

考虑系统静态电压稳定性的电动汽车充电设备 就地控制方法研究

肖勇¹, 张明晔², 张永旺¹, 郭庆来², 赵伟¹, 孙宏斌²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 随着电动汽车的大规模发展, 其峰值充电负荷占全网负荷的比例日益上升, 给电网的静态电压稳定带来了负面影响。试图将电动汽车充电设备纳入电力系统安稳控制, 从而减少这一影响。提出了电动汽车充电设备的三种控制方法: 灵敏度控制方法、理想控制方法以及下垂控制方法, 并对其控制效果进行了对比。三种方法都能够达到提升系统负荷裕度的目的, 但其中的下垂控制方法更适合实际控制应用。将下垂控制应用到新英格兰 39 节点系统, 在不同渗透率和不同充电速率情况下分析其对系统电压稳定性的影响。结果表明下垂控制能够明显提高系统负荷裕度, 是一种有效的电动汽车充电设备就地控制方法。

关键词: 电动汽车; 电压稳定性; 充电控制; 负荷裕度; 灵敏度

Study of electric vehicle charging equipment local control method considering the system static voltage stability

XIAO Yong¹, ZHANG Mingye², ZHANG Yongwang¹, GUO Qinglai², ZHAO Wei¹, SUN Hongbin²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the large-scale development of electric vehicles, the ratio of the peak electric vehicle charging load to the total network load is rising day by day, which would have a negative impact on the static voltage stability of the power grid. This paper attempts to incorporate electric vehicle charging equipment into power system control, thereby reducing this negative impact. Firstly, three kinds of EV charging control method are proposed and their control effects are compared. The simulation and comparison show that all the three kinds of control methods could increase the load margin of the power grid, but the droop control method is more suitable for practical use. Then the droop control method is applied to New England 39-bus system to analyze its effect on load margin under different permeability and charging rate. The results show that the droop control method could increase the load margin obviously, it is an effective method for electric vehicle charging equipment local control.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2012AA050211), National Natural Science Foundation of China (No. 51321005), and Tsinghua University Initiative Scientific Research Program.

Key words: electric vehicle; voltage stability; charging-control; load margin; sensitivity

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)13-0030-08

0 引言

随着电动汽车的大规模发展, 电动汽车的峰值充电负荷占全网负荷的比例逐渐上升, 这种无序的

大功率充电所带来的负荷波动给电网的安全稳定运行提出了挑战^[1]。

除考虑电动汽车接入对有功调度的影响^[2-3]外, 近年来, 许多学者都对电动汽车接入对电网电压的影响进行了研究。文献[4]对含电动汽车的配网电压稳定裕度进行了研究。文献[5]考察了电动汽车充电电流谐波的影响, 静态地分析了各次谐波对应的电压值, 进而需要对充电站谐波进行抑制^[6]。文献[7]

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA050211); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51321005); 清华大学自主科研计划

为电动汽车充电建立了一个多状态的电压敏感负荷模型, 并使用实际测量的电动汽车充电数据来拟合得到模型的参数。文献[8]从电动汽车充电设备的基本原理入手, 推导得到了包含电动汽车充电设备的潮流模型, 将电动汽车充电负荷视为与 PV 节点类似的恒定电压节点, 使用一个恒定的阻抗来代表电力电子设备的损耗。相比仅考虑充电有功功率模型, 该模型中的电动汽车可以和配网交换有功功率和无功功率, 能够更准确地对电动汽车给电网带来的影响进行评估。文献[9]基于人工神经网络提出了估计节点 L 电压稳定指数的方法。文献[10]使用 Monte Carlo 方法对电动汽车的随机充电进行分析, 获得了电压不平衡指标的概率分布。研究都表明, 电动汽车的无序大功率充电会给电力系统的电压稳定性带来负面影响。

虽然电动汽车负荷相对传统负荷具有随机性大, 机动性大的特点, 但如果利用得当, 将电动汽车纳入电力系统的静态稳定控制之中, 就可以减少电动汽车峰值充电负荷对电网的影响, 甚至提高电网的安全稳定状态。利用电动汽车对电网电压进行控制的研究, 大都使用电动汽车充电设备的无功功率输出能力来控制电网电压。文献指出, 四象限变流器的使用可以让电动汽车充电设备不仅仅具备充电的能力, 而且具备向电网提供无功功率的能力。无功功率管理可以让电动汽车更好地接入电网。文献[11]认为典型的电动汽车充电装置具备自动换向的功能, 所以理论上可以同时控制有功和无功的输出, 在文章中用闭环控制模型调整电动汽车充电的有功功率和无功功率。

