

基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略

许少伦, 严正, 冯冬涵, 张良

(上海交通大学 电气工程系 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 在分析电动汽车充电负荷特性、管理架构的基础上, 借鉴复杂自适应系统的核心思想, 提出基于多智能体的电动汽车充电管理模式。建立单台电动汽车的充电负荷模型和基于多智能体系统的电动汽车充电优化模型。采用蒙特卡洛方法模拟电动汽车用户的充电行为。在考虑电动汽车的充电功率、充电时间以及变压器可用容量等约束条件的前提下, 针对 35 kV 片区配电网中电动汽车接入充电的优化问题, 提出基于多智能体协同控制的电动汽车充电优化策略。仿真结果表明多智能体协同控制策略能够有效地实现电动汽车充电负荷的“移峰填谷”, 减小电网峰谷差。

关键词: 电动汽车; 充电优化; 多智能体; 协同控制; 复杂自适应系统; 模型; 负荷管理

中图分类号: TM 73; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.002

0 引言

电动汽车(EV)作为一种新型交通工具, 在缓解能源危机、减少环境污染等方面具有非常大的优势。电动汽车的普及已成为一种趋势^[1], 工信部《电动汽车发展战略研究报告》预测, 2030 年全国电动汽车保有量将达到 6 000 万辆。

电动汽车作为一种新型的、大容量的负荷, 大量接入电网时会给电力系统的安全与经济运行带来新的挑战。电动汽车的充电行为在时间和空间上具有不确定性, 其无序充电会导致电网高峰时段的负荷明显上升, 需要增加发电容量, 甚至需要新增电力网络容量, 大幅增加了系统运行成本和投资成本; 此外, 也会引起电压控制、谐波、供需平衡等方面的问题^[2-4]。同时, 电动汽车也可作为分布式储能元件, 如果对电动汽车的充放电进行优化控制, 不仅能够实现削峰填谷, 有效地降低总的充电成本和系统运行成本, 而且能够平抑可再生能源的间歇性, 为系统提供调频、调峰及备用等辅助服务。因此研究电动汽车的负荷模型及其充电优化策略, 充分发挥电动汽车对电网负荷削峰填谷等作用, 对提高电网供电可靠性和能源利用效率具有重要的意义。

目前, 国内外学者在电动汽车充电优化问题上做了一系列开拓性的研究。文献[5-8]主要以集中控制和分层控制的模式对电动汽车的充电负荷进行优化, 这种模式能够在理论上获得较优的控制结果, 但是如果考虑到将来大规模电动汽车接入电网, 该模

式相应的优化问题中会出现严重的“维数灾”, 难以求解; 另外, 集中调度模式要求调度机构与每辆电动汽车之间都要进行频繁通信, 这对通信网络的可靠性和带宽的要求极高。因此, 这种集中调度模式在实际应用中难以实现。

多智能体系统是分布式人工智能研究的一个重要分支, 是由多个可计算的智能体组成的集合, 其中每个智能体是一个物理的或抽象的实体, 能作用于自身和环境, 并可与其他智能体通信, 其目标是将大的复杂系统建造成小的、彼此相互通信及协调的、易于管理的系统, 是研究复杂自适应系统 CAS(Complex Adaptive System)的有效方法^[9-10]。大规模电动汽车接入之后的配电网实际上就是 CAS, 所以采用多智能体的方法来解决大规模电动汽车的充电优化问题是一个很好的探索。

本文以慢充方式的家庭用电动汽车为主要研究对象, 在分析电动汽车充电负荷特性和管理架构的基础上, 将电动汽车和充电桩定义为具有智能的主体, 并建立了单个电动汽车智能体的负荷模型和基于多智能体系统的充电优化模型, 采用多智能体协同控制的策略对电动汽车的充电优化问题进行求解分析。

1 电动汽车充电负荷特性分析

电动汽车充电负荷的建模是研究电动汽车充电优化策略的基础。首先需要分析充电负荷的影响因素, 主要包括以下几个方面。

a. 电动汽车类型。电动汽车的主要类型为公交车、出租车、公务车、私家车等^[11]。不同类型电动汽车的用户用车行为和充电行为差别较大。像公交车、出租车、公务车这类公用车的日行驶里程远远大于私家车, 一般需要快速充电或者换电池的模式。私家

收稿日期: 2013-11-04; 修回日期: 2014-09-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA-050803); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS13009)
Project supported by the National High-Tech R & D Program of China(863 Program)(2012AA050803) and State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(LAPS13009)

