

# 考虑逆变器无功支撑和三相选择的不平衡 主动配电网电动汽车有序充电控制

符 杨,孟祥浩,苏向敬,米 阳,田书欣

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

**摘要:**现有电动汽车有序充电控制均聚焦于对有功充电负荷的时空迁移而非消除,仍存在一定的运行越限风险;同时现有研究多基于三相平衡网络模型,而实际配电网是显著不平衡的。为此基于逆变器的无功注入和三相选择,提出了一种新型不平衡主动配电网电动汽车有序充电控制策略。首先定义了电动汽车充电控制的多目标优化模型,以实现最小化网损和充电成本、最大化无功收益的整体优化;接着计及逆变器无功注入和三相选择,提出了一种电动汽车优化协调控制策略,以实现电网24 h范围内运行的优化;最后基于某澳大利亚真实配电网开展详细仿真分析,验证所提电动汽车有序充电优化模型和协调策略的正确性和有效性。

**关键词:**电动汽车;有序充电;三相选择;无功支撑;主动配电网

**中图分类号:**U 469.72

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202011022

## 0 引言

考虑环境保护和经济发展,电动汽车作为一种传统交通工具的有效替代在世界范围内引起了广泛关注。我国也在积极推动电动汽车布局,截至2019年我国纯电动汽车的保有量已达到281万辆<sup>[1]</sup>。但电动汽车的充电时间和地点具有高随机性,大规模电动汽车接入电网会导致负荷峰谷差加大、电压下降等一系列问题<sup>[2-3]</sup>。同时,电网中分布式电源的波动性和反调峰性会进一步加重上述问题。故需对电动汽车的充电行为进行有序优化控制,以提升电网运行的安全稳定与经济性。

电动汽车充电行为通常发生在中低压配电网,因此对其进行有序充电控制需兼顾电网运行水平和用户充电需求。文献[4]根据区域电价和负荷信息计算出各时段负荷的容纳能力,并据此将电动汽车充电负荷移至容纳能力高的时段,以实现削峰填谷和平抑负荷波动。为提高配电网的电能质量,文献[5-6]从电流保护、网络损耗和充电功率等方面提出了电动汽车充电控制策略。其中,文献[5]为保证电流保护的正确动作,提出了一种考虑电流保护的电动汽车优化运行策略,基于电流保护显性、隐性指标与电压指标对电动汽车入网规模进行评估,以达到配电网最优运行工况;文献[6]对电动汽车的充电功率进行控制,在充电负荷与常规负荷之和不高于变压器功率限制的前提下尽可能满足用户充电需求。文献[7]提出了一种基于分时电价的多目标有序充电模型,通过电价来引导用户的充电行为,确保网络安全和经济效益。文献[8-9]在综合考虑电能质量和用户充电体验的基础上,对电动汽车进行有序充

电控制研究。其中,文献[8]根据用户驾驶习惯制定电动汽车有序充电策略,根据充电量和小区总负荷变化率对电动汽车进行调度;文献[9]建立了含用户充电成本、充电满意度和负荷平稳度的多目标优化模型,来控制电动汽车充电行为。

电动汽车不仅可以通过充电(G2V)从电网吸收电能,而且可以通过放电(V2G)在负荷高峰时段向电网注入电能。在V2G模式下,电动汽车被视为移动储能系统,通过注入电能来降低负荷峰值<sup>[10]</sup>。随着分布式电源的大量接入,电动汽车充电与可再生能源的协调控制也逐渐受到了关注,如:文献[11]针对高渗透率光伏系统,提出了一种电动汽车优化充电模型来提升光伏发电的利用率,并采用分散自治的方法来提高控制系统的效率;文献[12]结合电动汽车电池管理系统与光伏有功削减,来降低光伏高渗透率对配电网的负面影响。

电动汽车有序充电虽然已有很多研究,但仍存在以下不足:①目前有序充电研究主要集中在电动汽车有功充电控制,仅将充电负荷进行时空转移而未消除,仍存在电压越限等风险,传统应对策略是加装无功补偿设备如电容器和静止无功补偿器,但增加了额外投资;②现有充电研究多基于三相平衡网络,但由于受线路不对称布置、负荷不均匀分配及分布式电源随机接入等因素的影响,实际配电网是显著不平衡的,当电动汽车在不平衡网络中充电时,负荷高的相电压降低,会影响充电效率,而负载低的相电压升高,会对电气设备造成损坏。

针对上述问题,本文基于逆变器的无功注入<sup>[13]</sup>和三相选择<sup>[14]</sup>,提出一种新型不平衡主动配电网电动汽车有序充电控制策略。首先定义了电动汽车充电控制的多目标优化模型,以实现网损、充电成本和和无

功收益的整体优化;接着计及逆变器无功注入和三相选择,提出一种电动汽车优化协调控制策略,以实现电网24 h内运行的优化;最后基于澳大利亚某真实配电网开展详细仿真分析,验证了所提电动汽车有序充电优化模型和协调策略的正确性和有效性。

## 1 电动汽车并网模型

### 1.1 电动汽车并网架构

本文研究基于澳大利亚某真实低压配电网,如图1所示,各用户通过公共耦合点(PCC)接入外部电网,对内接家用负载、屋顶光伏和电动汽车等元件。图1虚线框中,电动汽车通过智能充电桩吸收有功并注入无功,并选择正确的充电相。

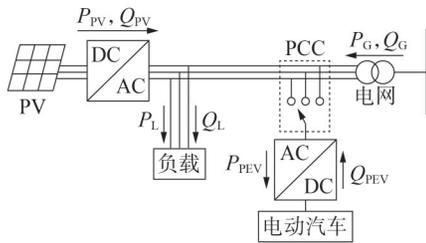


图1 含电动汽车用户经PCC并网接线

Fig.1 Residential connection with PEV through PCC

PCC处的有功与无功关系如下:

$$P_{G,k}(t) = P_{L,k}(t) - P_{PV,k}(t) + P_{PEV,k}(t) \quad (1)$$

$$Q_{G,k}(t) = Q_{L,k}(t) - Q_{PV,k}(t) - Q_{PEV,k}(t) \quad (2)$$

其中,  $P_{G,k}(t)$ 、 $P_{L,k}(t)$ 、 $P_{PV,k}(t)$ 、 $P_{PEV,k}(t)$  分别为  $k$  节点在  $t$  时刻的电网注入有功、居民常规有功负荷、光伏有功出力、电动汽车充电负荷;  $Q_{G,k}(t)$ 、 $Q_{L,k}(t)$ 、 $Q_{PV,k}(t)$ 、 $Q_{PEV,k}(t)$  分别为  $k$  节点在  $t$  时刻的电网注入无功、居民常规无功负荷、光伏无功出力、电动汽车无功注入。

