

# 计及电动汽车充放电负荷的分布式电压稳定监控方法

王旭冉<sup>1</sup>, 郭庆来<sup>1</sup>, 孙宏斌<sup>1</sup>, 葛怀畅<sup>1</sup>, 辛蜀骏<sup>1</sup>, 张永旺<sup>2</sup>, 赵伟<sup>2</sup>

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

**摘要:** 提出了一种计及电动汽车充放电负荷的分布式电压稳定监视和控制方法。在监视方面, 利用带可变遗忘因子的递推最小二乘方法对时变戴维南等效电路参数进行辨识, 更加准确地对本地电压稳定裕度进行评估。在控制方面, 建立优化控制模型, 在考虑电动汽车充放电约束的条件下, 优先减载电动汽车充放电负荷, 求解最大的电动汽车充放电负荷减载量。在发挥电动汽车负荷可充可放特性的基础上, 减少传统负荷的减载量, 减小控制代价, 提高减载的可行性。利用 IEEE39 节点系统的算例验证了所提出的分布式电压稳定监视方法的准确性和计及电动汽车充放电负荷的电压控制方案的可行性。

**关键词:** PMU; 电压稳定; 分布式; 电动汽车负荷; 电力系统

## Distributed voltage stability assessment and control considering electric vehicle charging and discharging load

WANG Xuran<sup>1</sup>, GUO Qinglai<sup>1</sup>, SUN Hongbin<sup>1</sup>, GE Huaichang<sup>1</sup>, XIN Shujun<sup>1</sup>, ZHANG Yongwang<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510800, China)

**Abstract:** This paper presents a method of distributed voltage stability monitoring and control considering electric vehicle charging and discharging the load. In terms of monitoring, variable forgetting factor recursive least squares method is used for time-varying Thevenin equivalent circuit parameters' identification, more accurate local voltage stability margin is evaluated. In terms of control, the optimal control model is established, the constraint of charge-discharge electric vehicle is considered, the load is shed prior, the largest amount of charge and discharge shed load is calculated, in this way, based on the charge and discharge characteristics, the amount of conventional reduction load can be reduced, the reduction control costs can be decreased and the control of load shedding can be more feasible. IEEE39 node system is used to show the accuracy of the proposed distributed voltage stability monitoring method and the feasibility of the proposed voltage stability control scheme considering charging and discharging electric vehicle load.

This work is supported by Guangdong High-tech R & D Program (No. 2012AA050211), The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51025725), National Natural Science Foundation of China (No. 51321005), and Tsinghua University Initiative Scientific Research Program.

**Key words:** PMU; voltage stability; distributed; electric vehicle load; power system

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0043-07

## 0 引言

随着电网规模的不断扩大, 远距离大容量超高

压输电的不断发展及系统负荷的持续增长, 现代电力系统经常运行在稳定极限附近。近些年来, 在全球一些大电网中时有发生由于电压稳定问题而造成的系统瓦解的事故, 造成巨大的经济损失和安全问题, 电压稳定问题越来越受到全球学者的重视<sup>[1-3]</sup>。

在智能电网迅速发展, 智能元器件不断增多的大背景下, 分布自治成为电力系统中新兴且重要的

基金项目: 广东 863(2012AA050211); 国家杰出青年科学基金(51025725); 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

研究方向。基于 PMU 的分布式电压稳定监控方法是从上个世纪 90 年代起兴起的一种不依赖于网络模型且在本地分布自治的电压稳定性监视与控制方法。此类方法的主要思路是根据不同时刻的 PMU 实时量测量,在负荷母线处对电网进行戴维南等值,建立两节点模型,计算出相关的电压稳定性指标,继而分布式地进行电压稳定控制决策<sup>[4-18]</sup>。

