

基于自适应变异粒子群算法的居民小区电动汽车优化充电策略

针对引入电动汽车和光伏发电的居民小区,首先根据小区内电动汽车的运行特性建立了电动汽车的充电负荷估算模型;再结合居民小区不同季节一天的光伏输出曲线和居民常规用电负荷,以平抑小区配电网负荷波动和减少电动汽车用户充电电费为目标,建立了电动汽车优化充电的多目标优化数学模型;在满足用户充电需求的条件下,调整电动汽车的充电负荷曲线,得到电动汽车的充电计划安排。基于小区的实际情况设计了仿真算例,并通过自适应粒子群优化算法进行了求解,仿真结果表明,利用文中建立的模型对电动汽车的充电行为进行引导,能较好地实现平抑负荷波动和降低充电电费的目的。

庞松岭¹ 张超² 张帝³ 刘汉炜⁴ 严乙桢³/1.海南电网有限责任公司
2.北京亿利智慧能源科技有限公司 3.北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心 4.湖南大学电气与信息工程学院



庞松岭/高级工程师

关键词/Keywords

居民小区·
电动汽车·
负荷估算·
优化充电·
自适应粒子群算法·

全球的能源危机和环境污染问题使电动汽车具有良好的发展前景^[1],电动汽车产业也是国家七大战略新兴产业之一。电动汽车大规模地接入,会对电网特别是局部配电网造成一定的影响^[2],为利用或尽量减小这一影响,国内外学者做了很多相关的研究工作:文献[3]总结了规模电动汽车充电功率需求的影响因素及估算方法;文献[4]列出了一些电动汽车对电网的影响及相对应的控制方式,并提供了一些解决办法;文献[5]通过电动汽车储能来降低分布式发电对配电网的影响,并且提高分布式电能的利用率;文献[6-7]通过控制充电功率和充电时间等对电动汽车进行有序充电引导,以实现降低线损和峰谷差等目标,或者从充换电站的角度出发考虑,实现

国家科技支撑计划2013年重大项目(2013BAA01B03)。

电动汽车充换电站的经济运行^[8]。

本文选择有光伏和电动汽车接入的居民小区为应用场景,在估算电动汽车充电负荷、不同季节光伏出力曲线和居民小区常规用电负荷曲线的基础上,采用改进的自适应变异粒子群优化算法求解居民小区内电动汽车的优化充电策略,引导电动汽车充电,在改善小区配电网负荷特性的同时,还降低了电动汽车用户的充电成本,这对于推动电动汽车进入家庭、合理利用电能以及促进整个电动汽车产业的发展是非常有意义的。

居民小区各类负荷估算

1. 电动汽车充电负荷估算

电动汽车的充电负荷主要与电动汽车起始充电时刻和充电时长相关,而起始充电时刻是由电动汽车用户的到家时间决定的,充电时长主要与电动汽车的行驶里程和充电倍率相关。

目前电动汽车还没有大规模运营,只能通过统计燃油车的相关规律来代替电动汽车。对北京市某小区的私家车用户进行统计,回家时间主要分为三种:一是正常朝九晚五的上班族,到家时间基本服从 $N(17.6, 1.3)$ 的正态分布,这类用户占的比重最大;二是加班或者上半夜班的用户,到家时间基本服从 $N(0.7, 1.6)$ 的正态分布;三是少部分后半夜上班的人,到家时间基本服从 $N(7.8, 1.22)$ 的正态分布。三类用户所占的比例分别为0.68、0.24和0.08。

电动汽车行驶里程的规律参考文献

[9], 根据2001年美国交通部对全美家用车辆的调查结果, 对统计数据进行归一化处理, 用极大似然估计的方法将日行驶里程数近似为对数正态分布, 具体如下

$$f_D(x) = \frac{1}{x\sigma_D\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right] \quad (1)$$

式中, $\sigma_D = 0.88$; $\mu_D = 3.20$ 。

目前大部分私人用电动汽车的常规充电功率约为3 kW, 根据以上相关信息, 可以通过蒙特卡洛计算机仿真模拟方法, 求出包含上述三类用户的居民小区平均每天一辆电动汽车的充电功率需求, 如图1所示。

