

# 电动汽车高渗透率的应对策略及换电站的最优规划

曾 正,赵荣祥,杨 欢,金 磊

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对传统配电网对电动汽车高渗透率的应对方案进行了研究。分析、对比并评价了峰谷电价调节方案、电动汽车和电网之间交互(V2G)方案和换电池方案,结果表明换电池方案具有明显的技术经济优势。同时认为微电网是实现换电站低碳、绿色、高效运行的一种有效方式,提出了一种以运行成本最低为目标,以功率平衡、电池管理、安装容量为约束的微电网型换电站中各分布式电源的最优规划模型。最后,利用一个数值算例验证了所提模型的有效性。

**关键词:** 电动汽车; 配电网; 最优规划模型; LINGO; 荷电状态

**中图分类号:** TM 64

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2012)09-0007-06

## 0 引言

近年来,电动汽车技术在我国获得了快速的发展<sup>[1]</sup>。文献[2]表明仅上海市嘉定区到 2015 年就将形成 3 万辆新能源汽车应用示范规模,若以每辆汽车 20 kW·h 的容量来计算<sup>[3]</sup>,折算成常规电力负荷,将给传统配电网带来 600 MW·h 的负荷需求。如此大的负荷势必会给配电网负荷扩容、新增装机容量和运行方式带来巨大的压力<sup>[4]</sup>。另一方面,由于电动汽车含有大量的电力电子变换装置,不但可以实现电机的四象限运行<sup>[5]</sup>,还能使电池成为一种优良的储能单元。只是由于电动汽车的分散性,使其和常规集中式储能系统在形式上有所区别,但仍可将其作为一种分布式储能系统。如果能提供有效的应对策略,不但能减轻电动汽车负荷给配电网带来的巨大压力,而且还可获得可观的效益,甚至可以在提高配电网稳定、负荷削峰填谷方面部分或全部取代集中式储能系统的作用。

文献[6]首先给出了电动汽车和电网之间交互 V2G(Vehicle to Grid)的概念及其应用框架。文献[7-9]表明通过 V2G,电动汽车能提高电力系统稳定性。文献[10-11]研究了电动汽车对配电网潮流、电能质量的影响,并提出了一种协调控制的充电方法以降低其给配电网带来的不良影响。文献[12]研究了电动汽车在参与电网频率调节中的应用。文献[13-14]研究表明,将电动汽车当作可控的电源或负荷,通过合理调度电动汽车电池与电网之间能量的双

向流动,并配合可再生能源,可以降低智能电网的运行成本和碳排放量。然而,针对传统配电网如何有效应对电动汽车快速发展方面的研究还不多见。

本文针对电动汽车高渗透率下配电网如何有效应对其带来的新挑战和新机遇进行了研究。给出了传统配电网应对该问题的 3 种可能方案,并进行了详细的分析探讨,评价了各自的优缺点,指出换电池方案是最佳的应对策略。最后,以换电池方案为例,给出了换电站的优化设计方法,并通过一个案例验证了该方法的有效性。

## 1 传统配电网应对电动汽车高渗透率的可能方案

结合现有技术条件,传统配电网面对电动汽车的快速发展,可能有 3 种应对方案:峰谷电价调节方案、V2G 方案和换电池方案。下面将分别针对这 3 种方案进行阐述,分析其各自的优缺点,以期从中获取配电网在电动汽车高渗透率下的最佳应对策略。

### 1.1 峰谷电价调节方案

随着电动汽车技术的发展,电动汽车高渗透率所带来的首要问题是负荷容量的急剧增加。然而,装机容量的增加和配电网的增容等配套措施的完善总是存在时延性,因此短期内无法从根本上解决该问题。如果仅将电动汽车的快速发展看作是常规负荷容量增加的问题,那么,一种可行的应对策略是峰谷电价调节方案,即通过电价的杠杆作用引导电动汽车负荷在时间上的合理分布,以减轻给电网带来的压力。

由于电动汽车的用途、行驶特性、用户的行驶习惯、选择的充电方式等都对电动汽车负荷具有直接的影响<sup>[15]</sup>。如果不考虑引入峰谷电价机制,各个时段的电价一致,在极端情况下,可能导致电动汽车和常

收稿日期:2011-07-28;修回日期:2012-05-18  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50907060);中国博士后科学基金资助项目(20090451438)  
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50907060) and China Postdoctoral Science Foundation(20090451438)

