

DOI: 10.7667/PSPC151392

# 电动汽车接入对风电穿透功率极限的影响研究

王星华, 彭智乐, 彭显刚, 聂一雄, 刘艺, 陈雅芳

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 电动汽车和分布式风电接入电网是当前的研究热点。首先分析了分布式风电以及电动汽车入网的随机特性, 介绍了基于非参数核密度估计法的含电动汽车配电网负荷建模方法。该方法能够较好地克服由传统的正态分布进行负荷建模带来的误差。建立了基于机会约束的分布式风电穿透功率极限的计算模型, 并使用嵌入随机模拟技术的粒子群优化算法对不同电动汽车渗透率时风电的穿透功率极限进行求解。最后, 算例说明了电动汽车入网对负荷分布的影响, 并从多个角度分析了电动汽车渗透率对风电极限穿透功率的影响机理。

**关键词:** 电动汽车入网; 分布式风电; 电动汽车渗透率; 风电穿透功率极限; 随机模拟; 粒子群算法

## Influence research of electric vehicle accessing on the wind penetration limit

WANG Xinghua, PENG Zhile, PENG Xiangang, NIE Yixiong, LIU Yi, CHEN Yafang

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Electric vehicle and distributed wind generation (DWG) accessing to grid are hotspot of current research. Firstly, the stochastic characteristics of DWG and electric vehicle to grid (V2G) are illustrated, and the method of distribution network load modeling including electric vehicle charge/discharge power is proposed based on nonparametric kernel density estimation, which could better overcome the error brought by traditional normal distribution in load modeling. Secondly, the wind penetration limit calculation model is constructed based on chance constrained programming (CCP), and the particle swarm optimization (PSO) algorithm embedded with stochastic simulation is proposed to solve the calculation model. Finally, the influence of V2G on the distribution of distribution network load is stated on a tested system; what is more, the influence of electric vehicle penetration on the wind penetration limit is analyzed from multiple perspectives.

**Key words:** electric vehicle to grid (V2G); distributed wind generation (DWG); electric vehicle penetration; wind power penetration limit; stochastic simulation; PSO

## 0 引言

据工信部的电动汽车发展战略研究报告的预测, 我国在 2030 年的电动汽车保有量将达到 6 000 万辆<sup>[1]</sup>。另外, 随着分布式能源 (Distributed Energy Resource, DER) 的建设不断推进, 风力发电开始大规模接入电网。风力发电按规模可分为 2 种<sup>[2]</sup>: 一种是直接与输电网连接的大中型风电场(50 MW 及以上), 另一种是以分布式电源(Distributed Generation, DG)形式分布在配电网中的单个风力发电机组或由此组成的小型风电场, 可以称之为分布式风电(Distributed Wind Generation, DWG)。其中的 DWG 具有接近负荷、避免功率的大容量长距离传输的特点, 其发展受到格外的重视。

目前, 已有较多文献对电动汽车和分布式风电并网展开研究, 如协调控制<sup>[3-5]</sup>、并网规划<sup>[6-7]</sup>等, 针对电动汽车渗透率对风电穿透功率极限之间关系的研究暂时较少。另外, 配电网负荷随机模型一般采用正态分布表示, 属于参数估计范畴。实际上随着用户的意愿和出行需要, 电动汽车的充放电具有随机性<sup>[8-9]</sup>, 与传统负荷叠加后的等效负荷模型将变得未知, 继续采用传统的参数估计法具有局限性。因此本文将提出非参数核密度估计法进行负荷建模, 能较好地克服参数估计的局限性。

## 1 相关随机变量及其建模

### 1.1 风力发电模型

一般认为, 风速随机变量  $v$  服从 Rayleigh 分布

或者 Weibull 分布<sup>[10]</sup>, 本文假定风速服从 Rayleigh 分布。设  $v$  的概率密度函数(PDF)为

$$f_v(v) = \frac{v}{\sigma^2} e^{-v^2/2\sigma^2} \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为形状参数。

