

快速充电站储能系统容量配置的研究

在电动汽车快速充电站中配置储能系统，可以起到减少充电站配电容量、减轻快速充电对电网冲击和降低综合费用等作用。基于线性规划建立具有储能系统的充电站综合造价数学模型，采用Lingo优化软件求解最优的充电站配电容量及储能容量，并对充电站扩容、电池梯次利用方面做了分析计算。实例验证这种结合储能技术的建站模式能够节约成本，提高资源利用率。

李芹芹 张维戈 黄 梅/北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心

0 引言

近年来，由于传统汽车工业的发展带来的全球变暖、环境污染和石油资源枯竭等一系列重大问题，电动汽车以其具有清洁环保、运行灵活等优点受到越来越多的关注。充电站作为电动汽车的基础设施，近年来随着电动汽车的快速发展而被广泛建设，但是通过对已有充电站的运行数据分析发现，充电站普遍存在变压器容量选择过大的问题。这会增加充电站的初始投资费用，不利于充电站的推广建设^[1-2]。另外，大功率快速直流充电站在实际应用中负荷波动较大，峰值功率和平均功率差距大，充电站大部分时间的负荷都低于最大负荷，变压器的运行能力未得到充分发挥。

目前，国内外学者对储能系统的容量优化配置进行了大量研究，文献[3-7]采取了不同的目标函数，如以系统运行费用最低、等年值投资费用最低等，采用了不同的优化算法，其中以粒子群优化算法、遗传算法为代表。主要是寻求

储能单元的最优容量配置，提高整个系统运行的经济效益。文献[8]指出国内传统的充电站变压器选择方法基本是根据充电站内所有用电设备视在功率之和 S_c 估算变压器的容量，然后考虑一定的裕度，最终选择大于且最接近 S_c 的变压器容量值。上述文献研究了不同的储能容量配置方法和充电站变压器的选择方法，但少有将两者结合起来，即在充电站中配置储能系统的研究。因此本文采用线性规划方法搭建含储能系统的快速充电站模型，对不同目标函数的最优储能电池容量配置进行求解，并对充电站扩容与电池梯次利用两方面的储能容量配置进行分析计算，为快速充电站的不同场景下的储能容量配置提供参考。

1 快速充电站的储能容量配置

1.1 总体思路

将快速充电站的运行安全性指标和储能系统的输出限制指标转换为容量配置模型中的约束条件，综合考虑电网和负荷需求，以系统投入总成本最小、负荷峰值降低20%以上为目标函数，构建快速充电站的储能配置容量模型。针对不同的优化目标，计算所需的储能最大充放电功率以及所需的容量配置；采用线性规划研究优化程度与储能系统功率、容量关系，不同储能功率约束条件下，优化目标的优化程度以及储能容量配置的关系。

1.2 目标函数

容量优化配置的目的是在满足系统



李芹芹/硕士研究生

关键词/Keywords

电动汽车 ·
快速充电站 ·
电池储能 ·
容量配置 ·

国家能源应用技术研究及工程示范项目：基于分层储能的主动配电网应用示范（NY20150303）。

性能指标的前提下,使得系统总成本最低,主要包括以下几个方面。

充电站变压器建设成本,储能电池购买、安装成本计算公式为

$$f_1 = f_{cr}(C_{cr}P_c + C_{cr}E_{ss}) \quad (1)$$

$$f_{cr} = \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \quad (2)$$

充电站、储能系统的年运行维护成本计算公式为

$$f_2 = f_{br}(C_{cr}P_c + C_{cr}E_{ss}) \quad (3)$$

每天的基本容量费计算公式为

$$f_3 = (32/30)P_c \quad (4)$$

每天从电网购电成本计算公式为

$$f_4 = \int_1^{24} C_b(t) \times P_b(t) dt \quad (5)$$

则系统总成本的优化目标函数为(以天为单位)

$$F = \min \left\{ \frac{(f_1 + f_2)}{365} + f_3 + f_4 \right\} \quad (6)$$

式中, m 为系统的工作年限; r_0 为折旧率; f_{br} 为年运行维护系数; $C_b(t)$ 为配电网的实时电价,元/kW·h; $P_b(t)$ 为从电网吸收的功率; C_{cr} 为充电站的初始单位投资成本,元/kW; P_c 为充电站的配电容量; C_{cr} 为储能单元的单位初始投资成本,元/kW·h; E_{ss} 为电池组储能单元的容量。

