

## 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析

王旭强<sup>1,2</sup>, 刘广一<sup>1</sup>, 曾沅<sup>2</sup>, 杨占勇<sup>1</sup>, 范士雄<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津 300072)

**摘要:** 分布式电源的接入对配电网的运行状况会有很大的影响, 尤其是配电网的电压分布以及网络损耗方面。首先给出了分布式电源和负荷的详细模型, 通过准确建模真实模拟电网潮流变化情况。然后引入一种基于规则的电压无功控制方法, 以加入分布式电源和具体负荷的 IEEE13 节点典型馈线系统作为仿真算例, 通过电压变化曲线和系统消耗功率等指标验证该算法在分布式电源接入情况下的有效性, 并分析接入分布式电源的配电网的电压无功连续控制效果。

**关键词:** 智能配电网; 分布式电源 (DG); 电压无功控制; 风力发电; 太阳能发电

### Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation

WANG Xu-qiang<sup>1,2</sup>, LIU Guang-yi<sup>1</sup>, ZENG Yuan<sup>2</sup>, YANG Zhan-yong<sup>1</sup>, FAN Shi-xiong<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Distributed Generation (DG) has a significant effect on the operation condition of the distribution network, especially on the voltage profile of distribution network and total power losses. This paper describes a detailed model designed for DGs and loads to reflect the exact condition of the power flow. Then a Volt/Var Control method based on rules is introduced. Next the IEEE 13 node feeder with DG and detailed load model is selected as the simulation example. Finally this method is applied to prove the validity of this method by the indicators such as voltage profile and total power losses, and to analyze the continuous effects of Volt/Var control of distribution network with DG.

This work is supported by Science and Technology Research Foundation of SGCC (No. DZB17201200260).

**Key words:** smart distribution network; distributed generation (DG); Volt/Var control; wind power generation; photovoltaic (PV) generation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0047-07

## 0 引言

当前, 分布式发电技术发展迅速。分布式电源与电网结合, 有利于节省投资、降低能耗、提高系统可靠性和灵活性<sup>[1]</sup>。分布式电源接入的配电网由原来的单电源、辐射型结构变成多电源的复杂网络, 馈线上的电压分布情况会随之发生变化。同时考虑分布式电源供电的随机性和间歇性, 配电网的电压无功控制将会受到很大的影响。

很多学者对于分布式电源接入电网问题进行了研究<sup>[2-18]</sup>, 其中文献[2-13]主要关注分布式电源并入配电网后的电压无功控制效果。文献[4]利用灵敏度分析方法分析了分布式电源的出力、接入位置对系

统电压的影响, 但是文中没有对用到的分布式电源进行建模, 也没有考虑分布式电源出力受地区气候影响的因素。文献[11]研究了不同类型的 DGs 在接入位置、接入容量发生变化时对系统电压及网络损耗影响的变化规律, 文中只是依据分布式电源的有功和无功出力特性对分布式电源进行分类建模, 并没有针对具体的分布式电源进行建模, 相应的研究结果准确性不高。文献[13]通过分析太阳能光伏发电和风力发电的模糊特性, 提出建立梯形模糊数表示分布式电源出力的地区电网无功电压优化模型, 文中对分布式电源出力和影响因素之间的关系进行了近似处理, 得到的分布式电源出力模型准确性有所欠缺。因此, 在研究分布式电源接入下的电压无功控制效果时, 需要对不同的分布式电源, 例如风力发电机, 光伏发电装置等分别建模, 便于得到更

基金项目: 国家电网公司科技项目 (DZB17201200260)

加准确的分析结果。

此外,分布式电源接入后的电压无功控制效果还要受到负荷模型的影响。目前,配电系统的负荷一般采用恒阻抗负荷,恒电流负荷和恒功率负荷的组合形式来表示。各类负荷所占的比例是固定的。为了动态模拟负荷变化,文献[15]尝试通过计划表来更新三类负荷的幅值和比例系数,但是更新频率为1h。综上所述,配电系统的负荷建模还有待进一步研究和完善。