### 1.2 电动汽车出行数据

出行数据包括电动汽车每天离开与返回时刻及行驶里程。假设电动汽车返回后立即进行充电,离开时结束充电,就可得出其停留时间和充电所需时间等。由于电动汽车的出行习惯与传统汽车近似,本文采用2017年美国家用车辆出行的统计结果<sup>[15]</sup>,并对该数据进行拟合得到每天离开与返回时刻及行驶里程的概率密度,据此对电动汽车24 h内的出行数据进行模拟仿真。

(1)电动汽车返回时刻即充电开始时刻(单位为h)的概率密度为:

$$f_s(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(t+24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & 0 < t < \mu_s - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(t-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & \mu_s - 12 \leq t \leq 24 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\mu_s$ 、 $\sigma_s$  分别为正态分布函数的数学期望和方

差,典型取值分别为16.84和3.99。

(2)电动汽车离开时刻即充电结束时刻(单位为h)的概率密度为:

$$f_e(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left[-\frac{(t-\mu_e)^2}{2\sigma_e^2}\right] & 0 < t < \mu_e + 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp\left[-\frac{(t-\mu_e+24)^2}{2\sigma_e^2}\right] & \mu_e + 12 \leq t \leq 24 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\mu_e$ 、 $\sigma_e$  的典型取值分别为9.22和2.92。

(3)电动汽车日行驶里程(单位为km)的概率密度为:

$$f_d(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d d} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (5)$$

其中,  $d$  为距离变量;  $\mu_d$ 、 $\sigma_d$  的典型取值分别为3.25和1.41。

## 2 电动汽车有序充电优化控制模型

本文所提电动汽车有序充电控制综合考虑电网和用户收益,建立了含用户充电成本和网络有功损耗成本的联合优化充电控制模型。同时电动汽车在单相双向逆变器的基础上,采用恒功率充电以满足逆变器容量限制,而电动汽车无功出力分为5个档位,分别为0.5、1、1.5、2、2.5 kvar,具体档位通过算法优化或灵敏度分析进行确定,以满足实际网络的无功需求。控制变量包括电动汽车充电时段、无功出力档位和三相选择,均由充电协调策略确定,以实现网络损耗和充电成本的最小化及用户利益的最大化,其中三相选择是为了保证电动汽车在最适合的相进行充电以及提供无功支撑。

### 2.1 电动汽车参数计算

通过蒙特卡洛模拟,可以确定电动汽车的返回时刻、离开时刻和荷电状态。为了进一步利用这些数据,本文进行了以下预处理。

(1)电动汽车停留时段数。

本文基于的澳大利亚真实配电网算例通过智能电表以15 min间隔对电网数据进行采集,故每个时段长度  $\Delta t$  设为15 min。假设第  $i$  辆电动汽车的返回时刻和离开时刻分别为  $T_i^a$  和  $T_i^l$ ,则停留时段数  $T_i^s$  为:

$$T_i^s = \frac{\lfloor T_i^l \rfloor - \lceil T_i^a \rceil}{\Delta t} \quad (6)$$

其中,  $\lfloor x \rfloor$ 、 $\lceil x \rceil$  分别表示对  $x$  向上、向下取整。

(2)电动汽车返回时的荷电状态。

本文假设电动汽车充满电后最大行驶距离  $d_m = 150$  km。同时考虑对电池的保护,电动汽车一次充电的范围设为70%,则荷电状态范围为20%~90%。当荷电状态达到90%时,认为电动汽车已充满。

$$\delta_{\text{SOC},i}^a = (0.9 - d_i^a/d_m) \times 100\% \quad (7)$$

其中,  $\delta_{\text{SOC},i}^a$  为第  $i$  辆电动汽车返回时的荷电状态;  $d_i^a$  为其一天内的行驶里程。

(3) 电动汽车充电所需时段数。

$$T_i^c = \frac{(\delta_{\text{SOC},i}^r - \delta_{\text{SOC},i}^a) E_{\text{PEV}}}{\Delta t P_{\text{PEV}} \eta} \quad (8)$$

其中,  $T_i^c$  为第  $i$  辆电动汽车充至预期荷电状态  $\delta_{\text{SOC},i}^r$  所需时段数;  $E_{\text{PEV}}$  为电动汽车的电池容量;  $P_{\text{PEV}}$  为电动汽车的充电功率;  $\eta$  为电动汽车充电效率, 本文假设充电效率为 0.95。

## 2.2 充电优化控制目标函数

本文旨在降低配电网损耗  $f_p(t)$  和用户充电成本  $f_c(t)$ , 同时为了促进用户参与无功补偿, 且电动汽车无功补偿无需额外投资, 故目标函数中又包括电动汽车向电网输送无功所产生的收益  $f_d(t)$ 。因各目标量纲不同, 故统一转换为成本的形式如下:

$$\min F_{\text{cost}} = f_p(t) + f_c(t) - f_d(t) \quad (9)$$

$$f_p(t) = \sum_{m=1}^{96} e(t) P_{\text{loss}}(t) \Delta t \quad (10)$$

$$P_{\text{loss}}(t) = \sum_{b=1}^{N-1} \sum_{p=A,B,C} L_b^p(t) \quad (11)$$

考虑到三相不平衡网络线路间自耦与互耦的影响, 式(11)中各支路网损可以通过下式求得:

$$\begin{bmatrix} L_b^A(t) \\ L_b^B(t) \\ L_b^C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{AA} & R_{AB} & R_{AC} \\ R_{BA} & R_{BB} & R_{BC} \\ R_{CA} & R_{CB} & R_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (I_b^A(t))^2 \\ (I_b^B(t))^2 \\ (I_b^C(t))^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$f_c(t) = \sum_{m=1}^{96} \sum_{k=1}^N \sum_{p=A,B,C} e(t) P_{\text{PEV},k}^p(t) \Delta t \quad (13)$$

$$f_d(t) = c \sum_{m=1}^{96} \sum_{k=1}^N \sum_{p=A,B,C} e(t) Q_{\text{PEV},k}^p(t) \Delta t \quad (14)$$

