

# 电动汽车充电负荷对丹麦配电系统的影响

徐立中<sup>1</sup>, 杨光亚<sup>2</sup>, 许 昭<sup>2,3</sup>, F. MARRA<sup>2</sup>, C. TRÆHOLT<sup>2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. Centre for Electric Technology, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby DK2800, Denmark; 3. 香港理工大学电机工程学系, 香港)

**摘要:** 电动汽车在减少二氧化碳排放方面意义重大。随着电动汽车数量的不断增加, 其对电力系统尤其是对中低压系统影响的研究也成为日趋紧迫的课题。电动汽车充电负荷作为一种随机负荷, 其负荷模型受用户用车习惯、电池特性及环境等的影响。以丹麦为背景, 考虑用户日常驾车模式及充电模式, 对电动汽车充电负荷特性作了初步分析, 并将其应用于典型配电系统分析之中。针对存在大量风电的配电系统, 采用蒙特卡洛仿真研究了电动汽车在不同普及程度、电价条件和季节下对配电系统的影响。

**关键词:** 电动汽车; 用车习惯; 电池特性; 配电系统; 风能

## 0 引言

随着经济发展与能源供给、环境污染之间的矛盾日益加剧, 节能降耗和减少对化石燃料的依赖已经成为经济可持续发展迫切需要解决的问题。电动汽车 (electric vehicle, EV) 是全部或部分由电能驱动电机作为动力系统的汽车, 它以电代油, 能够降低碳排放且噪声低, 是解决交通、能源和环境问题的重要手段。与此同时, 电动汽车对未来电力系统的可靠与经济运行以及可再生能源的接入也有着重要影响。作为一种灵活的充电负荷及储能装置, 电动汽车可以为电力系统提供调频和备用等辅助服务, 推动可再生能源的广泛利用。

随着电动汽车普及程度的不断提高, 电动汽车接入对配电系统的影响已经成为一个急需研究的课题。作为一种随机充电负荷, 电动汽车的负荷特性受用户驾车模式、电池特性以及环境的影响。本文在考虑分布式可再生能源发电随机波动的同时, 结合电动汽车充电特性, 以丹麦系统为背景, 研究了电动汽车在多种充电模式和不同渗透率情况下对居民区域配电系统的影响, 并提出了可能的解决方案。

## 1 丹麦电动汽车应用背景

丹麦政府在 2007 年发布了新的能源战略, 即在未来完全摆脱对传统燃料, 如煤、石油和天然气的依赖。为了实现这一目标, 可再生能源发电量所占比例在 2025 年必须提高到至少 30% 的水平。这意味着风力发电装机容量所占比例将从 2008 年约 20%

增加到 2025 年的 50%。在这一过程中, 电动汽车的应用和普及被视为是实现政府能源战略的一个重要手段<sup>[1-3]</sup>。丹麦电力系统的特点及政策导向使得电动汽车的应用有天然优势。

### 1) 电力系统的特征

在丹麦, 某些时段的风电出力高于总需求。例如, 在 2007 年和 2008 年西丹麦 Jutland 在 Nordpool 市场中有 113 h 电价为 0。从 2009 年 10 月起 Nordpool 引入负电价以更好地解决风电接入问题。由于大量风电的接入, 对辅助服务的需求要求更高。

### 2) 政策及社会行为

丹麦燃油汽车的购买税非常高 (180% + 增值税), 而按目前政策, 到 2012 年止对电动汽车仅收增值税。除购买税外, 在丹麦汽油价格也比很多国家高出 1 倍以上。

### 3) 驾车模式

据统计, 在丹麦汽车平均每天行驶距离约为 40 km, 且 75% 的电动汽车行驶里程小于 40 km<sup>[4]</sup>, 低于包括美国在内的许多其他国家。现有的电动汽车电池容量基本可以满足要求。

如果所有的公路运输都采用电动汽车, 丹麦每年的总用电量将增加 10~14 TW·h, 而丹麦在 2007 年的总用电量为 34 TW·h。因此, 对电动汽车并网方式及其对电力系统尤其是配电系统的影响分析已是迫在眉睫的课题, 而研究电动汽车充电负荷模型则是解决这一问题的前提。