综上所述,先前的研究大多没有对负荷的时变性和分布式电源出力的波动性进行综合考虑,还有一些研究只是基于某一时间断面,不能很好地反应分布式电源出力的间歇性。基于这一现状,本文将这两个因素综合考虑,研究了不同类型的分布式电源接入时连续时间内配电网电压无功控制效果。文章首先介绍了两种常见的分布式电源的数学模型,然后给出了负荷的建模方法,接下来提出本文研究使用的电压无功控制算法,并对仿真使用的负荷模型进行简要说明,最后通过对加入分布式电源的IEEE13节点典型馈线系统仿真结果分析,证实该电压无功控制算法在含分布式电源的配电网中应用的有效性,并分析具体的控制效果。

## 1 分布式电源数学模型

### 1.1 太阳能发电装置数学模型

典型的太阳能发电装置一般是通过单相逆变器接入配电网。太阳能发电单元输出的直流功率可以使用下面的数学表达式进行计算<sup>[6]</sup>

$$P_{DC} = P_{STC} \cdot \frac{G_A}{G_{STC}} \cdot [1 + (T_C - T_{STC})C_T] \quad (1)$$

$$T_C = T_a + G_A \frac{(NOCT - 20^\circ C)}{800 W/m^2} \quad (2)$$

式中:  $P_{DC}$  为太阳能发电单元输出的直流功率;  $P_{STC}$  为标准测试条件下太阳能发电单元输出的直流功率;  $G_{STC}$  为标准测试条件下太阳光辐射度,  $W/m^2$ ;  $G_A$  为实际的太阳光辐射度,  $W/m^2$ ;  $T_C$  为电池板的温度;  $T_{STC}$  为标准测试条件下太阳能电池板的温度,一般取为  $25^\circ$ ;  $G_T$  为制作厂商的功率温度系数(对于单晶硅,  $C_T = -0.00437/K$ );  $NOCT$  为正常运行时电池板温度,一般取为  $20^\circ$ ;  $T_a$  为外界温度。

### 1.2 风力发电装置数学模型

风力发电系统中,风机用来捕获风能。不同风速下,风机捕获的机械功率可表示为<sup>[1]</sup>

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S C_p V^3 \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $S$  为扫掠面积;  $C_p$  代表功率因数;  $V$  为风速,  $W/m^2$ ;  $P_m$  为机械功率。

其中功率因数的值与叶尖速比和桨距角有关。由于实际风机中  $C_p$  资料不能完全准确获得。该文  $C_p$  采用基于制造厂商数据的十次多项式插值方式表达,方程为

$$C_p = \begin{cases} 0 & z \leq V_{cut\_in} \text{ 或者 } z \geq V_{cut\_out} \\ f(z) & \text{其他} \end{cases}$$

$$f(z) = -0.08609z^{10} + 0.078599z^9 + 0.50509z^8 - 0.45466z^7 - 0.94154z^6 + 0.77922z^5 + 0.59082z^4 - 0.23196z^3 - 0.25009z^2 - 0.24282z + 0.37502$$

$$z = (V - 10.5) / 5.9161$$

式中:  $V_{cut\_in}$  代表切入风速;  $V_{cut\_out}$  代表切出风速;  $z$  是风速  $V$  的线性表达式。

## 2 负荷数学模型

负荷的类型对电压无功控制的效果有很大的影响。本文将配电系统负荷分为两类:不带温控回路的恒定负荷和带温控回路的时变负荷。两类负荷的具体建模形式详见2.1节和2.2节。

### 2.1 不带温控回路的恒定负荷

对于不带温控回路的负荷,例如灯、电风扇、电视机和电脑等,在电压给定的情况下,消耗的功率是恒定的。因此,这类负荷消耗的能量是电压和使用时间的函数。供给的电压越低,消耗的能量也就越少。