其中,  $F_{\text{cost}}$  为电网损耗成本、用户充电成本以及用户无功补偿收益的总和;  $m$  表示当前所求为第  $m$  个时段;  $e(t)$  为分时电价;  $N$  为网络节点总数;  $P_{\text{loss}}(t)$  为  $t$  时刻网络整体有功损耗;  $L_b^p(t)$  为  $b$  支路  $p$  相的网络损耗;  $R_{AA}$  为 A 相电阻的自耦,  $R_{AB}$  为 AB 相间阻抗, 其余含义类似;  $I_b^p(t)$  为  $b$  支路  $p$  相的电流;  $P_{\text{PEV},k}^p(t)$ 、 $Q_{\text{PEV},k}^p(t)$  分别为  $k$  节点  $p$  相的电动汽车在  $t$  时刻的充电负荷与无功注入; 本文取无功电价为实际有功的 10%, 即  $c=10\%$  [16]。

## 2.3 优化约束条件

为了保证式(9)–(14)所定义优化的实际可行性, 需同时满足以下约束条件。

(1) 节点功率平衡方程约束。

$$-P_{L,k}^p(t) + P_{PV,k}^p(t) - P_{\text{PEV},k}^p(t) + P_{G,k}^p(t) = 0 \quad (15)$$

$$-Q_{L,k}^p(t) + Q_{PV,k}^p(t) + Q_{\text{PEV},k}^p(t) + Q_{G,k}^p(t) = 0 \quad (16)$$

其中,  $P_{L,k}^p(t)$ 、 $P_{PV,k}^p(t)$  和  $P_{G,k}^p(t)$  分别为  $k$  节点  $p$  相在  $t$  时刻的有功负荷、光伏有功出力和电网注入有功;

$Q_{L,k}^p(t)$ 、 $Q_{PV,k}^p(t)$  和  $Q_{G,k}^p(t)$  分别为  $k$  节点  $p$  相在  $t$  时刻的无功负荷、光伏无功出力和电网注入无功。  $P_{G,k}^p(t)$  与  $Q_{G,k}^p(t)$  可分别通过式(17)、(18)求得。

$$P_{G,k}^p(t) = V_k^p(t) \sum_{j=1}^N V_j^p(t) (G_{kj}^p \cos \delta_{kj}^p(t) + B_{kj}^p \sin \delta_{kj}^p(t)) \quad (17)$$

$$Q_{G,k}^p(t) = V_k^p(t) \sum_{j=1}^N V_j^p(t) (G_{kj}^p \sin \delta_{kj}^p(t) - B_{kj}^p \cos \delta_{kj}^p(t)) \quad (18)$$

其中,  $V_k^p(t)$  为  $k$  节点  $p$  相在  $t$  时刻的电压幅值;  $\delta_{kj}^p(t)$  和  $G_{kj}^p + jB_{kj}^p$  分别为  $t$  时刻节点  $k$ 、 $j$  间相角差和支路导纳。

(2) 电压不平衡度约束。

电压不平衡度通常由电压不平衡系数表征, 并定义为电压负序分量与正序分量幅值的比值 [17]。

$$U_k(t) = \left| \frac{V_k^-(t)}{V_k^+(t)} \right| \times 100\% \leq U_{\text{max}} \quad (19)$$

其中,  $U_k(t)$  为  $k$  节点在  $t$  时刻的电压不平衡系数;  $V_k^-(t)$ 、 $V_k^+(t)$  分别为  $k$  节点在  $t$  时刻电压的负序分量和正序分量;  $U_{\text{max}}$  为电压不平衡系数的上限, 本文设定  $U_{\text{max}}=2\%$ 。

(3) 电压幅值约束。

$$\Delta V_k(t) = |V_k(t) - V_N| \leq \Delta V_{\text{max}} \quad (20)$$

其中,  $\Delta V_k(t)$  为  $k$  节点在  $t$  时刻电压幅值的变化量;  $V_N$  为额定电压。根据澳大利亚配电网所属电网的运行规范, 电压幅值变化范围为  $\pm 6\%$  [17], 故本文设定  $\Delta V_{\text{max}}=14.4\text{ V}$  (额定相电压为 240 V)。

(4) 电动汽车荷电状态约束。

$$\delta_{\text{SOC},\text{min}} \leq \delta_{\text{SOC},i} \leq \delta_{\text{SOC},\text{max}} \quad (21)$$

本文设定电动汽车荷电状态  $\delta_{\text{SOC},i}$  的最小值  $\delta_{\text{SOC},\text{min}}$  为 20%, 最大值  $\delta_{\text{SOC},\text{max}}$  为 90%。

## 2.4 优化控制模型求解

式(9)–(21)所定义电动汽车有序充电优化模型的控制变量为各电动汽车的离散充电时刻、电动汽车充电相以及无功出力档位, 是典型的混合整数非线性规划问题。对该优化潮流问题, 本文采用离散粒子群优化 (DPSO) 算法 [18] 和直接潮流 (DLF) 法 [19] 进行联合求解, 其中 DPSO 算法用于搜索可行充电时刻, DLF 法用于对搜索到的时刻进行评估。

### 2.4.1 DPSO 算法

DPSO 算法是在传统粒子群优化算法基础上改进而来的, 约定粒子的位置和速度向量均由 0、1 构成。相比其他算法, DPSO 算法具有更优越的计算速度和收敛能力, 故选作本文电动汽车充电优化控制问题的求解算法。

DPSO 算法的粒子结构示意图如图 2 所示, 图中列代表电动汽车的充电相, 行代表电动汽车的停留时段数, 1、0 分别表示电动汽车在该时刻充电、不充电, 且 1 又分为 5 列, 代表不同的无功出力档位。

以图中粒子为例,粒子的第1行第4列为1,且1中无功出力档位第3列为1,代表电动汽车在时段4的A相进行充电,并且选择无功出力档位为第3档。

	无功出力档位	0	0	1	0	0
A相		1	0	0	1	1
B相		0	1	0	0	0
C相		0	0	0	0	1
		时段1	时段2	时段3	时段4	时段5

图2 DPSO算法的粒子结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of DPSO particle structure

DPSO算法通过判断公式对各时段进行0/1选择,确定电动汽车充电时刻的分布与充电相的选择,且对电动汽车的无功出力档位做出优化,并通过迭代,寻找最优的充电时刻、充电相以及无功出力档位。

#### 2.4.2 配电网DLF法

潮流计算对DPSO算法的性能与应用效果起着关键作用,因每次迭代对所有粒子的评估均通过潮流计算完成。本文采用先进的不平衡配电网DLF法进行求解。DLF法可通过矩阵相乘同时完成经典前推回代潮流的前推和回代过程,且可避免传统算法的如上下三角分解、节点导纳矩阵计算及雅可比矩阵更新等复杂操作。相比其他算法,DLF法具有优越的计算精度和效率,因此获得了广泛关注和应用。更多关于DLF法的内容,可参考文献[19]。

