"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

杨昕然, 吕林, 向月, 刘友波, 刘芳芳 (四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:为评估电动汽车无序充电行为引起的充电负荷时空变化对城市配电网电压稳定性的影响,在构建恶劣充电场景的基础上提出了一种计及电动汽车行为特性驱动负荷增长的连续潮流模型。基于复杂网络理论构建"车-路-网"耦合系统模拟电动汽车行驶路径特性,在考虑城市交通网的约束条件下,设计电动汽车充电位置和行驶路径表征充电负荷的时空变化性,并以此构建恶劣充电场景,利用改进的连续潮流模型搜索电网崩溃状态,分析临界状态下的电压分布特性和电网薄弱区域。所提方法可量化恶劣充电场景下城市电网接纳电动汽车的数量,评估电网薄弱区域并对接入充电设施的该区域配电网进行改造和规划。

关键词:电动汽车;充电负荷模型;"车-路-网"系统;恶劣充电场景;连续潮流;配电网;电压稳定性 中图分类号:TM 712.2;U 469.72 文献标志码:A DOI:10.16081/j.epae.201908018

0 引言

电动汽车作为一种绿色交通工具,在应对城市 二氧化碳排放带来的温室效应和改变能源结构等方 面具有巨大优势和应用前景^[1]。电动汽车的充电行 为受城市复杂交通网络结构和道路车流量等"路-网"信息的约束和影响,因此在分析电动汽车充电负 荷对电网运行的影响时,需要综合考虑电动汽车、交 通网、配电网("车-路-网")的耦合结构。电动汽车 空间转移所引起的充电负荷不确定性更容易造成电 压越限和系统崩溃^[2],研究"车-路-网"耦合下受 "路-网"系统自身匹配性限制的问题,对接入电动汽 车规模、实际运行调度和充电站规划建设具有重要 的指导意义。

电动汽车充电负荷对电网运行的影响主要是由 用户出行行为导致充电位置空间变化和充电时间不 确定所引起的。已有大量文献研究电动汽车充电负 荷对电网的影响,如文献[3]根据用户出行特性确定 不同时间点充电负荷接入的位置及大小,再在各个 时间段对配电网的电压进行评估分析;文献[2]以实 测充电数据为基础,将电动汽车以不同比例接入充 电站节点,分析不同渗透率的电动汽车充电负荷对 配电网电压稳定裕度的影响;文献[4]在指定负荷节 点接入不同渗透率的电动汽车充电负荷,分析各种 情况下充电负荷对电网的电压越限和负荷峰谷差的 影响。上述文献均是在一个时间段将电动汽车充电

收稿日期:2019-04-08;修回日期:2019-06-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807127);四川省科 技厅项目(2019YFH0171,2019YFG0152)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807127) and Sichuan Science and Technology Program(2019YFH0171,2019YFG0152) 负荷接入特定负荷节点,属于静态研究,没有体现出 因电动汽车空间转移特性带来的负荷时空变动对电 网的影响。

此外,大量文献在对电动汽车充电负荷建模时 均只考虑电动汽车用户日出行特征,用概率分布函 数描述充电开始时刻的等分布规律,以表征充电负 荷特性:如文献[5]考虑不同类型电动汽车的充电特 性,基于电动汽车的起始充电时刻、日行驶里程、充 电时长的概率模型进行蒙特卡洛模拟得到充电负荷 模型;文献[6]用2阶段泊松分布描述电动汽车抵达 充电站的充电行为,基于充电负荷曲线提出了电动 汽车充电站负荷集聚模型;文献[7]采用马尔可夫链 描述电动汽车电池荷电状态SOC(State Of Charge) 变化,基于出行时间对应各个目的地的概率分布得 到不同区域电动汽车的充电负荷需求模型。以上文 献建立充电负荷模型时考虑因素较单一,电动汽车 行驶于"路-网",电动汽车用户的行驶决策行为受交 通网影响,进而影响充电负荷时空分布。

现有的研究多集中于电动汽车的有序充电及优 化控制方面^[89]。关于电动汽车无序充电对配电系 统的负面影响主要通过与有序充电控制策略对配电 网负荷曲线、网络损耗、电压降落等方面的影响进行 对比,以突出有序充电的优越性^[10-11]。文献[10]分析 自由充电、负荷低谷充电和优化充电方式下充电负 荷对配电网负荷曲线、节点电压偏移及网络线损的 影响,以此突出自由充电方式对配电系统所造成的 负面影响;文献[11]根据用户日出行规律回到住宅 区的时间,按照"先到先充"的充电原则进行无序充 电,与有序充电控制策略进行对比,突出无序充电在 网损、电压降落等方面对配电网产生较大的负面影 响。以上参考文献中所指的无序充电是依据用户出 行链规律预先设定电动汽车在特定地点和特定时间 段内集中充电,无法反映电动汽车用户在实际出行 过程中的决策行为和充电负荷的时空变化性,而且 并没有单独深入分析电动汽车无序充电行为在极端 充电场景下给配电网带来的负面影响。

