

基于时空双尺度的电动汽车充放电优化调度方案

针对大规模电动汽车 (Plug-in Electric Vehicle, PEV) 无序充放电对配电网的安全与经济运行带来的严重影响, 提出了一种基于时空双尺度的电动汽车充放电优化调度方案。将电动汽车配电系统按照电压等级分层, 然后将电动汽车充电站按照其所在的地域进一步划分为若干个基层区域。区域基层代理机构在时间和空间尺度上与辖区内每辆电动汽车建立通信信道, 采集整理电动汽车状态与充放电需求信息, 并根据系统调度目标执行调度计划, 实现电动汽车充放电的优化调度。根据现有研究并借鉴相关标准, 从提高电动汽车与配电网互动效率方面提出了电动汽车用户信用等级解决方案。仿真结果表明, 该方法所设计的电动汽车充放电优化模式不仅具有较好的泛化性能, 而且具有削峰填谷的工程应用价值。

马金祥^{1, 2} 范新南² 吴志祥¹ 蔡昌春² / 1. 常州工学院电气与光电学院
2. 河海大学江苏省输配电装备技术重点实验室



马金祥/讲师

关键词/Keywords

电动汽车·
电动汽车入网·
充放电优化·
分层分区调度·
时空双尺度·

电动汽车与传统的内燃机相比, 电动机的许多优点在汽车时代的早期就已经很明显。由于受到早期电池容量和电力系统容量等诸多方面因素的限制, 电动汽车发展落后于传统化石能源汽车。石油危机和部分地区的空气污染问题, 使电动汽车再度受到相关研究机构、工业界和政府部门的关注和重视^[1]。人们对环境和能源问题的日益关注, 促进了电动汽车的发展。电动汽车作为一种绿色交通工具, 已经成为汽车工业发展的必然趋势。

然而, 电动汽车充电选择系统是一个具有无序性、随机性、动态性和自适

江苏省输配电装备技术重点实验室开放基金资助项目 (2013JSSPD03), 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CXZZ14_0140)。

应性的复杂系统, 大规模电动汽车接入可能危害电力系统的安全与稳定运行; 另外, 充放电价格策略、充放电方式选择以及充换电站位置和容量的确定都是当前电动汽车大规模推广应用中亟待解决的难题^[2]。

电动汽车电池所具备的储能特性使其有别于常规负荷, 一方面作为负荷从电力系统汲取电能, 另一方面可作为移动式储能单元为电网提供支持^[3]。通过协调控制电动汽车的充放电过程, 可以缓解规模化电动汽车的充电需求对电网的升级改造压力, 还能降低总充电成本与系统网损, 削峰填谷, 维持系统的可靠运行。文献[4]分析了电动汽车有序充电与电网互动的研究现状和应用难点。文献[5]根据用户的驾驶习惯, 采用蒙特卡罗方法模拟用户的充电需求, 对电动汽车在无序充电、第一阶段模型和两阶段模型优化控制充电三种情形下充电站的经济效益及配电变压器下的负荷情况进行了仿真和分析。文献[6]基于粒子群优化算法提出了结合配电网负荷特性的充电站有序充电的动态优化方案。文献[7]以优化城市配电网利用率为目标, 构建出电动汽车强制性有序充电模型。为了建立换电模式下电动汽车电池充电负荷及优化模型, 文献[8]对两种电动汽车换电模式 (即充换电模式和集中充电统一配送模式) 的结构、运营流程进行了分析。文献[9]根据电动汽车换电站特点, 提出了以换电站充电功率为控制对象的有序充电调度策略, 建立了不同目标函

数的调度策略数学模型。文献[10]引入对电动汽车进行分层分区调度的理念,并构建了基于双层优化的可入网电动汽车充放电调度模型。

目前,电动汽车有序协调调度策略对车主充放电需求的个性化需求涉及较少,对电动汽车充放电需求信息与配电网管理系统互动研究不够。基于以上考虑,本文提出了一种基于时空双尺度的电动汽车充放电优化调度方案。为了提高电动汽车车主的履约积极性,根据现有研究并借鉴相关标准,从提高电动汽车与配电网互动效率方面提出了电动汽车用户信用等级解决方案。