### 3 电动汽车有序充电控制策略

本文基于单相双向电动汽车逆变器模型,可以支持电动汽车在PQ平面的4个象限充放电运行。具体而言,电动汽车返回并接入充电桩后,用户设定的离开时刻、当前荷电状态和目标荷电状态等信息将自动采集至中央协调控制器,中央控制器根据上传信息确定各电动汽车充电策略。在介绍所提充电控制策略之前,首先根据负荷水平将一天分为峰时(17:00—22:00)、谷时(22:00至次日06:00)和平时(06:00—17:00)。这些时段的电价不相同,谷时最低,峰时最高。在此基础上,对比电动汽车停留时段与充电所需时段,可有以下3种情况:

(1)若电动汽车在谷时停留时段数不小于充电所需时段数,则充电时段均匀分布在谷时,充电相和无功出力档位通过灵敏度分析进行确定,具体方法见附录A;

(2)若电动汽车在谷时停留时段数小于充电所需时段数,则谷时全部用于充电,其余充电时段、充电相以及无功出力档位则根据所提优化模型确定;

(3)若电动汽车没有谷时停留时段,则所有充电时段、充电相以及无功出力档位都由所提优化模型

确定。

图3进一步阐明了所提电动汽车充电策略。对于情景1,电动汽车停留时间等于充电所需时间,因此无论峰谷立即充电;对于情景2,谷时停留时段数不小于充电所需时段数,因此所有充电时段均匀分配于谷时;对于情景3,谷时停留时段数小于充电所需时段数,因此谷时停留时段全部用于充电,其余充电时段由所提优化模型确定;对于情景4,所有停留时段都不在谷时,故所有充电时段都由所提优化模型确定。

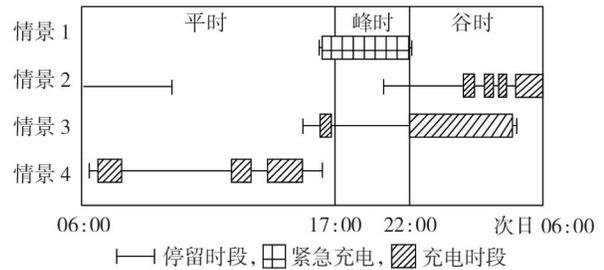


图3 电动汽车充电策略示意图

Fig.3 Demonstration of proposed PEV charging strategy

通过上述策略确定的电动汽车充电序列、充电相以及无功出力的档位均为当前时刻优化的结果。若出现电动汽车的到达与离开,则网络状态会发生变化,将对此时停留的电动汽车进行新的优化,确保优化结果符合当前网络状况。

对于情景3和情景4,部分或全部电动汽车充电时刻需通过有序优化确定。优化流程如附录B中图B1所示,具体步骤如下:

(1)中央控制器采集网络参数,以及当前时刻电动汽车返回或离开的情况;

(2)通过式(6)~(8)对电动汽车出行数据进行预处理,得到充电所需时段数和停留时段;

(3)根据图3确定需要优化的电动汽车;

(4)通过DPSO算法和DLF法联合优化,确定所有电动汽车的充电时段、充电相和无功出力档位。

### 4 仿真实验

#### 4.1 仿真网络

为验证所提基于逆变器无功支撑和三相选择的电动汽车充电控制模型和策略的可行性与有效性,基于澳大利亚某真实配电网开展仿真分析<sup>[20]</sup>。网络接线图见附录C中图C1,415V/240V低压配电网由容量为200kV·A、电压等级为22kV/415V的配电变压器供应,共有101个节点与77家用户,且各用户装有智能电表。其中51家用户单相接入,34家用户装有单相屋顶光伏,光伏接入情况与典型功率曲线见附录C中图C2。由于本文基于不平衡网络模型,图C1中位置由节点和相共同表征,如6B代表位

于6节点B相的单相节点,2代表位于2节点的三相节点。

#### 4.2 仿真场景及参数设置

为验证本文所提电动汽车有序充电控制策略,设置DPSO算法的迭代次数为100,粒子数为20;根据市面电动汽车典型参数,设定电动汽车电池容量为 $20\text{ kW}\cdot\text{h}$ ,恒定充电功率为 $2\text{ kW}$ 。24 h仿真时间窗口选为06:00至次日06:00,电动汽车出行数据见附录D。此外光伏仅作为功率注入考虑,不涉及出力控制,并做如下假设:

(1)根据市场常见车型,电动汽车为 $2\text{ kW}$ 恒功率单相充电,无功出力分为5个档位,分别为0.5、1、1.5、2、2.5 kvar;

(2)电动汽车渗透率设为42%,共50辆电动汽车接入,图C1中红色标记为电动汽车接入点,且参与三相选择的电动汽车均处于三相节点;

(3)对应峰时、谷时和平时,采用该澳大利亚真实配电网所在电网的分时电价,分别为30.64、10.86、20.08 cent / ( $\text{kW}\cdot\text{h}$ );

(4)在电动汽车返回或离开时,中央控制器会自动收集电动汽车出行数据。

本文设置了如下4个仿真案例进行对比分析:

①案例1为电动汽车无序充电,即无论负荷水平如何,电动汽车返回后立即进行充电;②案例2为电动汽车有序充电,但不考虑无功注入和三相选择;③案例3为电动汽车有序充电,仅考虑无功注入,不考虑三相选择;④案例4为电动汽车有序充电,同时考虑无功注入和三相选择。

#### 4.3 仿真结果与分析

鉴于本文所定义充电优化控制模型主要涉及经济性和电网运行水平,故对比分析围绕这2个方面展开。其中,经济性指标如式(9)所示,包括用户网络损耗成本、有功充电成本和无功注入收益;电网运行水平指标如式(19)和式(20)所示,包括电压不平衡度和电压幅值偏移。在电压幅值对比分析时,由于篇幅限制,仅选取负荷和光伏接入最多的C相展示。

4个案例的经济性指标和24 h有功网损分别如表1和图4所示。可以看出,在案例1中,多数用户在晚上回家时(峰时)对电动汽车进行充电,导致负荷进一步增加,并且总成本最高,为 $\$100.41$ ,其中网损成本和充电成本分别为 $\$21.43$ 和 $\$78.98$ ;在案例2中,采用有序充电策略对电动汽车充电时段进行优化分配,总成本显著降低为 $\$62.95$ ,其中网损成本和充电成本分别为 $\$17.35$ 和 $\$45.60$ ,案例2虽然削减了负荷的峰谷差,但没有消除负荷,谷时电能质量可能会变差且有越限风险;案例3在案例2的基础上,在电动汽车充电时提供无功注入,在无功补偿作用下,总成本进一步降低至 $\$57.69$ ,其中网损成本和

