

基于不确定充电行为的电网接纳电动汽车能力研究

假设电动汽车的使用不改变用户的行驶习惯，采用随机概率事件表示不确定性充电行为，将电动汽车集群的充电行为用二项分布表示，单台电动汽车的充电行为通过随机数与二项分布参数比较确定，建立了规模化电动汽车充电负荷计算模型；并基于充电负荷的概率分布特性，建立了电网接纳电动汽车能力的优化计算模型，采用机会约束规划（Chance Constrained Programming, CCP）和粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）相结合的方法进行求解。以北京市汽车行驶特性和IEEE—30电网系统为例，分析了电网接纳电动汽车的能力，并通过对比计算验证了提出方法的准确性。

杨冰 张宝群 马龙飞 宫成 焦然 迟忠君 陈艳霞 李香龙
/国网北京市电力公司



杨冰/工程师

0 引言

电动汽车接入电网的关键问题主要有电动汽车充电站的建设和电动汽车充电控制策略^[1-3]。由于用户充电行为的随机性，充电负荷具有很强的不确定性，会引起电网运行的随机波动，进而降低电网运行的静态安全，而且随着电动汽车规模的增长，这些影响会更加明显，因此研究不确定充电行为下电网能够接纳电动汽车能力有着深远的意义，可作为充电站建设和充电控制研究的基础。

目前关于电动汽车接入电网的研究包含三个方面：①电动汽车充电负荷计算/预测方法研究^[4-10]；②电动汽车充电对电网影响研究^[11-13]；③电动汽车与随机性电源结合参与电网调度控制研究^[13-16]。其中，对电动汽车充电负荷计算方法的研究是后续问题研究的基础，由于目前尚没有规模化的

电动汽车，蒙特卡洛模拟技术成为研究电动汽车充电负荷的主要方法，然而文献中多是考虑了用户充电时间和日行驶里程的随机性，却很少考虑用户充电行为的不确定性；文献[4-5]中认为电动汽车的充电行为有两种：确定性充电和约束性充电，进而预测未来电动汽车可能的充电负荷；文献[6,7,8,10]中以为用户每天行驶结束后均进行充电，来研究电动汽车充电负荷；文献[9]中采用模糊理论以动力电池荷电状态（State of Charge, SOC）为判定标准来决定个体用户的充电行为，是一种值得参考的方法；然而上述的这些方法只考虑了部分的因素，没有考虑不同充电行为所引起的充电负荷的差异。电动汽车充电对电网影响和电动汽车参与电网调度控制的研究都是基于电网接纳电动汽车能力基础之上，然而文献[13]中仅研究了不同电动汽车规模可能引起的对配电网的影响；文献[14]中研究了以减小电网损耗为目标的电动汽车调动控制策略；文献[15-16]中仅研究了电动汽车充电负荷对电网潮流的影响；然而却很少有研究来论证电网能够接纳电动汽车的能力。综上所述，有必要进一步地研究用户不确定性充电行为引起的充电负荷特性以及电网接纳电动汽车能力的计算方法。

本文基于电动汽车集群充电行为的不确定性，建立了电动汽车充电负荷计算模型，建立了电网接纳电动汽车数量的随机计算模型，验证了该模型的有效性，并分析了不确定性充电负荷对电网接纳能力的影响。

关键词/Keywords
不确定充电行为 ·
充电概率 ·
电动汽车 ·
接纳能力 ·

1 电动汽车充电负荷计算方法

1.1 充电行为不确定性建模

由于人们活动的主观性和随机性,会使得电动汽车充电行为很随机。对于用户的日行驶时间、行驶里程,可采用概率分布的方法描述其随机性,根据传统燃油车的行驶规律到相应的分布参数,因此,可认为随机特性是确定性的。对于用户的充电行为,在电动汽车尚未普及之前甚至是普及之后,也很难准确描述,因此是不确定性的问题。

