

电动汽车充电区/站两级实时能量管理机制及优化策略

刘其辉¹, 张怡冰¹, 卫婧菲², 洪晨威¹, 逢飞¹, 周强³

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国网物资有限公司, 北京 100120;

3. 青岛特锐德电气股份有限公司, 山东 青岛 266104)

摘要:未来电力系统中电动汽车保有量会相当庞大,由调度机构直接控制每辆电动汽车进行有序充电是不现实的,比较可行的方案是由代理商和电网调度中心共同对电动汽车进行分层分区管理。基于此,提出包括电网调度中心、区域能量管理系统(Area-EMS)和微调度能量管理系统(μ -EMS)的电动汽车充电分层能量管理架构,并详细阐述各个层级的功能以及该架构模型的运行原理;针对代理商负责的Area-EMS和 μ -EMS分别提出两级实时能量管理策略,该策略在满足电动汽车充电需求和保证经济效益的同时,能够适应不同的电网耦合模式,改善区域电网的负荷峰谷特性;通过仿真算例验证所提分层架构和实时能量管理策略的有效性和实用性。

关键词:电动汽车;分层架构;能量管理;经济效益;峰谷差

中图分类号:TM 73;U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.018

0 引言

在化石能源日益紧张、环境逐渐恶化的严峻情况下,大规模地普及和推广电动汽车(EV)将会成为必然趋势。引导EV进行有序充电,不仅能够减少大规模随机无序充电对电网造成的影响和冲击,也能通过利用其具有的-定的可控性来改善地区电网的负荷特性。现有文献针对EV的充电协调控制策略主要有以下3种方式:集中控制^[1]、分布式控制^[2]和分层控制^[3]。集中控制会加重控制中心的计算负担,甚至出现“维数灾”问题^[4],对通信网络的带宽和可靠性有极高的要求;分布式控制将计算量分散到各辆EV,由EV根据掌握的信息进行自主决策,但无法很好地发挥EV集群效应对电网提供的辅助作用。因此,比较可行的方案是针对EV采用分层分区管理的思想^[5]。

文献[4]采用了基于分布式控制的电动汽车车-网互联(V2G)分层管理框架,采取“EV智能体自主提交可以接受充电计划集、本地运营商审核、配电网控制中心统一调度的方式”对EV的充放电行为进行有效的管理,但是EV在智能体层面为单辆EV,并未能进行统一管理调度,计算量比较大。文献[5-7]提出的模型包括2层结构,上层通过确定下层各EV代理商各时段的调度计划以满足运营商收益最大化的调度目标,下层通过调度每辆EV的

充放电时段以与上层的调度计划尽可能一致,但是以上模型均没有考虑电网调度层面的运行要求。文献[8]提出了一种EV与风电集成的3级分层控制算法:顶级控制器优化常规电厂的调度和风力发电,最大限度地减少发电成本;中层控制器制定EV充电计划,根据各车辆的充电状态和停电时间实现负载跟踪;底层控制器使用电网频率作为反馈来控制EV充电,为电网提供辅助服务。这种模式适用范围较窄,且不能够满足大规模分布式EV调度控制需求。

目前,针对EV分层能量管理方面的研究主要有2方面的问题:现有的分层实时优化策略大多考虑“代理商-用户”或者“电网-用户”层面,对电网、运营商和EV用户三方面的共赢考虑不足;大多数研究对象为居民区夜间交流慢充方式下的EV充电负荷,但实际上工作地点的日间充电、购物娱乐地点的日/夜间充电也有可调度的空间,且这几种充电站充电负荷特性的差异在一个区域同一时段的管理中会彼此影响。如果能对不同地点的多个充电站进行协调调度优化,就能最大限度地利用EV的可调度性。

基于此,本文针对未来充电设施数量庞大且分散的特点,以电网负责的调度中心(调度层)和代理商负责的区域能量管理系统(Area-EMS)、微调度能量管理系统(μ -EMS)组成的EV充电分层能量管理架构为依据,充分考虑了办公区、商业区、居民区充电站EV充电行为的差异以及交流、直流2种充电模式下充电桩控制方式的不同,制定了由Area-EMS站间能量协调调度和 μ -EMS站内功率优化分配配合实现的实时能量管理机制及策略。分层架构将计算量分散到各个层次,大幅减少了优化计算的时间,

收稿日期:2018-06-22; **修回日期:**2019-04-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904000);国家电网公司科技项目(SGJB0000TKJS1801242)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904000) and the Science and Technology Project of SGCC(SGJB0000TKJS1801242)

适用于大规模 EV 的优化调度;实时能量管理策略以当前电网的实际情况和 EV 充电需求为依据,不依赖于预测数据,缩短了计算时间,可以保证管理的实时性和可操作性。对于调度层不同的耦合模式,区/站两级能量管理系统均能灵活地适应,能在满足用户需求的前提下响应电网的指令。

1 EV 充电分层能量管理架构

1.1 架构模型及各层级功能

图1为本文所提的 EV 充电能量管理3层架构模型。该架构模型自上而下分别为调度层、协调层和响应层。

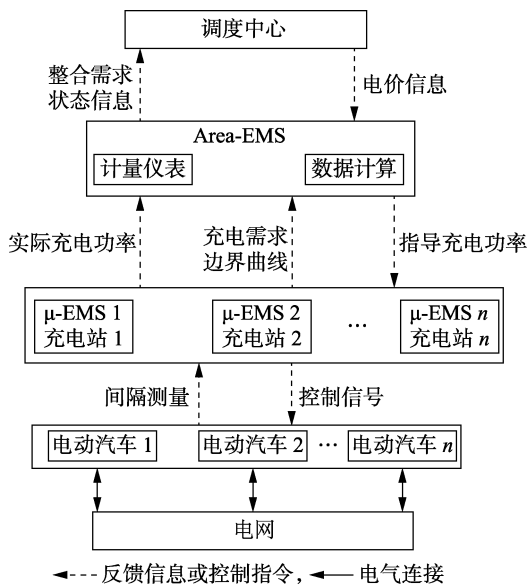


图1 EV 充电能量管理3层架构模型

Fig.1 Three hierarchical architecture model of EV charging energy management

(1)调度层(调度中心):负责系统的安全与经济运行,运行方式可分为采用电价引导的“弱耦合”方式和直接负荷控制的“强耦合”方式。即通过Area-EMS实时上报的EV充电信息实时修正日前电价并下发给下层调度实现调度控制。故通过Area-EMS实时上报的EV充电信息直接下发调度指令限值指导下层调度控制主要职责包括:基于Area-EMS实时上报的EV充电信息实时修正日前电价或者计算调度指令限值,并下发给下层调度。

(2)协调层(Area-EMS):负责管理充电区内各充电站之间的协调优化。主要职责包括:合理安排辖区各μ-EMS的指导充电功率,降低充电成本,改善地区负荷峰谷特性。

(3)响应层(μ-EMS):负责管理充电站内EV群的实际充电行为,实现有序充电控制。主要职责包括:参照Area-EMS下发的指令指导充电功率计算各EV的充电控制矩阵,并以此控制充电桩的启停和功率调节。

1.2 架构应用场景及特点

在EV发展的初期,由于数目不多,可采用直接负荷控制模式,即由分布式EV直接接收调度中心的电能交易指令,按照预先协定的充放电计划调整自身充电行为^[9]。当EV保有量持续增长时,充电设施将会越来越多且分散,此时可进行分层能量管理,实现对EV群的有序充电控制。在EV兴起初期,可由一家代理商公司管理;随着EV数量的不断增多,可设立多EV代理商公司管理不同区域的EV。