车使用非常灵活,一天中 90% 以上的时间都处于停驶状态,有足够的时间充电,便于协调调度,而且将来私家车的比例会越来越来,研究其充电优化不仅可以为用户节约充电成本,而且可以为电网提供“移峰填谷”等服务,所以本文中主要研究私家车的充电优化。

b. 电动汽车的电池特性。包括电池类型、电池容量、充电速率等。

电动汽车的电池主要包括铅酸、镍氢、镍镉、锂离子、钠硫等类型^[12]。虽然当前可用于电动汽车的动力电池类型较多,但是根据对电池比能量、效率、比功率等方面的性能对比得出结论,锂离子电池具备最佳的综合性能^[12-13],将有望推动电动汽车的大规模商业化。电池容量决定了电动汽车的续航里程。充电速率决定了实际的充电功率及充电负荷曲线。

c. 出行需求和使用习惯。主要指用户的日行驶里程、出行时间、出行频率与出行目的等,它们决定了用户的充电时间、需求电能以及获得充电服务的情况。当前基于出行需求的计算方法认为是电动汽车对传统车辆的替代使用,不会影响用户的出行特征,从而可以利用用户出行特征的统计数据进行研究,通过蒙特卡洛模拟抽样,可以方便地获得具有时序特征的充电负荷信息。

d. 电动汽车充电方式。不同的充电方式对应的充电负荷具有显著区别。从充电速率的角度而言,可以分为慢充、快充和电池更换 3 类;从控制的角度而言,可以分为直接、间接 2 类。直接控制是由调度机构直接制定充电计划,并且发送给各电动汽车执行充电。间接控制是指通过制定峰谷电价、实时电价或辅助服务价格等途径对用户充电行为加以引导^[14],本文主要考虑慢充方式和间接控制方式。

2 电动汽车的充电管理架构

2.1 电动汽车充电管理架构分析

在近期的一些文献中介绍了多种电动汽车充电管理的架构,比较有代表性的有集中控制、分层控制和分布式控制 3 种。

a. 集中控制。

文献[8]中对电动汽车调度问题采取的是由调度机构进行直接调度的模式。对电动汽车的充电进行控制需要电动汽车与电网进行信息交互,交互的内容包括电动汽车的充电需求、停车状态、电池荷电状态等。但目前配电网的信息化程度还不够,配电控制中心对于配网运行实时信息掌握不全,基于在线运行的电动汽车大规模充电控制难度较大,而且大规模电动汽车接入电网时,集中调度模式还会导致在相应优化问题中出现“维数灾”问题。

b. 分层控制。

文献[2]中采用分层分区控制的模式来缓解集中控制中遇到的维数灾和通信要求高的问题。在该模式下,一般由配电系统调度机构或第三方电动汽车代理负责某一区域内电动汽车的协调调度,这样电动汽车的调度问题就分解成为了输电系统调度问题和若干区域调度问题,可以缓解调度中心的压力,研究的重点可放在配电系统内各区域的电动汽车最优调度问题上。

c. 分布式控制。

由于电动汽车分属于千百万不同的用户,它们接入电网及其充电的操作权限也相应地归属于不同用户,所以具有明显的移动、分散以及不确定性,其充电优化实质上是一个分布式决策的问题^[15]。文献[16]将电动汽车和充电设备看作是多代理系统中的智能体,该智能体可以根据本身的状态和外部环境的变化做出相应的决策,自主选择充电站、充电方式,较好地仿真模拟了电动汽车的充电行为。这种分布式控制的方式可以在一定程度上有效地整合规模庞大但时空特性分散的电动汽车进行有序充电,实现电动汽车的分散自治。

2.2 基于多智能体的电动汽车充电管理架构

2.2.1 CAS

CAS 理论是在 1994 年由 Holland 教授正式提出的。CAS 理论的核心是适应产生复杂性,其成员称为具有适应性的主体。主体的适应性,是指它能够与环境以及其他主体进行交流,在这种交流的过程中“学习”或“积累经验”,并且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式^[17]。整个宏观系统的演变或进化,包括新层次的产生、分化和多样性的出现等,都是在这个基础上逐步派生出来的。CAS 理论是复杂性科学研究的一个重要领域,它的提出对人们认识、理解、控制和管理复杂系统提供了新的思路和视角,对于认识与解释经济、社会、生态和生物等复杂系统具有特别的意义^[16]。

CAS 所涵盖的范围非常广泛,小到微观粒子的内部相互作用,大到宏观经济、宇宙运行,都被认为是 CAS。当配电网中有大量的电动汽车接入时,电动汽车与充电设备、配电网等构成的系统实际上就是一个 CAS。电动汽车充电选择在时间上和空间上具有随机性,可以看作是具有适应性的主体,能够根据电网环境的变化改变充电时间、目标充电量等参数进行动态响应。