充电成本分别 $\$16.65$ 和 $\$45.60$ ,同时用户也会因对网络提供无功服务获得收益 $\$4.56$ ,虽然在案例3中网损成本已经降低,但从图4中仍可看出部分时间点出现了网损增加的现象;案例4在案例3的基础上引入了三相选择,网损成本降低到 $\$15.39$ ,总成本降低到 $\$55.54$ ,进一步降低了网损,提高了电压幅值和降低了电压不平衡度。因案例2—4采用相同的充电策略,故充电成本大致相同。

表1 4个案例的经济性指标对比

Table 1 Comparison of economic indexes among four cases

案例	$f_p / \$$	$f_c / \$$	$f_d / \$$	$F_{\text{cost}} / \$$
1	21.43	78.98	—	100.41
2	17.35	45.60	—	62.95
3	16.65	45.60	4.56	57.69
4	15.39	44.99	4.84	55.54

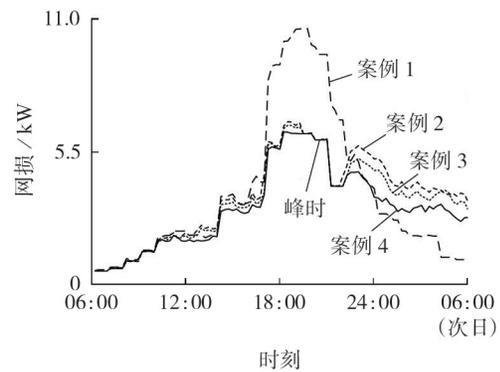


图4 4个案例的24 h有功网损曲线图

Fig.4 Network power loss of four cases within 24 hours

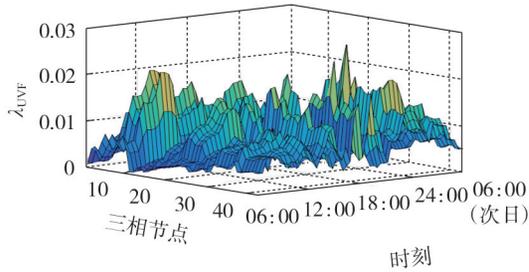
除上述经济性优化外,本文所提电动汽车有序充电策略同时提高了网络运行性能。4个案例的电网运行水平、电压不平衡因子 $\lambda_{\text{UVF}}$ 变化分别如表2和图5所示。可以看出,案例1中,电压下降和不平衡现象较严重,平均电压偏差 $V_{\text{de}}$ (定义见附录E)为 $1331\text{ V}$ ,最小电压为 $219.72\text{ V}$ (超过式(20)的限值 $14.4\text{ V}$ ), $\lambda_{\text{UVF}}$ 最大值为 $2.45\%$ (超过限值 $2\%$ );在案例2中,通过电动汽车有序充电, $V_{\text{de}}$ 减小到 $1208\text{ V}$ ,最小电压增大到 $223.07\text{ V}$ , $\lambda_{\text{UVF}}$ 最大值减小到 $2.29\%$ ;案例3采用无功注入后, $V_{\text{de}}$ 进一步减小到 $1058\text{ V}$ ,最小电压增大到 $225.36\text{ V}$ ;由于电动汽车充电均匀分布于谷时,故在案例2和案例3的谷时, $\lambda_{\text{UVF}}$ 最大值分别为 $2.29\%$ 和 $2.04\%$ ,高于给定限值,为解决该问题,案例4在案例3的基础上引入三相选择来降低 $\lambda_{\text{UVF}}$ ,其最大值减小到 $1.67\%$ , $V_{\text{de}}$ 减小到 $944\text{ V}$ ,最小电压增大到 $226.95\text{ V}$ 。

附录F中图F1给出了4个案例24 h内C相电压幅值的变化。结合表2和图5可知,案例2的电动汽车有序充电改善了峰值的电压水平和三相不平衡度,但在谷时出现了相反的结果;加入无功补偿后的

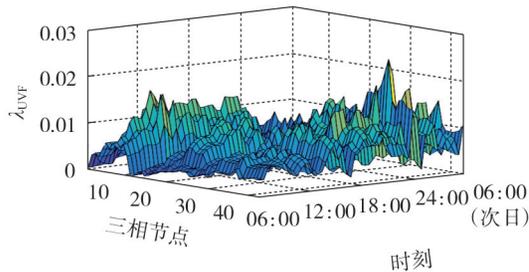
表2 4个案例的电网运行水平对比

Table 2 Comparison of voltage levels among four cases

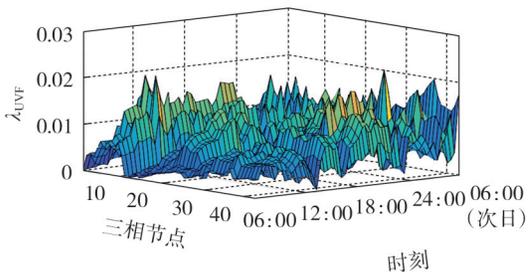
案例	$V_{de}/V$	$\lambda_{UVF}$ 最大值/%	最小电压/V
1	1331	2.45	219.72
2	1208	2.29	223.07
3	1058	2.04	225.36
4	944	1.67	226.95



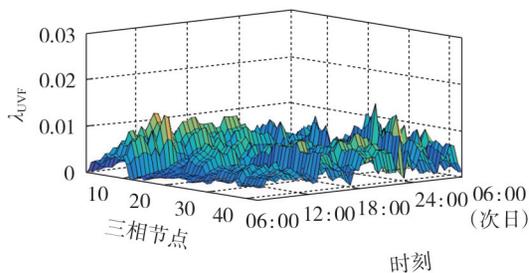
(a) 案例1



(b) 案例2



(c) 案例3



(d) 案例4

图5 4个案例的电压不平衡因子变化

Fig.5 Network VUF profiles of four cases

案例3,电压水平进一步提升,网络损耗下降,但个别时间点的 $\lambda_{UVF}$ 变差;而案例4采用三相选择后, $\lambda_{UVF}$ 得到了明显的改善。