本文提出一种EV充电分层能量管理架构,具有以下特点:实现电网、代理商和用户三方面的共赢,调度层根据上传的EV信息和配电网负荷信息下达运行约束,Area-EMS负责协调代理商和电网对EV充电的要求下发指导功率,μ-EMS响应Area-EMS调度指令安排充电计划,适用范围广;Area-EMS层调度灵活,可根据实际情况设定一个或者多个Area-EMS,Area-EMS调度范围小至某条馈线包含的单一较小区域EV充电负荷,大至包含居民区、商业区等的跨区域EV充电负荷,调度目标可综合考虑用户和电网的要求,运行方式灵活,适用性强;统一调度,计算效率高。Area-EMS利用实时上传的EV充电负荷分布特性和调度裕度,综合协调下辖的μ-EMS的能量调度,下发调度指令;μ-EMS根据Area-EMS下发的调度指令统一调度充电站下接入的EV,安排充电计划。分层管理架构将计算量分散到各层,缩短优化计算时间,能够适用于大规模EV优化调度的需求。

1.3 架构模型的运行原理

EV充电需求状态信息按照“自下而上”的方式进行采集:μ-EMS负责获取本充电站内各EV的电池状态信息和用户的充电行为调整意愿,计算出相应的充电需求边界曲线(充电功率上、下界曲线和累计能量上、下界曲线)并上报给Area-EMS;Area-EMS汇集各μ-EMS的充电需求边界曲线信息形成本充电区总的充电需求信息,并上报给调度中心。

EV充电控制指令按照“自上而下”的方式进行发布:调度中心根据电网运行优化目标确定运行方式(“弱耦合”或者“强耦合”),下发引导电价或者指导功率限值;Area-EMS根据调度中心下发信息优化配置各个μ-EMS的充电负荷;μ-EMS参照Area-EMS下达的指令控制站内各EV的充电功率,实现有序充电。

调度层策略的关键在于制定引导电价或者指导功率限值,已经有较为成熟的方法^[10-12],受限于篇幅,本文不再赘述,重点研究Area-EMS和μ-EMS实时能量管理策略。在本文仿真算例中,调度层策略以采用“弱耦合”方式为例,由于本文未涉及该部分

的策略,为了便于研究,调度层下发的引导电价由基于日前数据制定的电价简化替代。

2 区/站两级实时能量管理机制

2.1 应用场景及特点

由于无法预测未来 EV 的准确接入时间及充电需求,对 EV 充电进行全局最优化安排是不现实的。因此,本文将 1 d 划分为 96 个控制时段(控制时段时长 $\Delta t = 15 \text{ min}$),以控制时段为基本优化周期,对各控制时段内新接入车辆的充电行为进行动态实时优化。

图 2 给出了区/站两级实时能量管理的基本过程。为了便于分析,定义每个控制时段末端为该控制时段的优化计算点,进行本控制时段内新接入 EV 充电行为的优化计算;定义下一控制时段的始端为优化充电起始点,开始执行优化计算出的充电计划;定义从优化充电起始点直到已接入 EV 中最后一辆车辆离开的时间段为优化区间。假设充电站 i 在第 t 个控制时段中有 n 辆新接入的 EV 请求充电,在优化计算点(控制时段 t 末端)对这 n 辆车的充电计划进行优化,从优化充电起始点(控制时段 $t+1$ 始端)开始执行充电计划,该过程需要经历以下 3 个步骤。

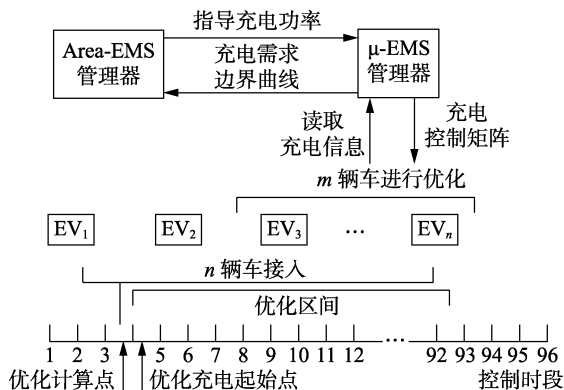


图 2 两级实时能量管理工作过程

Fig.2 Two-stage real-time energy management process

(1) μ -EMS 计算 n 辆 EV 中可以参与优化的 m 辆 EV(有优化时间裕度且车主有参与优化意愿的车辆)的充电功率上、下界曲线,累计能量上、下界曲线,离开时间段和充满所需时间段,并将计算结果上传给 Area-EMS;不参与优化的 $n-m$ 辆 EV 直接从优化充电起始点开始以充电桩的额定功率恒功率充电,直至充到期望荷电状态(SOC)。

(2) Area-EMS 接收下辖区域内 N 个充电站中在控制时段内有 EV 接入的 M 个充电站的 μ -EMS 上传的充电功率上、下界曲线,累计能量上、下界曲线,离开时间段和充满所需时间段信息,以该区域整体充电成本最小为目标,以区域电网负荷峰谷特性和配电变压器不越限为约束进行综合优化,分别得出 M 个充电站各控制时段的指导充电功率并下达

给相应的 μ -EMS。

(3) μ -EMS 接收指导充电功率指令,以此为参照分别对本站内 m 辆车中的交流慢充 EV 和直流快充 EV 进行充电功率分配,计算得到充电控制矩阵并下发到对应的充电桩。

2.2 区/站两级能量管理所需的输入参数

Area-EMS 管理过程中需要调度中心和下层各充电站的相关参数信息。调度中心提供的参数信息包括:各控制时段充电负荷裕度 $M(t)$ (kW),表示在第 t 个控制时段电网允许的该区域最大 EV 充电负荷功率;基于日前负荷数据优化得到的电价信息 $c(t)$ (元/(kW·h)),表示在第 t 个控制时段的充电成本。充电站提供的参数信息为充电需求边界曲线,该曲线需要通过以下的信息计算得到:车主将车接入充电桩时在人机界面上设置的预期停留时间 $t_{i,j}$ (min)以及离开时期望的电池充电水平 $\text{SOC}_{i,j0}$;充电桩访问电池管理系统(BMS)获取的电池容量 $B_{i,j}$ 、电池最大受电能力 $P_{i,j}^{\text{Bmax}}$ 以及电池当前电量水平 $\text{SOC}_{i,j0}$;各充电站配备的专供变压器运行极限 P_i^{Tmax} 。文献[11]指出电池的最大受电能力在充电过程中几乎始终大于充电桩的额定功率,所以本文假设充电负荷的最大充电功率为充电桩的额定充电功率 $P_{i,j}^{\text{N}}$ 。上述各变量的下标 i 表示充电站编号, j 表示站内充电桩编号。

区/站两级能量管理流程图如图 3 所示。

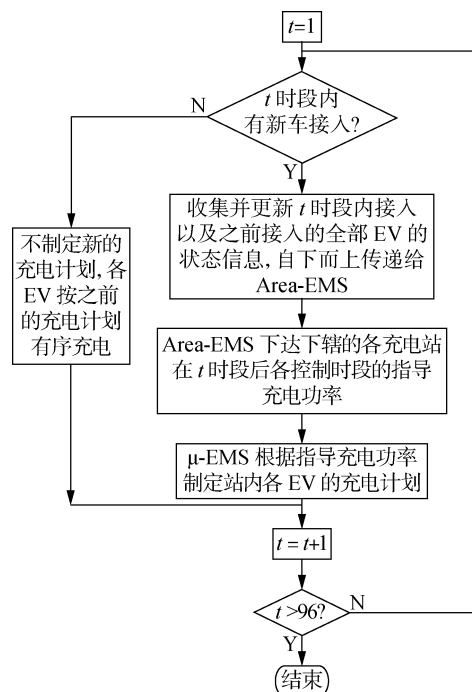


图 3 两级实时能量管理流程图

Fig.3 Flowchart of two-stage real-time energy management

2.3 站级充电需求边界曲线计算方法

μ -EMS 负责对一个充电站内的 EV 充电进行实时能量管理和控制,其重点在于计算 EV 的充电控

矩矩阵为各 EV 分配充电功率。充电需求边界曲线由 μ -EMS 计算得到,上传至 Area-EMS 用于区级优化计算。为方便下文论述,本节介绍站级充电需求边界曲线的计算方法^[7,13]。

