

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211501

# 计及大规模电动汽车接入的配电网故障分析方法

胡思洋<sup>1</sup>, 杨健维<sup>2</sup>, 廖凯<sup>2</sup>, 李波<sup>2</sup>, 杨威<sup>3</sup>

(1. 西南石油大学工程训练中心, 四川 成都 610500; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;  
3. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 电动汽车保有量不断增加, 故障发生时, V2G 模式下电动汽车的放电电流会干扰配电网原有的故障电流, 使配电网故障电流复杂多变且不易分析, 传统的故障分析方法已难以适用。提出了一种计及大规模电动汽车接入的配电网故障分析方法。首先分析了电动汽车对配电网故障电流的影响程度。其次采用基于马尔科夫链的车辆转移矩阵对电动汽车出行行为进行模拟。然后结合电动汽车充放电规则, 以电源出力的形式描述电动汽车的放电行为, 建立了电动汽车放电等值电源模型。最后, 以三相短路故障为例, 基于有源配电网的故障分析方法对含大量电动汽车的配电网进行故障分析, 得到了配电网各支路故障电流的时域变化特征。该分析方法建立的电动汽车放电等值电源模型能够体现电动汽车的放电特征, 故障电流的分析结果能直观反映电动汽车放电行为对配电网各支路故障电流的影响程度和特征, 可为含大量电动汽车的配电网保护整定方法提供理论依据。

**关键词:** 配电网; 电动汽车; 等值模型; 故障分析

## Fault analysis method for an urban distribution network considering large-scale electric vehicle access

HU Siyang<sup>1</sup>, YANG Jianwei<sup>2</sup>, LIAO Kai<sup>2</sup>, LI Bo<sup>2</sup>, YANG Wei<sup>3</sup>

(1. Engineering Training Center, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;  
2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;  
3. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The number of electric vehicles (EVs) is increasing. In the event of a fault, the discharge current of EVs in V2G mode will interfere with the original fault current of the distribution network (DN). This will make the fault current of the DN complex and difficult to analyze. Therefore, the traditional methods of fault analysis are hardly applicable. A fault analysis method of the DN considering the access of large-scale EVs is proposed. First, the influence of EVs on the fault current of the DN is analyzed. Secondly, the vehicle transfer matrix based on Markov chain is used to simulate travel behaviors of EVs. Then, combined with the charging-discharging rules of EVs, the discharge behavior of EVs is described in the form of power output, and the discharge equivalent power supply model of EVs is established. Finally, taking a three-phase short-circuit fault as an example, the fault analysis of a DN with a large number of EVs is carried out based on the fault analysis method of an active DN, and the time-domain variation characteristics of fault current of each branch of DN are obtained. The discharge equivalent power supply model of EVs can reflect their discharge characteristics. The analysis results of fault current can directly describe the influence degree and characteristics of EV discharge behavior on the fault current of each branch of a DN. They can also provide a theoretical basis for the protection setting method of a DN with a large number of EVs.

This work is supported by the Science and Technology Project of Sichuan Province (No. 2020YFSY0037).

**Key words:** distribution network; electric vehicle; equivalent model; fault analysis

## 0 引言

能源危机和环境污染问题日趋严重, 电动汽车

的逐渐普及能够有效缓解能源和环境问题, 其保有量在国家政策的大力支持下大幅度增加, 我国已逐渐占据世界上最大的电动汽车市场<sup>[1]</sup>。截至 2019 年底, 我国新能源汽车总量已达 381 万辆, 相较 2018 年同期, 增长率达到了 46%, 纯电动汽车数量达到 310

万辆,占新能源汽车总数的81.19%,较上一年同期增加100万辆,呈现出快速增长的趋势。预计至2030年,我国电动汽车数量将占据汽车总量的50%。可以预见,配电网将出现大规模电动汽车接入的新形态。然而大规模接入的电动汽车会威胁配电网的安全稳定运行<sup>[2-4]</sup>,大量接入的电动汽车将改变配电网的源荷组成,使故障特征复杂多变,传统的故障分析方法已经难以适用。准确有效的故障分析方法对配电网的保护整定至关重要,是保障配电网的安全可靠运行的关键,因此研究新的考虑大规模电动汽车接入的配电网故障分析方法意义重大。

电动汽车不同于传统负荷,其具有源荷二象性,在充电模式下可等效为接入配电网中的负荷,在放电模式下可借助城市中各区域停车场内集中安置的充电桩,以集中放电的方式向配电网放电,如果能够使电动汽车的集中放电充分有效地服务于配电网(Vehicle-to-Grid, V2G),将能减小能源开发所造成的环境污染,并有效缓解城市负荷曲线峰谷差大的问题<sup>[5]</sup>。然而集中放电的电动汽车总体接入容量大,大规模的电动汽车放电行为将扰乱配电网中原有的潮流分布,对配电网的潮流分析造成不可忽视的影响<sup>[6-7]</sup>。同时电动汽车的大量接入会改变配电网的电源结构,将其由传统的单辐射网络变为多源网络,进而改变故障时配电网的故障电流分布与走向,影响现有的继电保护系统,甚至造成配电网中继电保护的拒动或误动<sup>[8-11]</sup>。电动汽车高度随机的时空分布特征也增加了研究电动汽车对配电网影响工作的难度。

对于上述情景,传统的故障分析和保护整定方法已难以满足新形势下配电网的安全需求,需要研究计及电动汽车放电影响的配电网故障分析方法。充电状态下的电动汽车几乎不会影响配电网原有的故障特性,因此在故障情况下,仅考虑放电的电动汽车对配电网故障特性造成的影响。目前针对性的研究较少,文献[12]以高渗透率的分布式电源和电动汽车接入的配电网为研究对象,从系统经济性的角度展开研究与讨论,提出了计及分布式电源和电动汽车特性的配电网规划方案,但未考虑电动汽车入网对配电网稳定运行的影响;文献[13]提出一种“车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测模型,研究了电动汽车充电负荷对配电网潮流的影响,文献[14]针对电动汽车充/放电对有源配电网电压冲击问题,基于概率潮流方法,研究多时段及变量相关情形下电动汽车充/放电策略对有源配电网电压水平的影响,但没有研究放电的电动汽车对配电网故障的影响;文献[15]以分布熵来量度由电动汽车

大规模入网引起的配电网状态变量分布不确定性带来的风险,但没有考虑到在故障环境下,电动汽车放电行为对配电网原本故障特性的影响。上述文献在分析电动汽车的随机性时,角度较为宏观,未体现电动汽车的时空分布特性。

针对上述研究中存在的问题,本文根据电动汽车通过停车场内的充电桩进行集中放电的特征,以电源出力的形式描述电动汽车的放电行为,建立电动汽车放电等值电源模型,将电动汽车大规模接入的配电网类比为有源配电网。

在电动汽车的出行与充放电行为建模方面,目前已有较为成熟的研究可供参考,文献[16]采用了优先搜索和随机出行链,确定了电动汽车的出行路径,并通过对电动汽车的出行与停放进行模拟,建立了电动汽车换电需求时空分布的概率模型;文献[17]分析了不同季节下用户的出行规律,提出了考虑季节因素的电动汽车充电负荷建模方法;文献[18]考虑了城市不同功能区的特征,模拟了电动汽车在城市各时段各区域的出行行为,提出了一种基于改进重力模型的电动汽车负荷时空分布建模方法;通过模拟电动汽车的出行,可掌握电动汽车的停车行为,停驻在各场所放电的电动汽车具有很大的潜力参与电力系统需求响应服务<sup>[19]</sup>。上述文献通过模拟电动汽车的出行行为,对电动汽车的时空分布和用电需求进行仿真,建立了电动汽车负荷模型,基于此建模思想,本文建立了电动汽车放电等值电源模型,用于讨论电动汽车对配电网故障电流带来的随机性影响。

对于有源配电网系统,文献[20]介绍了一种含逆变型分布式电源的配电网故障分析方法,进行了单辐射网络转化为多源网络后的配电网故障特性分析;文献[21]建立了含逆变型分布式电源的配电网模型,模拟了故障场景,并对故障特性进行了分析;文献[22]建立了故障下多类型分布式电源的等效模型,并分析了含多类型分布式电源的配电网故障电流瞬态特征。但此类研究无法体现电动汽车放电的随机性与离散性对系统带来的不确定性。

