

“专变共享”模式下考虑时变电价和转移概率的EV有序充电

杨景旭¹, 周 来¹, 张勇军¹, 黄春艳², 范苏纯¹

(1. 华南理工大学 电力学院 智慧能源工程技术研究中心, 广东 广州 510640;

2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510000)

摘要:针对城市楼宇停车场难以新建变压器供电的问题,提出了利用原有专变冗余容量消纳电动汽车(EV)负荷的“专变共享”模式,建立了分别由专变用户、充电站运营商和EV用户主导的3层有序充电调节模型;建立了充电体验指数、专变租费、运行商盈利额和专变利用指数等评估指标描述各方的需求,以此建立了有序充电的综合目标;建立考虑时变电价和EV用户充电时段转移概率的有序充电优化模型,并提出了基于粒子群优化算法的有序充电优化方法。通过算例仿真分析了基于时变电价的3层有序充电调节模型的优化效果,验证了考虑EV出行需求和电量约束的合理性,并研究了楼宇负荷类型对有序充电的影响。

关键词:电动汽车;专变共享;有序充电;转移概率;时变电价;粒子群优化算法;模型

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008011

0 引言

配电变压器分为公用变压器(公变)和专用变压器(专变)。商场、办公楼宇等地方广泛采用专变进行供电,但由于各种原因,往往有许多专变容量配置存在冗余^[1]。因此充分利用专变的冗余容量将产生巨大的经济效益,具有非常重要的实际意义。

近年来,电动汽车EV(Electric Vehicle)得到了迅猛的发展^[2-3],充足的变压器容量是EV负荷接入电网的安全保障^[4-6]。针对该问题,目前主要有2种解决办法:一种是利用公变的冗余容量来消纳EV负荷^[7-8],但由于公变的消纳能力有限,只利用公变的冗余容量难以满足日益增长的EV充电需求;另一种是由充电站运营商投运新的变压器^[9],但这样一次成本过大,运营商回本的时间过长。基于此,本文提出“专变共享”模式,即充电站运营商通过租借商场、办公楼等楼宇专变的冗余容量来满足EV的充电需求。在“专变共享”模式中,在专变用户租费价格和充电站运营商电价策略的共同引导下,EV用户进行有序充电,任一方的利益得不到保障,都可能导致有序充电以失败告终。因此,如何建立由各方共同主导的有序充电调节模型,综合考虑各方的需求和利益,充分利用专变的冗余容量,是实现高质量、高效益的“专变共享”需要解决的问题。

目前,在EV进行有序充电时往往采用峰平谷分时电价^[10-12]。文献[13]的研究表明,基于峰平谷分时电价的有序充电可以较好地引导EV用户错峰充

电。但是,在峰平谷分时电价下负荷只能由峰时段向平/谷时段或由平时段向谷时段转移,同类型时段由于电价相同而负荷无法转移,导致负荷的转移空间较小。另一方面,不同类型楼宇的负荷特征差异较大^[14],对EV用户的充电活动造成的影响较大。因此如何在“专变共享”模式下由充电站运营商灵活地制定充电价格,并针对楼宇负荷类型提出不同的电价策略,是解决“专变共享”模式下有序充电问题的关键。

目前,充电负荷转移主要有2种方式:一种是以集群充电负荷为整体^[10],考虑时段电价差下充电负荷的整体转移;另一种是考虑单辆EV的行驶时段要求、荷电状态(SOC)、充电功率约束对EV参与有序充电的影响^[12,15],考虑因素更全面,充电负荷预测的准确性更高。在这些研究的基础上,如何综合充电价格、计划出行需求、临时出行电量裕度等来考虑EV用户选择其他时段充电的意愿,并将该意愿转化为充电时段转移概率,从而更准确地模拟EV用户进行充电时段转移的局限性和概率性,对提高引导后充电负荷预测的准确性具有非常重要的意义。

基于上述问题,本文提出利用楼宇专变的冗余容量为EV充电的“专变共享”模式,建立了3层有序充电调节模型。对各方的需求和利益进行建模,以此建立了有序充电综合目标;基于时变电价提出价差转移率来描述在电价差下EV进行充电时段转移的概率,根据EV出行需求和电量约束建立充电时段转移意愿函数,并综合两者考虑EV充电时段转移的局限性和概率性,由此建立了有序充电优化模型;通过算例仿真验证了本文所提“专变共享”模式的有效性和合理性。

收稿日期:2019-12-08;修回日期:2020-06-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777077)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777077)

1 “专变共享”模式

针对利用公变冗余容量消纳EV负荷的能力有限以及投运新变压器成本过大的缺陷,本文提出“专变共享”模式,即充电站运营商通过租借商场、办公楼等楼宇专变的冗余容量来满足EV的充电需求。

1.1 “专变共享”模式的运作机理

在“专变共享”模式下,各方都基于需求和利益参与运作。

充电站运营商无需投运新的变压器,一次成本大幅减小,通过电价策略引导EV用户配合楼宇负荷进行有序充电,以更加充分地利用专变的冗余容量,并通过充电价格与电网电价之差获利。在引导EV用户转移到专变冗余容量大的时段进行充电从而能够为更多的EV提供充电服务的过程中,充电站运营商因充电站一天的总充电量更大而获得更大的利润。

专变用户根据专变的负载情况以及EV充电负荷调节各时段的租费价格,通过收取一定的专变租费来获利。为了收取更多的租费,专变用户通过租费价格来协助充电站运营商引导更多的EV用户在专变负载率低的时段进行充电。但是,专变用户应使专变以供应楼宇负荷为首要任务,并保证楼宇负荷的正常供应,即需在不影响楼宇供电质量和专变安全运行的情况下充分利用专变的冗余容量,以实现高质量的“专变共享”。

EV用户根据充电站运营商制定的电价策略来转移充电时段,在更低电价时段充电以降低自身的充电成本。在这个过程中,EV用户还需要考虑参与有序充电对其出行需求以及电池SOC的影响。

此外,在“专变共享”模式下,需尽可能地利用专变的冗余容量,以实现高效益的“专变共享”。

1.2 “专变共享”模式的3层有序充电调节模型

在“专变共享”模式下,有序充电需要各方共同积极参与,从调节顺序来看,可分为上、中、下3层,如图1所示。其中,上层调节由专变用户主导,其可根据楼宇预测负荷初步制定租费价格,然后根据中、下层在上层租费价格下的调节效果进行循环调节;中层调节由充电站运营商主导,运营商根据租费价格、目标充电负荷及预测充电负荷进行电价调节,并根据租费价格、EV用户的响应程度和需求层的满足程度进行循环调节;下层调节由EV用户完成,EV用户根据电价策略按电价响应模型进行充电时段转移。3层调节可根据调节效果即需求层指标的优劣来循环调节,以制定更有效的租费价格和电价策略。