规负荷的波峰波谷重叠,恶化已有的负荷峰谷差,给电网的优化运行和稳定带来极大的不利,并使得现有装机容量在峰值负荷时严重不足,而在谷值负荷时又严重浪费。

如果引入传统的峰谷电价调节机制,即峰值高电价、谷值低电价的分时电价机制。该策略势必会将电动汽车负荷的充电高峰集中转移至常规负荷的谷值区,即电动汽车电池利用夜间充电。这样似乎能解决电动汽车负荷和传统负荷峰谷叠加带来的危害,然而应该注意到电动汽车的负荷容量是相当可观的,若峰谷电价制定得不合适,极有可能只是将峰值负荷推向夜间某个集中的时段,而不能从本质上解决负荷峰谷差过大的难题。

可见,在电价调节方案中,峰谷电价的制定具有决定性作用。该电价的制定取决于电动汽车的负荷容量和参与电价调节机制的电动汽车数量。然而,该分时电价方案会随着电动汽车负荷与常规负荷容量比例的不同而变动,可能难以找到一个长期适用的定价方案。且参与电价调节机制的电动汽车数量和消费者个人意愿密切相关,难以准确预计。另一方面,按电动汽车负荷特性制定的峰谷电价还将作用于常规负荷,此时常规负荷又将对电价方案的制定产生反馈作用。

总之,在峰谷电价调节方案中,难以找到一个合适的峰谷电价策略,不易处理好电动汽车的动态发展、消费者的个体差异以及常规负荷与电动汽车负荷在电价调节之间的均衡。

## 1.2 V2G 方案

V2G 方案,就是考虑电动汽车与电网之间的互动,即电动汽车在插入电网充电时也可以向电网放电。在电池电量不足或常规负荷谷值时,电动汽车从电网中汲取电能;而当电池电量充裕且在常规负荷峰值时,电动汽车向电网注入电能。可见,该方案通过对电动汽车充放电时间的优化调度,可使非行驶状态下的电动汽车起到分散式储能系统的作用。这样既能保证有效地将电动汽车负荷的峰谷差拉平,又能有效抑制常规负荷峰谷差对电网的冲击,有效减少电网的旋转备用容量。

从技术层面来看,在该方案中,电网需要合理设计电动汽车的充放电电价,调动消费者参与 V2G 过程的积极性。同时,每辆电动汽车还需要安装相应的电能计量单元、联系远端控制中心的无线通信设备以及本地的充放电控制设备。

该方案较峰谷电价调节方案具有明显的优势:具有一套独立于常规负荷的充放电电价,该电价与常规峰谷电价的差异性能有效带动消费者参与 V2G 的积极性;降低了消费者参与电网交互的技术屏障,消费者只需在非行驶状态下将电动汽车连接到电网

即可,其余的 V2G 功能由远端控制中心和本地控制设备来完成,这样极大地降低了对消费者的要求,故能进一步促进消费者主动参与 V2G;V2G 方案使得电动汽车负荷和常规负荷的调度相互独立,消除了峰谷电价调节机制中 2 类负荷之间的相互作用,能有效降低不合适的电价策略对应对方案的影响。

然而峰谷电价调节方案或 V2G 方案都具有以下明显的不足:每辆电动汽车都以一个独立负荷的形式接入电网,其接口的电力电子变换器可以看作是分布式的谐波电源,对电网带来大量的谐波污染<sup>[10-11]</sup>;虽然大量的电动汽车电池可以当作分布式储能使用,但是这种储能是分散的,每辆汽车作为储能系统的一个单体,容量一般仅为几十 kW·h,虽然总体来看对消除常规负荷的峰谷差具有一定的作用,但是一个单体的储能作用有限,难以实现配电网潮流优化、为配电网薄弱环节提供支撑等高级功能;在 V2G 中,电动汽车电池很难工作于一放一充模式,对于有充放电次数限制的电池而言,可能会降低其使用寿命。值得指出的是,即使是利用电动汽车的分散式储能功能来削峰填谷,分散的电动汽车在不同地点注入能量,其电能网架上流动带来的损耗也是很大的。综上,最佳的方案是负荷的就地平衡、能量的集中管理和系统资源的优化配置,而不是将分散式的储能分散于配电网中。

## 1.3 换电站方案

换电站方案,即建立公共电动汽车电池更换站,其功能如同传统交通系统中的加油站。当电动汽车电池电量不足时,到集中的换电站进行更换,换电站为其提供满充的电池并将更换下来的荷电状态 SOC (State Of Charge) 低的电池置于统一的充电设备中进行存储和管理。

