m /次	DOD	N_m /次
0.4	7200	0.8	5200
0.6	6000	1	4700

根据表 1 中的数据进行曲线拟合,采用 N 阶函数法拟合得到三阶函数如式(1)所示。循环次数与 DOD 的关系拟合曲线如图 3 所示。

$$N_m(DOD^3) = -2083DOD^3 + 8750DOD^2 - 13170DOD + 11200 \quad (1)$$

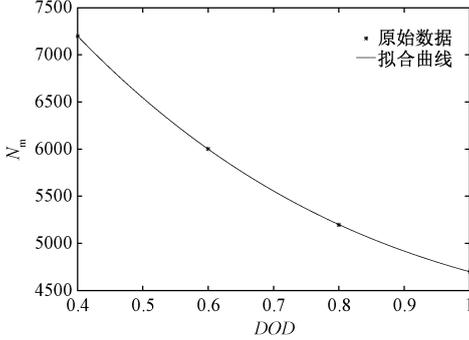


图 3 循环次数与 DOD 的关系

Fig. 3 Relationship between cycles and depth of charge and discharge

利用雨流计数法得到储能电池工作周期内的 n 次循环,对应的放电循环深度为 $DOD_1, DOD_2, DOD_3, \dots, DOD_n$,其中 $N_m(DOD_i)$ 记为 DOD_i 对应的最大充放电循环次数。

工作周期内的电池寿命衰减率为:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_m(DOD_i)} \times 100\% \quad (2)$$

式中, γ 为电池衰减率。

假设同样的工作周期经历 N 次,那么电池的剩余寿命为:

$$T = 1 - \sum_{j=1}^N \gamma(j) \quad (3)$$

式中, T 为电池剩余寿命。当 $T=0$ 时代表电池寿命到达极限。

2.3 储能电池容量配置模型及粒子群优化算法

2.3.1 目标函数

(1) 投资成本

投资成本由变压器成本、配电线路成本及 BESS 成本组成,考虑货币的时间价值,根据等年值法折算出每年的投资成本。

资本回收系数 $C_{r_0}(r_0, N)$ 为:

$$C_{r_0}(r_0, N) = \frac{r_0(1+r_0)^N}{(1+r_0)^N - 1} \quad (4)$$

式中, r_0 为年利率; N 为 BESS、变压器以及配电线路的运行年限(年)。

配电线路和 BESS 年成本如式(5)~式(7)所示:

$$y_b = C_{r_0}(r_0, N_b) \cdot (C_b E_b + C_p P_{batmax}) \quad (5)$$

$$y_d = C_{r_0}(r_0, N_d) \cdot (C_d P_d) \quad (6)$$

$$y_1 = y_d + y_b \quad (7)$$

式中, y_b 为 BESS 成本(元/年); y_d 为配电线路成本(元/年); y_1 为充电站总投资成本(元/年); C_b 为储能电池容量及安装成本(元/(kW·h)); N_b 为储能电池的寿命(年); C_p 为储能变流器等设备安装成本(元/kW); C_d 为配电线路建设成本(元/kW); P_d 为充电站配电容量(kW); N_d 为变压器以及线路使用年限(年)。

(2) 维护成本

配电线路、BESS 的年运行维护费用:

$$y_2 = a(C_d P_d + C_b E_b + C_p P_{batmax}) \quad (8)$$

式中, y_2 为维护成本(元/年); a 为年维护系数。

(3) 基本容量费

基本容量费是充电站每个月的配电容量费用。

$$y_3 = \frac{MP_{max}}{D_m \mu} \quad (9)$$

式中, y_3 为基本容量费(元/天); M 为月容量费(元/kW); P_{max} 网侧负荷峰值(kW); D_m 为每个月的天数; μ 为配电容量的裕量(通常考虑最大负荷功率不超过变压器容量的 80%)。

