

基于虚拟电厂的车-网负荷平衡策略

苏 粟,马 涛,王 玮,胡 勇,刘紫琦,韦香香

(北京交通大学 国家主动配电网技术研发中心,北京 100044)

摘要: 提出一种基于虚拟电厂的实时充电进程控制模型,既考虑了电动汽车车主的出行行为特性,又缓解了配电网的负荷不平衡,达到车-网互动的目的。采用双层算法求解所提模型,外层算法采用静态路由算法读取负荷数据,并采用前推回代方法计算节点电压及配电网网损;内层算法采用老化算法判断电动汽车的接入相,并采用轮询调度算法平衡配电网的三相负荷不平衡。通过调节电动汽车的充电时间可以有效地降低配电网网损以及平衡原配电网的三相不平衡度。算例仿真表明,所提策略可以有效地避免充电高峰,缓解配电网的三相负荷不平衡度,同时降低配电网网损,保障电网安全经济运行。

关键词: 虚拟电厂; 电动汽车; 有序充电; 实时充电控制; 负荷不平衡; 配电网; 互动; 轮询调度算法

中图分类号: TM 732; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.035

0 引言

进入 21 世纪以来,世界能源版图同时呈现“多极化”、“多元化”局面。世界能源格局的变化虽然给中国能源安全提供了一些机遇^[1],但我国作为三大化石能源净进口的国家,在新的发展形势下更应注重能源安全问题^[2]。保障能源的可持续供应、制定符合我国可持续发展的能源安全战略已经到了刻不容缓的地步^[3]。同时,改善能源环境、降低碳排放是能源可持续发展的重要共识^[4]。交通领域既是能源消耗比例较大的组成部分,也是节能减排的一个重要突破口。文献[5-7]阐述了我国电动汽车发展以及充电设施规划建设现状,并且认为大规模发展电动汽车已成为解决节能减排和减少对传统能源依赖问题的最佳途径。为此,文献[8]站在电力能源供应和节能减排角度,通过对国内外电动汽车发展的对比分析,阐述了我国发展电动汽车的必然性和关键影响因素。

然而规模化电动汽车的随机接入,必然对电网造成较大冲击。文献[9-12]深入分析了规模化电动汽车随机接入对现阶段电力系统的影响,指出:电动汽车的接入对配电网电能质量的主要影响包括电压下降、谐波污染和三相不平衡^[9]。考虑到用户的充电习惯,规模化电动汽车的无序充电需求与配电网需求重叠,不仅造成峰上加峰的情况^[10],而且还会增加调峰容量^[11]及发电容量^[12]。为了缓解规模化电动汽车随机接入对配电网的影响,达到良好的配电网-电动汽车的友好互动,国内外学者对此进行了深入的研究。

传统的互动大致可以分为 2 类:一类是基于分时

电价的调控模式;另一类是智能互动管理系统。

分时电价模式中,在不同的用电时刻,电力价格消费的水平是不尽相同的。阶梯化价格的设置主要是引导电动汽车用户选择电价低谷时刻进行充电,增加用电低谷时的用电量,减少用电高峰时的电力消耗,从而缓解电能的供求关系^[13-15]。然而,不合理的分时电价会对电网造成负面影响^[16-17],出现新的用电高峰,这比没有叠加电动汽车充电负荷时的用电高峰更高。

因此,相比于分时电价的互动模式,智能互动管理系统模式更注重配电网的安全稳定运行问题。

文献[18-23]对智能互动管理系统进行了深入的研究并且得出了相关结论:智能互动管理系统不仅可以降低电动汽车的充电高峰^[18]、平抑峰谷差^[19],还可以避免配电网的电力拥堵^[20]、提高配电网的电压稳定性^[21],甚至可以降低充电费用、减小配电网的网络损耗^[22]。同时,文献[23]考虑了储能系统中的电池寿命问题,通过合理的调度,延长了储能系统中电池的循环使用次数。

综上所述,车-网互动的主要目的是削峰填谷,但忽视了配电网三相负荷的不平衡性。文献[24-25]分析了不同渗透率下,规模化电动汽车对配电网三相不平衡的影响,结果表明:规模化电动汽车无序接入会加剧配电网的三相不平衡度,影响配电网安全稳定运行。文献[26]以三相负荷平衡及降低配电网的网络损耗为目标,构建了基于夜间集中充电的变功率有序充电策略模型,实现削峰填谷的同时,达到负荷平衡。然而,区域内车辆出行需求同样是决定规模化电动汽车充电负荷对配电网三相不平衡度影响的重要因素。

作为一种分布式能源的能量互动管理系统^[27-28],虚拟电厂(VPP)为车-网互动带来了新的契机。文献

收稿日期:2017-01-23;修回日期:2017-06-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677004);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(E16JB00140)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677004) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(E16JB00140)

[29]通过双层规划,将虚拟电厂接入电网;针对不同资源,采用不同的虚拟电厂内部资源调度算法^[30],达到供需资源的优化组合^[31]。通过竞价机制的建立以及效益分析,可以提高不同分布式能源的参与度^[32-33]。针对电动汽车的快速发展,文献[34]提出了含有电动汽车的虚拟电厂分类,其控制方式主要包含了直接控制方式、分层控制方式以及分散控制方式。每种控制方式可以包含单一分布式能源也可以包含多种分布式能源。