因此, 在未来电动汽车充电负荷渗透率比较高的情况下, 调度中心可以让大量的电动汽车充电设备在稳定控制中起到重要作用。由于电动汽车充电功率调节速度快, 调节量可控, 且相比工厂、居民区等电力用户, 充电设备对于功率调节并不敏感, 所以如果能够把大量的电动汽车充电设备纳入控制, 无论是对于电网的安全稳定运行, 还是减少对于社会因为切除负荷所承担的损失, 都具有一定的意义。

本文尝试对如何对充电设备进行控制以提高电网的静态电压稳定性进行研究。首先提出了电动汽车充电设备的就地控制方法, 然后对各控制方法的效果进行对比, 进而将就地控制应用于新英格兰 39 节点系统, 以评估就地控制对系统静态电压稳定性的影响, 最后是本文结论。

1 电动汽车充电设备就地控制方法

针对可能使用的电动汽车充电设备就地控制方

法进行研究, 提出了三种控制方法, 分别是灵敏度控制、理想控制、下垂控制。

基于两节点原理系统对三种控制方法进行分析, 系统单线图如图 1 所示。其中母线 1 上连接了一台发电机, 作为整个系统的电源及参考节点; 母线 2 上连接了一个 ZIP 负荷, 代表电动汽车充电负荷, 以及一个 PQ 负荷, 代表除了充电负荷以外的传统负荷。电源通过母线 1 和母线 2 之间的传输线给两个负荷供电。由于电动汽车 ZIP 负荷模型参数中, 恒定电流部分所占的比重较大, 因此在分析中忽略了恒定阻抗和恒定功率部分。

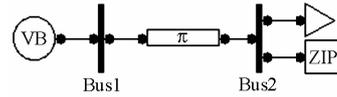


图 1 两节点系统单线图

Fig. 1 A 2-bus system

设母线 1 电压为 $E\angle 0^\circ$, 母线 2(即电动汽车充电设备端)电压为 $U\angle \delta^\circ$, 传输线阻抗为 jX , 电动汽车充电电流为 I_0 , 功率因数为 $\cos\theta$, 负荷有功功率和无功功率分别为 P_L 、 Q_L 。则有功率平衡方程

$$\begin{cases} P_L + I_0 U \cos\theta = \frac{EU}{X} \sin\delta \\ Q_L + I_0 U \sin\theta = \frac{EU}{X} \cos\delta - \frac{U^2}{X} \end{cases} \quad (1)$$

消去 δ , 得

$$\begin{aligned} (P_L + I_0 U \cos\theta)^2 + \\ \left(Q_L + I_0 U \sin\theta + \frac{U^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{EU}{X} \right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

对上式求偏导, 整理可得

$$\frac{\partial U}{\partial I_0} = \frac{(P_L + I_0 U \cos\theta)U \cos\theta + \left(Q_L + I_0 U \sin\theta + \frac{U^2}{X} \right)U \sin\theta}{(P_L + I_0 U \cos\theta)I_0 \cos\theta + \left(Q_L + I_0 U \sin\theta + \frac{U^2}{X} \right) \left(I_0 \sin\theta + \frac{2U}{X} \right) + \left(\frac{EU}{X} \right) \frac{E}{X}} \quad (3)$$

1.1 灵敏度控制

充电设备端电压 U 是负荷 P_L 、 Q_L 和自身充电电流的函数

$$U = f(P_L, Q_L, I_0) \quad (4)$$

其中, 隐函数 f 形式如式(2)所示。因此 U 关于 I_0 的偏导数可通过系统目前的状态得到。若目前系统所处状态为 $P(P_L, Q_L, U, I_0)$, 在此处线性化可得

$$U = f(P_L, Q_L, I_0) \Big|_P + \frac{\partial U}{\partial I_0} (I_0 - I_0 \Big|_P) \quad (5)$$

则

$$I_0 = (U - U|_p) / \left(\frac{\partial U}{\partial I_0} + I_0|_p \right) \quad (6)$$

