

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.019

含风、光发电单元的电动汽车充电站 智能网络控制系统*

王金跃¹, 杨晓东^{2*}, 陆海强¹, 卢俊杰², 王超杰², 张有兵²

(1. 嘉兴市恒创电力设备有限公司, 浙江 嘉兴 314101; 2. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:针对风、光电等可再生能源以及电动汽车的广泛发展,对 EV 充电站与可再生能源的综合利用架构进行了分析,探讨了集成可再生能源发电单元的充电站运行模式和盈利方式,设计了一种含风光发电单元的电动汽车充电站网络控制系统。综合考虑 EV 入网、需求信息和站内功率补偿需求,提出了一种无需可再生能源出力预测实体的 EV 充电站智能控制策略。从功能需求角度出发,设计了充电站智能网络控制通信架构,为智能控制的决策与执行以及站内辅助管理功能的具体实现提供了有力支撑。研究表明,该控制系统能够有效改善站内可再生能源利用效率,并提高充电站运营者和 EV 用户的经济性,可以为示范城市充电基础设施的运行提供依据和技术支撑。

关键词:充电站;风光发电单元;电动汽车;运营模式;智能网络控制;系统设计

中图分类号:TM76

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0521-06

Intelligent network control system for electric vehicle charging station with wind/photovoltaic generators

WANG Jin-yue¹, YANG Xiao-dong², LU Hai-qiang¹, LU Jun-jie²,
WANG Chao-jie², ZHANG You-bing²

(1. Jiaxing Hengchuang Electric Equipment Co., Ltd, Jiaxing 314101, China;

2. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the increasing development of electric vehicle and renewable energy sources such as wind and photovoltaic, the structure of the comprehensive utilization for EV charging station and the RES was analyzed, and the operation mode and the profit mode of the charging station integrated with RES generation unit were discussed, then an intelligent network control system for EV charging station with wind and PV generators was proposed. Firstly, an intelligent control strategy for EV charging and discharging was proposed by taking the information of EV and power compensation amount in the charging station into account. Secondly, through analyzing the function demands of the charging station, the associate communication architecture was designed to provide strong support for the decision-making and carrying out of the proposed strategy and the auxiliary management function of the charging station. Finally, the numerical simulations results indicate that through the proposed intelligent network control system, both the utilization of renewable energy sources and the economy of charging station operator and EV user are improved, thus providing strong support for the charging infrastructure operation in the demonstration city.

Key words: charging station; wind and PV generators; electric vehicle; operation mode; intelligent network control; system design

收稿日期:2016-11-29

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LY16E070005)

作者简介:王金跃(1977-),男,浙江平湖,人,硕士,主要从事新能源与电动汽车、充电桩设备开发等方面的研究. E-mail: wjy@china-jhee.com

通信联系人:杨晓东,男,博士研究生. E-mail: yang_xd90@163.com

0 引言

能源互联网环境下,电动汽车不断接入电网给电力系统的运行、控制带来了机遇和挑战^[1-2]。

电动汽车充电站及加装充电桩的商业或住宅停车场等将成为电动汽车的主要充电场所^[3]。一类集成分布式可再生能源发电系统的 EV 充电站。电动汽车与可再生能源的有机集成,有助于提高整体运行的经济和环境效益^[4-5],如何基于 V2G 技术实现电动汽车与可再生能源的集成利用显得尤为重要。

现有研究中,关于集成 RES 发电系统的 EV 充电站建设中主要涉及到的问题包括:集成系统的结构设计^[6]、充电站选址定容^[7]、EV 充放电控制策略制定以及策略的执行效率和系统经济性评价等问题^[8-9],但较少涉及到站内网络通信架构的设计。充电站的优化运行需以连接供需两侧的通信网络支撑平台为基础,保障控制策略实现时所需要的实时双向数据传输功能,以及满足站内电压、电流、温度监测、故障诊断和报警以及费用管理等辅助功能。

