

计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度

赵俊华¹, 文福拴¹, 薛禹胜², 董朝阳³, 辛建波⁴

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003;
3. 香港理工大学电机工程学系, 香港; 4. 江西省电力科学研究院, 江西省南昌市 330006)

摘要: 电动汽车和可再生能源发电的快速发展为电力系统的安全和经济运行带来了新的挑战。在此背景下, 构建了能够计及可入网电动汽车(plug-in electric vehicle, PEV)和风电机组的不确定性的随机经济调度模型。首先采用随机仿真方法研究 PEV 的充电与放电功率的概率分布。之后, 在假设风速服从 Rayleigh 分布的前提下, 导出了风电机组出力概率分布的表达式。通过理论分析得到了风电机组和电动汽车接入网络(vehicle to grid, V2G)的电源出力的数学期望的解析表达式, 并在此基础上, 构建了电力系统随机经济调度模型。最后, 以 IEEE 118 节点系统为例说明了所提出的随机经济调度模型的基本特征。

关键词: 风电机组; 可入网电动汽车; 随机经济调度

0 引言

经济调度(economic dispatch)是在计及一些电力系统安全约束的前提下, 通过分配发电机组出力以最小成本满足负荷需求的一个基本问题^[1]。传统的经济调度研究主要考虑常规的火电与水电机组。考虑到化石燃料对环境的破坏性影响, 以可再生能源如风能为基础的发电技术, 正在迅速扩大其市场份额。风力发电的益处是显而易见的, 然而其固有的、显著的不确定性却给电力系统的安全和经济运行带来了新的挑战。考虑到风力发电规模的不断增大, 在经济调度模型中, 就需要适当计及风电机组的影响, 尤其是其出力不确定性的影响。

可入网电动汽车的引入为电力系统的安全与经济运行带来了新的挑战。一般而言, 电动汽车是完全或部分由电力驱动的。作为减少碳排放和减缓噪声污染的有效途径, 电动汽车在全球汽车市场上所占份额日益提高。为了提高电动汽车的普及率, 各国正在建造大量的充电设施, 使电动汽车能够更方便地接入电力系统, 以直接对电池进行充电。考虑到电动汽车充电行为的随机性, 大量电动汽车接入会给电力系统的运行与控制带来显著的不确定性。

另一方面, 可入网电动汽车也可以被当做储能装置使用。现有的研究工作表明绝大多数电动汽车在 1 日中的 96% 的时间里是被闲置的^[2]。通过电动汽车接入网络(vehicle to grid, V2G)技术^[3], 这

些闲置的电动汽车可以在用电高峰期将电能放回电力系统中。电动汽车也可以在风电机组不能发电时作为系统备用, 从而减轻风能的间歇性对电力系统运行的影响。但是, 为了充分利用可入网电动汽车的储能功能和备用功能, 就需要深入研究计及电动汽车和风电机组的电力系统随机经济调度的模型与方法。

从数学上讲, 经济调度是一个优化问题。已有大量文献采用各种优化方法来解决这一问题。这些方法包括传统的数学规划方法, 如线性规划^[4]和非线性规划^[5], 以及各种现代启发式优化方法, 如进化规划^[6]、遗传算法^[7]、粒子群优化^[8]、模拟退火^[9]和差分进化算法^[10]等。然而, 现有的这方面的研究工作大多假定电力系统是确定性的, 无法容纳电动汽车和风电机组内在的随机特性。

新的经济调度模型与方法必须能够合理计及电动汽车与风电机组的不确定性。目前已经提出了一些用于解决电力系统运行不确定性的方法。传统的做法是维持足够高的系统备用水平, 以确保系统可用发电容量总是超过负荷需求^[11]。文献[12]基于 Monte Carlo 仿真来设计计及风电机组出力不确定性的可行性约束。文献[13]则假设风电遵循 Weibull 分布, 在此基础上通过数值积分计算风电成本。文献[14]以仿真方法和自回归滑动平均 (ARMA) 模型为基础来模拟风电出力的不确定性, 之后构建了经济调度模型以考察风电机组对电力系统运行的影响。

在可入网电动汽车对电力系统安全和经济运行影响的研究方面目前还相当初步。现有的一些文献

收稿日期: 2010-08-03; 修回日期: 2010-09-14。

高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (200805610020)。

主要从经济角度分析电动汽车的成本或者收益^[15-17]。文献[18]建立了一个计及有 V2G 功能的电动汽车的经济调度模型,但有 2 个方面的不足:①未考虑潮流约束;②假设系统中电动汽车的数量是确定的。

在上述背景下,本文构造了一个能同时计及电动汽车和风电机组出力不确定性的新的随机经济调度模型。首先发展了一种用于研究电动汽车随机充放电行为的仿真方法,然后导出了电动汽车和风电机组出力的概率分布。在此基础上,以整个系统中的总发电成本最小为目标构建了新的经济调度模型,其中针对电动汽车和风电机组引入了相应的约束。最后,采用 IEEE 118 节点系统对所发展的随机经济调度模型进行了测试,说明了其合理性和有效性。

1 电动汽车和风电机组出力的概率分布

1.1 电动汽车充放电行为仿真

电动汽车的充电模式主要包括随车充电、更换电池和两者结合 3 种模式。这里仅考虑随车充电模式。由于大多数大规模电动汽车充放电设施还在建设之中,尚无法得到电动汽车充放电行为的充分而可靠的历史数据。因此,这里采用仿真方法研究电动汽车充放电行为的统计特征。

以日本丰田汽车公司制造的 RAV4 电动汽车^[19]为例进行研究。附录 A 表 A1 中给出了这种电动汽车的技术参数。假定电动汽车可分为 3 类,即公用的、私人的和可调度的。公用电动汽车是供公众使用的,这种电动汽车的重要特点是平均每天的行车时间相对较长,且在用电高峰时段也会使用。它们通常在非高峰时段充电,因而一般不作为 V2G 电源。

