

DOI: 10.7667/PSPC152220

计及充电请求预测补偿的电动汽车有序充电策略

徐浩¹, 夏鑫珏², 李辉¹, 欧阳帆¹, 刘海峰¹, 张磊³, 梁文武¹

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 河北省电力勘测设计研究院, 河北 石家庄 050031; 3. 国网湖南省电力公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 针对现有有序充电策略未能充分考虑和应用后续时段内新增充电请求的问题, 提出了一种计及充电请求预测补偿的住宅区电动汽车有序充电控制策略。在均分出的每个控制时段末, 该策略依据实际新增充电请求数据修正了先前控制时段对当前控制时段新增充电请求的预测结果, 并采用预测结果对后续各控制时间段内的新增待充电请求作了补偿, 提高了充电请求预测结果的应用效果。在此基础上, 构建了使系统负荷波动最小的有序充电控制模型。大量的算例分析及结果表明, 该策略实施效果上佳, 应用前景可观。

关键词: 电动汽车; 住宅区充电行为; 充电请求预测; 动态优化; 有序充电策略

An ordered charging strategy for electric vehicles accounting the compensation of predicted charging requests

XU Hao¹, XIA Xinjue², LI Hui¹, OUYANG Fan¹, LIU Haifeng¹, ZHANG Lei³, LIANG Wenwu¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China; 2. Hebei Electric Power Design & Research Institute, Shijiazhuang 050031, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming at the problem of an inadequate consideration and application of newly generated charging requests in subsequent periods, this paper proposes an ordered charging strategy accounting the compensation of predicted charging requests for the residential charging behaviors. At the end of each control periods evenly divided, the strategy corrects the predicted results of newly generated charging request of the current control time period, which is conducted in the former control time periods, and utilizes the predicted charging requests to compensate the newly added electric vehicles waiting for charging in each control time periods following the current control time period, which improves the application effect of predicted results of charging requests effectively. On this basis, the paper establishes an ordered charging control model aimed at minimizing the load fluctuations. Numerous example analyses and results show that the strategy can obtain very good implementation effects, and thus own great application prospects.

Key words: electric vehicle; residential charging behavior; charging request prediction; dynamic optimization; ordered charging

0 引言

电动汽车(Electric Vehicles, EVs)是一种清洁能源交通工具, 可有效降低噪声污染、二氧化碳排放量及化石能源消耗^[1-2]。从各国政府及制造商对电动汽车发展的大力支持和推广、电动汽车目前的市场份额及今后的发展趋势、电动汽车自身的优越特性来看, 未来电动汽车的市场份额将达到一个较高水平^[3-5]。但作为一种大功率电力负荷, 电动汽车充电行为的固有随机性将影响配电系统的负荷特性和经济运行^[6-8]。特别是当大量充电行为集中发生在系统传统负荷高峰期时, 系统负荷的峰值和峰谷差都将

显著增加^[9-10]。因此, 研究电动汽车有序充电策略、优化规模化充电行为极有必要, 其一方面能可靠、高效地满足用户庞大的充电需求, 另一方面可将充电负荷对电网的负面影响降到最低。

目前, 国内外学者已就电动汽车有序充电问题做了大量的研究。文献[11]以使系统能耗最小为目标, 利用非线性规划算法对电动汽车充电行为进行了动态优化。文献[12]在考虑变压器容量约束和用户充电需求响应能力的基础上, 建立了实现充电站运行经济效益最大化的电动汽车有序充电优化模型。文献[13]相继以使充电站收益最大和因缩小峰谷差所受激励最大为目标, 提出了充电站内有序充

电的两阶段优化模型。这些文献所研究的对象都是公共充电行为,即发生在位于公共场所的集中充电站内的充电行为^[14]。在公共充电行为,用户进站后立即提出充电请求,并同时明示其车辆的最晚离站时刻。充电站站级控制中心或其上级控制中心则需要对用户进站时已经存在的充电请求及在用户进站时刻至其最晚离站时刻之间新产生的充电请求进行有序安排,实现既定优化目标。但在制定有序充电策略时,上述文献未能将在用户进站至其最晚离站时刻之间新产生的充电请求考虑在内,而仅研究将用户进站时已存在的充电请求有序安排在其最晚离站时刻之前,因此其获得的有序充电策略可能并非最优。造成这一缺陷的主要原因是公共充电行为随机性大,以至于在制定当前时刻的有序充电策略时难以准确预测后续时间段内新增充电请求的生成时刻和数量。

