

电动汽车充电站变压器容量及储能优化配置

张怡¹, 郝思鹏^{1,2}

(1. 南京工程学院, 南京 211167; 2. 江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心, 南京 211167)

摘要: 为提高电动汽车充电站的经济性, 需要结合储能系统对充电站容量进行合理配置。通过调研电动汽车的实际充电数据分析充电站的负荷特性, 得知不同规模的充电站应配置不同容量的储能系统。利用惩罚因子, 以充电站年净收益为优化目标, 在未配置储能和配置储能的情况下分别建立了充电站容量配置模型, 并利用数学方法对其进行求解。在某充电站进行了算例仿真, 验证了所提配置模型的有效性。

关键词: 负荷特性; 充电站; 惩罚因子; 储能配置

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2023.07.003

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2023)07-0019-07

Optimized configuration of transformer capacity and energy storage for electric vehicle charging stations

Zhang Yi¹, Hao Sipeng^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China. 2. Jiangsu Province Distribution Network Intelligent Technology and Equipment Collaborative Innovation Center, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to improve the economics of electric vehicle charging stations, it is necessary to reasonably configure the charging station capacity in conjunction with the energy storage system. By investigating the actual charging data of electric vehicles and analyzing the load characteristics of charging stations, it is known that different sizes of charging stations should be equipped with different capacities of energy storage systems. Utilizing the penalty factor and taking the annual net income of the charging station as the optimization target, the capacity allocation model of the charging station is established separately with and without the energy storage configuration, and the mathematical method is used to solve it. Finally, a simulation example is carried out at a charging station to verify the effectiveness of the proposed configuration model.

Keywords: load characteristics, charging station, penalty factor, energy storage configuration

0 引言

电动汽车快速增长, 充电站被广泛建设, 充电负荷和原配电网负荷叠加, 进一步扩大了峰谷差, 加大了配电网的承载压力。如何缓解局部电网压力成为影响电动汽车大规模发展的重要课题。电动汽车充电站建设成本较高, 提高充电站的利用率, 降低企业运行成本, 有利于促进充电站的建设和发展。

充电负荷特性是充电站容量配置的基础, 也是充电设施建设、规划的重要依据^[1]。电动汽车充电方式主要分为快充和慢充。慢充充电功率通常为 7 kW ~ 8 kW, 快充充电功率有 60 kW/80 kW/100 kW/120 kW 等。慢充的充电时间长, 负荷较为平稳, 快充时间短, 功率波动大。考虑到用户的需求, 充电站主要以快充方式为主。充电站建设通常都面向特定的客户群体, 如公交车、网约车、出租车、物流车以及家用轿车等。用户的充电负荷特性直接影响充电站配置, 需要对其

进行分析建模。文献[2]通过仿真得到单台充电机的负荷特性曲线, 并在此基础上进行了概率建模, 利用蒙特卡罗方法得到其日负荷曲线。文献[3]利用聚类分析对不同类型的充电站负荷数据进行分类并分析了其负荷特性。

电动汽车充电站的建设不仅要考虑用户需求, 还要考虑充电站的自身经济性。充电站成本除了建设成本之外, 主要是用电成本, 我国目前主要采用两部制电价, 即容量电价和电量电价。容量电价和充电站变压器申报容量相关, 充电站配置容量过小, 则无法满足大规模电动汽车进行充电; 配置容量过大, 则会造成不必要的额外成本。文献[4]考虑充电站变压器容量成本, 从总费用和过载运行两个角度去配置变压器容量。文献[5-7]将变压器容量作为约束条件来建立充电站优化模型, 但未考虑充电负荷的自身特性优化变压器容量配置。此外, 建立充电站优化模型可以配置不同的

优化目标,文献[8]以用户充电费用最小为目标,而文献[9]以投资成本最小为目标,但都未考虑将充电站净收益作为优化目标。

储能技术不断发展,给平抑电动汽车充电站负荷,优化配变容量提供了新的技术手段。在低谷期将电能存储起来,当高峰期电网负荷不够时,由储能装置对电动汽车进行充电,起到削峰填谷的作用。文献[10]基于削峰填谷,研究了电力需求侧对规模储能经济评估的方法。文献[11]利用线性规划方法搭建了充电站模型,分析了不同目标函数的最优储能配置。合理的储能配置能降低负荷峰值,减少电动汽车充电站配电变压器容量,提高充电站的经济性。文献[12]考虑充储放回年限最短建立了储能容量模型,但未考虑到充电站配电变压器容量成本。