令 U 为设定值 U_{set} ，则对应的 I_0 就是需要调整到的近似值。

1.2 理想控制

可以利用理论计算找出一定 PQ 负荷下使得电压最高的电动汽车电流值。当电压最高时，必定有

$$\frac{\partial U}{\partial I_0} = 0 \quad (7)$$

此时式(3)可以进一步简化为

$$\begin{aligned} & (P_L + I_0 U \cos \theta) U \cos \theta + \\ & \left(Q_L + I_0 U \sin \theta + \frac{U^2}{X} \right) U \sin \theta = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

且此时 U 和 I_0 的关系仍旧需要满足式(2)，联立这两个方程可以得到电压极值点，该极值点代表了电压最高时的电动汽车电流值。

1.3 下垂控制

由电动汽车节点的 PV 曲线可知，随着负荷的增长，电动汽车节点的端电压会下降。根据这一特点，在电动汽车充电负荷中可以引入下垂控制。其表达式如下

$$I_0 = \beta U + \alpha \quad (9)$$

其中， α 和 β 为控制参数，它们的值可以使用试探或凭借经验设定。

在对灵敏度控制和理想控制的仿真中发现控制电流和系统端电压之间近似服从线性关系，因此上式中的控制参数也可以通过拟合这两种控制方式给出的控制量来得到。

2 各控制方法效果对比

基于上述两节点系统对三种控制方法的控制效果进行仿真，并对三种控制效果进行对比。仿真使用软件 PSAT 进行相关计算，使用 Matlab 作为仿真环境。

2.1 仿真流程

仿真流程如图 2 所示。在仿真过程中，首先将电动汽车充电负荷的初始充电电流大小设定为合适值，然后从基态开始增长 PQ 节点的有功和无功负荷，模拟系统的负荷增长情况，直至潮流计算不收敛。由此可以得到 PQ 节点基态距离电压失稳点的距离，也即系统的负荷裕度。在上述过程中，根据选定的控制算法计算电动汽车充电电流的控制量，并将此控制量作为下一步计算时充电电流的数值。

通过仿真可以得到在不同控制策略下，电动汽车端点电压、电动汽车充电电流随电网有功负荷变化的情况。

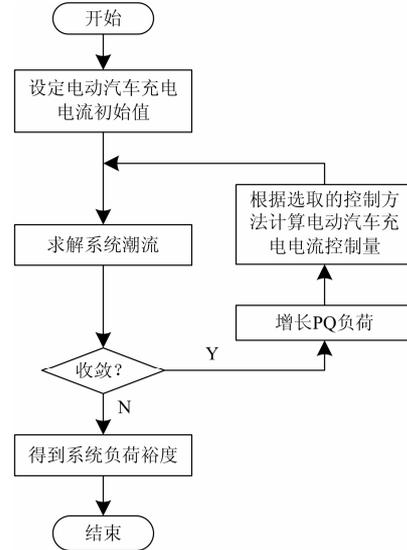


图 2 仿真流程

Fig. 2 Flow chart of the simulation

2.2 仿真参数设置

(1) 系统参数如表 1~表 3 所示。

表 1 发电机参数

Table 1 Generator parameters

功率基准值/ MVA	电压基准值/ kV	机端电压	无功上限	无功下限	电压上限	电压下限
100.0	1.00	1.05	8.0	-5.0	1.1	0.9

表 2 PQ 负荷参数

Table 2 Load parameters of PQ

功率基准值/MVA	电压基准值/kV	有功功率	无功功率	电压上限	电压下限
100.0	1.00	3.6	2.0	1.1	0.9

表 3 传输线参数

Table 3 Transmission line parameters

功率基准值/MVA	电压基准值/kV	R	X	g
100.0	1.00	0.0	0.040	0.0

(2) 电动汽车负荷基本参数

电动汽车 ZIP 负荷模型表达式为

$$P = gV^2 + I_p V + P_n \quad (10)$$

$$Q = bV^2 + I_Q V + Q_n \quad (11)$$

拟合得到各参数如下：

$$P_n = 0.1884 \times \cos(0.3531)$$

$$Q_n = 0.1884 \times \sin(0.3531)$$

$$I_p = 1 \times \cos(-0.26623)$$

$$I_Q = 1 \times \sin(-0.26623)$$

$$g = 0.1884 \times \cos(-0.4845)$$

$$b = 0.1884 \times \sin(-0.4845)$$

电动汽车充电电流初始值: 5 p.u.。假定电动汽车充电电流即: 能够为正数, 从电网中吸收能量; 也能够为负数, 向电网放出能量。

(3) 灵敏度控制

电压设定值: 0.95 p.u.;