本文首先基于复杂网络理论建立"车-路-网"耦 合架构。在考虑常规负荷波动性的基础上,模拟交 通网约束条件下的电动汽车行驶路径特性,设计电 动汽车行驶路径并构建恶劣充电场景。提出计及电 动汽车时空转移特性的连续潮流 CPF(Continuous Power Flow)模型搜索电网临界崩溃状态,深入分析 高渗透率电动汽车无序充电行为对城市配电网运行 的负面影响。评估结果可为含高渗透率电动汽车城 市配电网的运行调度和充电站规划提供指导依据。

1 "车-路-网"融合系统

电动汽车的充电行为是联系城市交通网与城市 配电网的纽带^[12]。电动汽车用户出行模式依托于城 市交通网道路通行能力和城市配电网电能供给能 力,相互影响相互制约。基于复杂网络理论,"车-路-网"耦合系统可抽象为交通网和电力网构成的二 元网络。交通网将路口抽象为交通节点^[13],道路抽 象为交通边;电力网将变电站抽象为电力节点,输电 线路抽象为电力边。安装在交通节点周围的充电站 通过电缆专线接入物理距离上最近的变电站,虽然 在地理位置上交通节点和电网节点并不完全相同, 但通过电动汽车充电行为将交通网和电力网耦合, 如图1所示。



融合系统可通过耦合网络邻接矩阵^[14]A表示, 包含交通网邻接子矩阵 A_{T} (详见1.2.1节所述)、电力 网邻接子矩阵 A_{P} 、交通网-电力网耦合子矩阵 A_{T-P} 。 A_{T} 中的元素 $a_{T,ij}$ 表示交通节点 $v_{T,i}$ 和 $v_{T,j}$ 的邻接关系: 若邻接,则 $a_{T,j}=d_{ij}$,其中 d_{ij} 为交通节点 $v_{T,i}$ 和 $v_{T,j}$ 之间 的道路长度;反之,则 $a_{T,j}=inf$,其中inf表示两节点间 没有直接的连通道路。 A_{P} 中的元素 $a_{P,ij}$ 表示电力节 点 $v_{P,i}$ 和 $v_{P,j}$ 之间的支路-节点关联导纳。 A_{T-P} 中的元 素 $a_{\text{T-P},ij}$ 表示交通节点 $v_{\text{T},i}$ 和电力节点 $v_{\text{P},j}$ 的耦合关系:若耦合,则 $a_{\text{T-P},ij}=1$;反之,则 $a_{\text{T-P},ij}=0$ 。图1所示融合系统可表示为式(1)。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\mathrm{T}} & \mathbf{A}_{\mathrm{T-P}} \\ \mathbf{A}_{\mathrm{T-P}}^{\mathrm{T}} & \mathbf{A}_{\mathrm{P}} \end{bmatrix}_{27 \times 27}$$
(1)

为评估电动汽车在恶劣充电场景下对城市配电 网电压稳定性的影响,本文以电压崩溃方向确定负 荷增长方向,并以此确定充电负荷应接入的电力网 节点;再根据"路-网"耦合关系确定对应的交通节 点。根据起止点设计电动汽车行驶路径,判断在当 前SOC下电动汽车按设计路径行驶能否在评估时刻 前到达指定的位置:若不能,则需要重新确定充电负 荷接入位置;反之,分析电动汽车无序充电对配电网 电压的影响。综上,交通网对充电负荷分布的约束 表现在电动汽车充电位置的选择及具体的行驶路径 两方面。

1.1 电动汽车行为特性

电动汽车一天的出行过程包括充电、行驶、停驻 3种行为模式。每辆电动汽车在任意时刻采取何种 行为模式由交通网信息及电网负荷信息共同确定, 进而影响电动汽车空间位置和SOC;反之,电动汽车 的行为模式影响交通网的车流量和接入配电网的负 荷量。因此,首先对电动汽车在一天的出行过程中 可能采取的行为模式进行分类,如式(2)所示。

$$s_{i} = \begin{cases} -1 & \widehat{\uparrow} \mathfrak{W} \\ 0 & \widehat{\varTheta} \mathfrak{W} \\ 1 & \widehat{\frown} \mathfrak{H} \end{cases}$$
(2)

其中,*s*_t为*t*时刻电动汽车采取的行为模式,*t*时刻电动汽车的行为模式持续到*t*+1时刻。

1.2 交通网特性

1.2.1 交通网模型

城市交通网主要由节点和道路组成,本文将城 市交通网简化成由点和线构成的交通网络拓扑结构 图,用 $A_{\rm T}(V,D)$ 表示。其中, $V=\{v_{\rm T,i}|i=1,2,\cdots,n\}$ 为城 市交通网中的交通节点集合, $D=\{d_i|i,j=1,2,\cdots,n\}$ 为 节点i=j间的道路长度集合,n为交通节点总个数。 图2为交通网络拓扑结构图,其交通网模型如式(3) 所示。