假设充电站 i 在第 t 个控制时段内有 n 辆 EV 接入,其中部分可以参与优化的 EV 组成集合 $W_{i,t}$ 。根据充电站 i 中 j 号充电桩上用户输入的预期停留时间 $t_{i,j}$,可确定集合 $W_{i,t}$ 中每辆车的停留时间所含控制时段数 $T_{i,j}$ 和最晚离开时间所在控制时段数 $T_{i,t}^{\max}$ 分别为:

$$T_{i,j} = \left\lfloor \frac{t_{i,j}}{\Delta t} \right\rfloor \quad j \in W_{i,t}; i=1,2,\dots,M \quad (1)$$

$$T_{i,t}^{\max} = \max T_{i,j} \quad j \in W_{i,t}; i=1,2,\dots,M \quad (2)$$

其中, $\lfloor x \rfloor$ 表示求取小于 x 的最大整数; M 为该 Area-EMS 辖内充电站 μ -EMS 数量; $T_{i,t}^{\max}$ 为第 i 个充电站在第 t 个控制时段内接入的全部可参与优化的 EV 中最晚的离开时间所在控制时段,即对任意的 i , 取不同 j 值时 $T_{i,j}$ 的最大值。

μ -EMS 针对集合 $W_{i,t}$ 中 EV 的优化是从第 $t+1$ 个控制时段开始的,其优化区间时长可用包含控制时段数 $J_{i,t}$ 表示。这是针对充电站的优化区间,称为站级优化区间。1 d 内最大控制时段数为 96,则:

$$J_{i,t} = \min(T_{i,t}^{\max}, 96) \quad (3)$$

2.3.1 计算充电功率边界曲线

计算充电站 i 内第 j 号充电桩在站级优化区间中第 k 个控制时段的充电功率下、上界 $P_{i,j}^{\min}(k)$ 和 $P_{i,j}^{\max}(k)$ 分别为:

$$P_{i,j}^{\min}(k) = 0 \quad k=1,2,\dots,J_{i,t}; j \in W_{i,t} \quad (4)$$

$$P_{i,j}^{\max}(k) = \begin{cases} P_{i,j}^N & k=1,2,\dots,T_{i,j}; j \in W_{i,t} \\ 0 & k=T_{i,j}+1, T_{i,j}+2, \dots, J_{i,t}; j \in W_{i,t} \end{cases} \quad (5)$$

EV 站级优化区间中第 k 个控制时段站内总的充电功率下、上界 $P_i^{\min}(k)$ 和 $P_i^{\max}(k)$ 分别为:

$$P_i^{\min}(k) = \sum_{j \in W_{i,t}} P_{i,j}^{\min}(k) \quad k=1,2,\dots,J_{i,t} \quad (6)$$

$$P_i^{\max}(k) = \min \left(\sum_{j \in W_{i,t}} P_{i,j}^{\max}(k), P_i^{T_{\max}}(k) \right) \quad k=1,2,\dots,J_{i,t} \quad (7)$$

其中, $P_{i,j}^{\min}(k)$ 和 $P_{i,j}^{\max}(k)$ 分别为第 i 个充电站第 j 号充电桩接入的 EV 在第 k 个控制时段的充电功率下、上界; $P_i^{\min}(k)$ 和 $P_i^{\max}(k)$ 分别为第 i 个充电站在第 k 个控制时段总的充电功率下、上界,分别对应第 i 个充电站内全部车辆在第 k 个控制时段内均不充电和该第 i 个充电站内全部车辆在第 k 个控制时段内均以额定功率充电 2 种极限情况; $P_i^{T_{\max}}(k)$ 为该充电站在第 k 个控制时段可提供给这些 EV 的最大

功率,即该充电站专供变压器功率上限与之前接入的车辆在第 k 个控制时段总充电功率的差值。

2.3.2 计算累计能量边界曲线

为了保证 EV 可以在停留时段内充电至期望 SOC,按照下面的方法计算充电站 i 内 j 号充电桩上的 EV 在站级优化区间中第 k 个控制时段的累计能量下、上界 $E_{i,j}^{\min}(k)$ 和 $E_{i,j}^{\max}(k)$,它们分别对应采用以下的 2 种充电方式时第 k 个优化时段的电池电量: EV 从最晚起始时段开始以最大功率充电,直到 EV 离开时段刚好完成充电(能量上界); EV 从接入的下一控制时段开始以最大功率充电直至完成充电(能量下界)。

$$E_{i,j}^{\min}(k) = \begin{cases} (\text{SOC}_{i,jD} - \text{SOC}_{i,j0}) B_{i,j} & k=T_{i,j}+1, T_{i,j}+2, \dots, J_{i,t} \\ \max(E_{i,j}^{\min}(k+1) - P_{i,j} \Delta t, 0) & k=T_{i,j}, T_{i,j}-1, \dots, 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$E_{i,j}^{\max}(k) = \begin{cases} 0 & k=0 \\ \min(E_{i,j}^{\max}(k-1) + P_{i,j} \Delta t, (\text{SOC}_{i,jD} - \text{SOC}_{i,j0}) B_{i,j}) & k=1, 2, \dots, J_{i,t} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $j \in W_{i,t}$; $B_{i,j}$ 为电池容量。

站级优化区间内第 k 个控制时段站内总的累计能量下、上界 $E_i^{\min}(k)$ 和 $E_i^{\max}(k)$ 分别为:

$$E_i^{\min}(k) = \sum_{j \in W_{i,t}} E_{i,j}^{\min}(k) \quad k=1,2,\dots,J_{i,t} \quad (10)$$

$$E_i^{\max}(k) = \sum_{j \in W_{i,t}} E_{i,j}^{\max}(k) \quad k=1,2,\dots,J_{i,t} \quad (11)$$

3 Area-EMS 管理策略

由于站与站之间无法通信,无法得知区域内当前时刻其他充电站的充电情况,而本站的充电安排又受到其他充电站充电情况的影响,故由 Area-EMS 统一协调区域内各站的能量流动是有必要的。Area-EMS 的管理策略以用户利益为主要考量,同时兼顾电网负荷特性,实现各充电站之间的能量协调调度。

3.1 目标函数

假设在第 t 个控制时段内 Area-EMS 管理的 N 个充电站中只有 M 个充电站有 EV 接入,其集合为 U_t 。Area-EMS 针对集合 U_t 中所有充电站的优化同样是从第 $t+1$ 个控制时段开始的,其时长为集合 U_t 中各充电站站级优化区间 $J_{i,t}$ 的最长者,可用包含控制时段的个数 J_t 表示,这一区间称为区级优化区间。由集合 U_t 中各充电站的 $J_{i,t}$ 可得:

$$J_t = \max J_{i,t} \quad i \in U_t \quad (12)$$

Area-EMS 以 J_t 个控制时段中 M 个充电站整体充电成本最小为目标,即:

$$\min \sum_{i \in U_t} \left(\sum_{k=1}^{J_t} P_{i,t}^{\text{ref}}(k) c(k) \Delta t \right) \quad (13)$$