本文将电动汽车大规模接入的配电网类比为有源配电网,参考有源配电网的故障分析方法,提出了一种适用于含大规模电动汽车的配电网故障分析方法。首先,分别针对辐射型和环网型配电网,分析了电动汽车放电行为对配电网故障电流的影响程度;其次,由基于马尔科夫链的车辆转移矩阵描述某地区内所有电动汽车的出行行为;然后,用蒙特卡洛法研究所有电动汽车在一天中各时刻所在区域及充放电状态,用电源出力的形式描述电动汽车的

放电行为,建立了电动汽车放电等值电源模型;最后,以三相短路故障为例,采用有源配电网的故障分析方法,分析了含大规模电动汽车的配电网故障电流,获得了在电动汽车放电影响下的配电网各支路的故障电流。

本文的研究能够针对电动汽车放电对配电网故障特性的影响问题进行分析,解决了传统故障分析方法难以适用于电动汽车大规模接入的配电网故障分析的问题,分析获得的故障电流可服务于含大量电动汽车的配电网保护整定方法的研究。

## 1 电动汽车放电行为对配电网故障电流的影响分析

配电网故障电流大小由故障类型、配电网网架结构、线路阻抗、变压器容量等因素共同决定。在配电网网架结构领域,部分发达国家和国内部分发达地区的配电网已采用多方向互联的环网型结构,巴黎城区 20 kV 配电网采用了三环网的供电方式,新加坡 22 kV 配电网网架结构呈花瓣形<sup>[23]</sup>,巴黎城区与新加坡供电可靠率均已超过 99.999%;在国内,上海目前正在打造“钻石型”配电网<sup>[24]</sup>,2018 年,“钻石型”配电网在西虹桥地区进行试点应用,使该地区供电可靠率达到 99.999%。此外,灵活互联的配电网网架结构是近年来提出的泛在电力物联网、电网智能化建设的基础。由此推测,虽然目前国内配电网结构多为辐射型,但为提高配电网供电可靠性与智能化程度,多向互联的环网型结构将是配电网网架的发展趋势。

本节分别针对辐射型和环网型结构的配电网,讨论电动汽车放电行为对其故障电流的影响。

### 1.1 电动汽车放电行为对辐射型配电网故障电流的影响

参考 IEEE33 节点系统的网架结构,设定变压器位于 0 号节点,在如图 1 所示位置发生三相短路故障。

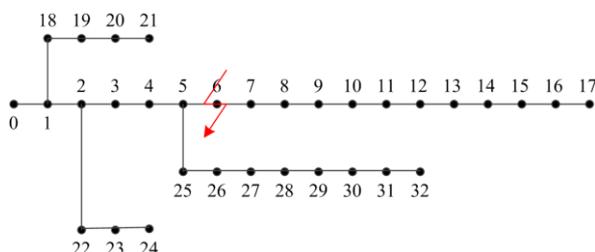


图 1 辐射型配电网短路场景示意图

Fig. 1 Schematic diagram of short circuit scenario of radial distribution network

此时,从变压器到故障点间的线路可由图 2 表示。

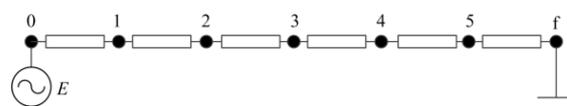


图 2 辐射型配电网故障线路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fault line of radial distribution network

短路故障电流可视为在故障点处注入电流  $-I_f$ ,由基尔霍夫电压定律和节点阻抗矩阵可知,系统中任一点  $i$  的电压  $U_i$  为

$$U_i = \sum_{j \in G} Z_{ij} I_j - Z_{if} I_f \quad (1)$$

式中:  $G$  为有源节点集合;  $Z_{ij}$  和  $Z_{if}$  分别为节点  $i$  与有源节点和节点  $i$  与故障点间的节点阻抗矩阵。

在图 2 所示的故障场景中,有源节点为 0 号节点,该节点电压为系统电势,故障线路不含支路,因此  $I_j$  与  $I_f$  相等。结合欧姆定律对式(1)进行变形,可推导出图 2 场景中的系统短路电流表达式如式(2)所示。

$$I_{f1} = \frac{E_\varphi}{Z_s + Z_{0f}} \quad (2)$$

式中:  $I_{f1}$  为系统短路电流;  $E_\varphi$  为系统电源的相电动势;  $Z_s$  为系统阻抗;  $Z_{0f}$  为变压器至故障点间的线路阻抗。

在实际线路中,由于变压器有容量限制,因此系统最大短路电流为变压器能够提供的最大短路电流,变压器短路容量可由式(3)计算。

$$S_f = \frac{S}{U_k} \quad (3)$$

式中:  $S_f$  为变压器短路容量;  $S$  为变压器额定容量;  $U_k$  为变压器短路阻抗百分数。因此,变压器输出的最大短路电流为短路场景下变压器对二次侧提供的最大电流,可由式(4)计算。

$$I_{f2} = \frac{S_f}{\sqrt{3}U_2} \quad (4)$$

式中:  $I_{f2}$  为变压器输出最大短路电流;  $U_2$  为变压器二次侧电压。

综上,系统实际短路电流  $I_f$  可表示为式(5)。

$$I_f = \begin{cases} I_{f1} & I_{f1} < I_{f2} \\ I_{f2} & I_{f1} > I_{f2} \end{cases} \quad (5)$$

参考实际变压器的参数,设定变压器额定容量为 15 MVA,变比为 35 kV/10 kV,变压器短路阻抗

百分数为 6%，由式(3)、式(4)可求得此时变压器可提供的最大短路电流为 14.4 kA，即系统线路最大短路电流为 14.4 kA，由于此时网架结构为辐射状，因此故障支路的短路电流为 14.4 kA。

当电动汽车进行放电时，电动汽车通过充电桩向电网送电，其电流大小与充电电流一致，根据国标 GB/T 18287.1-2015 中的规定，电动汽车交流充电电流为 16~32 A，因此认为单台电动汽车放电电流为 16 A。大型停车场拥有上千个停车位，当 100 辆电动汽车集中放电时，约产生 1.6 kA 电流，此时电动汽车集中放电的电流约为故障支路短路电流的 11.1%，对故障支路短路电流的影响较小。

### 1.2 电动汽车放电行为对环网型配电网故障电流的影响

参考 IEEE14 节点系统的网架结构，设定变压器位于 3 号节点，在如图 3 所示位置发生三相短路故障。

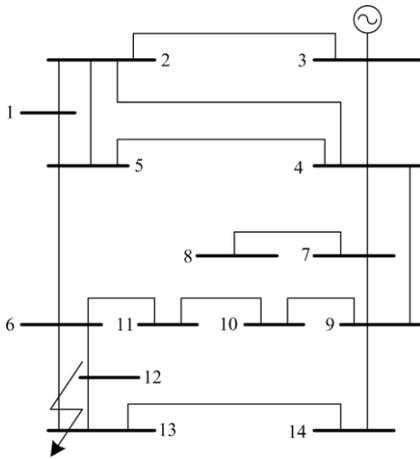


图 3 环网型配电网短路场景示意图

Fig. 3 Schematic diagram of short circuit scenario of ring network distribution network

此时，对电路进行等效，得到从变压器到故障点间的电路结构如图 4 所示，其中红色支路为与故障点直接连接支路。

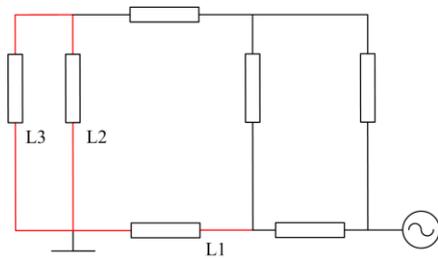


图 4 辐射型配电网故障线路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fault line of ring distribution network

图 4 中变压器的参数设定与 1.1 节中相同，因此变压器提供的最大短路电流为 14.4 kA。图 4 中故障支路为 L1、L2、L3，由基尔霍夫电流定律可知，流入故障点的电流与流出故障点的电流相等，可推导得到式(6)。

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = I_f \quad (6)$$

同时，系统短路电流全部由变压器提供，可得式(7)。

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = I_{f2} \quad (7)$$

结合式(7)可知，在变压器输出最大短路电流的情况下，图 4 中各故障支路的平均短路电流为 4.8 kA，每条故障支路的具体短路电流取决于线路阻抗。以短路电流平均值为例，当支路短路电流为 4.8 kA 时，100 辆电动汽车集中放电产生 1.6 kA 的电流，约为故障支路短路电流的 33.3%，此时电动汽车放电行为对故障支路短路电流的影响较大。

