

考虑电动汽车随机特性的机组组合问题研究

葛晓琳, 裴晨皓

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要:在考虑不同种类电动汽车随机行驶特性的基础上,建立电动汽车与系统互动的机组组合模型。该模型以各时段电动汽车的充放电功率以及机组出力作为决策变量,以火电机组总成本作为优化目标,在满足各类型电动汽车随机行驶特性的条件下,得出能够适应电动汽车接入的机组最优组合。为描述电动汽车行驶的随机特性,将电动汽车分为私家车、公交车、公务车以及出租车4种类型,利用大量场景模拟不同类型电动汽车的出行离开时间、接入时间以及日行驶里程,并引入电动汽车相关约束中。由于随机机组组合模型的复杂性与非线性,将其转化为线性混合整数规划模型,利用CPLEX进行求解。算例仿真结果验证了采用电动汽车入网(V2G)技术时考虑电动汽车随机特性以及对电动汽车进行分类研究的必要性。

关键词:机组组合;调度;电动汽车;随机特性

中图分类号:TM 761;U 469.72

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.012

0 引言

电动汽车EV(Electric Vehicle)在节能减排、遏制气候变暖以及保障石油供应方面有着无法比拟的优势,近年来得到了迅猛发展,产销量呈规模化增长^[1]。然而,电动汽车的行驶特性具有不确定因素,当大规模电动汽车接入电网后,若不加以引导与控制,将会使得电网原有负荷“峰上加峰”,造成峰谷差加大,对机组组合问题产生影响^[2]。为了减少电动汽车接入对电网的不利影响,充分利用电动汽车的储能特性,含电动汽车的机组组合问题得到了广泛关注。

文献[3]在机组组合模型的基础上,提出电动汽车最优充电模型,通过优化各调度时段的边际发电成本,合理分配电动汽车的充电时间段,但文中没有考虑电动汽车的反向放电能力。文献[4-5]则通过电动汽车入网V2G(Vehicle to Grid)技术将电动汽车充放电功率均作为优化变量引入机组组合模型中,在优化机组出力的同时优化电动汽车的充放电计划,以此作为电动汽车调度的优化方案。文献[6]分析了不同充电控制策略对机组组合优化结果的影响,并通过电动汽车放电增加系统的备用容量,提高电网运行可靠性。然而,上述文献只是对电动汽车进行简单的直接调度,即电网在任意时刻都能对电动汽车进行充放电控制。事实上电动汽车作为一种交通工具,其出行具有一定的随机性,因此充放

电时段会受到限制。

文献[7-8]基于电动汽车出行的随机性,研究了电动汽车作为充电负荷的特性。文献[9-10]在考虑电动汽车随机接入的基础上,提出智能充电策略。文献[11]在机组组合问题中考虑了电动汽车的出行随机性,将电动汽车的充电需求纳入约束条件,并分析了不同的充电策略对机组组合优化结果的影响。文献[12]将私家车的随机出行特性融入电网调度的建模中,通过优化电动汽车的充放电功率减少了系统成本。但上述文献普遍以单一类型车辆的出行特征为蓝本,事实上电动汽车的类型不同,其出行的特征也不同^[13-14],在机组组合问题中如何考虑多种类型电动汽车的随机特性仍需进一步研究。

为此,本文在研究多类型电动汽车随机特性的基础上,建立了含电动汽车的随机机组组合模型。该模型将电动汽车分为私家车、公交车、公务车以及出租车4类,先研究各类型电动汽车的出行特性,然后随机模拟大量场景作为电动汽车的行驶数据,将其并入电动汽车的出行约束中,以此研究电动汽车的随机特性,通过对电动汽车充放电功率和机组启停的总体优化,降低了系统运行成本。最后基于10机系统的仿真验证了考虑电动汽车随机特性的重要性以及对不同种类电动汽车进行分类建模的必要性。

1 车辆出行随机特性分析

车辆的出行随机特性主要指用户出行具有随机性,包括车辆的离开时间、车辆的接入时间以及车辆的日行驶里程,这些因素会影响车辆在实际中参与调度的情况。通过对各类型电动汽车行驶特性的研究,包括私家车、公交车、公务车以及出租车4类,分析处理可得这4类车行驶数据并用于计算。

a. 私家车用户行驶特性。

收稿日期:2018-01-10;修回日期:2018-06-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507100);“晨光计划”项目(14CG55);上海市青年科技英才扬帆计划(15YF1404600)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507100), the “Chen Guang” Project(14CG55) and Shanghai Sailing Program(15YF1404600)

对于私家车用户,可由 2009 年美国交通部对全美家用车辆的调查结果 NHTS (National Household Travel Survey) 的统计数据进行分析处理得出车辆初始离开时间、车辆初始接入时间以及车辆的日行驶里程的概率密度函数^[15]。其中车辆的接入时间与离开时间都满足正态分布,而车辆的日行驶里程满足对数正态分布。

b. 公交车用户行驶特性。

对于公交车,由于公交车的出行时间比较规律,一般在 06:00 开始出发工作,到 23:00 才返回。因此可认为公交车只在 23:00 至次日 06:00 之间进行充放电,车辆的日行驶里程满足对数正态分布^[12]。

c. 出租车的行驶特性。

出租车作为一种营业型车辆,应保证其运营的效率最大化,充完电马上进行载客。为保证其运营的效率,出租车只参与充电而不参与放电^[13]。而且,当出租车接入充电时马上使用快速充电,充电时间一般为 0.5~1 h,之后马上投入运营。车辆的开始充电时间满足均匀分布,日行驶里程满足对数正态分布。

d. 公务车的行驶特性。

公务车由于白天上班处于公务任务需要,因此在上班期间都处于行驶阶段,不参与充放电^[12]。到下班时间 18:00 至次日 08:00 才开始参与充放电,车辆的日行驶里程满足对数正态分布。