为了实现 EV 充电站的智能有序运行,本研究将以包含风光发电单元的电动汽车充电站为对象,设计一种充电站智能网络控制系统。

1 系统描述

1.1 系统架构

本研究面向包含风光发电单元的电动汽车充电站提出一种智能网络控制系统,系统架构如图 1 所示。

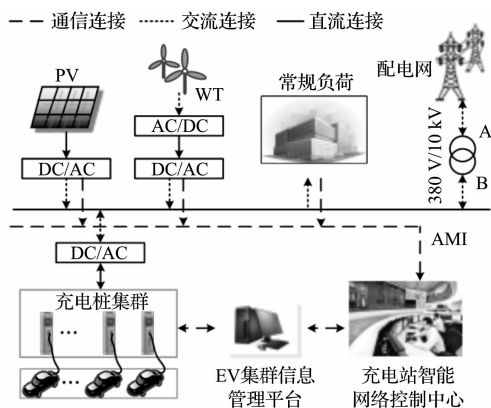


图 1 系统架构

系统内的主要单元介绍如下:

(1) AMI (advanced measurement infrastructure)。

智能量测系统,实时监测并采集系统内部 RES 出力及需求侧负荷水平信息,并将采集信息及时上传至充电站调度管理中心;

(2) 充电站智能网络控制中心。充电站优化运行主要控制单元,以 AMI 上传的信息、EV 集群信息管理平台整合的 EV 信息为基础,制定 EV 集群充放电智能控制策略;

(3) EV 集群信息管理平台。采集 EV 集群实时入网信息,一方面计算各 EV 的充电迫切程度值并上传至充电站智能网络控制中心,另一方面将接收到的由充电站控制中心下发的调度指令发送给 EV 充电桩;

(4) EV 充电桩。EV 集群智能控制策略的最终执行单元,与 EV 集群信息管理平台、充电站智能网络控制中心配合共同完成接入车辆的充放电优化与控制功能。

1.2 运行模式设计

图 1 所示架构下,给电动汽车充电站供电的降压变压器同时接有负荷和电源,涉及的配电网、EV 充电站和 EV 分别隶属于不同主体。在站内能量交互方面:包括风机和光伏阵列在内的分布式发电单元分别通过 DC/AC 变流器向站内的常规负荷和 EV 集群充电负荷供电;当站内分布式电源供电不足时接入充电站的 EV 集群能够基于 V2G 技术,经 DC/AC 双向逆变装置将自身多余电量馈入系统以满足常规负荷需求。在充电站与配电网能量交互方面:充电站内的运营商能够基于本研究设计的控制系统根据站内风光发电量的盈亏以及负荷需求向配电网出售或购买电量。

1.3 利益分析

EV 充电站作为 EV 充电服务的提供商,其运营成本包括以现行电价向电网公司支付的电费、站内风光发电单元的运维成本以及支付给参与系统能量调控的 EV 用户的补偿费用,其主要收入来源于按照制定给用户的电价收取的充电费用和风光发电单元的发电补偿^[10]。充电站运营商通过两者的差价来实现盈利。设 EV 集群的集合为 N ,则 EV 规模为 $n = |N|$ 。

充电站日运行成本可表示为:

$$D^{CS} = D_{op} + D^{grid} + D^{EV,comp} - D_{sub}^{RES} \quad (1)$$

式中: D^{CS} —充电站日运行成本; D_{op} —站内设备运行维护成本; D^{grid} —充电站与配电网的交互成本; $D^{EV,comp}$ —EV辅助服务补偿费用; D_{sub}^{RES} —可再生能源发电补贴。

在需求侧经济性方面,V2G模式下,EV用户的成本可表示为:

$$U_i = c_i^{ed} + c_i^{bat} + c_i^{loss} - c_i^{dis,comp} - c_i^{cap,comp}, \forall i \in N \quad (2)$$

式中: U_i —车辆*i*的用户成本; c_i^{bat} —锂电池寿命损耗折算成本^[11]; c_i^{loss} —电能损失费用; c_i^{ed} —不考虑充、放电效率下的理想充放电费用; $c_i^{dis,comp}$ —放电补偿; $c_i^{cap,comp}$ —辅助服务容量补偿。