但对住宅区充电行为进行有序控制时,上述问题可得有效解决。因为相关研究表明,当住宅区电动汽车达到较大规模时,其整体行驶特性将呈现一定的规律性^[15-16],在设计当前控制时段内住宅区有序充电策略时,可采取充电请求预测的方式将后续控制时段内新增的充电请求考虑在内,优化有序充电策略的实施效果。基于这个思想,文献[5]假设规模化电动汽车用户行驶习惯近似为正态分布,并预测了全天各时段的新增充电请求;文献[17]基于美国国家用车使用习惯调查结果同样将用户的出行规律模拟为正态分布。这些文献在充电请求预测结果的基础上,采用静态优化的方式将后续时段内新增充电请求融入进有序充电策略中,在一定程度上改善了有序充电策略的实施效果。静态优化策略假定用户在未来时刻的充电请求都是完全按照文献[5]或文献[17]所提正态分布规律发生,但事实上新增充电请求的预测结果与实际结果之间存在差异,因此静态优化策略在实施过程中可能出现实际新增充电请求与其制定的充电计划相悖的不利情形,以至于文献[5]或文献[17]所制定的有序充电控制目标无法顺利实现。

本文提出了一种计及充电请求预测补偿的住宅区电动汽车有序充电控制策略。该策略基于与车辆行驶习惯相关的统计数据对后续各控制时间内的新增充电请求进行了预测,并采用动态优化的方式对规模化充电行为进行有序控制,提高了充电请求预测结果的应用效果。在均分出的每个控制时段末,该策略首先依据实际新增充电请求数据修正了先前控制时段对该控制时段的新增充电请求预测结果,然后采用充电请求预测结果对后续各控制时间段内

的新增待充电请求进行补偿,在此基础上,构建了使系统负荷波动最小的有序充电控制模型,并采用 Monte Carlo 算法对该模型作了求解。算例分析的良好结果表明,该策略具有比无补偿有序充电策略和有补偿的静态有序充电策略更好的实施效果,具有非常可观的应用前景。

1 住宅区充电行为分析

电动汽车的规模化发展离不开有效又便捷充电方式的开发。住宅区充电行为具有操作性强、对用户零干扰、允许持续充电时间较长、居民用电电价低等优点,并采用充电功率较小的常规充电模式,对电网的冲击较小,因而被认为是最理想的充电方式^[14],其广泛实施有利于提高电动汽车的实用性。目前,电动汽车续航里程已较长,91.4%电动汽车用户的日充电需求量都在车载电池的容量范围内^[15-16]。这部分用户日最后一次出行结束后将其电动汽车充满电,第二天全天都无需进行二次充电。随着电动汽车动力特性及车载电池性能的不断发展,未来将有更多的用户最多每天只需充一次电。因此不难想象,未来住宅区充电行为将在电动汽车用户的充电模式中占有极大的比重。

住宅区充电行为多发生于用户日最后一次出行结束以后,允许充电时段可一直延续到次日第一次出行开始,期间间隔时间较长,具有较高的可控性。为了配合有序充电策略的顺利实施,笔者认为电动汽车上都装有智能充电设备作技术支撑。用户日最后一次出行结束后即将需要充电的电动汽车连接至邻近电源设备并产生充电请求,但受智能充电设备约束,充电过程并不立即开始。智能充电设备是基于双向、高速通信机制的过程层电子设备,其具备的功能至少应包括以下几项:①在电动汽车与电源设备相连接的情况下,控制电动汽车开始充电的时刻;②记录电动汽车的实时荷电状态,即开始充电时刻的荷电状态,并计算其所需充电时长;③与上级控制中心进行通信交互,提交充电请求,上传充电所需时长,接受并执行上级控制中心下达的充电控制指令。在智能充电设备辅助下,用户将电动汽车连接电源后,直到次日第一次用车前都无需过问充电过程。

此外,鉴于电动汽车车载电池的寿命以充电次数来衡量,本文不考虑间歇充电模式^[5]。充电过程一经开始,将一直持续到电池充满。因此,住宅区充电行为有序充电策略的主要控制因素是用户开始充电的时刻。通过对充电开始时刻的控制,满足各用户的充电需求,并错开充电负荷峰值和配电网传