风力发电输出有功功率  $P_{WT}$  与风速  $v$  的对应关系如图 1 所示。

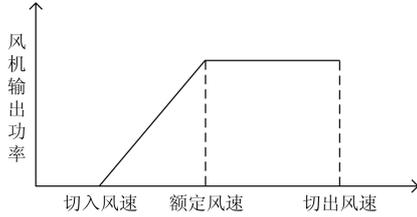


图 1 风电功率图

Fig. 1 A wind turbine power curve

函数映射关系如式(2)~式(4)所示。

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci}, v \geq v_{co} \\ av + b, & v_{ci} < v < v_r \\ P_r, & v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

$$a = \frac{P_r}{v_r - v_{ci}} \quad (3)$$

$$b = -\frac{P_r v_{ci}}{v_r - v_{ci}} \quad (4)$$

式中:  $v_{ci}$  为切入风速;  $v_{co}$  为切出风速;  $v_r$  为额定风速;  $P_r$  为额定有功功率。

另外, 将风电机组视为 PQ 节点<sup>[11]</sup>, 并以恒功率因数  $\cos\phi$  运行, 因此, 无功功率为

$$Q_{WT} = P_{WT} \tan\phi \quad (5)$$

## 1.2 基于非参数核密度估计的负荷建模

非参数核密度估计法是研究样本数据的分布特征, 不需对模型提前假设, 在研究一段时期的样本数据时, 可以有相对精确的估计结果<sup>[12]</sup>。

### 1.2.1 非参数核密度估计法

设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为随机变量  $x$  的样本, 概率密度函数为  $f(x)$ , 则随机变量  $x$  的核密度估计<sup>[13]</sup>为

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (6)$$

式中:  $h$  为带宽;  $n$  为样本规模;  $K(\bullet)$  为核函数。

根据拇指法则<sup>[13]</sup>(Rule of Thumb), 最优的带宽  $h$  应为

$$h = \left(\frac{4}{3n}\right)^{1/5} \sigma \approx 1.33\sigma n^{-1/5} \quad (7)$$

式中,  $\sigma$  为样本的标准差。文献[13]建议采用更加稳健的散度度量半极差(IQR), 并用式(8)的  $\hat{\sigma}$  代替

式(7)中的  $\sigma$ 。

$$\hat{\sigma} = \min\left\{\sigma, I_{qr} / (\Phi^{-1}(0.75) - \Phi^{-1}(0.25))\right\} \approx \min(\sigma, I_{qr} / 1.34) \quad (8)$$

式中,  $\Phi$  是标准正态累积分布函数。

不同的核函数对核密度估计的影响较带宽  $h$  小。当带宽  $h$  一定时, 不同核函数对  $\hat{f}(x)$  的影响是等价的<sup>[14]</sup>。一般选用高斯核函数, 如式(9)所示。

$$K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) \quad (9)$$

### 1.2.2 电动汽车的随机特性

每辆电动汽车可以视作独立的随机变量, 其日行驶距离和到家时间是随机的。设某配网中电动汽车数量为  $N_{ev}$ , 电池的技术参数如表 1 所示。

表 1 电动汽车的参数

Table 1 Technical parameters of PEV	
参数	值
电池容量	18 kWh
充电模式	220 V/10 A/2.2 kW
最大放电深度	90%
行驶损耗	26.7 kWh/百公里
充放电效率	95%

日行驶距离  $d$  的概率密度函数(PDF)服从广义极值分布(GEV), 可由式(10)表示<sup>[15]</sup>。

$$f(d) = \frac{1}{\sigma_d} e^{-\left(1+k_d \frac{(d-\mu_d)}{\sigma_d}\right)^{1/k_d}} \left(1+k_d \frac{(d-\mu_d)}{\sigma_d}\right)^{-\left(1+\frac{1}{k_d}\right)} \quad (10)$$

式中:  $d$  为每辆车每天的行驶距离;  $\mu_d$ 、 $\sigma_d$ 、 $k_d$  分别为该函数的位置参数、尺度参数以及形状参数。对于私家车, 具体参数值可由文献[15]获得。