由于各调节环节都由各参与方独立完成,任一方的利益得不到保障或参与度不强,都会导致有序充电的优化效果不佳甚至是以失败告终,因此在进行

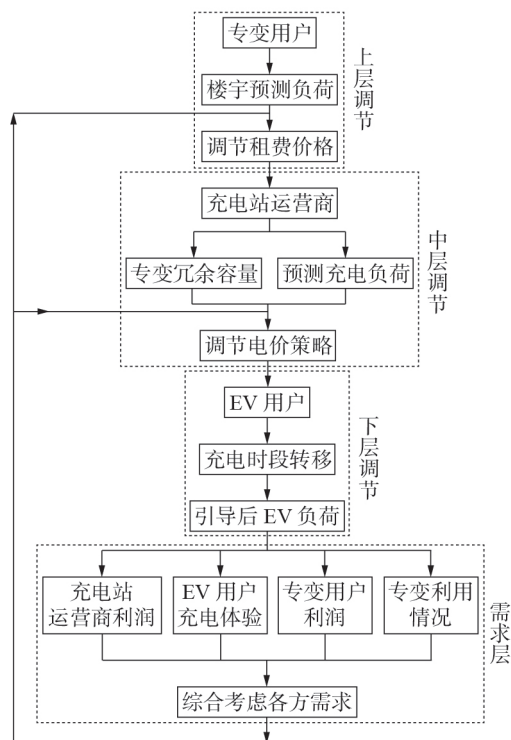


图1 3层有序充电调节模型

Fig.1 Three-layer ordered charging adjustment model

有序充电时要综合考虑需求层中各方的需求、利益。

在工程应用中,上述调节过程可通过开发相关软件平台和app模块并利用数据共享技术完成。在需充电的前一天,EV用户先在app上提供第二天的行程信息数据,专变用户提供楼宇用电信息,app根据这些数据预测充电负荷和楼宇负荷,根据负荷数据、各方利益需求和约束条件进行有序充电优化,为专变用户和充电站运营商分别推荐合理的租费价格和充电价格;根据EV用户的行程信息计算其转移到不同时段充电后的充电费用、对EV出行的影响和一天的SOC曲线,为EV用户提供充电时段转移建议。在此基础上,app根据EV用户的响应程度对租费价格、充电价格和EV用户充电时段转移建议进行调整,动作周期为1h,并根据调整结果在第二天的00:00时刻发布价格信息。在该过程中,解决各参与方的信息交互和信任问题并保护EV用户行程信息的安全是技术关键。

2 “专变共享”模式下各方需求建模

EV有序充电优化涉及EV用户、充电站运营商、专变用户等多方需求,需要同时兼顾各方利益,并充分发挥专变冗余容量的作用。本文基于各方需求进行建模,通过有序充电来更好地满足各方的利益。

2.1 EV用户充电体验指数

在充电过程中,EV用户的充电体验主要与时间代价、金钱代价有关,因此需考虑用户对在充电过程

中花费的时间^[11]及电费支出^[12]的满意程度。基于此,本文综合充电价格、充电平均排队时间来反映 EV 用户在有序充电过程中充电体验得到满足的程度。

2.1.1 用户充电平均排队时间

由于楼宇专变的冗余容量有限,在每个时段只能消纳有限的 EV 负荷,若某辆 EV 到站后专变没有冗余容量,则 EV 用户需要排队等待。 t 时刻到站的 EV 是否需要排队,根据式(1)判断。

$$\ell = \begin{cases} 0 & N_{\text{ES}}(t) \leq N_r(t) \\ 1 & N_{\text{ES}}(t) > N_r(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$N_r(t) = \lfloor S_r(t) / P_0 \rfloor \quad (2)$$

其中, ℓ 为 EV 是否需要排队的判断标准状态变量,取值为 0 表示 EV 用户不需要排队,取值为 1 表示 EV 用户需要排队; $N_{\text{ES}}(t)$ 为 t 时刻在充电站的 EV 数量; $N_r(t)$ 为 t 时刻充电站可接纳的 EV 数量; P_0 为单辆 EV 的额定充电功率; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整; $S_r(t)$ 为 t 时刻的专变冗余容量,由文献[1]可得当专变负载率大于 0.8 时为重载,因此为了避免专变发生过载,可定义专变冗余容量如式(3)所示。

$$S_r(t) = 0.8 S_{\text{a0}} - P_1(t) \quad (3)$$

其中, S_{a0} 为专变容量; $P_1(t)$ 为 t 时刻的楼宇负荷。

从 EV 用户的角度出发,当 EV 用户通过 app 等途径了解到在站排队充电的 EV 过多时,为了减少排队时间,其将会考虑转移到其他充电站进行充电。因此本文假设当在站排队充电的 EV 数量大于 N_{p0} ,即 $N_{\text{ES}}(t) - N_r(t) > N_{\text{p0}}$ 时,其他的 EV 将转移到其他充电站进行充电。

EV 用户充电平均排队时间 T_{p0} 可根据各辆 EV 排队时间的平均值计算,计算式为:

$$\begin{cases} T_{\text{p0}} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} T_p(i) \\ T_p(i) = t_{\text{c0}}(i) - t_{\text{a0}}(i) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $T_p(i)$ 为 EV_i 的充电排队时间,可根据 EV 开始充电时刻 $t_{\text{c0}}(i)$ 和到达充电站的时刻 $t_{\text{a0}}(i)$ 计算; N_c 为一天中实际在该充电站充电的 EV 数量,为一天中计划在该充电站充电的 EV 总数量 N_0 减去转移到其他充电站充电的 EV 数量。

2.1.2 用户充电平均电价

在有序充电过程中,充电价格是 EV 用户最关注的问题,其直接影响 EV 用户参与有序充电的积极性。平均电价的计算公式为:

$$\begin{cases} d'_{\text{ES}} = \sum_{\lambda=1}^{24} c_{\text{chg}}(\lambda) P'_{\text{ES}}(\lambda) \Delta t / W'_{\text{ES}} \\ W'_{\text{ES}} = \sum_{\lambda=1}^{24} P'_{\text{ES}}(\lambda) \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

其中, d'_{ES} 为引导后的平均电价; $c_{\text{chg}}(\lambda)$ 为 λ 时段的充

电价格; $P'_{\text{ES}}(\lambda)$ 为在引导后充电预测负荷 $P_{\text{ES}}(\lambda)$ 的基础上考虑 EV 排队问题后 λ 时段的充电负荷(λ 时段的负荷为该时段各时刻的平均负荷); W'_{ES} 为引导后 EV 的总充电量; Δt 为单位时段的时长,本文将 1 d 划分为 24 个时段,则 $\Delta t = 1 \text{ h}$ 。

