

# 一种基于智能节点终端技术的完全分布式多阶段配电网电压调控方案

胡倩<sup>1</sup>, 卜思齐<sup>1</sup>, 周博文<sup>2</sup>, 张沛<sup>3</sup>

(1. 香港理工大学电机工程学系, 中国香港特别行政区 999077; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 北京交通大学电气工程学院, 北京 西城 100044)

**摘要:** 基于先进的物联网设备在电力系统中的应用以及5G通讯网络的发展, 提出了一种完全分布式的相位独立的三阶段电压调控方案。该方案通过对系统中分布式能源(distributed energy resource, DER)可用的有功和无功功率进行分配来实现对出现电压问题节点的电压调节。第一阶段为该方案的规划阶段, 针对配电网较高  $R/X$  这一情况, 提出了一种扰动测量法来代替传统的雅可比矩阵, 定量分析了网络  $R/X$  对三相不平衡的非线性网络中节点电压灵敏度的影响。第二阶段是所有节点在无向通讯网络中基于一致性控制算法来实现电压偏差的信息共享。第三阶段中的每个 DER 单元的下垂控制器根据前两阶段的信号来调节功率输出进而对电压进行调控。案例研究的结果验证了提出的调控方案能够在不同  $R/X$  的情况下有效地处理网络中的三相不平衡电压问题。

**关键词:** 电压调节; 分布式控制; 分布式能源 (DER); 配电网; 通讯网络; 一致性算法

中图分类号: TM 714

文献标志码: A

## A Fully Distributed Multi-Stage Voltage Regulation Strategy for Distribution Network Based on Intelligent Bus Terminal Technology

HU Qian<sup>1</sup>, BU Siqui<sup>1</sup>, ZHOU Bowen<sup>2</sup>, ZHANG Pei<sup>3</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR 999077, China;  
2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning Province, China;  
3. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Xicheng District, Beijing 100044, China)

**ABSTRACT:** Considering wide deployment of advanced IoT infrastructure in the future power system as well as the development of 5G technology, a fully distributed three-stage phase independently voltage regulation strategy is proposed in this paper. Voltage issue can be regulated collectively by utilizing the available real and reactive power of distributed energy resource (DER). In the first planning stage, a perturbation approach is proposed as the substitute of conventional Jacobian analysis to quantify the local voltage sensitivity in the three-phase unbalanced nonlinear distribution network under different  $R/X$  of the line. In the second stage, based on the consensus algorithm, an average voltage deviation can be achieved without the need of central controllers via an undirected communication network. In the third stage, independent droop controller of each DER is initiated to proportionally allocate the available  $P/Q$  of DER to support the voltage. Results of case study verify that the proposed regulation strategy can effectively deal with the unbalanced voltage problems in the network.

**基金项目:** 国家自然科学基金委青年基金(51807171);香港研究资助局优配研究基金(15200418);香港研究资助局杰出青年学者计划基金(25203917);大学教育资助委员会香港理工大学研究启动基金(1-ZE68)

Project supported by National Natural Science Foundation of China (51807171), Hong Kong Research Grants Council General Research Fund (15200418), Hong Kong Research Grants Council Distinguished Young Scholars Program Fund (25203917), Research Initiation Fund of Hong Kong Polytechnic University by University Grants Committee(1-ZE68)

**KEY WORDS:** voltage regulation; distributed control; distributed energy resource(DER); distribution network; communication network; consensus algorithm

## 0 引言

分布式能源 (distributed energy resource, DER) 的广泛应用是未来低压配电网的发展趋势之一。在用户主导的配电网中,由于 DER 的存在,一方面灵活的用电需求可以被满足,然而另一方面新能源的间歇性和不确定性导致短暂的电压越限增加了配网安全稳定运行的难度<sup>[1]</sup>。传统配电网中的电压控制设备和机制更多的是利用无功补偿来修正较为严重的电压问题,例如带有有载分接开关的变压器,静态无功补偿器等<sup>[2]</sup>。频繁启用这些控制设备来应对由新能源导致的较快的电压波动是不可取的。