受使用习惯的影响, 每辆电动汽车到家的时间  $t_a$  不一, 其概率密度函数可由式(11)表达<sup>[15]</sup>。

$$f(t_a) = \frac{1}{\sigma_{t_a}} e^{-\left(1+k_{t_a} \frac{(t_a-\mu_{t_a})}{\sigma_{t_a}}\right)^{1/k_{t_a}}} \left(1+k_{t_a} \frac{(t_a-\mu_{t_a})}{\sigma_{t_a}}\right)^{-\left(1+\frac{1}{k_{t_a}}\right)} \quad (11)$$

式中:  $\mu_{t_a}$ 、 $\sigma_{t_a}$ 、 $k_{t_a}$  分别为该函数的位置参数、尺度参数以及形状参数。具体参数可由文献[15]获得。

### 1.2.3 负荷随机模型

由于分时电价机制的存在, 车主理性地选择只在谷电价时向电动汽车充电, 在峰电价时参与 V2G。假设以上行为只是在电动汽车到家之后发生。

以 15 min 为时间窗口, 通过蒙特卡洛抽样得到 1 天 96 点的充放电功率。与配电网其他一般性负荷

叠加后即可得到该配网一天 96 点的等效负荷样本。使用如式(9)所示的高斯核函数, 可以得到等效负荷  $x$  的概率密度函数  $f(x)$  的估计函数为

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}nh} \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2}{2h^2}\right) \quad (12)$$

式中:  $n$  为负荷样本个数;  $h$  为负荷样本带宽;  $x_i$  为第  $i$  个负荷样本;  $\hat{f}(x)$  为  $f(x)$  的非参数核密度估计函数。

## 2 风电穿透功率极限的数学模型

### 2.1 目标函数

由于风速的随机性, 风电机组的输出功率也是随机的, 不适合当作决策变量, 但风电场的装机容量是确定的。因此, 本文以风电场的装机容量作为优化变量, 并以装机容量的最大化作为优化目标。

具体可由式(13)表示。

$$\begin{aligned} \max(P_{\text{DVG}}) \\ P_{\text{DVG}} = \sum_{i=1}^m P_{\text{DVG}i} \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{DVG}}$  为分布式风电总装机容量;  $P_{\text{DVG}i}$  为第  $i$  个风电场装机容量;  $m$  为分布式风电场个数。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 等式约束

潮流约束

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

#### 2.2.2 机会约束

由于风速的随机性, 因此计算所得的状态变量也是随机量, 并且一些状态变量约束并不是严格要求满足, 允许短时间不满足, 因此, 将该状态变量的不等式约束表述成概率的形式, 使之在指定的置信水平上成立。置信水平一般取值在 0.9~1.0, 取值越小, 表明引入的风险越大, 取值越接近 1.0, 计算结果越趋于保守。

##### (1) 线路传输容量约束

$$\Pr\{S_{ij} \leq S_{ij\max}\} \geq \beta_1, \quad i, j = 1, 2, \dots, N_b \quad (15)$$

式中:  $S_{ij}$  为线路实际传输功率;  $S_{ij\max}$  为线路最大允许传输功率;  $\beta_1$  为线路不过载的置信水平。

##### (2) 节点电压约束

$$\Pr\{V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}\} \geq \beta_v, \quad i, j = 1, 2, \dots, N_B \quad (16)$$

式中:  $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  分别为节点电压允许上下限;  $\beta_v$

为节点电压合格的置信水平。

#### 2.2.3 不等式约束

##### (1) 电动汽车电池 SOC 约束

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\max} \quad (17)$$

式中: SOC 为电池荷电状态;  $\text{SOC}_{\max}$  和  $\text{SOC}_{\min}$  分别为电池 SOC 上下限。

##### (2) 充放电时间约束

每辆电动汽车的充放电时间受电池 SOC 影响, 电池的充电时间  $t_c$ 、放电时间  $t_{dc}$  满足以下约束:

$$t_{dc} \leq \min\left(\frac{(\text{SOC} - \text{SOC}_{\min}) \times E_r}{P_e}, t_{ps}\right) \quad (18)$$

$$t_c \leq \frac{(1 - \text{SOC}) E_r}{P_e} \quad (19)$$

式中:  $P_e$  为额定充放电功率;  $E_r$  为电动汽车电池额定容量;  $t_{ps}$  为峰电价剩余持续时间。

##### (3) 分布式电源出力约束

$$\begin{cases} P_{\text{DG}i} \leq P_{\text{DG}i\max} \\ Q_{\text{DG}i} \leq Q_{\text{DG}i\max} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{DG}} \quad (20)$$