综上所述，电动汽车的集中放电会对配电网故障支路的短路电流造成影响。环网型配电网由于存在并联结构，故障支路短路电流较小，短路电流受电动汽车放电影响的程度大于辐射型配电网。未来为提高配电网供电可靠性，并增强对新能源、电动汽车的接纳能力，配电网网架将向多向互联的环网型结构发展，因此，对受电动汽车放电影响的配电网进行故障分析是有必要的。

## 2 电动汽车出行行为建模

电动汽车的充放电行为与其出行规律密切相关<sup>[25-27]</sup>，本节以电动汽车出行行为作为研究对象，首先由相应的概率密度函数确定电动汽车的出发与返回时间，进而根据基于马尔科夫链<sup>[28-29]</sup>的车辆转移矩阵描述一辆电动汽车一天内的行程，再由蒙特卡洛法<sup>[30-31]</sup>模拟出地区内所有电动汽车的行程，得到设定地区内所有电动汽车在一天中各个时刻所处的区域，建立了电动汽车出行行为的数学模型。

### 2.1 电动汽车出行始末时刻统计

由美国的交通部调查数据(National Household Travel Survey, NHTS)<sup>[32-33]</sup>和文献[34]中的数据拟合方法可知，在电动汽车的出行过程中，车辆的出发和返回时刻服从对数正态分布，相应的概率密度函数如式(8)和式(9)所示。在电动汽车出行行为的模拟中，以式(8)和式(9)为依据，确定电动汽车的日出发与返回时间。

车辆日出发时刻  $t_1$  对应概率密度函数  $f(t_1)$ 。

$$f(t_1) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(t_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}], & 0 < t_1 \leq \mu_1 + 12 \\ \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(t_1 - 24 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}], & \mu_1 + 12 < t_1 \leq 24 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_1 = 9.24; \sigma_1 = 3.16$$

式中:  $t_1$  为车辆日出发时刻;  $\mu_1$  表示调查车辆日出发时刻的均值;  $\sigma_1$  表示日出发时刻的标准差。

由式(8)可知, 电动汽车的日出发时刻均值为 09:14, 标准差为 3 小时 10 分钟。

车辆日返回时刻  $t_2$  对应概率密度函数  $f(t_2)$ 。

$$f(t_2) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(t_2 + 24 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}], & 0 < t_2 \leq \mu_2 - 12 \\ \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(t_2 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}], & \mu_2 - 12 < t_2 \leq 24 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_2 = 17.6; \sigma_2 = 3.4$$

式中:  $t_2$  为车辆日返回时刻;  $\mu_2$  表示调查车辆日返回时刻的均值;  $\sigma_2$  表示日返回时刻的标准差。

由式(9)可知, 电动汽车的日返回时刻均值为 17:36, 标准差为 3 小时 24 分钟。

## 2.2 基于马尔科夫链的车辆转移概率矩阵

NHTS 将车辆出行目的地划分为 10 类, 分别为居住区、工作区、学校/日托/宗教活动区、医疗区、购物区、社交区、家庭私事区、接送区、就餐区和其他, 考虑用户前往部分地区的频率及停车时长较为相近, 为简化模型, 参考文献[35]中的区域划分方法, 将这 10 类区域进一步归类为 6 个类别, 即住宅区、工作区、教学区、社交区、购物区和其他。研究表明电动汽车下一时刻去往各区域的概率仅取决于当前时刻及所在区域, 与之前各时刻及所在区域无关, 因此引入马尔科夫链描述车辆在区域间的移动行为。

马尔科夫链是按条件概率相互依赖的随机过程, 并满足式(10)的关系。

$$p(X_{t+1} | X_t, X_{t-1}, \dots, X_1) = p(X_{t+1} | X_t) \quad (10)$$

马尔科夫链具备“无记忆性”, 表现为下一步的随机变量  $X_{t+1}$  在给定其当前步随机变量  $X_t$  后与其余的随机变量条件独立, 即下一刻的状态仅与当前状态有关。对于电动汽车出行行为, 电动汽车下一时刻所在区域仅取决于当前所在区域及当前时刻, 此特性与马尔科夫链的“无记忆性”高度统一, 故选

用基于马尔科夫链的方法描述电动汽车出行行为。

NHTS 统计了各个时刻以不同区域作为起点的车辆转移频率, 结合马尔科夫链的特性, 得出随时刻变化的转移频率矩阵, 由于 NHTS 的统计数据规模足够大, 此转移频率可认为是车辆的转移概率。因此车辆转移概率矩阵如式(11)所示。

$$P_k = \begin{bmatrix} P_{k,1,1} & P_{k,1,2} & L & P_{k,1,6} \\ P_{k,2,1} & P_{k,2,2} & L & P_{k,2,6} \\ M & M & M & \\ P_{k,6,1} & P_{k,6,2} & L & P_{k,6,6} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, 元素  $P_{k,i,j}$  表示在第  $k$  时刻, 车辆由第  $i$  区域转移到第  $j$  区域的概率,  $0 \leq P_{k,i,j} \leq 1$ 。该矩阵每行元素之和为 1, 24 个这样的矩阵可描述车辆在一天中各个时刻在各个区域间转移的概率。在转移时长方面, 由于在市区活动的车辆在两地点间的行驶时长一般不超过 1 h, 因此以小时为时间节点, 车辆在  $k$  时刻和  $k+1$  时刻所处地点间的行程, 可在  $k$  时刻到  $k+1$  时刻期间完成。由 NHTS 调查数据可知, 电动汽车完成一次区域转移后, 进行一段时长的停车, 车辆的单次停车时长  $t_3$  服从对数正态分布, 其概率密度函数如式(12)所示。

$$f(t_3) = \frac{1}{t_3 \sigma_3 \sqrt{2\pi}} \exp[-\frac{(\ln t_3 - \mu_3)^2}{2\sigma_3^2}], \quad 0 \leq t_3 \leq 1440 \quad (12)$$

$$\mu_3 = 47.2; \sigma_3 = 1.21$$

式中:  $t_3$  为车辆单次停车的时长;  $\mu_3$  表示调查车辆单次停车时长的平均值为 47.2 min;  $\sigma_3$  表示调查车辆单次停车时长的标准差为 1.21 min。

## 2.3 电动汽车出行行为建模

基于上述研究, 本文建立的电动汽车出行行为的数学模型可由如下步骤得到。

Step1: 由式(8)和式(9)确定一辆电动汽车的出发和返回时间;

Step2: 由车辆的出发时刻开始, 将住宅区作为初始区域, 由式(11)确定该车辆的目的地, 即在式(11)中,  $k$  为当前时刻,  $i$  为车辆当前位置, 由  $P_{k,i,j}$  的概率值确定下一时刻车辆所在区域  $j$  为何种区域;

Step3: 由式(12)确定车辆在到达目的地后的停车时长;

Step4: 判断停车时间结束后是否已经到达返回时间;

Step5: 若此时已到达返回时间, 则由此刻至 24:00 车辆所在区域均为住宅区, 若此时未到返回

时间, 则由式(11)确定车辆的下一个目的地, 重复 Step3—Step5 直至到达车辆返回时间;

Step6: 用蒙特卡洛法将 Step1—Step5 重复  $n$  次, 得到  $24 \times n$  的矩阵表示设定地区内  $n$  辆车在一天中各时刻所处的区域。

上述步骤可由附图 1 所示流程图描述。依此步骤可得  $24 \times n$  的矩阵, 描述地区内所有电动汽车在一天中各个时刻所处位置, 矩阵中的元素表示车辆所在位置, 以此刻画电动汽车的出行行为。

### 3 电动汽车放电等值电源模型建模

由电动汽车的出行行为可以得到车辆在各个时刻的行驶里程, 进而得到车辆在各时刻的荷电状态(State of Charge, SOC), 并以此作为电动汽车进行充放电的调度依据。将某时刻在某区域通过充电桩放电的电动汽车集合作为位于该区域的电源, 并以集合电源输出功率的形式描述该时刻在该区域放电的所有电动汽车的总放电功率, 建立电动汽车放电等值电源模型, 以此来刻画电动汽车在放电时刻对配电网的电能输出。

#### 3.1 电动汽车的荷电状态建模

目前, 各类电动汽车的慢充时间为约 6~8 h, 在一般用户的当天行程结束至次日行程开始的中间时段内均能充满, 因此本文设定所有电动汽车在每日出行前的 SOC 均为 100%, 根据一天中车辆的出行用电和充放电规则, SOC 发生相应变化。本文研究的侧重点在于电动汽车放电行为对配电网故障的影响, 需模拟电动汽车放电行为, 电动汽车的充放电规则及此规则对用户收益的影响和配电网故障之间没有直接关系, 因此在考虑充放电规则时, 本文设计了一简单规则以凸显电动汽车的充放电行为。对于任何电动汽车充放电优化策略, 在模拟出其引导下的电动汽车放电行为后, 均可代入本文模型进行分析。