2 含电动汽车的随机机组组合模型

2.1 目标函数

含电动汽车的机组组合模型是在满足系统电力电量需求的前提下,按照节能、经济的原则对电动汽车的充放电进行合理的调度,使系统总成本最小,其目标函数如下:

$$\min F_1^{\text{cost}} = \sum_{c=1}^C \pi(c) \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [C_G(c,i,t) + C_U(i,t) + C_D(i,t)] \right\} \quad (1)$$

其中, F_1^{cost} 为总煤耗量; t 为计划时段编号, T 为计划时段总数; i 为火电机组编号, N 为火电机组总数; c 为电动汽车出行预测场景编号, C 为场景总数; $\pi(c)$ 为场景 c 对应的概率; $C_G(c,i,t)$ 为运行成本; $C_U(i,t)$ 为启动成本; $C_D(i,t)$ 为停机成本。

火电机组的运行成本为:

$$C_G(c,i,t) = u(i,t) [a_i + b_i P(c,i,t) + c_i P^2(c,i,t)] \quad (2)$$

其中, $u(i,t)$ 为机组 i 在时段 t 的运行状态变量, $u(i,t) = 0$ 表示机组 i 停机, $u(i,t) = 1$ 表示机组 i 运行; a_i 、 b_i 、 c_i 为发电机组 i 的成本系数; $P(c,i,t)$ 为场景 c 时段 t 下火电机组 i 的功率。

火电机组的启动成本为:

$$C_U(i,t) = \begin{cases} F_G^{\text{hot}}(i) u(i,t) [1 - u(i,t)] & 1 \leq t_{\text{off}}(i) \leq T_{\text{cold}}(i) \\ F_G^{\text{cold}}(i) u(i,t) [1 - u(i,t)] & t_{\text{off}}(i) > T_{\text{cold}}(i) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $F_G^{\text{hot}}(i)$ 为机组 i 的热启动能耗; $F_G^{\text{cold}}(i)$ 为机组 i 的冷启动能耗; $t_{\text{off}}(i)$ 为机组 i 的停机时间; $T_{\text{cold}}(i)$ 为机组 i 的冷启动时间。

火电机组的停机成本为:

$$C_D(i,t) = F_G^D(i,t) u(i,t-1) [1 - u(i,t)] \quad (4)$$

其中, $F_G^D(i,t)$ 为机组 i 在时段 t 的停机能耗。

2.2 约束条件

2.2.1 火电机组约束

对于火电机组,有以下约束条件。

a. 负荷平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N P(c,i,t) + \sum_{v=1}^V P_{\text{dis}}(c,v,t) = D(t) + \sum_{v=1}^V P_{\text{ch}}(c,v,t) \quad (5)$$

其中, V 为场景 c 下时段 t 所有电动汽车的类型 (分别为私家车、公交车、出租车与公务车); $P_{\text{ch}}(c,v,t)$ 为场景 c 下所有 v 类车在时段 t 的充电功率; $P_{\text{dis}}(c,v,t)$ 为场景 c 下所有 v 类车在时段 t 的放电功率; $D(t)$ 为时段 t 的系统负荷。

b. 系统备用需求。

上备用约束:

$$\sum_{i=1}^N \bar{P}(c,i,t) + \sum_{v=1}^V P_{\text{dis}}(c,v,t) \geq D(t) + \sum_{v=1}^V P_{\text{ch}}(c,v,t) + \bar{K}(t) \quad (6)$$

其中, $\bar{P}(c,i,t)$ 为场景 c 时段 t 下火电机组 i 的功率上限; $\bar{K}(t)$ 为时段 t 负荷的上备用需求。

下备用约束:

$$\sum_{i=1}^N \underline{P}(c,i,t) + \sum_{v=1}^V P_{\text{dis}}(c,v,t) \leq D(t) + \sum_{v=1}^V P_{\text{ch}}(c,v,t) - \underline{K}(t) \quad (7)$$

其中, $\underline{P}(c,i,t)$ 为场景 c 时段 t 下火电机组 i 的功率下限; $\underline{K}(t)$ 为时段 t 负荷的下备用需求。

c. 机组出力约束:

$$\underline{P}(c,i,t) u(i,t) \leq P(c,i,t) \leq \bar{P}(c,i,t) u(i,t) \quad (8)$$

d. 火电机组爬坡限制约束。

火电机组的爬坡约束分为机组的启动爬坡约束、机组的停机爬坡约束和机组在连续运行时段的爬坡约束。

机组的启停爬坡约束:

$$\bar{P}(c, i, t) \leq S_U(i) [u(i, t) - u(i, t-1)] + \bar{P}(i) [1 - u(i, t)] \quad (9)$$

$$\bar{P}(c, i, t) \leq \bar{P}(i) u(i, t+1) + S_D(i) [u(i, t) - u(i, t+1)] \quad (10)$$

$$\bar{P}(c, i, t-1) - P(c, i, t) \leq S_D(i) \{u(i, t-1) - u(i, t) + \bar{P}(i) [1 - u(i, t-1)]\} \quad (11)$$

其中, $S_U(i)$ 为机组 i 启动爬坡限制; $S_D(i)$ 为机组 i 停机爬坡限制。

机组连续运行爬坡约束:

$$P(c, i, t-1) - P(c, i, t) \leq R_U(i) u(i, t-1) \quad (12)$$

$$P(c, i, t) - P(c, i, t-1) \leq R_D(i) u(i, t) \quad (13)$$

$$P(c, i, t) \leq \bar{P}(c, i, t) \leq P(c, i, t-1) + R_U(i) u(i, t-1) \quad (14)$$