在分布式电压稳定控制方面,主要是采用切负荷减载的方式对电压稳定进行控制和恢复<sup>[9,16-18]</sup>。未来电动汽车大规模接入电网将会给电网带来一系列新的控制思路<sup>[19-21]</sup>,其中一个重要的方向是电动汽车充放电负荷较为灵活,可充可放,具有较好的可控性和恢复性,紧急情况下,在对传统负荷进行减载控制前,优先对电动汽车充放电负荷进行控制是一种更廉价且更易行的方式。在满足电动汽车充放电负荷需求的前提下对其进行优先于传统负荷的控制,减少传统负荷的减载量,从而减少或避免工业和居民负荷的真正损失,提高减载控制的可行性。

本文提出了计及电动汽车充放电负荷的分布式电压稳定监控方法。在监视方面,利用可变遗忘因子递推最小二乘方法对时变的戴维南等值模型进行辨识,提高电压稳定裕度评估的准确性;在控制方面,建立优化控制模型,在考虑电动汽车充放电约束的条件下,优先减载电动汽车充放电负荷,求解最大的电动汽车充放电负荷减载量,在发挥电动汽车充放电负荷可充可放特性的基础上,减少传统负荷的减载量,减小控制代价,提高减载的可行性。

## 1 计及电动汽车充电负荷的分布式电压稳定监控模型

图 1 为计及电动汽车充电负荷的分布式电压稳定监控模型。其中,  $P_{lc} + jQ_{lc}$  为传统负荷,  $P_{le} + jQ_{le}$  为一个大型电动汽车充换电站,  $U_L \angle \mu$  和  $I_L \angle \gamma$  是该负荷节点的电压和总电流,可以由 PMU 直接量测得到,  $E_{eq} \angle \alpha$  和  $Z_{eq} \angle \beta$  是戴维南等值模型的内电势和内阻抗,是待估计参数。

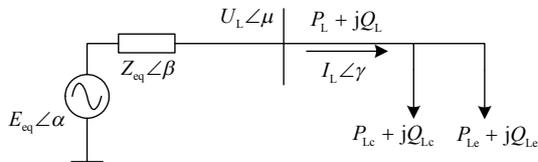


图 1 计及电动汽车充电负荷的分布式电压稳定监控模型  
Fig. 1 Model of distributed voltage stability assessment and control considering electric vehicle charging load

考虑负荷增长模式为恒功率因数增长,当等值内阻抗幅值等于负荷阻抗幅值时刻,即  $Z_{eq} = |U_L \angle \mu / I_L \angle \gamma|$ , 达到极限传输负荷  $P_{Lcrit}$ :

$$P_{Lcrit} = \frac{E_{eq}^2 \cos(\phi - \alpha)}{Z_{eq} 2[1 + \cos(\beta - \phi - 2\alpha)]} \quad (1)$$

其中,  $\phi = \mu - \gamma$ 。

负荷裕度值  $P_{margin}$  为

$$P_{margin} = P_{Lcrit} - P_0 \quad (2)$$

其中,  $P_0$  为当前负荷量。

若负荷裕度控制阈值为  $P_{th}$ , 当  $P_{margin} < P_{th}$  时, 则控制量  $\Delta P = P_{th} - P_{margin}$ 。

## 2 分布式电压稳定评估算法

### 2.1 戴维南等值模型的辨识

利用多组 PMU 量测的  $U_L \angle \mu$  和  $I_L \angle \gamma$  对于戴维南等值模型参数  $E_{eq} \angle \alpha$  和  $Z_{eq} \angle \beta$  进行辨识。

根据基本电路理论,  $t$  时刻可得关系式(3)。

$$\dot{E}_{eq} = \dot{U}_L + Z_{eq} \dot{I}_L \quad (3)$$

写成直角坐标形式如式(4)。

$$\begin{cases} E_{eqR} - U_{LR}^t - R_{eq} I_{LR}^t + X_{eq} I_{LI}^t = 0 \\ E_{eqI} - U_{LI}^t - R_{eq} I_{LI}^t - X_{eq} I_{LR}^t = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中: 下标 R、I 分别表示复数的实部、虚部; 上标  $t$  表示第  $t$  组量测对应的物理量。