2.1.3 EV 用户充电体验指数的计算方法

在充电过程中,排队时间越短,电价越低,则 EV 用户的充电体验越能得到满足。本文综合 EV 用户充电平均排队时间和平均电价综合反映 EV 用户的充电体验,充电体验指数 ρ 的计算公式为:

$$\rho = \beta_1 \frac{1}{T_{\text{p0}}} + \beta_2 \frac{1}{d'_{\text{ES}}} \quad (6)$$

其中, β_1 和 β_2 为权重系数。

2.2 专变租费

专变用户通过向充电站运行商租借专变冗余容量时收取一定的租费来获利。EV 的总充电量越大,则专变用户收取的费用越高,因此专变租费 D_z 与各时段的充电负荷有关,可表示为:

$$D_z = \sum_{\lambda=1}^{24} b(\lambda) P'_{\text{ES}}(\lambda) \Delta t \quad (7)$$

其中, $b(\lambda)$ 为 λ 时段的租费价格。

2.3 充电站运行商的盈利额

充电站运营商向 EV 用户收取电网电价费用和充电服务费用,其中充电服务费用由充电服务价格体现,同时充电站运营商需向专变用户支付专变租费,则充电站运行商一天的盈利额 D_{ser} 为^[10]:

$$D_{\text{ser}} = \sum_{\lambda=1}^{24} P'_{\text{ES}}(\lambda) c'_{\text{ser}}(\lambda) \Delta t - D_z \quad (8)$$

其中, $c'_{\text{ser}}(\lambda)$ 为引导后 λ 时段的充电服务价格,如式(9)所示。

$$c'_{\text{ser}}(\lambda) = c_{\text{chg}}(\lambda) - c_{\text{grid}}(\lambda) \quad (9)$$

其中, $c_{\text{grid}}(\lambda)$ 为 λ 时段的电网电价。

2.4 专变利用指数

“专变共享”模式下,有序充电是为了更好地利用专变冗余容量来为更多的 EV 提供充电服务,专变的利用情况关乎充电站运营商、专变用户、EV 用户的利益。因此,本文提出专变利用指数来综合考虑专变冗余容量的利用率、专变满足 EV 充电需求的程度。

2.4.1 冗余容量利用率

为了考察专变冗余容量的利用情况,本文定义冗余容量利用率 η_{r0} 为各时段的充电负荷与专变冗余容量比值的平均值,即:

$$\eta_{\text{r0}} = \frac{1}{24} \sum_{\lambda=1}^{24} P'_{\text{ES}}(\lambda) / S_r(\lambda) \quad (10)$$

2.4.2 专变满足率

当 EV 负荷大于专变冗余容量且排队 EV 数量过多时,部分 EV 需要转移到其他充电站进行充电,此时该部分 EV 的充电需求得不到满足。定义专变满

足率 η_m 为专变冗余容量满足EV充电需求的程度,以此衡量专变在“专变共享”模式下的功能和作用,其计算式为:

$$\eta_m = N_c / N_0 \quad (11)$$

2.4.3 专变利用指数的计算

本文综合冗余容量利用率和专变满足率来衡量专变的利用情况,定义专变利用指数 L_z 为:

$$L_z = s_1 \eta_{r0} + s_2 \eta_m \quad (12)$$

其中, s_1 、 s_2 为权重系数。

2.5 有序充电的综合目标

为了保证各方的需求和利益都能得到满足,本文综合EV用户充电体验指数、专变租费、充电站运行商的盈利额和专变利用指数建立有序充电的综合目标 χ ,如式(13)所示。

$$\chi = \gamma_1 \rho + \gamma_2 D_z + \gamma_3 D_{ser} + \gamma_4 L_z \quad (13)$$

其中, γ_1 — γ_4 为权重系数。

3 “专变共享”模式下的有序充电优化模型

为了解决峰平谷分时电价的局限性,本文考虑EV出行需求、电量约束的影响,建立了考虑时变电价、EV用户充电时段转移概率的有序充电优化模型。

3.1 有序充电的优化模型

本文通过充电站运营商调节服务价格来灵活地改变EV用户的充电价格以进行有序充电,将该灵活的充电价格称为时变电价。

3.1.1 EV状态参数计算

为了模拟EV一天的行为活动,可通过EV用户出行和充电行为的概率分布模型,抽取起始充电时刻、日行驶距离、日初始时刻SOC、出行时间等参数,进而计算EV一天的状态参数。

在充电过程中,基于充电时长计算EV的SOC,如式(14)所示^[16]。

$$\begin{cases} S(t_{c0} + \sigma) = S(t_{c0}) + \sigma \frac{\mu - S(t_{c0})}{T_c} \\ T_c = (\mu - S(t_{c0}))E / (P_0 \eta) \end{cases} \quad (14)$$

其中, t_{c0} 为开始充电时刻; T_c 为充电至指定SOC所需时长; μ 为期望充电完成后的SOC; $S(t_{c0})$ 为开始充电时EV的SOC; $S(t_{c0} + \sigma)$ 为充电 σ 时长后EV的SOC; E 为EV电池的容量; P_0 为EV的充电功率; η 为EV的充电效率。

在行驶过程中,EV的SOC可以表示为^[16]:

$$\begin{cases} S(t_{d0} + \varepsilon) = S(t_{d0}) - \varepsilon \frac{S(t_{d0} + T_d) - S(t_{d0})}{T_d} \\ T_d = L_d / v_d \\ S(t_{d0} + T_d) = S(t_{d0}) - L_d / L_{range} \end{cases} \quad (15)$$

其中, t_{d0} 为开始行驶时刻; $S(t_{d0})$ 为开始行驶时EV的

SOC; $S(t_{d0} + T_d)$ 为行驶完成后EV的SOC, T_d 为行驶时长; $S(t_{d0} + \varepsilon)$ 为行驶 ε 时长后EV的SOC; L_d 为行驶距离; v_d 为平均行驶速度; L_{range} 为EV的续航里程。

同理,根据EV的充电信息,可计算其一天的充电负荷,通过叠加各辆EV的充电负荷即可得到EV总的充电负荷^[2]。

3.1.2 用户价格响应模型

文献[10]基于消费者心理,以用户整体从高电价时段向低电价时段转移的用户数量占原时段用户数量的百分比来描述EV用户对电价的响应度。基于此,为了考虑单辆EV基于电价差进行时段转移的可能性,本文定义价差转移率 $\alpha(\lambda_1, \lambda_2)$ 为单辆EV考虑电价差后将充电时间从 λ_1 时段转移到 λ_2 时段的转移概率,如式(16)所示。

$$\alpha(\lambda_1, \lambda_2) = \begin{cases} 0 & \Delta c \leq \Delta c_1 \\ k_p (\Delta c - \Delta c_1) & \Delta c_1 < \Delta c < \Delta c_2 \\ \alpha_{max} & \Delta c \geq \Delta c_2 \end{cases} \quad (16)$$

$$k_p = \alpha_{max} / (\Delta c_2 - \Delta c_1) \quad (17)$$

其中, Δc 为EV转移前、后的充电电价差; Δc_1 为死区阈值,即进行有序充电时EV用户开始有响应时的电价差; Δc_2 为饱和区阈值,即进行有序充电时EV用户不再有响应时的电价差; α_{max} 为价差转移率的饱和值; k_p 为充电时价格响应曲线线性区的斜率。

