

换电站与电网协调的多目标双层实时充放电调度方法

曹一家¹, 刘易珠¹, 阙凌燕², 卢敏², 李勇¹, 黄小庆¹, 辛建波³

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007; 3. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330006)

摘要: 大规模电动汽车无序充电会对电网安全经济运行及换电站经济运营产生严重的负面影响。计及未入网电动汽车充换电预测, 考虑电力网络运行、大规模电动汽车用户充换电需求等约束, 建立了换电站与电网协调的多目标双层实时充放电调度模型, 其中上层模型以电网负荷波动最小和上下层调度偏差最小为目标, 由上层调度机构安排各换电站实时充放电计划; 下层以各充放电装置响应上层计划为目标, 同时满足用户充换电需求, 将大规模混合整数非线性规划问题转化为非线性多目标规划问题和大规模混合整数线性规划问题。采用基于 Zaslavskii 混沌映射的改进 NSGA-II 和 YALMIP/CPLEX 求解方式对上下层问题分别进行迭代求解滚动优化。以 IEEE 30 节点系统为例, 验证了所构建模型的正确性和有效性。

关键词: 电动汽车; 换电站; 换电站协调入网; 充放电滚动优化; Zaslavskii 映射; 多目标双层优化; 模型; 优化; 调度

中图分类号: TM 73; TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.001

0 引言

随着化石能源紧缺、自然环境恶化以及新能源的发展, 电动汽车受到政府、生产商及能源企业的日益关注。一方面, 电动汽车大规模无序充电将严重影响电网安全运行, 造成电压跌落、峰谷差增大及网损增加等问题^[1]; 而另一方面, 由于电动汽车时间上的可控性^[1-2], 对其合理调度控制将起到削峰填谷、减少网损及增加电网运行效益等积极作用。

目前电动汽车能源供给方式可分为充电模式和换电模式 2 种^[3]。换电模式采用电池租赁方式, 可显著降低用户的购车费用; 而对电池进行集中充电所采取的慢充方式, 又可避免快充引起的电池寿命缩短问题; 且换电模式下一般可在几分钟内完成换电过程, 即使与常规能源汽车相比, 其便捷性也毫不逊色。2011 年国家电网公司和南方电网公司先后提出了“换电为主, 充电为辅”的运营模式, 使换电模式具有广阔的应用前景。目前换电模式下电动汽车充电负荷模型及优化的研究还比较初步^[3], 因此研究换电站与电网协调运行调度意义重大。

文献[4]以换电站运营收益最大化为目标函数, 兼顾各类运营约束条件, 建立换电站最优充放电策略的线性优化模型, 但未考虑电池初始荷电状态(SOC)的差异性。文献[3]针对 2 种换电模式(即充换电模式和“集中充电、统一配送”模式)的结构与运营流程进行了分析, 建立了以总充电费用最小及日负荷波动

最小为目标的 2 阶段优化模型, 但未考虑电网潮流约束。文献[5]针对电动汽车充电站, 采用奔德斯分解方法, 将电力网络非线性问题与充电站充放电分解的混合整数问题解耦, 实现充电站与电网协调运行。文献[6]提出了计及电动汽车充电预测的实时充电优化模型, 并通过滚动优化求解得到入网汽车的实时充电功率, 但未考虑电网潮流约束。文献[7]建立了换电站多目标调度模型, 并采用自适应变异粒子群算法求解, 平稳了负荷波动, 但局限于集群调度。文献[8]针对充电模式, 以负荷波动最小为上层目标, 以响应上层计划为下层目标, 建立了双层优化模型, 但采用日前车主申报次日用车制度, 实行比较困难^[9], 因此有必要研究实时充放电调度。

在文献[8]的基础上, 本文做了进一步的工作: 将双层调度模式拓展应用于换电站充放电调度, 同时采用滚动优化调度机制, 计及未入网汽车充放电预测, 建立了换电站与电网协调的多目标双层实时充放电优化模型, 将电网调度计划分解安排到每台充放电装置上。与已有研究相比, 本文贡献如下:

a. 以上下双层为调度架构, 考虑电力网络约束的同时, 实现换电站整体充放电计划的分解;

b. 在换电站与电网协调的双层调度模型的基础上, 同时考虑未入网汽车预测信息, 建立滚动优化调度机制, 实现充放电实时优化控制;

c. 以双层调度架构为依托, 将较难求解的大规模混合整数非线性规划问题转化为非线性多目标规划问题和大规模混合整数线性规划 MILP (Mixed Integer Linear Programming) 问题, 并针对非线性多目标问题, 引入基于 Zaslavskii 映射的混沌优化方法, 提出基于 Pareto 的改进 NSGA-II 算法。

收稿日期: 2015-01-09

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAA01B01)

Project supported by the Scientific and Technical Supporting Programs of China(2013BAA01B01)

1 换电站与电网协调的充放电调度架构

1.1 双层调度模式

鉴于集中调度模式的“维数灾害”问题^[10], 本文结合换电站特点, 采用双层调度模式, 即首先由上层输电系统调度机构向下层配电网中各换电站发送出力计划, 下层各换电站在满足相关约束条件下对上层调度计划做出实时响应, 建立换电站与电网协调的双层调度架构, 实现电网调度与换电站调度的解耦, 如图 1 所示。