其中, $P_{i,t}^{\text{ref}}(k)$ 为充电站 i 在区级优化区间内第 k 个控制时段的指导充电功率; $c(k)$ 为该控制时段的电价。

3.2 约束条件

区级优化区间内各控制时段的充电站指导充电功率不能超过其充电站充电功率上、下界, 在充电站对应的站级优化区间以外时, 其指导充电功率为 0, 即:

$$P_i^{\min}(k) \leq P_{i,t}^{\text{ref}}(k) \leq P_i^{\max}(k) \quad k=1, 2, \dots, J_{i,t}; i \in U_t \quad (14)$$

$$P_{i,t}^{\text{ref}}(k) = 0 \quad k=J_{i,t}+1, J_{i,t}+2, \dots, J_t; i \in U_t \quad (15)$$

充电站指导充电功率积分值应当满足各充电站的累积能量上、下界, 即:

$$E_i^{\min}(k) \leq \sum_{\tau=1}^k P_{i,t}^{\text{ref}}(\tau) \Delta t \leq E_i^{\max}(k) \quad k=1, 2, \dots, J_{i,t}; i \in U_t \quad (16)$$

集合 U_t 中所有充电站总的指导充电功率在区级优化区间内的任意控制时段不得超过电网设定的充电负荷裕度 $M(k)$ 和区域配电变压器运行裕度的最小值, 即:

$$\sum_{i \in U_t} P_{i,t}^{\text{ref}}(k) \leq \min(M(k), P_{\text{limit}} - P_{\text{EV}}(k) - P_{\text{h}}(k)) \quad k=1, 2, \dots, J_t \quad (17)$$

其中, P_{limit} 为区域配电变压器运行极限; $P_{\text{EV}}(k)$ 为区级优化区间内第 k 个控制时段该区域的 EV 充电功率; $P_{\text{h}}(k)$ 为基础负荷功率。

3.3 考虑最小化局部峰谷差

采用上述模型求解得出的结果往往会在低电价时段呈现新的负荷尖峰, 新的峰荷甚至会超过原有的峰荷, 这对于电网公司而言是难以接受的^[14-15]。假设电网公司将给予 Area-EMS 一定的激励, 使其管辖下的充电负荷不加剧区域配电变压器下的负荷峰谷差。下面讨论考虑局部峰谷差的约束条件。

区级优化区间内的负荷峰谷差为:

$$L_{\text{p-v}} = \max P(k) - \min P(k) \quad k=1, 2, \dots, J_t \quad (18)$$

$$P(k) = P_{\text{h}}(k) + P_{\text{EV}}(k) + \sum_{i \in U_t} P_{i,t}^{\text{ref}}(k) \quad k=1, 2, \dots, J_t \quad (19)$$

其中, $P(k)$ 为第 k 个控制时段内叠加本次 EV 优化充电功率后的总负荷功率。

假设最优局部负荷峰谷差为 L_{opt} , 可在 3.2 节的优化模型中增加一项约束为:

$$L_{\text{p-v}} \leq \alpha L_{\text{opt}} \quad (20)$$

其中, α 为局部峰谷差约束系数, 且 $\alpha > 1$ 。 α 取值越

小, 局部峰谷差越接近 L_{opt} 。

4 μ -EMS 管理策略

Area-EMS 完成对所辖待优化充电站的协调优化后, 将当前区级优化区间内各控制时段的指导充电功率 $P_{i,t}^{\text{ref}}(k)$ 下发至相应充电站的 μ -EMS。 μ -EMS 依据 $P_{i,t}^{\text{ref}}(k)$ 计算站内集合 $W_{i,t}$ 中 EV 的充电控制矩阵 $P_{i,t}$ 。 矩阵 $P_{i,t}$ 的行对应集合 $W_{i,t}$ 中 EV 接入的不同充电桩, 列对应站级优化区间内不同控制时段, 即矩阵 $P_{i,t}$ 中的某一行各元素为对应 j 号充电桩在当前站级优化区间内不同控制时段的充电功率指令。

4.1 充电模式

现有的 EV 充电模式分为交流慢充和直流快充 2 种, 对应的充电桩调节方式分别为^[16]:

(1) 交流慢充的开断调节方式, 具体指充电桩根据充电控制矩阵在任一控制时段起始时自动开始或终止充电过程的操作, 该种方式下 $P_{i,t}(j, k) = 0$ 或 $P_{i,t}(j, k) = P_{i,t}^{\text{N}}$;

(2) 直流快充的平滑调节方式, 具体指充电桩根据充电控制矩阵在任一控制时段内连续调整充电功率的大小, 充电功率在 0 到充电桩额定功率范围内连续变化, 该种方式下 $P_{i,t}(j, k) \in [0, P_{i,j}^{\text{N}}]$ 。

4.2 充电控制矩阵计算

假设集合 $W_{i,t}$ 中通过交流和直流充电桩充电的 EV 集合分别为 $W_{i,t}^{\text{AC}}$ 和 $W_{i,t}^{\text{DC}}$ 。 为使实际充电功率尽可能跟随指导充电功率, μ -EMS 对 EV 进行优化控制的目标为集合 $W_{i,t}$ 中车辆总的实际充电功率值与本充电站指导充电功率值的欧氏距离最小, 即:

$$\min \sum_{k=1}^{J_t} \left[\left(\sum_{j \in W_{i,t}^{\text{AC}}} P_{i,t}^{\text{AC}}(j, k) + \sum_{j \in W_{i,t}^{\text{DC}}} P_{i,t}^{\text{DC}}(j, k) \right) - P_{i,t}^{\text{ref}}(k) \right]^2 \quad (21)$$

其中, $P_{i,t}^{\text{AC}}(j, k)$ 为接入交流充电桩充电 EV 的实际充电功率; $P_{i,t}^{\text{DC}}(j, k)$ 为直流充电 EV 的实际充电功率。

4.2.1 交流充电 EV 的约束

$W_{i,t}^{\text{AC}}$ 中各 EV 的充电所需控制时段数 $s_{i,j}$ 为:

$$s_{i,j} = \left\lceil \frac{(\text{SOC}_{i,j\text{D}} - \text{SOC}_{i,j0}) B_{i,j}}{P_{i,j}^{\text{N}}} \right\rceil \times 4 \quad j \in W_{i,t}^{\text{AC}} \quad (22)$$

其中, $\text{SOC}_{i,j\text{D}}$ 为 EV 离开时期望的电池充电水平; $\text{SOC}_{i,j0}$ 为电池当前电量水平; $\lceil x \rceil$ 表示 x 四舍五入取整。

每辆 EV 在其停留时段内要充电至期望 SOC, 故实际充电电量与所需充电电量应该相等, 即:

$$\sum_{k=1}^{J_{i,t}} P_{i,t}^{\text{AC}}(j, k) \Delta t = s_{i,j} P_{i,j}^{\text{N}} \Delta t \times 4 \quad j \in W_{i,t}^{\text{AC}} \quad (23)$$

其中, $P_{i,t}^{\text{AC}}(j, k) = 0$ 或 $P_{i,t}^{\text{AC}}(j, k) = P_{i,j}^{\text{N}}$, 前者表示停止充电, 后者表示以充电桩额定功率充电。

每辆 EV 在其停留时段外充电功率为 0, 故约束

条件为:

$$P_{i,t}^{AC}(j,k) = 0 \quad k = T_{i,j}+1, T_{i,j}+2, \dots, J_{i,t}; j \in W_{i,t}^{AC} \quad (24)$$

4.2.2 直流充电 EV 的约束

每辆 EV 在其停留时段内要充电至期望 SOC, 故实际充电电量与所需充电电量应该相等, 即:

$$\frac{\sum_{k=1}^{J_{i,t}} P_{i,t}^{DC}(j,k)}{4} = (\text{SOC}_{i,jD} - \text{SOC}_{i,j0}) B_{i,j} \quad j \in W_{i,t}^{DC} \quad (25)$$