储能型电动汽车充电站处于初步发展阶段^[13],储能系统的配置对充电站产业发展和配电网稳定运行意义重大^[14]。文中基于不同类型充电站的实测数据,分析了充电站的负荷特性,基于其高峰期持续时间较短,以充电站净收益为优化目标,利用惩罚因子,计算损失用户,优化充电站变压器容量配置。在此基础上,进一步优化配置储能容量,提高充电站经济效益。

1 电动汽车充电站负荷特性分析

充电桩具有负荷采集功能,采样间隔一般为 15 min,为简便描述,将 1 天分为 24 个时段分析其负荷特性。

1.1 充电桩负荷特性

根据采集的数据,统计不同类型直流充电桩的典型日充电负荷数据并进行了曲线拟合,拟合后充电桩的典型日负荷曲线如图 1 所示。

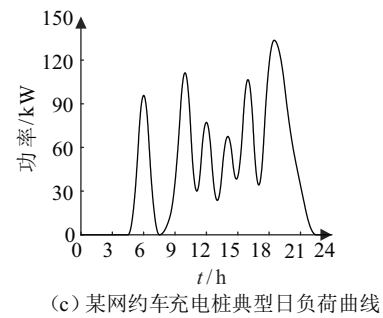
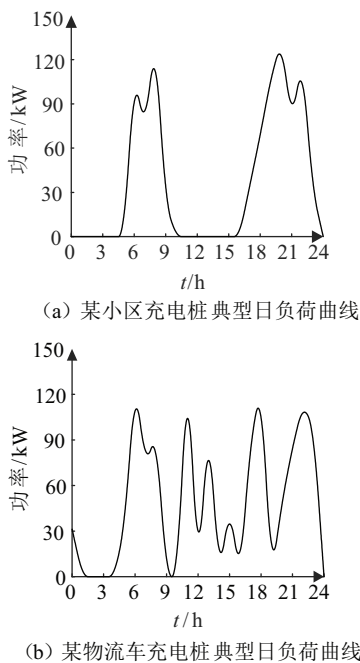


图 1 充电桩典型日充电负荷曲线

Fig. 1 Typical daily charging load curves of different types of charging piles

由图 1 可以看出,不同用途的电动汽车充电产生不同的负荷特性曲线,都存在充电负荷波动大、单台充电桩利用率低等问题。充电站通常有多个充电桩,可以适度平缓充电负荷波动。

1.2 充电站负荷特性

以直流充电桩为主要充电设施的公共快速充电站为例。两种不同规模的充电站典型日充电负荷特性曲线如图 2 所示。

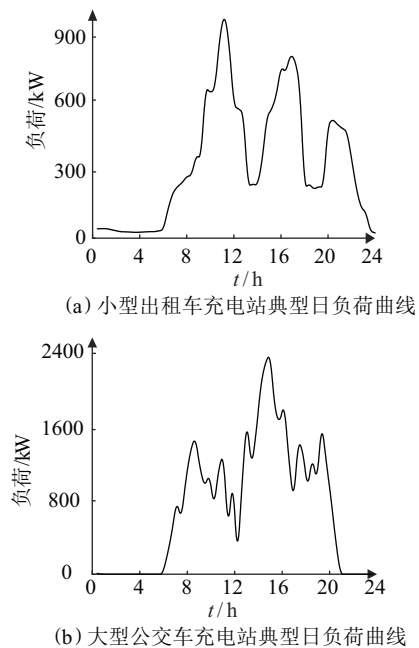


图 2 充电站典型日负荷曲线

Fig. 2 Typical daily load curve of charging station

由图 2 可以看出,多个充电桩集成的充电站可以平抑负荷波动,缓解峰谷差,充电桩的利用率略有提高,但仍然存在负荷峰谷差大、高峰持续时间短、低谷期时间较长的问题。

以两个容量不同的充电站为例,最大充电功率 P_{\max} 分别为 1 160 kW、2 230 kW,其相应的充电桩总充

电容量分别为 1 200 kW、2 400 kW。根据充电站采集数据,统计不同充电功率的时间占比如表 1 所示。

表 1 不同容量充电站充电功率时间占比

Tab. 1 Time ratio of charging power of charging stations with different capacities