2.2.2 多智能体系统

多智能体系统是由多个可计算的智能体组成的集合,其中每个智能体是一个物理的或抽象的实体,能作用于自身和环境,并可与其他智能体通信。多智

能体系统没有中央控制器,信息的交换和分享也只是在部分个体间进行,每个个体根据分布式的邻域规则来更新自身的状态,但是就是基于这些简单的局部信息的作用规则却能产生一些期望的宏观行为^[18]。在自然界中,多智能体系统可以是神经网络、生态系统、新陈代谢系统等;在工程中,多智能体系统可以是电力网、有线/无线通信系统、传感器网络、机器人网络、软件系统等。

2.2.3 基于多智能体的电动汽车充电管理模式

结合分层控制和分布式控制,本文提出基于多智能体的电动汽车充电管理模式,其架构如图 1 所示。

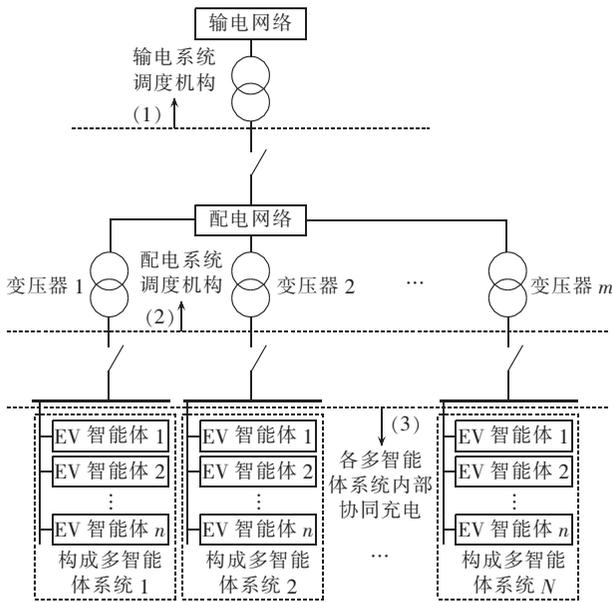


图 1 基于多智能体的电动汽车充电管理架构

Fig.1 Charging management structure of EV based on multi-agent

该模式将电力系统分成 3 个层次:第(1)层为输电网络层;第(2)层为变压器以上的配电网层;第(3)层为变压器以下的用电层。

在变压器以下层面,采用多智能体协同控制的策略对电动汽车充电进行管理。将电动汽车作为具有适应性的智能体,同一变压器下的电动汽车组成一个充电群体,它们之间可以利用现今比较主流的基于 WiFi 的无线传感网络进行信息传递^[19],其通信机制如图 2 所示。并根据需要将 1 d 分为多个时段,当电动汽车接入配电网时,该智能体获取所接入的变压器在该时段的负荷信息以及后续时段的预估负荷信息,同时结合自身的充电需求和可用时段,制定自身的充电计划,并将更新后的变压器负荷信息发布给其他智能体,按照接入时间依次生成各自的充电计划,共同完成其所在变压器负荷的“移峰填谷”任务(本文中假定电动汽车用户和上层的电动汽车服务商或配电网调度中心之间有辅助服务协议,暂不考虑充电电价的影响)。

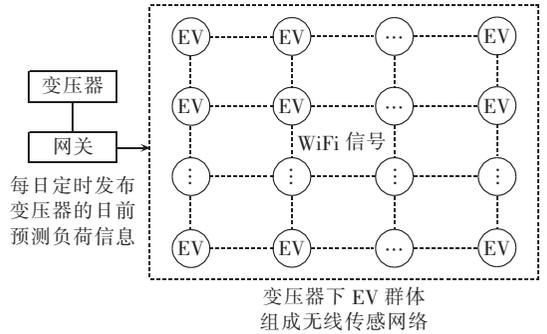


图 2 基于无线传感网络的电动汽车通信机制

Fig.2 Communication mechanism of EV based on wireless sensor network

可在配网变压器上安装信息发布终端,按照时段定时将该变压器的预测负荷信息发布给该时段内接入的电动汽车智能体;上层的配电系统调度和输电系统调度采用和传统电网中相同的调度策略即可。该架构的好处在于因变压器下的充电设备可以在较大程度上实现自适应协同,将上层调度机构的范围缩小在变压器以上,从而可以有效地避免大规模电动汽车充电优化的“维数灾”和“通信要求高”等问题。