图 2 交通网络拓扑结构 Fig.2 Topological structure of traffic network

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \text{inf} & \text{inf} & d_{16} & d_{17} \\ d_{12} & 0 & d_{23} & d_{24} & d_{25} & \text{inf} & \text{inf} \\ \text{inf} & d_{23} & 0 & d_{34} & \text{inf} & \text{inf} & \text{inf} \\ \text{inf} & d_{24} & d_{34} & 0 & d_{45} & \text{inf} & \text{inf} \\ \text{inf} & d_{25} & \text{inf} & d_{45} & 0 & d_{56} & \text{inf} \\ d_{16} & \text{inf} & \text{inf} & \text{inf} & d_{56} & 0 & d_{67} \\ d_{17} & \text{inf} & \text{inf} & \text{inf} & \text{inf} & d_{67} & 0 \end{bmatrix}$$
(3)

电动汽车行驶速度影响 SOC 和充电位置,而行 驶速度与道路阻塞程度密切相关,由交通网的道路 容量和车流量共同决定^[15]。上述因素导致不同道路 上电动汽车的行驶速度不同,进而影响电动汽车的 充电行为,以此作为交通网对电动汽车充电行为的 约束条件。*t*时刻节点*a*至节点*b*的连通路段(道路 *ab*)上车辆的行驶速度如式(4)所示^[16]。

$$\begin{cases} v_{ab}(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{ab}(t)}{C_{ab}}\right)^{\beta_{ab}}} v_{ab,0} \\ \beta_{ab} = \mu + \gamma \left(\frac{V_{ab}(t)}{C_{ab}}\right)^{q} \end{cases}$$
(4)

其中, $v_{ab,0}$ 为道路ab零流量的行驶速度; $V_{ab}(t)$ 为t时 刻道路ab的车流量; C_{ab} 为道路ab的容量; β_{ab} 为t时 刻道路ab的饱和系数; μ , γ ,q为不同道路等级下的 自适应参数,依据实测数据拟合其具体数值,实测数 据可以通过交通测量仪、人工观测仪等得到。本文 参考文献[13]中的仿真数据对不同道路的 μ , γ ,q参 数进行取值:对主干道分别取值 1.726、3.15和 3,对 次干道分别取值 2.076、2.870和 3。

1.2.2 最优路径选择方法

104

通常从交通节点*i*至*j*有多条路径可以到达,以 用户均选择最短路径行驶作为电动汽车选择充电路 径的约束条件。根据交通网邻接子矩阵*A*_r利用 warshall 传递闭包法^[17]找出从交通节点*i*至*j*的所有可 行路径集合*L_{ij}*,利用 Floyd 算法^[18]选择最短路径,其 最优路径方向为*i*-···-*u*-*v*-···-*j*,如式(5) 所示。

$$\min \sum_{u,v \in L_{ij}(s)} a_{\mathrm{T},uv} \tag{5}$$

其中, $L_{ij}(s)$ 为 L_{ij} 中第s条路径;u、v为交通节点i至节 点i的中间节点。

1.3 电动汽车充电方式

电动汽车的充电方式包括一天一充^[19]、设定充 电模式和充电时长^[20]以及基于需求响应的有序充 电^[21]等。本文为凸显电动汽车无序充电行为,选取 出租车作为研究对象。每次充电采取快充方式,即 电动汽车在结束一段行程后,当SOC低于设定阈值 时,充电至SOC上限SOC^{mas}或下一段行程开始时刻。 电动汽车的SOC计算如式(6)所示。

$$\operatorname{SOC}_{t+1} = \begin{cases} \operatorname{SOC}_{t} + \frac{P_{\operatorname{charging}} T_{c}}{Q} & s_{t} = 1 \\ \operatorname{SOC}_{t} & s_{t} = 0 \\ \operatorname{SOC}_{t} - \frac{\omega l}{Q} & s_{t} = -1 \end{cases}$$
(6)

其中, $P_{charging}$ 为充电功率; T_{o} 为单次充电时间;Q为电动汽车的电池容量; ω 为单位里程耗电量;l为单次行驶里程。

2 恶劣充电场景对电压稳定性影响

分析电网运行特性的手段包括安全裕度评估、 供电能力评估和电压稳定性评估等,其中电压稳定 性评估更为常见^[4,22]。本文选择临界崩溃电压反映 电动汽车无序充电对城市配电网的影响,连续潮流 法是求解电压崩溃点的常用方法。为突出电动汽车 充电负荷的时空动态变化在连续潮流计算中引起负 荷增长方式较常规方式有所不同,本文提出计及电 动汽车用户行为特性驱动负荷增长的连续潮流 模型。

2.1 计及电动汽车行为特性的连续潮流模型

电动汽车充电负荷与其数量及"路-网"耦合特 性相关,此类负荷在时空尺度上为可变负荷,因此在 连续潮流计算时充电负荷增长方式较常规负荷并不 相同。计及电动汽车行为特性的连续潮流模型如式 (7)、式(8)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{L},h} = \lambda_h K_P P_{\text{L},h0} \\ Q_{\text{L},h} = \lambda_h K_Q Q_{\text{L},h0} \end{cases}$$
(7)

$$F(\boldsymbol{\theta}, V, \boldsymbol{\lambda}) = 0 \tag{8}$$

其中, λ_h 为节点h的负荷参数,与该节点接入电动汽车的数量有关,且其数值大小为电动汽车充电负荷的整数倍,因此 λ 是一个随时间而变化的多维变量; K_P, K_0 分别为关于节点h的有功与无功功率负荷因子; $P_{L,h0}, Q_{L,h0}$ 分别为节点h的原始有功与无功功率; θ 为节点电压相角矩阵。