由式(4)可以看出, 对于  $m$  组量测, 共有  $2m$  个方程, 4 个未知数, 因此至少需要 2 组量测便估计出  $\dot{E}_{eq}$ 、 $Z_{eq}$  的值。学者大多采用此模型进行戴维南等值模型参数的估计。

### 2.2 可变遗忘因子递推最小二乘估计方法(VFFRLS)

传统的最小二乘方法求取戴维南模型参数存在高阶矩阵求逆、不利于在线快速计算的弊端, 同时存在参数漂移的问题<sup>[5]</sup>。一些学者提出的带固定遗忘因子的递推最小二乘方法可以对戴维南等值模型进行参数估计<sup>[6]</sup>, 但由于受系统运行方式、负荷变动以及故障扰动等因素的影响, 戴维南等值模型的参数具有时变的特点, 带固定遗忘因子的递推最小二乘方法不能有效地根据模型变化调整对于戴维南等值参数进行估计, 并且抗量测误差干扰性能不够强。本文采用带可变遗忘因子的递推最小二乘估计方法对于时变的戴维南等值模型参数进行辨识。

将式(4)写成矩阵形式, 得式(5)。

$$y_t = h_t^T X \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{y}_t = \begin{bmatrix} U_{LR}^t \\ U_{LI}^t \end{bmatrix}; \mathbf{h}_t^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{LR}^t & I_{LI}^t \\ 0 & 1 & -I_{LI}^t & -I_{LR}^t \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} E_{\text{eqR}} \\ E_{\text{eqI}} \\ R_{\text{eq}} \\ X_{\text{eq}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

联合多组电压和电流的 PMU 量测数据, 利用最小二乘方法进行模型参数辨识, 得到:

$$\mathbf{Y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{X} + \mathbf{e}_t \quad (7)$$

其中,

$$\mathbf{Y}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_t \end{bmatrix}, \mathbf{H}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^T \\ \mathbf{h}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{h}_t^T \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} E_{\text{eqR}} \\ E_{\text{eqI}} \\ R_{\text{eq}} \\ X_{\text{eq}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

假设误差函数为

$$\mathbf{J}_t = \sum_{i=1}^t \lambda_t^{t-i} \mathbf{e}^T(i) \mathbf{e}(i) = \mathbf{e}_t^T \mathbf{e}_t, 0 < \lambda < 1 \quad (9)$$

因此, 加权残差矢量为式(10)。

$$\mathbf{e}_t = [\sqrt{\lambda_t^{t-1}} \mathbf{e}(1) \quad \sqrt{\lambda_t^{t-2}} \mathbf{e}(2) \quad \dots \quad \mathbf{e}(t)]^T \quad (10)$$

继而,

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{t+1} &= \sum_{i=1}^{t+1} \lambda_{t+1}^{t+1-i} \mathbf{e}^T(i) \mathbf{e}(i) = \\ &\lambda_{t+1} \sum_{i=1}^t \lambda_{t+1}^{t-i} \mathbf{e}^T(i) \mathbf{e}(i) + \mathbf{e}^T(t+1) \mathbf{e}(t+1) = \\ &\begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_{t+1}} \mathbf{e}_t \\ \mathbf{e}(t+1) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_{t+1}} \mathbf{e}_t \\ \mathbf{e}(t+1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

其中:

$$\sqrt{\lambda_{t+1}} \mathbf{e}_t = \sqrt{\lambda_{t+1}} \mathbf{Y}_t - \sqrt{\lambda_{t+1}} \mathbf{H}_t \mathbf{X} \quad (12)$$

$$\mathbf{e}(t+1) = \mathbf{y}_{t+1} - \mathbf{h}_{t+1}^T \mathbf{X} \quad (13)$$

对式(11)做如下求导:

$$\frac{\partial \mathbf{J}_{t+1}}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_{t+1}} = 0 \quad (14)$$