对于个体电动汽车,充电行为有两种:“行驶结束后即充电”和“行驶结束且不能满足行驶需求时充电”。对于电动汽车集群,充电行为则呈现出 uncertain 的情况,介于“所有用户行驶结束后即充电”和“所有用户行驶结束且不能满足行驶需求时充电”两种状态之间。将“行驶结束后即充电”用“1”表示,将“行驶结束且不能满足行驶需求时充电”用“0”表示,因此个体用户充电行为服从(0-1)分布。假设用户之间充电行为互不影响,数量为 n 的电动汽车集群充电行为近似服从参数为 n, p 的二项分布,记为 $\text{charge_set} \sim b(n, p)$,其中 p 为充电的概率,至此可以用 p 表示充电行为。

电动汽车充电负荷考虑的是电动汽车集群的充电行为,对于个体充电行为,可以通过如下的两步进行确定:

- 1) 第1步。设定集群充电概率为 $p, p \in [0, 1]$ 。
- 2) 第2步。对于第 i 台电动汽车,随机生成服从 $U(0, 1)$ 的随机数 rand ,当 $\text{rand} > p$ 时,电动汽车在行驶结束后即进行充电;当 $\text{rand} < p$ 时,电动汽车在不能满足行驶需求时进行充电。

1.2 电动汽车充电负荷计算

电动汽车的电量消耗与行驶工况有关,这里认为电动汽车每公里耗能不变,在行驶前后电动汽车SOC的变化情况可按照公式(1)进行计算,充电过程中电池SOC变化的过程可由公式(2)计算,单台电动汽车的充电功率可由公式(3)计算。

$$\text{SOC}_i(t_{ii-2}) = \text{SOC}_i(t_{ii-1}) - d_i / D_i \quad (1)$$

$$\text{SOC}_i(t_{ci-2}) = \text{SOC}_i(t_{ci-1}) + c \times (t_{ci-2} - t_{ci-1}) / C_i \quad (2)$$

$$p_i(t) = \begin{cases} c, & t_{ci-1} \leq t \leq t_{ci-2} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

式中, SOC_i 为电动汽车行电池的SOC值; d_i 和 D_i 分别为第 i 辆电动汽车的日行驶里程和续航里程; t_{ii-1} , t_{ii-2} ,和 t_{ci-1} , t_{ci-2} 分别为电动汽车行驶起始、终止时间和充电起始、终止时间,假设 $t_{i-2} = t_{c-1}$; c 为恒定充电功率; C_i 为第 i 台电动汽车的电池容量(单位kWh); $p_i(t)$ 为第 i 辆电动汽车在 t 时刻的充电功率。

对于电动汽车的行驶里程、行驶起始和终止时间,根据目前燃油车的行驶规律,采用蒙特卡罗模拟技术获得^[8]。而实际中用户的日行驶里程和行驶起始、结束时间都略有变化,可通过叠加一个随机因子进行描述,因此,电动汽车的日行驶里程和行驶起始、结束时间可用表达式(4)描述。

$$\begin{cases} d_i = d'_i + \Delta d_i \\ t_{ii-1} = t'_{ii-1} + \Delta t \\ t_{ii-2} = t'_{ii-2} + \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中, $d'_i, t'_{ii-1}, t'_{ii-2}$ 分别为根据燃油车行驶规律获得的第 i 辆电动汽车日行驶里程和行驶起始、终止时间; $\Delta d_i, \Delta t$ 为日行驶里程和行驶时间的随机因子,均采用正态分布随机数表示。

因此,规模化电动汽车的充电负荷 $p(t)$ 可通过单台电动汽车的充电功率叠加得到,由公式(5)计算,单台电动汽车的平均充电负荷 $p_{ev}(t)$ 可通过公式(6)计算。

$$p(t) = \sum_{i=1}^N p_i(t) \quad (5)$$

$$P_{ev}(t) = p(t) / N_{ev} \quad (6)$$

式中, N 为需要充电的电动汽车数量; N_{ev} 为总的电动汽车数量。

电动汽车充电时无功功率由充电机的功率因数决定,因此充电无功负荷采用公式(7)计算。

$$Q_{ev}(t) = P_{ev}(t) \sqrt{\frac{1-a^2}{a^2}} \quad (7)$$

式中, $Q_{ev}(t)$ 为电动汽车的无功功率需求, a 为充

机的功率因数。

2 电网最大接纳电动汽车能力计算

2.1 最大接纳充电负荷计算模型

电动汽车充电负荷接入电网会改变电网原有运行的状态,例如改变节点电压、支路潮流等。这里根据电网运行的稳态特性,考虑电网的静态安全约束来计算电网能够接纳最大电动汽车的规模,因此可建立如下规划模型。