其中, $P_{i,t}^{DC}(j,k) \in [0, P_{i,j}^N]$; 4 为 15 min 和 1 h 的换算系数。

每辆 EV 在其停留时段外充电功率为 0, 故约束条件为:

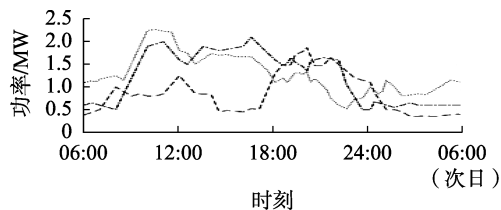
$$P_{i,t}^{DC}(j,k) = 0 \quad k = T_{i,j}+1, T_{i,j}+2, \dots, J_{i,t}; j \in W_{i,t}^{DC} \quad (26)$$

5 算例分析

5.1 算例概述及参数设置

设某 EV 充电代理商公司在某地区电网的区域配电变压器处设置有 Area-EMS, Area-EMS 下辖 3 个充电站, 分别位于办公区、商业区和居民区, 3 个充电站分别设置各自的 μ -EMS。具体线路图见附录 A。

图 4 为区域配电变压器下的基础负荷曲线, 将基础负荷划分为办公(工业园区)、商业及居民用电负荷三大类。根据负荷曲线数据, 假设该地区配电变压器的额定容量为 10 MV·A, 有功运行极限为 7.6 MW (功率因数为 0.8, 效率为 0.95); 假设区域的 EV 数量为 500 辆, 有电池容量为 24 kW·h (型号 1) 和 32 kW·h (型号 2) 2 种型号; 设充电站内交流充电桩额定功率为 7 kW, 直流充电桩额定功率为 45 kW, 充电站配备的专供变压器额定容量为 1 000 kV·A, 有功运行极限为 810 kW (功率因数为 0.85, 效率为 0.95)。办公区既有交流慢充也有直流快充充电桩, 商业区仅有直流快充充电桩, 居民区仅有交流慢充充电桩。按照文献[17]提出的基于蒙特卡洛模拟方法的 EV 出行链模拟得出 3 个充电站各辆 EV 的充电需求, 具体方法见附录 B。表 1 为模拟得出的 3 个充电站 1 d 的 EV 累计停车数量。表 2 为各时段电价^[18-20]。



----居民用电负荷,工业用电负荷, -.-商业用电负荷

图 4 某地区实测负荷数据

Fig.4 Measured load data in a region

表 1 充电站 EV 数据

Table 1 Data of EV in charging station

充电站位置	交流充电车辆数	直流充电车辆数	型号 1 车辆数	型号 2 车辆数
办公区	120	30	92	58
商业区	0	50	20	30
居民区	300	0	144	156

表 2 电价

Table 2 Electricity price

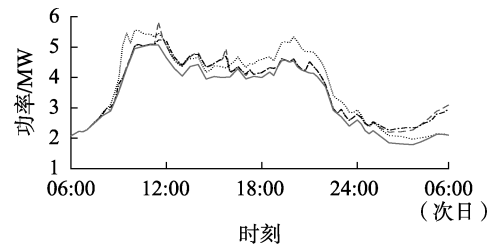
时段	电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	时段	电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]
02:00—07:00	0.3	14:00—18:00	1.07
07:00—09:00	0.712	18:00—23:00	1.12
09:00—14:00	1.21	23:00 至次日 02:00	0.712

Area-EMS 和 μ -EMS 的能量管理周期为从该日 06:00 至次日 06:00 的一整天, 其中 06:00—06:15 为第一个控制时段, 06:15—06:30 为第二个控制时段, 其他依此类推。本文算例仿真验证及分析均以 Area-EMS 和 μ -EMS 的一个能量管理周期为对象。

5.2 Area-EMS 策略效果

令 Area-EMS 不考虑局部峰谷差的运行策略为策略 1, 考虑局部峰谷差的运行策略为策略 2。策略 2 中最优局部峰谷差的约束系数 $\alpha = 1.05$ 。

图 5 为 1 d 内的区域基础负荷曲线和不同 Area-EMS 策略下的运行曲线对比。4 种情况下的峰谷差与充电成本如表 3 所示。



---策略 1, -.-策略 2,即时充电, ——基础负荷

图 5 基础负荷和不同 Area-EMS 策略的对比

Fig.5 Comparison of base load and different Area-EMS strategies

表 3 峰谷差与充电成本对比

Table 3 Comparison of peak to valley difference and charging cost

策略	峰谷差/MW	充电成本/元
即时充电	3.59	8 571.9
策略 1	3.37	3 934.7
策略 2	3.18	3 958.9
基础负荷	3.29	—

结合图 5 和表 3 可看出, 采用策略 1 可以使 EV 尽量不在电价高的时段充电, 夜间有良好的“填谷”效果, 但在高电价变为低电价时会出现负荷尖峰, 在一定程度上加剧了局部的负荷波动, 给电网带来不利影响; 采用策略 2 比策略 1 的运行曲线更平滑, 局

部峰谷差更小,具有同样良好的“填谷”效果,且在充电成本上只比策略 1 高 24.2 元。因此,采用策略 2 的综合效果更好。

策略 2 下 3 个充电站 1 d 内的充电功率曲线如图 6 所示。可见,商业区充电站的充电行为较均匀地分布在全天各时段,办公区充电站的充电行为集中在 08:00—10:00 和 14:00—18:00 这 2 个电价相对较低的时段,而居民区充电站的充电行为由于电价的引导集中在 02:00—06:00 谷电价时段。通过 Area-EMS 策略的协调调度,商业区、办公区、居民区充电负荷得到有序引导,既能够满足不同充电区 EV 用户需求,同时总负荷特性得到优化,能够实现不同区充电站之间的能量协调优化。

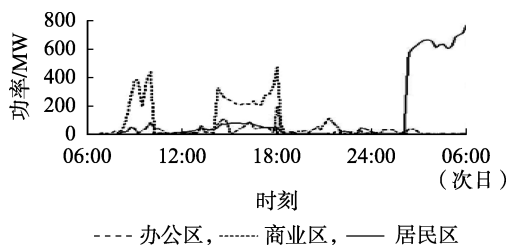


图 6 策略 2 下的充电站充电功率曲线

Fig.6 Charging power curve of charging station under Strategy 2

假设在第 30 个控制时段始端(即在 13:30 时刻左右),区域配电网受到扰动,区域配电变压器短时降额运行,由原来的 7.6 MW 变为 4.5 MW,第 36 个控制时段(15:00—15:15)故障解除。图 7 为正常和故障工况 2 种情况下采用策略 2 的运行曲线,图中虚线椭圆部分对应故障状态。从图中可以看出,在故障期间,由于 Area-EMS 的协调管理,各充电站的充电功率进行了相应调整,使得运行曲线始终在变压器运行极限下方;在此期间减少的充电功率转移到了故障解除后的一段时间,仍可满足车主的充电需求。

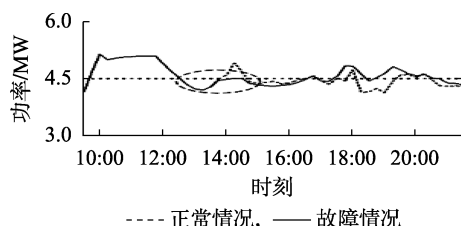


图 7 正常、故障 2 种情况下采用策略 2 的运行曲线

Fig.7 Operating curves with Strategy 2 under normal and fault conditions

5.3 μ -EMS 策略效果

图 8 为 μ -EMS 策略下的运行效果柱状图,选取了办公区第 12 个控制时段(08:45—09:00)进入的 20 辆 EV(14 辆交流慢充、6 辆直流快充)进行对比。居民区和商业区的 μ -EMS 策略下的效果图见附录 C。