则最小二乘解为

$$\mathbf{X}_{t+1} = \left[ \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_{t+1}} \mathbf{H}_t \\ \mathbf{h}_{t+1} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_{t+1}} \mathbf{H}_t \\ \mathbf{h}_{t+1} \end{bmatrix} \right]^{-1} \left[ \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_{t+1}} \mathbf{H}_t \\ \mathbf{h}_{t+1} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_{t+1}} \mathbf{Y}_t \\ \mathbf{y}_{t+1} \end{bmatrix} \right] \quad (15)$$

经过一系列推导, 得到带遗忘因子的最小二乘算法如下。

$$\mathbf{G}_{t+1} = \mathbf{P}_{t+1} \mathbf{h}_{t+1} = \frac{\mathbf{P}_t \mathbf{h}_{t+1}}{\lambda_{t+1} \mathbf{I} + \mathbf{h}_{t+1}^T \mathbf{P}_t \mathbf{h}_{t+1}} \quad (16)$$

$$\mathbf{X}_{t+1} = \mathbf{X}_t + \mathbf{G}_{t+1} (\mathbf{y}_{t+1} - \mathbf{h}_{t+1}^T \mathbf{X}_t) \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{t+1} = \frac{\mathbf{I} - \mathbf{G}_{t+1} \mathbf{h}_{t+1}^T}{\lambda_{t+1}} \mathbf{P}_t \quad (18)$$

其中:  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\lambda_{t+1}$  是遗忘因子;  $\lambda_{t+1}$  可以根据系统的变化而调整新数据的权重, 这样表现出更好的跟踪效果;  $\mathbf{X}_1$  和  $\mathbf{P}_1$  为给定初值。

根据文献[22]的研究以及这个问题中的实际情况, 遗忘因子  $\lambda_{t+1}$  可以如下变化。

$$\mathbf{X}_\Delta = \mathbf{y}_{t+1} - \mathbf{h}_{t+1}^T \mathbf{X}_t = \begin{bmatrix} \Delta U_{LR} \\ \Delta U_{LI} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\lambda_{t+1} = \lambda_{\min} + (1 - \lambda_{\min}) \cdot 2^{-\rho(\Delta U_{LR} + \Delta U_{LI})^2} \quad (20)$$

其中:  $\rho$  是一个敏感系数, 控制着  $\lambda_{t+1}$  趋近于 1 的速率;  $\mathbf{X}_\Delta$  表示的是系统的变化情况。

### 2.2.1 可变遗忘因子的引入原理

当系统发生较大的扰动, 比如系统运行方式的变化、负荷变化和故障等时候,  $\mathbf{X}_\Delta$  的值也较大, 根据式(19)、式(20),  $\lambda_{t+1}$  趋近于  $\lambda_{\min}$ 。根据式(10), 当前时刻新数据的权重就会加大, 则算法就可以利用较少的数据快速地跟踪上系统的变化。

同理, 当系统变化较小的时候,  $\mathbf{X}_\Delta$  的值接近于零, 根据式(19)、式(20),  $\lambda_{t+1}$  趋近于  $\lambda_{\max}$ 。根据式(10), 则算法退化成普通的递推最小二乘算法, 从而可以更好地平复系统的量测误差。

### 2.2.2 可变遗忘因子递推最小二乘初值的选取

作为一种递推方法, 其对于初值的要求并不苛刻, 可以选择平启动

$$\mathbf{P}_1 = \frac{1}{a} \mathbf{I} \quad (21)$$

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} \delta \\ \delta \\ \delta \\ \delta \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中:  $\mathbf{I}$  为四行的单位矩阵;  $a > 0$ ;  $\delta$  趋近于 0。

随着数据的增多, 递推算法会逐渐得到准确的估计值。为了加快得到准确估计值的速度, 本文初值选取原则为先取一批观测量, 用最小二乘求得初值为

$$\mathbf{P}_1 = [\mathbf{H}^T \mathbf{H}]^{-1} \quad (23)$$

$$\mathbf{X}_1 = [\mathbf{H}^T \mathbf{H}]^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Y} \quad (24)$$