PQ 节点负荷功率因数: 0.707(在负荷增长过程中保持恒定)。

(4) 下垂控制

经过仿真, 选取效果相对较好的下垂控制参数对应的表达式如下

$$I = 3.291 + 20.25 \times (U - 0.96) \quad (12)$$

2.3 仿真结果

两节点系统采用不同就地控制方法时电网有功负荷增长过程中电压的变化曲线如图 3 所示。其中方块所示为不采用就地控制时的结果, 圆形为灵敏度控制的结果, 三角为理想控制的情况, 菱形为下垂控制的结果。由结果可见, 不采用就地控制时, 系统的负荷裕度仅为 6.1 p.u., 而采用就地控制时, 在各种控制方式下系统负荷裕度都可达到 6.9 p.u. 左右。在本算例中, 对电动汽车充电电流的就地控制能够使系统的静态电压稳定裕度大约提高 13%。因此在电动汽车接入时, 采用充电设备的就地控制能够提高系统的静态电压稳定性。且本文所提出的三种控制方式在参数整定合适的情况下, 都能够达到比较好的控制效果。

若考虑负荷增长过程中电动汽车充电电流的变

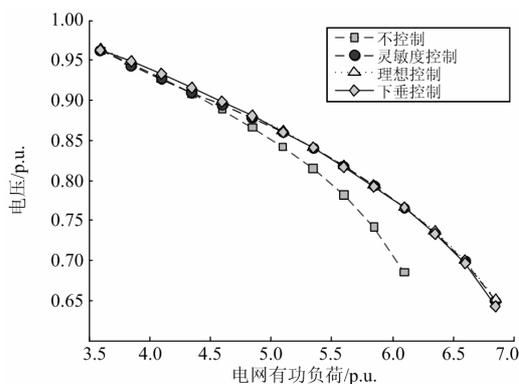


图 3 两节点系统不同控制下的电压变化曲线

Fig. 3 Voltage curve of the 2-bus system under different control modes

化, 则三种不同的控制方式体现出了差异。电流曲线如图 4 所示。灵敏度控制方式下, 电动汽车充电设备的充电电流相比其他两种控制方式波动较大: 充电电流的初始值为 5 p.u., 短暂地上升至 5.3 p.u. 后电流开始下降, 最后在其他两种控制策略给出的电流左右摆动。在将电压调节为理论上最高值的理想控制方式下, 充电电流的变化比较平稳。下垂控制方式下充电电流变化同样比较平稳, 但比理想情况给出的控制电流要大一些。

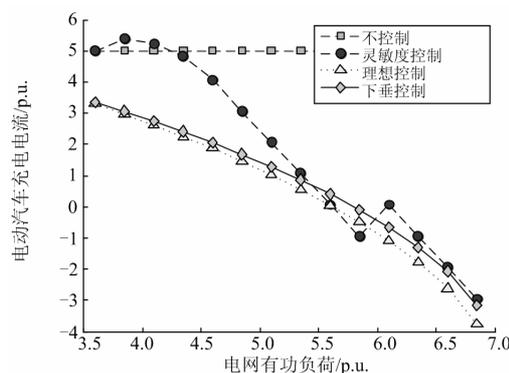


图 4 两节点系统不同控制下的充电电流曲线

Fig. 4 Charging current curve of the 2-bus system under different control modes

总体来说, 三种控制策略的最终效果差别不大。但采用灵敏度控制时, 当电压达到理论上的最高点附近, 电压对于负荷的灵敏度很小, 这将造成调节量过大, 控制轨迹在最优点附近摆动。另外灵敏度控制由于是通过线性化得到的模型, 所以当设定值远离目前状态时将会有很大的误差。同时对于理想控制, 当电网规模大时难以解析求得电动汽车接入电压极值点及相应的充电电流。因此灵敏度控制和理想控制并不适用于大规模电网的实际应用。而下垂控制如果参数整定得当, 能够得到很好的控制效果, 适合实际控制使用。