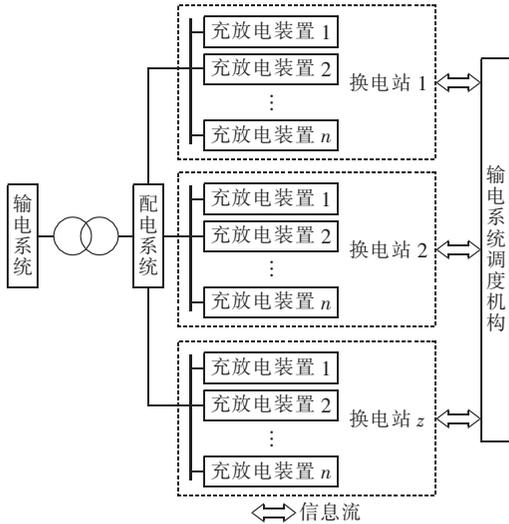


图 1 换电站与电网协调的双层调度架构

Fig.1 Architecture of bi-level dispatch with coordination of BSS and grid

1.2 滚动优化调度机制

目前电动汽车充放电优化调度的研究多采用如下 2 种调度机制, 第 1 种为日前车主向调度机构申报次日用车情况的机制, 如文献[8-10]; 第 2 种考虑当前入网汽车信息, 包括汽车接入时间及充电需求等, 通过优化设定当前时段充电功率, 如文献[11-12]。前者工程实际应用比较困难, 后者虽然可行, 但由于优化控制的已知信息仅包含当前时段小部分电动汽车信息, 优化效果并不理想^[12]。随着车网通信技术的发展^[13], 已有人根据充电行为历史数据和当前信息预测未来将入网汽车信息, 如文献[14]根据美国交通部对全美家用车辆的调查结果(NHTS), 建立非时齐半马尔科夫模型, 预测电动汽车在未来时段的充电时间和负荷需求。

基于此, 本文将基于充电模型预测的 N-RT 方法^[6], 拓展应用于换电模式下计及换电站电池放电的情形, 不考虑具体预测方法, 而仅将电动汽车充换电预测信息作为模型已知输入, 结合双层调度模式, 针对换电站与电网协调运行, 提出计及未入网汽车信息预测的双层实时充放电优化方法, 即综合当前入网及未来一段时间将入网的汽车信息, 滚动优化求

解得到当前时段充放电计划。

2 多目标双层实时充放电调度模型

2.1 上层电网调度模型

实际工程应用中, 很多情况下关注的是如何统一协调系统的经济性和安全性^[15]。换电站与电网协调运行的充放电调度中, 考虑到分时电价信息将有效反映原始负荷波动^[16], 则引入分时电价后, 意味着负荷波动越小, 则换电站运营收益越大, 因此本文暂不考虑换电站充放电收益目标。上层电网调度分别以电网总负荷波动最小和上下层调度偏差最小为目标, 以电力网络潮流等为约束, 得到下述多目标模型。

2.1.1 目标函数

(1) 电网总负荷波动最小。

$$\min_{P_{z,t}} F_1 = \frac{1}{T^{(i)} - 1} \sum_{t \in W^{(i)}} (P_{L,t} + \sum_{z \in Z} P_{z,t} - P_{av})^2 \quad (1)$$

$$P_{av} = \frac{1}{T^{(i)}} \sum_{t \in W^{(i)}} (P_{L,t} + \sum_{z \in Z} P_{z,t}) \quad (2)$$

其中, Z 为换电站集合; $W^{(i)}$ 为时刻 i 的各换电站优化时间窗口最小值, 即 $W^{(i)} = \min \{W_z^{(i)}, z \in Z\}$, $W_z^{(i)}$ 是时刻 i 换电站 z 的优化时间窗口, 即 $W_z^{(i)} = \{t | i \leq t \leq i + T_z^p, z \in Z\}$, T_z^p 是换电站 z 的换电预测的时段长度; $T^{(i)}$ 为优化时间窗口 $W^{(i)}$ 包含的时段数; $P_{L,t}$ 为 t 时段电网原始负荷; $P_{z,t}$ 为 t 时段换电站 z 的整体功率, 正功率表示从电网获取电能, 负功率表示向电网输送电能; P_{av} 为 $T^{(i)}$ 个时段内的系统平均负荷。