其中, $R_U(i)$ 为机组 i 上爬坡约束; $R_D(i)$ 为机组 i 下爬坡约束。

e. 火电机组最小启停约束:

$$[u(i, t-1) - u(i, t)] [M(i, t-1) - T_U(i)] \geq 0 \quad (15)$$

$$[u(i, t) - u(i, t-1)] [-M(i, t-1) - T_D(i)] \geq 0 \quad (16)$$

其中, $T_U(i)$ 为机组 i 最小连续停机时间; $T_D(i)$ 为机组 i 最小连续启动时间; $M(i, t)$ 为机组 i 在时段 t 已连续运行(正值)或连续停机(负值)的时间。

2.2.2 电动汽车相关约束

电动汽车作为交通工具,具有特殊的出行规律,这些出行规律具有的随机特性致使电动汽车的充放电调度具有随机性。在这些出行规律中,行驶起始时间以及行驶结束时间决定了可行的充放电区间,日行驶里程决定了用户的电量需求,电动汽车应该在满足这些条件下进行调度安排。

a. 出行时段约束。

当 $t_{in} \leq t_{out}$ 时,电动汽车只在 $[t_{in}, t_{out}]$ 区间进行充放电:

$$\begin{cases} t_{in}(c, v) \leq t < t_{out}(c, v), X(c, v, t) + Y(c, v, t) \leq 1 \\ t < t_{in}(c, v) \cup t \geq t_{out}(c, v), X(c, v, t) + Y(c, v, t) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

其中, $t_{in}(c, v)$ 为场景 c 下 v 类车单辆车的入网时段; $t_{out}(c, v)$ 为场景 c 下 v 类车单辆车离网时段; $X(c, v, t)$ 为场景 c 下 v 类车单辆车在时段 t 的充电状态, $X(c, v, t) = 0$ 表示车辆处于不充电状态, $X(c, v, t) = 1$ 表示车辆处于充电状态; $Y(c, v, t)$ 为场景 c 下 v 类车单辆车在时段 t 的放电状态, $Y(c, v, t) = 0$ 表示车辆处于不放电状态, $Y(c, v, t) = 1$ 表示车辆处于放电状态。

当 $t_{out} \leq t_{in}$, 电动汽车只在 $[1, t_{in}] \cup [t_{out}, 24]$ 区间进行充放电:

$$\begin{cases} t_{out}(c, v) \leq t < t_{in}(c, v), X(c, v, t) + Y(c, v, t) = 0 \\ t < t_{out}(c, v) \cup t \geq t_{in}(c, v), X(c, v, t) + Y(c, v, t) \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

b. 电动汽车充放电功率:

$$P_{ch}(c, v, t) = N_{ev}(c, v) P_{Vch}(c, v, t) \quad (19)$$

$$P_{dis}(c, v, t) = N_{ev}(c, v) P_{Vdis}(c, v, t) \quad (20)$$

其中, $N_{ev}(c, v)$ 为场景 c 下并入电网的 v 类车车辆总数; $P_{Vch}(c, v, t)$ 为场景 c 下 v 类车在时段 t 每辆车的充电功率; $P_{Vdis}(c, v, t)$ 为场景 c 下 v 类车在时段 t 每辆车的放电功率。由于各电动汽车的充放电行为缺乏同步性,为了规模化电动汽车用户充放电行为,用 $P_{ch}(c, v, t)$ 和 $P_{dis}(c, v, t)$ 表示规模化电动汽车的充放电功率,其行驶起始时间、行驶结束时间以及日行驶里程都对应着相应的单辆电动车的行驶特征,是随机变量。

c. 电量平衡约束。

当电动汽车开始接入电网时,即 $t = t_{in}(c, v)$ 时,有:

$$SOC(c, v, t) = SOC_0(c, v, t) \quad (21)$$

$$SOC_0(c, v, t) = SOC_E(c, v) - \frac{d(c, v) M(v)}{100Q(v)} \quad (22)$$

其中, $SOC(c, v, t)$ 为场景 c 下 v 类车单辆车在时段 t 的电池荷电状态; $SOC_0(c, v, t)$ 为场景 c 下 v 类车单辆车在 $t = t_{in}(c, v)$ 时段初始电池荷电状态; $SOC_E(c, v)$ 为场景 c 下 v 类车单辆车用户在离网时的电池荷电状态期望值; $d(c, v)$ 为场景 c 下 v 类车单辆车用户的日行驶里程; $M(v)$ 为 v 类车的百千米耗电量; $Q(v)$ 为 v 类车单辆车的最大电池容量。

当电动汽车在与电网连接时间段时,满足电动汽车的电量平衡:

$$Q(v) SOC(c, v, t) = Q(v) SOC(c, v, t-1) + \mu_{EV}^c P_{Vch}(c, v, t) \Delta t - \frac{1}{\mu_{EV}^d} P_{Vdis}(c, v, t) \Delta t \quad (23)$$