式中:  $P_{\text{DG}i\max}$ 、 $Q_{\text{DG}i\max}$  分别为第  $i$  个分布式电源的最大有功、无功出力。

## 3 嵌入随机模拟技术的粒子群算法

### 3.1 粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)因其良好的全局搜索能力已被广泛应用于电力系统优化。从随机解出发, 通过迭代寻优, 追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优解。粒子速度以及位置更新方程为

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 [P_{\text{best}}(t) - x_i(t)] + c_2 \cdot r_2 [G_{\text{best}}(t) - x_i(t)] \quad (21)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (22)$$

式中:  $t$  为迭代次数;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子;  $w$  为惯性权重系数;  $r_1$  和  $r_2$  为 2 个相互独立的 [0, 1] 之间的随机数;  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}]$  为第  $i$  个粒子在  $N$  维空间中的速度;  $x(i) = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}]$  为第  $i$  个粒子在  $N$  维空间中的位置。

在 PSO 的可调整参数中, 惯性权重系数  $\omega$  是最重要的。较大的  $\omega$  有利于提高算法的全局搜索能力, 而较小的  $\omega$  有利于提高局部的搜索能力。为了防止 PSO 算法早熟和后期在全局最优解附近产生振荡, 本文采用线性变化的权重, 使权重系数  $\omega$  从最大值线性减小到最小值。迭代公式为

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot t / T_{\max} \quad (23)$$

式中:  $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$  分别为惯性权重系数的最大值和

最小值； $T_{\max}$  为最大进化代数。

### 3.2 随机模拟技术

随机模拟也称 Monte Carlo 模拟，是通过已知的概率分布中进行随机变量的抽样实验，是解决机会约束问题的有效方法<sup>[16-17]</sup>。机会约束表达如下：

$$P\{g_j(x, \xi) \leq 0, j = 1, 2, \dots, k\} \geq \alpha \quad (24)$$

式中， $\xi$  为随机变量。

对于任意给定的决策向量  $x$ ：

(a) 设  $N_1 = 0$ 。

(b) 负荷样本由非参数核密度估计函数进行随机抽样得到，风速样本根据概率密度函数随机产生。

(c) 进行潮流计算，如  $g_j(x, \xi) \leq 0, j = 1, 2, \dots, k$  成立，则  $N_1 = N_1 + 1$ 。

(d) 重复步骤(b)、(c)  $N$  次。

(e) 根据大数定律， $P = N_1 / N$ ，当且仅当  $N_1 / N \geq \alpha$  时，该粒子有效，结束；否则应该舍弃，并且更新，转步骤(f)。

(f) 设定最大更新次数  $Ud_{\max}$ ，每舍弃一次，更新次数  $Ud = Ud + 1$ ，直到粒子有效。如  $Ud \geq Ud_{\max}$ ，则该粒子以边界向量代替。