## 2 电动汽车充电需求模型

电动汽车充电负荷模型受并网方式、电池特性、

收稿日期: 2011-01-15; 修回日期: 2011-04-20。

用户用车习惯、市场等方面因素的影响。在丹麦2009年开始的EDISON项目中,有对电动汽车基础设施和并网相关技术挑战的详细阐述<sup>[5]</sup>。

## 2.1 充电方式

目前,对于电动汽车充电的讨论主要集中在以下几种方式:

### 1) 分布式即插即充

这种情况主要针对大量低电压(230 V)分布式充电点(主要集中于居民楼和很多办公区的停车场)。在这种模式下电动汽车的充电时间和地点完全由用户自由支配。同时,受基础设施的影响,主要采用普通充电方式,充电电流一般在0.2~0.5 C(0.2 C表示理想状态下 $1/0.2=5$ (h)充电充满,其他充电时间同理),电池充电状态(state of charge, SOC)从0提升至100%大概需要5~8 h。

### 2) 集中式充电

集中式充电主要包括电池交换站和快速充电站。快速充电指电池充电电流几倍于正常充电电流的情况,从而可以在很短的时间内将电池SOC提高。例如,以2 C的电流充电,0.5 h时间内可以将电池的SOC从0提升到80%左右。

### 3) 虚拟电厂

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)将分散且随机的个体集成起来,通过对个体的控制从而实现真实电厂所具有的功能。引入虚拟电厂概念提供了另一条解决大量电动汽车充电管理的途径。

在电动汽车充电研究中,不同的充电方式对电动汽车负荷模型会有不同的影响。丹麦目前主要采用分布式充电,其他充电方式只是补充。

## 2.2 电池特性

就目前来看,最有可能在电动汽车上广泛使用的电池是锂电池。锂电池的充电特性主要受充电电流、SOC、健康状态(state of health, SOH)、循环充放电次数的影响。除此之外,环境温度对锂电池的容量也有很大的影响。例如,在-20℃的环境下,锂电池的充电效率以及容量与常温时有较大的差别,此时电池容量下降到只有45℃时的60%。丹麦地处北欧,地理位置决定了其环境温度在冬夏季节的差异较大(-20~40℃),而这也将对电池的特性及使用寿命产生一定的影响。图1显示了环境温度对电池容量的影响,电池在45℃左右时达到额定的设计容量,性能最好。

## 2.3 用户用车习惯及市场影响

用户行为是影响电动汽车功率需求的关键因素,具有随机性。对电动汽车功率需求产生影响的用户行为主要包括充电时间、地点、频率以及日行驶

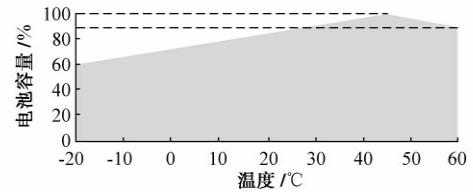


图1 温度对电池容量的影响

Fig. 1 Impact of temperature on battery capacity

里程。用户开始充电时间越集中,对系统的充电功率需求就越大;充电地点则显示了用户日常用车行为,一般为住宅、办公楼以及某些停车场。用户的充电频率则与电池容量及日行驶里程有关。电池容量大,用户的充电频率就越低;而日行驶里程越长,充电频率一般就越高。日行驶里程反映了用户当日的耗电量,在同样充电电流下,充电时间和日行驶里程相关。目前,丹麦全国的平均汽车日行驶距离为40 km左右。以Bornholm岛为例,据统计,岛上80%左右居民的日行驶距离少于50 km(含未用车的情况),且其比率随距离增长而快速递减,只有3%左右的用户日行驶距离在80 km以上<sup>[6]</sup>。

电力市场机制对电动汽车的充电也有重要影响。目前Nordpool市场中电价一般比较平稳,所以对用户而言充电时间对充电成本影响不大。如何利用市场来间接调控电动汽车的充电时间和地点也是一个值得研究的课题。

本文综合考虑了上述几个因素的影响,并结合丹麦电动汽车的一般特点,建立电动汽车的简化充电负荷模型;之后,基于丹麦配电系统中含有大量风电的实际情况,初步探讨居民电动汽车在分布式充电方式下,在不同普及程度、不同市场环境、不同季节情况下对配电系统的影响。