1.3 约束条件

约束条件应考虑储能荷电状态、储能最大功率限幅和瞬时功率平衡等方面的限制,以确保储能容量优化的合理性。

(1) 功率平衡约束

$$P_B(t) = P_L(t) + P_c(t) \quad (7)$$

式中, $P_B(t)$ 为电网输出功率; $P_L(t)$ 为负荷需求功率; $P_c(t)$ 为储能充(放)电功率,充电为正,放电为负。

(2) 电网输出功率约束

储能需要平抑负荷波动,降低负荷的峰值20%以上,故电网输出功率约束为

$$P_B(t) \leq kP_{Lmax} \quad (8)$$

式中, P_{Lmax} 为负荷的最大功率; k 为降低负荷峰值的比例系数。

(3) 储能电池运行约束

考虑储能电池的寿命,储能电池的放电倍率需限制在一定范围内,此处选取储能电池的放电倍率为1C。考虑储能系统一天的SOC能回到初始值,储能系统一天的充放电电量和为零。考虑系统的动态特性,在蓄电池进行充放电时,保证蓄电池的容量和充放电功率维持在正常的工作状态中,延长蓄电池的使用寿命。储能一天中任意时刻的荷电量约束为

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

$$-P_{max} \leq P_e \leq P_{max} \quad (10)$$

式中, SOC_t 为蓄电池的荷电状态; P_e 为蓄电池的充放电功率。

2 储能容量优化配置求解方法

线性规划由前苏联经济学家康托洛维奇提出,它主要研究的是在线性等式(或不等式)约束条件下,使某一线性目标函数取得最大值(或最小值)的问题。线性规划的一般形式为

$$\max z = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} a_{11}x_1 + \cdots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + \cdots + a_{mn}x_n \leq b_m \\ x_1, \cdots, x_n \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $x_j(j=1, \cdots, n)$ 为待定的决策变量,已知的系数 a_{ij} 组成的矩阵

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (13)$$

称为约束矩阵,条件 $x_j \geq 0(1 \leq j \leq n)$ 称为非负约束。满足线性规划所有约束条件的向量 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n)^T$ 称为线性规划问题的可行解,所有可行解组成的集合称为可行域,使线性规划的目标函数达到最优值的可行解称为线性规划问题的最优解。

对于一般的线性规划问题,目标函数包括利润、费用和产量等,其约束条件涉及经济、生产活动、资源和运输等许多方面。因此,这种方法作为服务于经营管理领域数学的一个分支而被广

泛研究。本文要优化的是含储能的电动汽车快速充电站的容量配置问题，模型的目标函数是包含充电站、储能等投资和运行维护的总费用，模型的约束条件为节点功率平衡、全网功率平衡及一些运行和限制参数等，它们都是线性的，因此是一个线性规划问题。本文采用Lingo软件求解储能容量配置，求解流程图如图1所示。

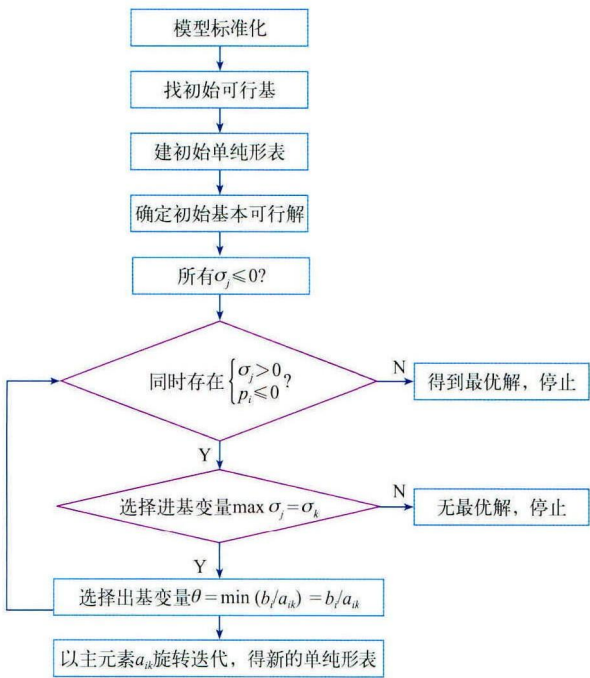


图1 单纯形法求解流程图

单纯形法求解线性规划问题的步骤如下：

- 1) 将线性规划问题转化为标准型，找到初始可行基，建立初始单纯形表。
- 2) 检验各非基变量的检验数，如果所有检验数都小于等于0，则已得到最优解；否则，转下一步。
- 3) 最大正检验数对应的变量作为进基变量；极小正比准则决定出基变量；进行迭代运算。
- 4) 重复步骤2)和步骤3)直到得到最优解。