其中, μ_{EV}^c 为单辆车的充电效率; Δt 为充放电时间间隔; μ_{EV}^d 为单辆车的放电效率。

当电动汽车离开电网,即 $t = t_{out}(c, v)$ 时,车辆的电池状态必须满足用户的电池荷电状态期望值,因此有:

$$SOC(c, v, t) \geq SOC_E(c, v) \quad (24)$$

d. 电动汽车的充放电功率限制:

$$0 \leq P_{Vch}(c, v, t) \leq \bar{P}_{Vch}(v) X(c, v, t) \quad (25)$$

$$0 \leq P_{Vdis}(c, v, t) \leq \bar{P}_{Vdis}(v) Y(c, v, t) \quad (26)$$

其中, $\bar{P}_{Vch}(v)$ 为 v 类车的充电功率上限; $\bar{P}_{Vdis}(v)$ 为 v 类车的放电功率上限。

e. 电动汽车电池电量状态限制。

电动汽车要在保证不损耗电池正常寿命情况下进行充放电:

$$\underline{\text{SOC}} \leq \text{SOC}(c, v, t) \leq \overline{\text{SOC}} \quad (27)$$

其中, $\underline{\text{SOC}}$ 为车辆的电池荷电状态下限值; $\overline{\text{SOC}}$ 为车辆的电池荷电状态上限值。

f. 电池充电限制。

车辆的充电量应保证不超过电池当前的可充电范围:

$$\mu_{\text{EV}}^c P_{\text{Vch}}(c, v, t) \Delta t \leq [\overline{\text{SOC}} - \text{SOC}(c, v, t-1)] Q(v) \quad (28)$$

g. 电池放电限制。

车辆的放电量应保证不超过电池当前的可放电范围:

$$\frac{1}{\mu_{\text{EV}}^d} P_{\text{Vdis}}(c, v, t) \Delta t \leq [\text{SOC}(c, v, t-1) - \underline{\text{SOC}}] Q(v) \quad (29)$$

h. 电池可放电深度约束。

为了使电池损耗最小, 当车辆处于放电状态时, 需要对车辆的电池可放电深度进行约束:

$$D_{\text{od}}(c, v, t) = \text{SOC}(c, v, t) - \text{SOC}(c, v, t-1) \quad (30)$$

$$D_{\text{od}}(c, v, t) \leq \overline{D}_{\text{od}} \quad (31)$$

其中, $D_{\text{od}}(c, v, t)$ 为电池的放电深度; $\overline{D}_{\text{od}}$ 为电池放电深度的最大值。

2.3 含电动汽车的随机机组组合模型求解

为了研究电动汽车随机特性, 需要充分反映各类型电动汽车的出行特征。本文通过分析各类型电动汽车的出行数据得出各类型电动汽车的出行时间以及日行驶里程的概率密度函数。在此基础上, 运用拉丁超立方抽样, 通过对抽样概率分布进行分层, 再从各间隔或各层次随机抽样^[16], 得到大量场景来模拟各类电动汽车接入时段 t_{in} 、车辆离开时段 t_{out} 以及车辆日行驶里程 d 。同时为了平衡求解精度和难度, 基于同步回代技术的场景减缩法^[17], 消除部分出现概率较小的场景并将概率合并到相近的场景, 形成缩减的预测场景, 作为机组组合的场景输入。

此外, 针对所建立的考虑电动汽车随机特性的机组组合模型, 考虑到该模型属于多变量、多时段、非线性的动态最优化问题, 采用文献[18]中的线性化方法将随机机组组合中的非线性约束转换为混合整数线性规划 MILP (Mixed Integer Linear Programming) 模型进行求解。最后将转换后的模型在 GAMS 平台上仿真实现, 并采用商用的 CPLEX 软件包进行求解。

具体的流程图如图 1 所示。

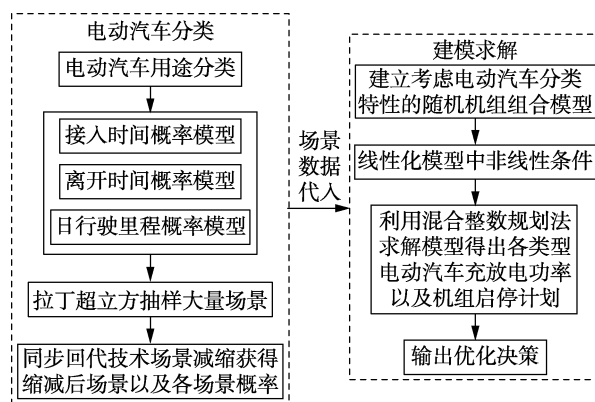


图 1 模型求解的基本流程图

Fig.1 Basic flowchart for solving model

3 算例分析

3.1 算例数据

为验证上述所提模型和方法的正确性和有效性, 本文结合 10 台火电机组以及区域内的各类电动汽车集群的具体算例进行测算分析。系统以及火电机组的数据来自于 10 机组测试系统, 参数详见文献[19]。各类电动汽车的参数以及行驶参数及城市区域内各类电动汽车的数量设置详见附录中表 A1—A3。电动汽车的荷电状态上下限 $\underline{\text{SOC}}$ 、 $\overline{\text{SOC}}$ 分别取 1、0.2, 充放电效率 μ_{EV}^c 、 μ_{EV}^d 取 0.95, 充放电的时间间隔 Δt 取值为 1 h, 可放电深度最大值 $\overline{D}_{\text{od}}$ 设置为 36.2%^[20]。

利用场景减缩法对各类电动汽车的出行行为进行合理分析, 并在运用相应的抽样方法抽取 10 000 个样本的基础上, 利用同步回代技术进行缩减运算, 缩减后样本个数为 100。与原始的 10 000 个场景的优化结果进行对比, 如表 1 所示, 从表中可以看出缩减后与原始场景的误差相差很小, 优化结果误差在 1% 以内, 且运算时间大幅缩短。因此, 接下来将采用缩减为 100 个场景时的数据进行计算。