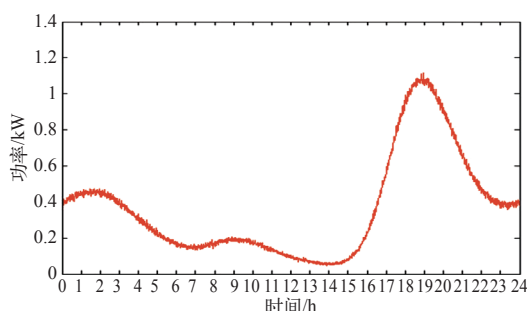


图1 电动汽车一天平均充电功率需求

根据电动汽车平均一天的充电功率需求曲线, 只要设置居民小区的电动汽车用户数量, 就可以求出相应规模电动汽车的充电负荷曲线。

2. 光伏出力曲线和常规用电负荷

固定铺设面积的光伏出力曲线主要与光照强度和温度相关, 在实际条件下主要表现为天气变化和季节性变化。通过对某楼顶10 kW光伏发电系统功率输出数据进行统计和处理, 可得不同季节该光伏发电系统满发的出力曲线, 如图2所示。

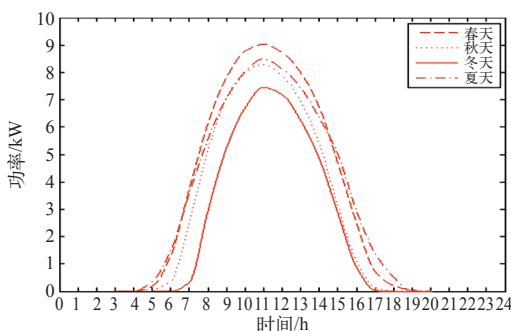


图2 四季光伏满发出力曲线

居民小区的负荷曲线主要和小区的用户规模相关, 通过对北京市某小区居民楼的实际负荷数据进行统计, 可得夏季和冬季每户平均家庭常规用电负荷曲线, 如图3所示。

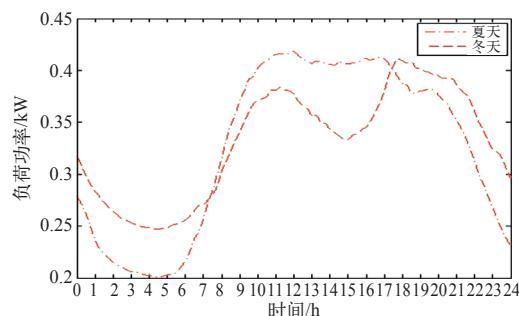


图3 某小区每户平均家庭常规负荷曲线

电动汽车优化充电模型

1. 目标函数

本文以平抑小区配电网的负荷波动和降低电动汽车用户充电电费为小区电动汽车充电优化的目标函数。以分钟为单位, 将一天分为1 440 min。

1) 以平抑负荷波动为目标函数, 即

$$F_1 = \min \sum_{j=1}^{1440} (P_{Lj} + P_{Cj} - P_{pvj} - P_{av})^2 \quad (2)$$

$$P_{av} = \sum_{j=1}^{1440} P_{Lj} / 1440 \quad (3)$$

式中, P_{Lj} 为j min小区内常规用电负荷; P_{av} 为调整前的小区日均用电负荷; P_{Cj} 为j min小区内电动汽车充电功率; P_{pvj} 为j min小区光伏输出功率。

2) 以用户电费最少为目标函数, 即

$$F_2 = \min \sum_{j=1}^{1440} (P_{Lj} + P_{Cj} - P_{pvj}) C_j / 60 \quad (4)$$

式中, C_j 为j min的电价。

针对上述两个目标, 考虑两者目标函数的量纲不同, 对每个目标函数进行规范化, 采用线性加权和法将多目标优化问题转化为单目标优化问题, 具体如下

$$F = \min(\gamma_1 \frac{F_1}{F_{1max}} + \gamma_2 \frac{F_2}{F_{2max}}) \quad (5)$$

式中, F_{1max} 和 F_{2max} 分别为在未进行优化情况下的目标函数值; γ_1 和 γ_2 分别为两个目标函数 F_1 和 F_2 所对

应的权系数,并且保证两者之和为1,即 $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ 。

2. 约束条件

居民小区电动汽车充电优化调度的约束条件主要满足用户使用方面和电网运行的要求。对于用户使用方面的要求主要体现在用户开始充电时间和充电时长;对于电网运行的要求主要体现在总功率不能超过电网节点功率的限制。