(2) 上下层调度计划偏差最小。

$$\min_{P_{z,t}} F_2 = \sum_{z \in Z} f(P_{z,t}) \quad (3)$$

其中, $t \in W^{(i)}$; $f(P_{z,t})$ 为下层换电站 z 实际调度结果与上层电网调度计划的偏差。

2.1.2 约束条件

(1) 多时段交流潮流约束。

$$\begin{cases} P_{Gm,t} = P_{Lm,t} + P_{Em,t} + U_{m,t} \sum_{n \in N_m} U_{n,t} (G_{mn} \cos \theta_{mn,t} + B_{mn} \sin \theta_{mn,t}) \\ Q_{Gm,t} = Q_{Lm,t} + U_{m,t} \sum_{n \in N_m} U_{n,t} (G_{mn} \sin \theta_{mn,t} - B_{mn} \cos \theta_{mn,t}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $t \in W^{(i)}$; $P_{Gm,t}$ 和 $Q_{Gm,t}$ 分别为发电机 m 在 t 时段注入的有功功率和无功功率; $P_{Lm,t}$ 和 $Q_{Lm,t}$ 分别为节点 m 在 t 时段注入的有功负荷和无功负荷; $P_{Em,t}$ 为接入节点 m 的换电站在 t 时段的调度计划; $U_{m,t}$ 为节点 m 在 t 时段的电压值; N_m 为系统节点集合; G_{mn} 和 B_{mn} 分别为节点导纳矩阵的实部和虚部; $\theta_{mn,t}$ 为支路 mn 在 t 时段的相角差。

(2) 节点电压约束。

$$U_{m,t}^{\min} \leq U_{m,t} \leq U_{m,t}^{\max} \quad (5)$$

其中, $t \in W^{(i)}$; $U_{m,t}^{\max}$ 和 $U_{m,t}^{\min}$ 分别为节点 m 的电压上、下限。

(3)线路传输功率约束。

$$|P_{l,t}| \leq P_l^{\max} \quad (6)$$

其中, $t \in W^{(i)}$; $P_{l,t}$ 为 t 时段线路 l 的传输功率; P_l^{\max} 为线路 l 允许的传输功率上限。

(4)发电机出力上、下限约束。

$$\begin{cases} P_{Gm,t}^{\min} \leq P_{Gm,t} \leq P_{Gm,t}^{\max} \\ Q_{Gm,t}^{\min} \leq Q_{Gm,t} \leq Q_{Gm,t}^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $t \in W^{(i)}$; $P_{Gm,t}^{\max}$ 和 $P_{Gm,t}^{\min}$ 分别为发电机 m 的有功出力上、下限; $Q_{Gm,t}^{\max}$ 和 $Q_{Gm,t}^{\min}$ 分别为发电机 m 的无功出力上、下限。

(5)换电站各时段的调度约束。

$$-\sum_{k \in H_z^{(i)}} P_{z,k,t}^{\text{NC}} I_{z,k,t} \alpha \leq P_{z,t} \leq \sum_{k \in H_z^{(i)}} P_{z,k,t}^{\text{NDC}} I_{z,k,t} \alpha \quad (8)$$

其中, $t \in W^{(i)}$; $H_z^{(i)} = \{k \in N_z | t_{z,k}^s \leq i\}$, 即为换电站 z 在优化时间窗口 $W_z^{(i)}$ 内的入网充放电装置集合, 包括当前时段入网充放电装置集合和剩余时段预测入网充放电装置集合, N_z 为换电站 z 充放电装置集合, $t_{z,k}^s$ 为换电站 z 第 k 台充放电装置上的电池开始接入时间; $P_{z,k,t}^{\text{NC}}$ 和 $P_{z,k,t}^{\text{NDC}}$ 分别为换电站 z 第 k 台充放电装置的额定充电功率和额定放电功率; $I_{z,k,t}$ 为 t 时段换电站 z 第 k 台充放电装置的连接状态, 其值为 1 代表接入, 其值为 0 代表未接入; α 为可用系数, 即集群实际可充放电电量上限将随集群充放电量的增加而减少^[17]。

2.2 下层换电站调度模型

下层换电站根据各自换电需求和备用容量等约束, 将上层总的充放电计划分解到各自管辖的每台充放电装置上, 使上下层调度计划偏差最小。

2.2.1 目标函数

$$\min f = \sum_{t \in W_z^{(i)}} \left(\sum_{k \in H_z^{(i)}} \bar{P}_{z,k,t} - P_{z,t} \right)^2 \quad (9)$$

其中, $t \in W_z^{(i)}$; $\bar{P}_{z,k,t}$ 为 t 时段换电站 z 第 k 台充放电装置的实际调度结果。

2.2.2 约束条件

(1)充放电状态约束。

$$X_{z,k,t} + Y_{z,k,t} \leq 1 \quad (10)$$

$$X_{z,k,t} = \begin{cases} 1 & t \in [t_{z,k}^s, t_{z,k}^e] \cap W_z^{(i)} \\ 0 & t \in W_z^{(i)} \setminus [t_{z,k}^s, t_{z,k}^e] \end{cases} \quad (11)$$

$$Y_{z,k,t} = \begin{cases} 1 & t \in [t_{z,k}^s, t_{z,k}^e] \cap W_z^{(i)} \\ 0 & t \in W_z^{(i)} \setminus [t_{z,k}^s, t_{z,k}^e] \end{cases} \quad (12)$$

其中, $k \in H_z^{(i)}$; $X_{z,k,t}$ 和 $Y_{z,k,t}$ 属于 0-1 变量; $[t_{z,k}^s, t_{z,k}^e]$ 为换电站 z 第 k 台充放电装置上的电池接入时间; $t \in W_z^{(i)} \setminus [t_{z,k}^s, t_{z,k}^e]$ 表示时段 t 属于时间窗口 $W_z^{(i)}$ 中除了 $[t_{z,k}^s, t_{z,k}^e]$ 以外的时段。