表 1 缩减前后结果对比

Table 1 Result comparison between before and after reduction

场景数量	耗时	总成本/\$	误差/%
100	1 min 15 s	564 841.68	0.7
10 000	5 h 2 min 34 s	569 376.43	—

3.2 电动汽车随机特性的研究

考虑电动汽车的随机特性即需要考虑电动汽车的随机出行特性。以私家车为例, 图 2 显示私家车日行驶里程的概率分布图, 车辆的日行驶里程决定了车辆开始充电时的荷电状态。图 3 显示车辆的离开时间与车辆的接入时间的概率分布, 电动汽车的可调度时间范围会遵循其出行规律, 而不是 24 h 完全控制车辆的充放电行为。图 4 显示当车辆考虑随机特性与不考虑随机特性时各时段的充电功率对

比。当考虑电动汽车随机特性时,车辆的出行时间以及充电需求都满足一定的随机性,电动汽车的可充电时间区间会在满足车辆的随机特性下安排;而不考虑车辆的随机特性时,电动汽车的充电安排集中为机组组合服务,车辆只需安排在一天内的几个时段完成充电,使得机组组合最优即可。因此,考虑电动汽车的行驶特性时,充电的功率分布在各个时段都有出现,不考虑车辆的随机特性时,电动汽车集中在一天内的几个时段进行充放电安排,两者会产生较大区别。以上分析表明,在对电动汽车进行充电安排时,需要考虑电动汽车的随机特性,否则得到的优化策略会与实际应用产生一定的差异。

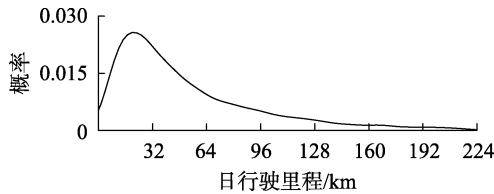


图2 电动汽车日行驶里程数概率分布

Fig.2 Probability distribution of travelled mileage of EV

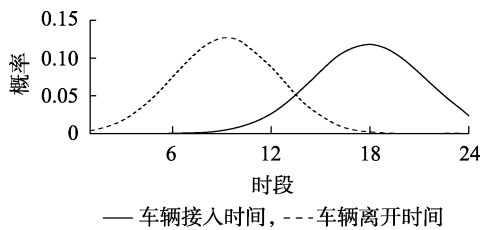


图3 电动汽车离开时间与接入时间概率分布

Fig.3 Probability distribution of departure time and access time of EV

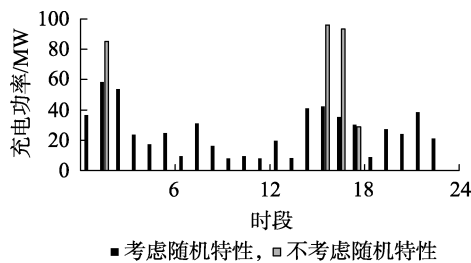


图4 考虑随机特性与不考虑随机特性时的充电功率

Fig.4 Charging power with and without stochastic characteristic

3.3 V2G 对电网调度的影响

为了研究 V2G 对电网调度的影响,对以下 3 种调度模式进行对比分析。

模式 1:对电动汽车进行无序充电方式,即电动汽车接入后立即进行充电直至满足充电需求,不考虑电动汽车的反向放电。

模式 2:对电动汽车进行协调充电方式,即控制电动汽车的充电时间,优化系统负荷的同时满足充电需求,不考虑电动汽车的反向放电。

模式 3:电动汽车采取 V2G 技术进行优化调度,即电动汽车接入电网后根据电网需求进行充电和放电的优化调度。

图 5 给出 3 种模式下各时段的系统负荷值以及无电动汽车时系统原负荷,表 2—4 给出了 3 种模式下机组的启停情况。由于 11、12 机组出力比较大,占全部机组的 50%左右,所有时段都处于开机状态,因

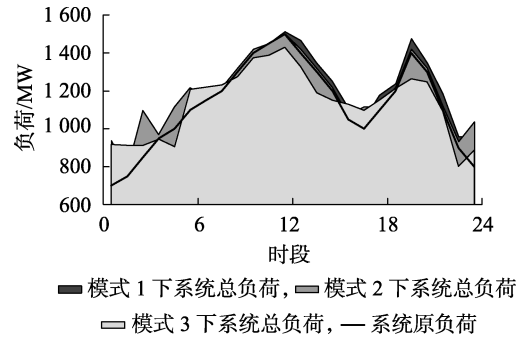


图5 3种模式下的系统负荷对比

Fig.5 System load comparison among three modes

表2 模式1 机组启停情况

Table 2 Unit start/stop situation under Mode 1

机组编号	机组启停情况
13	0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
14	0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
15	0 0 1
16	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
17	0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0
18	1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
19	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
110	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0

注:表中“1”表示机组处于开机状态,“0”表示机组处于停机状态,对应 24 个时段,后同。

表3 模式2 机组启停情况

Table 3 Unit start/stop situation under Mode 2

机组编号	机组启停情况
13	0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1
14	0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
15	0 0 1 0 0
16	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 0 0
17	0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 0 0 0
18	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
19	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0
110	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

表4 模式3 机组启停情况

Table 4 Unit start/stop situation under Mode 3

机组编号	机组启停情况
13	0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0
14	0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
15	0 0 1 0 0
16	0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0
17	0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0
18	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
19	0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
110	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