2.1.1 目标函数

模型以系统能够接纳的电动汽车最大数量为目标,因此可建立如下目标函数

$$\max \sum_{i=1}^m x_i \quad (7)$$

式中, i 为负荷节点标号; x_i 为节点 i 处能够接纳的电动汽车数量; m 为可接入电动汽车的负荷节点数量。

2.1.2 等式约束

电动汽车并入电网后,必须能够满足电力系统的潮流方程,即为等式约束条件

$$\begin{cases} P_{si} - x_i P_{ev} - P_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{si} - x_i Q_{ev} - Q_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{si} , Q_{si} 分别为节点电源的注入有功功率和无功功率; P_{Li} , Q_{Li} 分别为负荷的有功功率和无功功率注入; $x_i P_{ev}$, $x_i Q_{ev}$ 分别为电动汽车充电负荷的有功功率和无功功率注入; U_i , U_j 分别为节点 i , j 的电压幅值; G_{ij} , B_{ij} 分别为节点导纳矩阵 i , j 位置对应元素的实部和虚部; θ_{ij} 为节点 i , j 之间的电压相位差; $j \in i$ 为 j 与节点 i 关联的节点。

2.1.3 决策变量约束

某一个节点能够接纳的电动汽车数量,要考虑到该节点实际地理位置能够建设的电动汽车充电设施的最大数量,可由如下的决策变量约束

$$0 \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad (9)$$

式中, $x_i^{\max}$ 为受地理等因素影响后,节点 i 能够接入的最大电动汽车数量。

2.1.4 不等式约束

在优化计算中,考虑节点电压幅值约束,发

电机有功、无功约束,线路潮流约束和电力系统有功无功热备用约束等,其表达形式如不等式(10)~(13)所示。

(1) 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (10)$$

式中, $U_i^{\min}$ 和 $U_i^{\max}$ 分别为节点 i 电压幅值分最大最小约束,其标幺值一般为 0.95 和 1.05。

(2) 发电机出力约束

$$\begin{cases} P_{si}^{\min} \leq P_{si} \leq P_{si}^{\max} \\ Q_{si}^{\min} \leq Q_{si} \leq Q_{si}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $P_{si}^{\min}$, $P_{si}^{\max}$, $Q_{si}^{\min}$, $Q_{si}^{\max}$ 分别为发电机 i 的有功出力和无功出力的最大最小值。

(3) 线路潮流约束

$$0 \leq P_{Lij} \leq P_{Lij}^{\max} \quad (12)$$

式中, P_{Lij} 为流过线路 i, j 的有功潮流; $P_{Lij}^{\max}$ 为能够承受的最大潮流值极限,根据表达式(13)计算。

$$P_{Lij} = U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - t_{ij} G_{ij} V_i^2 \quad (13)$$

式中, t_{ij} 为支路变比标幺值。

(4) 系统旋转备用约束

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (P_{si}^{\max} - P_{si}) \geq P_{sr}^{\text{up}} \\ \sum_{i=1}^n (P_{si} - P_{si}^{\min}) \geq P_{sr}^{\text{dn}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, P_{sr}^{up} , P_{sr}^{dn} 分别为系统的热备用的上、下限值,一般为系统总负荷的 5%。

2.2 机会约束规划计算模型

由于电动汽车集群充电概率的不确定性,以及用户行驶里程,充电时间的随机性,电动汽车的充电负荷会是一个随机值,即在上述等式约束表达式(8)中 P_{ev} 是一个随机变量,这里引入机会约束规划(Chance Constrained Programming, CCP)的方法来求解上述的最优化问题^[17]。因此,将上述模型的不等式约束条件转换成如下形式。

$$P_r \{ g_i^{\min} \leq g_i(x_i, P_{ev\zeta}) \leq g_i^{\max} \} \geq \alpha \quad (14)$$