本文为只包含单一资源(电动汽车)分散控制的虚拟电厂提出了一种调度策略,为电动汽车与电网的互动提供一个虚拟载体。具体的互动是指,电动汽车车主通过使用手机 APP 等客户端,向虚拟电厂发送充电需求信息,虚拟电厂结合配电网的经济运行要求,选择合适的充电地点,引导车辆前往该地点充电,从而达到通过信息交互方式满足配电网以及电动汽车双方需求的要求。

首先,以某区域内停车场车辆进出数据为基础,建立了出行规律模型;然后,提出了适用于实时控制的充电进程控制模型;在此基础上,提出了考虑负荷平衡的有序充电策略。提出的算法分为 2 层:外层算法以前推回代算法为主,计算区域内配电网的网损,选出最优充电地点,并将其网损传入内层算法;内层算法根据网损的计算结果,优化充电时刻,平抑充电地点的负荷不平衡度。本文所提策略同时兼顾降低区域内配电网网损及充电地点的负荷三相不平衡。在算例仿真部分,以该区域实际配电网的网络结构为基础,验证了算法的合理性及适用性。

1 区域内车辆进出规律建模

1.1 车辆进出特征建模

车辆的出行规律是预测电动汽车充电需求的基础。通过统计北京市某区域内停车场车辆出行数据(工作日),运用蒙特卡洛法建立该区域内车辆进出模型,分别得出该区域内车辆的驶入/驶出时间的概率分布如图 1 所示,停留时长概率密度分布如图 2 所示。驶入/驶出的概率密度拟合公式分别如式(1)、式(2)所示。

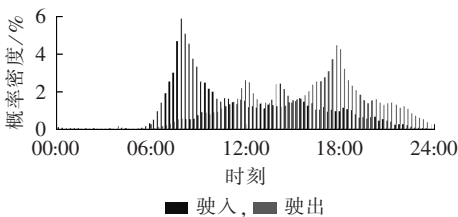


图 1 车辆驶入、驶出概率分布图
Fig.1 Probability distribution of arrival time and departure time of EVs

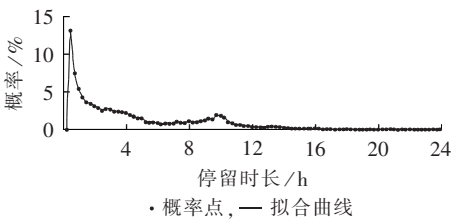


图 2 车辆停留时长概率分布
Fig.2 Probability distribution of EV parking duration

$$y_1(t)=\sum_{i=1}^6a_ie^{-\frac{(t-b_i)^2}{c_i}} \tag{1}$$

$$y_2(t)=\sum_{i=1}^6d_ie^{-\frac{(t-f_i)^2}{g_i}} \tag{2}$$

其中, $y_1(t)$ 为车辆 t 时刻驶入的概率密度; $y_2(t)$ 为车辆 t 时刻驶出的概率密度; a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 、 f_i 、 g_i 为拟合参数,如表 1 所示。

表 1 拟合参数
Table 1 Fitting parameters

<i>i</i>	<i>a_i</i>	<i>b_i</i>	<i>c_i</i>	<i>d_i</i>	<i>f_i</i>	<i>g_i</i>
1	1.7510	8.0040	0.3077	1.8160	17.860	0.4535
2	0.9956	17.310	3.6250	0	21.570	0.0111
3	3.5360	8.1640	1.2890	1.1870	12.070	0.4577
4	1.4050	10.920	2.9860	-963.9	15.970	4.3840
5	1.4880	14.220	0.5199	9640.0	15.970	4.3840
6	0.5853	15.460	0.7524	1.6990	17.090	1.7490

1.2 出行特征分析

从图 1 中可以分析得出车辆进入该区域的时间主要集中在 08:00—14:00,车辆离开该区域的时间主要集中在 12:00—18:00。这些特征均符合我国工作日的通勤出行规律^[35]。同时,从图 2 可以看出,该区域车辆停留时长具有综合化的特点:既存在短期随机访问(0~1 h),又兼顾了中长期(2~10 h)工作特点。

2 有序充电模型

随着电动汽车渗透率的逐步提高,充电问题逐步显现:电动汽车充电需求相对集中,一方面容易造成峰上加峰的局面;另一方面,也会导致区域内充电设施闲置,得不到有效利用。区域内的时空分散特性为有序充电提供了良好的契机,同时也可以缓解充电相对集中的矛盾。

2.1 时空节点 IP 化

在配电网区域内,负荷的时空特性是不同的。利用时空地址转换,可以将配电网节点的时间信息和空间信息表达为一个类似于 IP 地址的编码。

某区域内拥有 n 台变压器提供电力。若以 1 min 为单位时段时长,将 24 h 分为 1440 个时间片,用二进制转换,将其地址化。并且借用 IP 地址的后 11 位作为时间片地址,借用第 12 位到第 16 位作为变压器地址,则每个 IP 地址对应的资源属性可以表示不同地点不同时刻的负荷特性,其示意图如图 3 所示。其