电动汽车有序充放电优化调度架构

1. 有序充放电分层分区优化调配模式

随着电动汽车规模的扩大,作为基础设施的电动汽车充换电站在电网中所占的比重将会越来越大。电动汽车有序充放电优化调度要求调度机构与每辆电动汽车之间建立通信信道,收集整理电动汽车的用电需求,并根据优化控制策略合理调配基于时间和空间尺度的电动汽车充放电过程。提高电网高级资产运行效率,减少电动汽车用户用电成本,实现电网公司与电动汽车用户双方共赢互利。对于大规模电动汽车的高效管理,比较可行的方案是采用基于时空双尺度的电动汽车分层分区充放电优化调度方案。

基于时空双尺度的电动汽车分层分区充放电优化调度方案的核心是:以电动汽车车主行驶需求为基本前提,将电动汽车配电系统按照电压等级分层,然后将电动汽车充电站按照其所在的地域进一步划分为若干个基层区域。基层调度机构负责本区域电动汽车充放电协作调度。区域基层代理机构在时间和空间尺度上与辖区内每辆电动汽车建立通信信道,采集整理电动汽车状态信息与充放电需求,并根据系统基层调度的调度目标指定调度计划,向电动汽车发送充放电调度指令,实现电动汽车充放电的有序调度。系统总调度制定相应的考核指标监督基层调度机构的工作,并根据考核结果影响基层调度机构充放电负荷分配的调度计划。电动汽车分层分区充放电优

化调度模型架构如图1所示。

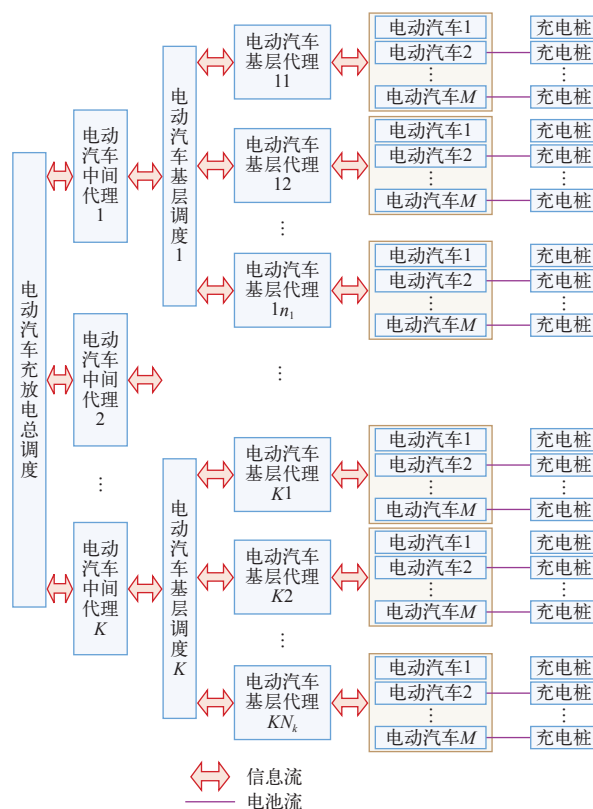


图1 电动汽车分层分区充放电优化调度模型架构

2. 有序充放电时空双尺度优化调度步骤

基于时间尺度的控制主要是实现电动汽车用户从用电需求信息上报到充放电结束全过程的监控,并将用户履约情况作为该用户充放电价格和后继信用等级评估的参考依据;而基于空间尺度的控制主要是实现电动汽车运行区域全范围电动汽车电池荷电状态(State Of Charge, SOC)的监控与执行。基于时空双尺度的电动汽车有序充放电分层分区调度方案主要包括以下步骤:

1) 车主根据次日电动汽车的使用情况向所在区域基层代理进行日前申报,作为系统调度自下而上的电动汽车用电信息来源。

2) 各区域基层代理综合车主申报信息与信用等级信息,在时间尺度上将车主充放电信息分组,并将各时段所需调度的容量通过中间代理向系统总调度机构申报。

3) 系统总调度机构根据各区域基层代理的申报数据,制订峰谷差信息调度目标,同时制订各区域基层代理在各时段的调度计划,并将相关调

度信息发送给各区域基层代理。

4) 各基层调度根据系统总调度机构的调度目标, 在满足车主行驶需求的前提下根据其申报信息制订各车主的具体充放电实施计划, 计算系统总负荷水平方差、电动汽车平均充放电成本和区域基层代理机构制订的充放电调度计划与实际执行调度结果不一致性。