作为传统控制的一种补充,协调调配可控负载是一种较有前景的解决配电网电压问题的方式之一。随着 P2P (peer-to-peer) 通讯网络的日渐成熟以及智能设备的快速发展,通过完全分布式的 DER 控制来调节电压已经成为趋势<sup>[3-5]</sup>。与传统集中式的控制相比,分布式控制有以下几个明显优势:1) 由于控制中心被分散,计算量明显减少,信息处理效率可以大大被提高;2) 本地用户的数据不需要上传至控制中心,因而用户的数据隐私和安全可以得到保障;3) 很好地适应了未来配电网中负载即插即用的特性。

有别于传统的输电网,在未来智能配电网的规划和发展中,有两点需要注意。一是考虑到大规模新能源的接入,网络的拓扑结构将会频繁地改变。二是和输电网的输电线相比,配电网拥有较高的线路阻抗电抗比 (ratio of line resistance to reactance,  $R/X$ )。因此,在配电网中  $P\theta-QV$  解耦不再有效,节点电压可能对于有功功率的改变更为敏感<sup>[6-7]</sup>。在这样的情况下,研究线路  $R/X$  对电压调节有效性的影响至关重要。传统的计算电压灵敏度的方法是使用雅可比矩阵 (Jacobian matrix) 来分析节点功率的变化对节点电压的影响,在文献[7-9]中均使用了基于雅可比矩阵的传统的分析电压灵敏度的方法来调节电压。但是值得注意的是,当网络的结构复杂而且有较多的非线性的负载存在的情况下,纯数学雅可比矩阵分析会变得十分复杂而且精确度下降。

综上所述,针对 DER 高比例渗透的配电网,本文提出了一个完全分布式的三阶段相位独立的电

压调控方案,用于逐相分配 DER 的可用功率,以处理网络中的相位不平衡电压问题。文中的三个要点总结如下:1) 提出了一种扰动方法来局部获得非平衡非线性系统的精确电压灵敏度。这个方法不仅可以帮助配电网建设管理人员在不同网络  $R/X$  之下规划合适的电压调节策略(例如 DER 的安装位置和  $P/Q$  调节电压能力评估),而且在电压调控期间还可以指导 DER 下垂系数。2) 提出了智能节点终端的概念,引用最新的物联网和第五代移动网络 (the fifth generation of mobile networks, 5G) 通讯技术为提出的电压调控方案提供硬件和通信支持。3) 应用了基于图论的一致性算法,做到了节点的本地信息与相邻节点的信息互相传输并最终达到所有节点可以共享相应信息的效果,从而使得本地的控制决策可以由本地节点来做出。

## 1 扰动法计算电压敏感度

首先,用如图 1 所示的简化两节点网络来定性的分析  $R/X$  对节点电压灵敏度的影响。

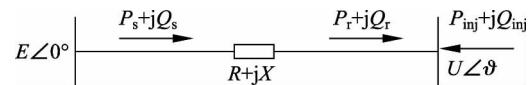


图 1 两节点网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-bus network

发送端的电压  $\bar{E}$  默认为常数 1.0 pu, 考虑线路阻抗, 接收端的电压和线路传输的视在功率可以分别表示为:

$$\bar{U} = \bar{E} - (R + jX) \bar{I}^* \quad (1)$$

$$\bar{S} = \bar{E} \bar{I}^* = P_s + jQ_s \quad (2)$$

通过(2)可以得到通过线路的电流:

$$\bar{I} = \frac{P_s - jQ_s}{E} \quad (3)$$

其中  $\bar{E} = E \angle 0^\circ$ 。重新整理(1)和(3)可以得到:

$$\begin{aligned} E - \bar{U} &= (R + jX) \frac{P_s + jQ_s}{E} = \\ \frac{RP_s + XQ_s}{E} + j \frac{XP_s - RQ_s}{E} & \end{aligned} \quad (4)$$