统负荷峰值, 实现配电网的经济高效运行。

2 住宅区有序充电控制策略

将一天均分为 48 个控制时段, 即每个控制时段为半小时。配网控制中心仅在每个控制时段末对待充电电动汽车的充电开始时刻进行有序安排。其中, 待充电电动汽车指在当前时刻已产生充电请求但还未开始充电的电动汽车。住宅区充电行为与公共充电行为不同, 其不存在最晚离站时刻。但考虑到全国范围内大部分行业工作作息时间基本同步, 本文为住宅区用户设置了两个最晚充电截止时刻, 即次日 7:00 和次日 12:00, 分配如下: 对于日最后一次出行结束时刻(即充电开始时刻)早于 24:00 的用户, 其充电行为可最晚持续到次日 7:00; 对于日最后一次出行结束时刻介于 24:00 和次日 7:00 之间的用户, 为了保证其有足够的时间将电动汽车电池充满, 其充电行为可最晚持续到次日 12:00。为了方便论述, 对于日最后一次出行结束时刻早于 24:00 的用户, 在制定其有序充电策略时, 从 7:30 至次日 7:00, 依次将各控制时段标记为 1, 2, ..., 48; 对于日最后一次出行结束时刻介于 24:00 和次日 7:00 之间的用户, 在制定其有序充电策略时, 从 12:30 至次日 12:00, 依次将各控制时段标记为 1, 2, ..., 48。以系统负荷(包括传统负荷和充电负荷)波动最小化为目标, 住宅区有序充电策略可表示为

$$\min \delta(L) = \left[(LT_j + LE_{j-1} - \varphi LE_j + \delta LE_j^j - LG_{\text{aver}})^2 + \sum_{i=j+1}^n (LT_i^i + LE_{i-1}^i - \varphi LE_i + \delta LE_j^i - LG_{\text{aver}})^2 \right] / (n-j) \quad (1)$$

$$LG_{\text{aver}} = \left(\sum_{k=1}^j (LT_k + LE_k) + \sum_{i=j+1}^n (LT_i^i + LE_i^i) \right) / n \quad (2)$$

$$LE_i^i = LE_{i-1}^i - \varphi LE_i + \delta LE_j^i \quad (3)$$

式中: $\delta(L)$ 为当前控制时段以后的系统总负荷方差; j 为当前控制时段; LT_i^i 和 LE_i^i 分别为第 i 个控制时段末传统负荷和充电负荷的预测值; LE_{j-1} 为第 $j-1$ 个控制时段末的充电负荷实际值; LE_{i-1}^i 为第 $i-1$ 个控制时段末的充电负荷预测值; φLE_i 为在第 i 个控制时段内结束充电过程的充电负荷; LG_{aver} 为系统平均负荷, 包括传统负荷和充电负荷; LT_k 和 LE_k 分别指当前控制时段之前各控制时段末的传统负荷和充电负荷, 为实际值; n 为控制时段总数, 即 48。此外, $\delta LE_j^j, \delta LE_j^{j+1}, \dots, \delta LE_j^n$ 为当前控制时

段制定的充电计划, 其中, δLE_j^j 为安排在当前控制时段末开始充电的充电负荷; $\delta LE_j^{j+1}, \dots, \delta LE_j^n$ 为安排在后续各控制时段末开始充电的充电负荷。

上述有序充电策略中, 传统负荷预测值通过系统过往日负荷曲线获得; 充电请求预测值(即预测出的在当前控制时段后续的各控制时段内产生的充电请求的数量)通过用户过往日最后一次出行结束时刻统计数据获得。配网控制中心统筹在当前控制时段已存在的充电请求及预测出的将在后续各控制时段内产生的充电请求, 根据优化模型的解给出安排在当前控制时段末及其后续各充电时段末开始充电的充电负荷。系统日负荷曲线较为固定, 预测值与实际值相差不大; 但电动汽车充电随机性强, 充电请求的预测值与实际值之间存在差异, 因此, 在时间序列上, 配网控制中心会依次在每个控制时段末制定一次有序充电策略, 并用后续控制时段制定的充电计划覆盖前一控制时段末制定的充电计划, 通过这种重叠式的计划修正来优化有序充电策略的实施效果。在当前控制时段末制定的充电策略中, 仅 δLE_j^j 为确定值, 这部分用户将在当前控制时段末开始充电; 而 $\delta LE_j^{j+1}, \dots, \delta LE_j^n$ 都是不确定值, 并不一定会在相应控制时段末开始充电, 这部分用户在后一控制时段末将被重新视为未获得充电安排的待充电电动汽车, 是后一控制时段末制定有序充电策略时的控制变量。