3 就地控制对电压稳定性的影响

本节将分析采用下垂控制方式时, 对电动汽车充电设备的就地控制对系统静态电压稳定性的影响。

3.1 含电动汽车充电负荷的新英格兰 39 节点系统

新英格兰 39 节点系统是分析电力系统电压稳定问题的经典系统。为了模拟电动汽车接入, 将系统中 5 个 PQ 负荷节点改造成电动汽车充电节点, 如图 5 所示。

改造后, 系统 PQ 节点总有功功率为 4 496 MW, 将该值假定为系统运行的平均值, 并根据典型的日

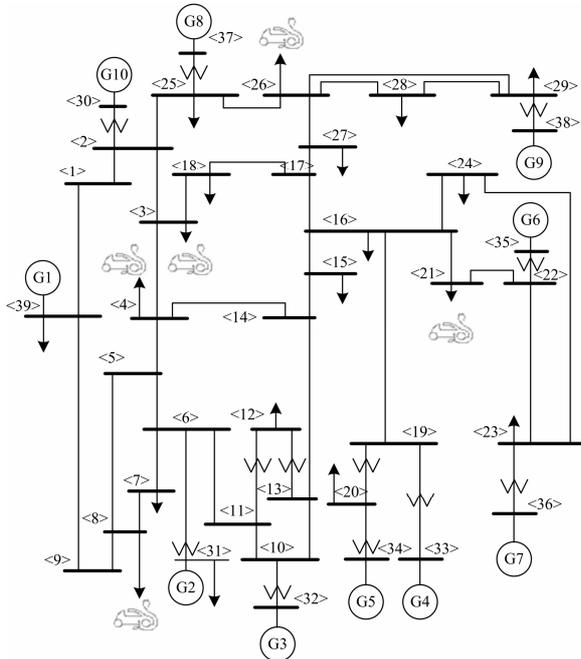


图 5 加入电动汽车充电负荷的新英格兰 39 节点系统
Fig. 5 New England 39-bus system with EV charging loads

负荷曲线进行整定,得到该 39 节点系统的日负荷曲线。该负荷曲线中有功率最小值为 2 749 MW,假设其中 30%为居民负荷,每户居民每月用电 300 kWh,则可得居民总共为 200 万户。

根据文献[12]提出的算法,可以由居民电力用户数量估算电动汽车数量。以一户居民当中有 1 辆电动汽车的比例作为电动汽车的渗透率,假定电动汽车渗透率分别为 0%、10%、20%、30%、40%,则可以得到对应电动汽车的数目如表 4。仿真考虑三种典型的电动汽车充电类型: 1.9 kW 慢充(AC level 1), 8 kW、19.2 kW 快充(AC level2)。

表 4 电动汽车渗透率和与之对应的数量

Table 4 Permeability of EV and the corresponding number					
渗透率	0%	10%	20%	30%	40%
电动汽车数/万辆	0	20	40	60	80
充电功率(以 1.9 kW 计)					
占原系统最大负荷比例	0	3.25%	6.50%	9.75%	13.0%

3.2 不采用控制时系统电压稳定情况

不采用对电动取车充电设备的就地控制的情况下,计算不同渗透率和不同充电速率情况下系统有功负荷裕度,结果见图 6。

可以看到,不论用何种速率进行充电,随着电动汽车渗透率的增长,电网的负荷裕度都是下降的,但是下降的速度有所不同。1.9 kW 的慢速充电下,随着渗透率的增长,负荷裕度缓慢下降,但始终在 100 p.u.以上。8 kW 的中间速率充电下,负荷裕度

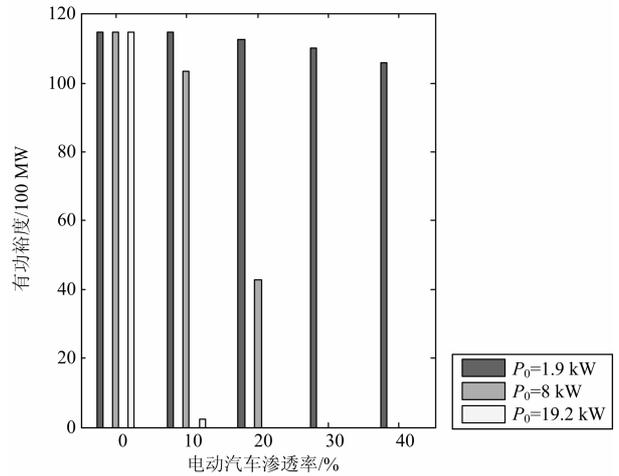


图 6 电动汽车渗透率、充电速率对负荷裕度的影响
Fig. 6 Effect of permeability of EVs / charging rate to load margin