1) 用户需求约束,即

$$t_{\text{back}} < s < t_{\text{leave}} \quad (6)$$

$$s + t_{\text{charge}} < t_{\text{leave}} \quad (7)$$

式中, t_{back} 为用户回家的时间; s 为电动汽车开始的充电时刻; t_{leave} 为用户离开家的时间; t_{charge} 为电动汽车充电时长。

本约束条件的要求是要保证电动汽车在用户离开家的时间之前完成充电。

2) 电网运行约束,即

$$P_{\min} \leq P_{Lj} + P_{Cj} - P_{pvj} \leq P_{\max} \quad (8)$$

式中, $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为电网节点功率的最小值和最大值。

本约束条件的要求是要保证小区在引入电动汽车充电负荷和光伏发电输出的情况下,电网节点的功率要维持在电网的合理安全范围之内。

3. 求解方法

居民小区电动汽车的优化充电问题是一个多维、多变量、多约束条件以及非线性的优化问题,线性规划等经典优化算法难以解决。这里采用粒子群优化算法,考虑到基本粒子群算法容易陷入局部最优的问题,本文将采用改进的自适应变异粒子群优化算法进行求解。

粒子群算法即模拟鸟群的捕食行为,通过鸟群的集体协作达到群体最优值,算法通过式(9)和式(10)实现粒子位置和速度的更新,粒子群算法相关理论可参考文献[10],这里不再赘述。

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (9)$$

$$X_{id}^{(k+1)} = X_{id}^k + V_{id}^{(k+1)} \quad (10)$$

式中, ω 为惯性权重,一般在0.1~0.9之间取值; $d=1,2,\dots,D$; $i=1,2,\dots,n$; k 为当前迭代次数; V_{id} 为粒子的速度; X_{id} 为粒子的位置; c_1 和 c_2 为非负的常数,称为加速度因子; r_1 和 r_2 为0~1区间的随机数。

粒子群优化算法存在早熟收敛现象,需要对惯性权重和学习因子进行改进。对于惯性权重 ω ,若 ω 在0.5~1之间随机取值,则实验表明该算法比线性递减策略准确度更高,收敛速度更快^[11],本文对于惯性权重 ω 的取值为

$$\omega = 0.5 - 0.5 \text{rand} \quad (11)$$

对于学习因子 c_1 和 c_2 采用非线性反余弦加速, c_1 先大后小,而 c_2 先小后大,能解决陷入局部最优的问题。基本思想是搜索初期粒子飞行主要参考本身的历史信息 c_1 ,到了后期则更加注重群体信息 c_2 ,即

$$c_1 = c_{1e} + (c_{1s} - c_{1e}) \left[1 - \frac{\arccos(-\frac{2k}{\text{Maxgen}} + 1)}{\pi} \right] \quad (12)$$

$$c_2 = c_{2e} + (c_{2s} - c_{2e}) \left[1 - \frac{\arccos(-\frac{2k}{\text{Maxgen}} + 1)}{\pi} \right] \quad (13)$$

式中, c_{1s} 和 c_{2s} 为迭代的初始值; c_{1e} 和 c_{2e} 为迭代的终值; Maxgen 为算法迭代总次数。本文取值为: $c_{1s}=2.5$, $c_{2s}=0.5$, $c_{1e}=0.5$, $c_{2e}=2.5$ 。

在修改惯性权重和学习因子的基础上,在粒子群优化算法的基本框架中增加随机变异算子,通过对群体极值 g_{best} 的随机变异来提高粒子群算法跳出局部最优解的能力,让算法在发生早熟收敛时,能够进入解空间的其他区域继续进行搜索,直到最后找到全局最优解^[12]。

设 f_i 为第 i 个粒子的适应度(目标函数值),则整个群体平均适应度表达式为

$$f_{\text{avg}} = \frac{1}{\text{sizepop}} \sum_{i=1}^{\text{sizepop}} f_i \quad (14)$$

式中, sizepop 为粒子总数。

确定粒子群归一化定标因子 f 为

$$f = \begin{cases} \max\{f_i - f_{\text{avg}}\} & \max\{f_i - f_{\text{avg}}\} > 1 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