对于很小的电压相角  $\theta$ , 电压的幅值可以被近似为:

$$U \cong E - \frac{RP_s + XQ_s}{E} \quad (5)$$

注入接收端的有功和无功功率可以分别表示为:

$$P_r = P_s - P_{\text{loss}} \quad (6)$$

$$Q_r = Q_s - Q_{loss}$$

其中  $P_{loss}$  和  $Q_{loss}$  是线路的有功和无功损耗。这里假设理想情况下线路损耗与传输的功率相比可以忽略不计,因此,可以近似为:

$$P_r = P_s \quad (8)$$

$$Q_r = Q_s \quad (9)$$

则电压幅值的大小重新表示为:

$$U \cong E - \frac{RP_r + XQ_r}{E} \quad (10)$$

由于我们的目的是了解注入接收端的功率如何影响接收端电压的变化  $\Delta U$ 。因此,  $\Delta U$  可以在线性化表达式中表示为:

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial P_r} \Delta P_r + \frac{\partial U}{\partial Q_r} \Delta Q_r \quad (11)$$

其中,式(11)的第一部分被定义为  $U-P$  灵敏度,等于式(10)有功功率的偏导数乘以该节点的总注入功率。同理式(11)的第二部分为  $U-Q$  灵敏度。通过式(11)可以分别得到相对于有功功率和无功功率的节点电压灵敏度:

$$S_{vp} = \frac{\partial U}{\partial P_r} = -\frac{R}{E} \quad (12)$$

$$S_{vq} = \frac{\partial U}{\partial Q_r} = -\frac{X}{E} \quad (13)$$

如式(14)所示,灵敏度比  $S_{Ratio}$  可以定义为  $\frac{S_{vp}}{S_{vq}}$ 。这里可以得出一个重要结论:灵敏度比等于发送端和接收端之间的线路的  $R/X$ 。

$$S_{Ratio} = \frac{S_{vp}}{S_{vq}} = \frac{R}{X} \quad (14)$$

由以上的定性分析可知,节点电压相对于有功和无功功率的灵敏度取决于线路的  $R/X$ 。当  $R$  大于  $X$  时,电压的变化会对有功功率更为敏感。因此,传统的无功补偿调节电压可能不再适用。然而,大规模配电网由于其复杂的网络结构使得传统的线性灵敏度分析变得极其复杂和不准确。另外,雅可比矩阵分析电压灵敏度还需要全局信息来构建,所以该方法并不能应用于完全分布式的电压调节方案。因此,这里引入扰动法来研究局部电压灵敏度:通过在网络中的任意节点处连续注入一定量的功率扰动来收集相应的一连串目标节点处的电压幅值,通过将电压波动量与定量的功率扰动值做比,可以得到该目标节点相对于某个节点上的有功或无功功率的电压灵敏度。采用改进的 IEEE-13 节点配电网(见图 2)解释这种方法的工作原理。网

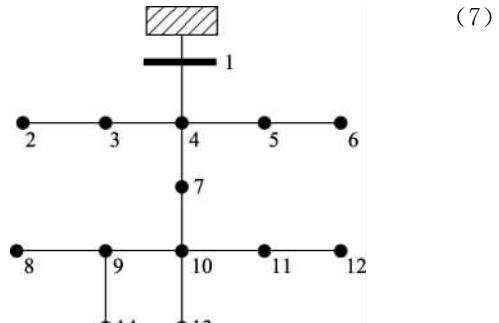


图 2 IEEE-13 节点配电网示意图

Fig. 2 Diagram of IEEE-13 bus distribution network

络线路的  $R/X$  设为 1.34,位于馈线末端的节点 13 被选择作为目标节点去观察其的电压灵敏度。有功和无功功率分别以 0.1 MW 的增量由 0 至 2 MW 依次注入其他检测节点,记录相应的电压幅值以绘制曲线。线的斜率表示节点 13 相对于被注入功率的节点的电压灵敏度。表 1 第二行和第三行分别记录了节点 13 对于不同节点注入的有功和无功功率的灵敏度系数。

表 1 节点 13 相对于其他节点功率注入的灵敏度系数  
( $R/X=1.34$ )