此外, 上述有序充电策略需满足以下约束条件:

1) 充电开始时刻约束

即每个用户的充电开始时刻应该晚于该用户日最后一次出行结束的时刻, 并保证充电截止时刻早于用户的最晚充电截止时刻:

$$t_k^0 \leq t_k \leq t_k^1, k = 1, 2, \dots, N_e \quad (4)$$

式中: t_k^0 为第 k 个用户日最后一次出行结束时刻(即该用户充电请求产生时刻)所对应控制时段值; t_k 为第 k 个用户的充电开始时刻; N_e 为控制中心下辖电动汽车总数; 此外, t_k^1 为第 k 个用户充电开始时刻所在控制时段的取值上限, 其值可通过式(5)计算。

$$t_k^1 = te_k - \lceil T_k / 0.5 \rceil \quad (5)$$

$$T_k = (1 - SOC_k^0) \cdot C / P \quad (6)$$

式中: te_k 为第 k 个用户的最晚充电截止时刻所对应的控制时段值, 其值等于 48; 此外, T_k 为第 k 个用户所需充电时长; SOC_k^0 为第 k 个电动汽车日最后一次出行结束时的荷电状态; C 和 P 分别为电动汽车的容量和充电功率; $\lceil x \rceil$ 为向上取整函数。式(4)

一式(6)适用于在包括当前控制时段在内的各控制时段内产生充电请求的用户。

2) 荷电状态约束

即每个用户在整个充电过程中的荷电状态介于充电开始时荷电状态和 1 之间。

$$SOC_k^0 \leq SOC_k^1 \leq 1, k=1, 2, \dots, N_e \quad (7)$$

式中: SOC_k^0 为第 k 个电动汽车日最后一次出行结束时的荷电状态; SOC_k^1 为第 k 个电动汽车在整个充电过程中的荷电状态。

3) 容量约束

即各控制时段末的系统总负荷水平应不超过住宅区上级变压器的容量:

$$\begin{cases} LT_j + LE_{j-1} - \phi LE_j + \delta LE_j^j \leq L_{up}, j=1, 2, \dots, 48 \\ LT_i' + LE_{i-1}' - \phi LE_i + \delta LE_i^i \leq L_{up}, i=1, 2, \dots, 48 \end{cases} \quad (8)$$

式中, L_{up} 为住宅区上级变压器的额定容量。

4) 充电连续性约束

即某电动汽车一旦开始充电, 则充电过程将一直持续到该电动汽车充满电为止。

$$\text{if}(S_{i,k} = 1, i < t_k^0 + \lfloor T_k / 0.5 \rfloor), \text{then}(S_{(i+1),k} = 1) \quad (9)$$

式中: $S_{i,k}$ 为充电状态系数, 当第 k 个电动汽车在第 i 个控制时段末处于充电状态时, 其值为 1, 否则其值为 0; 此外, $\lfloor x \rfloor$ 表示向下取整函数。

3 算例分析

为了验证本文所提有序充电策略的实施效果, 本节拟基于加拿大 Manitoba 地区冬季典型日负荷曲线和 2001 年美国交通部对全美家用车辆的调查结果(National Household Travel Survey, NHTS)作算例分析。算例分析共包括 4 种充电情形: ① 计及充电请求预测补偿的动态有序充电模式, 即本文所提有序充电模式; ② 计及充电请求预测补偿的静态有序充电模式, 即文献[5, 17]提出的有序充电模式; ③ 无补偿但有序充电模式, 即文献[11-13]提出的有序充电模式; ④ 无补偿且无序充电模式, 即假定用户在日最后一次出行结束后立即开始对电动汽车充电。4 种充电模式针对的都是住宅区充电行为, 其中, 在第④种充电模式下用户的充电起始时刻等于其充电请求生成时刻。下文首先给出充电请求生成时刻和用户所需充电时长的模拟方法, 然后详述 4 种充电模式的仿真步骤, 最后对比 3 种充电模式实施效果并给出仿真结论。

依据 NHTS, 家用车辆日最后一次出行结束时刻的概率分布特性可用式(10)刻画^[15-16]。

$$h(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_i \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), & (\mu_i - 12) < t \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_i \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t+24-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), & 0 < t \leq (\mu_i - 12) \end{cases} \quad (10)$$