(2)充放电功率约束。

$$P_{z,k,t}^{\text{CH}} - P_{z,k,t}^{\text{DCH}} = \bar{P}_{z,k,t} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{z,k,t}^{\text{CH}} \leq P_{z,k,t}^{\text{NC}} X_{z,k,t} \\ P_{z,k,t}^{\text{DCH}} \leq P_{z,k,t}^{\text{NDC}} Y_{z,k,t} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $t \in W_z^{(i)}$; $k \in H_z^{(i)}$; $P_{z,k,t}^{\text{CH}}$ 为 t 时段换电站 z 第 k 台充放电装置的充电功率; $P_{z,k,t}^{\text{DCH}}$ 为 t 时段换电站 z 第 k

台充放电装置的放电功率。

(3)电池 SOC 约束。

$$\begin{cases} S_{z,k,t} = S_{z,k,t-1}^0 \\ S_{z,k,t} = S_{z,k,t-1} + \frac{\eta^{\text{CH}} P_{z,k,t}^{\text{CH}} \Delta t}{B_c} - \frac{P_{z,k,t}^{\text{DCH}} \Delta t}{\eta^{\text{DCH}} B_c} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $t \in W_z^{(i)}$; $k \in H_z^{(i)}$; $S_{z,k,t}^0$ 和 $S_{z,k,t}$ 分别为下层换电站 z 第 k 台充放电装置上的电池初始 SOC 和 t 时段起始时刻的 SOC; η^{CH} 和 η^{DCH} 分别为充电和放电效率; B_c 为电池容量。

(4)电池更换能力约束。

$$\begin{cases} A_{z,t} = N_{Bz} \\ A_{z,t} = A_{z,t-1} + C_{z,t-1} - D_{z,t-1} \end{cases} \quad (16)$$

$$C_{z,t} = \sum_{k \in H_z^{(i)}} \left(\left\lfloor \frac{S_{z,k,t}}{S_U} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{S_{z,k,t-1}}{S_U} \right\rfloor \right) \quad (17)$$

$$S_{z,k,t} \geq S_L \quad (18)$$

其中, $t \in W_z^{(i)}$; $k \in H_z^{(i)}$; t^s 为调度周期的初时段; N_{Bz} 为换电站 z 备用电池数量; $C_{z,t}$ 为 t 时段充满的电池数量; $D_{z,t}$ 为 t 时段换电站 z 换电需求; $A_{z,t}$ 为 t 时刻可用于更换的电池数量; S_U 和 S_L 分别为 SOC 上、下限; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整函数。

(5)换电需求约束。

$$(1+\beta)D_{z,t} \leq A_{z,t} \quad (19)$$

$$N_{Bz} \leq A_{z,t^e} \quad (20)$$

其中, $t \in W_z^{(i)}$; t^e 为调度周期的末时段; β 为可用换电电池数目裕度, 主要为保证预测误差下的换电需求, 同时考虑到需维持下个调度周期换电站的正常运营, 当前调度周期末时段可用换电电池数量应达到备用电池数量。

(6)充放电状态转换次数约束。

$$U_{z,k,t} = |X_{z,k,t} - X_{z,k,t-1}| \quad (21)$$

$$U_{z,k} = \sum_{t \in W_z^{(i)}} U_{z,k,t} \leq N_U - \sum_{t \in W_z^{(i)}} U_{z,k,t} \quad (22)$$

其中, $t \in W_z^{(i)}$; $U_{z,k,t}$ 为充放电转变状态变量; $U_{z,k}$ 为当前优化时间窗口内的充放电转变次数; N_U 为充放电转变次数限值; $\bar{W}_z^{(i)}$ 为当前调度周期内除优化时间窗口 $W_z^{(i)}$ 外的时段集合。式(21)可写为:

$$\begin{cases} U_{z,k,t} \geq X_{z,k,t} - X_{z,k,t-1} \\ U_{z,k,t} \geq X_{z,k,t-1} - X_{z,k,t} \end{cases} \quad (23)$$

3 求解方法及流程

3.1 求解方法

如果采用集中调度模式, 且同时考虑了电力网络运行、大规模用户充换电需求及换电站充放电计划分解等约束, 兼顾了电网、换电站与用户的多方利益, 则所建立的模型将属于大规模混合整数非线性规划问题, 缺乏有效快速的求解方法, 因此本文依托双层调度模式, 将大规模混合整数非线性规划问题分解为非线性多目标规划问题和大规模混合整数二次规

划 MIQP(Mixed Integer Quadratic Programming)问题,即分别对应本文提出的上下层问题,并通过下层目标函数等分线性化^[3],将 MIQP 问题进一步转化为 MILP 问题。