与公用电动汽车不同,私人电动汽车的运行方式比较灵活,且通常在 1 日的大部分时间中被闲置。因此,私人电动汽车较适合作为 V2G 电源。这里假设部分私人电动汽车会被其车主主动注册为可调度电动汽车。当然,车主会得到相应的经济回报。一旦电动汽车被注册,车主应确保其车辆只在非高峰时段充电,且需要在每天的特定时间将电池连接到电动汽车充放电设施上。在此期间,电力系统调度机构可以将这些可调度电动汽车用做电源,并在需要时对其进行调度。

这里还作了以下假定:

- 1) 电动汽车充电和放电功能是通过连接电池和电网的 DC/AC 变换器实现的。
- 2) 电动汽车充/放电过程既能被车主手动控制,

在其连接到电网上时也能被调度部门远程控制。

3) 每一类电动汽车都有其特定的充/放电时段,且只在这些时段内充/放电。

4) 在充/放电时段内,具体的充/放电时间服从均匀分布。

5) 根据文献[20],电动汽车的最大充/放电功率被设定为 3.6 kW。以该功率充电,丰田 RAV4 的电池可以在 6 h 内充满。

基于上述假定,采用 Monte Carlo 仿真来研究电动汽车的充/放电行为。对于每辆电动汽车,首先根据其类型确定充电和放电时段。然后,在充/放电时段内随机选择它的充电和放电时间。充/放电时间由每天的平均行驶里程确定。这里假定电动汽车充电一旦开始,充电过程会一直持续到它的电池完全充满。类似地,可调度电动汽车向电网的供电时间也是随机确定的。在所有电动车的充/放电行为被随机确定后,可以方便地计算出所有电动汽车在 1 日的各个时段的总负荷水平和能够提供的总 V2G 功率。将这一过程重复 N (N 为充分大的整数) 次,以获得总负荷水平和总 V2G 功率的概率分布。

有关的仿真结果将在后面的算例部分给出。仿真结果清楚地表明:电动汽车总负荷水平和总 V2G 输出功率都近似服从正态分布。这个结论是下文中理论分析的基础。由于一般负荷也服从正态分布,因此,从概率分析的角度看,电动汽车负荷的随机性和一般负荷的随机性给系统调度带来的影响是类似的。由于 2 种随机性都可以用正态分布模拟,因此可以方便地将电动汽车负荷和一般负荷的随机性合并考虑。

1.2 风电机组出力的概率分布

在 1.1 节中讨论了电动汽车充放电的概率分布。本节将从风速分布和功率转换曲线出发得到风电的概率分布。已有的研究工作普遍表明风速服从 Rayleigh 分布或 Weibull 分布^[13,21]。这里假定风速服从 Rayleigh 分布,其概率密度函数(PDF)如下:

$$f_v(V) = \frac{V}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{V^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中: V 为风速; σ 为分布参数。

风电机组最大输出功率和风速的函数关系可以用附录 A 图 A1 所示的功率曲线表示。该曲线可以分为 4 个部分:当风速低于某一阈值,即切入风速时,风力涡轮机不能被驱动,因此,机组输出功率为 0;当风速大于另一个阈值(切出风速)时,输出功率也将为 0;当风速在切入风速和额定风速之间时,机组出力可近似地用风速的线性函数表示;当风速在额定风速和切出风速之间时,输出功率将是一个常

数。因此,功率曲线的数学表达式为:

$$W(V) = \begin{cases} 0 & V < v_{in}, V > v_{out} \\ aV + b & v_{in} \leq V \leq v_r \\ \omega_r & v_r < V \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

$$a = \frac{\omega_r}{v_r - v_{in}} \quad (3)$$

$$b = -\frac{v_{in}\omega_r}{v_r - v_{in}} \quad (4)$$

式中: $v_{in}, v_r, v_{out}, \omega_r$ 分别为切入风速、额定风速、切出风速和额定功率(额定风速下的输出功率)。

基于式(1)~式(4),可以得到风电机组出力的累积分布函数(CDF)如下:

当 $W=0$ 时,

$$F_W(W) = \int_0^{v_{in}} f_V(V) dV + \int_{v_{out}}^{+\infty} f_V(V) dV = -\frac{1}{2} \exp\left(-\frac{V^2}{2\sigma^2}\right) \Big|_0^{v_{in}} - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{V^2}{2\sigma^2}\right) \Big|_{v_{out}}^{+\infty} = 1 - \exp\left(-\frac{V_{in}^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{V_{out}^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

当 $0 < W < \omega_r$ 时,

$$F_W(W) = \int_0^{\frac{W-b}{a}} f_V(V) dV + \int_{v_{out}}^{+\infty} f_V(V) dV = 1 - \exp\left(-\frac{(W-b)^2}{2a^2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{V_{out}^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

当 $W = \omega_r$ 时,

$$F_W(W) = \int_0^{+\infty} f_V(V) dV = 1 \quad (7)$$

由式(6)可以得到 $0 < W < \omega_r$ 时的风电机组出力的概率密度函数为:

$$f_W(W) = \frac{dF_W(W)}{dW} = \frac{W-b}{a^2\sigma^2} \exp\left(-\frac{(W-b)^2}{2a^2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

当 $W=0$ 时,风电机组出力的概率密度函数为:

$$f_W(W) = \left(1 - \exp\left(-\frac{V_{in}^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{V_{out}^2}{2\sigma^2}\right)\right) \delta(W) \quad (9)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 是为了解决风电概率密度函数不连续而引入的 Dirac Delta 函数,Dirac Delta 函数是定义在实数域上且满足下列条件的函数:

$$\delta(x) = \begin{cases} +\infty & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases}$$

且

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1$$

当 $W = \omega_r$ 时,

$$f_W(W) = \left(\exp\left(-\frac{V_r^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{V_{out}^2}{2\sigma^2}\right)\right) \delta(W - \omega_r) \quad (10)$$