(4) 日购电成本

$$y_4 = \int_1^{24} C_m(t) P_{grid}(t) dt \quad (10)$$

式中, y_4 为从电网购电成本(元/天); C_m 为电价(元/(kW·h)); P_{grid} 为网侧实时功率(kW)。

(5) 总目标函数

$$Y = \min \left[\frac{(y_1 + y_2)}{365} + y_3 + y_4 \right] \quad (11)$$

式中, Y 为充电站日成本(元/天)。

2.3.2 约束条件

(1) 电能功率平衡约束

$$P_{grid}(t) = -P_{bat}(t) + P_{load}(t) \quad (12)$$

式中, P_{load} 为负荷侧功率; P_{bat} 为电池侧功率, 电池充电功率为负, 放电功率为正。

(2) 储能电池运行约束

过充或过放均会造成电池寿命大幅度下降, 因此充放电过程中电池的 SOC 以及充放电功率需控制在合理的范围内。

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (13)$$

$$-P_{batmax} \leq P_{bat} \leq P_{batmax} \quad (14)$$

式中, SOC_{min} 为储能电池 SOC 的最小值; SOC_{max} 为

储能电池 SOC 的最大值。

(3) 电网侧功率约束

$$P_{\text{grid}} \leq P_{\text{max}} \quad (15)$$

(4) 储能约束条件处理

为避免频繁充电,储能电池的充电功率应大于系统允许的最小充电功率 P_{batmin} ,即:

$$|P_{\text{bat}}| \geq P_{\text{batmin}} \quad (16)$$

储能电池充放电过程存在能量损失,充电倍率不超过 1C,为简化计算充放电效率 u 均取为 0.962^[10]。

储能电池放电和充电下的 SOC 计算公式:

$$SOC_t = SOC_{t-1} - \frac{P_{\text{bat}}T}{E_b u} \quad (17)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} + P_{\text{bat}}T \frac{u}{E_b} \quad (18)$$

式中, SOC_t 为当前荷电状态; SOC_{t-1} 为前一时刻荷电状态; T 为间隔时间; u 为充放电效率。

实际充电站能够配置储能电池的面积有限,具体需要根据每个充电站的规划制定,即:

$$E_b \leq E_{\text{max}} \quad (19)$$

式中, E_{max} 为充电站允许最大储能容量。

2.3.3 储能充放电策略

首先初始化储能电池的荷电状态,然后根据下一时段的负荷与设定约束值的功率差额及电价情况,结合储能电池模型,得到对应的荷电状态。当负荷高于目标值,储能电池放电,放电功率满足式(20)。

$$P_{\text{bat}} = \min(P_{\text{load}} - P_{\text{max}}, P_{\text{batmax}}) \quad (20)$$

当负荷低于目标值,分为以下几种模式。

(1) 负荷处于高电价段,不充电,但如果剩余电量大于后期所需能量,则放电。

$$P_{\text{bat}} = \begin{cases} \min[(SOC_t - SOC_{\text{nex}}) \frac{E_b u}{T}, P_{\text{batmax}}] & SOC_t > SOC_{\text{nex}} \\ 0 & SOC_t \leq SOC_{\text{nex}} \end{cases} \quad (21)$$

(2) 负荷处于电价平期或低谷段,可按需求充电。

$$P_{\text{bat}} = \begin{cases} \max[(SOC_t - SOC_{\text{nex}}) \frac{E_b}{Tu}, -P_{\text{batmax}}] & SOC_t < SOC_{\text{nex}} \\ 0 & SOC_t \geq SOC_{\text{nex}} \end{cases} \quad (22)$$

式中, SOC_{nex} 为后期所需电量对应的 SOC 值。

根据目标函数可知最优解与储能容量密切相关,寻找最合适的储能容量是关键问题,需要借助智

能求解算法,粒子群算法具有易于实现、快速收敛、精度较高等优点,可用于优化求解^[11]。

2.3.4 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是一种基于迭代的优化算法。

本文给出目标峰值 (即电网侧最大配电容量) 已知和未知时储能电池最优的容量配置方法。基于储能电池寿命的 BESS 容量配置流程图如图 4 所示。当目标峰值已知,储能电池容量是决策变量,储能电池充放电功率、储能电池寿命、电价以及总成本通过程序计算得出,不断对比总成本,得到最优的成本和储能容量值,具体流程见图 4。目标峰值未知针对成本最小寻找目标峰值和容量,即充电站配置储能的最优解。决策变量中增加了目标峰值,其程序流程图在图 4 的决策变量中加入目标峰值这一变量,其他步骤与图 4 相同。