对上层非线性多目标规划问题采用对目标函数个数没有限制的、鲁棒性强的 NSGA-II 方法求解^[15,18],该方法直接反映了 Pareto 思想,避免了传统加权方法的盲目性,可供决策者各目标优化相对均衡的 Pareto 最优解。对于下层 MIQP 问题,虽然随机搜索类方法(包括粒子群算法、遗传算法以及进化算法等)可以有效处理非线性规划,常用于求解 MILP 问题,并且对中小规模问题能够获得较高质量的次优解,但该类方法对于大规模问题则可能引起维数困难^[19]。基于分支定界算法的混合整数规划高效商业软件 CPLEX 在一定程度上已具备解决大规模优化问题能力,并已在大规模电动汽车有序充放电控制领域有了广泛的应用^[3,8-9,11]。

由于传统 NSGA-II 主要贡献在于非支配排序和拥挤距离计算,其遗传算子仍与传统遗传算子相同,当可行域复杂时容易陷入局部最优^[20],本文采用改进的 NSGA-II 算法,即将 Zaslavskii 映射引入 NSGA-II,修改 SBX(Simulated Binary Crossover)交叉算子和 PM(Polynomial Mutation)变异算子,并借鉴文献^[21]种群混沌初始化和自适应调整搜索技术,利用混沌遍历性细化优化变量的搜索空间,并根据种群进化状态自适应调整搜索精度,以克服多目标遗传算法存在的收敛速度慢、易早熟等难题。鉴于传统 NSGA-II 已有较多文献介绍,这里只简介算法的改进部分。

混沌是一种有规律的动态非线性系统,具有非周期性、非收敛性、有界性、确定性、易于产生和存储、对初始值敏感、遍历性强等特征。传统 Logistic 混沌映射易集中到 $(0,0.2) \cup (0.8,1)$ 区间内。因此本文采用 Zaslavskii 混沌映射^[20],其形式如下:

$$\begin{cases} X_{n+1} = (X_n + v + aY_{n+1}) \bmod(1) \\ Y_{n+1} = \cos(2\pi X_n) + e^{-r} Y_n \end{cases} \quad (24)$$

其中, n 为循环次数。当 $v=400$ 、 $a=12.6695$ 、 $r=3$ 时, X 和 Y 就表现出很好的混沌特性^[20], X 映射范围是 $[0,1]$, Y 映射范围是 $[-1.15012,1.5012]$,本文利用正则化的混沌 Y 序列初始化种群并设定 SBX 中 β_j 值和 PM 中的 Δ_j 值^[20]。

本文采用模糊集理论确定最优折中解。每个 Pareto 解中各目标函数对应的满意度可用线性模糊隶属度函数来表示,定义如下:

$$\mu_{\zeta}^i = \begin{cases} 1 & F_{\zeta}^i \leq F_{\zeta}^{\min} \\ \frac{F_{\zeta}^{\max} - F_{\zeta}^i}{F_{\zeta}^{\max} - F_{\zeta}^{\min}} & F_{\zeta}^{\min} \leq F_{\zeta}^i \leq F_{\zeta}^{\max} \\ 0 & F_{\zeta}^{\max} \leq F_{\zeta}^i \end{cases} \quad (25)$$

其中, F_{ζ}^i 、 μ_{ζ}^i 分别为第 i 个 Pareto 解的第 ζ 个目标函数值及其隶属度。选择最大 μ^i 对应的解为最终解:

$$\mu^i = \frac{\sum_{\zeta \in P} \omega_{\zeta} \mu_{\zeta}^i}{\sum_{i \in I} \sum_{\zeta \in P} \omega_{\zeta} \mu_{\zeta}^i} \quad (26)$$

$$\omega_{\zeta} = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} (\mu_{\zeta}^i - \mu_{\zeta}^j)^2}{\sum_{\zeta \in P} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} (\mu_{\zeta}^i - \mu_{\zeta}^j)^2 \right]} \quad (27)$$

其中, I 为 Pareto 最优解集; P 为目标函数集合; ω_{ζ} 为第 ζ 个目标函数的权重,若所有 Pareto 解在目标下的隶属度差异越小,则说明该目标对最优解决策所起作用越小,反之亦然。因此,Pareto 最优解目标值偏差越大的目标函数(无论其本身的重要程度),赋予越大的权重是合理的^[15]。

YALMIP 建模工具^[22]提供了统一简单的建模语言,实现了建模和算法的分离。因此,本文采用改进 NSGA-II 与 PQ 分解法对上层问题进行求解,采用基于 MATLAB-YALMIP 建模平台的 CPLEX12.5 对下层问题进行求解。