如前述分析,如果能将大规模的电动汽车进行集中配置,就能有效地组织这些分散的储能单体,对其进行集中管理,构成一个个大容量的换电站,合理地将这些换电站优化配置于电网的薄弱环节或者是峰谷差较大的区域,就能明显地缩短负荷供需方之间能量流动的电气距离,同时大容量储能系统较分散式的单体能对配电网的薄弱环节提供更好的支撑。此外,换电站为能量的集中管理提供了便利,可以取消分布于每辆汽车的无线通信与充放电控制设备,并能有效地将分散的谐波源集中于换电站进行治理。通过换电站对大量电池的集中管理,还能更好地使电动汽车电池工作在一放一充模式,提高电池的使用寿命。

综上,在配电网应对大规模电动汽车发展的 3 种方案中,换电站方案具有更多的优势。通过实现对分散式的电动汽车电池资源的集中整合与优化配置,可以更好地实现如下功能:

a. 对常规峰谷负荷进行调节,降低配电网旋转备用容量和电网装机容量;

b. 将换电站设置在峰谷差较大的区域可以为其提供功率支撑,实现能量的供需就地补偿,降低能量在网架上的流动,减小损耗,优化潮流分布。将换电站配置在配电网的薄弱环节,可以使得配电网更加坚强;

c. 可以方便地对换电站的电能质量进行集中治理,改善传统电动汽车分布式充电给配电网带来的谐波污染;

d. 电池的集中更换消除了消费者在参与电网互动过程中由个体因素差异所带来的不利影响,还能更加可靠地保障电池工作于一放一充模式,提高对充放电次数有要求类电池的使用寿命。

应该注意到,上述3种方案之间存在密切的联系,并非完全孤立。峰谷电价方案也可适用于换电站与电网交换功率的定价,同时换电站与电网之间的功率交换本身也可以看作是一种广义的V2G方式。为了获得更好的效果,必要时可以考虑多种方案的综合应用。

## 2 换电站规划模型

第1节的对比分析结果表明换电站方案具有明显的优势,而换电站的合理设计与规划又成为该方案的关键因素。不难发现,该换电站具有集中式储能系统的性质,在适当的时候需要从配电网吸收能量,必要时又能向电网注入能量,故可以看作是一种可控负荷或者可控发电机。此外,考虑到换电站运行过程中的低碳、绿色、高效需求,实现这样一个换电站的最佳途径是采用微电网技术<sup>[16]</sup>,将电动汽车电池看作一个等效的储能系统,辅助以风力发电机、光伏电池组,再考虑到换电站的本地负荷,共同构成了一个局部供电系统<sup>[17-21]</sup>,以配合电动汽车换电。下面给出一个基于微电网的换电站规划模型<sup>[22-24]</sup>。

### 2.1 目标函数

本文以总成本费用最低作为换电站规划的目标函数。该目标函数由分布式电源的成本和向电网购电的成本组成,在整个工程寿命期内,平均每天的成本为:

$$\min F = \frac{1}{365N_e} \sum_{i=p,w,b} (I_i - S_i + M_i) + C_g \quad (1)$$

其中, $N_e$ 为工程的设计使用年限; $C_g$ 为购电成本; $I_i$ 、 $S_i$ 和 $M_i$ 分别为微电源 $i$ 的投资成本、残值和运行管理费用; $i=p,w,b$ 分别表示光伏电池、风力发电机和电动汽车储能电池。

投资成本 $I_i$ 为:

$$I_i = q_i C_i \quad (2)$$

其中,待优化变量 $q_i$ 为微电源 $i$ 的安装量,对于光伏

为光伏电池组的面积,对于风力发电机为其叶面的扫风面积,对于电动汽车电池为电池的总安装容量; $C_i$ 为微电源 $i$ 单位安装量的成本。

微电源 $i$ 的残值 $S_i$ 为:

$$S_i = q_i R_i \left( \frac{1+\beta}{1+\gamma} \right)^{N_e} \quad (3)$$

其中, $\beta$ 为通货率; $\gamma$ 为折现率; $R_i$ 为微电源 $i$ 单位安装量的残值。

运行管理费用为:

$$M_i = q_i H_i \sum_{j=1}^{N_e} \left( \frac{1+\varepsilon}{1+\gamma} \right)^j \quad (4)$$

其中, $\varepsilon$ 为升值率; $H_i$ 为微电源 $i$ 单位安装量的年运行管理费用。

购电成本为:

$$C_g = C \sum_{t \in \Omega} W_g(t) \quad (5)$$

其中, $C$ 为电网电价; $\Omega$ 为需要向电网购电的时间集合, $\Omega = \{t | W_g(t) > 0, 1 \leq t \leq 24\}$ ;  $W_g(t)$ 为 $t$ 小时内换电站和电网之间交换的电能。