式中: 时刻值采用 24 小时制; $\mu_i=17.6$; $\sigma_i=3.4$ 。该调查针对的是燃油汽车用户, 假定电动汽车与燃油汽车的性能差异不至于影响到用户的行驶习惯, 则该调查结果同样适用于电动汽车用户。由前文分析可知, 用户日最后一次出行结束时刻即为其提出充电请求的时刻, 因此式(10)可用来刻画充电请求生成时刻的概率特性。为了对比出第①种充电模式和第②种充电模式实施效果的差异, 笔者进一步人为设定了一条用户充电开始时刻概率密度分布的实际值, 如图 1 所示。图中, 实线表示充电开始时刻概率密度分布的预测值, 即式(10)对应的曲线; 虚线表示充电开始时刻概率密度分布的实际值, 其平均值和方差分别为 19.6 和 3.4。由于第①种充电模式在各累积时段对充电负荷请求预测作了及时修正, 能较好地跟踪充电请求实际生成曲线, 因此对应于图 1 中的实际值。

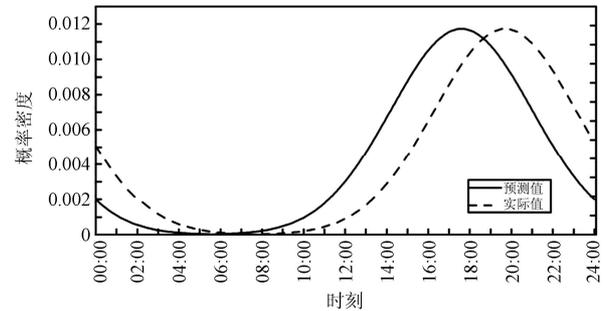


图 1 充电开始时刻概率密度曲线

Fig. 1 Probability density curve of charging start time

用户所需充电时长与其提出充电请求时的荷电状态(即充电起始荷电状态)线性相关, 如式(6)所示。假定电动汽车行驶过程中的累积耗电量与行驶里程具有线性关系, 则其充电起始荷电状态与日行驶里程有如下关系。

$$SOC_k^0 = f(D) = (1 - D/D_R) \times 100\% \quad (11)$$

式中: D 指日行驶里程; D_R 指电动汽车的续航里程。汽车用户日行驶里程服从概率密度函数^[15-16]。

$$g(D) = \frac{1}{D\sqrt{2\pi\sigma_D^2}} \exp\left(-\frac{(\ln D - u_D)^2}{2\sigma_D^2}\right), D > 0 \quad (12)$$

式中: $u_D=3.2$; $\sigma_D=0.88$ 。

本章采用蒙特卡洛法对前 3 种充电模式的实施

效果进行模拟仿真。其中,第①种充电模式的具体仿真步骤如下:

1) 计算出在当前控制时段后续的各控制时段内新增待充电电动汽车数量。

$$nev_i = N \cdot \int_{i-0.5}^{(i+1)-0.5} h(t) dt \quad (13)$$

式中: i 指第 i 个控制时段; N 表示电动汽车保有量; 0.5 指控制时段时长为半个小时。

2) 依据式(12)和式(11)依次随机生成各控制时段上新增待充电电动汽车的充电起始荷电状态,并依据式(6)计算各用户所需的充电时长。

3) 依据式(4)求解各用户充电起始时刻的值域空间,并用 $unidrnd(x)$ 函数随机生成各用户的充电起始时刻。

4) 将各用户所产充电负荷叠加到系统负荷中。

5) 依据式(1)计算系统负荷方差,并与过程变量相比较。过程变量初值设为 200。若所得负荷方差小于过程变量,则将过程变量替换为该负荷方差值,并记录此时各控制时段末的系统负荷值;若所得负荷方差大于过程变量,则不做任何操作转入下一仿真步骤。

6) 判断是否达到 Monte Carlo 总循环次数。每次仿真中总循环次数设为 10 000 次,足以保证 Monte Carlo 的准确度。若为达到总循环次数,则转至步骤(1);否则结束仿真,输出过程变量及其对应的系统负荷曲线。