2 随机经济调度模型

2.1 目标函数

在下面构造的随机经济调度模型中,考虑了诸如电动汽车的充/放电行为、风电机组出力、负荷水平等不确定因素。以最小化系统的总发电成本期望值为目标:

$$\min E(C_{total}) \quad (11)$$

式中: $E(\cdot)$ 为数学期望算子; C_{total} 为系统的总发电成本。

C_{total} 由7个部分组成:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^{N_c} C_i(P_{s,i}) + \sum_{i=1}^{N_w} C_{w,i}(W_{s,i}) + \sum_{i=1}^{N_w} C_{w,u,i}(W_{s,i}, W_i) + \sum_{i=1}^{N_w} C_{w,o,i}(W_{s,i}, W_i) + \sum_{i=1}^{N_e} C_{e,i}(P_{e,s,i}) + \sum_{i=1}^{N_e} C_{e,u,i}(P_{e,i}, P_{e,s,i}) + \sum_{i=1}^{N_e} C_{e,o,i}(P_{e,i}, P_{e,s,i}) \quad (12)$$

式中: N_c 和 N_w 分别为传统发电机组和风电机组的数量; N_e 为带有 V2G 设施的节点数量;其他变量含义由下文详细介绍。

在这里所构造的模型中,所有接入到同一个节点的电动汽车都被合并为一个 V2G 电源考虑。

假设传统发电机组生产成本用二次函数表示:

$$C_i(P_{s,i}) = \alpha_i + \beta_i P_{s,i} + \gamma_i P_{s,i}^2 \quad (13)$$

式中: $P_{s,i}$ 为传统发电机组 i 的输出功率; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 均为成本系数。

风电机组的成本可以分成3个部分。第1部分是由调度部门(或作为购买者的电网公司)付给风电机组所有者的直接成本:

$$C_{w,i}(W_{s,i}) = c_{w,i} W_{s,i} \quad (14)$$

式中: $W_{s,i}$ 为风电机组 i 的输出功率; $c_{w,i}$ 为直接成本参数。

由于风电机组出力一般很不稳定,这样对其预测通常会有一些偏差。当风电机组被调度的输出功率低于其实际可发最大输出功率时就会造成浪费。因此,风电机组成本的第2项表示由于对风电机组的最大输出功率低估而造成的浪费所带来的惩罚:

$$C_{w,u,i}(W_{s,i}, W_i) = c_{w,u,i}(W_i - W_{s,i}) \quad (15)$$

式中: $c_{w,u,i}$ 为低估惩罚系数; W_i 为风电机组实际可发的最大功率。

另一方面,如果风电机组的实际最大输出功率小于调度计划的输出功率,这些不足的功率则需要通过其他机组提供的备用来弥补。因此,风力发电机组成本的第3项表示由于高估风电机组实际最大

可发功率而带来的备用成本:

$$C_{w,o,i}(W_{s,i}, W_i) = c_{w,o,i}(W_i - W_{s,i}) \quad (16)$$

式中: $c_{w,o,i}$ 为高估惩罚系数, 其为负值。

类似地, 电动汽车的 V2G 出力成本也包括 3 个部分:

$$C_{e,i}(P_{e,s,i}) = c_{e,i}P_{e,s,i} \quad (17)$$

$$C_{e,u,i}(P_{e,s,i}, P_{e,i}) = c_{e,u,i}(P_{e,i} - P_{e,s,i}) \quad (18)$$

$$C_{e,o,i}(P_{e,s,i}, P_{e,i}) = c_{e,o,i}(P_{e,i} - P_{e,s,i}) \quad (19)$$

式中: $C_{e,i}(\cdot)$, $C_{e,u,i}(\cdot)$, $C_{e,o,i}(\cdot)$ 分别为电动汽车的直接成本、低估惩罚成本和高估惩罚成本; $c_{e,i}$, $c_{e,u,i}$, $c_{e,o,i}$ 分别为直接成本系数、低估惩罚成本系数和高估惩罚成本系数; $P_{e,i}$ 为在节点 i 的最大 V2G 输出功率; $P_{e,s,i}$ 为节点 i 的 V2G 输出功率的调度计划值。

2.2 发电成本均值的求取

这里推导发电成本均值的解析表达式。基于式(8)、式(9)所表示的概率密度函数, 可以得到对风电机组出力的低估惩罚成本的均值为:

$$\begin{aligned} E(C_{w,u,i}(W_{s,i}, W_i)) = & \int_{w_{s,i}^-}^{w_r} c_{w,u,i}(W_i - W_{s,i}) f_W(W_i) dW_i = \\ & \int_{w_{s,i}^-}^{w_r} c_{w,u,i}(W_i - W_{s,i}) f_W(W_i) dW_i + \\ & w_r \left(\exp\left(-\frac{V_r^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{V_{out}^2}{2\sigma^2}\right) \right) = \\ & \frac{c_{w,u,i}}{2} \left(\sqrt{2\pi} a \sigma \left(e_{rf}\left(\frac{b - W_{s,i}}{\sqrt{2}a\sigma}\right) - e_{rf}\left(\frac{b - w_r}{\sqrt{2}a\sigma}\right) \right) + \right. \\ & \left. 2(W_{s,i} - w_r) \exp\left(-\frac{(b - w_r)^2}{2a^2\sigma^2}\right) \right) + \\ & w_r \left(\exp\left(-\frac{V_r^2}{2\sigma^2}\right) - \exp\left(-\frac{V_{out}^2}{2\sigma^2}\right) \right) \quad (20) \end{aligned}$$

式中: $e_{rf}(\cdot)$ 为高斯误差函数, 通过数值积分很容易计算; w_r^- 为从左侧无限逼近 w_r 的实数。

类似地, 可以得到对风电机组出力的高估惩罚成本的均值为:

$$\begin{aligned} E(C_{w,o,i}(W_{s,i}, W_i)) = & \int_0^{w_{s,i}} c_{w,o,i}(W_i - W_{s,i}) f_W(W_i) dW_i = \\ & 0 + \int_{0^+}^{w_{s,i}} c_{w,o,i}(W_i - W_{s,i}) f_W(W_i) dW_i = \\ & \frac{\sqrt{2\pi} a \sigma c_{w,o,i}}{2} \left(e_{rf}\left(\frac{b}{\sqrt{2}a\sigma}\right) - e_{rf}\left(\frac{b - W_{s,i}}{\sqrt{2}a\sigma}\right) \right) - \\ & c_{w,o,i} W_{s,i} \exp\left(-\frac{b^2}{2a^2\sigma^2}\right) \quad (21) \end{aligned}$$