由图 8 可以看出,3 个充电站的 μ -EMS 进行实

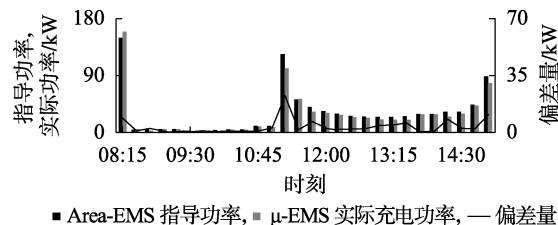


图 8 μ -EMS 策略下指导充电功率和实际充电功率的对比

Fig.8 Comparison between planned charging power and actual charging power under μ -EMS strategy

时能量管理后的实际充电功率与 Area-EMS 优化得出的指导充电功率偏差不大,基本可以实现实际充电功率跟随指导充电功率。偏差产生的原因是 Area-EMS 在优化时将充电站的功率上、下界约束当作一个整体,而未考虑每辆车的充电功率限值。

两者对应的充电成本如下:办公区、商业区、居民区 μ -EMS 实际充电成本分别为 162.16、51.41、44.1 元,办公区、商业区、居民区 Area-EMS 指导充电成本分别为 163.85、51.97、43.70 元。可以看出, μ -EMS 实际充电成本较 Area-EMS 指导充电成本只有极小的增加。这进一步地说明由 Area-EMS 与 μ -EMS 配合实现实时能量管理机制及策略具有良好的运行效果。

6 结论

本文采用由调度中心、Area-EMS 和 μ -EMS 三级能量管理系统组成的 EV 能量管理 3 层架构模型,通过实时能量管理机制,实现了 EV 经济有序充电和区域电网负荷局部峰谷差控制。提出的策略可以兼顾各方效益,实现 3 个层次之间的协调优化,适用于大规模 EV 的实时动态管理。通过仿真算例,可以得到以下的结论:

(1)所提的分层能量管理架构具有灵活性好、可扩展性强的特点,可有效对 EV 充电负荷进行引导,避免区域电网“峰上加峰”的现象,同时有效“填谷”;

(2)Area-EMS 可以实时管理下辖的充电站,根据所辖各充电站站内 EV 的充电需求情况为其下发合理的指导充电功率,使本充电区整体充电成本最小,同时辅助区域电网缩小负荷峰谷差;

(3) μ -EMS 可以最大限度地依照 Area-EMS 下发的指导充电功率指令为本充电站所有可优化 EV 计算充电控制矩阵,保证满足其充电需求,同时几乎不增加充电费用。

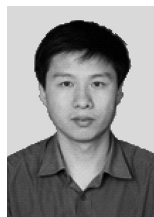
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MA Z, CALLAWAY D S, HISKENS L A. Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(1): 67-78.
- [3] 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.
- [4] 陈静鹏, 朴龙健, 艾芊, 等. 基于分布式控制的 EV 分层优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 24-31, 47.
- CHEN Jingpeng, PU Longjian, AI Qian, et al. Hierarchical optimal scheduling for electric vehicles based on distributed control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 24-31, 47.
- [5] 姚伟锋, 赵俊华, 文福拴, 等. 基于双层优化的 EV 充放电调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 30-37.
- YAO Weifeng, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. A charging and discharging strategy for electric vehicles based on bi-level optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 30-37.
- [6] 李敏, 苏小林, 阎晓霞, 等. 多目标分层分区的 EV 有序充放电优化控制[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3556-3562.
- LI Min, SU Xiaolin, YAN Xiaoxia, et al. Coordinated charging and discharging of plug-in electric vehicles based on multi-layered and multi-regional optimization[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3556-3562.
- [7] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 等. 含新能源接入的 EV 有序充电分层控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3689-3695.
- ZHAN Kaiqiao, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Electric vehicle coordinated charging hierarchical control strategy considering renewable energy generation integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3689-3695.
- [8] 张颖达, 刘念, 张建华. 电动汽车换电站 V2G 运行对中压配电网故障特征的影响[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 55-61.
- ZHANG Yingda, LIU Nian, ZHANG Jianhua. Impact of battery swap station using V2G technology on fault characteristics of medium voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 55-61.
- [9] 翁国庆, 黄飞腾, 张有兵, 等. 电动公交汽车电池集群参与海岛微网能量调度的 V2G 策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 31-39.
- WENG Guoqing, HUANG Feiteng, ZHANG Youbing, et al. V2G strategy for energy dispatch of island microgrid with EBBG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 31-39.
- [10] 高亚静, 王辰, 吕孟扩, 等. 计及车主满意度的 EV 最优峰谷分时电价模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 8-13.
- GAO Yajing, WANG Chen, LÜ Mengkuo, et al. Optimal time-of-use price model considering satisfaction degree of electric vehicle owners[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 8-13.
- [11] 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. EV 参与 V2G 的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 15-25.
- XIANG Ding, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 15-25.
- [12] 葛少云, 王龙, 刘洪, 等. 计及 EV 入网的峰谷电价时段优化模型研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2316-2321.
- GE Shaoyun, WANG Long, LIU Hong, et al. An optimization model of peak-valley price time-interval considering vehicle-to-grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2316-2321.
- [13] 李秋硕. EV 接入电网的电能有序利用模型与控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- LI Qiushuo. Research on models and strategies of electric energy coordinated consumption with electric vehicles integrated in power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [14] 张良, 严正, 冯冬涵, 等. 采用两阶段优化模型的 EV 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.
- [15] ZHAN K, HU Z, SONG Y, et al. A probability transition matrix based decentralized electric vehicle charging method for load valley filling[J]. Electric Power Systems Research, 2015(125): 1-7.
- [16] 于浩明. 基于分时电价的 EV 有序充电优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- YU Haoming. The coordinated charging optimization for electric vehicles based on time-of-use price[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [17] 温剑锋, 陶顺, 肖湘宁. 基于出行链随机模拟的 EV 充电需求分析[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1477-1484.
- WEN Jianfeng, TAO Shun, XIAO Xiangning. Analysis on charging demand of EV based on stochastic simulation of trip chain[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1477-1484.

作者简介:



刘其辉

刘其辉(1974—),男,山东济南人,副教授,博士,主要研究方向为新能源发电与并网技术、EV 与电网融合(E-mail: liuqihui@163.com);

张怡冰(1993—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电与并网技术、EV 能量管理(E-mail: 2274705443@qq.com);

卫婧菲(1993—),女,山西长治人,硕士研究生,主要研究方向为 EV 与电网融合、EV 充电站能量管理(E-mail: 381752542@qq.com);

洪晨威(1996—),男,江西景德镇人,硕士研究生,主要研究方向为 EV 有序充电策略、EV 能量管理(E-mail: hong_chenwei@163.com);

逢飞(1993—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为氢氧燃料电池发电技术(E-mail: ncepupangfei@126.com)。

(下转第 152 页 continued on page 152)

voltage and reactive power characteristics of multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 25-30.

- [24] 雷霄, 孙棚, 李新年, 等. 适应大容量直流入弱受端的直流极控系统优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 205-209.

LEI Xiao, SUN Xu, LI Xinnian, et al. Optimization methods of pole control system for large-capacity HVDC accessing to weak receiving system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 205-209.

- [25] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 3版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008: 140-146.

- [26] 宋新立, 吴小辰, 刘文焯, 等. PSD-BPA 暂态稳定程序中的新直流输电准稳态模型[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 62-67.

SONG Xinli, WU Xiaochen, LIU Wenzhuo, et al. New quasi-steady-state HVDC models for PSD-BPA power system transient stability simulation program[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 62-67.