5) 若系统总负荷水平方差指标满足调度目标, 则进入调度计划具体实施阶段; 若系统总负荷水平方差指标不能满足调度目标, 则重新调整各区域基层代理在各时段的调度计划, 重复步骤3) ~ 步骤5) 或直接在各基层调度范围内微调。

6) 统计计算前一个工作日的系统总负荷水平方差、电动汽车用户信用等级调整、电动汽车平均充放电成本和基层区域代理机构制订的充放电调度计划与实际执行调度结果不一致性, 作为系统总调度计划、电动汽车用户用电成本核算和信用等级动态评估的依据。电动汽车充放电调度流程如图2所示。

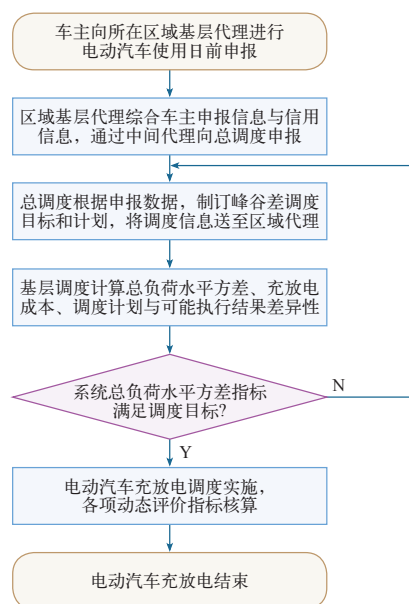


图2 电动汽车充放电调度流程

电动汽车有序充放电优化调度模型

基于时空双尺度的电动汽车有序充放电分层分区调度方案包括构建目标函数、构建约束条件和电动汽车用户信用等级评估三个步骤。

1. 构建目标函数

f_1 为系统总负荷水平方差, 目标函数 f_1 体现了系统削峰填谷的控制效果, 其计算表达式为

$$\min f_1 = \min \frac{1}{T-1} \sum_{t=1}^T (P_{-ev,t} + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \sum_{m=1}^{M_{K,N}} x_{k,n,m,t} P_{k,n,m,t} - \bar{P}_d)^2 \quad (1)$$

式中, $t \in [1, T]$, $T = 24h/\Delta T$, ΔT 为单位控制时段, T 为一个调度周期内所包括的时段数; $k \in [1, K]$, K 为所有中间代理机构的数量; $n \in [1, N_k]$, N_k 为第 k 个中间代理机构中基层代理的数量; $m \in [1, M_{K,N}]$, $M_{K,N}$ 为中间代理 k 的基层代理 n 中电动汽车的数量; $P_{-ev,t}$ 为时段 t 内总调度系统中除电动汽车负荷之外的负荷水平; $\bar{P}_d$ 为一天内总调度系统平均负荷; $x_{k,n,m,t}$ 、 $P_{k,n,m,t}$ 分别为时段 t 内第 k 个中间代理第 n 个基层代理中第 m 辆电动汽车实际执行的充放电调度结果与负荷水平。

f_2 为区域基层代理实际执行调度结果与系统总调度制订的充放电调度计划的偏差, 目标函数 f_2 反映了区域基层调度机构对系统总调度制订调度计划的执行力度, 具体如下

$$\min f_2 = \min \sum_{k=1}^K \|X_k, Y_k\| \quad (2)$$

式中, X_k 为区域基层代理机构 k 内电动汽车实际执行的充放电调度结果; Y_k 为区域基层代理机构根据系统总调度的调度目标制订的调度计划。

$$X_k = \begin{pmatrix} x_{N_k,1,1} & \cdots & x_{N_k,1,T} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{N_k,M,1} & \cdots & x_{N_k,M,T} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$Y_k = \begin{pmatrix} y_{N_k,1,1} & \cdots & y_{N_k,1,T} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{N_k,M,1} & \cdots & y_{N_k,M,T} \end{pmatrix} \quad (4)$$

f_3 为电动汽车平均充放电成本, 目标函数 f_3 反映了电动汽车用户参与优化调度的程度, 具体如下

$$\min f_3 = \min \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} \sum_{m=1}^{M_{K,N}} (c_{k,n,m} \text{Price}_t x_{k,n,m,t} P_{k,n,m,t} \Delta T)}{T \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_k} M_{K,N}} \quad (5)$$