## 3 分布式电压稳定减载控制决策

利用可变遗忘因子递推最小二乘准确辨识戴维南等值模型参数, 继而得到准确的负荷裕度结果。

当负荷裕度结果  $P_{\text{margin}}$  低于控制门限值  $P_{\text{th}}$  后, 启动减载控制。在满足电动汽车充放电负荷充电要

求的前提下, 优先减载电动汽车负荷, 当电动汽车负荷减载量不足时, 再减载传统负荷。

按照电动汽车充电规律假设减载后充换电站的电动汽车的充电功率为  $P_{ch}$ , 减载后  $T_r$  小时重新开始充电, 充电功率以  $K$  的速度回升到正常充电功率  $P_{e0}$ 。

假设减载时刻  $T=0$ , 此时电动汽车电量为  $B_0$ , 电动汽车要求在  $T_m$  时刻之前完成充电过程, 充电完成时总电量为  $B_m$ 。建立优化控制模型如下, 得到最大的电动汽车充电负荷减载量。

$$\min \{-(P_{e0} - P_{ch})\} \quad (25)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_{e0} - P_{ch} \leq \Delta P$$

$$B_0 + \int_0^{T_r} P_{ch} dt + \int_{T_r}^{T_s} P_e(t) dt + \int_{T_s}^{T_m} P_{e0} dt \geq B_m \quad (26)$$

$$\int_0^{T_r} (0 - P_{ch}) dt + \int_{T_r}^{(0-P_{ch})/K+T_r} (0 - P_e(t)) dt \leq B_0$$

$$P_{emin} \leq P_{ch} \leq P_{emax}$$

目标函数为最大的电动汽车充电负荷减载量, 控制变量为减载后电动汽车充电功率  $P_{ch}$ , 其值为负时表示电动汽车负荷放电。

4 个约束条件分别为电动汽车减载量约束、电动汽车充电完成时间约束、电动汽车最大放电电量约束以及电动汽车减载后充电功率约束。 $P_e(t) = K(t - T_r) + P_{ch}$  为充电功率回升过程中的充电功率值,  $T_s = (P_{e0} - P_{ch}) / K + T_r$  为充电功率回升到  $P_{e0}$  的时刻。

控制过程中充换电站的电动汽车充电功率变化曲线如图 2 所示。

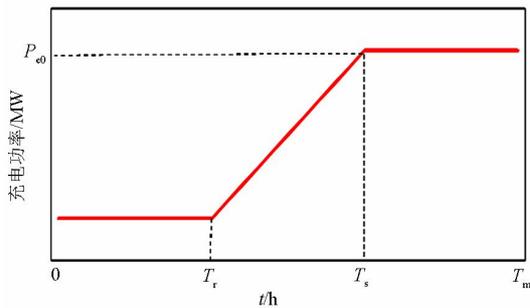


图 2 充换电站的充电功率曲线示意图

Fig. 2 Charging power in the electric vehicle charging station

#### 4 算例分析

本文利用图 3 所示的 IEEE-39 节点系统验证方法的可行性。选取图 3 中圈内的节点 18 为监视节点, 该节点基态总负荷功率为 158 MW, 其中传统负荷 148 MW, 电动汽车充电负荷 10 MW, 系统仿真时监视节点处负荷保持恒功率因数增长。根据多次仿