2.2 常规负荷功率模型

电网中的负荷包括常规负荷和电动汽车充电负荷,常规负荷相较于电动汽车负荷而言随机性小,但仍具有波动性。为反映常规负荷不确定性,本文基于拉丁超立方抽样LHS^[23](Latin Hypercube Sampling)得到常规负荷节点的功率需求,具体方法如下。

假设系统共有M个负荷节点,形成负荷 $L=[L_1, L_2, \dots, L_M]$,第 $k(k=1,2,\dots,M)$ 个节点的初始负荷为 L_{k00} 。依次对各节点采用单负荷增长方式至系统崩 溃,记增负荷节点此时的负荷为 L_{k1} ,则该节点负荷 的最大增长系数为 $\alpha_{km}=L_{k1}/L_{k00}$ 以此种增长方式下 的节点负荷极限值作为负荷波动上限值;节点k的 负荷波动下限值 θ_k 取该节点初始负荷的60%,则节 点k的负荷增长系数 α_k 在区间[$\theta_k / L_{k0}, \alpha_{km}$]上服从 均匀分布。

假设 α_k 的累积分布函数CDF(Cumulative Distribution Function)为:

$$Y_k = F_k(\alpha_k) \tag{9}$$

其中, F_k 为值域为[0,1]的连续单调递增函数。将区 间[θ_k / L_{k0} , α_{km}]等分成N个子区间,在每个子区间内 按均匀分布随机采样得到采样值 $Y_{kc}(z=1,2,\dots,N)$ 。 根据CDF反函数得到 α_k 的1×N维采样矩阵 X_k ,再采 用Gram-Schmidt序列正交化方法^[24]对采样结果进行 排序,得到常规负荷增长系数采样矩阵 $\alpha_{M\times N}$ 。

2.3 电动汽车"攻击"策略

为分析恶劣充电场景对电压稳定性的影响,在 考虑交通网拓扑结构和道路车流量的约束条件下, 朝着电压崩溃的方向设计电动汽车行驶路径和充电 位置,构成使各节点电压偏离期望值最远的"攻击" 策略。图3为此种策略下的"车-路-网"相互影响示 意图,其数学模型如式(10)—(20)所示。图3(a)为 使电网运行恶化而设计的电动汽车的最优行驶路 径,其路径方向为A—B—D—E;图3(b)为电动汽车 行驶过程中SOC的变化情况,通过时间轴与图3(a) 匹配;图3(c)为电动汽车按不同路径行驶进行充电 后节点电压对比,通过评估时刻点与图3(a)匹配。



Fig.3 Diagram of "EV-road-grid" interrelated effects

$$F = \max\left\{F_1 - \zeta F_2\right\} \tag{10}$$

其中,F为目标函数,表示在状态变量约束下各节点 电压偏离期望值最远;F₁为节点电压关于期望值的 偏差,其计算如式(11)所示;F₂为状态变量约束,在 攻击过程中应尽量逼近临界崩溃状态但避免崩溃;ζ 为惩罚系数,本文取1000。

$$F_{1} = \left(Y - H(X)\right)\left(Y - H(X)\right)^{\mathrm{T}}$$
(11)

其中,Y为各节点电压期望值;H(X)为潮流计算所 得各节点电压值。F₁越大表明电网距离临界崩溃状 态越近。

$$F_{2} = \sum_{e=1}^{N_{L}} \varepsilon \left(C_{e} - C_{e,\max} \right) + \sum_{e=1}^{N_{L}} \varepsilon \left(C_{e,\min} - C_{e} \right) + \sum_{f=1}^{N_{N}} \varepsilon \left(u_{f} - u_{f,\max} \right) + \sum_{f=1}^{N_{N}} \varepsilon \left(u_{f,\min} - u_{f} \right)$$
(12)

$$\varepsilon(R) = \begin{cases} 0 & R < 0\\ 1 & R \ge 0 \end{cases}$$
(13)

其中, C_e 为线路e的传输功率; $C_{e,max}$ 、 $C_{e,min}$ 分别为线路 最大、最小传输功率; u_f 为节点f的电压幅值; $u_{f,max}$ 、 $u_{f,min}$ 分别为电压幅值的上限、下限; N_L 为线路总数; N_N 为节点总数。

"攻击"策略的数学模型约束条件如式(14)—(20)所示。式(14)为潮流等式约束条件。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{G}_{\boldsymbol{P}} \\ \boldsymbol{G}_{\boldsymbol{Q}} \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{P}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{P}_{0} + \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{E}\boldsymbol{V}} \\ \boldsymbol{Q}_{0} \end{bmatrix}$$
(14)

$$P_{\rm EV} = P_{\rm charging} \sum_{p=1}^{N_{\rm V}} s_t^p$$
(15)