下降速度大为增加,在电动汽车渗透率达到 20%时只剩下 40 p.u.的负荷裕度,而 30%和 40%渗透率下,系统无法保持稳定运行。19.2 kW 的快速充电下,系统负荷裕度急速下降。

3.3 采用就地控制时系统电压稳定情况

下垂控制的本质是在电压降低时通过减少电动汽车的充电功率来提升系统的负荷裕度。假设电动汽车充电设备能够接受控制连续地调节充电功率。使用变量 pct_i 代表第 i 个充电设备实际充电功率与额定电压下充电功率的比例,代表了充电设备的充电速率。则根据式(10)、式(11),当前充电速率下电动汽车充电负荷表达式为

$$P_i = pct_i (g_i V_i^2 + I_{pi} V_i + P_{ni}) \quad (13)$$

$$Q_i = pct_i (b_i V_i^2 + I_{Qi} V_i + Q_{ni}) \quad (14)$$

假定充电速率 pct_i 与端电压存在线性关系,且需要满足当电压为 1 时,相应的速率 pct_i 也为 1。即有

$$\begin{cases} pct_i = \beta_i V_i + \alpha_i \\ 1 = \beta_i + \alpha_i \end{cases} \quad (15)$$

式中,在仿真中分别取 β 为 1、2、3。

在算法实现过程中,做出了如下假定:电动汽车充电速率由控制算法决定,其对电压的反应较慢。电动汽车的电路模型由充电设备的硬件决定,对电压反应时间很短。在仿真时,控制算法通过上一次计算得到的充电设备端电压确定电动汽车的充电速率。充电设备的潮流模型仍保持为 ZIP 负荷模型,控制算法修改 ZIP 模型的参数。仿真步骤流程图如图 7 所示。

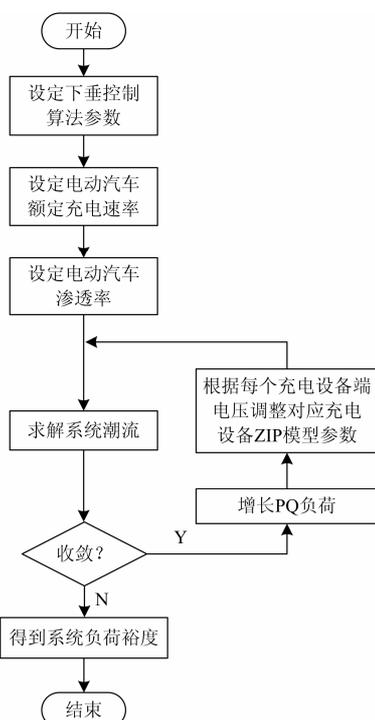


图 7 39 节点系统下垂控制算法流程图

Fig. 7 Flow chart of droop control for the 39-bus system

在不同的电动汽车渗透率、不同的充电速率情况下,下垂控制模型采用不同的参数,分别进行仿真,结果如图 8~图 10 所示。

由结果可见,当接入的电动汽车充电功率为 1.9 kW 时,对系统负荷裕度的影响非常小。随着电动汽车渗透率从 0%增大至 40%,系统的负荷裕度发生了轻微的下落。下垂控制起到了一定的效果,但是由于系统中电动汽车充电负荷本来就不多,所以起到的作用不是很大。