式中, Price_t 为时段 t 内的电价; $c_{k,n,m}$ 为第 k 个中间代理第 n 个基层代理中 m 辆电动汽车信用等级对应执行的用电价格优惠比例。

2. 构建约束条件

1) 电动汽车电池安全约束

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_{k,n,m,t} \leq \text{SOC}_{\max} \quad (6)$$

式中, SOC 为电池荷电状态; $\text{SOC}_{k,n,m,t}$ 为时段 t 内第 k 个中间代理第 n 个基层代理中第 m 辆电动汽车的电池荷电; $\text{SOC}_{\max}$ 和 $\text{SOC}_{\min}$ 分别为电动汽车电池荷电的上下限。

2) 电动汽车行驶需求约束

$$\text{SOC}_{k,n,m,t_{\text{end}}} \geq \text{SOC}_{k,n,m} \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{k,n,m,t} P_{k,n,m,t} \geq P_{k,n,m} \quad (8)$$

式中, $\text{SOC}_{k,n,m,t_{\text{end}}}$ 和 $\text{SOC}_{k,n,m}$ 分别为第 k 个中间代理第 n 个基层代理中第 m 辆电动汽车在离开系统时的 SOC 值与充放电需要达到的 SOC 值; $P_{k,n,m}$ 为第 k 个中间代理第 n 个基层代理中第 m 辆电动汽车在离开系统时需要的功率; 因为 $t_{\text{end}} \leq T$, 故需要考虑电池充放电结束后电池电量的自然损耗。

3) 电动汽车不可调度时段约束

$$y_{k,n,m,t} = 0 \quad t \leq t_{\text{start}} \text{ 或 } t \geq t_{\text{end}} \quad (9)$$

式中, t_{start} 和 t_{end} 分别为第 k 个中间代理第 n 个基层代理中第 m 辆电动汽车接入系统和离开系统的时间。

4) 基层区域代理机构的调度约束

$$0 \leq P_{k,t} \leq \sum_{k=1}^K y_{k,n,m,t} P_{k,n,m,t} \quad (10)$$

式中, $P_{k,t}$ 为中间代理机构 k 在时段 t 的可调度充放电功率; $y_{k,n,m,t}$ 为充放电状态, 可取值 -1 、 0 和 1 , 分别为充电、闲置和放电状态。

5) 电网线路节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\max} \quad (11)$$

式中, $U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 分别为电网线路节点电压的上下限值。

6) 电网线路传输功率约束

$$|P_{l,t}| \leq P_l^{\max} \quad (12)$$

$$|Q_{l,t}| \leq Q_l^{\max} \quad (13)$$

式中, $P_{l,t}$ 和 $Q_{l,t}$ 分别为线路 l 在时段 t 传输的有功功率和无功功率; $P_l^{\max}$ 和 $Q_l^{\max}$ 分别为线路 l 在时段 t 允许传

输的有功功率和无功功率的上限。

3. 电动汽车用户信用等级评估

电动汽车用户信息等级评估适用于电动汽车充放电调度的信用风险评估和管理, 能够提高电动汽车充放电有序调度的效率。客户信用等级既是区域代理调度规划执行的依据, 也是对电动汽车用户的约束。电动汽车用户用电价格优惠条件与优惠比例如表1所示, 电动汽车用户放电价格优惠条件与优惠比例如表2所示。

表1 电动汽车用户用电价格优惠条件与优惠比例

用电价格优惠条件		用电价格优惠比例(%)
信用等级	时间差(绝对值)/min	
A	[0,30)	80
B	[30,60)	85
C	[60,90)	90
D	[90,180)	95
E	≥ 180	100