在 1.1 节中已经指出, V2G 的最大输出功率服从正态分布, 其概率密度函数可表示为:

$$f_P(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\phi^2}} \exp\left(-\frac{(P - \mu)^2}{2\phi^2}\right) \quad (22)$$

式中: P 为节点的最大 V2G 输出功率; μ 和 ϕ 分别为正态分布的均值和标准差。

由式(22)可得对 V2G 出力的低估惩罚成本为:

$$\begin{aligned} E(C_{e,u,i}(P_{e,i}, P_{e,s,i})) = & \int_{P_{e,s,i}}^{+\infty} c_{e,u,i}(P_{e,i} - P_{e,s,i}) f_P(P_{e,i}) dP_{e,i} = \\ & \frac{c_{e,u,i}}{2} (\mu - P_{e,s,i}) \left(1 + e_{rf}\left(\frac{\mu - P_{e,s,i}}{\sqrt{2}\phi}\right) \right) + \\ & \frac{c_{e,u,i}\phi}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\mu - P_{e,s,i})^2}{2\phi^2}\right) \quad (23) \end{aligned}$$

而高估惩罚成本则为:

$$\begin{aligned} E(C_{e,o,i}(P_{e,i}, P_{e,s,i})) = & \int_0^{P_{e,s,i}} c_{e,o,i}(P_{e,i} - P_{e,s,i}) f_P(P_{e,i}) dP_{e,i} = \\ & \frac{c_{e,o,i}\phi}{\sqrt{2\pi}} \left(\exp\left(-\frac{\mu^2}{2\phi^2}\right) - \exp\left(-\frac{(\mu - P_{e,s,i})^2}{2\phi^2}\right) \right) + \\ & \frac{c_{e,o,i}}{2} (\mu - P_{e,s,i}) \left(e_{rf}\left(\frac{\mu}{\sqrt{2}\phi}\right) - e_{rf}\left(\frac{\mu - P_{e,s,i}}{\sqrt{2}\phi}\right) \right) \quad (24) \end{aligned}$$

基于式(20)、式(21)和式(23)、式(24), 式(11)可重写为:

$$\begin{aligned} \min E(C_{total}) = & \sum_{i=1}^{N_c} C_i(P_{s,i}) + \sum_{i=1}^{N_w} C_{w,i}(W_{s,i}) + \\ & \sum_{i=1}^{N_w} E(C_{w,u,i}(W_{s,i}, W_i)) + \\ & \sum_{i=1}^{N_w} E(C_{w,o,i}(W_{s,i}, W_i)) + \\ & \sum_{i=1}^{N_c} C_{e,i}(P_{e,s,i}) + \\ & \sum_{i=1}^{N_c} E(C_{e,u,i}(P_{e,i}, P_{e,s,i})) + \\ & \sum_{i=1}^{N_c} E(C_{e,o,i}(P_{e,i}, P_{e,s,i})) \quad (25) \end{aligned}$$

2.3 约束条件

1) 发电容量约束

$$P_{i,\min} \leq P_{s,i} \leq P_{i,\max} \quad (26)$$

$$Q_{i,\min} \leq Q_{s,i} \leq Q_{i,\max} \quad (27)$$

$$0 \leq W_{s,i} \leq W_{i,\max} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{e,s,i} \leq P_{e,i,\max} \quad (29)$$

$$0 \leq Q_{e,s,i} \leq Q_{e,i,\max} \quad (30)$$

式中: $P_{i,\min}$ 和 $P_{i,\max}$ 分别为传统发电机组的有功功率下限和上限; $Q_{i,\min}$ 和 $Q_{i,\max}$ 分别为传统发电机组无功功率下限和上限; $W_{i,\max}$ 和 $P_{e,i,\max}$ 分别为风电机组和 V2G 出力的有功功率上限; $Q_{e,s,i}$ 和 $Q_{e,i,\max}$ 分别为 V2G 电源的无功功率和无功功率上限调度计划值。

2) 支路潮流约束

$$P_{ij} \leq P_{ij,\max} \quad (31)$$

式中: P_{ij} 为支路 $i-j$ 的有功潮流; $P_{ij,\max}$ 为支路 $i-j$ 可以传输的最大有功功率。

3) 节点注入功率约束

$$P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (32)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (33)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为注入节点 i 的有功功率和无功功率; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为导纳矩阵元素的实部和虚部; V_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 和 j 之间的电压角度差; $j \in i$ 表示节点 i 与节点 j 直接相连。

4) 风电机组约束

这里假定系统中的风电机组均装备鼠笼式异步电机。这样, 根据文献[22-23], 装备鼠笼电机的风电机组应满足下列约束:

$$W_{s,i}^2 + Q_{w,i}^2 + V_i^2 \frac{Q_{w,i}}{X_i} = 0 \quad (34)$$

$$-\frac{V_i^2}{2X_i} \leq Q_{w,i} \leq 0 \quad (35)$$

式中: $Q_{w,i}$ 为机组的无功功率, 由于鼠笼电机总是吸收无功功率, 因此它总是负值; X_i 为风电机组的定子漏抗和转子漏抗之和。

前已述及, 假设所有电动汽车都通过 DC/AC 变换器与系统相连。这样, 需要根据 DC/AC 变换器的工作方式来判断接入电动汽车的是 PV 节点还是 PQ 节点^[22]。这里假定有大量电动汽车所连接的 DC/AC 变换器能够分别控制功率和电压^[22]。对于每个有大量电动汽车接入的节点, 将增加一个与其直接相连的 PV 节点以表示相应的 V2G 电源。

从总体上讲, 可以用 2 大类方法求解上述由式(25)~式(35)所表示的随机经济调度问题: 一是传统的数学规划方法, 如内点法; 二是直接利用一些现代启发式优化方法, 如遗传算法。这里采用了第 1 类方法。