3 算例分析

某电动公交场站共计8台直流450 kW充电桩，至2015年6月该充电站共有58辆快速充电纯电动公交车。取典型日负荷曲线如图2所示，负荷高峰出现在9：30～11：30和12：30～14：00和18：00～20：00，负荷低谷出现在23：00～07：00，充电站的峰值负荷达到1 261 kW，而日平均负荷

仅为282 kW，峰值功率和平均功率差距很大；超过1 000 kW的总电量仅占一天总电量的0.83%，充电站大部分时间的负荷都低于最大负荷，变压器的运行能力未得到充分发挥。

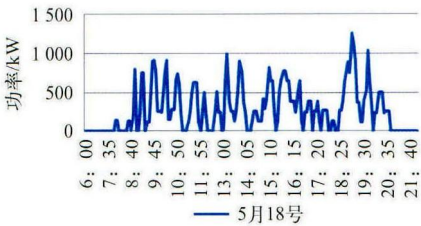


图2 某快速充电站典型日负荷曲线

通过调研，选取快速充电站及储能系统的参数如表1所示，配电网实时电价如表2所示。

表1 快速充电站及储能系统参数

系统参数	数值
变压器价格/(元/kV·A)	220
变压器寿命/年	20
储能电池价格/(元/kW·h)	2 500
储能电池寿命/年	7
运行维护系数	0.01
负荷比例系数k	0.8
荷电量SOC	0.1～0.95
折旧率r ₀	0.06

表2 配电网实时电价

配电网实时电价	元/kW·h
谷时段0：00～7：00	0.394 6
平时段7：00～10：00	0.695 0
峰时段10：00～15：00	1.004 4
平时段15：00～18：00	0.695 0
峰时段18：00～21：00	1.004 4
平时段21：00～23：00	0.695 0
谷时段23：00～24：00	0.394 6

为简化计算在此假定充电机的功率因数为1.0。

3.1 储能优化配置结果

基于上述对快速充电站的输出功率和储能单元容量的分析，建立目标函数模型。在满足系统安全性的前提下，使得系统总的费用最小，最大负荷降低20%以上，其目标函数表达式为

$$F = \min \left\{ \frac{(f_1 + f_2)}{365} + f_3 + f_4 \right\} \tag{14}$$

将上述参数代入式（14）求得目标函数为

$$F = 1.125 2P_c + 1.295 4E_{ss} + \sum_0^{24} C_b \times P_b \quad (15)$$

对目标函数进行求解，得到系统容量的优化配置结果如表3所示。

表3 储能容量优化配置结果

限制峰值功率/kW	1 000	900	800	700	600	500	400
峰值功率/kW	914	880	789	630	575	482	386
总费用/元	5 209	5 199	5 181	5 119	5 081	5 048	4 998
储能容量/kW·h	221	255	346	505	560	653	749

由表3可看出负荷峰值降低得越多，所需的储能容量越大，总费用越低。因为储能电池容量越大，移峰填谷的作用越明显，可通过的谷电价时充电峰电价时放电获得的收益越大，而且快速充电桩需配置的变压器容量越小，相应的基本容量费也越小，所以总费用也越小。当限制充电桩的峰值功率为900 kW时，充电桩输出功率以及从电网购电功率曲线如图3所示，储能充放电功率曲线如图4所示，储能容量变化曲线如图5所示。加入储能系统前后结果对比如表4所示。