## 3 考虑电动汽车和风电的节点负荷

### 3.1 电动汽车充电负荷曲线

#### 3.1.1 电动汽车参数及充电负荷特性

影响电动汽车充电的参数主要包括电池容量、百公里耗电、充电效率以及充电功率等。电动汽车充电负荷特性与日行驶里程和充电开始时刻有关,后者受行驶结束时刻影响。

#### 1) 日行驶里程

日行驶里程反映了电动汽车一天内消耗的电能,日行驶里程近似满足对数正态分布<sup>[7]</sup>:

$$f_D(x) = \frac{1}{x\sigma_D \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2}\right) \quad (1)$$

该分布函数的数学期望为 $\exp(\mu_D + \sigma_D^2/2)$ ,方差为 $(\exp(\sigma_D^2) - 1)\exp(2\mu_D + \sigma_D^2)$ 。

对于每一辆电动汽车,先根据日行驶里程概率密度分布函数式(1)产生日行驶里程,然后根据汽车百公里耗能得到充电能量需求值。

## 2) 行程结束时刻

假设汽车行驶里程满足正态分布,最后一次行程结束时刻满足以下分布<sup>[7-8]</sup>:

$$f_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) & \mu_s - 12 < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x+24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) & 0 < x \leq \mu_s - 12 \end{cases} \quad (2)$$

该分布函数为分段正态分布,其标准差均为  $\sigma_s$ ,而数学期望则分别为  $\mu_s$  和  $\mu_s - 24$ 。

### 3.1.2 计算电动汽车充电负荷曲线

用户充电时刻应根据不同的电力市场环境进行假设。本文考虑 2 种简单情况:①在无经济利益和政策引导的情况下,电动汽车的充电行为通常较随意,一般是在用户下班回家后就开始充电(10:00—24:00 之间),其充电开始时刻根据分布函数式(2)随机选取;②考虑利用经济手段调节电动汽车充电时间,如依靠电价进行调节,检验其是否可以起到很好的避峰效果;这里假设电动汽车延时到 24:00 开始充电,这种方式是考虑用户因经济利益而选择避开用电高峰对电动汽车进行充电。

根据以上假设,可以确定电动汽车充电开始时刻;而根据电动汽车的行驶里程,则可以确定电动汽车充电所需要的电能;最后结合电动汽车充电特性,通过以下过程得到每辆电动汽车的充电负荷曲线:

1) 随机选取电动汽车充电接入点。

2) 根据电动汽车日行驶里程分布函数式(1)随机产生电动汽车的日行驶里程  $x_D$ 。

3) 在所有电动汽车中,假设只有 90% 的电动汽车会在当天返回家中进行充电。所以通过一个随机数来模拟这一概率。生成一个  $[0, 1]$  之间的随机数  $P_{Chr}$ ,只有在  $P_{Chr} < 0.9$  时,电动汽车才进行充电。

4) 确定电动汽车充电时刻,根据前面的假设和分析,电动汽车充电时刻有 2 种可能:①根据分布函数式(2)随机产生电动汽车充电开始时刻;②汽车都在 24:00 开始充电。

5) 在确定了电动汽车充电开始时刻和日行驶里程后,结合电动汽车每次充电都充至满电量的假设,生成电动汽车充电功率需求曲线。

### 3.2 配电系统负荷曲线

这里采用正态分布描述配电系统的其他负荷,其概率密度函数<sup>[9]</sup>为:

$$f_L(x_{L,h}) = \frac{1}{\sigma_{L,h} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_{L,h} - \bar{x}_{L,h})^2}{2\sigma_{L,h}^2}\right) \quad (3)$$

式中: $x_{L,h}$  为  $h$  时刻的负荷有功需求; $\bar{x}_{L,h}$  和  $\sigma_{L,h}$  分别为负荷期望值和标准差,负荷期望值可从典型负荷曲线获得,方差则可按期望值的一定比率设定,这里假设负荷具有 0.95 的恒功率因数。