在第①种充电模式仿真步骤的基础作些修改可得出第②种充电模式和第③种充电模式的仿真步骤。从上述仿真步骤中去掉第 2) 步即获得第②种充电模式的仿真步骤。第③种充电模式的仿真步骤与第②种充电模式近似一致,只是存在两处差异: (a) 第 1) 步不需要计算后续各控制时段内新增待充电电动汽车的数量,而仅需计算当前控制时段末所有待充电电动汽车的数量; (b) 第 2) 步中不需要生成后续各控制时段内新增待充电电动汽车的荷电状态,而仅需生成当前控制时段末所有待充电电动汽车的荷电状态。此外,第④种充电模式无需有序控制,其仿真过程较简单:首先依据式(11)一式(13)随机生成各控制时段内新增待充电电动汽车的数量和所需充电时长,然后将充电负荷叠加到系统负荷中,此处不另作赘述。

基于上述步骤,作者分别仿真了电动汽车保有量为 10 万台、20 万台和 30 万台时有序充电策略的实施效果。Manitoba 地区目前拥有 643 580 辆注册

乘用车,3 种仿真规模分别占到 Manitoba 地区汽车保有量的 15.5%、31% 和 46.6%^[18]。仿真过程中,电动汽车车载电池容量和额定充电功率分别设为 32 kW·h 和 8 kW·h。针对 4 种充电模式的仿真结果如图 2—图 4 及表 1—表 3 所示。其中,图 2—图 4 分别是电动汽车保有量为 10 万台、20 万台和 30 万台时 4 种充电模式实施后的系统负荷曲线;表 1、表 2 和表 3 分别为电动汽车保有量为 10 万台、20 万台和 30 万台时 3 种充电模式实施后的系统负荷特性。

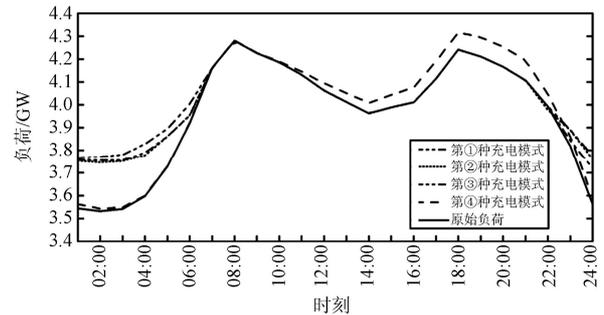


图 2 电动汽车保有量为 10 万台的仿真结果

Fig. 2 Simulation results with an electric vehicle ownership of 100 000

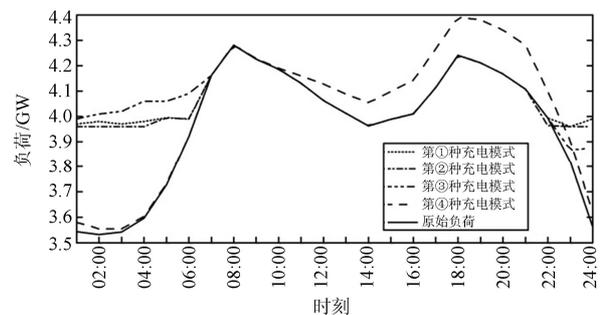


图 3 电动汽车保有量为 20 万台的仿真结果

Fig. 3 Simulation results with an electric vehicle ownership of 200 000

图 2—图 4 各包含 5 条曲线,其中原始负荷为加拿大 Manitoba 地区冬季典型日负荷曲线。分析图 2—图 4 及表 1—表 3,可获得如下结论: 1) 在第④种充电模式下,系统负荷峰值、峰谷差和方差都较原始负荷有明显提升,说明无序充电行为恶化了系统的负荷特性; 2) 第①种充电模式和第②种充电模式下,系统负荷峰谷差和方差均比第③种充电模式下的情况好,说明在有序充电策略中考虑后续时段的充电请求可获得更好的实施效果; 3) 第①种充电模式下,系统负荷峰谷差和方差均比第②种充电模

式下的情况好, 说明对充电行为进行动态优化控制可获得更好的实施效果; 4) 随着电动汽车保有量的增加, 第①种充电模式较另两种有序充电模式在改善系统负荷特性上的优越性体现得更加明显, 以负荷方差为例, 当电动汽车保有量从 10 万台增至 30 万台时, 第①种充电模式与第②种充电模式的偏差从 0.002 9 扩大至 0.010 2, 与第③种充电模式的偏差从 0.008 7 扩大至 0.041 5。