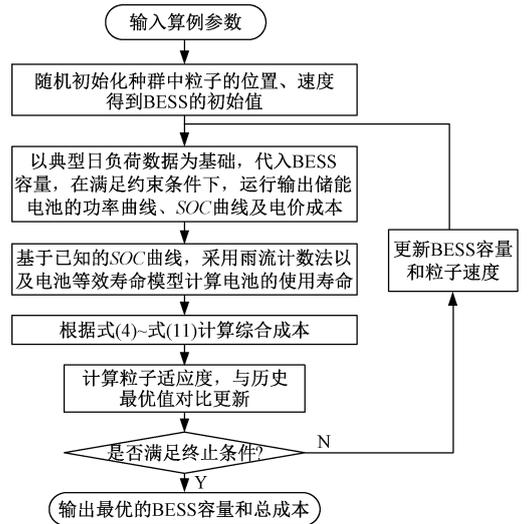


图4 基于储能电池寿命的 BESS 容量配置流程图
Fig. 4 BESS capacity configuration flow chart based on energy storage battery life

3 算例分析

3.1 深圳市出租车充电站

3.1.1 负荷分析

分析深圳市某出租车充电站 6 月份某一星期数据以及实时电价得到典型日功率曲线以及电价曲线图,如图 5 所示,其中横坐标表示时间 t ,左边的纵坐标表示负荷功率 P ,右边的纵坐标表示电价 C ,黑色曲线为典型日,以 10min 为一节点。

分析数据可知负荷平均功率为 154kW,最大功率为 334kW,平均日负荷率为 46%。负荷尖峰集中

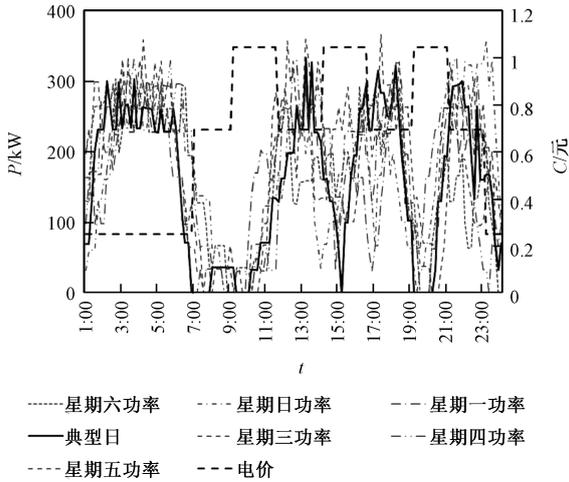


图5 典型日负荷功率以及电价曲线

Fig. 5 Typical daily load power and electricity price curves

在 13:00~14:00、17:00~18:00,可以看出一天中仅 1h 左右负荷功率超过 300kW,初步判定该充电站资源利用率不高,变压器的运行能力未得到完全发挥。同时结合深圳市电价,分析发现该充电站充电负荷积极响应峰谷电价。对实地考察,充电站内允许配置储能电池的最高容量 $E_{\max}=200\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

根据调查可知充电站、BESS 参数如表 2 所示,深圳市电价如表 3 所示。由于线路扩容需要涉及征地费等多方面费用,且大城市扩容费较高,根据实际调查,北京市为 1 万元/ $\text{kW}^{[1]}$ 。

表 2 相关参数

Tab. 2 Related parameters

参数	数值	参数	数值
r_0 (%)	6	N_d /年	20
M /(元/($\text{kV}\cdot\text{A}$))	32(北京)	C_b /(元/($\text{kW}\cdot\text{h}$))	2000
C_p /(元/ kW)	400	a /(%)	1 ^[1]
M /(元/($\text{kV}\cdot\text{A}$))	24(深圳)	C_d /(元/ kW)	10000
μ	0.8	D_m /(天)	30

表 3 深圳市电价

Tab. 3 Electricity price in Shenzhen

时间	实时电价 /(元/($\text{kW}\cdot\text{h}$))	时间	实时电价 /(元/($\text{kW}\cdot\text{h}$))
0:00~7:00	0.2494	16:30~19:00	0.6934
7:00~9:00	0.6934	19:00~21:00	1.0459
9:00~11:30	1.0459	21:00~23:00	0.6934
11:30~14:00	0.6934	23:00~24:00	0.2494
14:00~16:30	1.0459		