此在表中不作说明。I8—I10 小机组开机时间较少,在负荷较小阶段不用开机,为降低成本,只在负荷高峰期用以调峰作用。

从表2—4可看出,模式1下的I8、I10机组开机时段要比模式2、模式3多;模式2下的I9机组比模式3的I9机组多出2个开机时段。对比模式1的无序充电,模式2实行协调充电后合理安排了电动汽车的充电时间,避免了电动汽车在负荷高峰期充电,在负荷低谷进行充电起到一定的填谷作用。模式3在实行V2G技术后,比模式2协调充电方案的负荷曲线更加平缓,电动汽车不仅能在负荷低谷时进行充电,而且在系统负荷高峰期进行放电,减少系统的负荷压力,调整各时段机组的出力,减少昂贵机组的开机时间,能有效减少机组成本,同时也具有环保效益。最终,模式1下的系统总成本为\$591 905.71,模式2下的系统总成本为\$571 467.38,模式3下的系统总成本为\$564 841.682。由此可见,采用V2G能够有效地降低成本。

3.4 电动汽车分类的研究

为了验证对电动汽车分类能使调度决策更加合理,采用以下5种方案进行分析对比。

方案1:所有车型的行驶特性均考虑为私家车。

方案2:所有车型的行驶特性均考虑为公交车。

方案3:所有车型的行驶特性均考虑为公务车。

方案4:所有车型的行驶特性均考虑为出租车。

方案5:考虑多类型电动汽车的行驶特性,即本文采用的模型。

方案1—5机组启停情况及总成本的对比分析详见附录。图6显示考虑多类型电动汽车时各类型电动汽车的充放电功率。图7显示方案1—5所得的充放电功率。从图7可看出,当所有电动汽车的出行特性均考虑为同一类车型时,充放电功率遵循该类电动汽车的出行规律,但不能表示其他类型车辆的出行规律。方案1显示车辆在时段24(23:00—24:00)进行充电,但方案5在23:00时由于大量的公交车接入,充放电优化安排大规模公交车进行放电,因此整体呈放电功率;另外,出租车以运营为主要目的,只进行充电行为不进行放电行为,导致方案1每小时的充放电功率与方案5的充放电功率存在差异;由于方案2、方案3分别只在23:00至次日06:00与18:00至次日08:00进行调度,因此充放电功率值出现在所约束时间段内,这与方案5中考虑多类电动汽车参与调度时的充放电功率有很大差别;方案4中出租车接入电网后立即进行固定功率快速充电,且只进行1 h,不进行放电行为,因此也与方案5的充放电功率有很大差异。对电动汽车进行分类调度后,所得出的充放电功率综合了各类型电动汽车的出行规律,更符合实际情况。因此,

在机组组合问题中,需要对电动汽车进行分类建模。

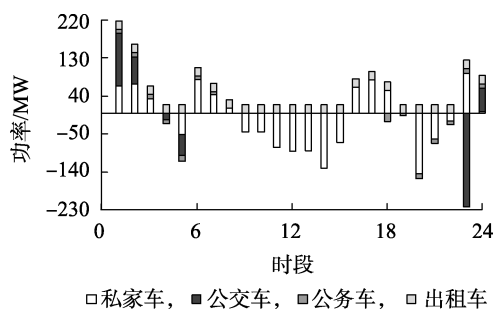


图6 各类型电动汽车充放电功率分布

Fig.6 Charging and discharging power distribution of various types of EV

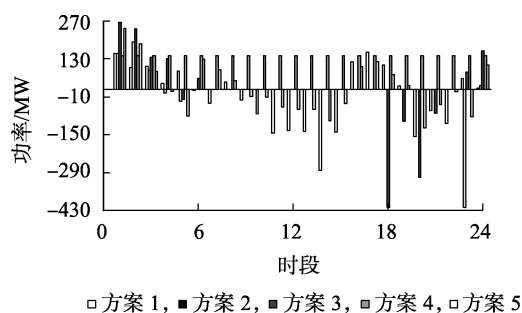


图7 5种方案下电动汽车的充放电功率对比

Fig.7 Charging and discharging power comparison of EV under five cases

4 结论

本文分析了各类型电动汽车的随机特性,建立了考虑各类型电动汽车随机特性的机组组合模型,该模型以火电机组总成本最低为目标函数,电动汽车的随机特性通过模拟大量场景生成,并代入电动汽车相关约束中,在10机组系统仿真下得到优化结果,并得出如下结论:

a. 在对电动汽车进行合理调度时,需要考虑电动汽车的随机特性,调度人员应该在满足电动汽车随机出行规律情况下进行合理的充放电安排;

b. 运用V2G技术,能够起到削峰填谷的作用,使得机组的出力调整更加灵活,从而实现系统总成本最优;