为了模拟负荷的电压响应,一般使用ZIP模型来模拟负荷的功率变化。ZIP模型的具体数学计算公式如式(4)和式(5)。

$$P_i(V_a) = \begin{bmatrix} \frac{V_a^2}{V_n^2} \cdot S_n \cdot Z_{\%} \cdot Z_{pf} + \\ \frac{V_a}{V_n} \cdot S_n \cdot I_{\%} \cdot I_{pf} + \\ S_n \cdot P_{\%} \cdot P_{pf} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Q_i(V_a) = \begin{bmatrix} \frac{V_a^2}{V_n^2} \cdot S_n \cdot Z_{\%} \cdot \sin(a \cos(Z_{pf})) + \\ \frac{V_a}{V_n} \cdot S_n \cdot I_{\%} \cdot \sin(a \cos(I_{pf})) + \\ S_n \cdot P_{\%} \cdot \sin(a \cos(P_{pf})) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $P_i$  是第  $i$  个负荷消耗的有功功率;  $Q_i$  是第  $i$

个负荷消耗的无功功率;  $V_a$  是实际的线路终端电压;  $V_n$  是额定的线路末端电压;  $S_n$  是额定电压下的额定功率;  $Z_n$  是恒阻抗部分在负荷中占的比例;  $I_n$  是恒电流部分在负荷中占的比例;  $P_n$  是恒功率部分在负荷中占的比例;  $Z_{pf}$  是恒阻抗部分的功率因数;  $I_{pf}$  是恒电流部分的功率因数;  $P_{pf}$  是恒功率部分的功率因数。

从上式可以看出, 降低电压对功率消耗值降低作用因负荷类型而不同, 对恒阻抗负荷效果最明显, 恒电流负荷效果其次, 恒功率负荷效果最差。

## 2.2 带温控回路的时变负荷

对于带温控回路的负荷, 例如 HVAC、电热水器、电冰箱等, 在电压变化的情况下, 输出的功率可能会变化, 但是控制环节会通过调节措施, 保证消耗的能量值满足控制需求。

这类负荷一般使用等效热参数 (ETP) 模型来进行模拟, 具体的模拟方式和数学模型见文献[14]。

## 3 配电网电压无功控制算法

### 3.1 电压无功控制算法原理

在本文中使用的电压无功协调控制算法是一种启发式算法。该算法的原理是通过将配电网负荷侧的运行电压维持在 ANSI 电压标准的较低部分, 从而降低系统消耗的总能量。

### 3.2 电压无功控制算法求解流程

基于电压控制和无功控制之间的耦合关系很弱, 该算法将电压无功控制问题解耦成电压控制子问题和无功控制子问题<sup>[7]</sup>。

#### 3.2.1 电压控制子问题

步骤 1: 从监测的线路末端电压测量值的集合中得到电压最小值  $V_{end}$ 。

步骤 2: 计算变电所的电压  $V_0$  与最小的线路末端电压测量值  $V_{end}$  之间的电压降  $VD$  为

$$VD = V_0 - V_{end} \quad (6)$$

步骤 3: 基于电压降  $VD$  与预先定义的电压降值  $VD^h$  的关系, 确定相应的控制电压带宽  $V_{bw}$ 。控制电压带宽可以被设置为  $V_{bw}^l$ ,  $V_{bw}^h$ 。

$$VD < VD^h, V_{bw} = V_{bw}^l \quad (7)$$

$$VD > VD^h, V_{bw} = V_{bw}^h \quad (8)$$

步骤 4: 比较期望电压  $V_{set}$  和最小的线路末端电压测量值  $V_{end}$ 。

当负荷量较低时, 分接头  $tap$  变化为

$$V_{end} < (V_{set} - V_{bw}^l), tap = tap + 1 \quad (9)$$

$$V_{end} > (V_{set} + V_{bw}^l), tap = tap - 1 \quad (10)$$

当负荷量较高时, 分接头  $tap$  变化为

$$V_{end} < (V_{set} - V_{bw}^h), tap = tap + 1 \quad (11)$$

$$V_{end} > (V_{set} + V_{bw}^h), tap = tap - 1 \quad (12)$$

在稳压器分接头动作前, 会判断该动作是否会导致电压超出允许的范围。一旦出现电压越界情况, 会立即终止分接头的动作。如果电网中含有多个稳压器, 则每个稳压器的分接头会依据相应的线路末端电压值和稳压器所在处的电压进行动作。