由于频繁切换充放电状态会加剧电池组内部的不一致性, 减少电动汽车电池的使用寿命<sup>[36]</sup>, 因此本文设计如图 5 所示的充放电曲线作为电动汽车的充放电调度规则。此规则仅根据车辆的 SOC 来切换车辆的充放电模式, 因此只拥有一条坐标轴, 为

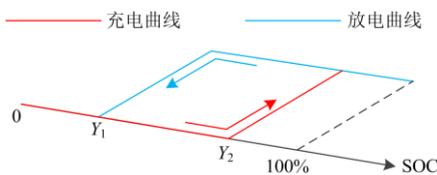


图 5 电动汽车充放电曲线

Fig. 5 Charge discharge curve of electric vehicle

便于观察, 将曲线以平面图的形式呈现, 并将位于坐标轴上的充放电曲线拉伸至坐标轴外。

此规则根据电动汽车的 SOC 定义了两个模式, 当 SOC 值高于放电阈值( $Y_1$ )时, 电动汽车进入放电模式( $S=1$ ), 开始放电; 当 SOC 值低于放电阈值( $Y_1$ )时, 电动汽车进入充电模式( $S=2$ ), 开始充电, 且在 SOC 值达到充电阈值( $Y_2$ )之前不参与放电。处于充电模式下的车辆不会参加放电工作, 处于放电模式下的车辆不会进行充电工作, 此规则可有效降低电动汽车充放电状态的切换频率, 保护电池的使用寿命。电动汽车的充放电调度以不影响车主正常出行原则, 因此所有的充放电行为均在电动汽车停车时进行。

电动汽车在运行过程中,  $t$  时刻的 SOC 值由车辆的充电、放电、行驶耗电以及上一时刻的 SOC 值决定, 表达式如式(13)所示。

$$S_{OC,t} = \begin{cases} S_{OC,t-1} - \frac{P_f}{Q}, & d_{is,t-1} = 0, S = 1, t_{d1} \leq t \leq t_{d2} \\ S_{OC,t-1} + \frac{P_c}{Q}, & d_{is,t-1} = 0, S = 2, t_{d1} \leq t \leq t_{d2} \\ S_{OC,t-1} - \frac{d_{is,t-1} \cdot W_{100}}{100Q}, & d_{is,t-1} \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $S_{OC,t}$  和  $S_{OC,t-1}$  分别表示  $t$  时刻和  $t-1$  时刻电动汽车的 SOC 值;  $P_f$  和  $P_c$  分别表示电动汽车的放电功率和充电功率;  $t_{d1}$  和  $t_{d2}$  为电动汽车充放电调度时段的开始时刻和结束时刻;  $Q$  为电动汽车电池容量, 单位为 kWh;  $W_{100}$  是电动汽车百公里能耗, 单位为 kWh;  $d_{is,t-1}$  为电动汽车在  $t-1$  时的行驶里程, 由车辆在  $t-1$  和  $t$  时刻所处的区域决定, 单位为 km。

#### 3.2 电动汽车放电等值电源模型建模

结合电动汽车发展规划, 城市中各个区域都将设立电动汽车充电桩, 故本文设定的 6 个区域均可视为电动汽车放电站点。(不考虑逆变器的功率损耗)对于某区域的电动汽车放电等值电源, 其在某时刻的输出功率为该时刻该区域参与放电的全部电动汽车放电功率之和, 可由如下步骤得出。

Step1: 采用本文电动汽车出行行为建模得到的描述设定地区内  $n$  辆车在一天中各时刻所处区域的矩阵, 由前后两个时刻车辆所在区域的间距, 得到  $24 \times n$  的矩阵, 表示设定地区内  $n$  辆车在一天中每小时的行驶里程;

Step2: 将 Step1 得到的车辆每小时行驶里程矩阵代入式(13), 根据车辆在式(13)中是否按照放电模式( $S=1$ )进行计算, 得到  $24 \times n$  的矩阵, 表示设定地

区内  $n$  辆车在一天中各时刻是否处于放电状态;

**Step3:** 结合设定地区内  $n$  辆车在一天中各时刻所处区域的矩阵和 **Step2** 得到的矩阵, 统计在电动汽车充放电调度时段内每小时的放电车辆与该车辆所在的位置, 得到  $24 \times 6$  的矩阵, 表示设定地区内各区域在一天中各时刻的放电车辆数量(在调度时段以外的时刻, 放电车辆数量为 0);

**Step4:** 将 **Step3** 得到的矩阵与车辆放电功率相乘, 得到  $24 \times 6$  的矩阵, 表示设定地区内各区域在一天中各时刻保有的放电车辆的总放电功率, 即为每个区域的电动汽车放电等值电源在一天中各时刻的输出功率。

上述步骤可由附图 2 所示流程图描述。依此步骤可得到一天中各时刻在各区域放电的电动汽车放电总功率, 即位于各区域的电动汽车放电等值电源在各时刻的输出功率。

## 4 计及电动汽车大规模接入的配电网故障分析方法

### 4.1 有源配电网故障分析方法

在有源配电网故障分析方法选用上, 考虑到电动汽车充电桩与逆变型分布式电源均含有电力电子逆变器的特征, 本文参考了含逆变器型分布式电源的配电网故障分析方法<sup>[20]</sup>协助分析, 方法核心是求解式(14)所示的配电网等值网络的故障节点方程。

$$\mathbf{YU} = \mathbf{I} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{U}$  为系统故障电压和各分布式电源接入节点故障电压构成的矩阵;  $\mathbf{Y}$  为系统节点导纳矩阵;  $\mathbf{I}$  为系统故障电流和各分布式电源输出的故障电流组成的矩阵。各分布式电源输出的故障电流如式(15)所示。

$$\begin{cases} I_{\text{DGF},q,k} = \min[r(U_N - U_{\text{Nf},k}), I_{\text{max}}] \\ I_{\text{DGF},d,k} = \min[P_N / U_{\text{Nf},k}, \sqrt{I_{\text{max}}^2 - I_{\text{DGF},q,k}^2}] \\ I_{\text{DGF},k} = (I_{\text{DGF},d,k} \cos \sigma_k + I_{\text{DGF},q,k} \sin \sigma_k) + \\ \quad \text{j}(I_{\text{DGF},d,k} \sin \sigma_k - I_{\text{DGF},q,k} \cos \sigma_k) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $U_N$  为系统的额定电压;  $U_{\text{Nf},k}$  为第  $k$  次迭代下分布式电源接入点的故障电压;  $I_{\text{max}}$  为分布式电源允许的最大输出电流;  $I_{\text{DGF},q,k}$  和  $I_{\text{DGF},d,k}$  分别为第  $k$  次迭代下分布式电源故障电流的无功分量和有功分量;  $P_N$  为分布式电源额定输出功率;  $\sigma_k$  为第  $k$  次迭代下分布式电源接入点的故障电压相角。

分布式电源具有低电压穿越能力, 即在系统电压下降后, 分布式电源输出无功电流来为系统提供支撑, 其值为系统电压下降值的  $r$  倍。在保证无功

电流输出的前提下, 分布式电源进行有功电流的输出, 且有功电流和无功电流均不得超过分布式电源输出电流的限定值。在计算时采用迭代计算的方法, 以各分布式电源的额定输出电流作为各分布式电源输出故障电流的初始值, 收敛条件如式(16)所示。

$$\max |U_{\text{Nf},k} - U_{\text{Nf},k-1}| < \varepsilon \quad (16)$$

式中:  $U_{\text{Nf},k-1}$  和  $U_{\text{Nf},k}$  分别为迭代前后两次计算的系统故障电压值;  $\varepsilon$  为计算的迭代误差。

### 4.2 计及电动汽车大规模接入的配电网故障分析方法

根据电动汽车放电等值电源(后文简称等值电源)的输出功率在时间轴上的变化, 采用有源配电网故障分析方法, 分别对每一时刻的等值电源并网后的系统进行故障分析, 得到随时间变化的系统故障电流, 以此描述大规模电动汽车接入对配电网故障的影响。具体步骤如下。