### 2.2 约束条件

为了保证整个换电站的正常运行,需要满足下面的约束条件。

a. 功率平衡。换电站作为一个微电网,要保证其稳定运行,首先需要满足电源与负荷之间功率的平衡。为方便分析,假定第1小时电池充满电且不输出功率。那么, $t$ 小时内有功平衡关系为:

$$\begin{cases} W_w(t) + W_p(t) + W_b(t) + W_g(t) = W_d(t) + W_v(t) & t > 1 \\ W_w(t) + W_p(t) + W_g(t) = W_d(t) + W_v(t) & t = 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $W_w(t)$ 、 $W_p(t)$ 分别为风力发电机、光伏电池组在 $t$ 小时内的出力, $W_b(t)$ 为储能电池组在 $t$ 小时内放出的能量; $W_g(t) > 0$ 表示换电站在 $t$ 小时内从配电网吸收的电量, $W_g(t) < 0$ 表示换电站向配电网注入的电量; $W_d(t)$ 为 $t$ 小时内局部负荷的功率需求; $W_v(t)$ 为 $t$ 小时内电动汽车更换电池给换电站带来的等效负荷。

需要指出的是,由于本文以1h为时间间隔,故负荷(功率)和电量这2类变量在数值上是相同的。风力发电机的出力 $W_w(t)$ 满足:

$$W_w(t) = \eta_w q_w P_w(t) \quad (7)$$

其中, $\eta_w$ 为风力发电机的效率; $P_w(t)$ 为单位扫风面积的风力发电机在 $t$ 小时内所发出的电能,其值取决于风速和风力机特性,一般可以表达为:

$$P_w(t) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \\ av^3 - bP_n & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_n & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (8)$$

$$a = P_n / (v_r - v_{ci})^3, \quad b = v_{ci}^3 / (v_r - v_{ci})^3$$

其中, $v_{ci} = 2.5 \text{ m/s}$ 为切入风速, $v_r = 12.5 \text{ m/s}$ 为额定风速, $v_{co} = 20 \text{ m/s}$ 为切出风速, $P_n = 4 \text{ kW/m}^2$ 为风力



发电机单位扫风面积(1 m<sup>2</sup>)的额定输出功率。

为方便分析,忽略温度对光伏电池出力的影响,假定光伏电池出力  $W_p(t)$  仅和其辐射量有关,则:

$$W_p(t) = \eta_p q_p S(t) \quad (9)$$

其中,  $\eta_p$  为光伏电池的效率;  $S(t)$  为  $t$  小时内的太阳辐射能量。

储能电池组在  $t$  小时内放出的能量  $W_b(t)$  由 2 种情况引起:一种是处于能量集中管理的电池组释放能量给本地负荷或送到电网;另一种是发生电动汽车电池更换,一个几乎处于零负荷状态的电动汽车电池从换电站取走一个满负荷状态的电池。 $W_b(t)$  可表示为:

$$W_b(t) = W_{\text{soc}}(t) - W_{\text{soc}}(t-1) \quad t > 1 \quad (10)$$

其中,  $W_{\text{soc}}(t)$  为电池组在  $t$  小时内存储的电能,由于储能电池在第 1 小时满电量且不输出电能,则  $W_{\text{soc}}(1) = q_b$ 。假定  $t$  小时内电动汽车出现在该换电站的时间间隔为  $T_{bt}(t=1, 2, \dots, 24)$ ,那么在  $t$  小时内到达该换电站的电动汽车数量的均值为  $\lambda_t = 1/T_{bt}$ ,由泊松分布的性质可知, $t$  小时内到达的电动汽车数量  $x_t$  为  $k$  的概率满足泊松分布<sup>[25]</sup>:

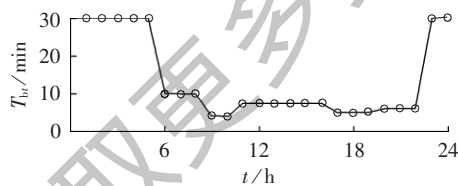
$$P(x_t = k) = \frac{e^{-\lambda_t} \lambda_t^k}{k!} \quad (11)$$

那么,由电动汽车更换电池给换电站带来的负荷  $W_v(t)$  为:

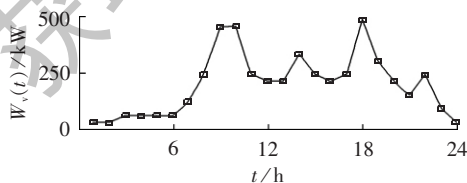
$$W_v(t) = W_{v0} x_t \quad (12)$$

其中,  $W_{v0}$  为每辆电动汽车电池的容量。

图 1(a) 给出了各个时间段电动汽车到达换电站的时间间隔  $T_{bt}$  的分布情况。若每辆电动汽车电池的容量为  $W_{v0} = 20 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,则电动汽车负荷  $W_v(t)$  的分布曲线如图 1(b) 所示。



(a) 电动汽车到达的时间间隔分布



(b) 电动汽车负荷曲线

图 1 电动汽车负荷特性

Fig.1 Load characteristics of electric vehicles

**b. 电池管理约束。**由于受到电动汽车电池自身特性的限制,其充放电速率不是无限的。为方便分析,假定电池的充放电过程是匀速进行的。例如,若某 1 kW·h 电池能量从零到满充的时间为  $T_c$ ,则其充电速率为  $1/T_c$ 。电池的充放电速率约束为:

$$|W_{\text{soc}}(t) - W_{\text{soc}}(t-1)| \leq q_b / T_c \quad t > 1 \quad (13)$$

另一方面,为了实现换电站对电网峰谷负荷的调节能力,以及对电网稳定性的支撑能力,换电站在任何时候都需要保持一定量的能量储备。该能量储备可以理解为电力系统中的旋转备用,并假定备用容量为一个常数  $Q_{bs}$ 。那么,电池管理的目标需要满足:

$$Q_{bs} \leq W_{\text{soc}}(t) \leq q_b \quad (14)$$

**c. 安装容量限制。**由于受到安装场地大小和预期成本的限制,各种分布式电源 DER (Distributed Energy Resource) 的容量必须限制在一定范围之内。对于光伏电池有:

$$q_{p,\min} \leq q_p \leq q_{p,\max} \quad (15)$$

其中,  $q_{p,\min}$  和  $q_{p,\max}$  分别为光伏电池组的最小和最大安装面积。风力发电机与电动汽车电池的容量限制类似。

### 3 算例分析

以一个数值算例验证本文模型的有效性。模型中各分布式电源的参数如表 1 所示。工程设计年限  $N_e = 20$ 。值得指出的是,由于电池的使用寿命为工程设计年限的一半,故整个工程期中需要更换一次电池,其投资成本需要乘以 2。此外,通货率  $\beta = 9\%$ ,升值率  $\varepsilon = 12\%$ ,折现率  $\gamma = 12\%$ ,备用容量  $Q_{bs} = 1 \text{ MW}\cdot\text{h}$ ,风力发电机和光伏电池发电的效率分别为  $\eta_w = 50\%$ 、 $\eta_p = 12\%$ ,电池充电特性时间  $T_c = 2 \text{ h}$ ,电网电价  $C = 0.12 \text{ \$/kW}\cdot\text{h}$ 。

表 1 微电源参数

Tab.1 Parameters of micro power sources

DER	$C_i$	$R_i$	$H_i$	$q_{i,\min}$	$q_{i,\max}$	寿命/a
光伏	450 $\text{\$/m}^2$	45 $\text{\$/m}^2$	4.3 $\text{\$/a}\cdot\text{m}^2$	0	20000 $\text{m}^2$	20
风机	100 $\text{\$/m}^2$	10 $\text{\$/m}^2$	1.25 $\text{\$/a}\cdot\text{m}^2$	0	50000 $\text{m}^2$	25
电池	400 $\text{\$/kW}\cdot\text{h}$	0	10 $\text{\$/[a}\cdot\text{(kW}\cdot\text{h)]}$	0	5 $\text{MW}\cdot\text{h}$	10

图 2(a)和图 2(b)给出了某天局部负荷、单位面积光伏电池和风力发电机出力的分布情况,数据源于 Homer 软件。基于以上模型及参数,利用 LINGO 软件进行求解<sup>[26]</sup>。所得各分布式电源的最优安装结果为:  $q_w = 224.26 \text{ m}^2$ 、 $q_p = 4607.42 \text{ m}^2$ 、 $q_b = 1608.13 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,对应的目标函数最小值为  $F = \$ 687.4$ 。若没有该基于微电网的换电站,电动汽车充电负荷所需电能均直接从电网购买,则所需的购电成本为  $\$ 590.4$ 。可见,采用微电网技术虽然能有效利用可再生能源并网发电,降低排放量,但是其日均运行成本仍高于直接向电网取电,从经济性角度来看,利用微电网实现电动汽车换电站并不是最优方案,这有待各种可再生能源发电成本的进一步降低。