3.1.2 已运行的充电站 BESS 容量配置

将表 2 与表 3 中的参数代入式(4)~式(11),得到目标函数如式(23)所示。充电站已经参与运行,因此投资成本中不考虑充电站配电容量的投资。

$$Y = \left[0.066 + \frac{144 \times 1.06^{N_b}}{365(1.06^{N_b} - 1)} \right] E_b + 1.34P_{\max} + \sum_{t=1}^{144} C_m(t)P_{\text{grid}}(t) \quad (23)$$

削减目标是未配置储能时最大负荷的百分比(例如削减目标为 $n\%$,即最大负荷不超过 $P_{\max} = 334 - 334 \times n\%$)。求解目标函数,可得充电站 BESS 容量配置最优结果如表 4 所示。

表 4 储能电池容量优化配置结果

Tab. 4 Optimal configuration of capacity of energy storage battery

削减目标 (%)	负荷峰值 /kW	储能电池容量 /($\text{kW}\cdot\text{h}$)	日负荷率 (%)	成本 /元	成本下降 (%)
0	334	0	46	2600	0
15	283	61.5	54	2562	1.46
30	230	187	67	2736	-5.2
最优解	287.4	50	53	2560.5	1.52

根据表 4 可知,随着削减目标的增加,所需储能电池容量相应增加,日负荷率也有所提升,说明充电站加入 BESS 可以有效降低负荷高峰,提高日负荷率。但成本呈现先增后减的趋势,说明成本存在最低值即最优解,此时对削峰目标和容量两者寻优可得最低成本,相比原始成本下降 1.52%,具体参数见表 4 最后一列,但是成本下降并不明显。该类充电站利用储能削峰,在经济性上并没有大幅度改善。

表 4 中最优解对应的负荷功率变化以及储能电池的充放电功率曲线如图 6 所示。粒子群优化曲线如图 7 所示,图 7 中横坐标为迭代次数(N),纵坐标为总成本(F),经过 85 代的迭代,可得充电站投入总成本为 2560.5 元,此时储能电池容量为 $50\text{kW}\cdot\text{h}$,削减后的负荷峰值功率为 287.4kW, BESS 运行的 SOC 曲线如图 8 所示。

3.1.3 规划建设的充电站 BESS 容量配置

传统建设的充电站资源利用率低,加入 BESS 的充电站可以降低配电容量,提高资源利用率,降低配电成本。将相应参数代入式(4)~式(11),得到目标函数为:

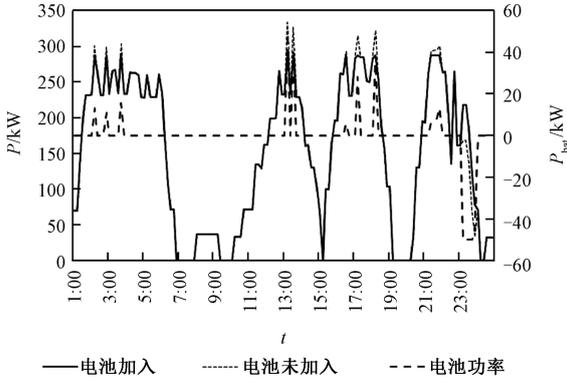


图 6 加入储能电池前后充电站输出功率以及 BESS 充放电功率曲线

Fig. 6 Output power of charging station with and without BESS and charge and discharge power curve of BESS

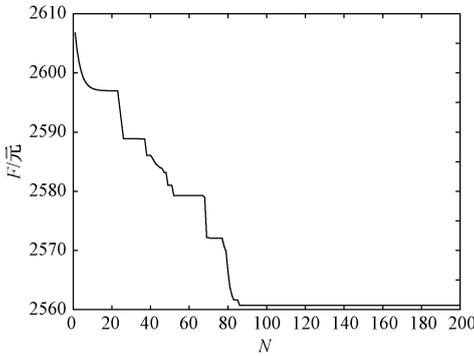


图 7 粒子群优化曲线

Fig. 7 Curve of particle swarm optimization

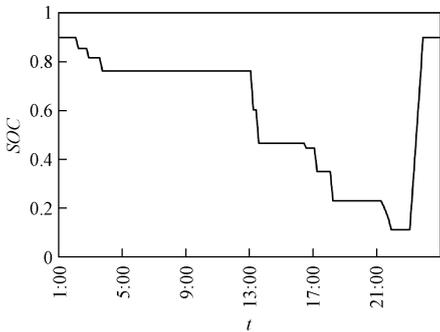


图 8 BESS 运行的 SOC 曲线

Fig. 8 SOC curve of BESS

$$Y = \left[0.066 + \frac{144 \times 1.06^{N_b}}{365(1.06^{N_b} - 1)} \right] E_b + 4.33P_{\max} + \sum_{t=1}^{144} C_m(t)P_{\text{grid}}(t) \quad (24)$$