中, $X_i (i=1, 2, \dots, 32)$ 为一个二进制数字, 即 0 或 1。

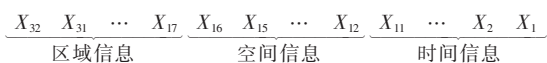


图 3 32 位地址示意图

Fig.3 Schematic diagram of 32-bit address

地址转换完成后, 以每 8 位为 1 组, 将这 32 位二进制地址分为 4 组。将这 4 组二进制的数字再次转化为十进制数字。至此, 完成多时空节点的时间信息和空间信息的转换过程。

同时, 每个 IP 地址所标记的是不同地点不同时刻的负荷值, 通过基于流量的静态路由算法^[36]访问不同 IP 地址, 建立不同的路由路径, 可以模拟电动汽车充电对电网产生的影响。根据模拟结果, 可以优化路由路径, 进行有序充电。

2.2 实时充电进程控制模型

每个充电进程是从创建到终止的全过程一直处于不断变化中的过程。为了判断是否能够对电动汽车进行实时充电操作, 本文建立了五状态实时充电进程控制模型。该模型的充电进程始终处于以下 5 种状态之一: 创建, 充电, 就绪, 等待, 退出。

其中, 创建状态是指根据电动汽车车需求, 创建充电进程; 充电状态是指充电进程开始执行, 电池充电的状态; 就绪状态是指安排充电计划, 充电进程未执行, 电池未充电的状态, 此状态为一种短暂的过渡状态, 方便相关算法决定电动汽车进入充电/等待状态; 等待状态也可称为阻塞状态或封锁状态, 是指充电进程不执行、电池不充电的状态; 退出状态是指充电目标完成、退出充电序列的状态。任何时刻, 充电进程都处于且仅处于 5 种状态之一。由于电网负荷和自身发展状况的变化, 充电进程在运行过程中可以在这 5 种状态间相互转换 (如图 4 所示), 从而体现了电动汽车有序调度的动态性。5 种状态转换过程如下。

a. 创建→就绪。

当充电控制系统获取充电任务后, 随即创建充电进程, 并完成提交任务, 充电进程转换为就绪状态。

b. 就绪→等待。

根据配电网的实时负荷特性, 若充电进程不满足电压、功率上限、三相不平衡度等限制条件, 则充电进程由就绪状态转换为等待状态。

c. 就绪→充电。

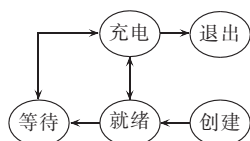


图 4 5 种充电进程状态转换图

Fig.4 Transition among five states of charging process

根据配电网的实时负荷特性, 若充电进程满足电压、功率上限、三相不平衡度等限制条件, 则充电进程由就绪状态转换为充电状态。

d. 充电→就绪。

当充电进程所处时间片用完, 充电进程由充电状态转换为就绪状态。

e. 等待→充电。

当停车剩余时长小于充电必要时长时, 充电进程由等待状态强制转换为充电状态。

f. 充电→等待。

由于存在有车辆的充电进程由等待状态转换为充电状态, 内层算法根据当时状态, 决定其他车辆进入等待状态。

g. 充电→退出。

当充电目标达到时, 充电进程由充电状态转换为退出状态。

2.3 有序充电模型

三相负荷的不平衡影响系统网损^[37], 为此, 本文设计了双层目标函数。

2.3.1 外层模型目标函数

适用于中压侧的目标函数主要以减小区域内配电网的网络损耗为主, 其表达式为:

$$F_0 = \min \Delta P_{\text{loss}} \quad (3)$$

$$\Delta P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{i\text{loss}} \quad (4)$$

$$\Delta P_{i\text{loss}} = \sum_{d=d_s}^{d_e} \frac{P_i^2(d) + Q_i^2(d)}{U_i^2(d)} (R_{il} + R_{iT}) \quad (5)$$

$$P_i(d) = P_{il}(d) + P_{ich}(d) \quad (6)$$

其中, ΔP_{loss} 为区域内的总网损; $\Delta P_{i\text{loss}}$ 为配电网中区域 i 的全天网损; n 为变压器台数; d_s 为起始地址; d_e 为终止地址; $P_i(d)$ 为区域 i 地址 d 标记的有功功率; $Q_i(d)$ 为区域 i 地址 d 标记的无功功率; $U_i(d)$ 为区域 i 地址 d 标记的电压值; R_{il} 为区域 i 距离上级母线的线路电阻值; R_{iT} 为区域 i 的配电变压器短路电阻值; $P_{il}(d)$ 为区域 i 的本地负荷在地址 d 的有功功率; $P_{ich}(d)$ 为区域 i 的充电负荷在地址 d 的总体充电功率。

电压和有功功率约束条件为:

$$(1-\alpha)U_n \leq U_i(d) \leq (1+\alpha)U_n \quad (7)$$

$$S_i(d) \leq 0.75 S_{iN} \quad (8)$$

$$S_i(d) = \sqrt{P_i^2(d) + Q_i^2(d)} \quad (9)$$

其中, $\alpha=0.07$ ^[39]; U_n 为标准电压; $S_i(d)$ 为地址 d 标记的视在功率值; S_{iN} 为区域 i 配电变压器的标称视在功率值^[38]。