式中, $P_r\{\}$ 表示求概率; $g_i(x_i, P_{ev\zeta})$ 表示约束条件,对应不等式(10)~(13), $P_{ev\zeta}$ 表示电动汽

车充电负荷随机数； $g_i^{\max}$ ， $g_i^{\min}$ 分别表示约束条件的上下限； α 为 CCP 计算时的置信度。

2.3 计算方法

在求解 CCP 问题时，一般要借助于蒙特卡罗模拟技术来生成所需要随机数以表示变量的随机特性，对于最优化的问题求解可借助于人工智能算法，本文采用粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization, PSO）来求解电动汽车最大接入能力问题。假设粒子群的维数 m 为所要接入电网的节点数目，则规模为 n 的粒子群可表示为

$$P_{psa} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中，每一行元素表示一个粒子，粒子中的每一个元素 x_{ij} 表示第 i 个粒子在第 j 个负荷节点所接纳的电动汽车数量，与表达式 (7) 中的 x_i 相对应。

按照标准粒子群算法的计算方法，在求解最优接入电动汽车数量时，粒子群需要不断更新以获得更好的粒子取值，按照表达式 (16) 和 (17) 计算。

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (p_g^t - x_i^t) \quad (16)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (17)$$

式中， v_i^t 为第 t 次迭代过程中粒子 i 对应的速度； p_i^t ， p_g^t 分别为第 t 次迭代时粒子群的个体最优值向量和全局最优向量； c_1 ， c_2 为学习因子； r_1 ， r_2 为区间 (0, 1) 的随机数； ω 为惯性权重因子。

为了更好地控制全局和局部搜索能力， ω 取值可采用线性递减策略

$$\omega = \omega_{\max} - t(\omega_{\max} - \omega_{\min}) / t_{\max} \quad (18)$$

式中， $\omega_{\max}$ ， $\omega_{\min}$ 为权重因子的最大、最小值，一般取 0.9 和 0.4； $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

2.4 计算步骤

按照上述的计算模型和计算方法，将电网接纳最大电动汽车数量的计算步骤归纳为如下：

1) 给定电网参数、电动汽车参数、电网接

入点以及粒子群算法的相关参数。

2) 按照电网接入点参数，生成初始种群：

$$X = [x_1, x_2, \cdots, x_n]^T$$

3) 按照充电负荷的概率分布参数，生成 N 个随机充电负荷峰值数据，并转换为电动汽车的充电负荷： $X^*[\zeta_1, \zeta_2, \cdots, \zeta_N]$ 。

4) 将 N 组充电负荷数据分别代入公式 (8) 中进行潮流计算，得到电网各节点的电压、各发电机的有功功率、无功功率以及线路潮流；用表达式 (14) 判断是否满足约束，如果满足约束，则用表达式 (7) 计算相应粒子的适应度值，转到第 5) 步；若不满足约束，则重新生成粒子，返回到第 3) 步。

5) 按照公式 (16) 和 (17) 更新粒子，返回第 4) 步。

6) 当迭代次数达到设定值时计算结束，输出能够接纳的电动汽车数量和各节点的接纳数量。

3 案例分析

3.1 电动汽车不确定性充电负荷

以燃油车行驶规律为基础计算电动汽车的充电负荷，用户日行驶的起/止时间和行驶里程根据北京市交通委员会发布的《北京市 2011 年交通发展年度报告》得到，电动汽车参数参见文献 [8]，电动汽车的充电功率设定为 3.3 kW。通过计算，分别得到 200 万辆电动汽车在充电概率 p 为 1, 0.5 和 0 时的充电负荷曲线，如图 1 所示。

从图 1 中可以看出，在不同的电动汽车集群充电概率下，充电负荷的峰值出现的时间点基本不变，而峰值大小的概率分布特性却不同，通过分析发现在不同充电概率时充电负荷峰值均服从正态分布。表 1 为几种不同充电概率下充电峰值的概率分布参数。