c. 不同类型的电动汽车具有不同的出行特性,进行机组组合优化时需要考虑车辆的类型以及各类型车辆的出行特性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.
- DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.
- [3] 张新松, 顾菊平, 袁越, 等. 电动汽车最优充电模型及其近似求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3148-3155.
- ZHANG Xinsong, GU Juping, YUAN Yue, et al. Optimum electric vehicle charging model and its approximate solving technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3148-3155.
- [4] SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Hierarchical charge control of large populations of EVs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(2): 1147-1155.
- [5] 朱永胜, 王杰, 瞿博阳, 等. 含电动汽车的电力系统动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 16-23.
- ZHU Yongsheng, WANG Jie, QU Boyang, et al. Dynamic environmental and economic dispatch of power system with EVs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 16-23.
- [6] 陆凌蓉, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及可入网电动汽车的电力系统机组最优组合[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 16-20.
- LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Unit commitment in power systems with plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 16-20.
- [7] 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.
- [8] 苗轶群, 江全元, 曹一家. 考虑电动汽车随机接入的微网优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 1-7.
- MIAO Yiqun, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 1-7.
- [9] 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.
- [10] 许少伦, 严正, 冯冬涵, 等. 基于多智能体的电动汽车充电协同控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 7-13, 21.
- XU Shaolun, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Cooperative charging control strategy of electric vehicles based on multi-agent[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 7-13, 21.
- [11] 吴可, 汪春, 孙海顺, 等. 含大规模电动汽车的电力系统机组组合问题研究[J]. 电力建设, 2014, 35(12): 26-31.
- WU Ke, WANG Chun, SUN Haishun, et al. Unit commitment in power systems considering large-scale electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 26-31.
- [12] 童素芬. 电动汽车有序充放电调度策略的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- TONG Sufen. Research on coordinated charging and discharging strategies of electric vehicles[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 陈海燕, 张美霞, 吴翠玉, 等. 电动汽车有序充放电策略研究[J]. 资源节约与环保, 2014, 34(2): 1-7.
- CHEN Haiyan, ZHANG Meixia, WU Cuiyu, et al. Study on the orderly charging and discharging strategy of electric vehicles[J]. Resources Economization & Environment Protection, 2014, 34(2): 1-7.
- [16] 康重庆, 夏清, 徐玮. 电力系统不确定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 23-24.
- [17] LI T, SHAHIDEHPOUR M, LI Z. Risk-constrained bidding strategy with stochastic unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 449-458.
- [18] CARRIÓN M, ARROYO J M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
- [19] SWARUP K S, YAMASHIRO S. Unit commitment solution methodology using genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1): 87-91.
- [20] 刘利兵, 刘天琪, 张涛, 等. 计及电池动态损耗的电动汽车有序充放电策略优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 83-90.
- LIU Libing, LIU Tianqi, ZHANG Tao, et al. Orderly charging and discharging strategy optimization for electric vehicles considering dynamic battery-wear model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 83-90.

作者简介:



葛晓琳

葛晓琳(1988—),女,安徽亳州人,副教授,博士,主要研究方向为电力经济调度、电动汽车调度等(E-mail: gexiaolin2005@126.com);

裴晨皓(1992—),男,广东广州人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车调度(E-mail: 358488476@qq.com)。

Study on unit commitment problem considering stochastic characteristics of electric vehicles

GE Xiaolin, PEI Chenhao

(College of Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: A unit commitment model of interaction between electric vehicles and power system is built considering the stochastic driving characteristics of different kinds of electric vehicles. Based on the proposed model, taking the charging and discharging power of electric vehicles and unit output at each period as decisive variables, and taking the total cost of thermal power units as the optimization goal, the optimal unit commitment that adapts to the access of electric vehicles is obtained under the condition of meeting the stochastic driving characteristics of all kinds of electric vehicles. In order to describe the stochastic characteristics of electric vehicles, the electric vehicles are divided into four types, i.e. private cars, buses, service cars and taxis. A large number of scenarios are used to simulate the departure time, access time and daily travelled distance of electric vehicles, which are introduced to the relative constraints of electric vehicles. Because of the complexity and nonlinearity, the unit commitment model is converted into a mixed integer linear programming model and solved by CPLEX. Case simulative results verify that it is necessary to consider the stochastic characteristics and the classified study of electric vehicles when applying V2G (Vehicle to Grid) technology.

Key words: unit commitment; dispatching; electric vehicles; stochastic characteristics

(上接第 69 页 continued from page 69)

Integrated economic dispatching for charging service considering routing choice and energy supply of mobile charging vehicle

LIU Hong¹, QI Boshuo¹, HAN Zhentao², GE Shaoyun¹, ZHANG Qiang¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Company, Shenyang 110013, China)

Abstract: Considering the fact that currently there is few scientific dispatching models and tools to guide the routing choice and energy supply of vehicles in mobile charging service operation, a two-process integrated economic dispatching model of mobile charging service is proposed. The operation modes of mobile charging service are analyzed. Considering the time variability of the road network and the reusability of mobile charging vehicles, a vehicle routing choice model with the minimum logistics cost as the objective and the time window etc. as the constraint is proposed. Considering the discrete SOC (State Of Charging) of batteries, a coordinated charging integer programming model with the minimum charging cost as the objective and the charger number as the constraint is proposed. Taking the mobile charging vehicles as the coupled carrier of the two processes, an integrated economic dispatching model for mobile charging service is constructed, and solved by the genetic algorithm nested lpsolve toolbox. The feasibility and effectiveness of the proposed model and algorithm are verified by the case study.

Key words: electric vehicles; mobile charging service; economic dispatching; vehicle routing; coordinated charging; integer programming; integrated dispatching

附录

表 A1 各类电动汽车参数设置
Table A1 Parameters setting for various types of EV

车辆 类型	参考 车型	电池 容量/kW	最大充 电功率/kW	最大放 电功率/kW	百公里 耗电量/kW	充电 模式
私家车	日产 leaf	24	4.8	12	12	常规
公交车	比亚迪 K9	324	80	162	85	常规
公务车	比亚迪 E6	60	12	30	19.5	常规
出租车	比亚迪 E6	60	—	—	19.5	快充