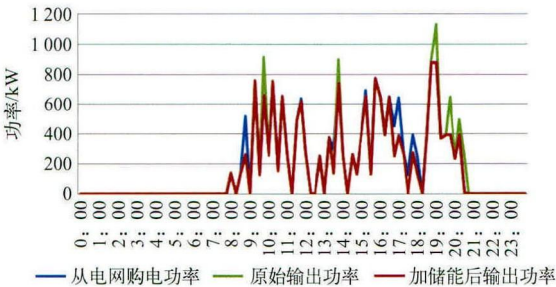


图3 充电桩输出功率曲线

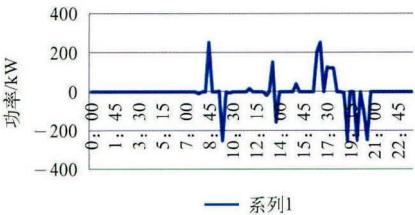


图4 储能充放电功率曲线

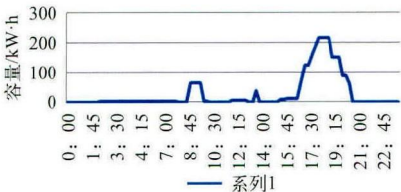


图5 储能容量变化曲线

表4 结果对比

	不加储能	加储能
总费用(元/天)	6 434.4	5 199
负荷最大值/kW	1 135	880

由表4可看出加入储能系统后，利用电网的峰谷电价差可以节约费用，提高系统经济性；且加入储能系统后，负荷的最大值降低至880 kW，起到了平抑负荷波动的作用。

3.2 减少充电桩扩容容量

传统的扩容需要对某一线路进行升级或者增建，包括升级或者增建变压器、配电线路等。目前北京城区扩容已经达到了1万元/kW，扩容成本太高，且采用扩容，增建的设备只在一天中持续时间很短的高峰时段投入使用，其余大部分时间都是处于闲置状态，资源利用率较低，而采用储能技术可以很好地解决这个问题。它通过减少输电网容量需求，延缓电网升级和增建以降低成本。假设配电网能为充电桩建设可以提供的配电容量为600 kW，采用储能系统进行优化配置，减少扩容容量需求。此时目标函数为

$$F = 1.125 2P_c + 1.295 4E_{ss} + \sum_0^{24} C_b \times P_b \quad (16)$$

对目标函数进行求解，得到系统容量的优化配置结果如表5所示。

表5 储能容量优化配置结果

需扩容百分比(%)	20	30	40	50	60	70
峰值功率/kW	914	789	670	562	451	342
采用储能总费用/元	5 203	5 181	5 154	5 106	5 079	5 041
直接扩容总费用/元	5 739	6 030	6 307	6 559	6 818	7 072
储能容量/kW·h	221	346	465	621	684	793

由表5可看出采用储能系统解决扩容问题后，整个系统的经济性有了很大的提高，且加入储能系统后，负荷的最大值也不同程度地降低了，具有平抑负荷波动的作用。

3.3 电池梯次利用

根据目前国内外的研究，动力电池的实际容量衰退至标称容量的70%~80%后就应该停止在电动汽车上使用，这些电池直接淘汰将造成严重的

资源浪费和环境污染。通过检测，可将一部分性能较好的单体电池模块挑出重组用作储能电池，形成动力电池的梯次利用。考虑动力电池梯级利用的情况下，以快速充电站储能系统为研究目标，建立系统容量优化配置模型。

系统初始投资成本包括充电站建站成本、梯次电池购买和安装成本，而系统的主要初始投资成本为

$$f_a = f_{cr} \left[C_{cr} P_c + (C_{ef1} + C_{ef2}) \frac{E_{ss1}}{s} \right] \quad (17)$$

$$f_{cr} = \frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \quad (18)$$

充电站、储能系统的年运行维护成本为

$$f_2 = f_{br1} (C_{cr} P_c + C_{ef1} E_{ss1}) \quad (19)$$

每天的基本容量费及从电网购电费用同上。

则系统总成本的优化目标函数为（以天为单位）

$$F = \min \left\{ \frac{(f_a + f_2)}{365} + f_3 + f_4 \right\} \quad (20)$$

式中， m 为系统的工作年限； r_0 为折旧率； s 为重组率； f_{br1} 为年运行维护系数； C_{cr} 为充电站的初始单位投资成本，元/kW； P_c 为充电站的配电容量； C_{ef1} 为梯次储能单元的单位初始投资成本，元/kW·h； C_{ef2} 为梯次储能单元的单位容量测试和重组费用，元/kW·h； E_{ss1} 为电池组储能单元的容量。

约束条件同上。

通过调研，选取快速充电站及梯次电池的参数如表6所示。

表6 快速充电站及梯次电池参数

系统参数	数值
变压器价格/(元/kV·A)	220
变压器寿命/年	20
梯次电池价格/(元/kW·h)	300
重组率 s	0.8
储能电池寿命/年	4
容量测试和重组费用/(元/kW·h)	60
变压器运行维护系数	0.01
梯次电池运行维护系数	0.02
荷电量SOC	0.1~0.8
折旧率 r_0	0.06

将上述参数代入式（20），求得目标函数为

$$F = 1.1252 P_c + 0.364 E_{ss} + \sum_0^{24} C_b \times P_b \quad (21)$$

对目标函数进行求解，得到系统容量的优化配置方案如表7所示。

表7 系统容量优化结果

限制峰值功率/kW	峰值功率/kW	总费用/元	储能容量/kW·h
1 000	947	5 042	188
900	858	4 968	276
800	774	4 871	361
700	674	4 776	461
600	514	4 570	630
500	454	4 527	681