3 算例

3.1 电动汽车的充放电行为仿真

首先用 1.1 节讨论的仿真方法研究电动汽车的充放电行为。在前面的章节和附录中给出了电动汽车的参数(见附录 A 表 A1)、仿真的相关设定(见附录 A 表 A2)和一些假设。在附录 A 图 A2~图 A4 中绘出了 3 个时间段, 即 00:00—01:00(夜间低谷时间)、11:00—12:00(白天高峰时间)和 19:00—20:00(夜间高峰时间)的电动汽车负荷水平的正态概率图(normal probability plot)。这些正态概率图

表明电动汽车在这 3 个时间段的负荷水平都近似服从正态分布。此外, 附录 A 图 A5 给出了 11:00—12:00 期间电动汽车的最大 V2G 输出功率的正态概率图。最大 V2G 输出功率也近似服从正态分布。

为了更严格地证明电动汽车的负荷和最大 V2G 出力服从正态分布, 在附录 A 表 A3 中给出了仿真结果的 Jarque-Bera (JB) 正态分布检验结果。JB 检验的显著性水平设为 0.05。检验结果表明, 4 个时间段的 JB 统计值都小于相应的临界值。此外, 4 个时间段的 P 值都大于 0.05。 P 值的定义为: 假定零假设(null hypothesis, 在这里指服从正态分布的假设)为真的前提下, 观察到用于进行检验的样本的条件概率; 因此, P 值越大, 代表零假设越可能为真。上述检验结果清楚地表明电动汽车的总负荷和最大 V2G 出力都近似服从正态分布。

3.2 IEEE 118 节点系统的仿真结果

这里采用 IEEE 118 节点系统来测试所发展的随机经济调度模型。假定有 3 台风电机组分别连接于节点 24, 26, 116 上。在附录 A 表 A4 中给出了风电机组的技术参数。根据式(3)和式(4), 可以得出参数值 $a=15, b=-75$ 。Rayleigh 分布中的参数 σ 可以通过风速预测得到。设平均风速与风速预测值相等, 容易推导得出 Rayleigh 分布的均值为 $\sigma\sqrt{\pi/2}$, 从而可以得到:

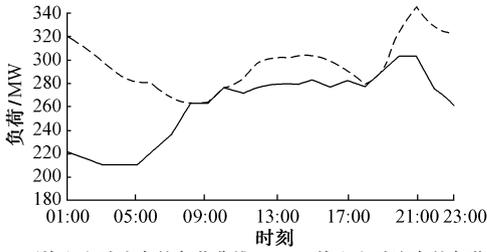
$$\sigma = V_f \left(\frac{\pi}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (36)$$

式中: V_f 为风速预测值。

在本文的算例中假定风速预测值为 20 m/s, 从而可以得到 $\sigma=15.9577$ 。

假设电动汽车可以在节点 59, 80, 90, 116 接入系统, 且在这 4 个节点中的每个节点都连接着 9 万辆电动汽车。利用 1.1 节介绍的仿真方法, 可以得出电动汽车的出力水平和最大 V2G 输出功率的均值与方差。此外, 在附录 A 表 A5 中给出了风电机组和 V2G 电源的成本系数。风电的直接成本相对较低, 因为它的变动成本很低。另一方面, 因为需要用高价来刺激电动汽车车主将车注册成可调度电动汽车, V2G 电源的成本则相对较高。

为了研究电动汽车对负荷水平的影响, 在图 1 中给出了节点 59 接入电动汽车之后的负荷曲线和原来的负荷曲线。可以看出, 在 23:00—24:00 和次日 00:00—07:00 期间的负荷水平有明显增加。这是由于大量电动汽车同时充电造成的。从附录 A 表 A2 可以看出, 大多数电动汽车都会在用电低谷期, 特别是在 23:00—24:00, 次日 00:00—07:00 之间充电。因此, 负荷曲线有显著的变化。



— 不接入电动汽车的负荷曲线; --- 接入电动汽车的负荷曲线
 图 1 接入与不接入电动汽车的负荷曲线对比(节点 59)
 Fig. 1 Load curves with and without PEVs (Bus 59)

图 2~图 4 给出了在 00:00—01:00, 11:00—12:00 和 19:00—20:00 这 3 个时段的最优调度方案。在这些图中, W24 和 P59 分别表示接入节点 24 的风电机组和节点 59 的 V2G 电源;其余依此类推。

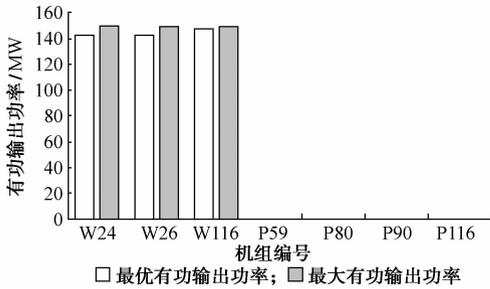


图 2 各机组在 00:00—01:00 时段的最优有功输出功率
 Fig. 2 Optimal active power outputs in 00:00—01:00

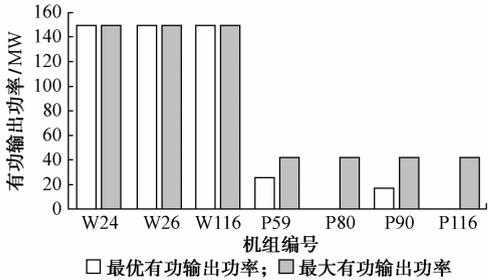


图 3 各机组在 11:00—12:00 时段的最优有功输出功率
 Fig. 3 Optimal active power outputs in 11:00—12:00

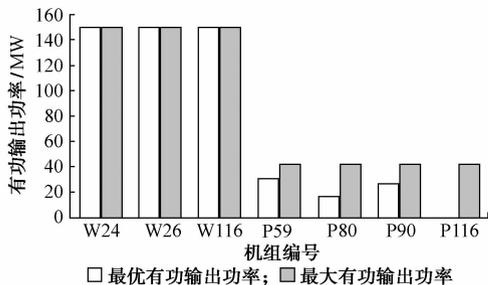


图 4 各机组在 19:00—20:00 时段的最优有功输出功率
 Fig. 4 Optimal active power outputs in 19:00—20:00