求解目标函数,可得充电站 BESS 容量优化配置结果如表 5 所示。

表 5 储能电池容量优化配置结果

Tab. 5 Optimal configuration of capacity of energy storage battery

减少配 电容量 百分比(%)	负荷 峰值/kW	储能电池 容量 /(kW·h)	成本 /元	成本 下降(%)
0	334	0	3597	0
15	283	61.5	3407	5.3
30	230	187	3423	4.8
最优解	235	200	3348	6.9

根据表 5 可知,随着配电容量的降低,储能电池容量逐渐增加,日负荷率提高,总成本减少。当负荷最高峰值降为 235kW,成本最低,即削减配电容量的最优值,之后成本相对上升。实际工程中减少配电容量的多少需综合多方面因素,因此本文给出部分配电容量已知的优化结果以及整体最优结果,以供参考。

3.2 北京市公交车充电站

3.2.1 负荷分析

北京市某电动公交车充电站共计 8 台直流 450kW 的充电桩,有 58 辆公交车,根据 6 月份的负荷数据,得到典型日负荷功率以及电价曲线如图 9 所示,以 5min 为一节点。

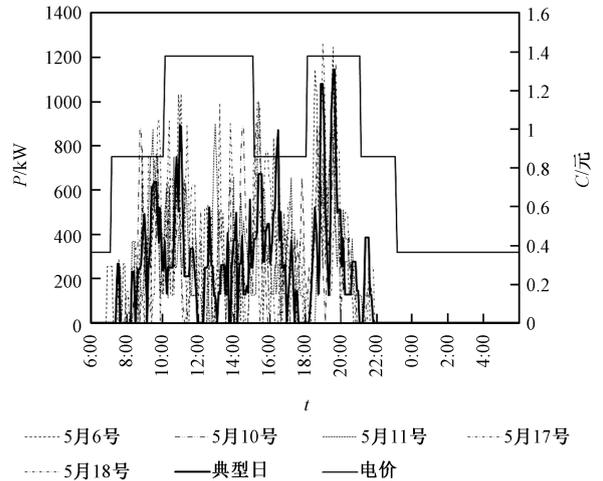


图 9 典型日负荷功率以及电价曲线

Fig. 9 Typical daily load power and electricity price curve

分析典型日负荷功率曲线,最大负荷为 1145kW,平均负荷 177kW,日负荷率为 15.5%,高峰时段为 9:00~11:00、14:00~16:00、19:00~20:00。日负荷率极低,且负荷超过 800kW 的时间段只占 4.2%左右,负荷高峰维持时间极短,资源利用率极低。对实地考察,充电站内允许配置储能电池的最

大容量 $E_{\max} = 1000\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

北京市电价如表 6 所示。

表 6 北京市电价

Tab. 6 Electricity price in Beijing

时间	实时电价 /(元/(kW·h))	时间	实时电价 /(元/(kW·h))
0:00~7:00	0.3658	18:00~21:00	1.3782
7:00~10:00	0.8595	21:00~23:00	0.8595
10:00~15:00	1.3782	23:00~24:00	0.3658
15:00~18:00	0.8595		

3.2.2 已运行的充电站 BESS 容量配置

针对公交车充电站负荷特点结合 BESS 建立目标函数,将现有参数代入式(4)~式(11),得到目标函数如式(25)所示。

$$Y = \left[0.066 + \frac{144 \times 1.06^{N_b}}{365(1.06^{N_b} - 1)} \right] E_b + 1.676P_{\max} + \sum_{t=1}^{288} C_m(t)P_{\text{grid}}(t) \quad (25)$$

求解目标函数,可得充电站 BESS 容量优化配置结果如表 7 所示。

表 7 储能电池容量优化配置结果

Tab. 7 Optimal configuration of capacity of energy storage battery

削减目标(%)	负荷峰值/kW	储能电池容量/(kW·h)	日负荷率(%)	成本/元	成本下降(%)
0	1145	0	15.5	6887	0
15	973	172	18.2	6602	4.1
30	800	345	22.1	6318	8.3
45	629	516	28.1	6050	12.2
60	450	900	39.3	5817	15.5
最优解	431	978	41.1	5802	15.8