由表7可看出加入梯次储能电池后，不但提高了经济效益，而且负荷的最大值降低了43.8%，平抑负荷波动的作用非常明显。

由上述方案可看出，在快速充电站中加入储能系统不但可以提高经济性，而且降低了负荷的最大值。随着电动汽车的蓬勃发展，电动汽车数量会大幅度增加，相应的充电站的配电容量也需扩大。目前像北京这种大城市可采用储能系统代替扩容来大幅度降低成本，提高经济效益。淘汰的车用动力电池梯次利用可以节约成本、平抑负荷波动。

4 结束语

本文建立了含电池储能系统的电动汽车快速充电站容量优化配置模型，利用某快速充电站负荷典型数据作为已知条件，采用线性规划建模并利用Lingo作为求解的优化软件，对系统进行合理的储能容量优化配置。

1) 储能系统可用于充电站的削峰填谷，对其实行特殊的充放电控制，可以降低负荷峰值从而减小充电站的配电容量，进而降低了充电站建设成本。

2) 利用电网的峰谷分时电价降低充电站的运行费用，在谷电价时从电网买电储存在蓄电池中，在峰电价时蓄电池进行放电可以提高充电站运行经济效益。

3) 采用储能系统将负荷的峰值降低20%以上作为约束条件，可以达到平抑负荷波动减轻快速

充电对电网冲击的效果。

4) 本文还对储能用于充电站扩容与电池梯次利用方面的经济性作了分析计算, 为求解不同场景下的储能容量配置提供参考。

参考文献

[1] 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, 28 (2): 15-21.

[2] 胡景生. 变压器经济运行 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1998.

[3] 张颖达, 刘念, 张建华, 等. 含电动汽车充电站的风光互补系统容量优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (15): 126-133.

[4] Codemo C G, Erseghe T, Zanella A. Energy storage optimization strategies for smart grids [C]. IEEE International Conference, 2013: 4089-4093.

[5] 余岳, 栗梅, 孙尧, 等. 计及电动汽车的微电网储能单元容量优化 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (6): 1261-1267.

[6] 杨佩佩, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析 [J]. 电网技术, 2009, 33 (20): 38-42.

[7] Lin L, Li L, Jia L. An optimal capacity configuration method of wind/PV and energy storage co-generation system [C]. PES General Meeting | Conference & Exposition, IEEE, 2014.

[8] 滕乐天. 电动汽车充电机 (站) 设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[9] 常雨芳, 王粟, 黄文聪, 等. 线性规划问题计算机求解方法研究 [J]. 软件导刊, 2012, 11 (9): 25-26.

[10] 夏翔, 雷金勇, 甘德强. 储能装置延缓配电网升级的探讨 [J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24 (3): 33-39.

[11] 刘念, 唐霄, 段帅, 等. 考虑动力电池梯次利用的光伏换电站容量优化配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (4): 34-44.

(收稿日期: 2016-06-08) **EA**

(上接第25页)

信息可有效区分, 并获取到了部分优化前被掩盖在噪声中的有效信号, 壁厚分辨率由2 mm提高至1 mm, 数据信噪比得到很大提高, 由此能够更准确地识别套管信息并提高测井数据的解释效率。

5 结束语

在瞬变电磁信号噪声抑制方面, 实际测试中只要根据具体情况选择适当方法, 就能有效地抑制电磁噪声的影响。但无论采用哪种方法, 最后运用积分采样方法进行处理, 均可以得到更好的抑制效果。实验结果也表明, 运用积分采样方法对提高信号的信噪比作用明显, 有效信号被累积, 削弱了噪声的影响, 使得实时采集并以软件方式显示的测量信号质量大大提高, 有效地提高了测量数据的质量与解释的可靠稳定性。

参考文献

[1] 牛之琰. 时间域电磁法原理 [M]. 长沙: 中南工

业大学出版社, 1992.

[2] 嵇艳鞠. 浅层高分辨率全程瞬变电磁系统中全程二次场提取技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[3] 李实, 宋建平, 等. 瞬变电磁仪中几种干扰的消除方法 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 35 (4).

[4] Buselli G, Cameron M. Robust statistical methods for reducing sferics noise contaminating transient electromagnetic measurements [J]. Geophysics, 1996, 61 (6): 1633-1646.

[5] 潘浩, 李力, 等. 差分输入双积分电路在热电阻测温中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1312-1315.

[6] 宋汐瑾. 生产井瞬变电磁探测理论与方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

[7] 嵇艳鞠, 林君, 等. 瞬变电磁法中数据取样处理方法研究 [J]. 物探与化探, 2003, 27 (2): 142-145.

(收稿日期: 2016-02-18) **EA**