其中, G_p 、 G_q 分别为支路有功、无功功率向量; P_0 、 Q_0 分别为常规负荷注入节点的有功、无功功率向量; P_{EV} 为注入节点的充电负荷向量; N_V 为系统中的电动 汽车数量; s_i^r 为第p辆电动汽车行为模式,取值如式 (2)所示。

式(16)为控制变量约束条件,表示有充电需求 的电动汽车。

$$p \in [1, N_{\rm v}] \tag{16}$$

式(17)为第p辆具有充电需求的电动汽车按 1.2.2节所述方法选择的路径行驶,能在电池电量支 持下到达充电位置并符合可进行充电的条件。

 $\underline{\alpha} Q \leq \mathrm{SOC}_{t}^{p} Q - s_{t}^{p} \omega l_{t+1}^{p} \leq \overline{\alpha} Q \tag{17}$

其中, α 为电池允许最小电量阈值系数, $\overline{\alpha}$ 为设定充 电电量阈值系数,本文分别取为0.2和0.6;SOC^{*i*},为*t* 时刻第*p*辆电动汽车的SOC; l^{n}_{t+1} 为*t*+1时刻第*p*辆汽 车的行驶里程。

式(18)为电动汽车充电结束时电池电量的约束 条件。

$$\overline{\alpha} Q \leq \text{SOC}_{t}^{p} Q + P_{\text{charging}} s_{t}^{p} T_{t,c}^{p} \leq \text{SOC}_{t}^{p-\text{max}} Q \quad (18)$$

其中,SOC^{*p*-max}为第*p*辆汽车的SOC上限。 式(19)为充电时间约束条件。

$$T_{t} - T_{t-1} - l_{t}^{p} / v_{t}^{p} \leq T_{t-1}^{p} \leq T_{t-1} - T_{t}$$

其中, v_t^p 为t时刻第p辆电动汽车的行驶速度;T为评估时刻。

式(20)为交通网的约束条件,即可调度的电动 汽车按设计路径行驶须在评估时刻前能够到达充电 位置进行充电。

$$l_{i}/v_{i}^{p} \leq T_{i} - T_{i-1} \tag{20}$$

(19)

2.4 分析流程

在建立常规负荷功率模型和电动汽车"攻击"策略的基础上,通过2.1节改进的连续潮流模型搜索临界崩溃状态并评估电压稳定性。具体步骤如下。

(1)设定每辆电动汽车的初始位置 D₀,抽取每辆 电动汽车一天首次出行时间 T_{start}、出行时刻的 SOC₀。

(2)系统的负荷节点 $L = [L_1, L_2, \dots, L_M]$ 按全网负荷等比例增长方式至电压崩溃,此时第k个节点的负荷量 $L_{k_{collapse}}$ 为该节点的临界状态负荷量,负荷增长系数 $\alpha_{collapse} = L_{k_{collapse}} / L_{k_0}$ 作为判别评估状态是否发生系统崩溃的参考依据。

(3)按2.2节采样方法获得第*t*个评估时刻*T_t*各节点常规负荷注入功率,筛选出重负荷节点*L_{heavy}*,根据"路-网"耦合关系,采用式(10)—(20)所示"攻击"策略调度电动汽车,使其到达包含于*L_{heavy}*内的交通节点充电,并使电网不断逼近临界崩溃状态。

(4)根据各节点常规负荷和电动汽车负荷形成 综合增长系数矩阵 $S_{M\times N}$,矩阵的每一列对应一个负 荷状态。若 $max(s_{ij}) < \alpha_{collapse}$,说明该负荷状态距离系 统崩溃较远,将该列从 $S_{M\times N}$ 剔除;若 $min(s_{ij}) > \alpha_{collapse}$, 说明该负荷状态已超出系统电压稳定范围,也将该 列从 $S_{M\times N}$ 剔除,得到矩阵 $S_{M\times N}^*$ 。

(5)进一步筛选更接近系统崩溃的负荷状态,若 某两列元素 $min(s_{kt})>max(s_{kt}),$ 说明第r列对应的负 荷状态较第t列对应的负荷状态更接近系统崩溃,则 剔除第t列元素,重复该步骤,使 $S_{M\times N}$ 中的剩余负荷 状态 S_{all} 不断逼近系统临界极限。

(6)将 S_{all}中每一列对应的负荷状态按 2.1 节所 述负荷增长方式至系统崩溃,得到临界状态下的负 荷增长系数矩阵 S^{*}_{all}。

(7)重复步骤(3)—(6),根据抽样总量 N_{sample}和 N确定重复次数 N_{sample} / N。

(8)对每一个评估时刻按步骤(3)一(7)重复模 拟,分析系统崩溃状态下的电压分布特性和电动汽 车分布位置。

3 算例分析

3.1 算例结构及参数

以某城市局部交通网为例进行分析,"路-网"结构如图4所示,分为居民区(交通节点1-14)、商业区(交通节点15、16、21-26、29)和工业区(交通节点17-20、27、28)3个区域,交通网相关数据参考文献[13],与该交通网匹配的配电网根据IEEE 33节点的标准配电系统经适当调整线路参数后得到。电动汽车的初始位置随机分布在交通节点2-4、8、12,设定各电动汽车在初始时刻电池均处于SOC^{max},且假设SOC^{max}为理想状态(为容量的100%)^[25]。