## 4 算例分析

### 4.1 测试系统及相关参数设置

本文利用 38 节点网络进行实例仿真分析，网络拓扑图如图 2 所示，网络参数见文献[18]。节点 1 为平衡节点，DWG 接入配电系统的节点为 8，30，36。

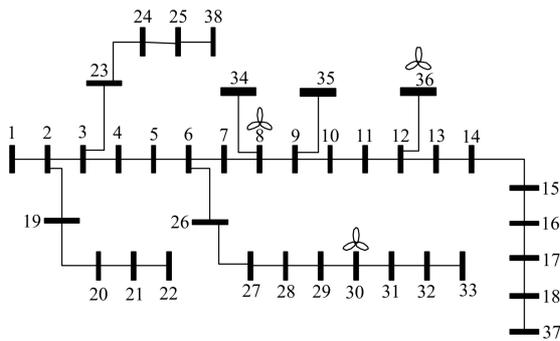


图 2 38 节点系统

Fig. 2 The 38-node test system

假设同一风电场内各风机的出力之间满足强相关，即相关系数为 1；不同风电场总出力之间相互独立，即相关系数为 0。风电机组的功率因数为 0.9。

各选风电机组的技术参数如表 2 所示。风速的分布参数  $\sigma = 6.5 \text{ m/s}$ 。

表 2 风电机组参数

Table 2 Parameters of wind turbines

型号 编号	额定功率/ kW	切入风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	额定风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	切出风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	50	3.0	12	25
2	75	3.0	13	25
3	100	3.5	12	25
4	200	2.5	14	25

### 4.2 分时电价模式及非参数核密度估计

分时电价的设置如图 3 所示。

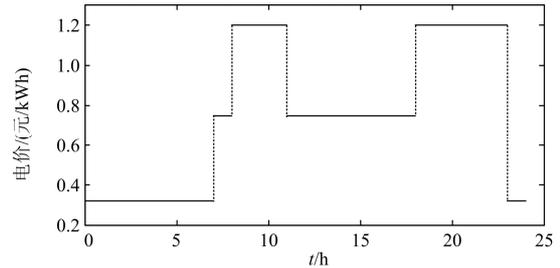


图 3 分时电价

Fig. 3 Time-sharing electricity price

定义电动汽车渗透率为：所有电动汽车同时充/放电功率占配网最大有功功率的比例。

不同渗透率下的等效负荷的非参数核密度估计的结果见附录 A(图 A1 至图 A6)。不同电动汽车渗透率对负荷的分布类型有很大影响。从拟合结果看，非参数核密度估计的拟合效果很好，而正态分布的拟合效果基本失效。

### 4.3 计算结果及分析

令机会约束的置信水平  $\beta_1 = \beta_v = 0.95$ ，通过使用本文提出的基于随机模拟的粒子群算法，可以得到不同电动汽车渗透率情况下分布式风电的穿透功率极限，如表 3 所示。

表 3 不同渗透率下的穿透功率极限

Table 3 Penetration limit under different permeability

渗透率/%	极限穿透功率/kW
0	$P_0 = 1\ 400$
10	$P_1 = 1\ 700$
20	$P_2 = 1\ 850$
30	$P_3 = 1\ 875$
40	$P_4 = 1\ 800$
50	$P_5 = 1\ 675$
60	$P_6 = 1\ 225$

图 4 所示为电动汽车渗透率与风电极限穿透功率之间的关系图。

从图 4 可以看到，电动汽车渗透率与风电极限

穿透功率之间呈“抛物线”状态。对于该配电网而言, 30%的电动汽车渗透可以接受的风电极限穿透功率最大, 越大或越小的电动汽车渗透率均不能增加风电的极限穿透功率。

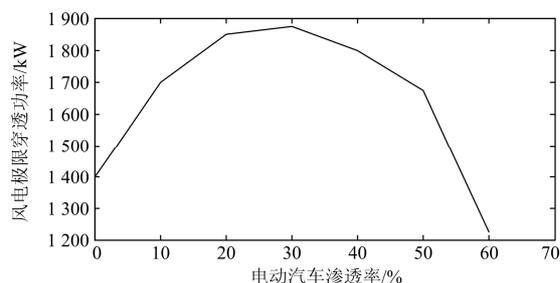


图4 渗透率与穿透功率极限关系图

Fig. 4 Relational figure of EV penetration and DWG penetration limit

不同电动汽车渗透率主要影响了负荷曲线, 如附录 A 中图 A7 中所示, 其实质是负荷曲线的波动程度, 可以用负荷的标准差来描述。表 4 所示为不同电动汽车渗透率下的相关参数指标。其中  $I_i = (S_0 - S_i) / S_0$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ ;  $\Delta P_j = P_j - P_0$ ,  $j = 1, 2, \dots, 6$ 。