同时可以得到整个群体的适应度方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{\text{sizepop}} \left(\frac{f_i - f_{\text{avg}}}{f} \right)^2 \quad (16)$$

对满足变异条件的群体极值 g_{best} 按一定的概率 p_m 变异, p_m 的计算表达式为

$$p_m = \begin{cases} \mu & \sigma_2 < \sigma_d^2 \text{ 且 } f(g_{\text{best}}) > f_d \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式中, μ 为 0.1~0.3 之间的任意随机数; σ_d^2 的取值一般远小于 σ^2 的最大值; f_d 为理论最优值。

对于 g_{best} 的变异操作采用增加随机扰动的方法, 设 $g_{\text{best}i}$ 为 g_{best} 的第 i 维取值, β 为服从高斯 (0,1) 分布的随机变量, 则 g_{best} 的变异表达式为

$$g_{\text{best}} = g_{\text{best}i} (1 + 0.5\beta) \quad (18)$$

根据上述分析, 得到相应的优化算法的求解过程如下:

- 1) 初始化粒子群中粒子的位置与速度, 并根据约束条件对粒子位置进行修正。
- 2) 计算粒子的适应度值 (目标函数值)。
- 3) 将个体最优值设置为当前位置, 群体最优值 g_{best} 设置为初始群体中最佳粒子的位置。
- 4) 再根据式 (9) 和式 (10) 更新粒子速度和相应位置。
- 5) 计算粒子群粒子的适应度, 更新并记录粒子最优位置和群体最优位置。
- 6) 根据式 (14) 式 (16) 计算群体适应度方差 σ^2 。
- 7) 根据式 (17) 计算变异概率 p_m 。
- 8) 产生在 0~1 的随机数, 如果该数小于变异概率 p_m , 则执行式 (18) 的变异操作, 并进行相应修正。
- 9) 判断是否达到结束条件, 如果为真, 则停止计算, 并输出优化的解; 如果为假, 返回步骤 4)。

算例分析

1. 场景设计

本文主要是针对引入电动汽车和光伏的小区, 对电动汽车的充电进行优化, 从而实现能量的管理与优化利用, 需要结合传统小区设置相应的场景。假设有大约 100 户居民用户的小区, 配有 3 个 10 kW 的光伏发电系统, 一半的住户使用电动汽车 (即有 50 辆电动汽车), 按前文所述的比例设置三类用户, 同时设置相应用户的到家时刻和离家时刻作为电动汽车充电的约束条件, 设置小区配电网

节点功率的最大和最小限值保证电网的安全。

目前国内大部分地区针对居民小区主要实行阶梯电价, 从每个月的用电总量上进行相应影响, 这种电费计价方式使居民的用电高峰相对集中, 不利于电网负荷一天中的平衡。国外很多地区针对居民用户实行分时电价或者实时电价, 从而实现对用户负荷的实时调控, 一定程度上有利于改善负荷特性。国内对于大部分工业和商业用电采用这种分时电价, 有少部分地区针对居民用户也采用分时电价。我国物价局经济贸易委员会电力工业局对居民生活用电峰谷电价的定义为: 将一天 24 h 划分成两个时间段, 即将 8:00~22:00 共 14 h 称为峰段, 执行峰电价; 将 22:00 到次日 8:00 共 10 h 称为谷段, 执行谷电价, 并在部分地区试点。本文参考浙江省居民用电峰谷分时电价, 峰电价为 0.568 元/kW·h, 谷电价为 0.288 元/kW·h, 以此作为居民小区电费计算的依据。

2. 仿真结果

根据前文所述的场景假设, 得出优化前的电动汽车充电负荷曲线, 结合夏季的光伏出力曲线和居民平均用电负荷曲线, 利用式 (2) 和式 (3) 可以计算得到负荷波动的方差 $F_{1\text{max}}$, 结合居民用电峰谷分时电价, 利用式 (4) 可以计算得到用户侧的电费 $F_{2\text{max}}$, 二者的值分别为 1.596×10^6 和 387.12 元。两个权系数 γ_1 和 γ_2 均设置为 0.5, 也可根据不同需求设置不同的比例。