Table 1 Sensitivity coefficient of bus 13 regarding power injection from other buses ( $R/X=1.34$ )

节点	$S_p/10^{-3}$	$S_q/10^{-3}$
3	6.4	4.2
5	6.5	4.3
6	6.4	4.2
8	12.8	8.3
9	13.1	8.5
11	13.8	8.6
12	14.0	8.3
13	19.7	13.0
14	12.8	8.3

由表 1 可得:1)当线路  $R/X$  为 1.34 时,对于同一节点的功率注入,有功功率显然比无功功率对节点 13 的电压影响更大。然而,进行电压补偿的位置也对电压灵敏度有一定的影响,在节点 8 进行无功功率补偿比在节点 3、节点 5 和节点 6 的有功功率补偿更有效。2)节点 13 上的电压对自身的功率注入最为敏感。3)节点 9、节点 11、节点 12 和节点 14 可以被认为是安装 DER 的关键节点,因为此处的功率变化会带来更明显的电压变化。

结果表明,该扰动方法可用于规划在特定  $R/X$  下的电压调节策略。可以提前判断哪种功率可以提供更为有效的电压调节以及哪些关键节点最适宜提供功率补偿,在规划中这些关键点可以建议安

装 DER。此外,扰动方法可以为电压控制的下垂系数提供指导,在下一节具体介绍电压调控策略时将对此进行详细讨论。

## 2 三阶段电压调控方案

为有效保证三相配电网络的安全运行,特别是针对三相不平衡的电压问题,提出了三阶段的电压调控策略。图 3 描绘了此策略的一般结构,该结构具备三个主要特点:1)基于上一部分提出的扰动法,在特定线路和网络配置下,用于提供电压调节的功率类型和 DER 安装的位置可以在规划阶段提前确定,以提供更精准有效的电压调节;2)电压的调节过程是完全分布的,每个节点只需要本地的信息就可以完成本地控制行动的部署;3)此策略可以应用于三相不平衡的网络中,在电压调节过程中每相的电压被独立监测并分别进行调节。下面将详细讨论其第二和第三阶段的工作原理。

### 2.1 一致性控制算法和通信网络拓扑结构

离散的一致性算法可以简单地用式 (15) 表示,其中  $k=0,1,2\cdots$  代表离散的时间点。 $x_k^i$  和  $x_k^j$  是迭代  $k$  次后节点  $i$  和节点  $j$  的状态。 $n$  是系统中

节点的总数。下一步迭代  $k+1$  时,节点  $i$  的状态将会根据它的先前状态和邻近节点  $j$  的状态来进行更新。 $a_{ij}$  是节点  $i$  和节点  $j$  之间的通信系数,  $d_i =$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}.$$

$$x_{k+1}^i = x_k^i + \frac{1}{d_i + 1} \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j - x_i) \quad (15)$$

当  $k \rightarrow \infty$  时,节点  $x_{k+1}^i$  的状态变量将收敛到初始状态  $x_0^i$  的平均值,如下:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x_{k+1}^i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_0^i = \bar{x} \quad (16)$$

电网的通信拓扑被设置为无向网络,即相邻节点之间的信息可以双向传输,如图 4 所示。基于这一通信网络的拓扑结构,可以推导出携带通信权重的邻接矩阵  $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ 。本文中,所有的边缘权重都设置为 1。如果两个节点直接连接,则有  $a_{ij} = 1$ ,否则  $a_{ij} = 0$ 。基于一致性算法和图论,目标控制变量可以在不需要中央控制器的情况下在给定一组初始条件下实现全局信息一致,即每个节点都共享同一信息。图 5 展示了应用一致性算法之后不同节点的电压偏差收敛到稳定值的一个示例。