对于跨时段充电的EV而言,要按其可在各时段的电价和充电时间求取综合电价。

3.1.3 EV用户的时段转移意愿

EV用户对于转移时段的考虑,首先不能影响其出行需求;其次,EV用户出于对紧急或临时出行需要的考虑,更倾向于EV具有一定的电量裕度;再者,为了保障电池的寿命,电池的电量不可过低。基于上述需求,本文建立EV用户的时段转移意愿,以描述EV用户将充电时段转移到其他时段的愿意程度。

(1)考虑出行需求的转移意愿。

考虑EV用户的出行需求,基于出行延误时间,采用线性分段函数表示EV用户的时段转移意愿,如式(18)所示。

$$F(\lambda_1, \lambda_2) = \begin{cases} (T_{y_{max}} - T_y) / T_{y_{max}} & T_y < T_{y_{max}} \\ 0 & T_y \geq T_{y_{max}} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $F(\lambda_1, \lambda_2)$ 为考虑出行需求后EV充电时间从 λ_1 时段转移到 λ_2 时段的意愿值; T_y 为出行延误时间,即充电时段转移后由于充电活动与计划出行时间冲突所导致的用户出行延误时间; $T_{y_{max}}$ 为EV用户所能接受出行延误的极限时间。

(2)考虑电量裕度的转移意愿。

基于电量裕度需求和不损害电池寿命的最低SOC约束,采用分段函数衡量EV用户的时段转移意愿,如式(19)所示。

$$R(\lambda_1, \lambda_2) = \begin{cases} 0 & S_{\min} \leq S_m \\ (S_{\min} - S_m) / (S_{sp} - S_m) & S_m < S_{\min} < S_{sp} \\ 1 & S_{\min} \geq S_{sp} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $R(\lambda_1, \lambda_2)$ 为考虑电池电量裕度需求后 EV 充电时间从 λ_1 时段转移到 λ_2 时段的意愿值; $S_{\min}$ 为 EV 充电时间从 λ_1 时段转移到 λ_2 时段后一天中最小的 SOC 值; S_m 为不损害电池寿命的最低 SOC 值; S_{sp} 为满足 EV 电量裕度需求的 SOC 阈值。

(3) 综合时段转移意愿。

综合考虑 EV 出行需求和电池电量裕度需求, 可建立 EV 用户的时段转移意愿函数 $\xi(\lambda_1, \lambda_2)$ 为:

$$\xi(\lambda_1, \lambda_2) = F(\lambda_1, \lambda_2) R(\lambda_1, \lambda_2) \quad (20)$$

3.1.4 EV 用户的时段转移概率

EV 用户进行充电时段转移主要受各时段电价的激励和 EV 用户出行需求及电池 SOC 值的约束, 因此结合价差转移率和转移意愿得到单辆 EV 进行充电时段转移的概率, 可合理地模拟 EV 用户进行充电时段转移的局限性和概率性。EV 充电时间从 λ_1 时段转移到 λ_2 时段的时段转移概率 $p(\lambda_1, \lambda_2)$ 为:

$$p(\lambda_1, \lambda_2) = \alpha(\lambda_1, \lambda_2) \xi(\lambda_1, \lambda_2) \quad (21)$$

为了方便计算, 并考虑 EV 用户对开始充电时刻的选择, 分别计算 EV 在 λ 时段的起始时刻以及第 10、20、30、40、50 min 开始充电对应的时段转移概率, 按其时段转移概率随机选择一个时间点作为开始充电时刻。

3.1.5 引导后 EV 充电预测负荷计算

根据 EV 的时段转移概率, 通过蒙特卡罗模拟^[17]抽取转移时段及其开始充电时刻后, 计算其一天的充电功率, 然后将各辆 EV 的充电负荷进行叠加, 得到 EV 总的充电负荷, 并将每次抽样计算得到的 EV 总的充电负荷求平均值, 即可得到 EV 充电预测负荷^[18], 如式(22)所示。

$$\begin{cases} P'_{ES}(t) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M P_z^j(t) \\ P_z^j(t) = N_z^j(t) P_0 \end{cases} \quad (22)$$

其中, $N_z^j(t)$ 、 $P_z^j(t)$ 分别为第 j 次蒙特卡罗模拟抽样得到的 t 时段处于充电状态的 EV 数量、总充电负荷; M 为蒙特卡罗模拟抽样次数。

3.2 有序充电的约束条件

本文的有序充电优化模型需满足以下约束条件:

$$c_{grid}(\lambda) \leq c_{chg}(\lambda) \leq c_{max} \quad (23)$$

$$b_{min} \leq b(\lambda) \leq b_{max} \quad (24)$$

$$S_{SOC} \geq S_m \quad (25)$$

$$\sum_{\lambda=1}^{24} p(\lambda, \tau) \leq 1 \quad (26)$$

其中, b_{max} 、 b_{min} 分别为租费价格的上、下限。式(23)表示各时段的充电价格不能过高, 也不能低于电网电价; 式(24)表示为了保证专变用户的盈利需求和避免给充电站运营商带来过大的租费负担, 租费价格要满足一定的约束; 式(25)表示为了避免电池电量过低对电池寿命的影响, EV 电池的实时 SOC 值 S_{SOC} 不能超过不损害电池寿命的最低 SOC 值; 式(26)表示 EV 充电时间从 λ 时段转移到其他时段的转移概率之和不能大于 1。

3.3 基于粒子群优化算法的有序充电优化方法

本文采用粒子群优化算法进行 EV 有序充电优化, 设搜索空间的维数为 48, 群体粒子数为 m , 第 i 个粒子的租费价格为 $\{b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,24}\}$, 电价为 $\{c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,24}\}$, 初始粒子的租费价格和电价都是随机产生的, 则可设第 i 个粒子的位置为:

$$\begin{aligned} X_i &= [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,48}] = \\ &[b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,24}, c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,24}] \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $i=1, 2, \dots, m$ 。

每个粒子的位置就是一个潜在解, 将第 i 个粒子的飞行速度记为 $V_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,48}]$ 。每次迭代中粒子通过跟踪个体极值和全局极值来更新速度和位置, 从而改变粒子的租费价格和电价, 即^[19]:

$$\begin{aligned} v_{i,d}^{k+1} &= \omega_k v_{i,d}^k + \phi_1 r_1(k) (p_{best,i,d}^k - x_{i,d}^k) + \\ &\phi_2 r_2(k) (g_{best,i,d}^k - x_{i,d}^k) \end{aligned} \quad (28)$$