### 3.3 风力发电出力曲线

这里假设风速满足 Weibull 分布,其概率密度函数  $f_v(v)$  和分布函数  $F_v(v)$  分别为:

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (4)$$

$$F_v(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (5)$$

式中: $v$  为风速; $k$  为形状系数; $c$  为尺度参数。

$v$  与风力发电机有功出力  $P_w$  的关系可用下式描述:

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} \leq v \leq v_R \\ P_R & v_R < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $v$  为风机轮毂高度处的风速; $v_{ci}$  为切入风速; $v_{co}$  为切出风速; $v_R$  为额定风速; $P_R$  为风力发电机的额定功率; $k_1 = P_R / (v_R - v_{ci})$ ;  $k_2 = -v_{ci} P_R / (v_R - v_{ci})$ 。

对于风力发电机,根据风速的分布函数,利用蒙特卡洛方法生成风速曲线,结合输出功率和风速之间的关系,产生日风力发电机出力曲线。同样无功也可根据恒定功率因数的假设求得。根据风速的累积分布式(5),利用蒙特卡洛模拟随机生成某一时刻的风速,先生成一个  $[0, 1]$  之间的随机数  $F_v$ ,然后求取式(5)的反函数得到对应的风速。具体公式如下:

$$v = c(-\ln(1 - F_v))^{1/k} \quad (7)$$

最后根据式(6),求得风速  $v$  对应的风力发电机出力值。

### 3.4 节点净负荷曲线计算流程

先根据前文方法产生各节点的电动汽车充电负荷曲线、常规负荷曲线、风力发电出力曲线,然后生成各节点的净负荷曲线。图 2 给出了这一过程的流程图。

## 4 仿真分析流程

仿真分析流程如图 3 所示。利用蒙特卡洛模拟方法,就电动汽车对配电系统的影响进行分析。对生成的节点功率需求曲线通过潮流计算求解各节点电压和注入电流,分析线路和其他设备的载荷和网损情况。

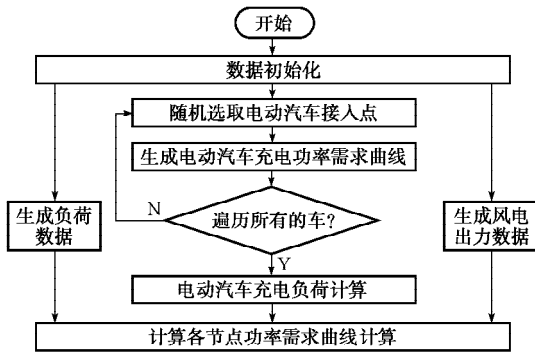


图 2 各节点负荷曲线计算流程  
Fig. 2 Flow chart of calculating the demand curve in each node

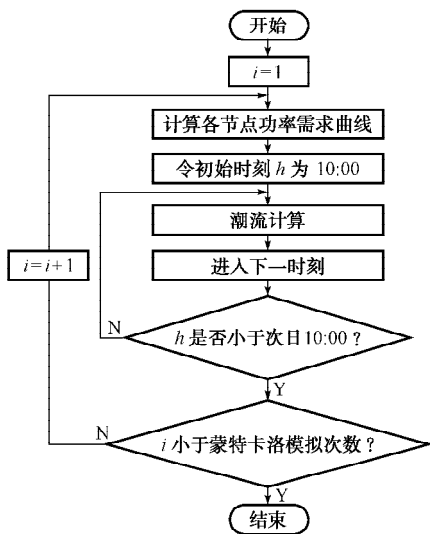


图 3 配电系统的蒙特卡洛仿真分析  
Fig. 3 Flow chart of Monte Carlo simulations for distribution systems

潮流计算采用前推回代方法。流程如下：先进行回代计算，即从馈线末端开始，逐层向上计算每个节点的注入电流，从每条馈线的末端向馈线的根节点回推；然后进行前推计算，从馈线根节点的电压开始向馈线末端逐层更新节点电压；然后进行收敛判断，若每个节点的电压在连续 2 次迭代中的电压修正量小于某一给定值，则潮流计算结束，否则重复前推回代过程。