从图 2~图 4 可以清楚地看到,在这 3 个时段风电机组的输出都非常接近其容量。这主要是因为和传统发电机与 V2G 电源相比,风机的直接成本是非常低的。另一方面,由于 V2G 电源具有相对较高的直接成本,其实际输出功率远小于其容量。在图 2 中,由于假设所有可调度电动汽车只会是在用电低谷时段被调度,因此各节点的 V2G 容量都为 0。

而如图 5 所示,如果将 V2G 电源的直接成本和低估惩罚成本系数分别改为 30 美元/(MW·h)和 50 美元/(MW·h),其输出功率会显著提高,并接近其最大输出功率。因此,可以通过改变 V2G 电源的直接成本(即支付给电动汽车车主的成本)和低估惩罚成本来控制 V2G 电源的输出功率。利用 V2G 电源有一个矛盾之处:一方面,为了吸引更多的可调度电动汽车并增加系统的 V2G 电源容量,需要一个较高的直接成本;而另一方面,从调度的角度看,较高的直接成本会降低 V2G 电源的实际输出,造成资源浪费。

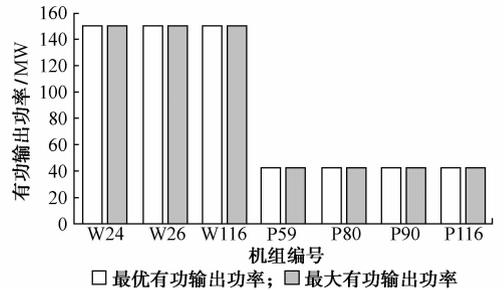


图 5 各机组在 11:00—12:00 时段的最优有功输出功率
 ($C_{e,i} = 30$ 美元/(MW·h), $C_{e,w,i} = 50$ 美元/(MW·h))
 Fig. 5 Optimal active power outputs in 11:00—12:00
 ($C_{e,i} = 30$ \$/(MW·h), $C_{e,w,i} = 50$ \$/(MW·h))

为了分析所发展的随机经济调度模型的统计特性,下面考察概率分布参数 σ 和 ϕ 对最优调度方案的影响。从图 6 可以看出,当 σ 增大时,风机的最优有功输出功率也随之增加。由于 σ 正比于预测风速,因此可以得出风机的最优有功输出功率也正比于预测风速的结论。

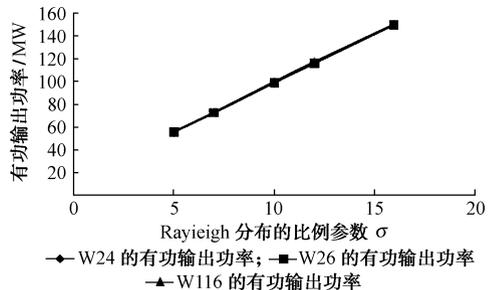


图 6 风力机组的最优有功输出功率与分布参数 σ 的关系
 Fig. 6 Wind power outputs for different scale parameter σ 's

图 7 给出了最优 V2G 有功输出功率与 V2G 电源容量的标准差 ϕ 之间的函数关系。一般而言, V2G 的最优输出会随着 ϕ 的增加而减少。仿真结果清晰地表明 V2G 电源容量的不确定性对 V2G 电源的调度有负面影响。这是因为一旦 V2G 电源实际不能发电而需要调度系统备用容量发电时,就需要承担较高的高估惩罚成本。因此,为了充分利用电动汽车的储能功能,必须要有一个合适的市场机制来保证 V2G 电源的总容量是稳定且可预测的。

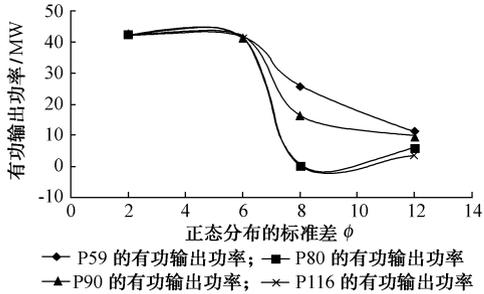


图 7 V2G 电源的最优有功输出功率与分布参数 ϕ 的关系

Fig. 7 V2G power outputs for different standard deviation ϕ 's

为分析支路潮流约束对于调度结果的影响,在图 8 中给出了计及与不计支路潮流约束情况下最优调度方案的对比结果。

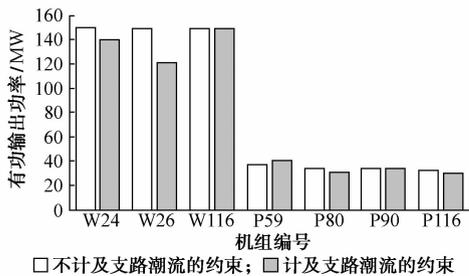


图 8 支路潮流约束对最优调度结果的影响

Fig. 8 Impacts of branch power flow limits on the optimal dispatch results

可以看出,就该算例系统而言,支路潮流约束对于最优调度方案有一定的影响,但并不明显。计及支路潮流约束后,多数风电机组和 V2G 电源的输出功率有所减少。需要指出,不同的电力系统由于负荷轻重有别,支路潮流约束对于调度结果的影响程度也就不同。