2 智能控制策略设计

2.1 决策变量建模

假设一天24 h的优化时长内采样点总数为*T*,对于任意第*k*个采样点,有 $k \in \{1, 2, \dots, T\}$,采样时间间隔为 Δs 。设第*k*个采样时段的入网EV集合为 N_k ,则该时段EV规模为 $n_k = |N_k|$ 。

由EV集群能量管理中心整合EV集群入网信息,对于 $\forall i \in N$,表示为:

$$\Omega_i = [T_{in,i}, T_{out,i}, S_{0,i}, S_{E,i}, Q_{s,i}, P_c, P_d, \eta_c, \eta_d] \quad (3)$$

式中: $T_{in,i}, T_{out,i}$ —车辆*i*的入网时间和预期离网时间; $S_{0,i}, S_{E,i}$ —车辆*i*的起始荷电状态和期望SOC; $Q_{s,i}$ —车辆*i*的电池容量; P_c, P_d —额定充、放电功率; η_c, η_d —充放电效率。

设车辆*i*接入电网的持续时间为 $T_{sy,i} = T_{out,i} - T_{in,i}$, $T_{sy,i}$ 所包含的采样点集合设为 $T_{m,i}$,并设其长度为 H_i 。

对于 $\forall k \in T_{m,i}$,建立的EV模型和约束条件为:

$$S_i(k) = S_i(k-1) + \frac{P_i(k)\Delta s}{Q_{s,i}} \quad (4)$$

$$S_{i,min} \leq S_i(k) \leq S_{i,max} \quad (5)$$

$$-P_d/\eta_d \leq P_i(k) \leq P_c\eta_c \quad (6)$$

式中: $S_i(k-1), S_i(k)$ —车辆*i*在采样点*k-1*、*k*处的SOC; $P_i(k)$ —车辆*i*在采样点*k*处的功率; $S_{i,max}, S_{i,min}$ —SOC上、下限。

各EV在各自入网时段内的充放电功率集合即为本研究所提实时控制策略的决策变量:

$$P_i = [P_i(T_{m,i}(1)), P_i(T_{m,i}(2)), \dots, P_i(T_{m,i}(H_i))] \quad (7)$$

2.2 智能控制方法描述

智能控制方法的实现流程描述如下:

(1) 根据电动汽车*i*的入网信息可计算每个采样点*k*处电动汽车*i*需要保持的SOC:

$$S_i^{req}(k) = \begin{cases} S_{E,i} - S_{i,min} - \frac{P_{c,i}\eta_{c,i}(T_{out,i} - k)\Delta s}{Q_{s,i}}, \\ \text{if } k \in (T_{em,i}, T_{out,i}) \\ S_{i,min}, \text{ else} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S_i^{req}(k)$ —采样点*k*处电动汽车*i*需要保持的荷电状态; $T_{em,i}$ —电动汽车*i*的紧急充电起始时刻, $T_{em,i} = T_{out,i} - S_{E,i}/(P_{c,i}\eta_{c,i})$; Δs —电动汽车*i*的紧急充电起始时刻。

(2) 基于各EV的入网信息计算其在当前时刻的充电迫切程度,表示如下:

$$U_i(k) = \left(\frac{T_{out,i} - k}{T_{out,i} - k - Q_{s,i}(S_{E,i} - S_{i,min} - S_i(k-1))/\eta_{c,i}P_{c,i}} \right)^u \quad (9)$$

式中: $U_i(k)$ —采样点*k*处电动汽车*i*的充电迫切程度; u —功率因数,取 $u = 2$ 。

进一步可得各采样点处EV的调度优先权:

$$f_i(k) = \frac{U_i(k)}{\sum_{i \in N_k} U_i(k)} \quad (10)$$

式中: $f_i(k)$ —采样点*k*处车辆*i*的调度优先权, $\sum_{i \in N_k} U_i(k)$ —采样点*k*处所有入网EV的充电迫切程度之和。