## 5 算例分析

将第 4 节的分析过程应用到图 4 所示的典型配电系统，电压等级为 23 kV/10 kV，系统参数和节点负荷见附录 A。

该配电系统的最大负荷容量为 4 944 kW，最高家庭用电负荷占总容量的 75%。假设电动汽车充电功率为 4.6 kW，则系统最多可接入电动汽车数量

为  $4\,944/4.6 \approx 1\,075$  (辆)，但是由于受到潮流约束和节点电压的影响，实际可接入的电动汽车数量需要通过网络运行分析得到。定义渗透率  $r_p$  为：

$$r_p = \frac{4.6N}{4\,944} \times 100\% \quad (8)$$

式中： $N$  为电动汽车数量。

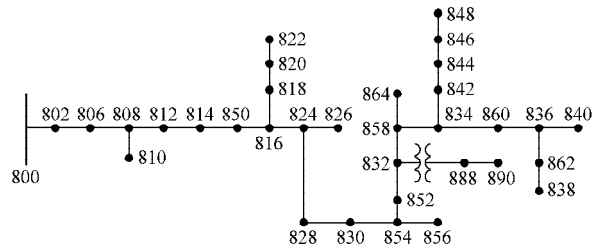


图 4 配电系统单线模型  
Fig. 4 Single-line diagram of a distribution network

节点 830, 840, 844 处安装有风力发电机，每个节点的风力发电机容量均为 100 kW。在一种极端情况下，即居民家庭用电负荷达到最大值，风电出力为 0，假设电动汽车充电功率为 4.6 kW 左右，则系统容量最多可承载 269 辆电动汽车同时充电。如果按每天最多 90% 的电动汽车接入充电的概率，在极端情况下可接入电动汽车的最大渗透率为 27.8%，考虑到风电接入的影响，按容量实际可接入的电动汽车可能更多。

图 5 给出了该配电系统的负荷标幺值曲线，冬天的负荷比夏天高很多。

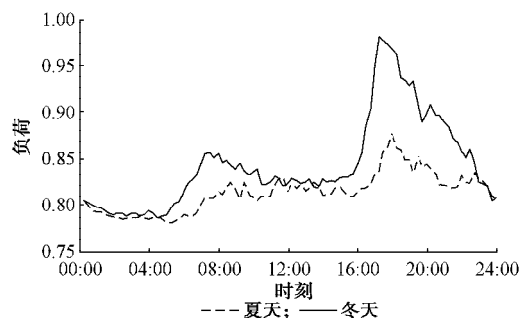


图 5 某配电系统负荷曲线  
Fig. 5 Load curve in a distribution network

为简化分析，对各风力发电机选取相同的参数，其中切入风速为 3.0 m/s，切出风速为 22 m/s，额定风速为 10 m/s，Weibull 分布中的  $c = 6.5, k = 2$ 。对任意一台风力发电机，其各时段风速大小根据风速分布函数式(5)随机生成，然后根据式(6)得到风力发电机对应的出力值。

对不同国家而言，式(2)中的参数或略有不同。针对丹麦情况，这里选取  $\mu_s = 17.6, \sigma_s = 3.4$  [4]。最后一次行程结束时刻的累积分布如图 6 所示。从

图6可以看出,超过95%的电动汽车在10:00以后结束最后一次出行。为便于分析,假设所有汽车在10:00以后结束行程。这里的分析也从当天10:00到次日10:00,并假设每日行程之间相互独立。

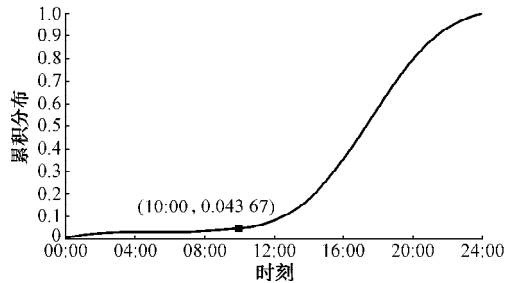


图6 最后一次行程结束时刻的累积分布  
Fig. 6 Cumulative distribution of the finishing time of the last trip

根据目前市场上电动汽车的实际情况,对家用汽车的具体参数作出一些假设,如表1所示。

表1 电动汽车参数假设  
Tab. 1 Parameters of EVs

参数	数值
电池容量	20 kW·h
百公里耗电	15 kW·h
SOC 范围	15%~90%
充电效率	90%
充电功率因数	0.95
正常充电功率	4.6 kW