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1} \quad (29)$$

其中, k 为迭代次数; ω_k 为惯性权重, 采用随迭代次数线性递减的模型^[20], 如式(30)所示; ϕ_1 、 ϕ_2 为学习因子; $r_1(k)$ 和 $r_2(k)$ 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数; $v_{i,d}^k$ 、 $x_{i,d}^k$ 分别为第 k 次迭代中第 i 个粒子在第 d 维的速度、位置; $p_{best,i,d}^k$ 、 $g_{best,i,d}^k$ 分别为第 k 次迭代中第 i 个粒子的个体极值、全局极值的位置。

$$\omega_k = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min})k / I_{max} \quad (30)$$

其中, ω_{max} 、 ω_{min} 分别为惯性权重的上、下限; I_{max} 为最大的迭代次数。

基于粒子群优化算法的有序充电优化流程图见附录 A 中图 A1。

4 算例分析

4.1 仿真参数设置

在本文的仿真算例中, $\Delta t = 1$ h, 引导前的服务价格 $c_{ser} = 1$ 元 / (kW·h)^[10], $c_{max} = 2.2$ 元 / (kW·h); 根据充电价差范围, Δc_1 、 Δc_2 可分别取为 0.1、1 元 / (kW·h); 为了维持充电站运营商和专变用户的利润分配比约为 3:1, b_{max} 、 b_{min} 分别取为 0.3、0.1 元 / (kW·h); $\alpha_{max} = 8\%$; 为了避免过充, μ 可设为 0.9; S_{20} 取为 1250 kV·A, 接入充电负荷前专变的最大负载率为 50%; 根据文

献[20], $\omega_{\min}$ 、 $\omega_{\max}$ 可分别取为 0.4、0.9, ϕ_1 、 ϕ_2 均取值为 1.496 18, $m=800$, $I_{\max}=500$; 蒙特卡罗模拟抽样次数 $M=500$; 根据排队时间和充电价格对 EV 用户的重要程度, β_1 、 β_2 可分别取值为 0.2、0.8, s_1 、 s_2 均取值为 0.5, $\gamma_1+\gamma_2+\gamma_3+\gamma_4=1$ 且 $\gamma_1:\gamma_2:\gamma_3:\gamma_4=10:3:1:10$; $N_{p0}=4$ 辆, S_m 、 S_{sp} 分别取值为 0.1、0.3, $T_{y_{\max}}=30$ min; 电网峰平谷分时电价如附录 B 中表 B1 所示^[21]; $N_0=800$ 辆, EV 参数^[16]以及 EV 用户出行概率分布^[22]分别如附录 C 中表 C1 和表 C2 所示。

由文献[14]可知,迎晚峰型、价格敏感型、早九晚五型、夜间用电型和用电稳健型楼宇负荷(分别记为类型 1—5)的特征如附录 D 中图 D1 所示(图中负荷为标么值)。

4.2 基于时变电价的 3 层有序充电调节效果分析

以迎晚峰型(类型 1)负荷曲线作为楼宇预测负荷,分别基于峰平谷分时电价(情景 1)、时变电价(情景 2)进行有序充电,并以用户在电网电价差下自主优化(情景 3)作为对比,3 种情景下的充电电价见图 2,充电负荷见图 3,需求层的各项指标结果见表 1。

由表 1 可知,相比于情景 1 和情景 3,情景 2 下的充电体验指数、专变租费以及充电站运营商盈利额更大,说明各方的需求都得到了更大的满足;同时,情景 2 下冗余容量利用率和专变满足率都更大,表明各时段专变的冗余容量都得到了更加充分的利用。上述结果表明,相比于用户基于电网电价差自

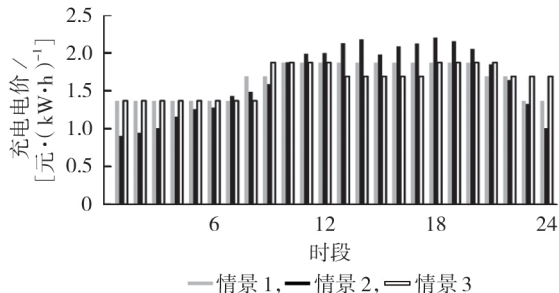


图 2 3 种情景下的充电电价

Fig.2 Charging electricity price under three scenarios

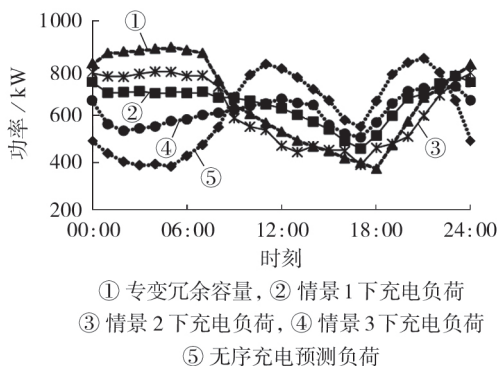


图 3 3 种情景下的充电负荷

Fig.3 Charging load under three scenarios

表 1 3 种情景下需求层的指标结果

Table 1 Index results of demand layer under three scenarios

需求层指标	结果		
	情景 1	情景 2	情景 3
充电体验指数	0.55	0.62	0.53
平均排队时长 / min	5.85	1.83	9.96
平均电价 / [元·(kW·h) ⁻¹]	1.55	1.49	1.58
专变租费 / 元	2860	3480	2370
充电站运行商盈利额 / 元	8480	9920	7340
专变利用指数	0.87	0.92	0.81
冗余容量利用率 / %	85	90	80
专变满足率 / %	88	93	82

主充电优化和基于峰平谷分时电价的有序充电优化,基于时变电价的有序充电优化的效果更佳。

由图 2 可知,当基于时变电价进行有序充电时,充电站运营商能根据充电需求更加灵活地调节各时段的电价,使得各时段的负荷都可按时变电价进行转移,即峰—峰、平—平和谷—谷时段间的充电负荷亦可相互转移,负荷转移空间增大,EV 用户在有序充电中进行充电时段转移的响应程度和灵活性提高,这样可充分利用专变的冗余容量消纳更多的 EV 负荷,使实际的 EV 总充电量增大。专变用户和充电站运行商的利润增加,EV 用户的充电需求也得到了更大的满足。因此,本文所提“专变共享”模式下基于时变电价的 3 层有序充电调节能很好地满足各方的需求,优化效果明显,其有效性得到了验证。