2.3.2 内层模型目标函数

由于三相负荷存在差异, 配电网中存在一定程度的负荷不平衡度, 如图 5 所示。

降低配电网的三相负荷不平衡, 有利于进一步降

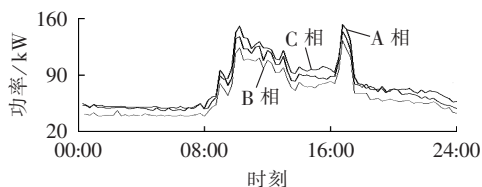


图 5 配电网三相负荷不平衡

Fig.5 Three-phase load imbalance of distribution network

低配电网的网络损耗^[37]。

本文内层模型针对配电网的负荷不平衡特点,主要利用电动汽车随机接入,控制电动汽车的充电状态,平抑本地负荷三相不平衡度,其目标函数表达式为:

$$F_1 = \min \varphi_{\text{un}} = \min \frac{\sqrt{\sum (P_{i\alpha}(t) - P_{i\beta}(t))^2}}{P_{i\alpha}(t)} \quad (10)$$

其中, $\beta = A, B, C$; $P_{i\beta}(t)$ 为 t 时刻区域 i 三相负荷的最小有功功率值; $P_{i\alpha}(t)$ 为 t 时刻区域 i 三相负荷的平均值。

2.3.3 有序充电策略算法

为了解决双层目标函数的问题,本文提出了一种车-网互动求解策略,流程图如图 6 所示。

外层算法使用寻址求解,内层算法使用实时的轮询调度算法。求解策略流程如下。

a. 针对当前 t 时刻,首先判断是否为全天的终点,如果是全天的终点,则输出充电效果图。

b. 判断是否接收到充电需求(主要包含电动汽车充电起始时间 t_s 和充电截止时间 t_e),进行地址转换,过程如 2.1 节所述。如果虚拟电厂接收到充电需求,则进入外层算法结构;如果虚拟电厂没有接收到充电需求,则判断当前时刻是否有车辆正在充电。

针对接收的充电需求,首先创建充电进程 P_g (每辆车都有独立的进程),然后针对充电区间 t_w (如式(11)所示),以地址 d 为变量,使用基于流量的静态路由算法^[36]遍历充电区间内的地址,读取地址 d 所标记的负荷值,使用前推回代算法计算地址段内的网络损耗。选取区间内的网损最低处作为充电区域。

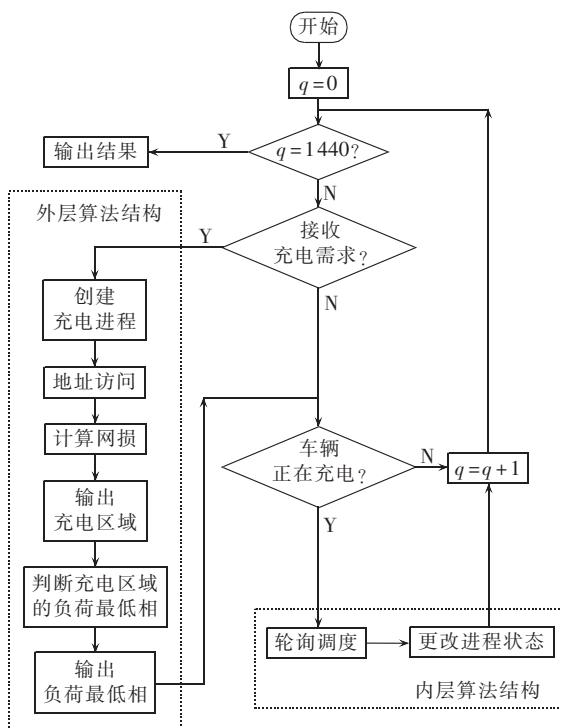
同时,为了防止电动汽车在该区域集中于某一相充电,即充电负优化,使用老化算法^[40]优化 t_s 时刻三相的负荷,选取负荷判断值 $P_{i\beta}$ 的最低相作为充电相,引导车辆前往,如式(12)所示。

$$t_w = t_e - t_s \quad (11)$$

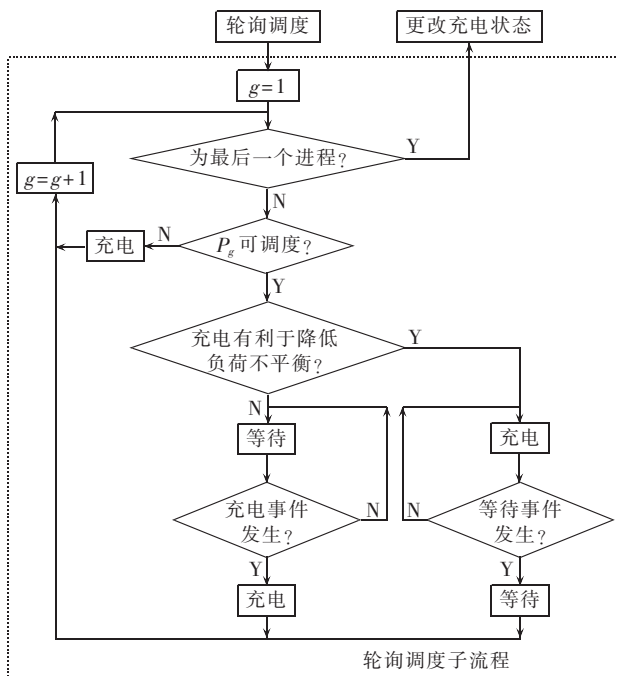
$$P_{i\beta} = \sum_{t=t_s}^{t_e} P_{i\beta}(t) / 2 \quad \beta = A, B, C \quad (12)$$