## 5 结论

本文基于逆变器的无功注入和三相选择,提出

了一种新型不平衡主动配电网的电动汽车有序充电控制策略。首先对电动汽车接入节点以及出行数据进行分析,通过对数据进一步处理建立了网损成本、用户充电成本以及无功补偿收益的数学模型,并计及逆变器无功补偿能力与三相选择,提出了一种电动汽车有序充电策略;最后基于澳大利亚某真实配电网进行24 h仿真分析验证。仿真结果表明:本文所提基于逆变器无功能力及三相选择的不平衡主动配电网电动汽车有序充电控制方法是可行且有效的。所提方法能充分兼顾电网和用户需求,降低有功网损、电压三相不平衡度和用户充电成本,并为参与用户带来经济收益;同时利用逆变器闲置容量为电网提供无功支撑,减少了其他设备的投资,降低了充电负荷的不利影响,提升了网络负荷容量及对可再生能源的消纳能力。

现实生活中,实行本文所提电动汽车有序充电策略需要建立相应的无功补偿收益机制,该机制使得用户提供无功补偿时有一定收益,从而促进用户参与到该有序充电策略中。后续工作将对建立无功补偿机制进行研究,并验证该机制的可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 李玉坤. 公安部:全国纯电动汽车保有量已达281万辆[EB/OL]. (2019-07-05)[2020-02-16]. [http://www.caam.org.cn/chn/8/cate\\_82/con\\_5224742.html](http://www.caam.org.cn/chn/8/cate_82/con_5224742.html).
- [2] 杨昕然,吕林,向月,等. “车-路-网”耦合下电动汽车恶劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):102-108,122.  
YANG Xinran, LÜ Lin, XIANG Yue, et al. Degradation charging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under “EV-road-grid” coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 102-108, 122.
- [3] 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.
- [4] 王毅,王飞宏,侯兴哲,等. 住宅区电动汽车充电负荷随机接入控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):59-64.  
WANG Yi, WANG Feihong, HOU Xingzhe, et al. Random access control strategy of charging for household electric vehicle in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 59-64.
- [5] 梅哲,詹红霞,杨孝华,等. 考虑电流保护的配电网电动汽车与分布式能源配合优化运行策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):89-102,181.  
MEI Zhe, ZHAN Hongxia, YANG Xiaohua, et al. Optimal operating strategy of distribution network based on coordination of electric vehicle and distributed energy resource considering current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 89-102, 181.
- [6] 齐先军,李冬伟,纪姝彦. 采用功率限制的住宅区电动汽车有序充电控制策略[J]. 电网技术,2016,40(12):3715-3721.  
QI Xianjun, LI Dongwei, JI Shuyan. A coordinated charging control strategy for electric vehicles in residential area with

- power limitation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3715-3721.
- [7] 崔金栋,罗文达,周念成. 基于多视角的电动汽车有序充放电定价模型与策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4438-4450, 4644.  
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, 4644.
- [8] 苏粟,刘紫琦,王世丹,等. 基于用户驾驶行为特性的电动汽车有序充电策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 63-71.  
SU Su, LIU Ziqi, WANG Shidan, et al. Ordered charging strategy of electric vehicles based on users' driving behavior[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 63-71.
- [9] 师瑞峰,梁子航,马源. 基于TOPSIS方法的居民区电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 141-150, 219.  
SHI Ruifeng, LIANG Zihang, MA Yuan. TOPSIS method based orderly charging strategy for electric vehicles in residential area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 141-150, 219.
- [10] 张怡冰,刘其辉,洪晨威. 基于模糊控制的区域电动汽车入网充放电调度策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 147-153.  
ZHANG Yibing, LIU Qihui, HONG Chenwei. Charging and discharging dispatch strategy of regional V2G based on fuzzy control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 147-153.
- [11] 杨晓东,张有兵,任帅杰,等. 含高渗透率光伏发电并网型微网中的电动汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 15-23.  
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, REN Shuaijie, et al. Optimal scheduling scheme of electric vehicles in grid-connected microgrid with high penetration photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 15-23.
- [12] BARTON J P, INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [13] RESTREPO M, MORRIS J, KAZERANI M, et al. Modeling and testing of a bidirectional smart charger for distribution system EV integration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(1): 152-162.
- [14] SHAHNIA F, WOLFS P, GHOSH A. Voltage unbalance reduction in low voltage feeders by dynamic switching of residential customers among three phases[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1318-1327.
- [15] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2017 national household travel survey[DB/OL]. [2020-02-16]. <http://nhts.ornl.gov/>.
- [16] HASANPOUR S, GHAZI R, JAVIDI M H. Voltage security constrained active and reactive power pricing considering reactive market power[J]. Electrical Engineering, 2013, 95(2): 127-134.
- [17] PILLAY P, MANYAGE M. Definitions of voltage unbalance[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(5): 49-51.
- [18] RAMESHKUMAR K, SURESH R K, MOHANASUNDARAM K M, et al. Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO) algorithm for permutation flowshop scheduling to minimize makespan[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3612: 572-5811.
- [19] TENG J H. A direct approach for distribution system load flow solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 882-887.
- [20] SU X, MASOUM M A S, WOLFS P J. Optimal PV inverter reactive power control and real power curtailment to improve performance of unbalanced four-wire LV distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 967-977.

#### 作者简介:



符 杨

符 杨(1968—),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为变压器故障监测与故障诊断、风力发电与并网技术(**E-mail**:mfudong@126.com);

孟祥浩(1994—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车有序充电控制、不平衡主动配电网(**E-mail**: mengxh6162@163.com)。

(编辑 李莉)

## Coordinated charging control of PEV considering inverter's reactive power support and three phase switching in unbalanced active distribution networks

FU Yang, MENG Xianghao, SU Xiangjing, MI Yang, TIAN Shuxin

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

**Abstract:** Current studies of PEV (Plug-in Electric Vehicle) coordinated charging control mainly focus on the shifting feature of charging instead of eliminating, and the risk of worse operation still exists. Also existing studies on PEV charging are commonly based on three-phase balanced network model, but practical distribution networks are obviously unbalanced. A novel coordinated strategy of PEV charging in unbalanced distribution networks is proposed based on the inverter's reactive power support and three phase switching. A multi-objective optimization model of PEV charging is firstly proposed to minimize network loss, charging cost while maximizing user benefit from providing ancillary reactive service. Secondly, a coordinated control strategy of PEV considering the inverter's reactive power support and three phase switching is presented to improve the network operation within 24 hours. Finally, detailed simulations based on a real Australian distribution network verify the correctness and effectiveness of the proposed coordinated PEV charging model and strategy.