表 1 不同充电概率时充电负荷峰值概率分布参数

充电概率 p	平均值/MW	标准差/MW
0.00	3 103.2	182.6
0.23	3 495.4	196.2
0.33	3 592.1	177.9
0.50	3 816.1	159.0
0.67	4 111.3	135.9
0.77	4 320.4	123.7
1.00	4 858.1	93.2

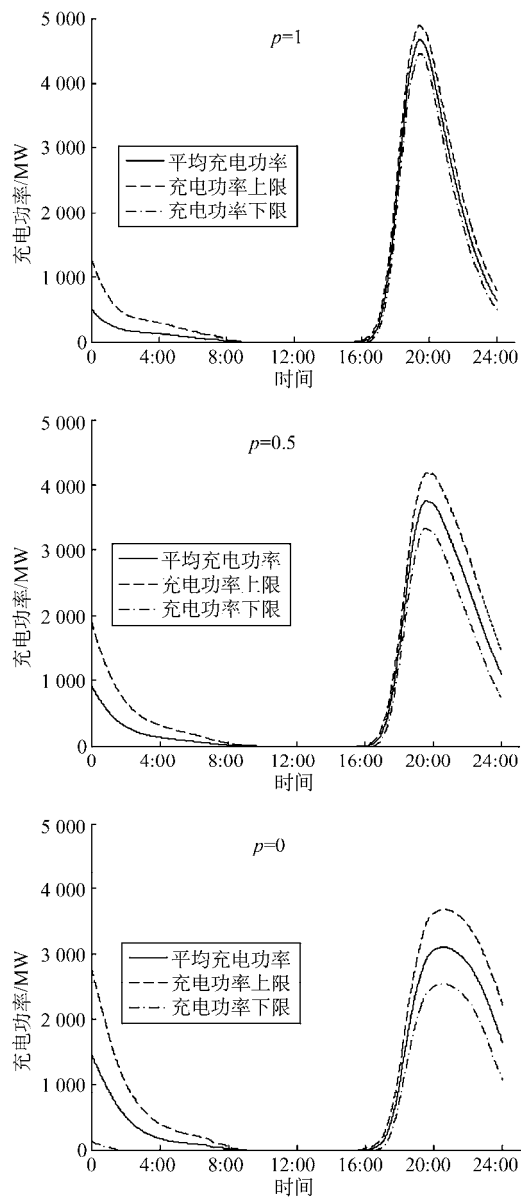


图1 电动汽车充电负荷曲线

从表 1 中可以看出：

1) 随着充电概率的增大，充电负荷峰值的平均值增大。

2) 充电负荷峰值的标准差随充电概率的增大而减小。其原因在于：随着充电概率的增大，电动汽车集群充电行为的随机性降低，单台电动汽车每次充电的能量减小，充电变得频繁，每天充电的电动汽车数量增大，因此充电负荷峰值变大，标准差降低。

3.2 电网接纳电动汽车能力分析

假设电动汽车的充电负荷和电力系统的负

荷峰值重合，以 IEEE—30 标准系统为例来分析电网能够接纳的电动汽车能力，该系统是电力系统研究中广泛应用的标准测试系统之一，其主接线如图 2 所示，系统由 24 个负荷节点，41 条支路，6 台发电机构成，系统负荷为 198.2 MW。

(1) 单节点接纳电动汽车能力分析

将 IEEE—30 电网结构分为三个区域，如图 2 所示，不同区域中电网的发电机容量和负荷容量均不同，因此在不同区域中各选择一个节点作为电动汽车的接入点来分析电网的接纳能力。通过仿真计算得到，在不同充电概率情况下，按照确定性均值和本文所提出的方法计算单节点接纳电动汽车最大数量，如表 2 所示。