(3) 制定电动汽车智能功率分配准则;

当站内RES出力过剩时EV需充电以满足系统功率补偿需求:

$$P_i^{RES}(k) = \begin{cases} f_i(k)P_{com}(k), & \text{if } k \in T_{m,i} \\ \text{and } S_i(k-1) < S_{i,max} \text{ and } P_{com}(k) > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_i^{RES}(k)$ —车辆*i*来自RES的充电功率; $P_{com}(k)$ —采样点*k*处充电站内功率补偿需求量, $P_{com}(k) = P_w(k) + P_{pv}(k) - L_B(k)$, $P_w(k), P_{pv}(k), L_B(k)$ —采样点*k*处风机、光伏出力 and 常规负荷。

当剩余RES出力不能满足当前时刻EV充电需求时,EV需从配电网中获取电量:

$$P_i^{\text{grid}}(k) = \begin{cases} S_i^{\text{req}}(k) - S_i(k-1) - P_i^{\text{RES}}(k), & \text{if } k \in T_{m,i} \\ \text{and } S_i(k-1) + P_i^{\text{RES}}(k) < S_i^{\text{req}}(k) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $P_i^{\text{grid}}(k)$ — 车辆 i 来自配电网的充电功率。

当站内 RES 出力不能满足常规负荷需求时,基于 V2G 技术, EV 需放电以满足系统功率补偿需求:

$$P_i^{\text{out}}(k) = \begin{cases} \frac{1 - f_i(k)}{n_k - 1} P_{\text{com}}(k), & \text{if } k \in T_{m,i} \\ \text{and } P_{\text{com}}(k) < 0 \text{ and } S_i(k-1) > S_i^{\text{req}}(k) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $P_i^{\text{out}}(k)$ — 车辆 i 的放电功率,若同一时刻只有一辆 EV 入网,则 $[1 - f_i(t)] / (n_k - 1)$ 取值为 1。

综合公式(11 ~ 13),电动汽车 i 在采样点 k 处的功率可表示为:

$$P_i(k) = P_i^{\text{RES}}(k) + P_i^{\text{grid}}(k) + P_i^{\text{out}}(k) \quad (14)$$

3 充电站网络控制系统通信架构设计

3.1 充电站智能网络控制系统的通信需求分析

3.1.1 充电站监控业务

在充电站智能网络控制系统中,监控业务占据着重要的作用,主要的功能模块如图 2 所示。

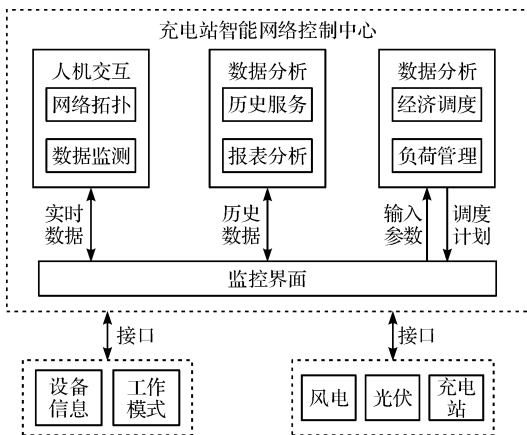


图 2 充电站监控业务示意图

决策优化是充电站智能网络控制系统的核心模块,主要涉及到经济调度和负荷管理。本研究的智能控制策略就是基于该模块。

3.1.2 数据通信需求分析

本研究所述充电站内含若干个充电桩、风机、光伏

发电单元和常规负荷组成,为完成对这些分布式电源和负荷的监控管理需要相匹配的双向通信系统进行功能支撑。通信系统主要完成承担以下功能:①传输光伏、风机的发电、运行状态信息以及常规负荷的用电信息;②传输充电站控制系统与充电桩之间双向控制信息;③支撑电动汽车计费、充电站安防监控等辅助管理信息的上传。根据南方电网公司制定的电动汽车充电设施企业标准对通信报文的要求^[12],充电参数配置阶段、充电阶段和充电结束后最大发送量分别为 24 packets/s,57 packets/s 和 12 packets/s,而分布式电源和用电信息采集业务的数据发送率范围为 80 kbit/s ~ 90 kbit/s。