表 4 相关参数对比图

Table 4 Comparison of related parameter

渗透率/%	标准差 $S_i$	标准差改善率/%
0	$S_0=829.880\ 2$	$I_0=0$
10	$S_1=637.760\ 6$	$I_1=23.15$
20	$S_2=513.683\ 2$	$I_2=38.10$
30	$S_3=482.530\ 6$	$I_3=41.86$
40	$S_4=567.137\ 0$	$I_4=31.66$
50	$S_5=731.047\ 7$	$I_5=11.91$
60	$S_6=928.297\ 3$	$I_6=-11.86$

图 5 所示为负荷的标准差与风电极限穿透功率之间的关系图。

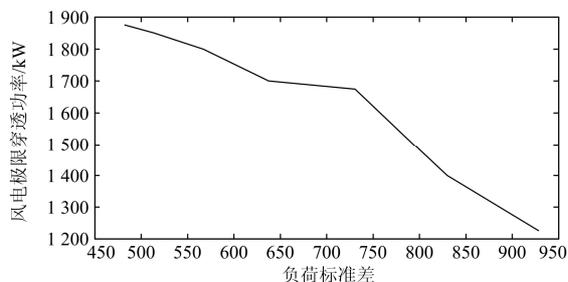


图5 标准差与风电极限穿透功率关系图

Fig. 5 Relational figure of standard deviation and DWG penetration limit

由图 5 可知, 风电穿透功率极限与负荷的标准差呈现单调递减关系, 从另一角度说, 负荷越平稳, 越有利于风电机组的接入。具体表现为: 如减小了负荷的标准差, 则有利于增加风电的穿透功率极限; 如增加了负荷的标准差, 则相应地会减少风电的穿透功率极限。

图 6 所示为标准差改善比例与穿透功率极限增加量之间的关系图。

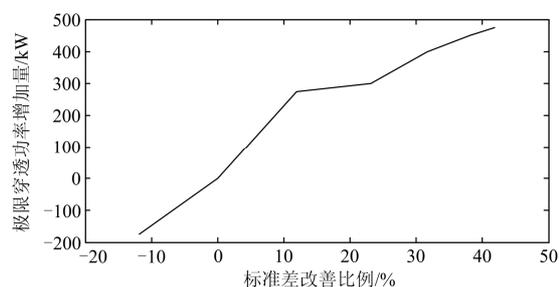


图6 标准差变化率与穿透功率变化关系图

Fig. 6 Relational figure of standard deviation change rate and DWG penetration limit change rate

结果表明, 如果电动汽车接入后, 对负荷标准差的影响程度越高, 则对风电穿透功率极限的影响越明显, 并呈现单调递增关系。

## 5 结论

本文首先通过非参数核密度估计法对不同电动汽车渗透率下配电网的负荷建模, 建立了基于机会约束的风电穿透功率极限的计算模型, 使用嵌入随机模拟技术的粒子群算法对不同电动汽车渗透率下分布式风电的穿透功率极限进行仿真计算。可得以下结论:

(1) 非参数核密度估计法进行配电网负荷拟合的结果较正态分布好;

(2) 不同电动汽车渗透率下, 风电穿透功率极限出现了极大值; 其后无论是增加还是减少电动汽车渗透率, 都不能有效增加风电的穿透功率极限。

(3) 在风电穿透功率极限在极大值时, 相应的负荷标准差最小。意味着负荷曲线的平滑程度是影响分布式发电穿透功率的重要因素, 曲线越平滑, 分布式发电的穿透功率极限越大。