**Key words:** electric vehicles; coordinated charging; three phase switching; reactive power support; active distribution network

## 附录 A

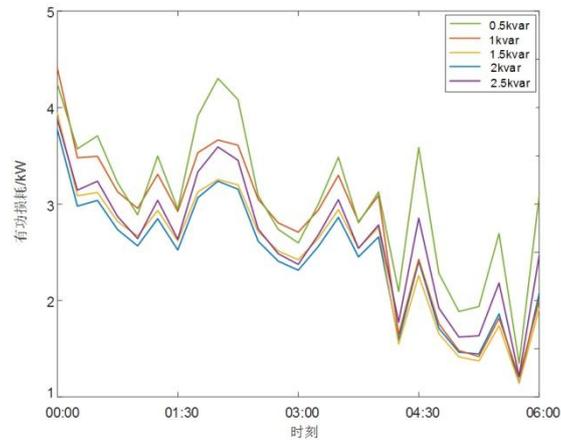


图 A1 无功出力档位网损对比

**Fig.A1 Comparison of network loss of reactive power output gear**

由本文充电策略可知，非谷时充电的电动汽车，充电时段与无功出力档位通过共同的优化确定，而谷时充电的电动汽车无功出力档位由灵敏度选择确定。由图 A1 可知，00:00—04:00，电动汽车无功出力为 2 kvar 时的有功损耗最小，且相关网络电能指标相对最优；04:00—06:00，电动汽车无功出力为 1.5 kvar 时的有功损耗最小，且相关网络电能指标相对最优。因此通过灵敏度选择，该电动汽车在 00:00—04:00 期间无功出力档位为 2 kvar, 04:00—06:00 期间无功出力档位为 1.5 kvar。充电相灵敏度选择同理。图 A1 仅为示例，与文中仿真无关。