#### 3.2.2 无功控制子问题

无功控制的目的是将变电所稳压器所在处的功率因数维持在指定的值以上。

步骤 1: 在电容器进行动作之前, 要对电网中相关的电容器进行排序。排序的规则是容量越大的电容器越早投入, 越晚切除。如果两个电容器的容量相同, 离变电所远的电容器先被投入, 后被切除。

步骤 2: 依据下面的判据, 进行电容器投切操作。

$$Q_{bri} > d^{\max} Q_{ci}, SW_i = CLOSED \quad (13)$$

$$Q_{bri} < d^{\min} Q_{ci}, SW_i = OPEN \quad (14)$$

式中:  $Q_{ci}$  是第  $i$  个电容器的额定容量;  $d^{\max}$  和  $d^{\min}$  是用来防止机械震荡的系数;  $Q_{bri}$  是相应的无功缺额;  $SW_i$  是第  $i$  个电容器的开关状态。

## 4 实例验证

本文使用 GridLAB-D 进行电压无功控制效果的分析。GridLAB-D 是由美国西北太平洋实验室研发的仿真软件, 可以进行连续时间序列的仿真。该软件含有详细的负荷建模, 具体的家用电器均采用时变的 ZIP 模型, 能够准确地模拟负荷的变化情况, 便于分析连续时间内电压无功控制的准确效果<sup>[14]</sup>。

为了实时模拟负荷的变化, 在 IEEE13 节点典型馈线上总共添加了 600 个家庭用户, 每个用户家里配置了灯, 热水器和 HVAC 等家用电器。热水器和 HVAC 单元的实际需求由需求计划表来安排。具体的负荷功率日变化曲线如图 1 所示。

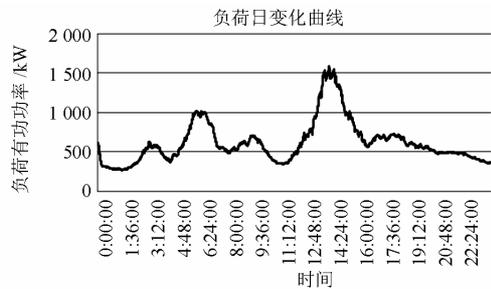


图 1 负荷日变化曲线

Fig. 1 Daily power output of load

本文所有场景的仿真都是在 GridLAB-D 仿真平台完成。仿真步长为 1 s，仿真持续时间为 1 天。

#### 4.1 IEEE13 节点馈线加入太阳能发电装置

为了模拟分布式电源，在每个用户处分别加入太阳能发电装置。单一太阳能发电装置的日输出功率曲线如图 2 所示。

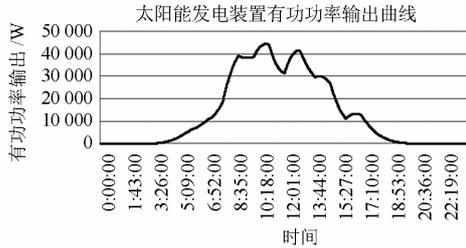


图 2 太阳能发电装置有功功率输出曲线  
Fig. 2 Power output of photovoltaic (PV)

加入太阳能发电装置后，设定负荷侧期望电压为 117 V，允许的电压变化范围是[115 V，119 V]。具体仿真结果的展示与分析如图 3 所示。

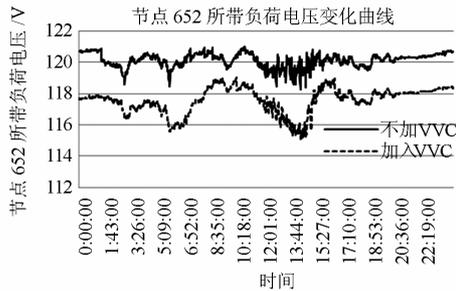


图 3 节点 652 所带负荷电压变化曲线  
Fig. 3 Voltage of load connected with node 652

##### (1) 节点 652 负荷电压

加入 VVC 控制算法后，负荷节点电压整体降低，基本达到控制要求。但在太阳能渗透率太大时，节点的电压普遍较高，主要是因为太阳能发电装置输出功率较大，对其附近节点的电压提升作用明显。