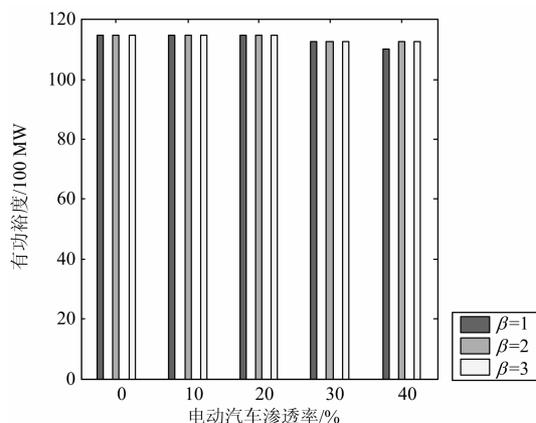
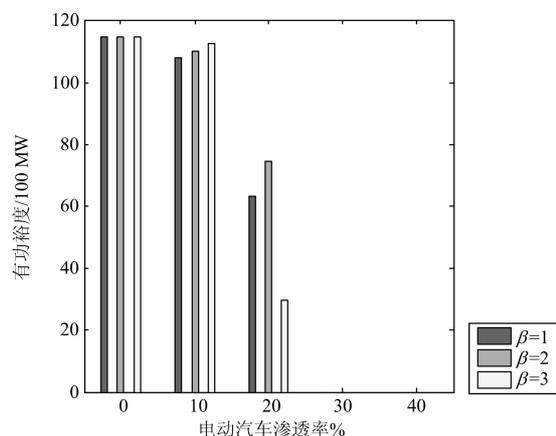
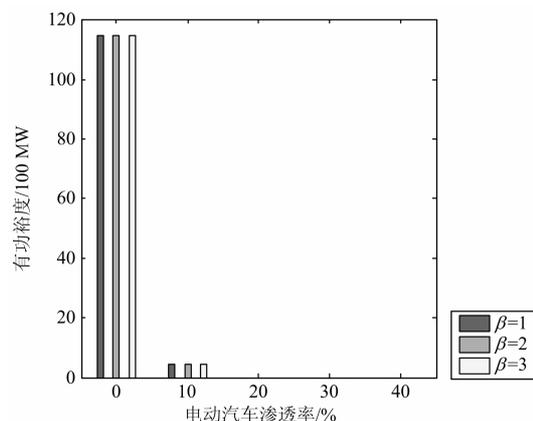


图 8 下垂控制斜率对有功裕度的影响(充电功率 1.9 kW)

Fig. 8 Effect of slope used in droop control to load margin (when charging power is 1.9 kW)

图 9 下垂控制斜率对有功裕度的影响(充电功率 8 kW)
Fig. 9 Effect of slope used in droop control to load margin (when charging power is 8 kW)图 10 下垂控制斜率对有功裕度的影响(充电功率 19.2 kW)
Fig. 10 Effect of slope used in droop control to load margin (when charging power is 19.2 kW)

当接入的电动汽车充电功率为 8 kW 时,与不采用控制时的结果(图 6)相比,下垂控制明显增大了系统负荷裕度,提高了系统静态电压稳定性。且下垂控制的斜率 β 为 2 时的效果相对于斜率为 1 和 3 的要好。以渗透率为 20%时的结果为例, $\beta=2$ 时采用下垂控制后系统的负荷裕度约为不采用控制的 2 倍。

当接入的电动汽车充电功率达到 19.2 kW 时,简单的下垂控制已经不能够有效地提升系统负荷裕度。这是因为此时电网发生电压崩溃的主要原因已经由除电动汽车充电负荷以外的 PQ 负荷变为电动汽车本身,控制策略更加容易发生振荡。

可见,采用下垂控制方式的就地控制,在常规情况下对于系统负荷裕度有较大的提升作用,但当电动汽车充电负荷过高时,简单的下垂控制将失去效果。但由于下垂控制方法简单易行,依然对于电

电动汽车充电控制具有重要的意义。

在系统负荷增长的过程中，下垂控制得到的充电功率控制策略的一个典型结果如图 11。以斜率 $\beta=1$ 时为例，随着系统负荷增长量从 0 上升至 11 010 MW，电动汽车充电控制使得电动汽车的充电速率由额定功率的 120% 逐渐下降至 50%。当系统负荷接近极限值时，相应的电动汽车充电速率下降速度增大。在其他情况下，充电速率的变化也有类似结果。