## 附录 B

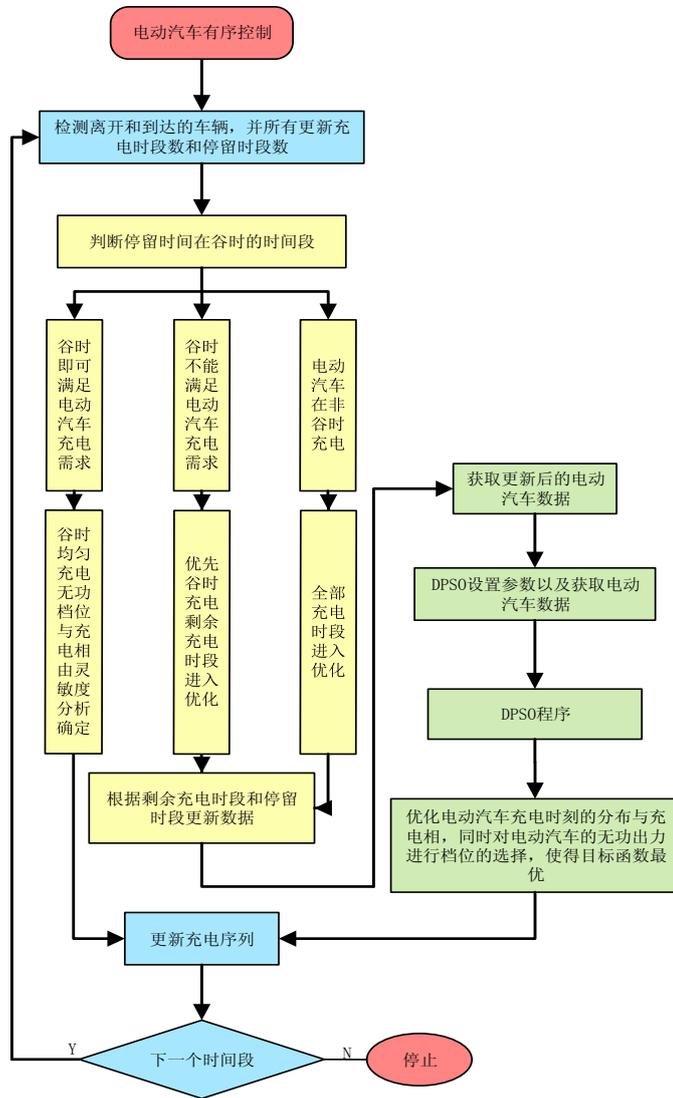


图 B1 电动汽车有序充电路程图

Fig.B1 Flowchart of coordinated charging strategy of PEV

### 附录 C

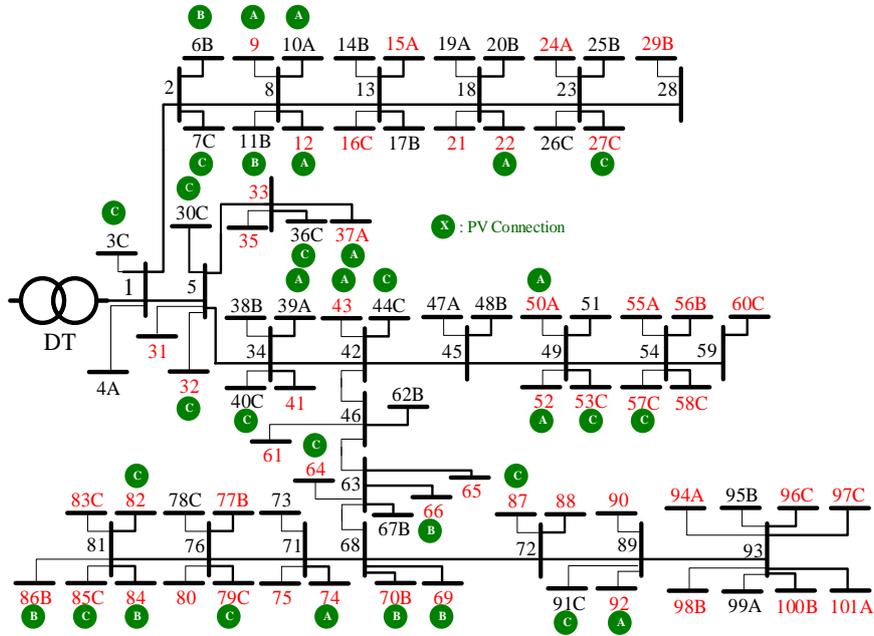


图 C1 澳大利亚配电网 415 V /240 V 101 节点测试网络

Fig.C1 415 V /240 V 101-bus Australian distribution network

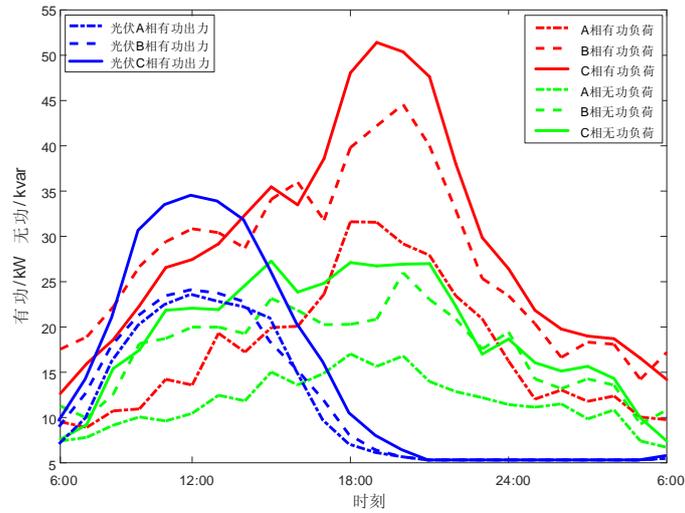


图 C2 仿真网络三相日负荷曲线与光伏出力情况

Fig.C2 Daily load and PV profiles of simulation network

## 附录 D

表 D1 电动汽车出行数据

Table D1 Travel data of PEV

电动汽车编号	开始充电时间	结束充电时间	返回时 SOC/%	电动汽车编号	开始充电时间	结束充电时间	返回时 SOC/%
1	09:57	14:35	75.40	26	18:20	08:22	58.07
2	09:31	14:41	74.89	27	18:29	08:15	57.59
3	23:26	12:17	74.86	28	18:15	08:26	57.51
4	11:46	18:54	74.25	29	17:46	08:50	57.49
5	13.:12	20:03	73.48	30	17:26	09:04	56.92
6	10:29	17:42	72.79	31	17:29	08:55	56.32
7	07:31	15:11	69.82	32	17:07	09:17	56.01
8	22:17	12:41	69.47	33	17:08	09:11	55.92
9	12:04	19:53	68.90	34	16:55	09:39	55.89
10	22:13	12:45	68.12	35	16:59	09:37	55.82
11	21:59	12:47	64.70	36	12:29	01:47	55.35
12	13:16	21:38	62.19	37	16:05	09:46	55.04
13	21:14	12:50	61.96	38	15:41	09:55	54.82
14	20:50	14:08	61.45	39	15:45	09:52	54.19
15	20:52	14:01	61.35	40	12:22	02:52	53.89
16	20:56	13:23	60.36	41	15:08	10:24	53.81
17	20:58	13:14	59.86	42	12:19	03:21	53.72
18	13:26	22:58	59.44	43	14:46	10:48	53.70
19	20:11	14:09	59.43	44	14:52	10:38	53.17
20	06:01	16:59	59.27	45	14:55	10:38	52.43
21	19:01	07:55	23.16	46	14:58	10:36	52.41
22	19:06	07:46	18.77	47	14:37	11:17	51.01
23	19:10	07:29	58.30	48	14:43	10:50	46.95
24	19:19	07:03	58.10	49	14:19	11:45	58.97
25	18:50	07:55	58.08	50	13:54	12:09	58.56

值得注意的是，由于电动汽车每日行驶里程较短，因此作者对电动汽车行驶里程进行了一定比例的扩大。

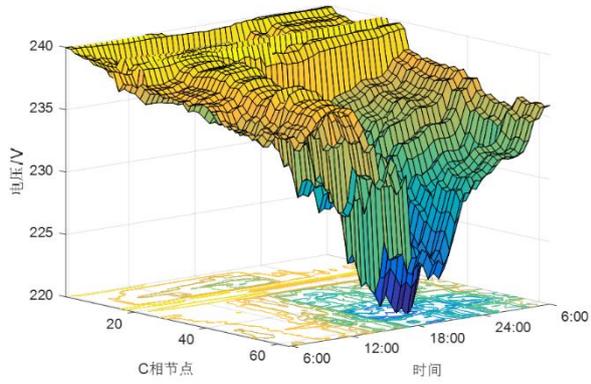
## 附录 E

本研究将电压偏差定义为 96 个时段中各相位电压(绝对值)与额定电压差值的平均值，即每个时段的平均电压偏差，具体表达式如下：

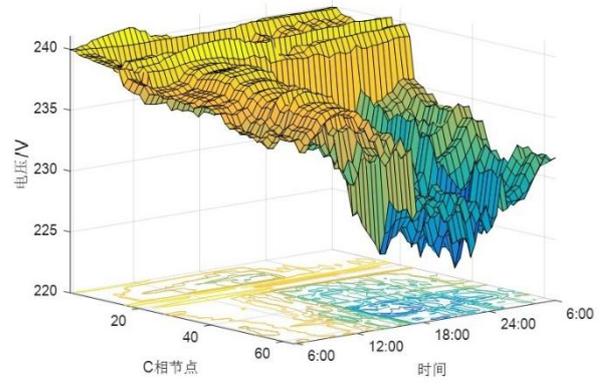
$$V_{de} = \left( \sum_{m=1}^{96} \sum_{k=1}^N \sum_{p=A,B,C} |V_k^p - 240| \right) / 96$$

其中， $V_{de}$  为平均电压偏差； $V_k^p$  为  $k$  节点  $p$  相电压。

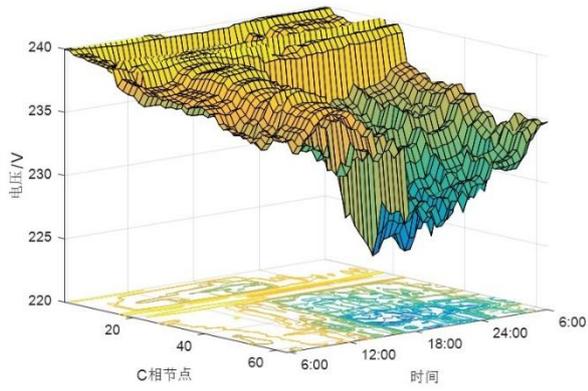
附录 F



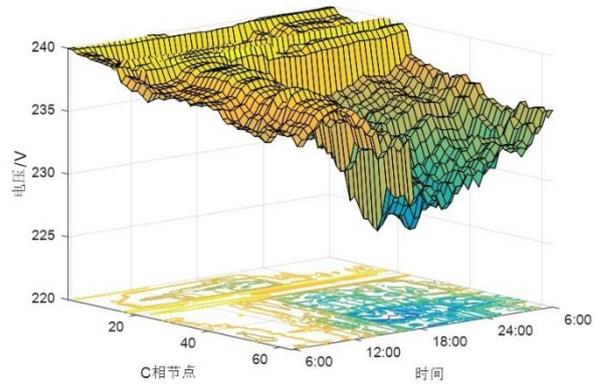
(a) 案例 1



(b) 案例 2



(c) 案例 3



(d) 案例 4

图 F1 4 个案例的 C 相电压幅值变化

Fig.F1 Phase-C voltage profiles of four cases