类型	95% P_{\max}	90% P_{\max}	85% P_{\max}	80% P_{\max}
小型充电站	0.028 5	0.031 1	0.033 4	0.034 8
大型充电站	0.022 6	0.029 8	0.034 5	0.048 7

通过比较表 1 中不同容量充电站的充电功率时间占比可知,相比于小型充电站,大型充电站尖峰负荷较少些,负荷峰谷差略小,负荷波动略平稳。但两者的充电高峰负荷持续时间都比较短,占比 80% 以上的充电负荷功率占比都比较小,负荷利用率较低。在这样的情况下,为了平抑负荷波动、缓解局部电网压力,在电动汽车充电站配置储能成为不可避免的趋势。由于充电站类型、规模以及配电变压器容量的不同,其所需配置的储能容量也就不同。

1.3 惩罚因子的提出

惩罚因子的设置体现了电动汽车充电站对变压器及储能容量配置的可控性,惩罚因子越大,可控性要求越严格,惩罚费用过大则必然要通过降低配置变压器容量或者加大储能容量,使得净收益最大化。

在未配置储能的情况下,一般的充电站容量配置方法为建立排队模型,合理配置充电设施^[15-17];若考虑在充电站配置储能系统,文献[12]通过设置分时电价、排队系统、调度等方法减小负荷峰谷差来优化配置模型。文献[18]虽在模型中提及了惩罚电量,但只是考虑充电站内部电池储能系统的损失电量得到储能的最优配置。文章将电动汽车用户的损失电量放大为惩罚成本,通过调节这部分损失电量成本可以较为明显地降低充电站变压器及储能的配置容量,从而提高充电站的整体净收益。

2 充电站变压器容量优化配置

由负荷特性分析可知充电站负荷波动大,高峰持续时间短,以最大功率去配置变压器容量,利用率低,经济性不佳,有必要优化电动汽车充电站的容量配置,提高充电站的经济效益。

充电站收益来自于面向用户的售电电量费用,投入成本除一次性投资外,主要来自向电网购电的费用,购电费用包括固定的变压器容量费用和购电电量费用。

降低充电站变压器最大需量可以削减成本,但在高峰时间段内可能存在部分用户无法正常充电,不仅损失电量收益,还会降低用户的满意度。基于成本与收益理论,文中提出将损失电量乘以惩罚性因子考虑到优化模型中,即当充电站容量受限,用户因无法正常

充电损失的充电电量以惩罚性因子放大,计入优化模型。模型如式(1)所示:

$$F = \max\{I - C - L\} \quad (1)$$

式(1)由三部分构成, I 为充电站的年收益; C 为充电站年运行成本; L 为用户损失电量惩罚成本。

2.1 充电站年收益

电动汽车充电站的年收益主要为向电动汽车用户售电的收益 I ,即:

$$I = \sum_{n=1}^N P_{\text{load}}(n) (e_{\text{sell}} + e_{\text{serve}}) \quad (2)$$

式中 N 为年采样次数; $P_{\text{load}}(n)$ 为第 n 个采样时刻充电站的负荷功率,单位为 kW; e_{sell} 为充电站充电电价,单位为元/(kW·h); e_{serve} 为充电站充电服务费用,单位为元/(kW·h)。

2.2 充电站年运行成本

充电站年运行成本包括投资年平均折旧费用 C_1 、从电网购电的费用 C_2 和基本容量费用 C_3 :

$$C_1 = \frac{r_0 (1 + r_0)^a}{(1 + r_0)^a - 1} \times C_T P_e \quad (3)$$

$$C_2 = \sum_{n=1}^N e_{\text{buy}} \times P_{\text{grid}}(n) \quad (4)$$

$$C_3 = 12A \times P_T \quad (5)$$

式中 r_0 为折旧率; a 为充电站充电设备运行年限; C_T 为充电站单位为容量价格,单位为元/kW; P_e 为充电站充电桩总充电容量,单位为 kW; e_{buy} 为从电网购电的电价,单位为元/(kW·h); $P_{\text{grid}}(n)$ 为第 n 个采样时刻充电站从电网吸收的功率,单位为 kW; A 为变压器月基本容量费(根据相关政策 2020 年前免收基本电费^[19],将来充电站需要缴纳这部分费用),单位为元/(kW·月); P_T 为变压器最大需量,单位为 kW。