真结果, 确定本文实际算例中取  $\lambda_{min} = 0.9$ ,  $\rho = 5000$ 。

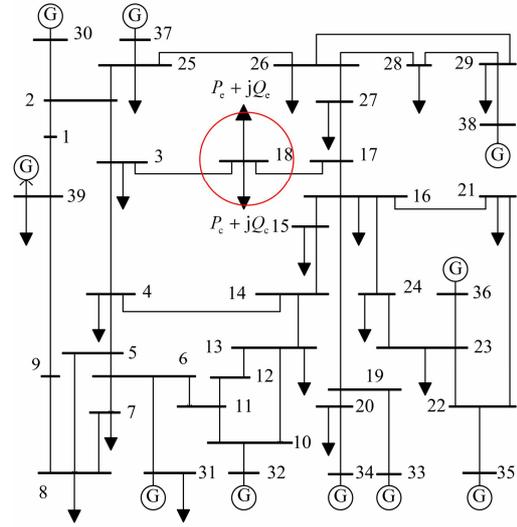


图 3 IEEE39 测试系统图

Fig. 3 IEEE39 test system

#### 4.1 可变遗忘因子辨识结果

系统中所有负荷按基态同比例增长, 以节点 18 为监视节点的戴维南等值模型参数是时变的。量测数据加入了均方差为 0.33 的误差, 以模拟 PMU 实测数据。

图 4 为利用带可变遗忘因子的递推最小二乘与传统递推最小二乘求解的负荷裕度误差率的对比, 实线为利用了带可变遗忘因子的递推最小二乘的结果曲线, 虚线为传统递推最小二乘求解的结果曲线。对比可知, 相比较传统的递推最小二乘, 利用可变遗忘因子递推最小二乘辨识的等值模型计算出的负荷裕度结果误差值较小, 结果较准确。

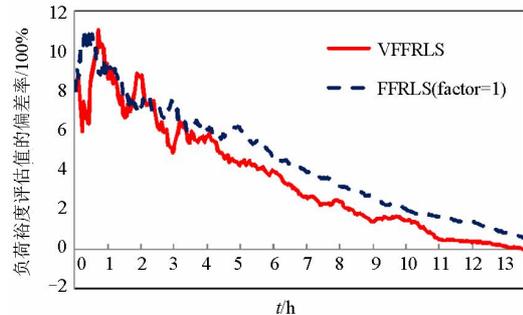


图 4 可变遗忘因子递推最小二乘辨识结果

Fig. 4 Result of VFFRLS

#### 4.2 分布式电压稳定切负荷结果

当节点 18 的负荷裕度结果  $P_{margin}$  为 7.76 MW 时, 低于门槛值  $P_{th}$  19.56 MW, 需切负荷 12.8 MW。

假设  $B_0$  为 11 MWh,  $B_m$  为 30 MWh, 充电功率  $P_{e0}$  为 10 MW, 恢复时间段充电功率的增长速度  $K$  为 8 MW/h,  $T_r=1$  h。

算例 1:  $T_m=3$  h。

根据控制优化模型求解的结果为  $P_{ch}=2.51$  MW, 即表示电动汽车充电功率从 10 MW 降低到 2.51 MW。电动汽车充电功率曲线见图 5, 在  $T=1.94$  h 时充电功率恢复到 10 MW,  $T=3$  h 时电量充满, 满足充电要求。

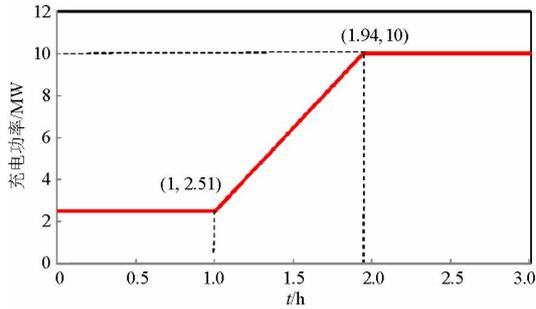


图 5 算例 1 的电动汽车换电站的充电功率曲线图  
Fig. 5 Charging power in the electric vehicle charging station of case 1

由表 1 可知, 节点 18 需要总减载量为 12.8 MW, 其中电动汽车负荷减载 7.49 MW, 而传统负荷只需减载 5.31 MW。减载控制后, 节点 18 的裕度值恢复到预期值(即裕度控制门槛值)19.56 MW。