根据表 7 可知,随着削减峰值的增加,成本逐渐下降并出现最优值,即负荷峰值为 431kW,储能容量为 978kW·h,当 P_{\max} 低于 431kW 时,电费下降变缓,储能成本相对增加,总成本呈上升趋势。最优解对应的负荷曲线和储能充放电功率如图 10 所示。

对比表 5 可知,出租车充电站配置储能电池削峰填谷在经济上没有明显优势,而公交车充电站在成本上有明显优势,从经济性上比较公交车充电站更适合配置储能,因此电动汽车充电站的储能配置需要结合负荷特点具体分析。

3.2.3 规划建设的充电站 BESS 容量配置

以此类型充电站假设建设一个新的公交车充电

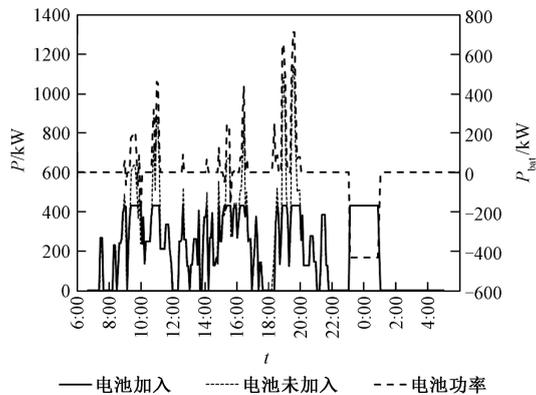


图 10 加入储能电池前后充电站输出功率与储能电池系统充放电功率曲线

Fig. 10 Output power of charging station with and without BESS and charge and discharge power curve of BESS

站,负荷状态类似。以削减不同比例的配电容量为目标配置储能,并对比经济性。将表 3 和表 7 的相关参数代入式(4)~式(11),得到目标函数如式(26)所示。

$$Y = \left[0.066 + \frac{144 \times 1.06^{N_b}}{365(1.06^{N_b} - 1)} \right] E_b + 4.66P_{\max} + \sum_{t=1}^{288} C_m(t)P_{\text{grid}}(t) \quad (26)$$

求解目标函数,可得充电站 BESS 容量优化配置结果如表 8 所示。

表 8 储能电池容量优化配置结果

Tab. 8 Optimal configuration of capacity of energy storage battery

减少配电容量百分比(%)	负荷峰值/kW	储能电池容量/(kW·h)	成本/元	成本下降(%)
0	1145	0	10298	0
15	973	172	9506	7.7
30	800	345	8705	15.5
45	629	516	7928	23
60	450	893	7160	30.5
最优解	352	953	6949	32.5

根据表 8 可知,随着配电容量的降低,储能电池容量逐渐增加,日负荷率增加,总成本下降并出现最低点。对比表 5 的出租车充电站成本下降率可知,公交车充电站配置储能可大幅度降低成本,减少投资。因此公交车充电站从成本角度配置储能更具优势。但上述两种类型充电站在规划设计中考虑配置 BESS 均会降低负荷峰值,减少配电容量,缓解电网

压力,同时降低充电站投资成本,提高整体的经济性。

4 结论

(1)分析充电站的负荷特点,有助于合理选择储能电池利用模式,达到经济最优的目标。根据算例分析,当充电站负荷相对较平稳且积极响应峰谷价差的情况下,配置储能电池用于削峰填谷在经济性没有优势,但用于规划建设的充电站是可以有效降低成本。而针对负荷波动大,且夜晚无充电的充电站,两种配置场景在经济性上均值得考虑。

(2)考虑储能电池使用寿命与 *DOD* 的关系,利用雨流计数法分析电池的 *DOD*,并建立电池寿命模型,相比于累积吞吐电量法更切合实际,对充电站的成本计算更加准确,同时可有效判断电池更换的时间。

(3)电池寿命的影响因素较多,单独使用雨流计数法和电池等效寿命模型建立的电池寿命模型还不能完全符合实际要求,如何能做好电池使用寿命的不确定性表达或建模是需要进一步研究。