图 2(c)为各种负荷和电源的功率曲线,从图中可以发现,在算例所示的 24 h 中,风力发电机和光伏电池的出力形成了良好的风光互补特性,有效地

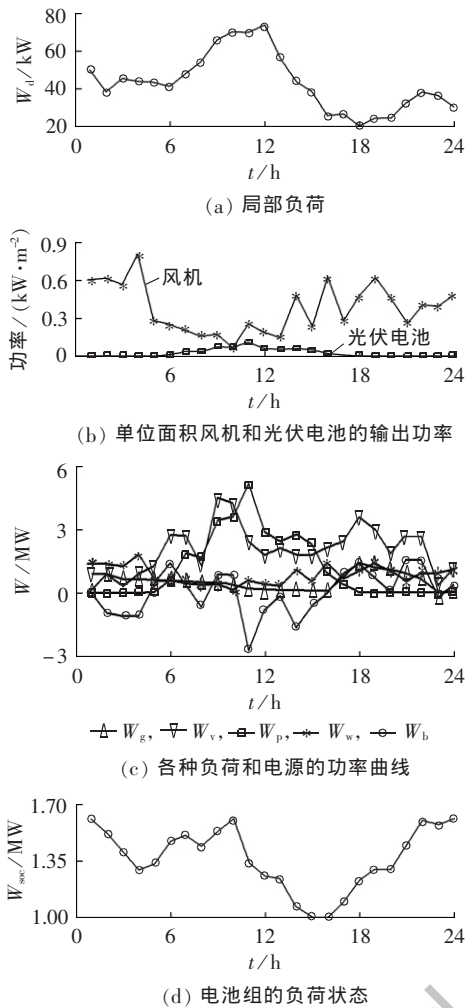


图 2 系统变量与优化结果

Fig.2 System variables and optimization results

提高了可再生能源的利用效率,但是当风光互补特性较差时,可能会进一步增加换电站的日均运行成本。值得指出的是,该换电站还储存了 1 MW·h 的备用容量,可以为配电网的一些其他高级功能提供支撑。图 2(d)为电池组的负荷状态,可以看出电池组整体上每天充放电一次,这是一个很好的特性。

定义不平衡功率为:

$$W_u(t) = W_p(t) + W_w(t) + W_b(t) + W_g(t) - [W_v(t) + W_d(t)] \quad (16)$$

图 3 给出了一天内不平衡功率的分布情况,可见所获最优解能有效保证负荷的供需平衡。

值得指出的是,虽然上述算例验证了所提换电站规划模型的可行性和有效性,但是换电站的运行与每日更换电池的需求密切相关,不同节假日、工

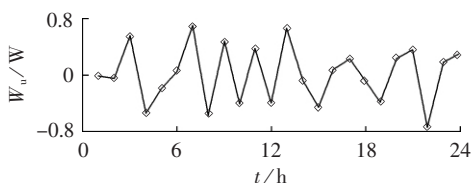


图 3 不平衡功率曲线

Fig.3 Curve of unbalanced power

作日、不同季节情况下更换电池需求差别很大。因此,在实际应用中,还应在以上算例的基础上考虑不同节假日、工作日、不同季节对模型结果的影响,在各种典型日所得结果的基础上取各分布式电源安装容量的最大值并乘以一个裕量系数作为最终的规划结果<sup>[27]</sup>。

#### 4 结论

本文针对传统配电网对大规模电动汽车接入后的应对策略进行了详细的研究,并获得以下结论。

a. 详细对比分析了 3 种可能的应对方案:峰谷电价调节方案、V2G 方案和换电站方案。结果表明换电站方案是最佳的选择:该方案能消除消费者的个人因素在配电网调节电动汽车负荷中的影响,能量的集中利用可以方便地解决分布式谐波电流不易治理的难题,优化潮流分布;通过合理配置换电站的容量和安装地点,可以有效地对常规负荷进行削峰填谷、提高配电网的稳定性;通过对换电站储能电池的集中管理,能有效实现电池的一放一充工作模式,提高电池的使用寿命。当然,这 3 种方案之间也存在一定的互补关系,必要时可以考虑 3 种方案的综合应用。

b. 基于微电网技术提出了一个换电站的优化设计模型。该模型以成本最低为目标,结合换电站的运行特性约束,可以很好地整合风力发电机、光伏电池组、储能电池和局部负荷之间的运行特点,充分发挥各自的优势,使得在保证电动汽车换电的同时,充分利用可再生能源的优势。同时,该模型的结果还能为配电网储备一定的可支配容量,提高配电网的稳定裕度。