4 结语

风力发电和电动汽车在电力系统中的逐步渗透和容量的不断增加给电力系统的安全与经济运行带来了严峻的挑战。应用 V2G 技术,电动汽车既是电

力系统的负荷,又可以在必要时成为电源。然而,到目前为止,在 V2G 电源对电力系统安全和经济运行的影响方面的研究还相当初步。在此背景下,本文建立了一个新的随机经济调度模型以计及电动汽车与风电机组出力的不确定性。首先导出了电动汽车和风电机组的出力水平的概率分布,之后得出了电动汽车和风电机组的生产成本均值的解析表达式,在此基础上建立了随机经济调度模型。IEEE 118 节点系统的仿真结果表明了所发展的模型是可行和有效的。为本文所构造的优化模型发展更加有效的求解算法将是下一步需要研究的问题。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] EL-HAWARY M E, CHRISTENSEN G S. Optimal economic operation of electric power system. New York, NY, USA: Academic Press, 1979.
- [2] KEMPTON W, LETENDRE S. Electric vehicles as a new power source for electric utilities. Transportation Research: Part D, 1997, 2(3): 157-175.
- [3] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 280-294.
- [4] GRANVILLE S. Optimal reactive dispatch through interior point methods. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 136-146.
- [5] CHEN C L, WANG S C. Branch-and-bound scheduling for thermal generating units. IEEE Trans on Energy Conversion, 1993, 8(2): 184-189.
- [6] YANG H T, YANG P C, HUANG C L. Evolutionary programming based economic dispatch for units with nonsmooth fuel cost functions. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 112-118.
- [7] BAKIRTZIS A, PETRIDIS V, KAZARLIS S. Genetic algorithm solution to the economic dispatch problem. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(4): 377-382.
- [8] SELVAKUMAR A I, THANUSHKODI K. A new particle swarm optimization solution to nonconvex economic dispatch problems. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 42-51.
- [9] CHEN C L. Simulated annealing-based optimal wind-thermal coordination scheduling. IET Generation, Transmission and Distribution, 2007, 1(3): 447-455.
- [10] COELHO L S, MARIANI V C. Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 989-996.
- [11] SODER L. Reserve margin planning in a wind-hydro-thermal

- power system. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 1345-1354.
- [12] WANG J, SHAHIDEHPOUR M, LI Z. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1327.
- [13] HERTZER J, YU D C, BHATTARAI K. An economic dispatch model incorporating wind power. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(2): 603-611.
- [14] UMMELS B C, GIBESCU M, PELGRUM E, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 44-51.
- [15] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [16] PETERSON S B, WHITACRE J F, APT J. The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage. Journal of Power Sources, 2010, 195(8): 2377-2384.
- [17] ANDERSSON S L, ELOFSSON A K, GALUS M D, et al. Plug-in hybrid electric vehicles as regulating power providers: case studies of Sweden and Germany. Energy Policy, 2010, 38(6): 2751-2762.
- [18] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid: a cost-emission optimization. Journal of Power Sources, 2010, 195(3): 898-911.
- [19] KADUREK P, IOAKIMIDIS C, FERRAO P. Electric vehicles and their impact to the electric grid in isolated systems// Proceedings of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), March 18-20, 2009, Lisbon, Portugal: 49-54.
- [20] FLUHR J, AHLERT K H, WEINHARDT C. A stochastic model for simulating the availability of electric vehicles for services to the power grid// Proceedings of the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, January 5-8, 2010, Hawaii, USA: 1-10.
- [21] CELIK A N. A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey. Renewable Energy, 2003, 29(4): 593-604.
- [22] MOGHADDAS-TAFRESHI S M, MASHHOUR E. Distributed generation modeling for power flow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial distribution systems considering distributed generation. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 680-686.
- [23] JABR R A, PAL B C. Intermittent wind generation in optimal power flow dispatching. IET Generation, Transmission and Distribution, 2009, 3(1): 66-74.

赵俊华(1980—),男,现在博士后流动站从事研究工作,主要研究方向:电力系统分析与计算、智能电网、随机方法在电力系统中的应用、电力经济与电力市场。E-mail: fuxiharp@gmail.com

文福拴(1965—),男,通信作者,特聘教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场。E-mail: fushuan.wen@gmail.com

薛禹胜(1941—),男,中国科学院院士,国网电力科学研究院名誉院长,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

Power System Stochastic Economic Dispatch Considering Uncertain Outputs from Plug-in Electric Vehicles and Wind Generators

ZHAO Junhua¹, WEN Fushuan¹, XUE Yusheng², DONG Zhaoyang³, XIN Jianbo⁴

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

3. Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

4. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China)

Abstract: A stochastic economic dispatch model, which can take into account the uncertain outputs of plug-in electric vehicles (PEVs) and wind generators, is developed. A simulation based approach is first employed to study the probability distributions of the charge/discharge behaviors of PEVs. The probability distribution of the wind power output is next derived based on the assumption that the wind speed follows the Rayleigh distribution. The mathematical expectations of the generation costs of wind generators and vehicle to grid (V2G) power sources are then derived analytically. The feasibility and efficiency of the developed stochastic economic dispatch model is demonstrated with the IEEE 118-bus test system.

This work is supported by the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (No.200805610020).

Key words: wind generator; plug-in electric vehicle; stochastic economic dispatch

附录 A

表 A1 电动汽车的技术参数

Table A1 Technical parameters of the PEV

参数	值
电池容量	21.6 kWh
每日平均单程里程	21.5 km
每日平均回程里程	21.5 km
能耗	0.139 kW · h/km
转换器效率	75%

表 A2 电动汽车仿真设定

Table A2 Simulation setting for PEVs

参数	公用电动汽车	私人电动汽车	可调度电动汽车
市场份额	20%	60%	20%
日平均里程	150 km	43 km	43 km
充电时段	19:00 – 7:00	10:00 – 16:00 19:00 – 7:00	23:00 – 7:00
放电时段	-	-	10:00 – 16:00 19:00 – 23:00

表 A3 JB 正态检验结果

Table A3 JB normality test results

数据集	时段	JB 统计值	临界值	P 值
负荷水平	00:00 – 01:00	0.29	5.9915	0.8650
负荷水平	11:00 – 12:00	1.0949	5.9915	0.5794
负荷水平	19:00 – 20:00	0.8654	5.9915	0.6488
V2G 容量	11:00 – 12:00	0.6514	5.9915	0.7220

表 A4 风电机组参数

Table A4 Wind generator parameters

参数	切入风速	切出风速	额定速度	额定功率
数值	5 m/s	45 m/s	15 m/s	150 MW

表 A5 风电和 V2G 电源的成本系数

Table A5 Cost coefficients of wind units and V2G power sources

类型	直接成本系数	低估惩罚成本系数	高估惩罚成本系数
风力发电机	10 \$/MWh	30 \$/MWh	70 \$/MWh
V2G 能源	65 \$/MWh	30 \$/MWh	70 \$/MWh