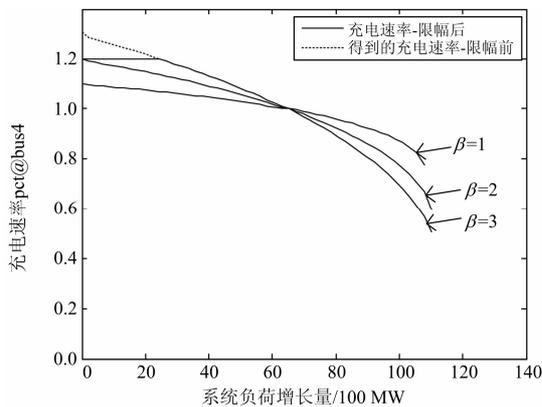


图 11 4 号节点充电速率(额定充电功率 1.9 kW, 渗透率 40%)
Fig. 11 Charging rate of bus 4 (when charging power is 1.9 kW, permeability of electric vehicles is 40%)

4 结论

本文对电动汽车充电设备的就地控制方法，以及采用就地控制对系统静态电压稳定性所产生的影响进行了研究。

首先使用包含电动汽车充电设备的两节点系统进行讨论，研究了三种就地控制方式：灵敏度控制、理想控制和下垂控制。进而通过仿真对三种控制方法的控制效果进行了对比。结果表明，三种方法都能够达到提升系统负荷裕度的目的。但是理想控制和灵敏度控制需要得到系统的详细信息，限制了其在实际电网的应用。而下垂控制如果参数整定得当，能够得到很好的控制效果，适合实际控制使用。

然后使用经过改造的 39 节点系统进行下垂控制的研究，在各种不同渗透率和不同充电速率情况下，分析了下垂控制对系统电压稳定性的影响，并给出了系统负荷增长的过程中下垂控制得到的充电功率控制策略的典型曲线。结果表明，在一般情况下采用下垂控制能够有效提高系统负荷裕度。在参数整定合适时，采用下垂控制后系统的负荷裕度可达到不采用控制时的 2 倍。下垂控制是一种有效的电动汽车充电设备就地控制方法。

与此同时，仿真结果也表明了，针对不同的充

电速度和电动汽车渗透率，最优的下垂控制斜率并不一致。下垂控制方法需要针对电网的每个节点分别进行整定才能达到理想的控制效果。如何得到各电动汽车充电负荷的最优控制参数，将是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.
- [2] 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, 32(4): 1-10.
- [3] 薛松, 袁越, 傅质馨, 等. 考虑电动汽车入网技术的电力系统机组组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 86-92.
- [4] 郑颖, 孙近文, 张冲, 等. 考虑电动汽车接入的配电系统静态电压稳定裕度研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 20-26.
- [5] STAATS P T, GRADY W M, ARAPOSTATHIS A, et al. A statistical analysis of the effect of electric vehicle battery charging on distribution system harmonic voltages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2): 640-646.
- [6] 杜学龙, 刘志珍, 王建, 等. 电动汽车充电站谐波抑制方法的对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 139-149.

- 2012, 40(19): 139-149.
- [7] SORTOMME E, NEGASH A I, VENKATA S S, et al. Multistate voltage dependent load model of a charging electric vehicle[C] // Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2012 IEEE, 2012.
- [8] JIMENEZ A, GARCIA N. Power flow modeling and analysis of voltage source converter-based plug-in electric vehicles[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, 2011.
- [9] MAKASA K J, VENAYAGAMOORTHY G K. Estimation of voltage stability index in a power system with plug-in electric vehicles[C] // Bulk Power System Dynamics and Control (iREP) - VIII (iREP), 2010 iREP Symposium, 2010.
- [10] SHAHNIA F, GHOSH A, LEDWICH G, et al. Voltage unbalance sensitivity analysis of plug-in electric vehicles in distribution networks[C] // Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian, 2011.
- [11] MITSUKURI Y, HARA R, KITA H, et al. Validation of voltage regulation method in distribution system utilizing electric vehicles[C] // Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on, 2012.
- [12] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Efficient utilization of renewable energy sources by gridable vehicles in cyber-physical energy systems[J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(3): 285-294.
-
- 收稿日期: 2014-09-29; 修回日期: 2015-01-21
- 作者简介:
- 肖勇(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电动汽车运营管理关键技术, 电能计量新技术; E-mail: hnuyongwang@126.com
- 张明晔(1984-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力系统无功电压控制, 静态电压稳定分析; E-mail: zhangmy@mail.tsinghua.edu.cn
- 张永旺(1984-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与控制, 电能计量新技术。E-mail: gddkyzyw@126.com
- (编辑 姜新丽)