表 1 算例 1 的减载结果值

Table 1 Load shedding results of case 1

				MW
减载前裕度值	裕度控制门槛值	总减载量		减载后裕度值
7.76	19.56	12.8		19.56
		电动汽车负荷减载量	传统负荷减载量	
		7.49	5.31	

算例 2:  $T_m=6$  h。

根据控制优化模型求解的结果为  $P_{ch}=-2.8$  MW, 即表示电动汽车充电功率从 10 MW 降低到 -2.8 MW, 即放电 2.8 MW。电动汽车充电功率曲线见图 6, 在  $T=2.6$  h 时充电功率恢复到 10 MW,  $T=4.2$  h 时电量充满, 满足充电要求。

由表 2 可知, 节点 18 需要总减载量为 12.8 MW, 减载量全部由电动汽车负荷承担, 没有减载传统负荷。减载控制后, 节点 18 的裕度值恢复到预期值(即裕度控制门槛值)19.56 MW。

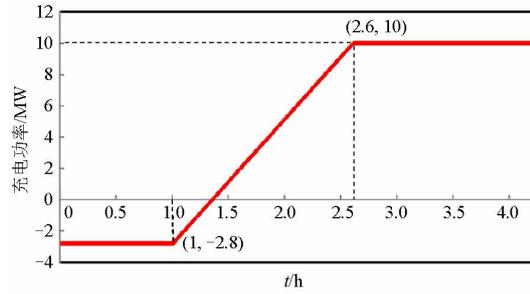


图 6 算例 2 的电动汽车换电站的充电功率曲线图  
Fig. 6 Charging power in the electric vehicle charging station of case 2

表 2 算例 2 的减载结果值

Table 2 Load shedding results of case 2

				MW
减载前裕度值	裕度控制门槛值	总减载量		减载后裕度值
7.76	19.56	12.8		19.56
		电动汽车负荷减载量	传统负荷减载量	
		12.8	0	

## 5 结论

本文提出了一种计及电动汽车充放电负荷的分布式电压稳定监控方法。

在监视方面, 利用带可变遗忘因子的递推最小二乘方法对于时变戴维南等值电路参数进行辨识, 更加准确地对本地电压稳定裕度进行评估; 在控制方面, 建立优化控制模型, 在考虑电动汽车充放电约束的条件下, 优先减载电动汽车充放电负荷, 求解最大的电动汽车充放电负荷减载量, 在发挥电动汽车负荷可充可放特性的基础上, 减少对于传统负荷的减载量, 减小控制代价, 提高减载的可行性。

IEEE39 节点系统算例验证了电压稳定监视结果的准确性和计及电动汽车充放电负荷的控制方案的可行性。

电动汽车负荷放电所需代价的补偿机制和可行性是后续需要进行更深一步的研究的内容。目前本文提出的控制方案具有如下两种可能的较好应用前景: 一, 只对电动汽车负荷的充电功率进行控制, 不让电动汽车负荷放电, 算例也验证了此种模式也能达到较好的控制效果; 二, 换电站的电池统一充电, 可提供的充放电功率较大, 且放电存在可行性, 基于换电站进行本文提出的控制模式具有更好的应用前景。