2.3 充电站惩罚成本

充电站惩罚成本主要来源于配置变压器容量受限而损失的用户充电电量成本 L :

$$L = \beta \times e_{\text{serve}} \times \sum_{m=1}^M [P_{\text{load}}(m) - P_T] \quad (6)$$

式中 β 表示超出充电站变压器容量而损失的用户电量成本惩罚因子; m 表示充电负荷超出变压器容量的采样时刻; M 表示超过变压器容量的全年负荷采样次数。

对于已建成充电站,投资成本主要为静态成本,可以近似用常数表示。和动态运行相关的主要是充电收益、买电成本、变压器基本容量费以及用户流失的惩罚性费用,由于我国目前采用单位电量的充电服务费计算方式,充电站买电、卖电为统一价格,仅需用电量乘以充电服务费即可计算收益。已建成的充电站积累了一年数据,可以根据需要直接统计各种充电量,其年运

行收益计算可简化为:

$$F = W_{\text{total}} \times e_{\text{serve}} - \beta \times W_{\text{lose}} \times e_{\text{serve}} - 12A \times P_T - C_1 \quad (7)$$

式中 W_{total} 为年总充电量,单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; W_{lose} 为年损失电量,即充电高峰时,由于变压器容量不足导致用户无法正常充电损失的电量。

由于充电站年平均投资成本 C_1 为常数,可知年运行收益变量主要为年总充电量、年损失电量、最大需量。变压器最大需量选择大,用户流失电量小,但基本费用高,需要根据充电站用户特性优化最大需量申报。

3 充电站变压器容量和储能协同优化

充电站变压器容量受到局部配网限制,而大容量今后会带来高成本。变压器小容量在高峰时段会导致部分用户充电受限,用户满意度下降。在电动汽车充电站配置储能系统可以降低变压器的容量,提高用户满意度,从而提高充电站的运行效益。

配置储能系统可以降低配电变压器容量,提高用户满意度,但同时产生储能成本,需要根据负荷特性、变压器容量等进行优化配置。在充电站收益目标函数中加入储能系统成本,以充电站年净收益为目标建立充电站配置储能的容量优化模型,如式(8)所示:

$$F = \max\{I - C - L - E\} \quad (8)$$

储能系统的成本 E 为储能电池、功率转换器等电力电子装置的投资,其与储能电池的容量成正比例关系。由于充电站考虑使用梯级利用电池,年单位容量使用成本近似取为常数。文献[20]对梯级利用电池储能系统的初始成本进行了分析,可表示为:

$$E = (C_E \frac{E_b}{s} + C_p P_b + C_t \frac{E_b}{s}) \times \frac{r_0 (1 + r_0)^b}{(1 + r_0)^b - 1} \quad (9)$$

式中 C_E 为折算的储能系统单位容量价格,单位为元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$; E_b 为梯级利用电池储能系统的容量,单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; s 为退役动力电池的重组率; C_p 为储能系统功率转换装置单位为安装成本,单位为元/ kW ; P_b 为电池储能系统最大充放电功率,单位为 kW ; C_t 为梯次电池容量测试与重组费用,单位为元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$; b 为梯级利用电池的使用年限。

假设储能系统每天的充放电效率近似为 1,即配置的储能系统每天充放电功率都能达到其最大值,则它对充电站高峰期的日补充电量可近似取值为 E_b 。由于相关参数已知,梯级利用储能系统的成本可以表示为关于储能容量的一次函数,可设为 $E = B \times E_b$,在式(7)的基础上加入储能成本,可得新的目标函数,如式(10)所示:

$$F = W_{\text{total}} \times e_{\text{serve}} - \beta \times (W_{\text{lose}} - 365E_b) \times e_{\text{serve}} - 12A \times P_T - C_1 - B \times E_b \quad (10)$$

4 算例分析

快速充电站的资源利用率普遍较低,加入储能系

统的充电站能降低其配电变压器容量,提高充电负荷利用率,降低配电成本。

某大型公共充电站的典型日负荷曲线如图 2(b)所示,由图 2(b)分析可知该充电站日充电负荷最大峰值为 2 230 kW,日负荷利用率为 19.56%,负荷波动性大,且负荷低谷持续时间较长。统计该充电站实际充电数据,可以得到该充电站一个月内日充电电量的大小变化,如图 3 所示。由图 3 可以估算充电站全年总充电电量为 438.72 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