3.2 结果分析

3.2.1 临界状态下的电压分布特性

设定采样次数 N_{sample}=500,根据每个有效采样样 本对应的临界崩溃电压统计信息,得到全网电压失 稳状态下的电压分布曲面图,如附录中图 A1 所示 (节点电压为标幺值,后同)。

根据图A1,可以清晰地看出系统在临界失稳状态下的节点电压分布规律及变化趋势,同一节点在不同崩溃场景下的电压在一定幅值范围内波动。根据失稳状态下的电压分布可从电压越限角度确定系统节点的薄弱区域。节点17、18的电压较其他节点明显偏低,为电压稳定性最薄弱区域;节点2、19的电压较其他节点明显偏高且小于1.05 p.u.,为电压稳定性最强健区域。

3.2.2 无常规负荷增长的结果分析

附录中图A2为在常规负荷取基数的条件下采 取电动汽车"攻击"策略,系统发生电压崩溃时各节 点电压随时间的变化情况。由图A2可知,不同时间 断面下各节点的电压分布趋势一致,节点16—18的 电压在每个时间断面下均低于同时刻的其他节点, 则一天内节点电压薄弱区域相同。图5为某时刻 有、无"攻击"策略节点16的电压曲线对比。由图5 可知,在常规负荷相同的情况下,无序充电行为将显 著影响当前运行点至电压崩溃点的负荷裕度,加速 系统崩溃。



附录中图A3为有、无交通网约束的条件时,某 一时刻系统临界崩溃状态下的电压分布情况及此时 系统最多可容纳的电动汽车数量。表1为2种情况 下充电负荷接入电网节点对比情况。附录中图A4 为考虑交通网约束条件时电动汽车的具体行驶轨 迹,可看出交通网拓扑结构对充电负荷分布的影响。 由表1可知,交通网的存在影响充电负荷接入位置。 同时结合图A3可知,在有交通网约束的条件下,实 施"攻击"策略使电网安全裕度更小。此外,因交通 网与电力网不完全匹配,在有无交通网约束下同样 进行电动汽车无序充电,有交通网约束时电网更易 崩溃且接纳电动汽车能力弱。

表1 有、无交通网约束下接入电动汽车充电 负荷的电力网节点

Table 1 Distribution network nodes plugged in EVs with and without traffic network constrains

有无交通网约束	接入电动汽车的电力网节点
有	1,3,4,6,15,19,22,28
无	1,3,4,6,15,16,19,22,28,29

3.2.3 考虑常规负荷增长的结果分析

考虑不同常规负荷年增长率δ情况下的系统负 荷裕度变化如图6所示,与之对应的系统能够容纳 的最大电动汽车数量如表2所示。由图6及表2可 知,随着δ增加,系统发生电压崩溃时的负荷增长倍 数减小,接入电网的电动汽车数量减少。由此说明 系统距离崩溃点的负荷裕度不断减小;δ越大,电压



图6 不同δ下电压崩溃点的最大负荷增长倍数

Fig.6 Maximum load growth rate of voltage collapse nodes under different growth rates of general load



Table 2	Limit quantity of EVs under different
	growth rates of general load

时间	电动汽车数量 / 辆		
	$\delta=1.2\%$	δ=2.7 %	δ=3.8 %
第1年	17845	17845	17845
第2年	17662	17658	17360
第3年	17643	17337	16826
第4年	17421	17128	16347
第5年	17238	16902	16003
第6年	17219	16699	15 578
第7年	16992	16358	15246
第8年	16983	16129	14792
第9年	16751	15812	14494
第10年	16740	15790	14215

崩溃时的负荷增长倍数减小得越明显。同一δ下, 随着时间的推移,系统常规负荷增多导致最大负荷 增长倍数减小,系统的负荷裕度减小,允许接入电网 的电动汽车数量减少。

4 结论

大规模电动汽车接入电网将影响城市配电网的 电压稳定性,考虑电动汽车无序充电行为会限制配 电网接纳电动汽车的能力。本文在"车-路-网"耦 合结构下考虑常规负荷波动,提出计及电动汽车行 为特性驱动负荷增长的连续潮流模型,研究电网临 界崩溃状态的电压分布特性作为电动汽车恶劣充电 场景对城市配电网电压稳定性影响的分析手段。结 果表明,交通网与电力网耦合的不完全匹配导致电 网在接入电动汽车充电负荷后更易接近崩溃状态, 系统允许接纳的最大电动汽车数量受到限制。本文 所提评估方法的评估结果可为含高渗透率电动汽车 城市配电网的运行调度和充电站规划提供指导 依据。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] DOUCETTE T, MCCULLOCH D. Modeling the prospects of plugin hybrid electric vehicles to reduce CO₂ emissions [J]. Applied Energy, 2011, 88(7):2315-2323.
- [2]郑颖,孙近文,张冲,等.考虑电动汽车接入的配电系统静态 电压稳定裕度研究[J].电工技术学报,2014,29(8):20-26.
 ZHENG Ying, SUN Jinwen, ZHANG Chong, et al. Study of voltage stability margin for the distribution network with electric vehicle integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(8):20-26.
- [3] NORAIDAH S, MOHAMMED E, LIANA C. Probabilistic analysis of electric vehicles charging load impact on residential distributions networks [C] //2016 IEEE International Energy Conference. Leuven, Belgium: IEEE, 2016:251-257.
- [4] 杜习超,刘永民,徐则诚,等. 电动汽车随机负荷建模及对配 电网节点电压分布的影响[J]. 电力自动化设备,2018,38(6): 124-130.