## 参考文献

- [1] RODRIGUES A B, PRADA R B, DA GUIA DA SILVA M. Voltage stability probabilistic assessment in composite systems: modeling unsolvability and controllability loss[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1575-1588.
- [2] 陈文广, 刘明波. 结合详细和准稳态模型的长期电压稳定全过程混合动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 242-251.  
CHEN Wenguang, LIU Mingbo. Full-process hybrid dynamic simulation of long-term voltage stability by combination of detailed and quasi steady-state model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 242-251.
- [3] 马兆兴, 万秋兰, 李洪美. 考虑极限诱导分岔的电压稳定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 24-29.  
MAO Zhaoxing, WAN Qiulan, LI Hongmei. Research on voltage analysis of limit induced bifurcation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 24-29.
- [4] CHEBBO A M, IRVING M R, STERLING M J H. Voltage collapse proximity indicator: behaviour and implications[C] // Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, 1992, 139(3): 241-252.
- [5] VU K, BEGOVIC M M, NOVOSEL D. Use of local measurements to estimate voltage-stability margin[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1029-1035.
- [6] MILOSEVIC B, BEGOVIC M. Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 121-127.
- [7] SMON I, VERBIC G, GUBINA F. Local voltage-stability index using Tellegen's Theorem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1267-1275.
- [8] CORSI S, TARANTO G N. A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1271-1279.
- [9] TSAI S S, WONG K H. Adaptive undervoltage load shedding relay design using Thevenin equivalent estimation[C] // Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008: 1-8.
- [10] 汤涌, 孙华东, 易俊, 等. 基于全微分的戴维南等值参数跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 48-53.  
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. Tracing algorithm for Thevenin equivalent parameters based on complete differential equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 48-53.
- [11] 廖国栋, 王晓茹. 利用局部区域量测的电压稳定在线监测[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 56-62.  
LIAO Guodong, WANG Xiaoru. On-line voltage monitoring applying local area measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 56-62.
- [12] 刘道伟, 谢小荣, 穆钢. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 16-20.  
LIU Daowei, XIE Xiaorong, MU Gang. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 16-20.
- [13] 刘明松, 张伯明, 姚良忠, 等. 基于 PMU 和改进戴维南等值模型的电压稳定在线监视[J]. 电力系统及其自动化, 2009, 33(10): 6-10.  
LIU Mingsong, ZHANG Boming, YAO Liangzhong, et al. On-line voltage stability monitoring based on PMU and improved Thevenin equivalent model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 6-10.
- [14] 王漪, 柳焯. 基于戴维南等值的系统参数跟踪估计[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 28-30.  
WANG Yi, LIU Zhuo. Tracing and estimation of system parameter using Thevenin's equivalent[J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 28-30.
- [15] 李连伟, 吴政球, 钟浩. 基于节点戴维南等值的静态电压稳定裕度快速求解[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 79-83.  
LI Lianwei, WU Zhengqiu, ZHONG Hao. Fast estimation method for steady-state voltage stability margin based on node Thevenin equivalent[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 79-83.
- [16] 周念成, 廖彦洁, 颜伟, 等. 基于相量测量的电压稳定裕度计算及减载方案[J]. 中国电力, 2012, 45(5): 6-10.  
ZHOU Niancheng, LIAO Yanjie, YAN Wei, et al. Voltage stability margin computation and under-voltage load shedding scheme based on phasor measurement[J].

- Electric Power, 2012, 45(5): 6-10.
- [17] 余文杰, 方勇杰. 一种基于 SMARTDevice 的低压切负荷算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 57-60.  
YU Wenjie, FANG Yongjie. An undervoltage load shedding method based on SMART devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(21): 57-60.
- [18] 傅旭, 王锡凡, 一种新的节点静态电压稳定指标及切负荷算法[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 8-12.  
FU Xu, WANG Xifan. A new index of nodal static voltage stability and local shedding method[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 8-12.
- [19] 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.  
MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [20] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 大规模电动汽车充放电优化控制及容量效益分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 19-26.  
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging and discharging of large scale plugin electric vehicles with cost and capacity benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 19-26.
- [21] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.  
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [22] PARK D J. Fast tracking RLS algorithm using novel variable forgetting factor with unity zone[J]. Electronics Letters, 1991, 27(23): 2150-2151.
- 
- 收稿日期: 2014-11-24; 修回日期: 2015-06-18
- 作者简介:
- 王旭冉(1985-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统电压稳定与无功电压优化控制; E-mail: wxr08@mails.tsinghua.edu.cn
- 郭庆来(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为调度自动化和无功电压优化控制;
- 孙宏斌(1969-), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 教育部长江学者, 特聘教授, 主要研究方向为电网调度自动化和控制。
- (编辑 葛艳娜)