其中, t_s 为充电起始时间; t_e 为充电截止时间; $P_{i\beta}$ 为区域 i 在充电起始时刻 t_s 时 β 相的负荷判断值。

c. 外层算法结束后,判断当前虚拟电厂是否有车辆正在充电。如果没有车辆进行充电,直接进入



(a) 双层算法流程图



(b) 轮询调度子流程

图 6 算法流程图

Fig.6 Flowcharts of algorithm

下一时刻;如果有车辆正在充电,则进入轮询调度阶段,其子流程如图 6(b)所示。虚拟电厂使用轮询调度算法访问三相负荷中每辆车的充电进程($P_1 \sim P_g$),并且判断车辆是否可以参与调度,判断条件如式(13)所示。

$$t_w > t_{EE} \quad (13)$$

其中, t_{EE} 为充电必要时间,如式(14)所示。

$$t_{EE} = 0.3 C_N / P_{ic} \quad (14)$$

$$P_{ic}=\begin{cases} 3 & t_{iw}>180 \\ 7 & 60<t_{iw}\leqslant 180 \\ 25 & t_{iw}\leqslant 60 \end{cases} \quad (15)$$

其中, C_N 为电动汽车电池容量; P_{ic} 为区域 i 电动汽车充电功率; t_{iw} 为区域 i 车辆停留时长。

如果车辆不可调度, 则直接进入充电状态; 若车辆可以参与调度, 计算计及电动汽车前后三相负荷不平衡度, 如式 (16) 所示。

$$\begin{cases} \varphi_i(t)=\frac{P_{i\alpha}^t-P_{i\gamma}^t}{P_{iavg}^t} \\ \varphi'_i(t)=\frac{P_{i\alpha}^t-P_{i\gamma}^t}{P_{iavg}^t} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\varphi_i(t)$ 为区域 i 不加充电负荷时的三相不平衡度; $P_{i\alpha}^t$ 为区域 i 未加充电负荷时负荷最大值; $P_{i\gamma}^t$ 为区域 i 未加充电负荷时负荷最小值; P_{iavg}^t 为区域 i 未加充电负荷时负荷平均值; $\varphi'_i(t)$ 为区域 i 计及充电负荷的三相不平衡度; $P_{i\alpha}^t$ 为区域 i 叠加充电负荷时负荷最大值; $P_{i\gamma}^t$ 为区域 i 叠加充电负荷时负荷最小值; P_{iavg}^t 为区域 i 叠加充电负荷时负荷平均值。

如果可调度的电动汽车 (同相或者不同相) 采取充电有利于降低三相负荷不平衡度, 即 $\varphi'_i(t)<\varphi_i(t)$, 则车辆进入充电状态, 然后, 若有等待事件发生 (如同相位的不可调度车辆充电, 加剧不平衡; 电压越限; 功率越限), 则进入等待状态; 反之, 若有充电事件发生 (不可调度车辆充电加剧不平衡, 其他相位的车辆充电有利于降低不平衡), 则相应等待状态的车辆进入充电状态。

- d. 根据步骤 c 的结果, 改变相应电动汽车状态。
- e. 当前时刻结束后, 进入下一时刻, 转步骤 a。

3 算例仿真

3.1 仿真设定

采用某区域实际配电网网络拓扑作为算例, 拓扑结构如图 7 所示, 拓扑参数如表 2 所示, 电压基准值设为 10 kV。该区域夏季典型日的时空负荷特性如图 8 所示。

配电网中共有 100 辆电动汽车, 按照第 1 节所建模型从区域内实际出行车辆中抽取。电动汽车电池

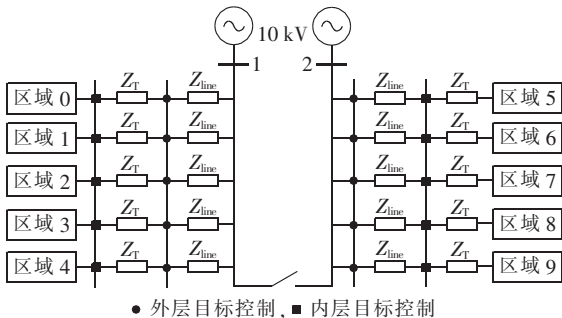


图 7 配电网拓扑
Fig.7 Topology of distribution network

表 2 配电网参数
Table 2 Parameters of distribution network

区域 编号	变压器参数			线路参数	
	电阻/ Ω	电抗/ Ω	容量/(kV·A)	电阻/ Ω	电抗/ Ω
0	1.0300	4.5000	1000	0	0
1	1.0300	4.5000	1000	0.085 239	0.049 896
2	1.0300	4.5000	1000	0.062 238	0.036 432
3	1.5621	7.1429	630	0.055 473	0.032 472
4	1.5621	7.1429	630	0.055 473	0.032 472
5	0.7680	3.6000	1250	0.056 826	0.033 264
6	0.4275	2.2500	2000	0.023 6775	0.013 86
7	0.7680	3.6000	1250	0.062 238	0.036 432
8	0.7680	3.6000	1250	0	0
9	1.0300	4.5000	1000	0.085 239	0.049 896