DU Xichao, LIU Yongmin, XU Zecheng, et al. Modeling of random load of electric vehicle and its influence on node voltage distribution of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):124-130.

- [5] 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.
- [6]郑竞宏,戴梦婷,张曼,等. 住宅区电动汽车充电站负荷集聚 特性及其建模[J]. 中国电机工程学报,2012,32(22):32-38.
 ZHENG Jinghong, DAI Mengting, ZHANG Man, et al. Load cluster characteristic and modeling of EV charge station in residential district[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(22):

32-38.

108

- [7]许威,吕林,许立雄,等. 基于马尔克夫链的电动汽车充电需求计算[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(3):12-19.
 XU Wei,LÜ Lin,XU Lixiong, et al. Calculation of charging demand from electric vehicles based on Markov chain [J].
 Proceedings of the CSU-EPSA,2017,29(3):12-19.
- [8]苏海锋,梁志瑞.基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有 序充电控制方法[J].电力自动化设备,2015,35(6):17-22.
 SU Haifeng,LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-vally electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(6):17-22.
- [9] 王建,吴奎华,刘志珍,等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):47-52.
 WANG Jian, WU Kuihua, LIU Zhizhen, et al. Impact of electric charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8): 47-52.
- [10] 宫鑫,林涛,苏秉华. 插电式混合电动汽车充电对配电网的影响[J]. 电网技术,2012,36(11):30-35.
 GONG Xin,LIN Tao,SU Binghua. Plug-in hybrid electric vehicle charging on power distribution network[J]. Power System Technology,2012,36(11):30-35.
- [11] 李敏,苏小林,阎晓霞,等. 多目标分层分区的电动汽车有序 充放电优化控制[J]. 电网技术,2015,39(12):3556-3562.
 LI Min,SU Xiaolin,YAN Xiaoxia,et al. Coordinated charging and discharging of plug-in electric vehicles based on multilayered and multi-regional optimization[J]. Power System Technology,2015,39(12):3556-3562.
- [12] CHEN Tao, ZHANG Bowen, POURBABAK H, et al. Optimal routing and charging of an electric vehicle fleet for highefficiency dynamic transit systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4):3563-3572.
- [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 Yinchi, 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] 汤奕,李峰,王琦,等. 通信系统故障对电力系统实时负荷控 制影响的量化评价方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(2): 90-96.

TANG Yi,LI Feng,WANG Qi,et al. Quantitative evaluation of communication system fault effect on real-time load control of power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):90-96.

- [15] 梅杰,高赐威. 交通特性在电动汽车并网研究中的考虑[J].
 电网技术,2015,39(12):3549-3555.
 MEI Jie,GAO Ciwei. Considerations of traffic characteristics in research of grid integration of electric vehicles[J]. Power System Technology,2015,39(12):3549-3555.
- [16] 陈盛. 城市道路交通流速度流量实用关系模型研究[D]. 南京:东南大学,2004.
 CHEN Sheng. Research on practical velocity-volume model of urban street[D]. Nanjing:Southeast University,2004.
- [17] 刘任任,陈建二,陈松乔. 基于求传递闭包的Warshall算法的 改进[J]. 计算机工程,2005,31(19):38-39.
 LIU Renren, CHEN Jian'er, CHEN Songqiao. Improvement of

Warshall algorithm based on transitive closure [J]. Computer Engineering, 2005, 31(19): 38-39.

- [18] 徐达,蔡满春,陈悦. 基于改进 Floyd 算法的城市交通网络最短路径规划[J]. 电子科技,2017,30(7):17-20.
 XU Da, CAI Manchun, CHEN Yue. Shortest path of urban traffic based on the improved Floyd algorithm[J]. Electronic Science and Technology,2017,30(7):17-20.
- [19] 田立亭,史双龙,贾卓,等. 电动汽车充电需求的统计学模方法[J]. 电网技术,2010,34(11):126-130.
 TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo, et al. A statistical model for charging power demand of electric vehicles [J].
 Power System Technology,2010,34(11):126-130.
- [20] 陈丽丹,聂涌泉,钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. 电工技术学报,2015,30(4):216-225.
 CHEN Lidan,NIE Yongquan,ZHONG Qing. A model for electric vehicle charging load forecasting based on trip chains
 [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (4):216-225.
- [21] 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.