采用前面提出的自适应粒子群优化算法解决电动汽车优化充电这一多目标优化问题, 相应的参数设置为: 粒子群规模为 20, 迭代次数为 300, σ_d 为 1, f_d 为 0.6。根据求解流程可得出目标函数随迭代次数变化的值, 以及最优的电动汽车充电安排和优化前后小区的总负荷曲线, 如图 4 所示。

电动汽车优化充电前后负荷波动和用户侧电费对比情况如下表所示。

表 优化充电前后各项指标对比

对比项	负荷波动/ (kW/) ²	用户电费/元
优化前	1.596×10^6	387.12
优化后	3.568×10^5	356.89
降低百分比 (%)	77.6	7.8

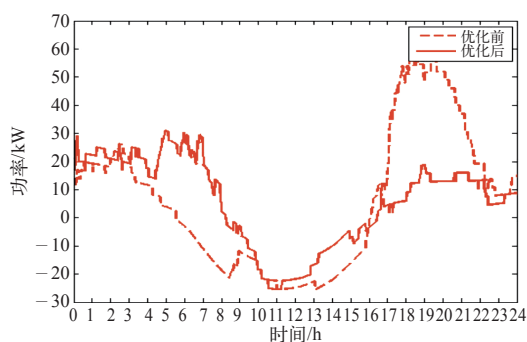


图4 居民小区充电优化前后总负荷曲线对比

从图4可以看出,优化后的总负荷曲线峰谷差明显变小,上半夜的部分峰值负荷移到了下半夜低谷时段,有利于小区配电网的经济性。由上表也可以看出,优化前后平抑负荷波动的效果明显,同时可以看到负荷有出现负值的点,这是因为在光伏出力较大的时段(8:00~16:00)恰好是小区的常规负荷用电和电动汽车充电低峰。目前国家支持新能源发电入网,所以本文也考虑将多余的这部分电能送入电网获取相应电费。由于车辆数较少,所需的充电电费本来就相对较低,加上峰时段和谷时段的电价差额相比现行工商业的分时电价差额小很多,用户侧降低电费的效果不是很明显,可通过改变权系数的值来改变优化效果。

结束语

本文针对引入光伏和电动汽车的居民小区,以平抑小区配电网的负荷波动和降低用户的电费为目标,提出了电动汽车的优化充电策略,并选用自适应粒子群算法进行求解,算例结果表明该控制策略能较好地实现平抑负荷和降低电费的目的,特别是电动汽车在家庭私人用户实现大规模应用后,通过平抑负荷能在小区配电限制的条件下接入更多的电动汽车。本文将多余的光伏进行处理卖给电网,今后可考虑在有条件的小区建立储能系统存储多余的光伏,在晚上供给电动汽车充电使用。同时,还可以考虑电动汽车作为紧急备用电源,在小区配电网发生停电故障后为重要负荷提供电能。

参考文献

- [1] 刘振亚. 智能电网技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 304-310.
- [2] 马琳琳, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (3): 140-148.
- [3] 杨冰, 王丽芳, 廖承林. 大规模电动汽车充电需求及影响因素 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (2): 22-28.
- [4] Juuso Lindgren, Rami Niemi, Peter D Lund. Effectiveness of smart charging of electric vehicles under power limitations [J]. International Journal of Energy Research Int. J. Energy Res., 2014 (38): 404-414.
- [5] Zhou Lin, Li Furong, Gu Chenghong, et al. Cost/benefit assessment of a smart distribution system with intelligent electric vehicle charging [J]. IEEE Transactions Smart Grid, 2014, 5 (2): 839-847.
- [6] 占恺桥, 宋永华, 胡泽春, 等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化 [J]. 电机工程学报, 2012, 32 (31): 11-18.
- [7] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 基于自适应变异粒子群算法的电动汽车换电池充电调度多目标优化 [J]. 电网技术, 2012, 36 (11): 25-29.
- [8] 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, 37 (8): 2101-2107.
- [9] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法 [J]. 电网技术, 2010, 34 (11): 126-130.
- [10] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB智能算法30个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 130-136.
- [11] 熊虎, 向铁元, 祝勇刚, 等. 电动汽车电池更换站布局的最优规划 [J]. 电力系统自动化, 2012, 32 (9): 1-6.
- [12] 吕振肃, 侯志荣. 自适应变异的粒子群优化算法 [J]. 电子学报, 2004, 32 (3): 416-420.

(收稿日期: 2014-12-25) EA