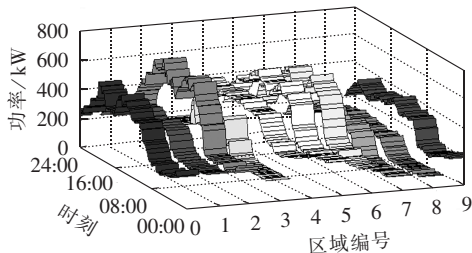


图 8 时空负荷特性
Fig.8 Time-space characteristics of load

容量 C_N 为 25.6 kW·h, 初始荷电状态 (SOC) 为 0.4, 截止 SOC 为 0.7, 补充电量为 7.68 kW·h, 约能驾驶 45 km, 足以满足日常通勤需求^[41]。根据停车时长不同, 由式 (15) 计算电动汽车充电功率。此次仿真地址使用范围为 192.168.0.1~192.168.77.160。线路和变压器等值模型中导纳支路带来的有功功率损耗忽略不计。

3.2 仿真结果

经过双层算法优化后的多时空充电特性如图 9 所示。由图 9 可知, 充电区域主要集中在区域 3 和区域 8。

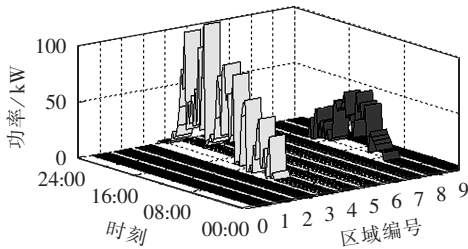


图 9 时空充电特性
Fig.9 Time-space characteristics of charging power

区域内电动汽车无序充电时的充电功率和有序充电时区域 3、8 的充电功率如图 10 所示。

区域内电动汽车无序充电和有序充电所带来的网损如图 11 所示。

计算双层优化调度后三相负荷中的最小值与三相负荷的平均值, 两者的比值 (三相负荷不平衡度) 越接近 1, 表明负荷越接近平衡。区域 3、8 的三相负荷不平衡度如图 12 所示。

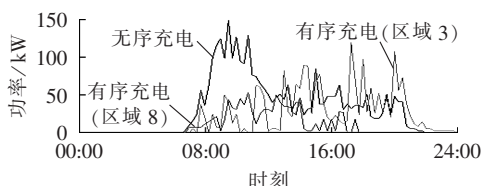


图 10 充电尖峰对比
Fig.10 Comparison of charging peaks

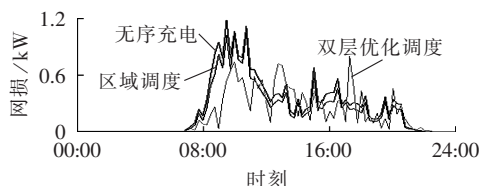
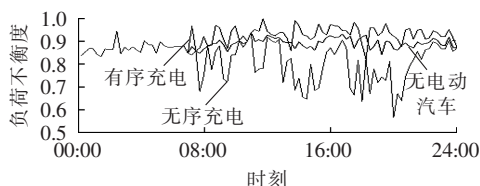
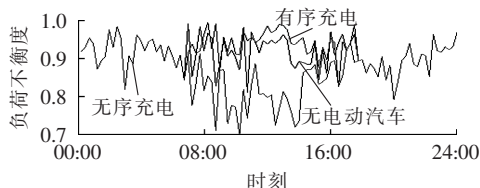


图 11 系统网损对比
Fig.11 Comparison of power losses



(a) 区域 3 的负荷不平衡度



(b) 区域 8 的负荷不平衡度

图 12 区域 3 和区域 8 的负荷不平衡度

Fig.12 Load imbalance degrees of Block 3 and 8

由图 10 可知,在满足电动汽车车主需求的前提下,将电动汽车无序充电经过时空调度分配后,变压器上级节点日间充电峰值得到明显下降,夜晚峰值增加,但峰值下降了 20%,达到了移峰填谷的作用。同时,由图 11 可见,经过有序引导,电动汽车对配电网所造成的网络损耗高峰降低 30%,全天网络损耗降低 25%。

由图 12 可知,在电动汽车充电过程中,经过有序充电引导,配电网负荷的三相不平衡度得到了改善。区域 3 的原始平均不平衡度为 88.3%,无序充电的平均不平衡度为 81.8%,有序充电的平均不平衡度为 91.0%;区域 8 的原始平均不平衡度为 91.3%,无序充电的平均不平衡度为 86.9%,有序充电的平均不平衡度为 92.0%。以上结果表明,有序充电在一定程度上平抑了配电网的负荷不平衡。