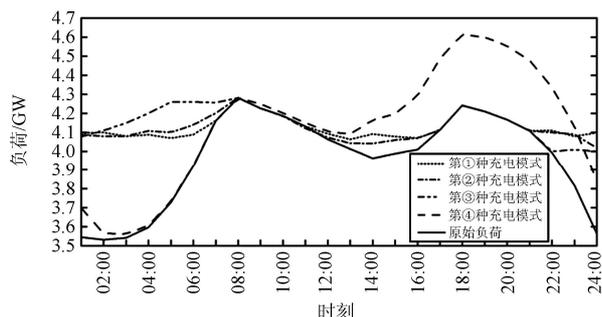


图 4 电动汽车保有量为 30 万台的仿真结果

Fig. 4 Simulation results with an electric vehicle ownership of 300 000

表 1 电动汽车保有量为 10 万台的负荷特性表

Table 1 Load characteristics table with an electric vehicle ownership of 100 000

充电模式	负荷峰值	负荷谷值	峰谷差	负荷方差
第①种充电模式	4.281 1	3.755 9	0.525 2	0.170 6
第②种充电模式	4.281 1	3.746 1	0.535	0.173 5
第③种充电模式	4.281 1	3.719	0.562 1	0.179 3
第④种充电模式	4.316 0	3.543 4	0.772 6	0.263 2
原始负荷	4.281 1	3.532 2	0.748 9	0.250 2

进一步分析图 3, 发现第③种充电模式将更多的负荷安排在了 03:00—07:00 之间, 而在 23:00—24:00 之间安排的充电负荷较少, 以致造成系统负荷谷值和方差的改善效果不够充分。究其原因, 第③种充电模式在安排充电计划时, 没有考虑后续新增充电请求的影响, 从第一个控制时段开始即尽量将充电负荷安排到系统负荷最低谷期, 以至于负荷最低谷期积累的待充电负荷过多。这种趋势在图 4 中表现更明显。图 4 中, 第①种充电模式(或第②种充电模式)充分利用了 11:00—17:00 时段内系统吸纳充电负荷的能力, 因而获得了更好的负荷特性; 而第③种充电模式则忽略了这段时期系统吸纳充电负荷的能力, 将大量的充电负荷都堆积在系统负荷最低谷期, 使得系统负荷谷值和方差都较前两种充电模式恶劣。

表 2 电动汽车保有量为 20 万台的负荷特性表

Table 2 Load characteristics table with an electric vehicle ownership of 200 000

充电模式	负荷峰值	负荷谷值	峰谷差	负荷方差
第①种充电模式	4.281 1	3.960 0	0.321 1	0.102 1
第②种充电模式	4.281 1	3.960 0	0.321 1	0.109 8
第③种充电模式	4.281 1	3.817 5	0.463 7	0.110 0
第④种充电模式	4.391 0	3.554 6	0.836 4	0.279 1
原始负荷	4.281 1	3.532 2	0.748 9	0.250 2

表 3 电动汽车保有量为 30 万台的负荷特性表

Table 3 Load characteristics table with an electric vehicle ownership of 300 000

充电模式	负荷峰值	负荷谷值	峰谷差	负荷方差
第①种充电模式	4.281 1	4.062 9	0.212 3	0.061 2
第②种充电模式	4.281 1	4.041 1	0.240 0	0.071 4
第③种充电模式	4.281 1	3.963 1	0.318 0	0.102 7
第④种充电模式	4.612 9	3.561 1	1.051 8	0.322 2
原始负荷	4.281 1	3.532 2	0.748 9	0.250 2

进一步分析图 4, 发现第②种充电模式在 11:00—17:00 时段内安排的充电负荷比第①种充电模式少, 以致更多的充电负荷集中到 7:00 之前的若干控制时段内。而由图 1 可知, 充电请求预测结果峰值的出现时间早于实际结果的峰值。因此, 在第②种充电模式制定的充电计划中, 11:00—17:00 时段之间安排有足够多的充电负荷。但这一时段内新增充电请求的实际值小于预测值, 以至于在实施过程中充电计划不能完全落实, 由此造成了第②种充电模式的实施效果不如第①种充电模式。事实上, 即使充电请求预测峰值的出现时间晚于实际峰值, 比如图 1 中两条曲线交换属性, 第①种充电模式仍然可以获得更好的事实效果, 因为此时第②种充电模式将陷入同第③种充电模式一样未能充分利用次低估期吸纳充电负荷能力而不能获得更好实施效果的不利局面。

4 结论

本文针对住宅区充电行为, 提出了一种计及充电请求预测补偿的有序充电策略。该策略采用充电请求预测结果补偿在当前控制时段后续的各控制时段内新增待充电电动汽车, 可优化控制策略的实施效果。在大量算例分析及结果的基础上, 本文获得如下结论:

(1) 充电负荷在数值上远小于传统负荷, 因此传

统负荷低谷期具有足够容纳所有充电负荷的能力,即有序充电策略的可行性较高。

(2) 基于充电请求预测补偿的动态有序充电策略具有比无补偿但有序充电策略更好的实施效果。原因在于无补偿但有序充电策略没有考虑后续新增充电请求的影响,往往会将大部分充电负荷安排到系统负荷最低谷期,而忽略了系统负荷次低谷期吸纳充电负荷能力。

(3) 基于充电请求预测补偿的动态有序充电策略具有比静态有序充电策略更好的实施效果。原因在于静态有序充电策略没有考虑后续时段充电请求预测值与实际值的差异,以致所制定的充电计划往往难以顺利实现。

(4) 随着电动汽车保有量增长,基于充电请求补偿的动态有序充电策略较另外两种有序充电策略在改善系统负荷特性上的优越性体现得更加明显。

参考文献

- [1] 张学清, 梁军, 张利, 等. 计及风光电源的一种地区电网电动汽车充电调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 28-35.
ZHANG Xueqing, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Approach for plug-in electric vehicles charging scheduling considering wind and photovoltaic power in chinese regional power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 28-35.
- [2] 肖湘宁, 温剑锋, 陶顺, 等. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究和建议[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 1-10.
XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, TAO Shun, et al. Study and recommendations of the key issues in planning of electric vehicles' charging facilities[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 1-10.
- [3] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.
- [4] 张聪, 许晓慧, 孙海顺, 等. 基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 19-24.
ZHANG Cong, XU Xiaohui, SUN Haishun, et al. Smart charging strategy of large-scale electric vehicles based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 19-24.
- [5] 黄贵鸿, 雷霞, 芦杨, 等. 考虑用户满意度的电动汽车用户侧最优智能充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 40-47.
HUANG Guihong, LEI Xia, LU Yang, et al. Optimus smart charge-discharge tactics in electric vehicle user profile considering user's satisfaction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 40-47.
- [6] 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): 22-27.
YANG Bing, WANG Lifang, LIAO Chenglin. Research on power-charging demand of large-scale electric vehicles and its impacting factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 22-27.
- [7] 徐国钧, 刘永胜, 李题印, 等. 基于层次分析和概率模拟的电动汽车对配网负荷影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 38-45.
XU Guojun, LIU Yongsheng, LI Tiying, et al. Study on the impact of electric vehicles charging load integrated into distribution network based on analytic hierarchy process and probabilistic simulation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 38-45.
- [8] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 电动汽车换电站有序充电调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 114-119.
TIAN Wenqi, HE Jinghan, JIANG Jiuchun, et al. Research on dispatching strategy for coordinated charging of electric vehicle battery swapping station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 114-119.
- [9] 葛少云, 黄镛, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 1-5.
GE Shaoyun, HUANG Liu, LIU Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5.
- [10] FERNÁNDEZ L P, SAN ROMÁN T G, COSENT R, et al. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 206-213.
- [11] ESMAILI M, RAJABI M. Optimal charging of plug-in electric vehicles observing power grid constraints[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(4):

- 583-590.
- [12] 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, 2012, 32(11): 38-43.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicle in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 32(11): 38-43.
- [13] 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.
- [14] XU Hao, MIAO Shihong, ZHANG Chunyong, et al. Optimal placement of charging facilities for large-scale electric vehicles[J]. International Journal of Electrical Power & Energy System, 2013, 53(1): 159-165.
- [15] TAYLOR M J, ALEXANDER A. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada, 2009: 1-6.
- [16] Department for Transport. Transport statistics bulletin-national travel survey: 2008[R]. London: Department for Transport, April 9, 2009.
- [17] ESMAILI M, RAJABI M. Optimal charging of plug-in electric vehicles observing power grid constraints[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(4): 583-590.
- [18] SHAHIDINEJAD S, FILIZADEH S, BIBEAU E. Profile of charging load on the grid due to plug-in vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 135-141.
-
- 收稿日期: 2015-12-23; 修回日期: 2016-03-30
作者简介:
徐浩(1987-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制技术、微网及配网新技术; E-mail: 702110505@qq.com
夏鑫珏(1987-), 男, 硕士, 主要研究方向为智能系统设计、机器学习。E-mail: yourxinjue@163.com
(编辑 周金梅)