3 电动汽车充电优化模型

3.1 单台电动汽车充电负荷模型

(1) 变量和参数。

表 1 列举了本文中单台电动汽车充电负荷所考虑的主要变量和参数。

表 1 单台电动汽车充电负荷的主要变量定义
Table 1 Main variables of a single EV charging load

变量	描述
B_c	电池容量
P_N	额定充电功率
η_c	充电效率
SOC_s	起始电量状态
SOC_e	结束时自行设置的期望电量状态
SOC_r	结束时的实际电量状态
T_a	到家接入电网的时间
T_d	出行离开电网的时间
T_s	开始充电的时间
T_r	实际完成充电所需的时长
M_d	日行驶里程
E_{p100}	行驶 100 km 所需要的电能

充电时间可以通过式(1)、(2)计算:

$$T_r = \frac{(SOC_e - SOC_s)B_c}{P_N \eta_c} \quad (1)$$

$$SOC_s = SOC_r - \frac{M_d E_{p100}}{100 B_c} \quad (2)$$

(2) 需要考虑的约束条件。

a. 电量状态约束:

$$SOC_e \leq SOC_r \leq 1 \quad (3)$$

$$0.2 \leq SOC_s \leq SOC_e \quad (4)$$

即用户出行离开电网时,其电动汽车完成充电的实际电池电量状态应该大于用户自行设定的目标值,最大为 1;考虑到电池过度放电对其寿命的不利影响,用户回家接入电网时,电动汽车的实际电池电量状态的最小值常取值为 0.2^[20]。

b. 充电时间约束:

$$T_a \leq T_s \leq T_d - T_r \quad (5)$$

即电动汽车应该在用户可用的充电时间段完成充电。如果未能达到目标电量状态,则需要用户重新设定目标电量状态或调整可用充电时间段。

本文中假设充电装置给电动汽车电池的充电过程为恒功率充电。对单台电动汽车而言,能够在满足自身基本电量需求的情况下参与多智能体系统的协同控制,并且尽可能使自身的起始充电时间最早:

$$\min T_s \quad (6)$$

3.2 基于出行需求的电动汽车充电负荷模拟

对电动汽车充电产生影响的用户行为主要包括用户出行开始和返回的时间、日行驶里程等,2009 年美国交通部对全美家用车辆的出行进行统计,并发布了调查结果^[21-22]。对统计数据进行归一化处理,用极大似然估计的方法可以分别将车辆最后 1 次出行结束时刻和第 1 次出行开始时刻近似表示为正态分布函数,而日行驶里程可近似为对数正态分布函数^[23-24]。

最后 1 次出行返回时刻,即到家接入电网的时间满足正态分布,其概率密度函数为:

$$f_s(T_a) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(T_a+24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & 0 < T_a \leq \mu_s - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(T_a-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & \mu_s - 12 < T_a \leq 24 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\mu_s = 17.47$; $\sigma_s = 3.41$ 。

第 1 次出行开始时刻,即出行离开电网的时间满足正态分布,其概率密度函数为:

$$f_e(T_d) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left[-\frac{(T_d-\mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right] & 0 < T_d \leq \mu_e + 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left[-\frac{(T_d-24-\mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right] & \mu_e + 12 < T_d \leq 24 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\mu_e = 8.92$; $\sigma_e = 3.24$ 。

日行驶里程满足对数正态分布,其概率密度函数为:

$$f_m(M_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m M_d} \exp\left[-\frac{(\ln M_d - \mu_m)^2}{2\sigma_m^2}\right] \quad (9)$$

其中, $\mu_m = 2.98$; $\sigma_m = 1.14$ 。

3.3 基于多智能体系统的电动汽车充电优化模型

a. 变量和参数。

表 2 列举了本文中电动汽车多智能体充电负荷所接入的变压器需要考虑的主要变量和参数。

表 2 电动汽车接入的变压器的主要变量定义
Table 2 Main variables of transformer with interconnection of EV