- [22] STEPHEN B, SCOTT G, JOE C. An optimal Thevenin equivalent estimation method and its application to the voltage stability analysis of a wind hub[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3644-3652.
- [23] 于晗,钟志勇,黄杰波,等.采用拉丁超立方采样的电力系统 概率潮流计算方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(21): 32-35.

YU Han, ZHONG Zhiyong, HUANG Jiebo, et al. A probabilistic load flow calculation method with Latin hypercube sampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 32-35.

- [24] OWEN A B. Controlling correlations in Latin hypercube samples [J]. Journal of the American Statistical Association, 1994,89(428):1517-1522.
- [25] 郭毅,胡泽春,张洪财,等. 居民区配电网接纳电动汽车充电 能力的统计评估方法[J]. 电网技术,2015,39(9):2458-2464. GUO Yi, HU Zechun, ZHANG Hongcai, et al. A statistical method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load[J]. Power System Technology,2015,39(9):2458-2464.

作者简介:



杨昕然(1994—), 女, 重庆人, 硕士研究 生, 研究方向为智能电网与电动汽车交互 (E-mail: xinranyyy@126.com);

吕 林(1963—),男,四川成都人,教授,研究方向为电力系统分析(E-mail:lvlin@scu.edu.cn);

杨昕然

向 月(1987—),男,重庆人,副教授, 博士,通信作者,研究方向为智能电网与电

动汽车交互(E-mail:xiang@scu.edu.cn)。

(下转第122页 continued on page 122)

in the 500 kV southern power grid of Suzhou[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 20-24.

- [15] 刘黎明,康勇,陈坚,等. UPFC的交叉耦合控制及潮流调节能力分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(10):42-48.
 LIU Liming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Cross coupling control scheme and performance analysis for power flow control of UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 42-48.
- [16] 刘普,王跃,雷万钧,等. 模块化多电平变流器桥臂电感参数设计[J]. 电网技术,2015,39(6):1665-1671.
 LIU Pu, WANG Yue, LEI Wanjun, et al. Parameter designing of arm reactor for modular multilevel converter [J]. Power System Technology,2015,39(6):1665-1671.

作者简介:



梅 军(1971—),男,江苏淮安人,副教 授,博士,主要研究方向为柔性交流输电、柔 性直流输配电技术等(E-mail:mei_jun@seu. edu.cn);

何梦雪(1994—), 女, 福建福州人, 硕 士研究生, 主要研究方向为柔性交流输电技 术(**E-mail**: careenstrive@126.com):

王 创(1992—),男,江苏扬州人,硕士研究生,主要研 究方向为柔性交流输电技术(E-mail:651547890@qq.com)。

Current-limiting MMC-UPFC based on split inductor

MEI Jun¹, HE Mengxue¹, WANG Chuang¹, LIU Jiankun², LI Peng²

(1. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to reduce the risk of large-current shocks caused by AC system short circuit faults to MMC-UPFC(Unified Power Flow Controller based on Modular Multilevel Converter) and ensure the safe operation of power electronic equipment, a novel current-limiting UPFC-MMC topology based on split inductors is proposed. Through the split design of the bridge arm inductance and the space configuration adjustment of the thyristor bypass switch on the valve side of the series transformer, the fast protection of the converter and the effective limitation of the fault current are realized. The current-limiting principle of this topology is elaborated, and the optimization design of key parameters is carried out. The simulation and analysis of proposed current-limit MMC-UPFC topology are carried out by PSCAD / EMTDC. The simulative results show that proposed topology has flexible power flow regulation characteristics and significant fault current limiting capability.

Key words: electric power transmission; unified power flow controller; split inductor; thyristor bypass switch; parameter design; fault current limiting

(上接第108页 continued from page 108)

Degradation charging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under "EV-road-grid" coupling

YANG Xinran, LÜ Lin, XIANG Yue, LIU Youbo, LIU Fangfang

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to evaluate the impact of static voltage stability caused by the disordered charging behavior of EVs(Electric Vehicles), a degradation charging scenario is constructed and a continuous flow model considering the behavior of EVs in a temporal and spatial context is proposed. Based on the complex network theory, a coupling system of "EV-road-grid" is built to simulate the driving path characteristics of EVs under the constraints of urban traffic network. The charging position and driving path of EVs are designed to characterize the temporal and spatial variability of charging load, then a degradation charging scenario is constructed. An improved continuous power flow model is built to search the power grid collapse state, and the voltage distribution characteristics and weak areas of power grid in critical state are analyzed. The proposed method can quantify the number of EVs admitted to the urban power grid in degradation charging scenarios, evaluate the weak areas of power grid, reconstruct and plan the regional distribution network connected with charging facilities.

Key words: electric vehicles; charging load model; "EV-road-grid" system; degradation charging scenario; continuous power flow; distribution network; voltage stability



图 A1 电压失稳状态下的电压分布曲面图

Fig.A1 Curved surface diagram of voltage distribution under voltage instability states



图 A2 常规负荷无增长时系统崩溃电压时间分布曲面图

Fig.A2 Curved temporal surface diagram of voltage collapse distribution without increment of general load





Fig.A3 Comparison of node collapse voltage with and without traffic network



Fig.A4 Driving path of EVs considering traffic networkconstrains