4.3 考虑 EV 出行需求和电量裕度约束的合理性分析

以迎晚峰型负荷曲线作为楼宇预测负荷,分别在考虑 EV 出行需求和电量裕度约束(情景 a)和不考虑 EV 出行需求和电量裕度约束(情景 b)下采用本文所提有序充电方法进行优化,所得充电负荷曲线见图 4。根据各辆 EV 一天内的状态参数,统计出行平均延误时间和一天中最低电量低于损害电池寿命的阈值和出行电量裕度的 EV 占比,结果见表 2。

由图 4 和表 2 可知,当不考虑 EV 出行需求和电量裕度约束时,引导后充电负荷更接近专变冗余容量,冗余容量利用率更大,但 EV 用户的出行平均延

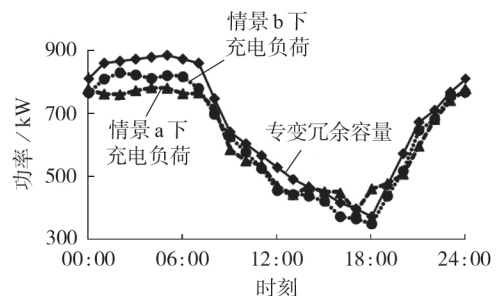


图 4 情景 a 和情景 b 下的充电负荷曲线

Fig.4 Charging load curves of Scenario a and Scenario b

表 2 情景 a 和情景 b 下各指标结果

Table 2 Index results of Scenario a and Scenario b

情景	冗余容量 利用率 / %	出行平均延误 时间 / min	$S_{\min} < S_m$ 的 EV 占比 / %	$S_{\min} < S_p$ 的 EV 占比 / %
a	91	0.9	0	3.2
b	93	7.2	5.4	19.5

误时间大幅增加,同时部分 EV 由于电池电量过低而会影响电池寿命,更多的 EV 的电量满足不了其临时出行备用电量需求,会较严重影响 EV 用户的生活和工作,极大地降低 EV 用户参与有序充电的积极性。因此,在进行有序充电优化时,必须充分考虑 EV 出行需求和电量裕度约束,保障 EV 用户的利益需求。

4.4 楼宇负荷类型对有序充电的影响

考虑各类型楼宇负荷,采用本文所提有序充电方法进行优化,需求层的指标结果如表 3 所示。

表 3 考虑不同类型楼宇负荷时需求层的指标结果

Table 3 Index results of demand layer considering different types of building load

楼宇负荷 类型	平均电价 / [元·(kW·h) ⁻¹]	专变满足 率 / %	充电站运行商 盈利额 / 元
迎晚峰型	1.49	93	9920
价格敏感型	1.58	100	10820
早九晚五型	1.52	95	10120
夜间用电型	1.56	98	10650
用电稳健型	1.49	92	9900

由表 3 可知,对于迎晚峰型、用电稳健型楼宇负荷而言,引导后的平均电价和充电站运行商盈利额都较低,说明充电站运营商为了引导 EV 转移到专变冗余容量大的时段充电,将相应时段的电价压得很低,因此利润较低,但此时专变满足率也相对较低,说明 EV 用户的响应不够积极。结合楼宇负荷曲线可知,迎晚峰型和用电稳健型楼宇负荷与 EV 负荷高峰在时间上重叠,导致专变冗余容量严重不足,需要大量 EV 用户转移到其他时段充电,因此引导难度大。相反地,价格敏感型和夜间用电型楼宇负荷与 EV 负荷需求峰谷相对错开,所以引导难度小,运营商利润高。因此,当楼宇负荷与 EV 负荷需求的峰谷错开时,有序充电的引导难度更小,充电站运营商能获得更大的利润,也更容易满足 EV 用户的充电需求。

5 结论

(1)在本文所提利用楼宇专变冗余容量为 EV 提供充电服务的“专变共享”模式下,基于时变电价的 3 层有序充电调节能够灵活地调节各时段的电价,使得充电负荷的转移空间增大,提高 EV 用户的响应程度;能够更充分地利用专变的冗余容量,更好地满足 EV 用户、专变用户和充电站运行商等各方的需求。因此,本文所提“专变共享”模式的有效性得到了验证,能为运营商建设充电站时解决变压器容量

问题提供另外一种选择。

(2)当不考虑 EV 出行需求、电量裕度约束时,将会较严重影响 EV 用户的出行,甚至导致电池寿命缩短,极大地降低 EV 用户的积极性。因此,在进行有序充电优化时,充分考虑 EV 出行需求、电量裕度约束是保障 EV 用户利益需求和参与积极性的基本前提。

(3)针对不同类型的楼宇负荷,充电站运营商引导用户的难度是不同的。当楼宇负荷与 EV 负荷需求的峰谷错开时,有序充电的引导难度更小,运营商能够获得更大的利润。

在本文模型的基础上,可进一步考虑楼宇负荷用户的响应,其可通过调节楼宇用电负荷,改变各时段专变的冗余容量,以方便 EV 用户进行充电,并从中减小用电费用。另外,如何通过数据共享、区块链等技术解决各参与方的信息交互和信任问题,保证有序充电的公平性、透明性与信息对称性和 EV 用户行程信息的安全性,是将本文所建模型应用到工程中需要解决的问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 吴明轩,王林莽,何勇琪,等. 10 kV 专变接收的筛选方法与建议[J]. 机电工程技术,2017,46(12):104-106,157.
WU Mingxuan, WANG Linmang, HE Yongqi, et al. The selection method and suggestion of 10 kV specific transform receiving[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(12):104-106, 157.
- [2] 杨景旭,羿应棋,张勇军,等. 基于加权分布熵的配电网电动汽车并网运行风险分析[J]. 电力系统自动化,2020,44(5):171-179.
YANG Jingxu, YI Yingqi, ZHANG Yongjun, et al. Operation risk analysis of electric vehicle integrated to distribution network based on weighted distribution entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5):171-179.
- [3] SADEGHIAN O, NAZARI-HERIS M, ABAPOUR M, et al. Improving reliability of distribution networks using plug-in electric vehicles and demand response[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5):1189-1199.
- [4] 谢东亮,张宇琼,吴巨爱,等. 容量受限下电动汽车充电策略优化及应急备用能力分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(11):56-63.
XIE Dongliang, ZHANG Yuqiong, WU Juai, et al. Charging optimization strategy and capability analysis as reserve measures for electric vehicles under limited-capacity area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):56-63.
- [5] 王育飞,蔡传高,薛花. 基于改进 NSGA- II 的社区电动汽车充电站优化充电策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):109-115.
WANG Yufei, CAI Chuangao, XUE Hua. Optimized charging strategy of community electric vehicle charging station based on improved NSGA- II[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):109-115.
- [6] LUO C, HUANG Y, GUPTA V. Placement of EV charging sta-