**Step1:** 判断当前时刻是否处于调度时段内, 若结果为“是”, 则执行 **Step2**, 否则执行 **Step4**;

**Step2:** 根据当前时刻, 由本文提出的等值电源建模方法, 确定当前时刻各等值电源输出功率;

**Step3:** 将各等值电源代入有源配电网故障分析方案中进行分析, 得到此时配电网各支路的故障电流并记录, 随后返回 **Step1**;

**Step4:** 整理记录各时刻的支路故障电流, 得到一组随时间变化的系统故障电流, 以此描述大规模电动汽车接入对配电网故障的影响。

上述步骤可由附图 3 所示流程图表示。

电动汽车的放电行为在各个时刻都有不同的表现, 由其集合的电源出力大小也随时间的变化而变化, 对不同时刻的配电网故障电流造成不同程度的影响。虽然建立的电动汽车放电等值电源模型属于概率模型, 但电动汽车的出行在时间轴上大致呈现出较为稳定的特征, 如上下班的高峰期与中午的低谷期, 因此建立的模型可以反映出电动汽车集群在各个时刻的出行与放电特征, 进而可以分析在不同时刻下受电动汽车放电影响的配电网故障特性。

上述步骤分别计算了各时刻下放电电动汽车等值电源的出力大小, 对在电动汽车放电行为影响下的配电网进行故障分析, 得到一组随时间变化的系统故障电流, 反映了在不同时刻下受电动汽车放电行为影响的配电网故障电流变化情况。

## 5 算例分析

### 5.1 仿真场景设定

本文算例设定地区中包含前文介绍的 6 类区

域, 即住宅区、工作区、教学区、社交区、购物区及其他, 每类区域各一个, 用 G1—G6 分别表示设定地区内 6 个区域的由放电电动汽车集合的电源, 设定地区的配电网结构如图 6 所示。

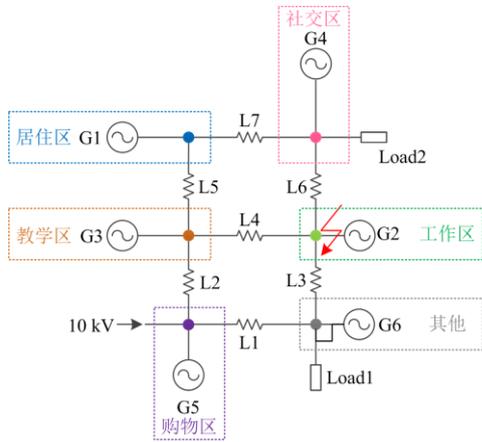


图 6 某配电网拓扑结构图

Fig. 6 Topology of distribution network

L1—L7 为系统的 7 条支路, 线路长度分别为 3 km、1 km、1 km、2 km、2 km、1 km、3 km, 线路单位长度阻抗为  $(0.1+j0.2) \Omega/\text{km}$ , Load1、Load2 为容量为  $(7+j0.5) \text{ MVA}$  和  $(4+j0.5) \text{ MVA}$  的负荷, 设定系统额定容量为 12 MVA。在高渗透率的电动汽车并网的系统中, 电动汽车分散在配电网的各个位置, 故障位置不会对由电动汽车放电行为形成的故障电流变化特征带来明显的影响。算例设定在如图 6 所示的位置发生三相短路故障, 过渡电阻为  $1 \Omega$ , 各区域间的距离如附表 1 所示。

### 5.2 电动汽车出行行为模型

设定地区内有电动汽车 8000 辆, 所有电动汽车早上均从住宅区开出, 在当天行程结束后均返回住宅区。参考 2017 款江淮 iEV6E 电动汽车参数, 设定每辆电动汽车电池容量为 18 kWh, 百公里耗电为 10 kWh, 充电功率为 3000 W, 放电功率为 3000 W。

考虑车辆的出行行为特征, 在早晨和夜间出行的电动汽车数量较少, 其放电行为对配电网造成的波动性影响程度较小, 为突出表现电动汽车对配电网的影响, 将算例中研究的时间段设置为 10:00—22:00。充放电调度规则如下: (1) 当电动汽车剩余电量大于 5 kWh 时, 可进行放电; (2) 当电动汽车剩余电量小于 5 kWh 时进行充电, 直至电量不低于 10 kWh, 在此期间电动汽车不参与放电调度。

在上述条件下采用本文介绍的电动汽车出行行为建模方法, 建立电动汽车出行行为的数学模型, 结果如图 7 所示。

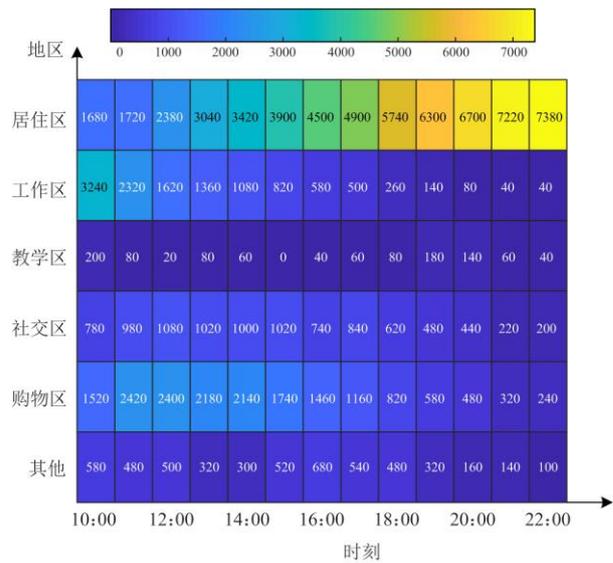


图 7 10:00—22:00 间 8000 辆电动汽车的分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of 8000 electric vehicles from 10:00 to 22:00

图 7 用热力图的形式展现了 10:00—22:00 间位于各区域的电动汽车数量。

### 5.3 等值电源模型建模分析

在获得电动汽车出行行为的基础上, 通过本文提出的等值电源建模方法, 可以得到在调度时间内各时刻各区域放电电动汽车集合的电源的输出功率, 结果如表 1 所示。

表 1 地区内各时刻各等值电源输出功率

Table 1 Output power of each equivalent source at each time in the region

时刻	输出功率/MW					
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
10:00	1.56	8.46	0.42	1.5	1.74	1.14
11:00	2.4	7.2	0.42	1.38	2.52	0.66
N	N	N	N	N	N	N
22:00	9.18	0.06	0.06	0.18	0.24	0.06

对表 1 的数据作图, 得到各时刻各等值电源输出功率变化趋势图, 如图 8 所示。

对图 8 的折线图进行分析, 可以看出, 各时刻各等值电源出力的变化相当明显, 由于工作区和居住区的车辆分布较其他区域更为集中, 等值电源整体输出功率也更大。随着下班时间的到来, 工作区的车辆将逐渐向居住区转移, 工作区等值电源输出逐渐减小, 居住区等值电源输出呈现上升趋势。时间继续推移, 各个区域的车辆均会向居住区转移, 在图 8 中呈现出居住区等值电源输出持续上升, 其他区域等值电源输出不断下降的特征。由此可见本

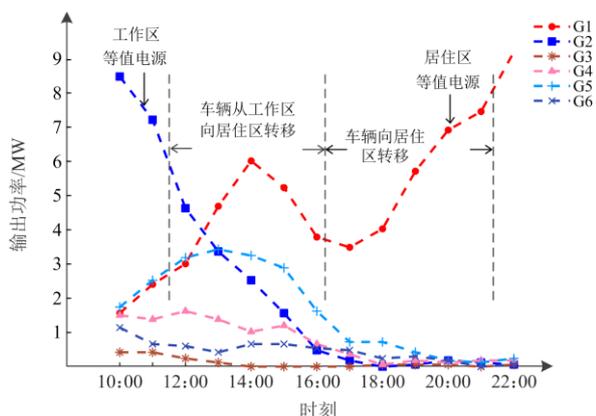


图 8 各时刻各等值电源输出功率变化趋势图  
Fig. 8 Change trend of output power of each set of power supply at each time

文提出的等值电源建模方法符合电动汽车出行行为规律。

#### 5.4 计及电动汽车大规模接入的配电网故障分析结果

将表 1 中各时刻各等值电源输出功率分别代入本文介绍的配电网故障分析方法中, 可以得到在 10:00—22:00 间各时刻各支路的故障电流大小。考虑到支路 L1、L2 与平衡节点直接相连, 其故障电流受等值电源输出功率变化的影响相对其他线路较小, 为使实验结果具备代表性和普适性, 单独研究支路 L3、L4、L5、L6 和 L7。将每一时刻所有支路的故障电流作为一组数据, 用 13 组数据, 将受大规模电动汽车放电行为影响的配电网各支路在各时刻的故障电流记录在表 2 中。