仿真结果表明,有序充电在大幅降低无序充电网络损耗的同时,降低了无序充电带来的不平衡冲击;与原始平均不平衡度相比,有序充电可以平抑配电网三相负荷的不平衡度。

4 结论

本文提出了一种基于虚拟电厂的车-网互动策略,利用电动汽车随机接入平抑配电网三相不平衡的有序充电策略模型。在满足车主需求的前提下,达到了降低全天网络损耗的目标,同时,利用电动汽车的随机接入,平抑了配电网的三相不平衡度。外层算法通过基于流量的静态路由算法结合前推回代算法计算充电的最佳位置,内层算法使用老化算法改进充电相位的选择,并且使用轮询调度算法决定充电进程状态。该算法计算速度快,适用于实时调度。仿真算例表明,应用所提策略可以有效降低充电高峰,达到避免峰上加峰的不利局面,在降低了全天网络损耗的同时,平抑了原配电网的三相负荷不平衡度。

本文提出的策略适用于工作日日常通勤私家车的有序充电控制,但时空调度会对车主造成一定程度上的不便。今后可结合包含多种资源的虚拟电厂、实时电价等手段解决这一问题,这也将是笔者研究的重点。

参考文献:

- [1] 彭倩,姚兰,胡国松. 中国能源安全及对策[J]. 财经科学,2014(10):73-80.
PENG Qian,YAO Lan,HU Guosong. China's energy safety and countermeasures[J]. Finance & Economics,2014(10):73-80.
- [2] 赵鲁涛,程蕾,薛美美,等. 中国能源安全分析与展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2014,16(3):1-6.
ZHAO Lutao,CHENG Lei,XUE Meimei,et al. China energy security analysis and projection[J]. Journal of Beijing Institute Technology(Social Science Edition),2014,16(3):1-6.
- [3] 沈镭,薛静静. 中国能源安全的路径选择与战略框架[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(10):19-22.
SHEN Lei,XUE Jingjing. Development path choice and strategy framework of China's energy security[J]. China Population Resources and Environment,2011,21(10):19-22.
- [4] WG C620,CIGRE. Integration of electric vehicles in electric power systems[R]. Paris,France:CIGRE Working Group,2015.
- [5] 刘文霞,张蕾蕾,刘宗歧,等. 城市纯电动汽车发展模式论证方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(24):34-40.
LIU Wenxia,ZHANG Leilei,LIU Zongqi,et al. A development pattern argumentation method for battery electric vehicles in cities[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(24):34-40.
- [6] 郭春林,甄子健,武力,等. 电动汽车发展前景与关键因素分析[J]. 汽车工程,2012,34(9):852-858.
GUO Chunlin,ZHEN Zijian,WU Li,et al. Prospects and key factors analysis of electric vehicles development[J]. Automotive Engineering,2012,34(9):852-858.
- [7] 庄幸,姜克隽. 我国纯电动汽车发展路线图的研究[J]. 汽车工程,2012,34(2):91-97.
ZHUANG Xing,JIANG Kejun. A study on the roadmap of electric vehicles development in China[J]. Automotive Engineering,2012,34(2):91-97.

- [8] 李志刚. 电动汽车发展创新与节能减排研究——基于电力能源的视角结合 EVA 分析评价[J]. 科学管理研究, 2014, 32(5): 55-58.
LI Zhigang. Electric vehicle development innovation and energy-saving emission reduction research—electric energy perspective based on the combination of EVA analysis and evaluation[J]. Scientific Management Research, 2014, 32(5): 55-58.
- [9] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [10] 赵俊华, 文福拴, 杨爱民, 等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 2-10.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 2-10.
- [11] 王建, 吴奎华, 刘志珍, 等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 47-52.
WANG Jian, WU Kuihua, LIU Zhizhen, et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 47-52.
- [12] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9.
GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9.
- [13] AXSEN J, KURANI K S. The early U.S. market for PHEVs: anticipating consumer awareness, recharge potential, design priorities and energy impacts[J]. Institute of Transportation Studies Working Paper, 2008(8): 32.
- [14] PARKS K, DENHOLM P, MARKEL T. Costs and emissions associated with plug-in hybrid electric vehicle charging in the XCEL energy colorado service territory[R]. [S.L.]: National Renewable Energy Laboratory, 2007.
- [15] KURANI K S, TYREEHAGEMAN J, CAPERELLO N. Potential consumer response to electricity demand response mechanisms: early plug-in electric vehicle drivers in San Diego, California[R]. Davis, California, USA; Institute of Transportation Studies University of California, 2013.
- [16] SHAO S, ZHANG T, PIPATTANASOMPORN M, et al. Impact of TOU rates on distribution load shapes in a smart grid with PHEV penetration[C]//2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans, LA, USA; IEEE, 2010: 1-6.
- [17] GAO Y, WANG C, WANG Z, et al. Research on time-of-use price applying to electric vehicles charging[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Tianjin, China; IEEE, 2012: 1-6.
- [18] MASOUM A S, DEILAMI S, MOSES P S, et al. Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimization considering voltage regulation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(8): 877-888.
- [19] ZHANG P, QIAN K, ZHOU C, et al. A methodology for optimization of power systems demand due to electric vehicle charging load[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1628-1636.
- [20] SUNDSTROM O, BINDING C. Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 26-37.
- [21] SU S, JIANG J C, WANG W. An autonomous decentralized voltage control scheme in PEV charging devices on the distribution network—reactive power compensation for voltage decreases caused by household loads and charging devices[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014, 24(3): 412-432.
- [22] DONG Q, NIYATO D, WANG P, et al. The PHEV charging scheduling and power supply optimization for charging stations[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2): 566-580.
- [23] HOKE A, BRISSETTE A, SMITH K, et al. Accounting for lithium-ion battery degradation in electric vehicle charging optimization[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3): 691-700.
- [24] SINGH M, KAR I, KUMAR P. Influence of EV on grid power quality and optimizing the charging schedule to mitigate voltage imbalance and reduce power loss[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. Ohrid, Macedonia; IEEE, 2010: T2-196-T2-203.
- [25] PUTRUS G A, SUWANAPINGKARL P, JOHNSTON D, et al. Impact of electric vehicles on power distribution networks[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. Dearborn, MI, USA; IEEE, 2009: 827-831.
- [26] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 201-207.
ZHAN Kaiqiao, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A coordinated charging strategy for electric vehicle three-phase load balance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 201-207.
- [27] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [28] 陈春武, 李娜, 钟朋园, 等. 虚拟电厂发展的国际经验及启示[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2258-2263.
CHEN Chunwu, LI Na, ZHONG Pengyuan, et al. Review of virtual power plant technology abroad and enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2258-2263.
- [29] 郑静, 文福拴, 李力, 等. 计及能效电厂优化配置的输电系统两层规划[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 13-20.
ZHENG Jing, WEN Fushuan, LI Li, et al. Two-level planning of transmission system with optimal placement of efficiency power plants[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 13-20.
- [30] 陈春武, 钟朋园, 曾鸣, 等. 虚拟电厂内部资源调度算法的对比分析及应用[J]. 水电能源科学, 2014(5): 197-201.
CHEN Chunwu, ZHONG Pengyuan, ZENG Ming, et al. Comparative analysis of dispatching algorithms for distributed energy resources in virtual power plant[J]. Water Resource and Power, 2014(5): 197-201.
- [31] 谭显东, 胡兆光, 彭谦. 考虑能效电厂的供需资源组合优化模型[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 108-112.
TAN Xiandong, HU Zhaoguang, PENG Qian. A resource combination optimization model considering efficiency power plant[J].