变量	描述
$P_{j,\max}$	EV 所接入的变压器在 j 时段的最大负载功率
$L_{j,t}$	EV 所接入的变压器在 j 时段的预测负荷
$L_{j,r}$	EV 所接入的变压器在 j 时段的实际负荷(包括该时段内 EV 充电的负荷)

b. 变压器容量约束:

$$L_{j,t} + \sum_{i=1}^M L_{i,j} < P_{j,\max} \quad (10)$$

即叠加了电动汽车充电负荷之后的变压器总体负荷小于变压器的最大负载功率, $L_{i,j}$ 为电动汽车 i 在 j 时段的充电功率, M 为 j 时段内电动汽车充电的数量。

c. 目标函数。

根据配电网内变压器的历史常规负荷,可以预测当日此变压器的常规负荷曲线。本文将 1 d 分成 24 个时间段,以每辆电动汽车每个时间段的充电功率为变量,以叠加了电动汽车充电负荷的变压器负荷曲线的峰谷差最小为目标函数,即:

$$F = \min[\max(L_{j,r}) - \min(L_{j,r})] \quad (11)$$

$$L_{j,r} = L_{j,t} + \sum_{i=1}^n L_{i,j} \quad (12)$$

4 基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略

本文提出了一种基于多智能体的电动汽车协同充电优化策略。在该策略中,每个电动汽车智能体可以根据自身的充电需求参数和配电变压器的负荷信息,在满足自身需求的情况下,以变压器负荷的“移峰填谷”为目标,制定自身的充电计划。其充电时段选择示意如图 3 所示,电动汽车智能体在自身可

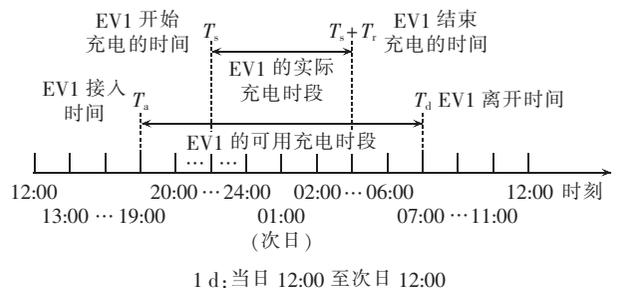


图 3 单台电动汽车充电时段示意

Fig.3 Schematic diagram of charging period of a single EV

用充电时段(T_a 至 T_d)中,可选择 T_r 个较低的变压器负荷时段来进行充电。

基于多智能体的电动汽车协同充电流程如图 4 所示。

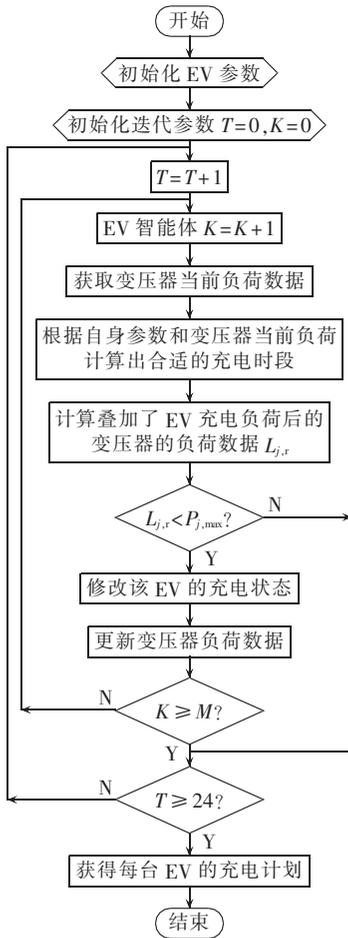


图 4 基于多智能体的电动汽车协同充电流程
Fig.4 Flowchart of cooperative charging of EV based on multi-agent

a. 初始化电动汽车的参数。包括电动汽车的数量、用户接入电网和离开电网的时间(可以获得该用户可用的充电时段)、日行驶里程、充电效率、额定充电功率等。

b. 初始化迭代参数。将 1 d 分为 24 个时段,每个时段内接入电网充电的电动汽车的数量为 M (根据蒙特卡洛抽样获取)。

c. 根据时间段数进行迭代,将电动汽车按照接入电网时间分配到各个时段。

d. 在每个时间段内根据电动汽车的数量进行迭代,每个电动汽车根据自身的接入电网时间、离开电网时间、充电需求等参数,同时结合迭加了该时段内该车接入之前的电动汽车充电负荷的变压器负荷信息,从而计算出适合自身的充电时段。

e. 计算叠加了当前电动汽车充电负荷之后的总负荷 $L_{j,r}$, 并和变压器的最大负荷 $P_{j,max}$ 进行比较,如

果 $L_{j,r} < P_{j,max}$, 则生成该电动汽车的充电计划并更新变压器的负荷信息;反之则退出循环(该时段不再接受充电)。

f. 按时段循环迭代至 $T=24$, 随时间的推进依次获取 1 d 内每台电动汽车的充电计划。

5 算例分析

5.1 仿真参数设置

仿真环境设置为上海某一 35 kV 片区配电网,表 3 列举了该片区中 10 kV 变压器和假定接入充电的电动汽车的情况。

表 3 35 kV 片区配电网下各变压器的参数
Table 3 Parameters of transformer in 35 kV distribution network