作者简介:



郑超

郑超(1977—),男,江西九江人,教授级高级工程师,博士,研究方向为电力系统稳定与控制、交直流系统分析、FACTS、新能源并网技术(E-mail: zhengch@epri.sgcc.com.cn);

吕思卓(1989—),男,山西大同人,工程师,硕士,研究方向为电力系统稳定与控制;

马世英(1969—),男,山东安丘人,教授级高级工程师,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、交直流系统分析、源网协调技术、电力大数据技术;

高凯(1972—),男,辽宁沈阳人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统调度自动化;

张鑫(1981—),男,山东莱芜人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为电力系统稳定与控制。

DC short circuit ratio considering difference of “quality” and “quantity” for active device

ZHENG Chao¹, LÜ Sizhuo¹, MA Shiyang¹, GAO Kai², ZHANG Xin¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Grid Liaoning Province Electric Power Company, Shenyang 110006, China)

Abstract: A new index $MISCR_{CQQ}$ for direct current short circuit ratio is proposed, which considers the difference of dynamic characteristics of active devices, that is, the difference of both “quality” and “quantity” for reactive power. The calculation process of $MISCR_{CQQ}$ is also given. Simulative results on multi-HVDC infeed system with large capacity induction motor access show that the magnitude of $MISCR_{CQQ}$ exhibits a same changing trend as the dynamic voltage support capability of power grid. Therefore, $MISCR_{CQQ}$ can effectively solve the evaluation failure problem of traditional short circuit ratio under multi-source environment.

Key words: short circuit ratio; power grid strength; dynamic voltage support; active device; diversification; characteristic difference

(上接第129页 continued from page 129)

Two-stage real-time energy management mechanism and optimization strategy for EV charging area/station

LIU Qihui¹, ZHANG Yibing¹, WEI Jingfei², HONG Chenwei¹, PANG Fei¹, ZHOU Qiang³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Materials Company, Beijing 100120, China;

3. Qingdao TGOOD Electric Co., Ltd., Qingdao 266104, China)

Abstract: A large number of electric vehicles will be integrated into the power system in the promising future. In this case, it is more or less unrealistic to directly dispatch each electric vehicle for orderly charging. A more realistic plan is to manage those electric vehicles in different levels and zones in a decentralized basis. In this regard, an EV charging layered energy management architecture including power system dispatching center, Area-EMS (Area Energy Manage System) and μ -EMS (fine-tuning Energy Management System) is proposed. The function of each layer and the operation scheme of the layered management architecture are introduced in detail. A two-stage real-time energy management strategy is designed for Area-EMS and μ -EMS in charge of agents respectively. The strategy can satisfy the charging needs of electric vehicles and ensure economic benefits. Moreover, this strategy is adaptive to different power grid coupling modes, and can improve load peak-valley characteristics of regional power grid. Simulation examples are conducted to verify the effectiveness and practicability of the proposed layered architecture and real-time energy management strategy.

Key words: electric vehicles; hierarchical architecture; energy management; economic benefit; peak-valley difference

附录

附录 A

设某 EV 充电代理商公司在某地区电网的区域配电变压器处设置有 Area-EMS, Area-EMS 下辖 3 个充电站, 分别位于办公区、商业区和居民区, 3 个充电站分别设置各自的 μ -EMS。

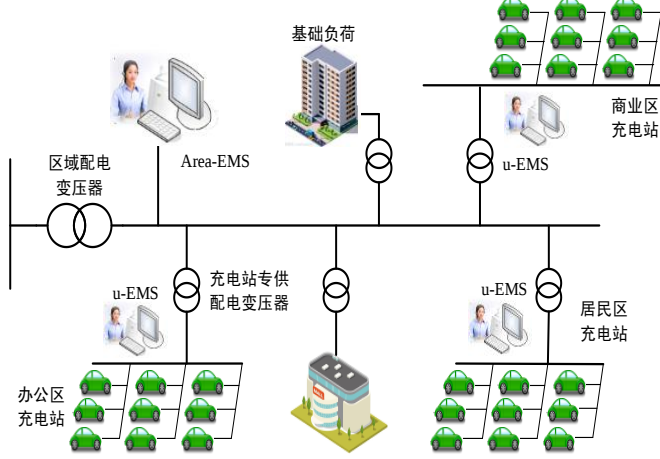


图 A1 仿真算例结构

Fig.A1 Structure of Simulation Example

附录 B

图 A1 为典型的以任意区域为始末点的出行链模拟, 模拟过程即得到时间和空间的特征量: 在出行前, 需模拟出行时刻; 在行程中, 需模拟行驶时长和行驶里程; 在每次行程的终点, 需确定电动车的到达时刻、停车时长、电池剩余电量。

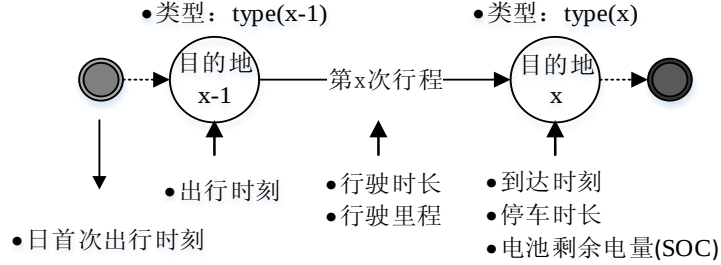


图 B1 出行链示意图

Fig.B1 Travel chain diagram

按照文献[17]提出的基于蒙特卡洛方法的出行链模拟用户一天出行的时间和空间特征量, 得出分别位于办公区、商业区、居民区 3 个充电站一天的电动汽车充电负荷数据。蒙特卡洛方法可简要分为 2 步: 构造待模拟随机变量的概率分布以及生成服从该分布的样本值。

单个电动汽车用户一天的出行链模拟流程如下:

(1) 抽取日首次出行时刻 t_0 (以家为起点)。首次出行时刻服从对数正态分布, 其概率密度函数为

$$f(t_0) = \frac{1}{t_0 \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (B1)$$

其中, $\mu=2.23$, $\sigma=0.30$ 。

(2) 抽取第 x 次行程的出行目的 D_x 。根据当前地点类型 D_{x-1} (首次出行出发点类型为住宅区) 及出行时刻, 在对应时刻的出行目的转移概率矩阵中抽取出行目的 D_x 。出行比重最大的 6 类目的分别为: 回家、购物、工作、休闲、接送及其他, 进一步把回家细化为回家逗留和结束出行, 则 D_x 的取值为 1 到 7。

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0.01 & 0.1 & 0.65 & 0.02 & 0.2 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.05 & 0.1 & 0.5 & 0.05 & 0.15 & 0.05 \\ 0.1 & 0.05 & 0.2 & 0.6 & 0.05 & 0.03 & 0.01 \\ 0.07 & 0.05 & 0.05 & 0.4 & 0.15 & 0.25 & 0.03 \\ 0.05 & 0.04 & 0.2 & 0.5 & 0.15 & 0.01 & 0.05 \\ 0.05 & 0.05 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (\text{B2})$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.1 & 0.3 & 0.1 & 0.2 & 0.15 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.15 & 0.05 & 0.15 & 0.1 & 0.05 \\ 0.05 & 0.35 & 0.1 & 0.05 & 0.2 & 0.2 & 0.05 \\ 0.15 & 0.4 & 0.15 & 0.05 & 0.1 & 0.1 & 0.05 \\ 0.05 & 0.5 & 0.2 & 0.05 & 0.15 & 0.01 & 0.04 \\ 0.05 & 0.5 & 0.2 & 0.05 & 0.1 & 0.05 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (\text{B3})$$