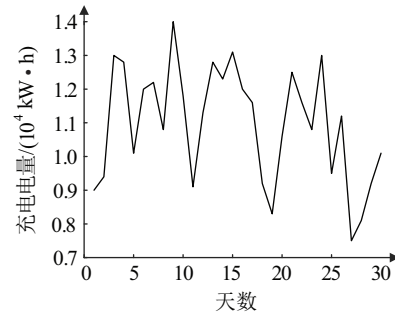


图 3 充电站月充电电量曲线

Fig. 3 Monthly charging power curve of charging station

根据充电站一年数据的统计见表 2,将充电功率分为 10 个占比区间,依次为 $[90\% \sim 100\%]$ 、 $[80\% \sim 90\%]$ 、 \dots 、 $[0\% \sim 10\%]$,例如图 2(b)中充电负荷最大峰值为 2 230 kW,区间 $[90\% \sim 100\%]$ 即表示充电功率位于 2 007 kW ~ 2 230 kW 之间,而负荷利用小时数表示某区间充电功率持续时间占总时间的比例。由表 2 可以看出一年中电动汽车充电功率占比较低的利用小时数较大,而占比较高的充电功率利用小时数都较小,表明该快速充电站负荷利用率较低,充电峰谷差很大,低谷持续时间长。

表 2 大型充电站负荷功率数据统计

Tab. 2 Statistics on load power of large charging station

充电功率占最大功率的比例区间/ kW	小时数/h
$[90\% \sim 100\%]$	449
$[80\% \sim 90\%]$	543
$[70\% \sim 80\%]$	625
$[60\% \sim 70\%]$	831
$[50\% \sim 60\%]$	906
$[40\% \sim 50\%]$	1 372
$[30\% \sim 40\%]$	857
$[20\% \sim 30\%]$	684
$[10\% \sim 20\%]$	479
$[0\% \sim 10\%]$	2 014

文中设置电动汽车充电站的快充电价 $e_{\text{sell}} = 0.9128$ 元/(kW·h), 充电服务费 $e_{\text{serve}} = 1.014$ 元/(kW·h), 为当日北京 92 号汽油每升最高零售价的 15% [21]。通过调查可知表 3 充电站及储能系统的参数。

表 3 充电站及储能系统参数
Tab. 3 Parameters of charging station and energy storage system

参数	数值
月容量费 A /(元/kW)	20
折旧率 r_0	0.06
充电单位容量价格 C_T /(元/kW)	10 000
充电站充电设备运行年限 a /年	20
储能容量价格 C_E /(元/(kW·h))	1 250
储能功率价格 C_P /(元/kW)	1 000
重组率 s	0.9
容量测试与重组费用 C_I /(元/(kW·h))	50
梯级利用电池的使用寿命 b /年	5

目前电动汽车充电站储能系统容量配置常用的求解算法有线性规划法 [11]、遗传算法 [22-23]、粒子群算法 [24-25] 等。文中提出根据最大需量和惩罚因子来优化容量模型并利用数学方法求解, 首先将实际调研的不同类型的充电站充电数据进行统计归类, 得到需要的表格和曲线; 其次因为变压器的容量等级是标准化的, 利用相关参数直接代入函数关系式, 在充电站容量优化模型中更有利于求解。最后, 文中分别考虑了充电站未配置储能和配置储能的两种情况。

4.1 未配置储能

变压器的容量等级是标准化的, 某大型充电站的最大负荷为 2 230 kV·A 左右, 文中考虑从国家标准中选择以下容量等级: $S = 2\ 500$ kV·A、 $S = 2\ 000$ kV·A、 $S = 1\ 600$ kV·A、 $S = 1\ 250$ kV·A, 根据电力行业相关规定, 设定变压器的额定功率因数为 0.9, 最大需量 P_T 可取为 $0.9S$, 即可求出年损失电量 W_{lose} , 将所有已知参数代入式 (2) ~ 式 (7) 中寻求 P_T 的最佳取值。