表 A2 各类电动汽车出行参数设置
Table A2 Driving parameters setting for various types of EV

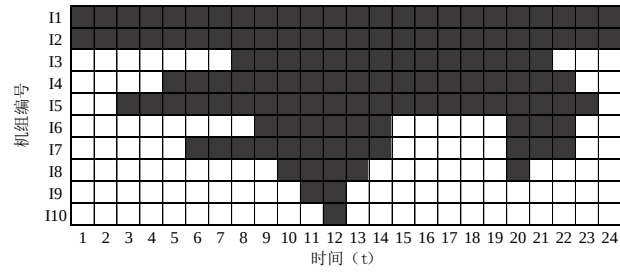
车辆 类型	出行 时间	行程结 束时间	行驶 参数
私家车	$N(8.92, 3.24^2)$	$N(17.47, 3.41^2)$	$\text{Ln}(x) \sim N(3.20, 0.8)$
公交车	06:00	23:00	$\text{Ln}(x) \sim N(4.34, 0.3)$
公务车	08:00	18:00	$\text{Ln}(x) \sim N(3.50, 0.4)$
出租车	均匀分布	均匀分布	$\text{Ln}(x) \sim N(5.06, 0.3)$

表 A3 城市各类电动汽车数量
Table A3 Number of various types of EV in urban areas

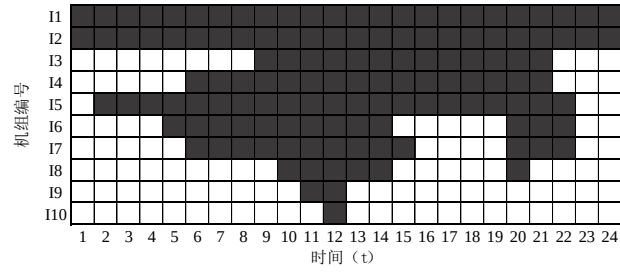
车辆类型	车辆数
私家车	20000
公交车	2000
公务车	1000
出租车	2000

方案 1—5 机组启停情况及总成本的对比分析如下。

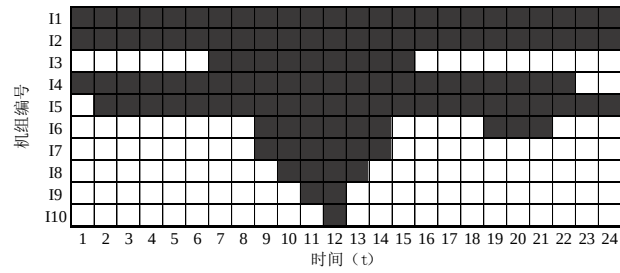
图 A1（a）—（e）展示了正文中 3.4 节方案 1—5 的机组启停情况。表 A4 给出了 5 种方案下系统的总成本对比。从图 A1 可看出，机组启停的优化结果会因不同类型电动汽车可调度时间的不同以及优化充放电结果的不同而产生差异。如图 A1（a）所示，方案 1 中，所有电动汽车均为私家车，其充放电特性最为灵活，所有方案中整体机组开启时间最少；图 A1（b）所示的方案 2 中，由于公交车通常在 23:00 接入，因此，对比方案 1—4，方案 2 在除 I1、I2 大机组开启外其余机组在 23:00 均未开启；图 A1（c）所示的方案 3 中，由于公务车的充放电优化结果在 18:00—22:00 间为放电行为，在 24:00 至次日 04:00 间为充电行为，因而减轻了 I7、I8 在 18:00—22:00 间的压力，增大了 I4、I5 机组 24:00 至次日 04:00 间压力，因此，对比其他方案，方案 3 中 I7、I8 在 18:00—22:00 间处于停机状态，I4、I5 机组 24:00 至次日 04:00 间开机状态相比其他方案少；图 A1（d）所示方案 4 中，大规模出租车的接入的固定充电行为会加重各时段机组的压力，因此，对比其他方案，方案 4 需投入更多机组；图 A1（e）所示方案 5 中，多种不同类型的电动汽车参与调度的机组组合情况与其他单一类型电动汽车参与的机组组合结果均不相同，这表明电动汽车的类型不同会影响机组组合优化方案的制定。表 A3 对比了不同方案的系统总成本，由于方案 4 中出租车只进行充电行为，因而机组的开启会增多，系统成本也最高；方案 5 中考虑多类型电动汽车的出行特性参与调度的系统总成本要比方案 1—3 高，说明当所有车型的出行特性均考虑为一类车型时会对系统总成本的评估产生偏差。



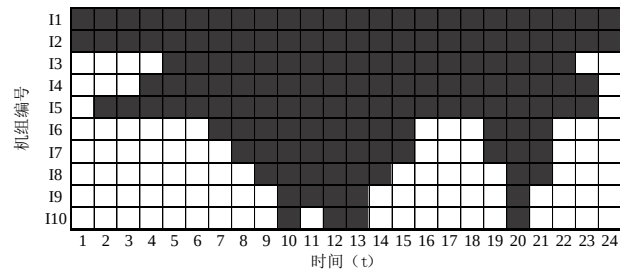
(a) 方案 1



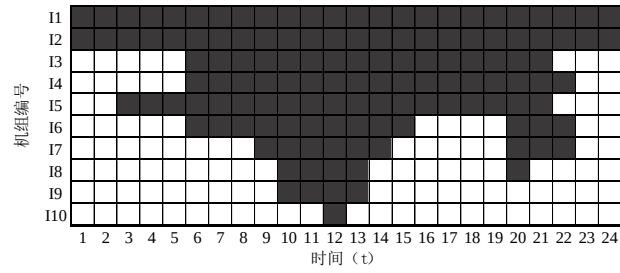
(b) 方案 2



(c) 方案 3



(d) 方案 4



(e) 方案 5

■ 机组开机, □ 机组停机

图 A1 5 种方案机组启停情况

Fig. A1 Unit commitment of case 5

表 A4 5 种方案下系统总成本
Table A4 Total system cost under five cases

方案	总成本/\$	方案	总成本/\$
1	563318.3	4	578388.8
2	563349.2	5	564841.7
3	558868.4		