变压器类型	变压器额定容量/(kV·A)	数量	单台变压器假定接入充电 EV 数量
S11-M.R	1600	4	300
S11-M.R	1200	8	225
SBH11-M	800	4	150

变压器额定容量 P_r , 假定变压器的功率因数 $\cos \phi$ 为 0.85、效率 η_t 为 0.95, 则该变压器的最大负载可以根据下式计算:

$$P_{j,max} = \eta_t P_r \cos \phi \quad (13)$$

变压器的日预测负荷曲线根据历史数据来模拟。本文仅考虑居民小区内家庭用电动汽车的充电负荷,根据对其充电负荷的分析,并参考目前电动汽车的发展状况,对仿真的环境做出如下假设。

- a. 电动汽车的电池为锂电池,容量为 30 kW·h。
- b. 额定充电功率为 5 kW。
- c. 充电效率为 90%。
- d. 行驶 100 km 耗电量为 15 kW·h。

e. 电动汽车在最后 1 次出行返回后接入电网,第 1 次出行开始时离开电网。接入电网时间、离开电网时间、日行驶里程都通过蒙特卡洛抽样来模拟。

f. 假定用户和电网公司之间有双赢协议,需要参与电网公司的“移峰填谷”任务。

g. 默认用户每次设置的期望电量状态都为 100%,如有的用户在可用的充电时段内不能充满,则默认利用完其全部可用充电时段即可。

5.2 结果分析

5.2.1 单台 10 kV 变压器接入电动汽车充电

以 1 台 1200 kV·A 变压器为例,在无序充电模式下,电动汽车在回家接入电网之后即开始充电,直至电池充满,整个充电过程不被控制和调整,从图 5 可以看出,电动汽车接入变压器充电的高峰时段和变压器负荷的峰值时段基本一致,所以会导致高峰时段的负荷明显上升,甚至会影响到电网的安全运行。

在多智能体协同优化充电模式下,电动汽车作

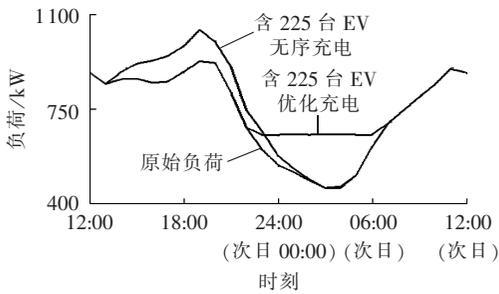


图 5 单台变压器接入电动汽车在无序充电和协同优化充电模式下的负荷曲线

Fig.5 Load curves of EV charging under random mode and coordinative charging mode, interconnected with one transformer

为独立的主体,接入变压器后能在自身的可用时间段内自动寻找变压器负荷低谷的时段进行充电,可有效地实现负荷的“移峰填谷”。

5.2.2 35 kV 片区配电网接入电动汽车充电

以 35 kV 片区配电网为例,从图 6 可以看出,在多智能体协同优化充电模式下,各台 10 kV 变压器下的电动汽车能够按照接入时间逐渐实现负荷的“填谷”,其效应迭加之后就能实现 35 kV 变压器负荷的“填谷”,极大降低了“峰谷差”,从而可以有效地降低发电机组的启停次数,提高配电网运行的安全性和经济性。

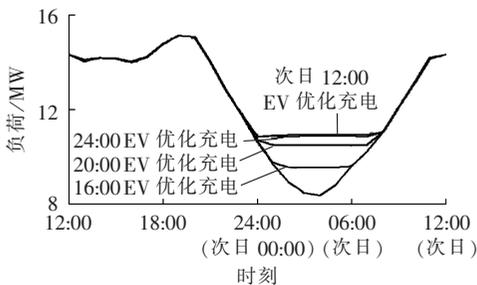


图 6 35 kV 片区配电网内各变压器接入的电动汽车在协同充电模式下分时段的负荷曲线

Fig.6 Load curves of EV interconnected with each transformer in 35 kV distribution network under cooperative charging mode at different periods

5.2.3 比较分析

表 4 列出了单台 10 kV 变压器接入电动汽车充电和整个 35 kV 片区配电网下电动汽车充电的叠加

表 4 无序充电和多智能体协同优化充电模式的结果对比

Table 4 Comparison of results between random charging mode and cooperative charging mode