电动汽车日行驶里程根据式(1)随机生成,根据丹麦电动汽车行驶特点<sup>[4]</sup>,选取  $\mu_D = 3.2$ ,  $\sigma_D = 0.88$ 。生成电动汽车日行驶里程后,根据每百公里耗电 15 kW·h 的假设计算出电动汽车充电需要的电能。

利用蒙特卡洛模拟方法求解,模拟次数设定为 1 000 次。针对不同电动汽车接入数量、不同充电方式、不同季节和有无风电接入的情况,统计网损率和最大电压偏差,分析电动汽车充电对配电系统的影响,在分析过程中忽略不同季节由于气温不同对电池的影响。

从表2和表3可以看出,电动汽车的接入对网损影响并不大。有35%的电动汽车接入量与没有电动汽车的情况相比,最大网损增加也不超过5%。电动汽车的2种充电模式(即插即充和延迟到24:00开始充电)对网损的影响则更小。原因在于电动汽车占负荷比例比较小,其充电电能需求占总负荷电能需求小于3%,充电时刻的不同对网损影响很小。同时也可看到,风电的接入对降低配电系统网损起到了很大的作用,平均降低网损11.67%。另外,由于冬天的负荷比夏天高出很多,所以网损

也较高。

表2 无风电接入时系统网损率  
Tab. 2 Power loss ratio without wind power

接入量/%	系统网损率/%			
	即插即充		24:00 开始	
	夏天	冬天	夏天	冬天
0	3.90	4.07	3.90	4.07
10	3.94	4.12	3.94	4.11
20	3.99	4.16	3.99	4.15
30	4.04	4.22	4.04	4.20
35	4.07	4.25	4.07	4.23

表3 风电接入时系统网损率  
Tab. 3 Power loss ratio with wind power

接入量/%	系统网损率/%			
	即插即充		24:00 开始	
	夏天	冬天	夏天	冬天
0	3.44	3.61	3.44	3.61
10	3.48	3.65	3.48	3.64
20	3.52	3.69	3.52	3.68
30	3.57	3.75	3.57	3.73
35	3.60	3.77	3.60	3.76

不同情况下的电动汽车充电造成的网络最大电压偏离见附录B表B1和表B2,从中可以看出,统一延时到24:00开始充电的情况下,电压偏离量比即插即充方式大。

根据对仿真结果的分析,最大电压偏离量的出现时刻与充电方式有关。以35%的电动汽车接入量为例,不论什么季节,在即插即充的方式下,最大电压偏离量出现在20:15和20:30;而24:00开始充电的情况下,最大电压偏离量出现在24:00。说明电动汽车的充电峰值是影响电压质量的主要因素。即插即充的功率需求峰值是系统负荷和电动汽车充电峰值叠加造成;而延时到24:00后的峰值,主要来自于电动汽车,且由于电动汽车充电时间集中,功率需求峰值反而比即插即充情况下高,所以这也是造成统一延时到24:00开始充电的情况下,电压偏离量更大的原因。

为了验证以上推测,这里针对冬季35%电动汽车接入情况作了进一步的仿真分析,分别对没有电动汽车接入、即插即充方式以及统一在18:00和统一在24:00同时充电4种情况进行了仿真。从表4给出的仿真结果发现,在电动汽车统一在18:00开始充电时,电压偏离量最大,而且网损最高;即插即充情况下,电动汽车并非同时接入配电系统开始充电,虽然大部分车在负荷高峰期接入并进行充电,电压偏离反而最小;统一从24:00开始充电的情况,电压偏离也比即插即充大。3种情况下网损的影响都不大。虽然电动汽车充电周期一般较长(5~8 h),

但调节分散管理电动汽车充电时间依然是增加电动汽车普及率的有效手段。

表 4 冬季无风电接入时系统网损率和最大电压偏离  
Tab. 4 Power loss ratio and maximum voltage deviation in winter without wind power