3.2 充电站智能网络控制系统的控制结构

两种方式的一些重要性能比较如表 1 所示。

表 1 集中式与分散式控制性能比较

参数	集中式控制方式	分散式控制方式
易管理性	有明确分工,较容易执行与维护	通信结构设计复杂,收敛慢
可扩展性、灵活性	分布式电源的增加,对中央控制要求较高	分散式控制弱化中央控制器的主导功能
经济性	较低的设备成本	较大的设备成本和复杂的通信要求
技术的成熟度	技术成熟	技术有待进一步完善
可靠性	整个系统面临瘫痪的风险较高	整个系统面临瘫痪的风险较低

根据表 1,本研究的充电站智能网络控制系统的通信架构采用的集中式组网方式如图 3 所示。

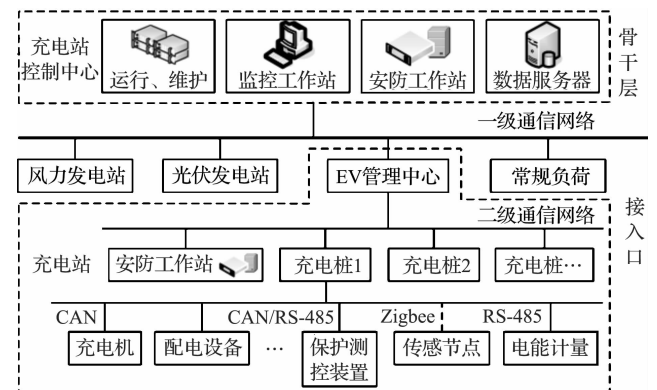


图 3 充电站智能控制系统的组网通信架构

整个通信架构分为站内通信子系统和控制通信系统两部分。具体应用中,可根据运营商对充电站的规划需求选择理想的通信组网方案^[13]。

4 实验及结果分析

4.1 场景设定

设计算时间长度为 24 h,时间间隔 Δs 为 0.05 h。以一处于居民区的包含风光发电单元的电动汽车充电站为例,验证所提 EV 充放电实时控制策略的有效性与正确性。该居民区的总负荷包括常规负荷和 EV 集群负荷。居民区接入的配电变压器容量为 750 kVA,效率为 0.95,站内风机、光伏的额定容量分别为 800 kW、750 kW。站内采用峰谷电价^[14],充电站与配电网间采用峰平谷电价^[15]。

设该配网服务的 EV 规模为 50 辆。EV 相关参数设置如表 2 所示。

表 2 参数设置

名称	值	名称	值
$Q_{s,i}$	60 kW · h	$S_{E,i}$	0.9
P_c, P_d	7 kW	$T_{in,i}$	$T_{in,i} \sim N(17.47, 3.41^2)$
η_c, η_d	0.92	$T_{out,i}$	$T_{out,i} \sim N(8.92, 3.24^2)$
$S_{i,max}$	0.95	r_d	$\ln(r_d) \sim N(2.98, 1.14^2)$
$S_{i,min}$	0.2	R_a	200 km

r_d —EV 日行驶里程,设 EV 每天充电一次;定义 $S_{0,i} = (S_{E,i} - r_d/R_a)$,其中, R_a —EV 充至期望状态后的可行行驶里程。