经过计算可得该大型充电站充电收益约为 444.862 1 万元, 年平均投资成本 C_1 约为 208.981 3 万元。

当 $P_T = 2\ 250$ kW 时, 代入式 (7) 中可得净收益约 127.880 7 万元, 此时充电站最大充电功率未超过变压器最大需量, 也就是说在这种情况下不存在损失电量; 当 $P_T = 1\ 800$ kW 时, 可得充电站损失电量为 19.486 3 万 kW·h, 此时净收益 $F = (192.680\ 7 - 19.759\ 1\beta)$ 万元; 当 $P_T = 1\ 440$ kW 时, $F = (201.320\ 7 - 73.454\ 9\beta)$ 万元; 当 $P_T = 1\ 125$ kW 时, $F = (208.880\ 7 - 159.022\ 5\beta)$ 万元。

根据以上四种情况的分析可以得到充电站年收益 F 与惩罚因子 β 的函数关系, 如图 4 所示。

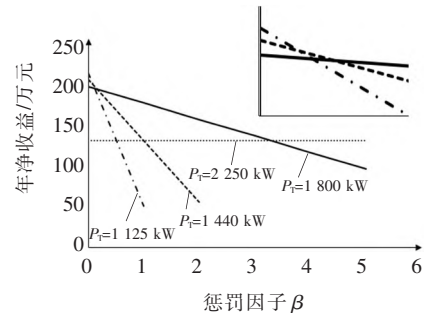


图 4 不同容量等级下年净收益与惩罚因子的关系
Fig. 4 Relationships between annual net income and factors at different capacity levels

由四种情况下的函数关系式求出放大图中其交点, 可以得出以下结论: 当 $0 < \beta \leq 0.088$ 时, 充电站配电变压器最大需量可设置为 1 125 kW; 当 $0.088 < \beta \leq 0.16$ 时, 可以设置为 1 440 kW; 当 $0.16 < \beta \leq 3.280$ 时, 可以设置为 1 800 kW; 当 $\beta > 3.280$ 时, 充电站只能选择配置较大容量的变压器, 但这样会造成资源浪费。

随着惩罚因子 β 的增大, 充电站惩罚成本不断增大, 充电站年净收益呈现不断减少的趋势, 也就意味着当 β 达到最大值以后, 通过减少充电站配电变压器最大需量获得的收益将不足以弥补损失的用户电量惩罚费用, 充电站就会开始亏损。

4.2 配置储能

合理地配置梯次利用电池储能系统的容量不仅可以降低充电站配电变压器最大需量, 还可以提高充电站最大充电功率, 补偿损失电量成本。根据对未配置储能系统的充电站容量优化分析考虑选用以下四个容量等级: $S = 2\ 000$ kV·A、 $S = 1\ 600$ kV·A、 $S = 1\ 250$ kV·A、 $S = 1\ 000$ kV·A。

当 $P_T = 1\ 800$ kW 时, 将表中相关参数代入式 (9) ~ 式 (10) 中, 经过计算可以得到其函数关系。惩罚费用与配置储能的充电站效益直接相关, 在文中得出的配置结果下建立不同惩罚因子下充电站年净收益 F 与储能容量 E_b 的关系, 从而得到其变化趋势, 如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 储能容量的增加使得充电站配置容量增加, 用户可以进行充电因而电量惩罚成本减少。随着 β 的不断增大, 充电站损失用户的电量惩罚成本越来越多, 而储能容量的增长速度变慢, 意味着通过配置储能容量实现效益最大化的弥补程度越来越小, 即存在储能容量的最优值; β 的增大导致电量损失增多, 但合理配置的储能系统发挥作用, 补充充电站损失的电

量使得惩罚成本减少,效益大大提高。综上分析可以得知此算例中储能最优配置容量为 533.87 kW·h。

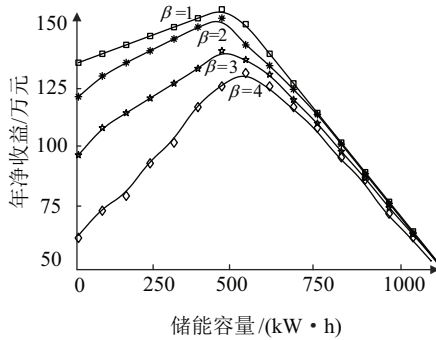


图5 不同惩罚因子下年净收益与储能容量的关系
Fig. 5 Relationship between annual net income and energy storage capacity under different penalty factors

同样地,当充电站配电变压器最大需量 P_T 分别取 1 440 kW、1 125 kW、900 kW 时,通过计算得到其相应的储能容量最优配置结果,分别为 1 570.73 kW·h、2 785.59 kW·h、3 813.64 kW·h。由此分析得知随着充电站配电变压器最大需量的不断减少,需要配置的储能系统容量就不断增加,通过调节惩罚因子 β 可得到其最优值及相应的充电站效益。