模式	变压器等级/kV	EV 数量	峰值/kW	谷值/kW	峰谷差/kW
原始预测负荷	10	225	924.16	458.54	465.62
	35	3600	15116.92	8365.49	6751.43
无序充电模式	10	225	1041.06	458.54	582.52
	35	3600	16601.93	8401.49	8200.44
多智能体协同优化模式	10	225	924.16	655.24	268.92
	35	3600	15116.92	10839.45	4277.47

分别对应的峰值、谷值和峰谷差,可见多智能体协同优化充电模式下的峰谷差相对于无序充电模式下的峰谷差大幅减小,起到了“移峰填谷”的作用,说明了该模式的有效性。而且相对于集中控制模式,并不需要和上层的调度机构之间进行频繁通信,避免了大规模电动汽车充电优化的“通信要求高”的问题,同时也不需要调度机构采集各台电动汽车的具体参数,极大简化了优化问题的求解,从而也有效地避免了大规模电动汽车充电优化“维数灾”的问题。

6 结论

本文针对大量电动汽车接入电网之后的充电优化问题展开研究,分析了电动汽车充电负荷的特性和管理架构,根据 CAS 理论的核心思想,提出了基于多智能体的电动汽车协同充电管理架构。基于建立的电动汽车充电优化模型,应用基于多智能体协同充电的优化算法进行仿真求解,并做了对比分析。

仿真结果表明,在变压器以下采用基于多智能体协同优化的充电模式,能够有效地实现电动汽车充电负荷的“移峰填谷”,减小电网峰谷差,并且可以将上层调度机构的范围缩小在变压器以上,从而有效地避免了大规模电动汽车充电优化的“维数灾”和“通信要求高”等问题,为电动汽车充电优化提供了一条新的途径。

本文研究中假定各变压器下接入的电动汽车组成一个多智能体系统,其用户通过和电网公司签署双赢协议的形式来参与电网公司的“移峰填谷”任务,而且只考虑了配网变压器容量限制的安全约束,下一步可以结合电价的引导机制,同时考虑更多的安全约束来进行更深层次的研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] FERNANDEZ L,ROMAN T G S,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.
- [4] CLEMENT-NYNS K,HAESSEN E,DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid power systems[J]. IEEE Transactions on Power

- Systems, 2010, 25(1):371-380.
- [5] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11):30-36.
YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A charging and discharging dispatching strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11):30-36.
- [6] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等. 大规模电动汽车充放电优化控制及容量效益分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10):19-26.
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging and discharging of large-scale plug-in electric vehicles with cost and capacity benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10):19-26.
- [7] 孙晓明,王玮,苏粟,等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1):191-195.
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1):191-195.
- [8] 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.
- [9] 刘金琨,尔联洁. 多智能体技术应用综述[J]. 控制与决策, 2001, 16(2):133-140.
LIU Jinkun, ER Lianjie. Overview of application of multiagent technology[J]. Control and Decision, 2001, 16(2):133-140.
- [10] 邓宏钟,谭跃进,迟妍. 一种复杂系统研究方法:基于多智能体的整体建模仿真方法[J]. 系统工程, 2000, 18(4):73-78.
DENG Hongzhong, TAN Yuejin, CHI Yan. A complex system research method—multi-agent-based ensemble modeling and simulation method[J]. System Engineering, 2000, 18(4):73-78.
- [11] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14):36-42.
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14):36-42.
- [12] 宋永华,杨岳希,胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35(4):1-7.
SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2011, 35(4):1-7.
- [13] MAY G. Battery options for hybrid electric vehicles [C]//IET Hybrid Vehicle Conference. Coventry, UK; IET, 2006:67-78.
- [14] 王锡凡,邵成成,王秀丽,等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1):1-9.
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1):1-9.
- [15] 薛飞,雷宪章,张野飏,等. 电动汽车与智能电网从 V2G 到 B2G 的全新结合模式[J]. 电网技术, 2012, 36(2):29-34.
XUE Fei, LEI Xianzhang, ZHANG Yebiao, et al. A brand-new approach of connecting electrical vehicles with smart grid from vehicle-to-grid mode to battery-to-grid mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(2):29-34.
- [16] 高赐威,董传燕,薛飞. 基于多代理系统的电动汽车充电行为仿真软件设计与实现[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31):68-77.
GAO Ciwei, DONG Chuanyan, XUE Fei. Design and implementation of simulation software for electric vehicle charging behavior based on multi-agent system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31):68-77.
- [17] HOLLAN J H. 隐秩序:适应性造就复杂性[M]. 周晓牧,韩晖,译. 上海:上海科技教育出版社, 2000:1-2.
- [18] 王晓丽,洪奕光. 多智能体系统分布式控制的研究新进展[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(2-3):70-81.
WANG Xiaoli, HONG Yiguang. New progress in the study of distributed control of multi-agent system [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2010, 7(2-3):70-81.
- [19] RODRIGUEZ-SERRANO A, TORRALBA A, RODRIGUEZ-VALENCIA E, et al. A communication system from EV to EV service provider based on OCPP over a wireless network[C]//IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria: IEEE, 2013:5434-5438.
- [20] GUENA T, LEBLANC P. How depth of discharge affects the cycle life of lithium-metal-polymer batteries [C]//28th Annual International Telecommunications Energy Conference, INTELEC 06. Providence, RI, USA: IEEE, 2006:1-8.
- [21] US Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2009 National household travel survey [EB/OL]. [2011-06-01]. <http://www.nhts.orl.gov>.
- [22] 张振夫,黄小庆,曹一家,等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4):24-29.
ZHANG Zhenfu, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Charging load calculation considering TOU for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4):24-29.
- [23] 周念成,熊希聪,王强钢. 多种类型电动汽车接入配电网的充电负荷概率模拟[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2):1-7.
ZHOU Niancheng, XIONG Xicong, WANG Qianggang. Simulation of charging load probability for connection of different electric vehicles to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2):1-7.
- [24] 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.
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2010, 34(11):126-130.