表 2 各时刻下支路 L3、L4、L5、L6、L7 故障电流大小

Table 2 Fault current of L3, L4, L5, L6 and L7 branches at each time

时刻	故障电流/kA				
	L3	L4	L5	L6	L7
10:00	1.73	2.37	0.64	0.86	0.87
11:00	1.72	2.45	0.58	0.92	0.94
12:00	1.78	2.53	0.54	1.02	0.99
13:00	1.79	2.61	0.40	1.10	1.11
14:00	1.83	2.65	0.30	1.13	1.20
15:00	1.85	2.65	0.36	1.13	1.16
16:00	1.87	2.62	0.48	1.00	1.09
17:00	1.86	2.60	0.50	0.94	1.08
18:00	1.84	2.63	0.46	0.94	1.13
19:00	1.82	2.66	0.31	1.05	1.23
20:00	1.79	2.68	0.23	1.10	1.30
21:00	1.76	2.69	0.19	1.14	1.33
22:00	1.76	2.73	0.17	0.18	0.24

由表 2 中数据可知, 等值电源造成了各支路故障电流的变化, 由此可知, 电动汽车的放电行为会使不同时刻下各支路的故障电流大小发生显著变化, 如对于支路 L6, 21:00 时的故障电流约为 22:00 时故障电流的 6.3 倍。

在分析讨论中, 根据支路是否为故障区间, 分别对 L3、L4、L6 与 L5、L7 进行讨论, 对 L3、L4、L6 与 L5、L7 的故障电流数据作图, 结果分别如图 9 和图 10 所示。

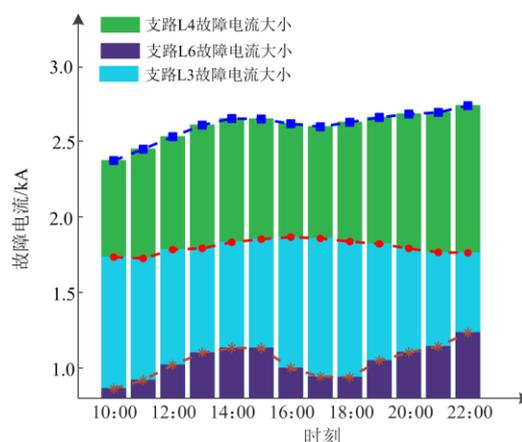


图 9 各时刻下支路 L3、L4、L6 故障电流变化趋势图  
Fig. 9 Change trend of fault current of L3, L4 and L6 branches at each time

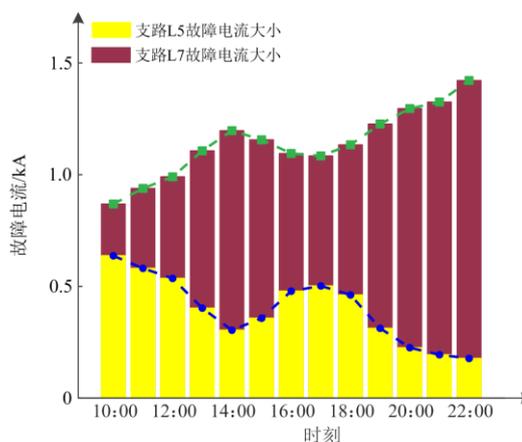


图 10 各时刻下支路 L5、L7 故障电流变化趋势图  
Fig. 10 Change trend of fault current of L5 and L7 branches at each time

图 9 采用折线-柱状图, 展现了故障区间各支路的故障电流变化趋势。此图可以实现故障区间各支路故障电流大小的横向比较, 比较结果可知, 在电动汽车放电影响下, 各支路故障电流均呈现波动现象, 这将影响配电网传统的三段式整定保护的保

范围，降低保护的可靠性。

图 10 采用折线-柱状图，展现了非故障区间各支路的故障电流变化趋势，可实现非故障区间各支路故障电流大小的横向比较。将图 10 与图 9 比较，可以看出，由于不包含故障点，非故障区间的故障电流平均水平略小于故障区间，且非故障区间各支路的故障电流在电动汽车放电影响下产生的波动更为明显，对非故障区间的系统安全运行造成了较大威胁。

统计故障发生在 14:00 时各支路的故障电流值和由等值电源提供的故障电流值，将统计结果记录在图 11 中。

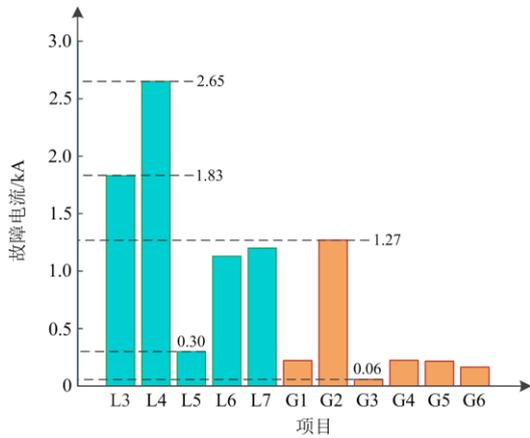


图 11 14:00 时各支路及各等值电源故障电流值  
Fig. 11 Fault current value of each branch and equivalent power supply at 14:00

从图 11 中数据可以看出，14:00 时支路故障电流值为 0.3~2.65 kA，各等值电源输出的电流值为 0.06~1.27 kA，支路故障电流值与等值电源输出电流值属于同一量级，由此可见电动汽车大规模接入后，在故障发生时，电动汽车的放电行为将对线路的故障电流产生不可忽视的影响。

### 5.5 计及电动汽车大规模接入的配电网保护整定指导策略

目前交流电网中常用的保护配置有过流、过压和距离保护等，本节选用过流保护，结合算例结果中各时刻的故障电流，设计含大量电动汽车的配电网保护整定指导策略。示意图如图 12 所示。

过流保护即当电流超过预设的整定值时，判定为故障情况，断路器动作，及时阻止故障的扩张。图 12(a)、图 12(b)、图 12(c)为断路器配置常用的三段式保护原理及动作时间示意图，本节仅设置图 12 中断路器 1 的整定值来进行说明。

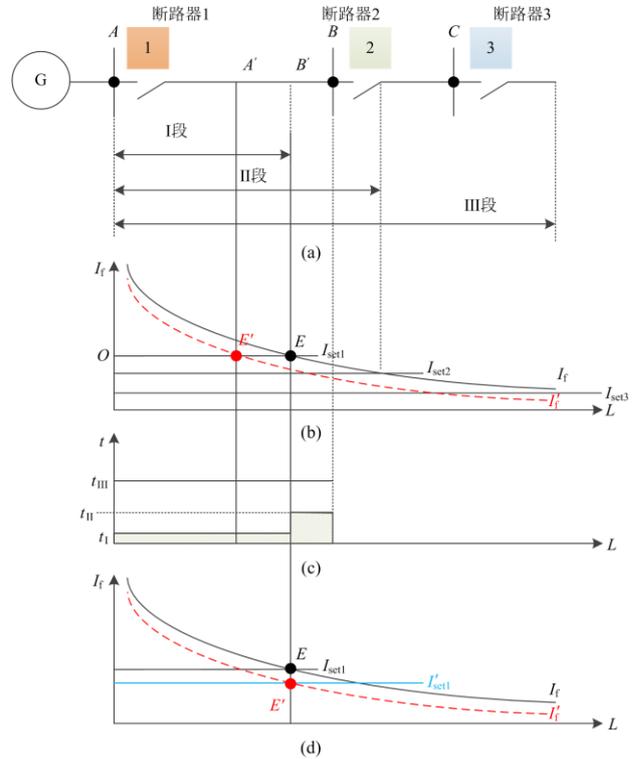


图 12 三段式动作原理及动作时间示意图

Fig. 12 Schematic diagram of three-section protection principle and operating time

断路器 1 保护的线路为图 12(a)中  $AB$  段，图 12(b)中的  $I_{set1}$ 、 $I_{set2}$ 、 $I_{set3}$  分别为断路器 1 的 I 段、II 段、III 段保护整定值，断路器 1 的故障电流值随故障点向线路末端的移动而逐渐降低，当故障电流  $I_f$  高于  $I_{set1}$  时，I 段保护动作，因此 I 段保护的范围为图 12(b)中的  $OE$  段，在图 12(a)中线路上体现为  $AB'$  段。当故障发生于  $B'B$  段时， $I_f$  低于  $I_{set1}$ ，高于  $I_{set2}$ ，此时 I 段保护不动作，II 段保护动作。由于故障点临近  $BC$  段，其故障电流值与  $BC$  段出口处相似，为防止  $BC$  段出口处故障导致断路器 1 的 II 段保护误动，给断路器 1 的 II 段保护设置动作时限  $t_{II}$  如图 12(c)所示，因此在  $B'B$  段发生故障时，断路器 1 和断路器 2 的 I 段保护不动作，经过  $t_{II}$  时间，断路器 1 的 II 段保护动作。类似地可得出断路器 1 的 III 段保护动作原理。