表2 电动汽车用户放电价格优惠条件与优惠比例

放电价格优惠条件		放电价格优惠比例(%)
信用等级	时间差(绝对值)/min	
A	[0,30)	120
B	[30,60)	115
C	[60,90)	110
D	[90,180)	105
E	≥ 180	100

表1与表2中的时间差是指预约到达时间与实际到达时间之间的差值。当同时满足充放电价格优惠条件时, 才执行相应的充放电价格优惠比例。例如, 只有当用户信用等级为A级, 且时间差值 $\in (0, 30]$ 时, 才执行80%的优惠比例。如果信用等级对应的优惠比例与时间差对应的优惠比例不一致, 则执行优惠比例的平均值, 并将时间差对应的一次信用等级循环计入客户信用等级评估中。客户信用等级评估是一个动态指标, 可以通过对电动汽车用户一定时间长度内信用指标的综合分析计算得到。并与电动汽车充放电电价衔接, 即高信用等级对应高优惠用电价格。

电动汽车用户信用等级分类包括: 分析电

电动汽车用户历史数据；建立客户信用计分模型；根据模型计算客户的信用得分，并评估其信用等级。该方法具有科学、客观和公正的优点，克服了现有电动汽车用户信用评估技术的缺点。另外，该系统还具有操作方便、与电动汽车充放电业务系统数据共享的优点。

用于计算电动汽车用户信用得分的指标体系，是利用电动汽车一定时间长度内的客户历史数据，经数据取样、数据探索、数据调整和预处理后，建立客户信用计分模型而形成的。其特征不在于客户信用计分模型为多元线性回归模型。依据该方法计算客户信用得分的步骤为：

1) 对系统提供的客户数据进行预处理，包括数据取样、数据探索和数据调整的过程。

2) 将预处理的客户样本数据带入多元线性回归方程，即

$$\text{Credit} = \beta_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i + \sum_{j=1}^p \beta_j v_j + \varepsilon \quad (14)$$

式中，Credit为客户的信用得分； $v_1, v_2, \dots, v_n$ 为信用指标； $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 为对应的指标权重，采用最小二乘估计方法，估计系数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 的值， β_0 为前期信用记录统计值的权重； ε 为偏差； u_i 为前期信用记录值； n 为向前追溯的信用记录历史时间长度。

3) 对建立的回归模型进行回归方程显著性检验和回归系数显著性检验，并对模型进行优化。

4) 输入客户资料信息，根据多元线性回归模型计算客户信用得分，归纳其所属的信用等级。

仿真实例分析

1. 结果评价指标

结果评价指标包含三项：第一项为系统总负荷水平方差，反映电动汽车调度系统所取得的削峰填谷效果；第二项为实际执行调度结果与系统调度制订的充放电调度计划的偏差，反映各基层代理机构对上层调度计划的执行程度；第三项为电动汽车平均充放电成本，反映电动汽车用户参与优化调度的程度。

优化目标函数为

$$\min F = f_1 + \alpha f_2 + \lambda f_3 \quad (15)$$

式中，三项子目标函数的权重比为 $(1 : \alpha : \lambda)$ 。 α 为惩罚系数，表示基层代理实际调度结果与系统制定的调度计划偏差的惩罚； λ 为激励系数，表示对电动汽车用户信用的激励。

2. 节点测试系统

采用修改的IEEE 30节点测试系统拓扑结构（含4个中间代理，每个中间代理辖5个基层代理，共20个基层代理机构）来说明本文提出的调度模型优化效果。电动汽车相关参数设置如表3所示。

表3 电动汽车相关参数设置

参数名称	数值	参数名称	数值(%)
平均充电功率/kW	3	充电效率	90
平均放电功率/kW	3	放电效率	90
平均蓄电池容量/kW·h	3	SOC _{max}	90
可用系数	0.8	SOC _{min}	10