5 结束语

文中对不同规模充电站的负荷特性进行了分析,以充电站年净收益为优化目标,考虑惩罚因子建立了充电站容量优化模型,在未配置储能和配置储能的情况下得到了最优配置容量。算例结果表明,只有当通过减少配电变压器最大需量获得的收益能够弥补损失的电量惩罚成本和梯次利用电池储能系统的成本时,充电站才可选择配置储能。此外,不同规模的充电站所需配置的储能容量各有不同,只有通过合理配置储能容量,能够在平抑负荷波动的基础上,提高充电站运行经济性。

参考文献

[1] 周翔, 陈杰军, 谢培元, 等. 基于效用最大化原则的电动汽车充电站负荷特性分析方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 1-8.
Zhou Xiang, Chen Jiejun, Xie Peiyuan, et al. Load demand analyzing method for electric vehicle charging station based on the principle of maximizing utility [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 1-8.

[2] 胡宇航, 皮一晨, 崔静安, 等. 电动汽车充电站负荷建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 107-112.
Hu Yuhang, Pi Yichen, Cui Jing'an, et al. Research on electric vehicle charging station modeling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 107-112.

[3] 李文超. 充电站储能应用典型模式分析及配置方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Li Wenchao. Research on typical mode analysis and configuration meth-

od of energy storage application in charging station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[4] 葛文捷, 黄梅, 张维戈. 电动汽车充电站经济运行分析[J]. 电工技术学报, 2013, 2(2): 15-21.
Ge Wenjie, Huang Mei, Zhang Weige. Economic operation analysis of the electric vehicle charging station [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 2(2): 15-21.

[5] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的电动汽车充电站内有序充电策略[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 967-973.
Zhang Liang, Yan Zheng, Feng Donghan, et al. Two-stage optimization model based coordinated charging for EV charging station [J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 967-973.

[6] 陈静鹏, 朴龙健, 艾芊. 基于改进贪心算法的大规模电动汽车充电行为优化[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 38-44.
Chen Jingpeng, Piao Longjian, Ai Qian. Charging optimization based on improved greedy algorithm for massive EVs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 38-44.

[7] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 36(11): 38-43.
Xu Zhiwei, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Coordinated Charging of Plug-in Electric Vehicles in Charging Stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 36(11): 38-43.

[8] 吴甲武, 邱晓燕, 潘胤吉, 等. 基于改进鸡群算法的电动汽车有序充电策略研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(9): 97-103.
Wu Jiawu, Qiu Xiaoyan, Pan Yinji, et al. Research on orderly charging strategy of electric vehicle based on improved chicken swarm optimization [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(9): 97-103.

[9] 孙宇乐, 刘继春, 刘红超, 等. 考虑充电电池组循环利用的集中充电站容量配置[J]. 电测与仪表, 2016, 53(10): 80-86.
Sun Yule, Liu Jichun, Liu Hongchao, et al. Optimal capacity configuration of the centralized charging station considering rechargeable battery recycling [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(10): 80-86.

[10] 熊雄, 杨仁刚, 叶林, 等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 224-230.
Xiong Xiong, Yang Rengang, Ye Lin, et al. Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 224-230.

[11] 李芹芹, 张维戈, 黄梅. 快速充电站储能系统容量配置的研究[J]. 电气应用, 2017, 36(5): 26-31.
Li Qinqin, Zhang Weige, Huang Mei. Research on the capacity configuration of energy storage system of fast charging station [J]. Electrotechnical Application, 2017, 36(5): 26-31.

[12] 吕跃春, 汪会财, 李志勇, 等. 电动汽车充储放电站储能系统容量配置方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(11): 133-137.
Lv Yuechun, Wang Huicai, Li Zhiyong, et al. Capacity allocation method for energy storagesystem in electric vehicle charging-storage-discharging integrated station [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(11): 133-137.

[13] 朱金卫, 郑正仙, 苏芳, 等. 储能型电动汽车充电站研究进展[J]. 浙江电力, 2017, 36(10): 7-10
Zhu Jinwei, Zheng Zhengxian, Su fang, et al. Research on the Development of Electric Vehicle Charging Station with Energy Storage [J].