(4)实际中充电站类型较多,如何对充电站进行合理分类并能够根据提出的指标快速确定该充电站是否值得配置储能是需要进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 李芹芹, 张维戈, 黄梅 (Li Qinqin, Zhang Weige, Huang Mei). 快速充电站储能系统容量配置的研究 (Research on capacity configuration of energy storage system in fast charging station) [J]. 电气应用 (Electrotechnical Application), 2017, 36 (5): 26-31.
- [2] 韩晓娟, 田春光, 张浩, 等 (Han Xiaojuan, Tian Chunguang, Zhang Hao, et al.). 用于削峰填谷的电池储能系统经济价值评估方法 (Economic evaluation method of battery energy storage system in peak load shifting) [J]. 太阳能学报 (Acta Energetica Solaris Sinica), 2014, 35 (9): 1634-1638.
- [3] 熊雄, 杨仁刚, 叶林, 等 (Xiong Xiong, Yang Rengang, Ye Lin, et al.). 电力需求侧大规模储能系统经济性评估 (Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (9): 224-230.
- [4] 吴杰, 温晨阳, 李珊, 等 (Wu Jie, Wen Chenyang, Li Shan, et al.). 基于分时电价的光伏-储能系统容量优化配置 (Optimal allocation of PV and accumulator system based on TOU price) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (1): 1-8.
- [5] Fossati J P, Galarza A, Villate A M, et al. A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids [J]. Renewable Energy, 2015, 77: 539-549.
- [6] 李军徽, 冯爽, 崔新振, 等 (Li Junhui, Feng Shuang, Cui Xinzen, et al.). 风储联合发电系统中锂电池寿命评估 (Lifetime evaluation of battery energy storage system in wind-ES hybrid power system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (10): 34-38.
- [7] 时玮 (Shi Wei). 动力锂离子电池组寿命影响因素及测试方法研究 (Research on Lifespan Factors and Test Methods of Traction Lithium-ion Batteries) [D]. 北京: 北京交通大学 (Beijing: Beijing Jiaotong University), 2014.
- [8] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等 (Han Xiaojuan, Chen Cheng, Ji Tianming, et al.). 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型 (Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (34): 91-97, 16.
- [9] 高飞, 杨凯, 惠东, 等 (Gao Fei, Yang Kai, Hui Dong, et al.). 储能用磷酸铁锂电池循环寿命的能量分析 (Cycle-life energy analysis of LiFePO₄ batteries for energy storage) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (5): 41-45, 8.
- [10] 李红林, 孙逢春, 张承宁 (Li Honglin, Sun Fengchun, Zhang Chengning). 动力电池充放电效率测试分析 (Test analysis for traction battery charging and discharging efficiency) [J]. 电源技术 (Chinese Journal of Power Sources), 2005, 29 (1): 49-51.
- [11] 潘超, 孟涛, 蔡国伟, 等 (Pan Chao, Meng Tao, Cai Guowei, et al.). 主动配电网广义电源多目标优化规划 (Multi-objective optimization planning of generalized power in active distribution network) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (3): 41-46.

Energy storage capacity allocation method of electric vehicle charging station considering battery life

LI Wen-chao¹, TONG Yi-bin^{1,2}, ZHANG Wei-ge^{1,2}

(1. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The access to the distribution network of the electric vehicle charging station not only increases the expansion pressure of the power grid, but also causes a problem of low utilization of equipment due to the large peak-to-valley difference of the charging station. By configuring the energy storage battery, the difference between peaks and valleys can be effectively reduced, and the utilization of equipment can be improved. The capacity of energy storage batteries determines the cost of investment, and it is necessary to find the most appropriate capacity. Since the life of the energy storage battery affects the battery replacement time, it is necessary to accurately estimate the life cycle of the energy storage battery in the state of frequent irregular charge and discharge. In this paper, the rain flow counting method is used to count the depth of charge and discharge in the battery operating cycle, and the battery life loss model is established based on the equivalent cycle life curve. To minimize the daily cost of charging stations, the investment cost of the distribution network of the charging station, the investment cost of the energy storage system, the maintenance cost, and the overall operating cost are comprehensively considered. The particle swarm optimization algorithm is used to solve the optimal capacity, and finally the different types are compared. The charging station configures the value of energy storage in different scenarios.

Key words: electric vehicle charging station; battery life; optimization algorithm; capacity configuration