3.2 求解流程

换电站与电网协调的多目标双层调度流程图如图 2 所示。

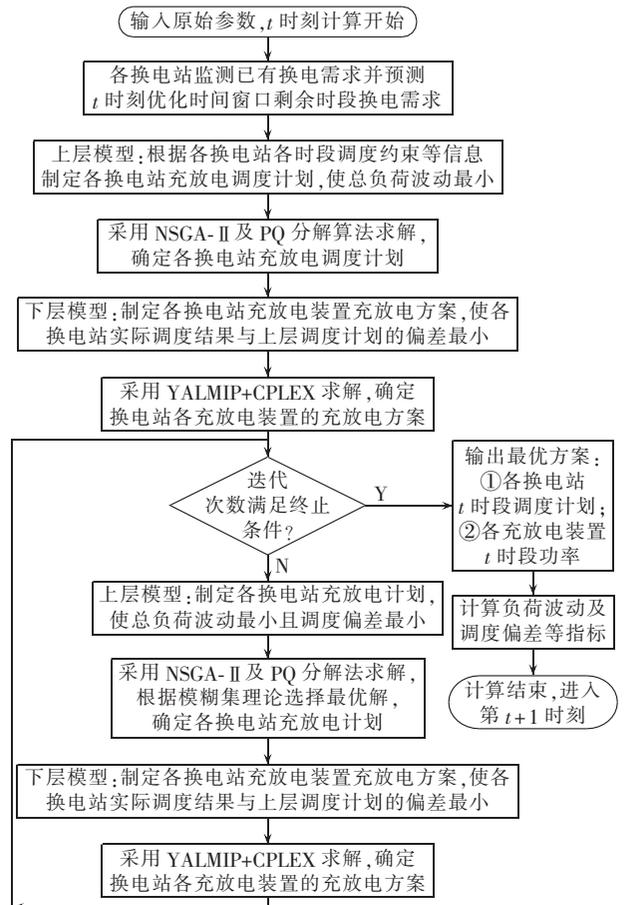


图 2 换电站与电网协调的多目标双层调度流程图
Fig.2 Flowchart of multi-objective bi-level dispatch
with coordination of BSS and grid

3.3 上层并行加速策略

上层模型即为传统最优潮流模型,优化过程中,约束条件的校验需要实时潮流数据,这使得上层问题成为数据密集型问题。本文借鉴文献[15]方法采用易于实现的主从并行结构,将复杂的计算任务分配给各子进程,以期缩短计算时间。主进程负责控制整个计算过程,包括网络拓扑信息读取,粒子非支配排序、拥挤距离计算、选择、交叉和变异等。从进程负责潮流计算,进而向主进程提供各粒子的目标函数值,工程实际应用时,还可采用 PC 集群并行计算方法,将大幅降低计算耗时,实现实时调度^[23]。

4 算例分析

本文采用含 5 个换电站的修改的 IEEE 30 节点测试系统分析验证所提模型及算法的有效性,换电站分别布置在节点 6、9、22、25 和 28 上;基本负荷采用典型夏季负荷曲线;发电机、负荷和支路相关数据见文献[8]。不失一般性,换电站充放电装置额定充放电功率为 7 kW,电池容量为 32 kW·h,电池 SOC 上、下限分别为 90% 和 10%,充放电效率为 90%。

假定该系统有 10^4 辆电动汽车,各换电站所辖电动汽车数量分别为 1000、2000、2500、2500 和 2000 辆;备用电池数量与换电需求之比(简称备需比)取 0.9,可用换电电池数量裕度为 0.2,并设定电池在一天内充放电转变次数不超过 4 次。假定充放电装置数量足够^[3]。基于 NHTS 数据,采用文献[24]对电动汽车行驶特性的统计拟合方法,设定换电开始时刻服从正态分布,日行驶里程服从对数正态分布,换电开始时刻初始 SOC 由百 km 耗电量和日行驶里程计算得到,具体方法及参数见文献[24]。 $t_{z,k}^s$ 预测误差在 ± 1 h, $S_{z,k}^0$ 预测误差在 $\pm 20\%$ 。

调度周期为中午 11:00 到次日 11:00,不失一般性,上层及下层各换电站 t 时刻优化时间窗口,即各调度开始时刻的预测时间长度统一设定为当前时刻到次日 11:00。调度时段以 1 h 为单位。传统和改进 NSGA-II 的交叉率及变异率均分别取 0.9 和 0.1;种群规模均为 50;最大迭代次数均为 100。

本文设置 4 种情形对模型有效性进行分析。情形 1:无序充电,即对到达车辆卸下的电池立即充电直至充满。情形 2:上层采用改进 NSGA-II 的理论优化调度(即无换电需求预测误差)。情形 3:上层采用改进 NSGA-II 的含预测误差的实际优化调度。情形 4:上层采用 NSGA-II 的含预测误差的实际优化调度。在给定双层迭代次数为 20 的条件下,4 种情形下日负荷曲线变化如图 3 所示。

由图 3 可知:无序充电情形下系统负荷高峰期换电站充电负荷也较大,而低谷时期充电负荷较

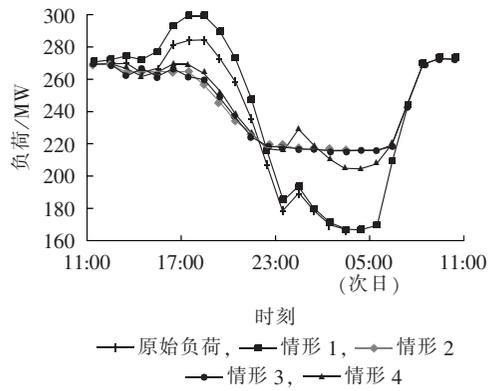


图 3 4 种情形下系统负荷曲线

Fig.3 System load curve for four cases

小,出现了峰上加峰情况,这将降低系统电压,增加机组备用容量,不利于系统安全经济运行。情形 2 和情形 3 下系统负荷在 11:00—21:00 之间有一定的偏差;而在 21:00 至次日 02:00 之间偏差很小;次日 02:00 至次日 11:00 之间无偏差,这是因为充放电早期大部分电动汽车未产生换电需求,相应信息由带误差的充电预测获得,若某时刻过高估计了未来的换电需求,电网将安排更少已入网电池在当前时段放电,故系统总放电功率比理论优化调度情形下略低;反之,系统总放电功率比理论优化调度情形下略高,而在后期由于大部分甚至全部电池已入网,换电需求预测误差带来的曲线波动很小。总体而言,含预测误差的调度结果很接近理论优化下的削峰填谷曲线。