根据文献[11]，将1天中第一次出行开始时刻和最后一次出行结束时刻近似表示为正态分布函数，而日行驶里程近似为对数正态分布。通过函数拟合可以分别获得第一次出行开始时刻、最后一次出行结束时刻以及日行驶里程的概率密度函数，具体如下

$$f_{\text{start}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{start}}} \exp\left[-\frac{(t-\mu_{\text{start}})^2}{2\sigma_{\text{start}}^2}\right] & 0 < t \leq \mu_{\text{start}} + 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{start}}} \exp\left[-\frac{(t-24-\mu_{\text{start}})^2}{2\sigma_{\text{start}}^2}\right] & \mu_{\text{start}} + 12 < t \leq 24 \end{cases} \quad (16)$$

式中， $\mu_{\text{start}} = 8.92$ ； $\sigma_{\text{start}} = 3.24$ 。

$$f_{\text{end}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{end}}} \exp\left[-\frac{(t+24-\mu_{\text{end}})^2}{2\sigma_{\text{end}}^2}\right] & 0 < t \leq \mu_{\text{end}} - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{end}}} \exp\left[-\frac{(t-\mu_{\text{end}})^2}{2\sigma_{\text{end}}^2}\right] & \mu_{\text{end}} - 12 < t \leq 24 \end{cases} \quad (17)$$

式中， $\mu_{\text{end}} = 17.47$ ； $\sigma_{\text{end}} = 3.41$ 。

$$f_{\text{date}}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{date}} t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \mu_{\text{date}})^2}{2\sigma_{\text{date}}^2}\right] \quad (18)$$

式中， $\mu_{\text{date}} = 2.98$ ； $\sigma_{\text{date}} = 1.14$ 。

假定电动汽车中间代理数量 $K=4$ ，每个中间代理所辖基层代理 $n=5$ 。为了简化模型，设5个基层代理系统有2万辆电动汽车，且分布情况一致，各基层代理管理的电动汽车数量如表4所示。

表4 各基层代理所辖电动汽车数量

(单位: 辆)

基层代理1	基层代理2	基层代理3	基层代理4	基层代理5
3 500	3 800	4 000	4 200	4 500

惩罚系数 α 按式(19)所示的指数规律变化。目的在于实现所构建的优化模型在迭代初期上层具有较强的全局搜索能力，迭代后期下层调度偏差迅速下降，即

$$\alpha = \exp\left(\frac{p-10}{3}\right) \quad (19)$$

式中， p 为迭代次数。

激励系数 λ 按式(20)所示的指数规律变化。可以实现在一个信用评估周期内(假定为15日)所构建的优化模型信用约束较弱，在信用评估等级形成之后信用约束基本稳定，即

$$\lambda = 1 - \exp\left(-\frac{q}{7}\right) \quad (20)$$

式中， q 为电动汽车车主申报天数。

为简化问题，对电动汽车用户信用等级评估只考虑用户前期充放电信用记录，不考虑其他信用指标(如受教育程度、工作性质和经济状况等)。对电动汽车用户信用评估的周期为15日，形成用户信用初始等级；初始信用等级评估之后，进入信用等级滚动评估。即在15日内用户用电价格只与时间差相关，在15日后用电价格优惠条件包括信用等级和时间差。

3. 优化运行模式结果分析

将本文设计的优化运行模式与原始负荷模式(不计及电动汽车充电负荷)、自由运行模式进行比较，结果分析如表5所示。

日负荷曲线的变化如图3所示。对自由充电模式仿真时的电动汽车相关参数与优化运行模式基本一致，两者的区别在于：在自由充电模式下，当电动汽车接入系统后，就以额定功率对其充电，直至充满结束；而优化运行模式则以运行目

表5 系统负荷水平指标的比较

(单位: MW)

模式	负荷值		峰谷差
	峰荷	谷荷	
原始负荷(P_{-ex})	1 137.6	718.8	418.8
自由充电模式	1 169.6	723.2	446.4
优化运行模式	1 071.2	886.8	184.4