站内典型一日 RES 出力曲线和常规负荷需求曲线如图 4 所示。

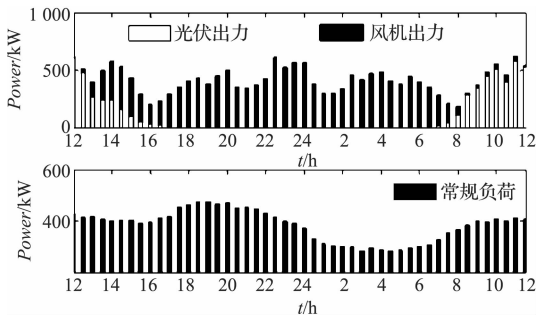


图 4 RES 出力、常规负荷曲线

4.2 结果及分析

本节在相同场景下对入网 EV 分别进行无序充电和智能充放电控制,并进行仿真结果的对比分析。

本研究通过蒙特卡洛模拟 EV 集群的充电行为,抽样获得日内 24 h 电动汽车集群的入网信息和日充电需求数据。在 Matlab 中采用 YALMIP 和 CPLEX 对上述 2 种模式进行建模、求解。

本研究提出的电动汽车智能控制方法的仿真实验流程如图 5 所示。

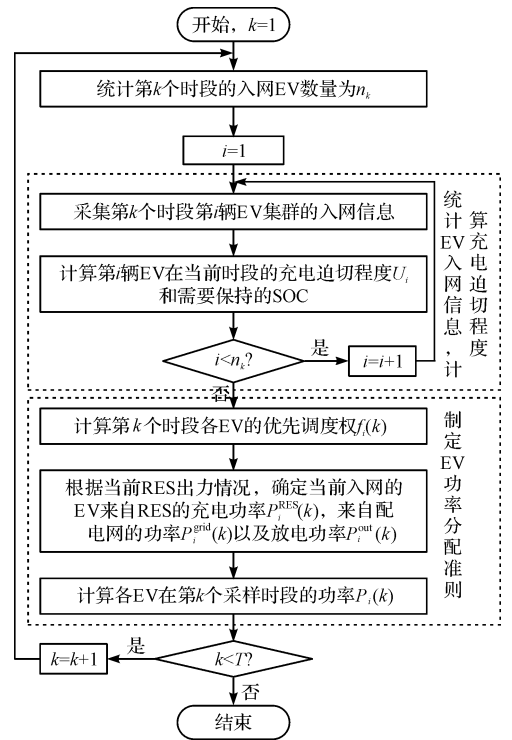


图 5 仿真实验流程图

无序和智能控制模式下系统总负荷、净负荷曲线分别如图 6、图 7 所示。

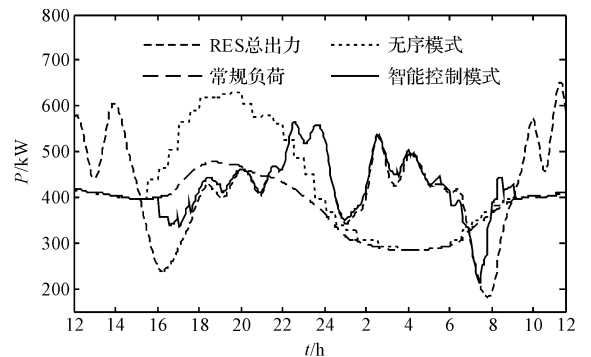


图 6 RES 总出力曲线和 4 种模式下微电网总负荷曲线

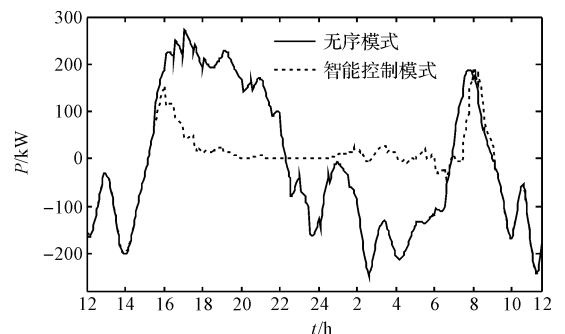


图 7 4 种模式下系统净负荷曲线

具体地,两种模式下系统负荷特性、经济特性相关统计数据如表 3 所示。

表 3 负荷特性相关统计数据

模式	无序充电模式	智能控制模式
净负荷峰谷差/kW	524.40	435.94
净负荷波动率/kW ²	148.17	78.12
RES 利用率/%	90.15	96.02
相对峰荷消减率/%	-	58.70
充电站日运行成本/元	-5168.45	-5336.71
EV 用户车均成本/元	13.92	-2.65
交互成本	1092	276.89