情形 3 和情形 4 对比可发现:当上层采用改进 NSGA-II 算法优化时,换电站的充放电调度能达到较好的削峰填谷效果;而采用 NSGA-II 算法优化时,在负荷低谷时段(23:00 至次日 06:00 之间),充电负荷均匀地分布于整个原始负荷谷时段,导致尽管达到了一定的填谷效果,但优化调度后的局部负荷波动仍然较大,这是由于 NSGA-II 陷入了局部收敛,而改进 NSGA-II 由于引入混沌自适应调整搜索和混沌交叉变异机制,跳出了局部收敛。图 4 给出了上下层调度偏差及各时段可用于更换的电池数量。

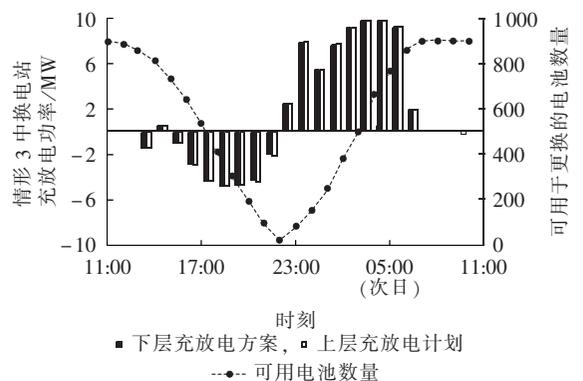


图 4 情形 3 中换电站 1 功率及可用电池数量

Fig.4 Power and available batteries of BSS 1 in case 3

由图 4 可知:换电站 1 各时段上下层调度计划偏差很小,这是因为换电站在 11:00—21:00 高峰时段之间的换电需求由备用电池满足,换电站仅在一定电池容量及充放电功率等技术约束下较好地与电网协调,实现负荷的削峰,而在 22:00 至次日 06:00 低谷时段之间,换电站为了满足次日备用电池运营要求,将最大限度地请求充电功率增加,实现较好的填谷。

以上可见,当换电站备用电池数量设定合理时,换电站将“近乎自然”地与电网调度计划配合,因此有必要进一步研究不同备用电池数量对换电站与电网协调的影响。表 1 给出了在不同备需比下各评价指标情况。

表 1 不同备需比下各评价指标的对比
Table 1 Comparison of evaluation indexes for different equipped-needed ratios

备需比	上下层调度偏差 F_1	电网总负荷波动 F_2
0.8	0.90	609.23
0.9	0.12	550.76
1.0	0.08	510.45
1.1	0.08	510.45

由表 1 可知:备需比越大,则上下层调度偏差和总负荷波动越小;当备用电池数量大于调度周期内换电需求数量时,备需比增大,各指标将不再更优(不考虑对备用电池放电),考虑到换电站电池成本,备需比不应过大;而为保证电动汽车用户能便捷更换电池且电网指标较优,备需比又不宜过小,因此备需比的确定需权衡换电站和电网双方利益。

5 结语

针对集中调度的高通信要求及“维数灾难”问题,本文构建了换电站双层调度架构,并充分利用换电需求预测信息,引入滚动优化机制,实现充放电实时优化,所发展的换电站与电网协调的多目标双层实时充放电调度模型,将大规模混合整数非线性规划问题解耦为非线性多目标规划和 MILP 问题,并分别采用基于 Zaslavskii 混沌映射的改进 NSGA-II 和 YALMIP/CPLEX 进行迭代求解,最后采用修改的 IEEE 30 节点测试系统验证了所提模型和算法的有效性。

如何利用电动汽车对含大规模分布式电源的电网进行调频辅助服务,特别是如何充分发挥电动汽车的快速响应能力以提高电网暂态稳定性等,是有待进一步研究的重要问题。

参考文献:

[1] PENG M, LIU L, JIANG C. A review on the economic dispatch and risk management of the large-scale plug-in electric vehicles (PHEVs)-penetrated power systems[J]. Renewable and Sustainable

Energy Reviews, 2012(16):1508-1515.