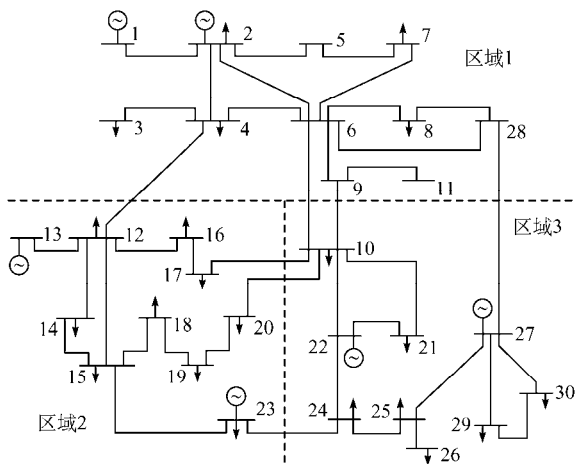


图2 IEEE-30 节点标准电网系统

表 2 不同充电概率时电网接纳电动汽车的能力
单位：百辆

<i>p</i>	节点 4		节点 17		节点 21	
	1	2	1	2	1	2
0.00	336	295.8	245	211.2	197	174.5
0.23	298	262.2	217	193.6	175	156.0
0.33	290	261.2	212	189.2	171	152.2
0.50	273	245.0	199	180.2	161	147.0
0.67	254	234.0	185	171.6	149	137.2
0.77	241	223.2	176	163.2	142	132.5
1.00	215	205.0	157	149.5	126	120.8

注：1 表示按照平均值计算的结果，2 表示按照本文的方法计算的结果，下同。

从表 2 中可以看出：

1) 不同节点能够接纳电动汽车的最大能力不同。

2) 随着充电概率的增大, 电网能够接纳的电动汽车数量减小。

3) 相比两种方法的计算结果, 采用本文所提方法计算的结果比较小, 而且充电功率越小, 计算的差别越大。因此, 将两种计算的结果并入电网进行检验。

按照上述电动汽车的充电负荷概率分布特性和不同充电概率下电网接纳电动汽车的能力分别生成 1 000 个充电负荷随机数, 将充电负荷接入电网模型进行潮流计算, 并统计电网不发生越限(对应上述 4 种不等式约束)的概率, 统计结果如表 3 所示。

表 3 单点接纳电动汽车能力检验

单位: 百辆

p	节点 4		节点 17		节点 21	
	1	2	1	2	1	2
0.00	0.42	1.00	0.38	1.00	0.45	1.00
0.23	0.43	1.00	0.42	0.99	0.58	1.00
0.33	0.50	0.99	0.53	1.00	0.48	0.99
0.50	0.54	0.99	0.52	1.00	0.50	0.99
0.67	0.41	0.99	0.49	1.00	0.56	0.99
0.77	0.48	1.00	0.52	0.99	0.47	1.00
1.00	0.41	1.00	0.37	1.00	0.42	1.00

从表 3 中可以看出, 采用本文所述的方法计算得到的电动汽车极限对电网静态稳定运行产生影响的概率小于 0.01, 而采用平均值计算出的结果对电网静态稳定影响很大, 因此可以说明本文所提计算方法的准确性。

(2) 多节点接纳电动汽车能力分析

由于电网结构中电源分布和网络参数不同, 各负荷节点能够接纳的电动汽车负荷渗透极限不同。另外, 电动汽车充电负荷存在空间特性, 因而需要考虑多点接入情况, 才能反映出电网系统能够接纳电动汽车的能力。

假设 IEEE-30 系统中 24 个负荷节点均有电动汽车接入, 仿真时构造一个 24 维粒子, 每一个粒子的取值范围为[1, 50], 最大更新速度设置为 5, 最大迭代次数设定为 300, 计算得到多节点接入时电网系统能够接纳的电动汽车的数量, 如表 4 所示。

表 4 多节点接入时电网的接纳能力

单位: 百辆

p	0.00	0.23	0.33	0.50	0.67	0.77	1.00
1	331.9	294.9	288.0	273.5	250.9	238.7	212.2
2	274.0	265.0	261.5	249.3	231.0	219.0	202.2
3	282.3	252.9	250.3	242.1	228.1	220.1	200.9

注: 3 表示按最大值计算的结果, 最大值=均值+3×标准差。

由表 4 中可以看出:

1) 随着充电概率的增大电网能够接纳的电动汽车数量减少, 与单点接入时的情况相同。

2) 按照不同方式计算出的电网接纳电动汽车数量极限不同, 按均值计算出的结果最大, 而按照最大值计算的结果最小。因此, 采用类似于单点接入的检验方法进行检验, 检验概率值如表 5 所示。

表 5 多节点接纳电动汽车能力检验

单位: 百辆

p	0.00	0.23	0.33	0.50	0.67	0.77	1.00
1	0.45	0.52	0.43	0.42	0.48	0.54	0.49
2	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

从表 5 中可以看出, 在三种方法计算的结果中, 按照均值计算的结果对电网稳定运行影响最大, 按照最大值和本文所述的方法计算的结果对电网稳定运行影响都比较小, 而按照最大值计算出的结果过于保守, 不能代表电网接纳电动汽车数量极限。

(3) 总结与预测

从上述的计算中可以看出, 采用本文提出的方法计算出结果能够代表电网的极限接纳能力, 在不同充电概率下, 电网能够接纳的电动汽车充电负荷的能力不同。充电概率越大, 电网能够接纳的电动汽车数量越少。

4 结束语

本文建立了不同充电概率情况下规模化电动汽车的充电负荷模型, 建立了电网接纳电动汽车能力的计算模型, 分析了不同充电概率时电动汽车的充电负荷峰值的概率分布特性, 分析了电网接纳电动汽车的能力。电网接纳能力计算中, 考虑了电动汽车充电负荷的随机特性与实际的充电特性更加相似, 因此计算的结果更为准确;

通过单点接入、多点接入计算以及与按照最大值、平均值计算结果的对比,验证了本文按照随机方法计算电网接纳电动汽车能力的准确性。该计算方法和结论可作为电动汽车充电建设等问题的理论依据。

参考文献

[1] Green Robert C, WANG Lingfeng, Mansoor Alam. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks : a review and outlook[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 1 (15) : 544-553.

[2] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述 [J]. 电网技术, 2011, 2 (35) : 127-131.

[3] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 4 (32) : 1-11.

[4] Kejun QIAN, Chengke ZHOU, Malcolm Allan, et al. Load model for prediction of electric vehicle charging demand[C]. IEEE 2010 International Conference on Power System Technology, 2010 : 1-6.

[5] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (14) : 36-42.

[6] 田立亨, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术. 2010, 11 (34) : 126-130.

[7] Ashtari A, Bibeau E, Shahidinejad S, et al. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (1) : 341-350.

[8] 杨冰, 王丽芳, 廖承林. 大规模电动汽车充电需求及影响因素[J]. 电工技术学报, 2013, 28 (2) : 22-27.

[9] Soheil Shahidinejad, Shaahin Filizadeh, Eric Bibeau. Profile of charging load on the grid due to plug-in vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (1) : 135-141.

[10] Lojowska A, Kurowicka D, Papaefthymiou G,

et al. From transportation patterns to power demand : Stochastic modeling of uncontrolled domestic charging of electric vehicles[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, 1 (1) : 1-7.

[11] Taylor J, Aaitra A, Alexander M, et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations [C]. Calgary :IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009 : 1-6.

[12] Li Gan, Zhang Xiao-Ping. Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations[J]. IEEE Transactions on smart grid, 2012, 3 (1) :492-499.

[13] Clement K, Haesen E, Driesen J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (1) : 371-380.

[14] Sortomme E, Hindi M M, Macpherson S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2 (1) : 198-205.

[15] Vlachogiannis J. G. Probabilistic constrained load flow considering integration of wind power generation and electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24 (4) : 1808-1817.

[16] 蔡德福, 钱斌, 陈金富, 等. 含电动汽车充电负荷和风电的电力系统动态概率特性分析[J]. 电网技术, 2013, 37 (3) : 590-596.

[17] 王锐, 顾伟, 孙荣, 等. 基于概率最优潮流的风电接入能力分析[J]. 电网技术, 2011, 35 (12) : 214-220.

作者简介

杨冰 (1987-), 男, 博士, 工程师, 主要从事工作领域: 电动汽车与电网互动。

(收稿日期: 2015-12-10) EA
(编辑: 史海疆)