充电方式	网损率/%	电压偏离/%
无电动汽车	4.07	7.39
即插即充	4.25	9.44
18:00 开始充电	4.28	10.87
24:00 开始充电	4.23	9.49

## 6 结语

电动汽车充电负荷模型是研究电动汽车与配电系统交互影响的基础。本文概述了丹麦电动汽车研究的背景及最新进展,采用概率方法研究了电动汽车充电负荷曲线,通过算例仿真初步分析了电动汽车充电负荷对配电系统的影响。结果表明:在各种充电方式下,电动汽车对配电系统网损的影响都较小,而风电的加入可降低网损和电压偏移,对电动汽车的充电产生积极影响。分析中同时考虑了不同季节下电动汽车充电的影响。如何有效管理电动汽车充电是有待进一步研究的课题。

感谢 J. ØSTERGAARD 对本文提供的帮助。

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

## 参考文献

- [1] Danish Energy Agency. A visionary Danish Energy Policy 2025 [EB/OL]. [2007-01-01]. [http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Energipolitik\\_UK/a\\_visionary\\_Danish\\_energy\\_policy/pdf/Engelsk\\_endelig\\_udgave\\_visionaer\\_energip.pdf](http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Energipolitik_UK/a_visionary_Danish_energy_policy/pdf/Engelsk_endelig_udgave_visionaer_energip.pdf).
- [2] DIVYA K C, ØSTERGAARD J. Battery energy storage technology for power systems: an overview[J]. Electric Power

Systems Research, 2009, 79(4): 511-520.

- [3] XU Z, GORDON M, LIND M, et al. Towards a Danish power system with 50% wind: smart grids activities in Denmark[C]// Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 8p.
- [4] WU Q, NIELSEN A H, ØSTERGAARD J. Driving pattern analysis for electric vehicle (EV) grid integration study[C]// Proceedings of IEEE Conference on Innovative Smart Grid Technology Europe 2010, October 10-13, 2010, Gothenburg, Sweden: 6p.
- [5] ØSTERGAARD J, FOOSNAS A, XU Z, et al. Electric vehicles in power systems with 50% wind power penetration: the Danish case and the EDISON programme[C]// Proceedings of European Conference on Smart Grids and Mobility, June 16-17, 2009, Würzburg, Germany.
- [6] CHRISTENSEN L. Data available for analysing travel patterns of electric vehicles[R]. Interim report of Edison project, 2009.
- [7] 田立亭,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,2010,34(11):126-130.  
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [8] TAYLOR J, MAITRA A, ALEXANDER M, et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations[C]// Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 6p.
- [9] HATZIARGYRIOU N D, KARAKATSANIS T S, PAPAPOPOULOS M. Probabilistic load flow in distribution systems containing dispersed wind power generation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 159-165.

徐立中(1983—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:微电网能量管理。E-mail: lizhoxu@gmail.com

杨光亚(1981—),男,研究员,主要研究方向:电力系统优化调度、同步相量测量单元应用及可再生能源并网。E-mail: gyy@elektro.dtu.dk

许昭(1974—),男,助理教授,主要研究方向:负荷侧管理、风电及电动汽车并网、电力系统运行与优化。E-mail: eezhaoxu@polyu.edu.hk

## Impacts of Electric Vehicle Charging on Distribution Networks in Denmark

XU Lizhong<sup>1</sup>, YANG Guangya<sup>2</sup>, XU Zhao<sup>2,3</sup>, F. MARRA<sup>2</sup>, C. TRÆHOLT<sup>2</sup>

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby DK2800, Denmark;

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

**Abstract**: Electric vehicles (EVs) provide a unique opportunity to reduce carbon dioxide emissions from the transport sector by drawing on renewable resources. As EVs become increasingly popular in the automotive market, the study of its impacts on the low-voltage grid has become increasingly important. The model of EVs is affected by the user, battery characteristics, as well as the environment. Studies are carried out based on the Danish case. A preliminary model on demand is created by integrating the driving pattern and battery charging characteristics. The model is applied to a typical distribution network. Monte Carlo simulation is employed to study the impact of EVs in the presence of wind power considering different penetration levels of EVs, electricity price schemes and seasons.

**Key words**: electric vehicle; driving pattern; battery characteristics; distribution network; wind power