(4) 电动汽车接入前后对负荷波动的改变效果越明显, 对风电穿透功率极限的影响也越大。

附录

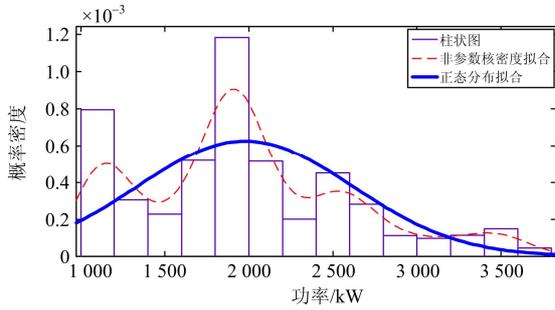


图 A1 10%渗透率的拟合结果  
Fig. A1 Fitting result with 10% penetration

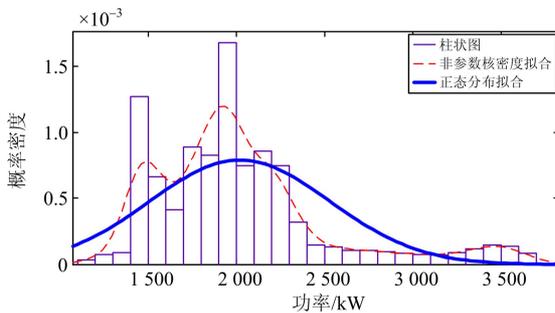


图 A2 20%渗透率的拟合结果  
Fig. A2 Fitting result with 20% penetration

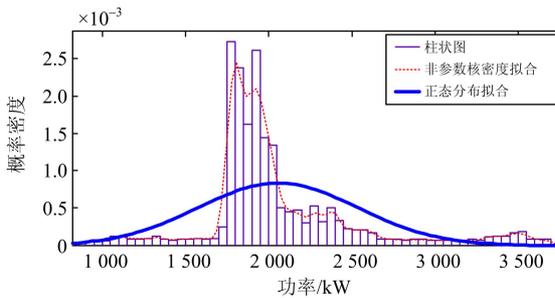


图 A3 30%渗透率的拟合结果  
Fig. A3 Fitting result with 30% penetration

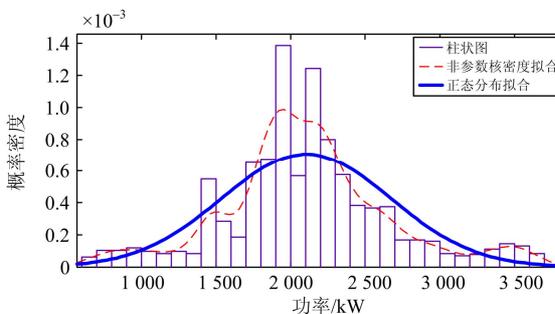


图 A4 40%渗透率的拟合结果  
Fig. A4 Fitting result with 40% penetration

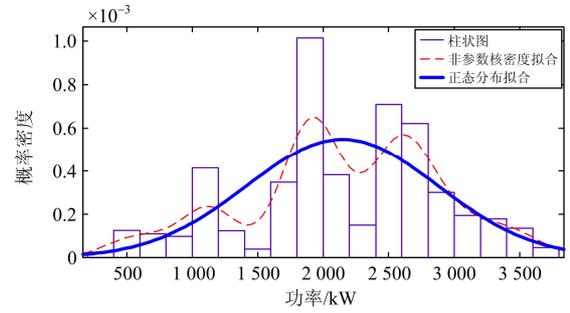


图 A5 50%渗透率的拟合结果  
Fig. A5 Fitting result with 50% penetration

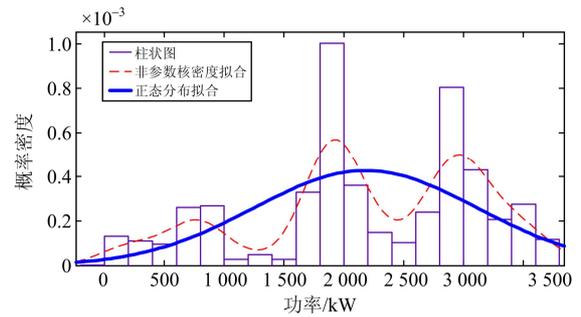


图 A6 60%渗透率的拟合结果  
Fig. A6 Fitting result with 60% penetration

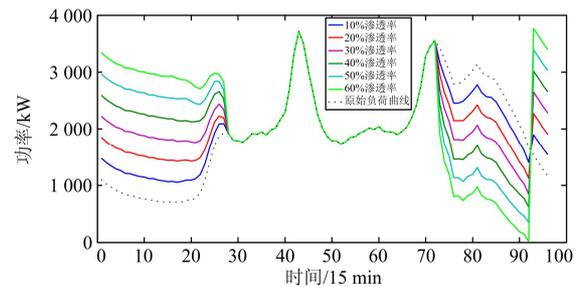


图 A7 不同渗透率的等效负荷曲线  
Fig. A7 Equivalent load curve under different EV penetration

参考文献

[1] 葛少云, 黄镠, 刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 1-5.  
GE Shaoyun, HUANG Liu, LIU Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 1-5.