##### (2) 馈线系统能量消耗值 (表 1)

表 1 不同场景下馈线系统平均能量消耗值

Table 1 Average power consumption of feeder in different cases

场景描述	馈线系统平均能量消耗值/W
接入太阳能发电装置	487 667
接入太阳能发电装置 并加入 VVC 控制	480 894

通过馈线系统能量消耗平均值的对比，可以看出加入 VVC 控制算法后，电网平均有功能量消耗值降低，下降率达到 1.4%。

##### (3) 馈线损耗

具体场景下的馈线有功功率损耗如图 4 和表 2 所示。

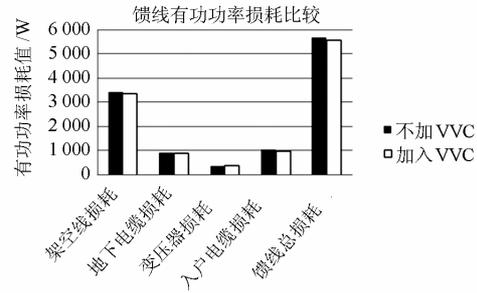


图 4 馈线有功功率损耗比较

Fig. 4 Comparison of power losses in the feeder

表 2 不同场景下不同设备的功率损耗平均值比较

Table 2 Average power losses of different devices in different cases

场景	架空线 损耗/W	地下电缆 损耗/W	变压器 损耗/W	入户电缆 损耗/W	馈线 损耗/W
不加 VVC	3 420	892	350	1 011	5 673
加入 VVC	3 341	872	363	979	5 555

通过各部分损耗平均值的对比，可以看出加入 VVC 控制算法后，电网平均有功损耗降低 2.1%。

#### 4.2 IEEE13 节点馈线加入风力发电装置

实际日风速曲线和加入的风力发电机有功功率曲线如图 5、图 6 所示。

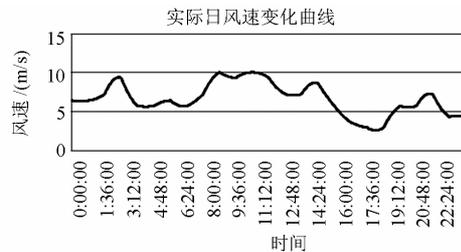


图 5 实际日风速变化曲线

Fig. 5 Daily change curve of wind speed

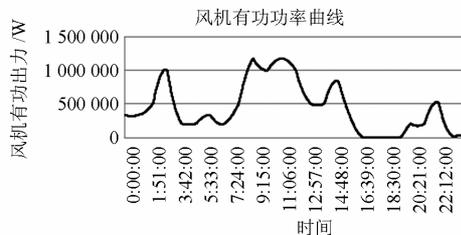


图 6 风机有功功率曲线

Fig. 6 Active power curve of wind power generation

加入风机发电机后, 设定负荷侧期望电压为 117 V, 允许的电压变化范围是[115 V, 119 V]。仿真结果及分析如下:

#### (1) 节点 652 负荷电压

通过图 7 中曲线, 可以看出加入 VVC 算法基本可以实现电压控制。但是在外界风速较大时, 风机出力较多, 渗透率较大导致电压控制效果较差, 但仍在允许的范围以内。