- Zhejiang Electric Power, 2017, 36(10): 7-10.
- [14]方超明,张宇,王育飞,等.基于排队理论的储能式快充站容量优化配置[J].现代电力,2017,34(2):62-66.
Fang Chaoming, Zhang Yu, Wang Yufei, et al. Optimized capacity allocation of fast charging station with energy storage based on queuing theory[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(2): 62-66.
- [15]杨校辉,邱俊宏,张娟,等.一种基于综合能源优化调配的充电站运营管理系统研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(5):173-179.
Yang Xiaohui, Qiu Junhong, Zhang Juan, et al. Research on a charging station operation management system based on integrated energy optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 173-179.
- [16]李景丽,时永凯,张琳娟,等.考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(7):94-102.
Li Jingli, Shi Yongkai, Zhang Linjuan, et al. Optimization strategy for the energy storage capacity of a charging station with photovoltaic and energy storage considering orderly charging of electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 94-102.
- [17]何阳,张宇,王育飞,等.储能式快速充电站负荷功率离散化模型建立[J].电力科学与技术学报,2021,36(5):72-78.
He Yang, Zhang Yu, Wang Yufei, et al. Discrete modeling of load power for energy storage fast charging station[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 72-78.
- [18]王博闻,李军徽,范兴凯,等.计及运行和惩罚成本的储能容量优化配置方法[J].吉林电力,2017,45(2):6-10.
Wang Bowen, Li Junhui, Fan Xing kai, et al. Optimal Capacity Allocation of Energy Storage Considered the Cost of Operation and Punishment [J]. Jilin Electric Power, 2017, 45(2): 6-10.
- [19]国家发展改革委.关于电动汽车用电价格政策有关问题的通知[Z].发改价格[2014]1668号,2014-07-22.
National Development and Reform Commission. The notification about the problem on electric vehicle electricity price policy[Z]. 发改价格[2014]1668号,2014-07-22.
- [20]韩晓娟,张娅,修晓青,等.配置梯次电池储能系统的快速充电站经济性评估[J].储能科学与技术,2016,5(4):514-521.
Han Xiaojuan, Zhang Hua, Xiu Xiaoqing, et al. Economic evaluation of fast charging electric vehicle station with second-use batteries energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(4): 514-521.
- [21]北京市发展和改革委员会.关于本市电动汽车充电服务收费有关问题的通知[Z].京发改[2015]848号,2015-04-24.
Beijing Municipal Commission of Development and Reform. The notification about the problem on the electric vehicle charging service charge in Beijing[Z]. 京发改[2015]848号,2015-04-24.
- [22]杨钰君,于艾清,丁丽青.基于停车需求的电动汽车移动储能多目标充放电协调控制[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):65-77.
Yang Yujun, Yu Aiqing, Ding Liqing. Multi-objective coordinated control of charging and discharging for mobile energystorage of electric vehicles based on parking demand[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 65-77.
- [23]徐杨杨,张新松,陆胜男,等.多重随机特性下的电动汽车充电网络机会约束规划[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):30-39.
Xu Yangyang, Zhang Xinsong, Lu Shengnan, et al. Chance constrained optimization of an electric vehicle charging network with multiple stochastic characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 30-39.
- [24]宋明曙,李中伟,宋爽,等.基于改进粒子群算法的智能小区电动汽车用电优化策略[J].自动化技术与应用,2022,41(12):17-22,27.
Song Mingshu, Li Zhongwei, Song Shuang, et al. Research on the optimization strategy of electric vehicle orderly charge and discharge in intelligent community [J]. Techniques of Automation and Applications, 2022, 41(12): 17-22, 27.
- [25]张良,刘禹含,冷祥彪,等.计及风-光-蓄多电场竞价的电动汽车购电策略研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(9):72-81.
Zhang Liang, Liu Yuhuan, Leng Xiangbiao, et al. Research on an electric vehicle electricity purchasing strategy based on wind-PV-pumped storage multiple electric fields bidding[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 72-81.

作者简介:



张怡(1995—),女,硕士研究生,从事储能优化配置研究。Email:l056628856@qq.com

郝思鹏(1971—),男,教授,博士,主要从事电力系统低频振荡、配电自动化研究。Email:hshhhdhy@126.com

收稿日期:2020-05-25;修回日期:2023-01-29
(任美辉 编发)