作者简介:



许少伦

许少伦(1978—),男,山东临沂人,工程师,博士研究生,主要研究方向为电动汽车充电管理、电力信息物理融合系统、电力系统优化运行(E-mail:slxu@sjtu.edu.cn);

严正(1964—),男,江西上饶人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析、电力市场和智能电网;

冯冬涵(1981—),男,浙江杭州人,副教授,博士,主要研究方向为智能电网、综合能源网的优化运行和运营策略;

张良(1990—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行。

(下转第 21 页 continued on page 21)

sive power quality evaluation model based on radar chart method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (14): 70-74.

作者简介:

周念成(1969—),男,重庆人,教授,博士,从事电力系统自动化、电能质量方面的教学和研究工作(E-mail:cee_nczhou@cqu.edu.cn);



周念成

cqu.edu.cn);

蒲松林(1987—),男,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化和电能质量(E-mail:jsfpu@cqu.edu.cn);

王强钢(1987—),男,福建晋江人,博士研究生,主要研究方向为电力系统自动化和电能质量。

Online monitoring, analysis and evaluation system for EV charging station

ZHOU Niancheng¹, PU Songlin¹, WANG Qianggang¹, JIANG Guangxue², ZENG Xianping², CHEN Min²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: An online monitoring, analysis and evaluation system for EV (Electric Vehicle) charging station is designed and developed, which adopts the PCI-bus-based multi-DSP structure and consists of multi-DSP acquisition terminal, vehicular terminal, industrial PC and interfacing circuits. The voltages and currents of PCC (Point of Common Coupling) and chargers are collected in real time, based on which, different power quality indices are calculated. All monitoring data are gathered via PCI bus, based on which, the operational characteristics of transformers and chargers are analyzed. The operating and charging information of EV is received via GPRS and the radar map method is applied to comprehensively evaluate the conditions of EV. The probability distributions of EVs' start charging time, initial state of charge and daily mileage are statistically analyzed. The results of practical operation show that, the system is stable and reliable, providing huge practical and reliable data of operation and evaluation for the operation and planning of EV charging station.

Key words: electric vehicles; charging station; monitoring; start charging time; SOC; daily mileage; evaluation

(上接第 13 页 continued from page 13)

Cooperative charging control strategy of electric vehicles based on multi-agent

XU Shaolun, YAN Zheng, FENG Donghan, ZHANG Liang

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the analysis of charging load characteristics and management structure of EV (Electric Vehicle), a charging management mode of EV based on multi-agent is proposed according to the core idea of complex adaptive system. A charging load model of a single EV and an optimal charging model of EV based on multi-agent are built. The Monte Carlo method is applied to simulate the charging performance of EV customers. With the consideration of constraints such as charging power, charging time and available capacity of transformer, an optimal cooperative control charging strategy of EV based on multi-agent is proposed for the problem of EV charging from a 35 kV distribution network. Simulative results show that, the strategy can effectively realize load shifting of EV charging load, reducing peak-valley difference.

Key words: electric vehicles; charging optimization; multi-agent; cooperative control; complex adaptive system; models; electric load management