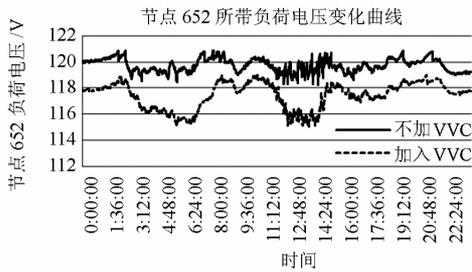


图 7 节点 652 所带负荷电压变化曲线

Fig. 7 Voltage of load connected with node 652

#### (2) 馈线系统能量消耗值

具体场景下的馈线能量消耗平均值如表 3 所示。

表 3 不同场景下馈线系统平均能量消耗值

Table 3 Average power consumption of feeder in different cases

场景	馈线系统能量消耗平均值/W
接入风力发电装置	648 218
接入风力发电装置并加入 VVC 控制	640 105

通过馈线系统能量消耗平均值的对比, 可以看出加入 VVC 控制算法后, 电网平均有功能量消耗值降低, 下降率达到 1.25%。

#### (3) 馈线损耗

不同场景下的馈线损耗平均值如表 4 所示。

表 4 不同场景下不同设备的功率损耗平均值比较

Table 4 Average power losses of different devices in different cases

场景	架空线 损耗/W	地下电缆 损耗/W	变压器 损耗/W	入户电缆 损耗/W	馈线 损耗/W
不加 VVC	3 996	1 454	366	232	6 048
加入 VVC	3 879	1 409	381	229	5 898

通过各部分损耗平均值的对比, 可以看出加入 VVC 控制算法后, 电网平均有功损耗降低 2.4%。

### 4.3 IEEE13 节点馈线加入风力发电和太阳能发电装置

在 3.1 节和 3.2 节的仿真场景中, 只单独考虑了一种分布式电源, 而在实际的电网中应该综合考虑风力发电装置和太阳能发电装置两种分布式电源。因此, 接下来的仿真算例在 IEEE13 节点的馈线模型中同时加入这两种分布式电源, 分析电压无功控制的效果。设定负荷侧期望电压为 118 V, 允许的电压变化范围是[116 V, 120 V]。仿真结果及分析如下。

#### (1) 节点 652 负荷电压

通过图 8 中曲线, 可以看出加入 VVC 算法基本可以实现电压控制。



图 8 节点 652 所带负荷电压变化曲线

Fig. 8 Voltage of load connected with node 652

#### (2) 馈线系统能量消耗值

具体场景下的馈线能量消耗平均值如表 5 所示。

表 5 不同场景下馈线系统平均能量消耗值

Table 5 Average power consumption of feeder in different cases

场景	馈线系统能量消耗平均值/W
接入分布式电源	623 997
接入分布式电源并加入 VVC 控制	619 313

通过馈线系统能量消耗平均值的对比, 可以看出加入 VVC 控制算法后, 电网平均有功能量消耗值降低, 下降率达到 0.75%。

#### (3) 馈线损耗

不同场景下的馈线损耗平均值如表 6 所示。

表 6 不同场景下不同设备的功率损耗平均值比较

Table 6 Average power losses of different devices in different cases

场景	架空线 损耗/W	地下电缆 损耗/W	变压器 损耗/W	入户电缆 损耗/W	馈线 损耗/W
不加 VVC	4 795	1 317	382	246	6 740
加入 VVC	4 653	1 293	370	239	6 555

通过各部分损耗平均值的对比,可以看出加入VVC控制算法后,电网平均有功损耗降低2.74%。

### 5 结论

分布式电源大量接入配电网,对电网运行会造成很大影响。本文在对风机和太阳能发电装置建模的基础上,利用GridLAB-D的详细负荷模型,对分布式电源接入的配电网电压无功控制效果进行分析,结果显示文章使用的电压无功控制算法基本可以实现控制要求,但是在分布式电源渗透率较大时,控制效果略差。

今后的研究将主要集中在当分布式电源渗透率较高时,如何进行有效的电压无功控制,实现电压的扁平化控制和无功功率的有效管理。

### 参考文献

[1] 付丽伟,王守相.多类型分布式电源在配电网中优化配置[J].电网技术,2012,36(1):79-84.  
FU Li-wei, WANG Shou-xiang. Optimal selection and configuration of multi-types of distributed generators in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 79-84.

[2] 于汀,郭瑞鹏.基于负荷预测的地区电网电压无功控制方案[J].电力系统保护与控制,2012,40(12):121-124.  
YU Ting, GUO Rui-peng. Control scheme for voltage reactive power of regional power grid based on load forecast[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 121-124.