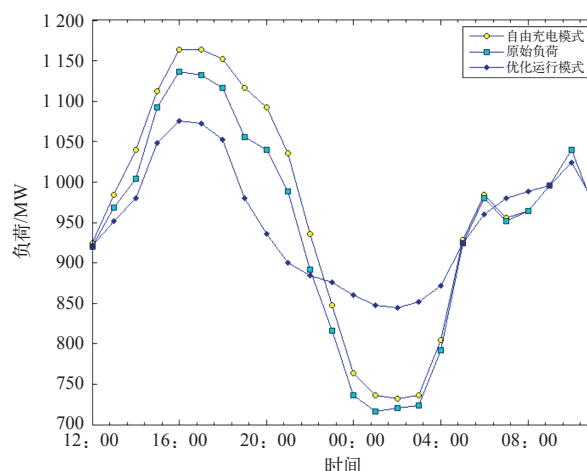


图3 自由充电模式与优化运行模式结果比较

标($\min F = f_1 + \alpha f_2 + \lambda f_3$)对各时段的充放电策略进行优化。

从表5和图3可知：自由充电模式导致系统峰谷差增大，电力系统资产管理的利用效率下降；而采用优化充放电模式时，不仅可以使峰荷明显下降，还可以提高系统的谷荷水平，削峰填谷，改善电力系统稳定运行效率。

4. 优化运行模式灵敏度分析

在时空双尺度电动汽车优化调度方案中，基层代理的决策者有权限决定其对系统总调度的参与程度，电动汽车用户也有充分的权限决定其对基层调度的参与程度。基层代理的调度偏差以罚函数的形式反映在系统优化目标函数中，电动汽车用户的响应偏差通过信用等级评估以激励函数的形式反映在系统优化目标函数中。

惩罚系数以促进各基层代理机构实际负荷/出力与上层系统调度计划一致性为目标，却以牺牲系统削峰填谷能力为代价。采用按指数规律动态变化的惩罚系数取值方案，在迭代初期全局搜索能力强，而在迭代后期基层各代理的调度偏差迅速下降，有利于保证系统上层调度计划的落实。

激励系数以促进各电动汽车用户充放电与基层代理调度计划一致性为目标,在信用评估周期结束后呈现基本稳定的状态。激励系数既能实现电动汽车用户信用等级动态评估,又能保证信用等级评估的平稳性。

结束语

大量电动汽车广泛应用后,其无序充电必然会给电力系统尤其是配电系统的安全可靠运行带来严重的挑战。而对电动汽车进行有序的充放电管理则有可能明显改善整个电力系统运行的经济性与安全性。

1) 将时间分段与空间分层分区相结合,电动汽车充放电需求日前申报与实际履约能力相结合,电动汽车充放电区域代理与总代理分层分区宏观调控相结合。在满足电动汽车行驶需求的前提下,综合考虑动力系统总负荷水平方差最小和电动汽车充放电成本最小,实现电动汽车充放电有序调度。

2) 将电动汽车车主充放电需求日前申报与实际履约能力相对比,构建电动汽车用户信用等级评估体系。信用等级与车主充放电电价相联系,有利于提高电动汽车车主履约能力,提高电动汽车充放电有序调度的执行力度。

3) 电动汽车车主充放电单位电价成本由两部分组成:系统总调度波峰波谷实时指导电价和电动汽车车主信用等级对应的优惠比例。

4) 将电动汽车的有序充放电调度纳入具有自适应和自组织性能的主动配电网架构体系,实现主动配电网物质、能量和信息等有机结合在一起的循环往复,还需要开展大量细致的研究工作。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 田立亭,张明霞,王免伶.电动汽车对电网影响的评估和解决方案[J].中国电机工程学报,2012,32(31):43-49.

[4] 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(4):1-10,25.

[5] 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(4):967-973.

[6] 杨玉青,苏粟,姜久春,等.改善配电网负荷特性的充电站有序充电优化策略[J].电力系统保护与控制,2014(7):60-66.

[7] 王晓寅,刘俊勇,唐现刚,等.基于空间负荷预测的电动汽车有序充电方法研究[J].浙江电力,2014(2):7-13,21.

[8] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等.换电模式下电动汽车电池充电负荷建模与有序充电研究[J].中国电机工程学报,2012(31):1-10,212.

[9] 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(21):114-119.

[10] 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):30-37.

[11] 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.

(收稿日期:2015-02-10) EA

中国知网 (CNKI) 数据库收录

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告