- [2] 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):1-10.
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):1-10.
- [3] 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, 32(31):1-10.
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on charging load modeling and coordinated charging of electric vehicles under battery swapping modes [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31):1-10.
- [4] 孙伟卿,王承民,曾平良,等. 基于线性优化的电动汽车换电站最优充放电策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1):1-7.
SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. An optimal charging discharging strategy for electric vehicle battery swapping stations based on linear optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1):1-7.
- [5] ALIREZA Z, SHAHRAM J, PIERLUIGI S. Multi-objective scheduling of electric vehicles in smart distribution[J]. Energy Conversion and Management, 2014(79):43-53.
- [6] LI Z, GUO Q, SUN H, et al. A new real-time smart-charging method considering expected electric vehicle fleet connections[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6):3114-3115.
- [7] 田文奇,和敬涵,姜久春,等. 基于自适应变异粒子群算法的电动汽车换电站充电调度多目标优化[J]. 电网技术, 2012, 36(11):25-29.
TIAN Wenqi, HE Jinghan, JIANG Jiuchun, et al. Multi-objective optimization of charging dispatching for electric vehicle battery swapping station based on adaptive mutation particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2012, 36(11):25-29.
- [8] 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.
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):30-37.
- [9] YAO W, ZHAO J, WEN F, et al. A hierarchical decomposition approach for coordinated dispatch of plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2768-2778.
- [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] HE Y, VENKATESH B, GUAN L. Optimal scheduling for charging and discharging of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1095-1105.
- [12] GAN L, TOPCU U, LOW S. Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2):940-951.
- [13] MARKEL T, KUSS M, DENHOLM P. Communication and control of electric drive vehicles supporting renewables[C]//Proceedings of 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Dearborn, MI, USA: IEEE, 2009:27-34.

- [14] ROLINK J, REHTAHZ C. Large-scale modeling of grid connected electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 894-902.
- [15] 叶承晋, 黄民翔. 考虑暂态稳定性的多目标最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 137-144.
YE Chengjin, HUANG Minxiang. Multi-objective optimal power flow considering transient stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 137-144.
- [16] 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 TOU price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [17] BESSA R J, MATOS M A. Global against divided optimization for the participation of an EV aggregator in the day-ahead electricity market: part II numerical analysis[J]. Electric Power System Research, 2013, 95: 319-329.
- [18] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [19] 杨林峰, 简金宝, 郑海艳, 等. 求解机组组合问题的次超立方混合整数规划广义割平面法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 99-108.
YANG Linfeng, JIAN Jinbao, ZHENG Haiyan, et al. A sub hyper-cube tight mixed integer programming extended cutting plane method for unit commitment[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 99-108.
- [20] DOS L, COELHO S, ALOTTO P. Multiobjective electromagnetic optimization based on a nondominated sorting genetic approach with a chaotic crossover operator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1078-1081.
- [21] 王瑞琪, 张承慧, 李珂. 基于改进混沌优化的多目标遗传算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(9): 1391-1397.
WANG Ruiqi, ZHANG Chenghui, LI Ke. Multi-objective genetic algorithm based on improved chaotic optimization[J]. Control and Decision, 2011, 26(9): 1391-1397.
- [22] LOFBERG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C]//2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design. Taipei, China: [s.n.], 2004: 284-289.
- [23] 李英, 江全元, 曹一家, 等. 基于并行协同粒子群优化算法和PC集群的无功优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 42-47.
LI Ying, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Optimal reactive power dispatch based on a parallel cooperative particle swarm optimization algorithm and PC-cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 42-47.
- [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:



曹一家

曹一家(1969—),男,湖南益阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统优化与控制、智能控制系统与决策(E-mail: yjcao@hnu.edu.cn);

刘易珠(1989—),男,湖南株洲人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充放电管理、电力系统最优潮流分析(E-mail: s12092021@hnu.edu.cn)。

Multi-objective bi-level real-time charging/discharging dispatch with coordination of BSS and grid

CAO Yijia¹, LIU Yizhu¹, QUE Lingyan², LU Min², LI Yong¹, HUANG Xiaoqing¹, XIN Jianbo³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Zhejiang Electric Power Company of State Grid Corporation of China, Hangzhou 310007, China;

3. Jiangxi Electric Power Research Institute of State Grid Corporation of China, Nanchang 330006, China)

Abstract: The disordered charging of numerous EVs (Electric Vehicles) may produce significant negative impacts on the secure and economic operation of both grid and BSS (Battery Swapping Station). A multi-objective bi-level optimization model of real-time charging/discharging dispatch with coordination of BSS and grid is established, which considers the prediction of incoming EVs, the battery swapping needs of customers and the operational constraints of grid and BSS. The upper-level model takes the minimum grid load variation and the minimum dispatch deviation between two levels as its objectives and lets the upper-level dispatch center determine the real-time charging/discharging schedule for every BSS, while the lower-level model takes the response of every charging/discharging device to the schedule of upper-level dispatch and the battery swapping needs of customers as its objectives and converts the large-scale mixed-integer nonlinear programming into a nonlinear multi-objective programming and a large-scale MILP (Mixed Integer Linear Programming). Improved NSGA-II based on Zaslavskii chaotic map and YALMIP/CPLEX are employed to solve two models respectively. The IEEE 30-bus system is employed to demonstrate the feasibility and efficiency of the proposed models.

Key words: electric vehicles; battery swapping stations; BSS to grid; charging and discharging receding horizon optimization; Zaslavskii chaotic map; multi-objective bi-level optimization; models; optimization; dispatch