- tions;balancing benefits among multiple entities[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(2):759-768.
- [7] 刘其辉,张怡冰,卫婧菲,等. 电动汽车充电区/站两级实时能量管理机制及优化策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):122-129,152.
LIU Qihui,ZHANG Yibing,WEI Jingfei,et al. Two-stage real-time energy management mechanism and optimization strategy for EV charging area/station[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(6):122-129,152.
- [8] 严俊,严凤. 峰谷分时电价背景下的居民电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(15):127-134.
YAN Jun,YAN Feng. An orderly charging and discharging strategy for residential electric vehicles based on peak-valley electricity tariffs[J]. Power System Protection and Control,2018,46(15):127-134.
- [9] 郭建龙,文福拴. 考虑削峰填谷的电动出租车充电负荷影响因素调节方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):242-248.
GUO Jianlong,WEN Fushuan. Methods of influencing factor regulation considering load shifting for electric taxis charging load[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):242-248.
- [10] 常方宇,黄梅,张维戈. 分时充电价格下电动汽车有序充电引导策略[J]. 电网技术,2016,40(9):2609-2615.
CHANG Fangyu,HUANG Mei,ZHANG Weige. Research on coordinated charging of electric vehicles based on TOU charging price[J]. Power System Technology,2016,40(9):2609-2615.
- [11] 朱建东,王红蕾,李倩倩. 考虑引力因素与时间满意度的充电站竞争性选址问题研究[J]. 数学的实践与认识,2018,48(24):59-65.
ZHU Jiandong,WANG Honglei,LI Qianqian. Competitive location problem of charging station considering gravity and time satisfaction[J]. Mathematics in Practice and Theory,2018,48(24):59-65.
- [12] 崔金栋,罗文达,周念成. 基于多视角的电动汽车有序充电定价模型与策略研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(15):4438-4450.
CUI Jindong,LUO Wenda,ZHOU Niancheng. Research on pricing model and strategy of electric vehicle charging and discharging based on multi view[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(15):4438-4450.
- [13] 闫志杰,张蕊萍,董海鹰,等. 基于需求响应的电动汽车充放电电价与时段研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(15):16-22.
YAN Zhijie,ZHANG Ruiping,DONG Haiying,et al. Price and period research of electric vehicles charging and discharging based on demand response[J]. Power System Protection and Control,2018,46(15):16-22.
- [14] 李志海,张春平,王子壬,等. 结合PCA的K-means算法在专变用户用电行为分析中的应用[J]. 电力信息与通信技术,2018,16(12):62-67.
LI Zhihai,ZHANG Chunping,WANG Ziren,et al. Application of K-means algorithm combined with PCA in behavior analysis of private transformer customer[J]. Electric Power Information and Communication Technology,2018,16(12):62-67.
- [15] 王毅,麻秀,万毅,等. 基于分时充放电裕度的电动汽车有序充电引导策略[J]. 电网技术,2019,43(12):4353-4361.
WANG Yi,MA Xiu,WAN Yi,et al. Sequential charge-discharge guidance strategy for electric vehicles based on time-sharing charging-discharging margin[J]. Power System Technology,2019,43(12):4353-4361.
- [16] 胡畔,吴斌,陈红坤,等. 计及时序特性的电动汽车快充充电站谐波分析[J]. 高电压技术,2019,45(11):3645-3655.
HU Pan,WU Bin,CHEN Hongkun,et al. Harmonic analysis of electrical vehicle fast-charging station considering sequence behavior of load[J]. High Voltage Engineering,2019,45(11):3645-3655.
- [17] 王浩林,张勇军,毛海鹏. 基于时空特征变量数据分析的共享汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):169-175.
WANG Haolin,ZHANG Yongjun,MAO Haipeng. Charging load prediction method of shared vehicles based on data analysis of spatiotemporal characteristic variables[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):169-175.
- [18] 王浩林,张勇军,毛海鹏. 基于时刻充电概率的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(3):207-213.
WANG Haolin,ZHANG Yongjun,MAO Haipeng. Charging load forecasting method based on instantaneous charging probability for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(3):207-213.
- [19] 唐佳,王丹,贾宏杰,等. 基于元模型辅助粒子群算法的主动配电网最优经济运行[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):95-103.
TANG Jia,WANG Dan,JIA Hongjie,et al. Optimal economic operation of active distribution networks based on hybrid algorithm of surrogate model and particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(4):95-103.
- [20] 周俊,陈璟华,刘国祥,等. 粒子群优化算法中惯性权重综述[J]. 广东电力,2013,26(7):6-12.
ZHOU Jun,CHEN Jinghua,LIU Guoxiang,et al. Summary on inertia weight in particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power,2013,26(7):6-12.
- [21] 黄小庆,陈颖,谢啟波,等. 用户充电选择对电网充电调度的影响[J]. 电工技术学报,2018,33(13):3002-3011.
HUANG Xiaoqing,CHEN Jie,XIE Qibo,et al. The influence of users' charging selection on charging schedule of power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(13):3002-3011.
- [22] 邵尹池,穆云飞,余晓丹,等. “车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J]. 中国电机工程学报,2017,37(18):5207-5219.
SHAO Yinchu,MU Yunfei,YU Xiaodan,et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(18):5207-5219.

作者简介:



杨景旭

杨景旭(1996—),男,广东湛江人,硕士研究生,研究方向为智能电网运行与分析(E-mail:3108043591@qq.com);

周来(1995—),女,湖南湘潭人,博士研究生,研究方向为电力系统可靠性与规划、低压拓扑识别(E-mail:291666680@qq.com);

张勇军(1973—),男,广东河源人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统无功规划与电压控制、能源互联网的优化运行等(E-mail:zhangjun@scut.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

(下转第193页 continued on age 193)

Research on harmonic impedance model and harmonic interaction of multiple converter station system with AC filters

GUO Chunlin¹, XU Xuan², ZHANG Chenliang¹, YANG Lin¹, MA Kai¹, JIANG Weiyong³

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Quzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Quzhou 324000, China;

3. State Grid Economic and Technological Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: When multiple converter stations are located in the adjacent AC networks, the electrical distance between the converter stations is short, and some specific AC filter combination switching methods may cause the harmonic current interaction between converter stations. Based on the harmonic impedance method, the influence coefficient of harmonic current in converter stations is defined, which is used to calculate the interactive influence degree of harmonic current between converter stations. Taking the multiple converter station system composed of Yinchuandong Station and Lingzhou Station as an example, the harmonic impedance model with AC filter is established to calculate the harmonic current influence coefficient of characteristic harmonics, and the influence of AC filter combination switching on the harmonic current interaction between Yinchuandong Station and Lingzhou Station is analyzed. The result shows that the interaction of 11th and 13th harmonic currents is small while the interaction of 23rd and 25th harmonic currents is relatively large, and the switching of specific filters will cause significant changes in harmonic current of AC bus in each converter station. Finally, the PSCAD electromagnetic transient simulation model is built to verify the analysis results.