[2] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.  
WANG Chengshan, ZHENG Haifeng, XIE Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44.

- [3] 李正烁, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 计及碳排放的输电网侧“风-车协调”研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 41-48.  
LI Zhengshuo, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Study on wind-EV complementation on the transmission grid side considering carbon emission[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 41-48.
- [4] 李惠玲, 白晓民, 谭闻, 等. 电动汽车与分布式发电入网的协调控制研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2108-2115.  
LI Huiling, BAI Xiaomin, TAN Wen, et al. Coordination control for grid-connection of plug-in hybrid electric vehicles and distributed generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2108-2115.
- [5] 于大洋, 宋曙光, 张波, 等. 区域电网电动汽车充电与风电协同调度的分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 24-29.  
YU Dayang, SONG Shuguang, ZHANG Bo, et al. Synergistic dispatch of PEVs charging and wind power in Chinese regional power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 24-29.
- [6] 吴万禄, 韦钢, 谢丽蓉, 等. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 65-73.  
WU Wanlu, WEI Gang, XIE Lirong, et al. Coordinated planning of distribution network containing charging station and distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 65-73.
- [7] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及可入网电动汽车的分布式电源最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 11-16.  
LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of distributed generators considering plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 11-16.
- [8] 张明霞, 田立亭, 杨水丽, 等. 考虑电动汽车充电负荷空间分布的系统特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 86-92.  
ZHANG Mingxia, TIAN Liting, YANG Shuili, et al. Influence of electric vehicle charging load distribution on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 86-92.
- [9] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 1-8.  
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 1-8.
- [10] HETZER J, YU D C, BHATTARAI K. An economic dispatch model incorporating wind power[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.
- [11] 严干贵, 王茂春, 穆钢, 等. 双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(7): 98-104.  
YAN Gangui, WANG Maochun, MU Gang, et al. Modeling of grid-connected doubly-fed induction generator for reactive power static regulation capacity study[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(7): 98-104.
- [12] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 基于非参数核密度估计法的光伏出力随机分布模型[J]. 中国电力, 2013, 46(9): 126-130.  
WU Zhenwei, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Random distribution model of photovoltaic output based on non-parametric kernel density estimation method[J]. Electric Power, 2013, 46(9): 126-130.
- [13] SILVERMAN B W. Density estimation for statistics and data analysis[M]. Chapman and Hall, 1986.
- [14] EPANECHNIKOV V A. Nonparametric estimation of a multidimensional probability density[J]. Theory of Probability and Its Application, 1969, 14(1): 153-158.
- [15] PASHAJAVID E, GOLKAR M A. Charging of plug-in electric vehicles: Stochastic modelling of load demand within domestic grids[C] // Electrical Engineering (ICEE), 2012 20th Iranian Conference on, Tehran, 2012: 535-539.
- [16] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 33-36.  
LEI Yazhou, WANG Weisheng, YIN Yonghua, et al. Wind power penetration limit calculation based on chance constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 33-36.
- [17] 王锐, 顾伟, 孙蓉, 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.  
WANG Rui, GU Wei, SUN Rong, et al. Analysis on wind power penetration limit based on probabilistically optimal power flow[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 214-220.
- [18] SINGH D, MISRA R K, SINGH D. Effect of load models in distributed generation planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 2204-2212.

收稿日期: 2015-08-09; 修回日期: 2015-10-25

作者简介:

王星华(1972-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化, 电力系统高级应用软件开发, 信息化电力系统等领域研究和开发工作; E-mail: riskmouse@163.com

彭智乐(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电; E-mail: pang\_zilok@163.com

彭显刚(1964-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统运行分析和电网规划、电能质量分析与控制。E-mail: epxg@gdut.edu.cn

(编辑 姜新丽)