当电动汽车大规模接入配电网后，同一故障下的故障电流在不同时刻会呈现不同的值，若依传统的定值整定方案，参照某一故障电流设定整定值，那么当故障电流降低时(在图 12 中由  $I_f$  变为  $I'_f$ )，I 段保护的范将图 12(b)中的  $OE$  段变为  $OE'$  段，在图 12(a)中线路上体现为由  $AB'$  段变为  $AA'$  段，保护范围变小。此时若原本属于 I 段保护范围的  $A'B'$

区间发生故障, 故障电流值小于  $I_{set1}$ , I段保护不动作, 需到动作时限  $t_{II}$  时, 由II段保护动作, 降低了保护的速度, 影响了保护的可靠性。

本文根据算例得到的变化的故障电流, 制定含大量电动汽车的配电网保护整定基本指导策略。由图 9 可知故障电流值沿时间轴发生变化, 参照各时刻各支路的故障电流值, 分别设定断路器整定值, 即可实现动态整定, 如图 12(d)中, 当故障电流值由  $I_f$  降为  $I'_f$  时, 以  $I'_f$  为参照, 重新设定断路器在该时刻下的整定值  $I'_{set1}$ 、 $I'_{set2}$ 、 $I'_{set3}$  (图中仅展示  $I'_{set1}$ ), 从图 12(d)中可以看出, 故障电流降低后, 在重新设定的整定值  $I'_{set1}$  下, 断路器的保护范围不变, 也维持了保护的速度, 为保护的可靠性提供保障。

此策略结合故障电流的变化特征, 考虑了电动汽车放电行为对故障下配电网的影响, 可为含大量电动汽车的配电网保护提供理论指导。

## 6 结论

本文根据 V2G 模式下电动汽车通过充电桩向配电网放电的特征, 用电源出力的形式描述大规模电动汽车的放电行为, 在此基础上建立了电动汽车放电等值电源模型, 研究了计及电动汽车大规模接入的配电网故障分析方法, 并以三相短路故障为例, 对故障电流进行了分析, 通过仿真算例分析得出如下结论:

1) 论证了电动汽车的放电行为会对配电网故障原有电流产生一定程度的影响。相较于辐射型配电网, 环网型配电网所受到的影响程度更大。

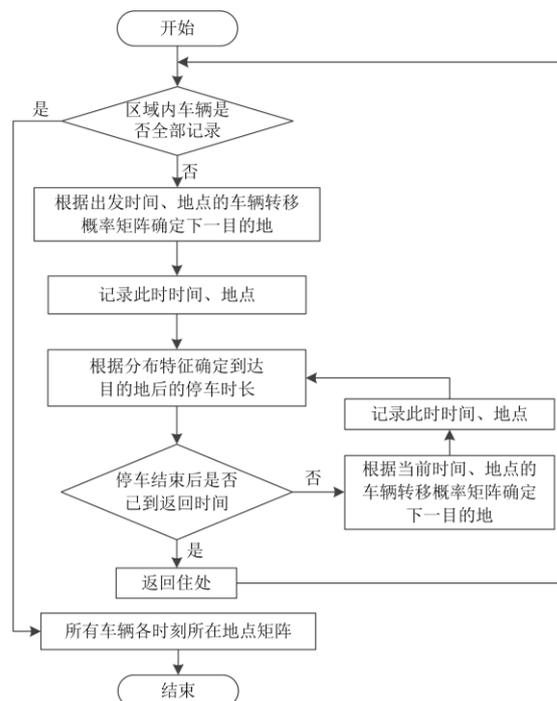
2) 建立的电动汽车放电等值电源模型可表现出电动汽车放电行为的离散性和随机性, 并符合电动汽车的出行行为规律。等值电源的出力变化相当明显。

3) 故障场景不变的情况下, 电动汽车的放电行为会使配电网中各支路的故障电流发生明显的变化。在电动汽车放电行为影响下, 同一支路的故障电流最大值与最小值间可能存在若干倍的差距。

4) 故障区间由于故障点的影响, 在电动汽车放电影响下故障电流变化程度弱于非故障区间, 但依然具有明显的变化, 这将影响配电网传统的三段式整定保护的正常工作。

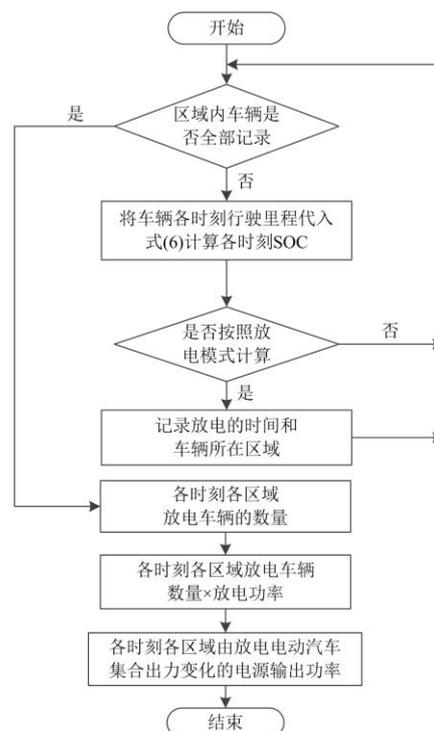
5) 非故障区间的故障电流变化程度较强, 且在部分时刻能达到故障区间的支路故障电流大小, 这将对非故障区间内负荷的安全运行及系统的稳定性造成较大的威胁。

## 附录



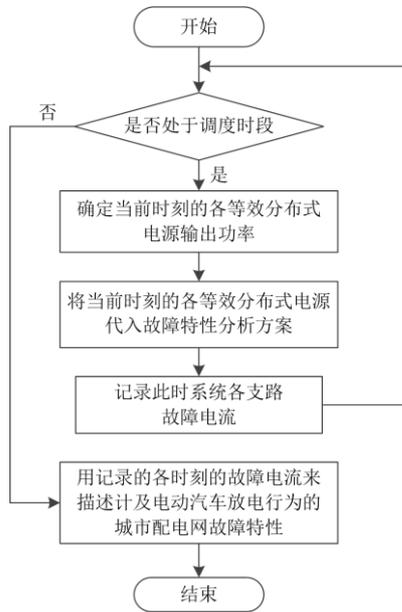
附图 1 电动汽车出行行为建模流程图

Attached Fig. 1 Flow chart of electric vehicle travel behavior modeling



附图 2 电动汽车放电等值电源模型建模流程图

Attached Fig. 2 Flow chart of modeling equivalent power supply model of EV discharge



附图 3 计及电动汽车大规模接入的配电网故障分析方法流程图

Attached Fig. 3 Flow chart of distribution network fault analysis method considering large-scale access of electric vehicles

附表 1 地区内各区域间距离

Attached Table 1 Distance between areas in the region

区域	间距/km					
	居住区	工作区	教学区	社交区	购物区	其他
居住区	0	8	3	5	6	9
工作区	8	0	3	3	5	3
教学区	3	3	0	5	5	6
社交区	5	3	5	0	8	6
购物区	6	5	5	8	0	3
其他	9	3	6	6	3	0

参考文献

[1] 程杉, 杨堃, 魏昭彬, 等. 计及电价优化和放电节制的电动汽车充电站有序充电调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 1-8.  
CHENG Shan, YANG Kun, WEI Zhaobin, et al. Orderly charging and discharging scheduling of an electric vehicle charging station considering price optimization and discharge behavior control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 1-8.

[2] 陈明强, 高健飞, 畅国刚, 等. V2G 模式下微网电动汽车有序充电策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 141-148.  
CHEN Mingqiang, GAO Jianfei, CHANG Guogang, et al. Research on orderly charging strategy of micro-grid electric vehicles in V2G model[J]. Power System Protection

and Control, 2020, 48(8): 141-148.

[3] 马立新, 徐嘉辉, 杨天笑. 基于 MPSO 算法含电动汽车的微网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8): 116-122.  
MA Lixin, XU Jiahui, YANG Tianxiao. Optimal scheduling of microgrid with electric vehicles based on MPSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 116-122.

[4] 武小梅, 冯琪劲, 严干贵, 等. 基于双层优化的电动公交车有序充电策略[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1): 119-126.  
WU Xiaomei, FENG Qijin, YAN Gangui, et al. A coordinated charging strategy of electric buses based on bi-level optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 119-126.