- Power System Technology, 2009, 33(20): 108-112.
- [32] 余爽,卫志农,孙国强,等. 考虑不确定性因素的虚拟电厂竞标模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 43-49.
- YU Shuang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. A bidding model for a virtual power plant considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 43-49.
- [33] 李泓泽,王宝,郭森. 智能电网条件下能效电厂参与市场竞价的分析模型及效益测算[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 111-116.
- LI Hongze, WANG Bao, GUO Sen. Analytic model and benefits measurement of efficiency power plant participating in market bidding transaction in smart grid environment[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 111-116.
- [34] FERDOESI M, UNDA I G, KARFOPOULOS E, et al. Controls and EV aggregation for virtual power plants[R]. [S.l.]: MERGE, 2010.
- [35] 北京交通发展研究院. 2015年北京交通发展年报[EB/OL]. [2016-12-20]. <http://www.bjjtw.gov.cn/xxgk/jttj/>.
- [36] 张春红. P2P技术全面解析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 15-17.
- [37] 蒋浩,王森. 三相负荷不平衡对低压网损影响的分析[J]. 供用电, 2008(3): 68-70.
- JIANG Hao, WANG Miao. Analysis on the influence of unbalance three-phase load on LV line loss[J]. Distribution & Utilization, 2008(3): 68-70.
- [38] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器经济运行: GB/T 13462—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [39] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [40] SILBERSCHATZ A P B G, GREG G. Operating system principles[M]. 7th ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2006: 159.
- [41] 王丰龙,王冬根. 北京市居民汽车使用的特征及其影响因素[J]. 地理学报, 2014, 69(6): 771-781.
- WANG Fenglong, WANG Donggen. Characteristics and determinants of car use in Beijing[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(6): 771-781.

作者简介:



苏粟

苏粟(1981—),女,北京人,副教授,博士,研究方向为电动汽车与电网互动、电力系统可靠性分析等(E-mail:ssu@bjtu.edu.cn);

马涛(1989—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为虚拟电厂、电动汽车对配电网的影响等(E-mail:formularf1@gmail.com)。

Strategy based on virtual power plant for load balancing between EVs and distribution network

SU Su, MA Tao, WANG Wei, HU Yong, LIU Ziqi, WEI Xiangxiang

(National Active Distribution Network Technology Research Center,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A model based on virtual power plant is proposed to control the charging process in real time, which not only considers the travel behaviors of EV(Electric Vehicle) owners but also relieves the load imbalance of distribution network to realize the interaction between EVs and distribution network. A two-layer algorithm is proposed to solve the model. Its outer layer adopts the static routing algorithm to obtain the load data and the back/forward sweep method to calculate the nodal voltage and power loss of distribution network; its inner layer adopts the aging algorithm to judge the accessing phase of EV and the round-robin scheduling algorithm to balance the three-phase loads of distribution network. The power loss and the load imbalance degree of distribution network can be reduced by adjusting the charging time of EVs. Simulative results show that, the proposed strategy can not only avoid the charging peak and lower the three-phase load imbalance degree of distribution network but also reduce its power loss and ensure its safe and economical operation.

Key words: virtual power plant; electric vehicles; orderly charging; real-time charging control; load imbalance; distribution network; interaction; round-robin scheduling algorithm