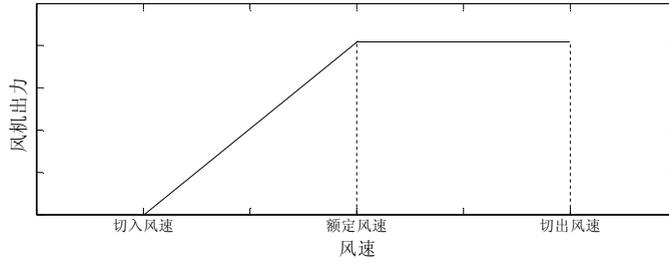


图 A1 典型风机功率转换曲线
Fig. A1 Typical wind turbine power curve

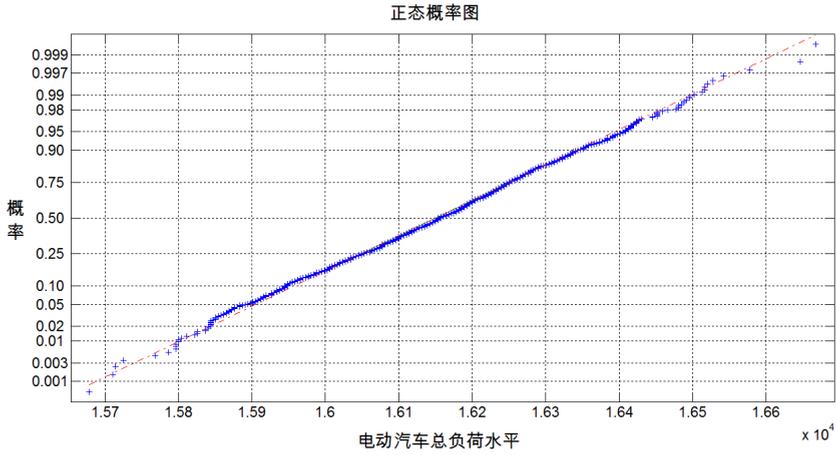


图 A2 电动汽车在 00:00-01:00 时段的总负荷水平的正态概率图
Fig. A2 Aggregated load level of PEVs in 00:00-01:00

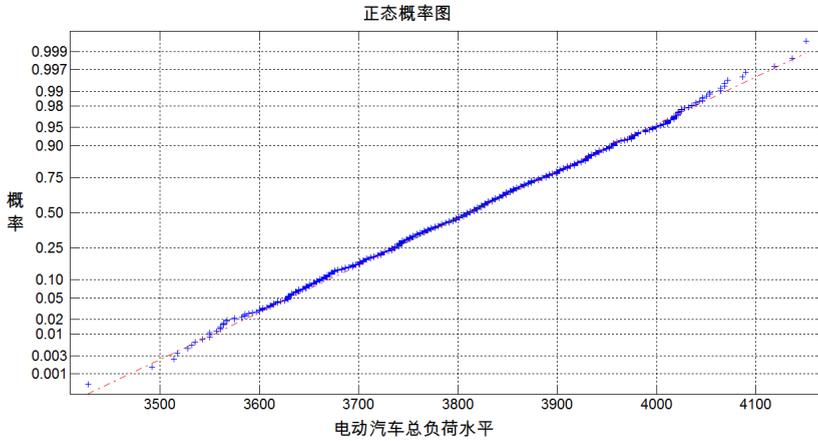


图 A3 电动汽车在 11:00-12:00 时段的总负荷水平的正态概率图
Fig. A3 Aggregated load level of PEVs in 11:00 - 12:00

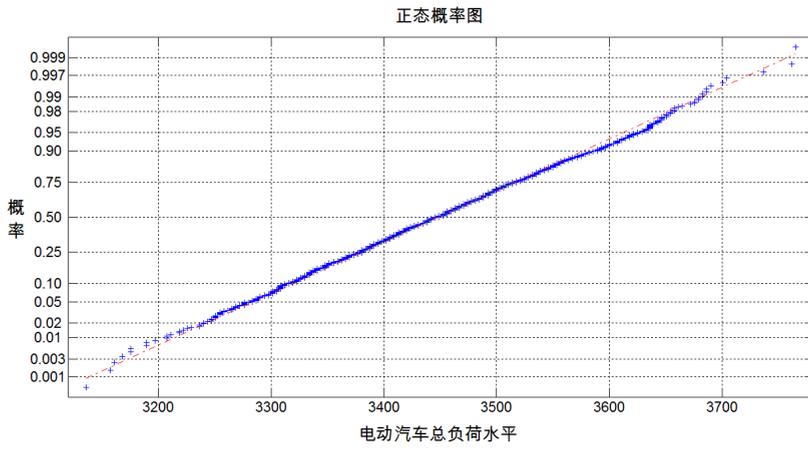


图 A4 电动汽车在 19:00-20:00 时段的总负荷水平的正态概率图
Fig.A4 Aggregated load level of PEVs in 19:00 – 20:00

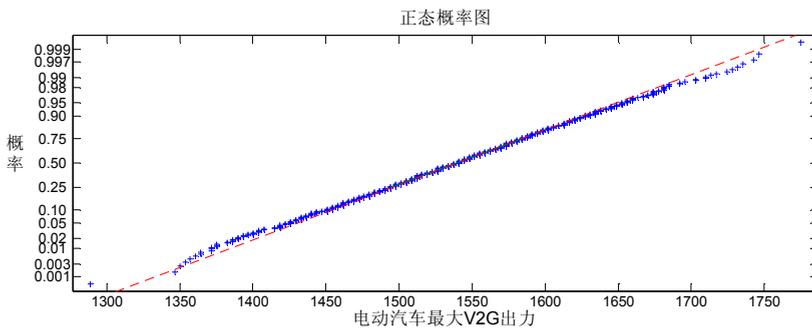


图 A5 电动汽车在 11:00-12:00 期间的总 V2G 电源容量
Fig.A5 Aggregated V2G power capacity in 11:00-12:00