c. 利用数值算例验证了所提方案的可行性。为配电网应对电动汽车的大规模接入提供了一种功能多样、行之有效的应对策略。

#### 参考文献:

- [1] 张文亮,武斌,李武峰,等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术,2009,33(4):1-5.  
ZHANG Wenliang,WU Bin,LI Wufeng,et al. Discussion on development trend of battery electric vehicles in China and its energy supply mode[J]. Power System Technology,2009,33(4):1-5.
- [2] 网易汽车. 上海:电动汽车如何运营国家电网是老大[EB/OL]. [2011-06-11]. <http://auto.163.com/11/0602/14/7516HJ3500084JU1.html>.
- [3] 宋永华,胡泽春,阳岳希. 电动汽车电池的现状及发展趋势[J]. 电网技术,2011,35(4):1-7.  
SONG Yonghua,HU Zechun,YANG Yuexi. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology,2011,35(4):1-7.
- [4] 高赐威,张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术,2011,35(2):127-131.  
GAO Ciwei,ZHANG Liang. A survey of influence of electric

- vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011,35(2):127-131.
- [5] 任桂周,常思勤. 一种电动汽车能量高效回馈制动方法[J]. 电网技术,2011,35(1):164-169.  
REN Guizhou,CHANG Siqin. A high-efficiency regenerative braking for electric vehicles[J]. Power System Technology,2011,35(1):164-169.
- [6] GUILLE C,GROSS G. A conceptual framework for the Vehicle-to-Grid(V2G) implementation[J]. Energy Policy,2009,37(11):4379-4390.
- [7] MITRA P,VENAYAGAMOORTHY G K. Wide area control for improving stability of a power system with plug-in electric vehicles[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2010,4(10):1151-1163.
- [8] TOMIĆ J,KEMPTON W. Using fleets of electric-drive vehicles for grid support[J]. Journal of Power Sources,2007,168(2):459-468.
- [9] KEMPTON W,TOMIĆ J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy[J]. Journal of Power Sources,2005,144(1):280-294.
- [10] CLEMENT-NYNS K,HAESSEN 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.
- [11] GALUS M D,KOCH S,ANDERSSON G. Provision of load frequency control by PHEVs,controllable loads,and a cogeneration unit[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(10):4568-4582.
- [12] HAN Sekyung,HAN Soohye,SEZAKI K. Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2010,1(1):65-72.
- [13] SABER A Y,VENAYAGAMOORTHY G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(4):1229-1238.
- [14] SABER A Y,VENAYAGAMOORTHY G K. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid—a cost-emission optimization[J]. Journal of Power Sources,2010,195(3):898-911.
- [15] 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.  
LUO Zhuowei,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):36-42.
- [16] 西安电视台新闻部. 西北地区首个运用微电网技术加电站亮相世园[EB/OL]. [2011-06-02]. [http://v.youku.com/v\\_show/id\\_XMjUzMTEyMjMy.html](http://v.youku.com/v_show/id_XMjUzMTEyMjMy.html).
- [17] LASSETER R H. Microgrids and distributed generation[J]. Journal of Energy Engineering,2007,133(3):144-149.
- [18] 曹相芹,鞠平,蔡昌春. 微电网仿真分析与等效化简[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):94-98.  
CAO Xiangqin,JU Ping,CAI Changchun. Simulative analysis and equivalent reduction for micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):94-98.
- [19] 施婕,郑漳华,艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):86-90.  
SHI Jie,ZHENG Zhanghua,AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):86-90.
- [20] 吴志,顾伟. 孤岛方式下基于多代理系统的微电网有功-频率控制[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):57-61.  
WU Zhi,GU Wei. Active power and frequency control of islanded microgrid based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):57-61.
- [21] 柳明,柳文. 基于电压的自治微电网分布式协调控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):20-24.  
LIU Ming,LIU Wen. Voltage-based distributed control of autonomous microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(1):20-24.
- [22] WANG Lingfeng,SINGH C. Multicriteria design of hybrid power generation systems based on a modified particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2009,24(1):163-172.
- [23] TANRIOVEN M. Reliability and cost-benefits of adding alternate power sources to an independent microgrid community[J]. Journal of Power Sources,2005(150):136-149.
- [24] MORAIS H,KÁDÁR P,FARIA P,et al. Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming[J]. Renewable Energy,2010,35(1):151-156.
- [25] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2005:340-349.
- [26] 谢金星,薛毅. 优化建模与LINDO/LINGO软件[M]. 北京:清华大学出版社,2005:1-20.
- [27] 艾欣,崔明勇,雷之力. 基于混沌蚁群算法的微网环经济调度[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2009,36(5):1-6.  
AI Xin,CUI Mingyong,LEI Zhili. Environmental and economic dispatch of microgrid using chaotic ant swarm algorithms[J]. Journal of North China Electric Power University:Natural Science Edition,2009,36(5):1-6.