[5] 陈天锦, 牛高远, 甘江华, 等. 基于虚拟同步策略的电动汽车 V2G 充放电系统研究及样机实现[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 131-141.  
CHEN Tianjin, NIU Gaoyuan, GAN Jianghua, et al. Research and prototype manufacture on electric vehicle V2G systems based on virtual synchronous control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 131-141.

[6] 刘明志, 张军, 于建成, 等. 电动汽车充电设施的接入对电网稳态运行影响分析[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(1): 71-75.  
LIU Mingzhi, ZHANG Jun, YU Jiancheng, et al. Impact of electric vehicle charging facilities on power grid steady state[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(1): 71-75.

[7] 单知非, 孙宇轩, 张翔, 等. 电动汽车充放电优化管理分析[J]. 电子科技, 2019(6): 1-7.  
SHAN Zhifei, SUN Yuxuan, ZHANG Xiang, et al. Research on optimization management of electric vehicle charging and discharging[J]. Electronic Science and Technology, 2019(6): 1-7.

[8] 喻锟, 林湘宁, 李浩, 等. 考虑分布式电源稳定助增效应的电压修正反时限过电流保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 716-726.  
YU Kun, LIN Xiangning, LI Hao, et al. A voltage correction based inverse-time overcurrent protection scheme considering distributed generation stable infeed effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 716-726.

[9] 杨珺, 孔文康, 孙秋野. 智能算法在含分布式电源配电网故障恢复的应用综述[J]. 控制与决策, 2019, 34(9): 1809-1818.  
YANG Jun, KONG Wenkang, SUN Qiuye. Application of intelligent algorithms to service restoration of

- distribution network with distributed generations[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(9): 1809-1818.
- [10] 王艳松, 刘珊, 衣京波, 等. 基于状态估计的含分布式电源树状配电网故障测距算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(23): 60-67.  
WANG Yansong, LIU Shan, YI Jingbo, et al. Fault location algorithm based on state estimation in tree distribution network with distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(23): 60-67.
- [11] 刘健, 张志华, 黄炜, 等. 分布式电源接入对配电网故障定位及电压质量的影响分析[J]. *电力建设*, 2015, 36(1): 115-121.  
LIU Jian, ZHANG Zhihua, HUANG Wei, et al. Influence of distributed generation on fault location and voltage quality of distribution network[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(1): 115-121.
- [12] 刘晋源, 吕林, 高红均, 等. 计及分布式电源和电动汽车特性的主动配电网规划[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(12): 41-49.  
LIU Jinyuan, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Planning of active distribution network considering characteristics of distributed generator and electric vehicle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(12): 41-49.
- [13] 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.
- [14] 李雪, 陈豪杰, 杜大军. 多时段及变量相关情形下电动汽车充/放电对有源配电网电压水平影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(2): 526-536.  
LI Xue, CHEN Haojie, DU Dajun. Study on the impact of charging/discharging strategy of electric vehicles on voltage level of active distribution system considering multi-period and variable correlations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(2): 526-536.
- [15] 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.
- [16] 段雪, 张昌华, 张坤, 等. 电动汽车换电需求时空分布的概率建模[J]. *电网技术*, 2019, 43(12): 4541-4550.  
DUAN Xue, ZHANG Changhua, ZHANG Kun, et al. Probabilistic modeling of battery swapping demand of electric vehicles based on spatio-temporal distribution[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(12): 4541-4550.
- [17] 王殿蒙, 李若楠. 考虑季节因素的电动汽车充电负荷建模与优化充电[J]. *电工技术*, 2020(18): 29-31.  
WANG Dianmeng, LI Ruonan. Modeling and optimizing charging of electric vehicle charging load considering seasonal factors[J]. *Electric Engineering*, 2020(18): 29-31.
- [18] 范磊, 陈良亮, 罗雯茜, 等. 考虑城市不同功能区的电动汽车负荷时空分布建模方法[J]. *电力建设*, 2021, 42(6): 67-75.  
FAN Lei, CHEN Liangliang, LUO Wenqian, et al. Spatial and temporal distribution model of electric vehicle load considering different urban functional areas[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(6): 67-75.
- [19] 陈丽丹, 张尧, FIGUEIREDO A. 电动汽车充放电负荷预测研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(10): 177-191.  
CHEN Lidan, ZHANG Yao, FIGUEIREDO A. Overview of charging and discharging load forecasting for electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(10): 177-191.
- [20] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变器分布式电源的配电网故障分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(4): 555-561.  
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(4): 555-561.
- [21] WANG L, GAO H, ZOU G. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(4): 370-378.
- [22] WANG P, SONG J, LIANG F, et al. Equivalent model of multi-type distributed generators under faults with fast-iterative calculation method based on improved PSO algorithm[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(3): 371-382.
- [23] 吴涵, 林韩, 温步瀛, 等. 巴黎、新加坡中压配电网供电模型启示[J]. *电力与电工*, 2010, 30(2): 4-7.  
WU Han, LIN Han, WEN Buying, et al. Revelation on power models of MV distribution network of Paris and Singapore[J]. *Electric Power & Electrical Engineering*, 2010, 30(2): 4-7.
- [24] 阮前途, 谢伟, 张征, 等. 钻石型配电网升级改造研究与实践[J]. *中国电力*, 2020, 53(6): 1-7, 63.

- RUAN Qiantu, XIE Wei, ZHANG Zheng, et al. Research and practice on the upgrading for diamond distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 1-7, 63.
- [25] 温剑锋, 陶顺, 肖湘宁, 等. 基于出行链随机模拟的电动汽车充电需求分析[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1477-1484. WEN Jianfeng, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. Analysis on charging demand of EV based on stochastic simulation of trip chain[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1477-1484.
- [26] 丁坚勇, 王伊宁, 胡志坚, 等. 基于智能代理分布式管理系统的电动汽车充放电策略[J]. 智慧电力, 2021, 49(7): 1-8, 43. DING Jianyong, WANG Yining, HU Zhijian, et al. Electric vehicles charging and discharging strategy based on intelligent-agent distributed management system[J]. Smart Power, 2021, 49(7): 1-8, 43.
- [27] 王晞, 徐浩, 王海燕, 等. 考虑风电和电动汽车不确定性的综合能源系统日前经济调度[J]. 电力建设, 2020, 41(12): 80-89. WANG Xi, XU Hao, WANG Haiyan, et al. Day-ahead economic dispatch of integrated energy system considering uncertainties of wind power and electric vehicles[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 80-89.
- [26] 汲剑锐. 马尔科夫链应用的一些探讨[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012. JI Jianrui. Some discussion on the application of Markov chain[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2012.
- [29] 张彬桥, 葛苏叶, 李成. 基于 Copula 函数的马尔科夫链风速预测模型[J]. 智慧电力, 2021, 49(11): 24-30, 37. ZHANG Binqiao, GE Suye, LI Cheng. Markov chain wind speed prediction model based on Copula function[J]. Smart Power, 2021, 49(11): 24-30, 37.
- [30] 方再根. 计算机模拟和蒙特卡洛方法[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988.
- [31] 李琳玮, 宁光涛, 俞悦, 等. 基于交通信息的多类型电动汽车综合充电需求研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 191-199. LI Linwei, NING Guangtao, YU Yue, et al. Comprehensive charging demand of multi-type electric vehicles based on traffic information[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 191-199.
- [32] TAYLOR M J, ALEXANDER A. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada, 2009: 1-6.
- [33] VYAS A, SANTINI D. Use of national surveys for estimating 'full' PHEV potential for oil use reduction [EB/OL]. [2008-07-21]. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/525.Pdf>.
- [34] 潘胤吉, 邱晓燕, 吴甲武, 等. 基于马尔可夫决策过程的电动汽车充电行为分析[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 129-137. PAN Yinji, QIU Xiaoyan, WU Jiawu, et al. Analysis on charging behaviors of electric vehicles based on Markov decision processes[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 129-137.
- [35] 李颖. 基于电动汽车出行随机模拟的充电桩需求研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017. LI Ying. Research on demand of charging pile based on stochastic simulation of EV trip chain[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [36] 黄海宏, 王海欣, 庄翔, 等. 电动汽车分布式电池充放电管理的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(6): 68-73. HUANG Haihong, WANG Haixin, ZHUANG Xiang, et al. Research on distributed battery charge-discharge management in electric vehicle[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2009, 23(6): 68-73.

收稿日期: 2021-11-05; 修回日期: 2022-01-22

作者简介:

胡思洋(1995—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为城市电网故障诊断, 配电网运行优化。E-mail: hsy2687@outlook.com

(编辑 周金梅)