[3] 韩文庆,周志勇,王毅.基于负荷预测的区域变电站电压无功综合控制的研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(8):68-72.  
HAN Wen-qing, ZHOU Zhi-yong, WANG Yi. Study of area substation voltage and reactive power control based on load forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 68-72.

[4] 李斌,刘天琪,李兴源.分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J].电网技术,2009,33(3):84-88.  
LI Bin, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88.

[5] 张立梅,唐巍,赵云军,等.分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J].电力系统保护与控

制,2011,39(5):91-96.  
ZHANG Li-mei, TANG Wei, ZHAO Yun-jun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-96.

[6] Govindswamy Tamizhmani, JI Liang, TANG Ying-tang, et al. Photovoltaic module thermal/wind performance: long-term monitoring and model development for energy rating[C] // Solar Program Review Meeting, 2003: 936-939.

[7] Mahti Daliparthi, Marsela JaKub-Wood, Anjan Bose. Analysis of the Volt/Var control scheme for smart distribution feeders[C] // North American Power Symposium (NAPS), Sept. 9-11, 2012, Champaign, IL.

[8] Borozan V, Baran M E, Novosel D. Integrated Volt/var control in distribution systems[C] // Power Engineering Society Winter Meeting, Jan. 28-Feb. 1, 2001, Columbus, OH, IEEE, 2001.

[9] Ruchi Singh, Francis Tuffner, Jason Fuller, et al. Effects of distributed energy resources on conservation voltage reduction (CVR)[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, San Diego, CA, IEEE, 2011.

[10] Niknam T, Ranjbar A M, Shirani A R. Impact of distributed generation on Volt/Var control in distribution networks[C] // IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, June 23-26, 2003.

[11] 陈芳,王玮,徐丽杰,等.分布式电源接入对配电网电压变化的分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(4):145-149.  
CHEN Fang, WANG Wei, XU Li-jie, et al. Analyzing the voltage variation of distribution network including distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2012, 24(4): 145-149.

[12] 余昆,曹一家,陈星莺,等.含分布式电源的地区电网无功电压优化[J].电力系统自动化,2011,35(8):28-32.  
YU Kun, CAO Yi-jia, CHEN Xing-ying, et al. Reactive power and voltage optimization of the district grid with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 28-32.

[13] 杨广杰,郑华.含分布式电源的配电网电压无功优化

- 问题研究[J]. 现代电力, 2012, 29(2): 27-31.
- YANG Guang-jie, ZHENG Hua. Research on the voltage and reactive power optimization control of distribution system with distributed generations[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(2): 27-31.
- [14] Schneider K P, Fuller J C. Detailed end use load modeling for distribution system analysis[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, IEEE, 2010.
- [15] SynerGEE Electric[EB/OL]. <http://www.gl-group.com>.
- [16] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 168-174.
- ZHANG Li, XU Yu-qin, WANG Zeng-ping, et al. Reactive power optimization for distribution system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.
- [17] 张佳佳, 石东源. 分布式电源用四桥臂变换器中点电压飘移控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 225-232.
- ZHANG Jia-jia, SHI Dong-yuan. Control of neutral point voltage shift for four-leg converter in distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 225-232.
- [18] 汪海宁, 苏建徽, 张国荣, 等. 光伏并网发电及无功补偿的统一控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 114-118.
- WANG Hai-ning, SU Jian-hui, ZHANG Guo-rong, et al. Unitive control of PV grid connected generation and reactive compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 114-118.

收稿日期: 2013-06-13; 修回日期: 2013-09-11

作者简介:

王旭强(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网下的电压无功控制; E-mail:wangxuqiang@outlook.com

刘广一(1963-), 男, 博士, 中央千人计划专家, 从事智能电网、能量管理系统、电力市场、分布式能源管理和控制技术等方面的研究;

曾沅(1975-), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事电力系统安全性与稳定性, 电力系统规划, 智能电网技术等方面的研究。