#### 作者简介:

曾 正(1986-),男,重庆人,博士研究生,研究方向为分布式发电与微电网、并网逆变器(E-mail:zengerzheng@zju.edu.cn);

赵荣祥(1962-),男,浙江杭州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力电子与电力传动、分布式发电与微电网、储能及其应用等;

杨 欢(1981-),男,江苏南通人,助理研究员,博士,主要研究方向为分布式发电与微电网、储能及其应用、并网逆变器等(E-mail:yanghuan@zju.edu.cn)。



## 纯电动汽车充电机系统稳定性研究

李 晶,姜久春

(北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

**摘要:** 一般纯电动汽车充电机的控制系统基于额定输入电压、充电电流等条件设计,忽略了工作条件变化和元器件寄生参数对系统稳定性的影响。为了保证在充电过程中充电机能够稳定工作和进一步了解充电机系统稳定性的机理,建立基于全桥拓扑结构的纯电动汽车充电机的平均线性小信号模型。依据该线性小信号模型推导出表征充电机特性的关键传递函数。通过 MATLAB 仿真,研究纯电动汽车充电机在拓扑结构和主要参数确定的情况下,影响其控制环路特性的因素如输入电压、充电电流、输出滤波器等串联电阻与表征控制环路特性的参数如穿越频率和相位裕度之间的关系,并用实验证明了理论分析的正确性。

**关键词:** 电动汽车; 充电机; 系统稳定性; 环路增益; 穿越频率

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2012)09-0013-05

### 0 引言

纯电动汽车(BEV)充电机的稳定性关系到充电安全与电池的使用寿命,是充电机设计过程中需要考虑的重要问题<sup>[1]</sup>。目前纯电动汽车充电机一般基于隔离开关型电力电子变换器拓扑设计,尤其以隔离 Buck 型拓扑为主,根据使用的功率等级和输入输出条件选取不同的拓扑结构。在中大功率充电机中全桥拓扑因其传递功率大、变压器磁芯利用率高和器件应力小等优势被广泛应用<sup>[2]</sup>。本文以全桥拓扑构成的充电机为例,对影响其稳定性的因素进行分析。

充电机的稳定性和动态响应性能可以用控制环路参数如穿越频率和相位裕度以及特征传递函数如

占空比对输入电压的传递函数和输出电压对输入电压的传递函数等进行考察<sup>[3]</sup>。一般情况下,充电机的控制环路参数如穿越频率和相位裕度是在某一工作点下设计的。然而其在工作过程中工作环境、充电需求的变化以及元器件参数具有离散性会导致穿越频率和相位裕度发生变化。这些变化有可能导致充电机失去稳定性。因此有必要研究影响控制环路特性的因素。

本文首先建立了充电机的动态线性小信号模型,借鉴一般开关变换器的分析方法得到表征充电机特性的传递函数,重点研究影响环路特性的主要因素如输入电压、充电电流、输出滤波器参数与充电机环路特性的关系,为纯电动汽车充电机的控制环路设计提供依据,最后制作了一台样机进行测试,对理论分析进行验证。

### 1 纯电动汽车充电机模型

纯电动汽车充电机属于中大功率电力电子设

收稿日期:2012-02-17;修回日期:2012-07-18  
基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2011AA05A108)  
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2011AA05A108)

## Responsive schemes to high penetration of electric vehicles and optimal planning of battery swap stations

ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan, JIN Lei

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The responsive schemes of distribution network to the high penetration of electric vehicles are investigated. Three schemes are analyzed, compared and evaluated, i.e. peak-valley price regulation, V2G (Vehicle to Grid) and battery swap. Results show that, the battery swap scheme has obvious technical and economic advantages. The microgrid is considered as the best way to realize the green operation of battery swap stations with low emission and high efficiency. An optimal planning model is presented for the distribution of power sources in the microgrid for battery swap stations, which takes the minimal operating cost as its objective and the power balance, battery management and installation capacity as its constraints. A numerical case study verifies its effectiveness and validity.

**Key words:** electric vehicles; distribution network; optimal planning model; LINGO; state of charge