Key words: multiple converter stations; interaction of harmonic current; switching filters; harmonic impedance; characteristic harmonics; harmonic analysis

(上接第 180 页 continued from page 180)

Ordered charging of EVs considering time-varying electricity price and transition probability under “dedicated transformer sharing” mode

YANG Jingxu¹, ZHOU Lai¹, ZHANG Yongjun¹, HUANG Chunyan², FAN Suchun¹

(1. Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to build new transformers to supply power in the parking lot of urban buildings, the “dedicated transformer sharing” mode is proposed, which utilizes the redundant capacity of original dedicated transformers to absorb the EV (Electric Vehicle) load. A three-layer ordered charging adjustment model dominated respectively by dedicated transformer users, charging station operators and EV users is established. The comprehensive objective of ordered charging is set up by establishing the assessment indexes, such as charging experience index, capacity rent charge of dedicated transformer, charging station operators' profit, utilization index of dedicated transformer, and so on, which can describe the needs of all parties. An ordered charging optimization model considering time-varying electricity price and the transition probability of EV users' charging period is built, and an ordered charging optimization method based on the particle swarm optimization algorithm is proposed. The optimization effect of the three-layer ordered charging adjustment model based on time-varying electricity price is analyzed by simulation. The rationality of considering EV travel demand and electricity constraint is verified, and the influence of the types of building load on ordered charging is studied.

Key words: electric vehicles; dedicated transformer sharing; ordered charging; transition probability; time-varying electricity price; particle swarm optimization algorithm; models

附录 A

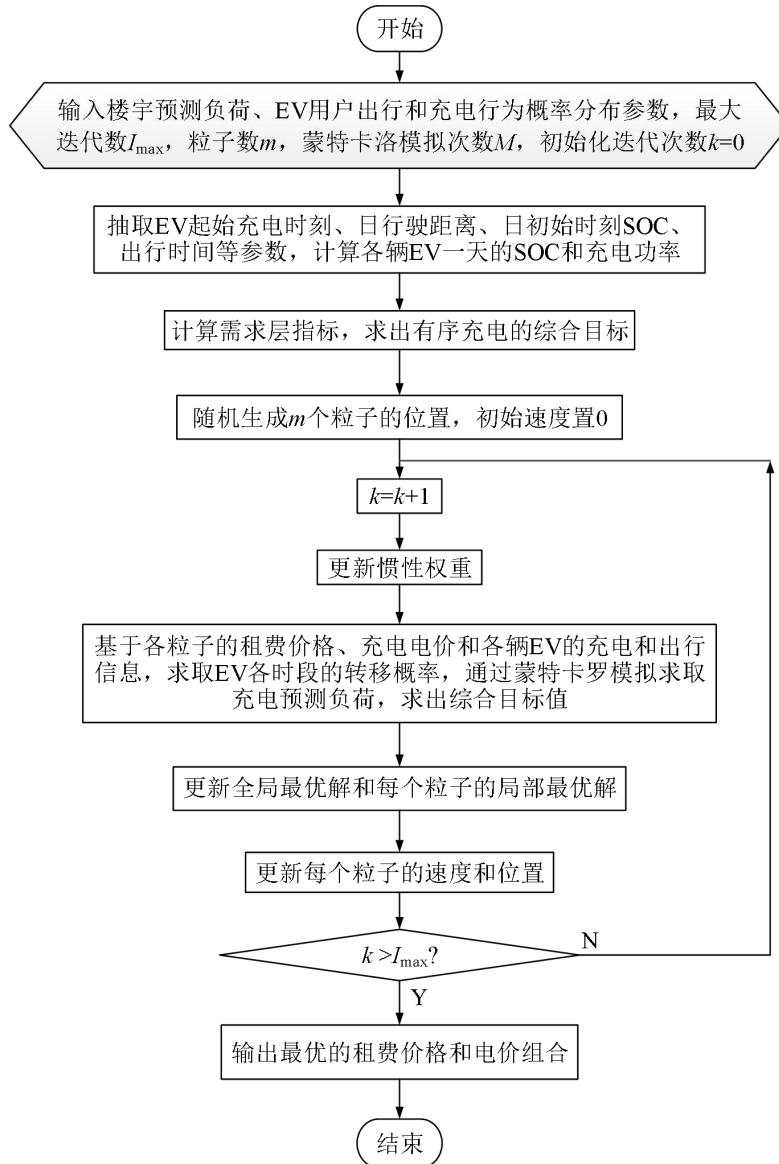


图 A1 有序充电优化流程

Fig.A1 Flowchart of ordered charging optimization

附录 B

表 B1 峰平谷分时电价
Table B1 Peak and valley time-of-use electricity price

时段		电网电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
峰	08:00—12:00, 17:00—21:00	0.869
平	12:00—17:00, 21:00—24:00	0.687
谷	00:00—08:00	0.365

附录 C

表 C1 EV 参数
Table C1 Parameters of EV

参数	取值	参数	取值
电池容量/(kW·h)	40	充电效率	0.9
续航里程/km	160	平均行驶速度/(km·h ⁻¹)	30
充电功率/kW	50		

表 C2 EV 用户出行和充电行为的概率分布
Table C2 Probability distribution of EV users' travel and charging behavior

参数	概率分布	参数	概率分布
起始充电时刻	N(9, 0.88 ²)	日初始时刻 SOC	N(0.6, 0.1 ²)
	N(19, 0.88 ²)		
	U(23, 5)		
日行驶距离/km	ln <i>l</i> ~N(3.2, 0.8 ²)	出行时间	N(8, 0.8 ²)
			N(18, 0.8 ²)

附录 D

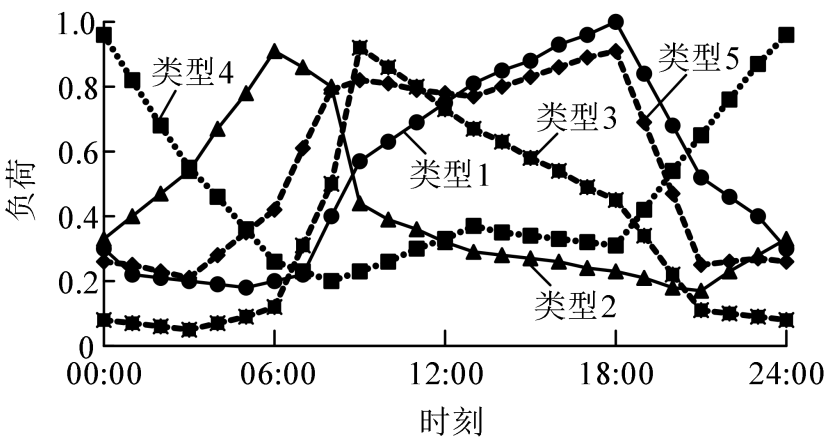


图 D1 不同类型楼宇负荷曲线
Fig.D1 Curves of different types of building load