其中, $\mathbf{H}_1$ 和 $\mathbf{H}_2$ 分别为一天 17:00 之前和 17:00 之后车主出行目的转移概率矩阵。矩阵中 $x-1$ 行 x 列的元素 $H_{x-1,x}$ 表示结束以 D_{x-1} 类型活动目的停车行为且去往类型为 D_x 的活动区域的概率。

(3) 抽取行驶时间 $t_{x-1,x}$ 。 $t_{x-1,x}$ 与行程的起、终点类型有关, 基本服从对数正态分布, 概率密度形式表示为式(B4), 参数以矩阵形式表示为式(B5)、(B6)。

$$f(t_{x-1,x}) = \frac{1}{t_{x-1,x} \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t_{x-1,x} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{B4})$$

$$\boldsymbol{\mu}_{TD} = \begin{bmatrix} 2.79 & 2.79 & 2.9 & 2.32 & 2.57 & 2.34 & 2.4 \\ 2.79 & 2.79 & 2.9 & 2.32 & 2.57 & 2.34 & 2.4 \\ 2.96 & 2.96 & 2.73 & 2.4 & 2.7 & 2.72 & 2.17 \\ 2.24 & 2.4 & 2.38 & 2.06 & 2.5 & 2.39 & 2.11 \\ 2.55 & 2.55 & 2.46 & 2.3 & 2.71 & 2.54 & 2.38 \\ 2.38 & 2.38 & 2.7 & 2.27 & 2.58 & 2.37 & 2.28 \\ 2.49 & 2.49 & 2.17 & 2.19 & 2.6 & 2.41 & 2.22 \end{bmatrix} \quad (\text{B5})$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{TD} = \begin{bmatrix} 0.81 & 0.81 & 0.76 & 0.75 & 0.88 & 0.78 & 0.77 \\ 0.81 & 0.81 & 0.76 & 0.75 & 0.88 & 0.78 & 0.77 \\ 0.79 & 0.79 & 0.92 & 0.84 & 0.87 & 0.79 & 0.75 \\ 0.75 & 0.75 & 0.88 & 0.87 & 0.96 & 0.83 & 0.94 \\ 0.82 & 0.82 & 0.81 & 0.79 & 1.05 & 0.81 & 0.8 \\ 0.81 & 0.81 & 0.82 & 0.81 & 0.95 & 0.82 & 0.8 \\ 0.78 & 0.78 & 0.79 & 0.92 & 0.96 & 0.79 & 0.99 \end{bmatrix} \quad (\text{B6})$$

其中, $\boldsymbol{\mu}_{TD}$ 和 $\boldsymbol{\sigma}_{TD}$ 中 $x-1$ 行 x 列的元素 $\mu_{x-1,x}$ 和 $\sigma_{x-1,x}$ 表示结束以 D_{x-1} 类型活动目的停车行为且去往类型为 D_x 的活动区域时所需的行驶时间概率密度的参数 μ 和 σ 。

(4) 抽取行驶里程 $d_{x-1,x}$, 服从行驶时长 $t_{x-1,x}$ 条件下的正态分布 $N[0.4348t_{x-1,x}^{1.199}, (0.2431t_{x-1,x}^{1.132})^2]$ 。

(5) 抽取停车时长 T_x 。根据目的类型 D_x 抽取在该目的地充电站的停车时长: 目的地类型为 D_1 (回家逗留) 时, 在居民区充电站停车时长满足 $N(2, 0.25^2)$; 目的地类型为 D_4 (办公) 时, 在办公区充电站停车时长满足 $N(5.5, 1^2)$; 目的地类型为 D_3 (购物) 和 D_5 (休闲) 时, 按下表所示概率抽取在商业区充电站的停车时长。

表 B1 商业区充电站停车时长概率

Table B1 Parking time probability of charging station in business district								
停车时长/h	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
概率	0.18	0.25	0.22	0.15	0.1	0.05	0.02	0.03

(6) 计算到达充电站时电动汽车的电池剩余 SOC。每次停车后, 从 $N(0.5, 0.1)$ 中抽取一个随机数, 表征该

用户习惯充电的起始 SOC，若剩余 SOC 小于该值，则用户选择充电。充电的期望 SOC 设为 1。

$$\text{SOC}_x = \frac{B_{x-1} - ed_{x-1,x} / 100}{B} \quad (\text{B7})$$

其中， B 为电池额定容量； B_{x-1} 为开始本次行程时的电池电量； e 为百公里耗电量。

(7) 根据行驶时间 $t_{x-1,x}$ 计算到达充电站的时刻，根据停车时长 T_x 计算下次出行时刻。

(8) 若 D_x 为 D_2 则代表一天出行结束，该辆车的出行链模拟完成。否则，返回步骤 (2)，继续循环。

附录 C

图 C1 和图 C2 为商业区和居民区充电桩 μ -EMS 能量管理策略的运行效果柱状图。图 C1 表示商业区第 47 个控制时段(17:30—17:45)进入的 4 辆直流快充 EV 总的实际充电功率，图 C2 表示居民区第 46 个控制时段(17:15—17:30)进入的 9 辆交流慢充 EV 总的实际充电功率。

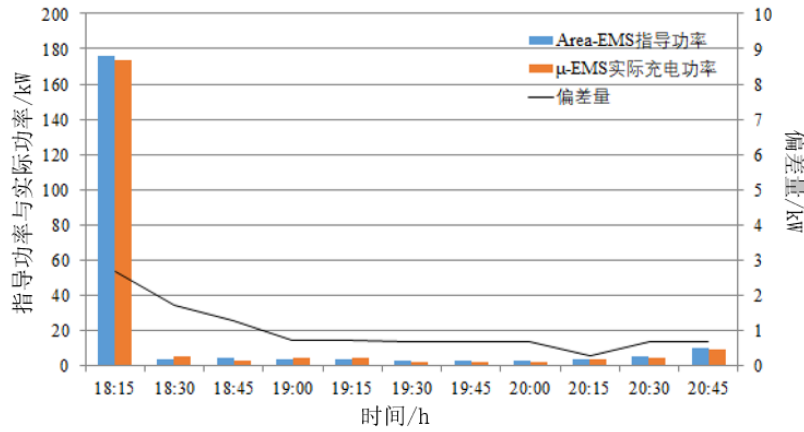


图 C1 商业区 μ -EMS 第 47 控制时段部分优化区间运行结果

Fig.C1 Operation results of part of optimized interval in the 47th control period of μ -EMS in commercial area

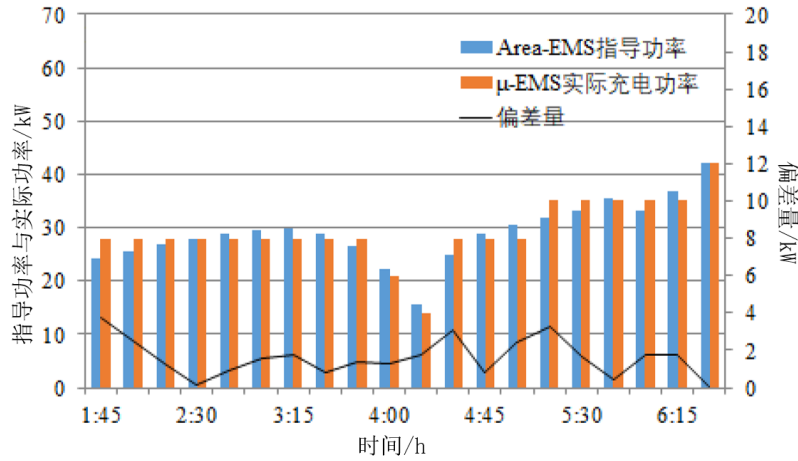


图 C2 居民区 μ -EMS 第 46 控制时段对应优化区间的运行结果

Fig.C2 Operation results of part of optimized interval in the 46th control period of μ -EMS in residential area