在站内负荷特性改善方面,结合图 6、图 7 以及表 3 中的数据可知,无序充电模式下,EV 集中在晚高峰充电,加剧了负荷曲线的峰谷差同时又使得 RES 出力未得到及时消纳。相较于无序模式,本研究所提智能控制方法使得 EV 能够灵活跟随站内 RES 出力,及时响应系统功率补偿需求,从而在净负荷峰谷差、净负荷波动率等负荷特性方面均有所改善,且 RES 利用率较无序模式提升了约 6.51%。

智能控制方法通过灵活配置入网 EV 的充放电功率,可使得充电站日运行成本降低了约 3.26%。对电动汽车用户而言,车均成本显著降低。

总体而言,相较无序充电模式,笔者通过采用本研究所提站内智能控制策略,改善了站内负荷特性,并同时提高了充电站运营商、EV 用户的经济性。

5 结束语

本研究面向含风光发电单元的电动汽车充电站设计了一种智能网络控制系统。建立了电动汽车智能控制决策模型,并设计了一种充电站智能网络控制通信架构,用于支撑实现完备化的 EV 充电站智能网络控制。

通过对某地一处于居民区的含风光发电单元的 EV 充电站进行仿真分析表明,所提控制系统能够使得 EV 集群准确地实时响应系统能量补偿需求,有效改善了系统的负荷特性,有利于能提高站内 RES 的利用效率和充电站运营者、EV 用户的经济性。

参考文献 (References):

[1] ATIA R, YAMADA N. More accurate sizing of renewable energy sources under high levels of electric vehicle integration[J]. *Renewable Energy*, 2015, 81(4): 918-925.

[2] ZHONG F. A distributed demand response algorithm and its application to PHEV charging in smart grids[J]. *IEEE Trans on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1280-1290.

[3] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(22): 3638-3646.

[4] 黄贵鸿,雷霞,杨毅,等. 考虑风电与用户满意度的电动汽车两层智能充放电策略[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(5): 86-97.

[5] 岢美琴,孙树娟,苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(14): 30-35.

[6] BHATTI A R, SALAM Z, AZIZ M J B A, et al. Electric vehicles charging using photovoltaic: status and technological review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54(9): 34-47.

[7] 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.

[8] 刘东奇,王耀南,申永鹏. 基于 T-S 模糊控制器的电动汽车 V2G 智能充电站控制策略[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(2): 206-214.

[9] 陈奇芳,刘念,赵天阳,等. 基于滚动线性规划的光伏充电站自动需求响应[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 2967-2974.

[10] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于电动汽车用电价格政策有关问题的通知(发改价格[2014]1668)[R/OL]. [2014-07-22]. http://jgs.ndrc.gov.cn/zcfg/201408/t20140801_621052.html.

[11] 翁国庆,张有兵,戚军,等. 多类型电动汽车电池集群参与微网储能的可 V2G 可用容量评估[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(8): 36-45.

[12] Q/CSG 11516—2010. 中国南方电网有限责任公司企业标准[S]. 广州:中国南方电网有限责任公司,2010.

[13] 杨晓东,张有兵,赵波,等. 考虑规划需求的 EV 充电桩集群管理系统通信方式综合评价[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(24): 63-71.

[14] 杨晓东,张有兵,翁国庆,等. 基于虚拟电价的电动汽车充放电优先调度及其实现机制研究[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(17): 107-117.

[15] 张明锐,谢青青,李路遥,等. 考虑电动汽车能量管理的微网储能容量优化[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(18): 4663-4672.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

王金跃,杨晓东,陆海强,等. 含风、光发电单元的电动汽车充电站智能网络控制系统[J]. *机电工程*, 2017, 34(5): 521-526.

WANG Jin-yue, YANG Xiao-dong, LU Hai-qiang, et al. Intelligent network control system for electric vehicle charging station with wind/photovoltaic generators[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(5): 521-526.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>