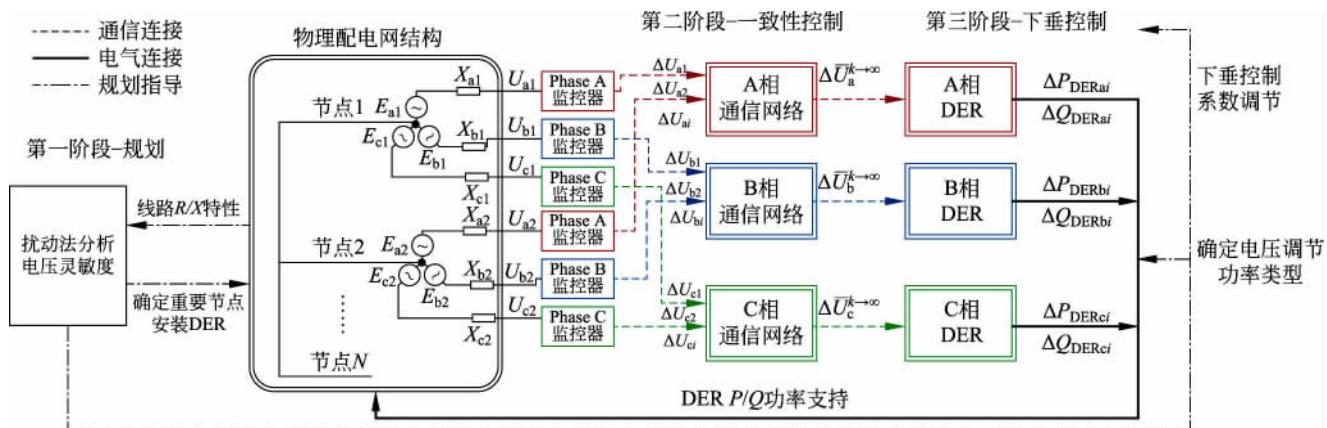


图 3 三阶段电压调控策略示意图

Fig. 3 Schematic diagram of proposed three-stage voltage regulation strategy

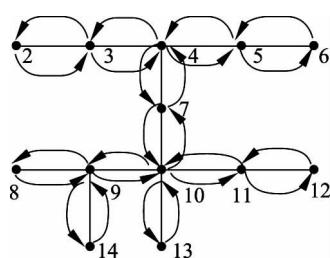


图 4 IEEE 13 节点配电网的通讯网络图

Communication network of IEEE-13 bus network

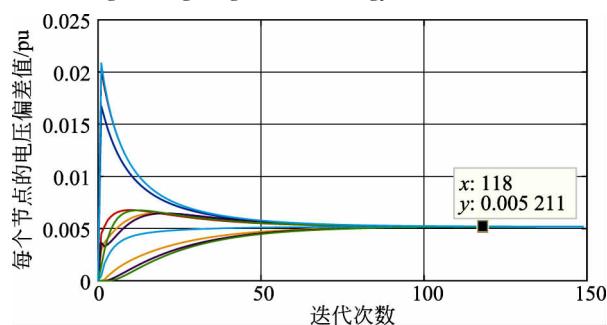


图 5 不同节点电压偏差的收敛过程

Fig. 5 Convergence of voltage deviation at different buses

## 2.2 第二/三阶段调节过程

为了应对配电网中的不平衡相电压,每个节点的各个相位被独立监控和调节。一旦节点  $i$  的某相电压超出电压正常运行的规定范围( $1.0 \pm 5\% \text{ pu}$ ),第二阶段的一致性控制将被激活。出现电压问题的节点的本地处理器计算出电压偏差  $\Delta U_i$ ,此信号将被传送到通信网络中的相邻节点。经过一定的步数的迭代后,所有的节点都会收到平均电压偏差  $\Delta \bar{U}$  这一信号,如下所示:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta U_{k+1}^i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta U_0^i = \Delta \bar{U} \quad (17)$$

在第三阶段中,每个 DER 单元上安装的基于恒定下垂控制的控制器根据收到的信号开始对每个 DER 功率输出进行控制,从而最终联合作用于网络中出现的电压问题。第二阶段得到的信号  $\Delta \bar{U}$  作为第三阶段所有 DER 下垂控制的输入信号,如图 6 所示,其中两个因素影响下垂系数  $D$  的调整:1)扰动法得到的本地节点的电压灵敏度;2)DER 的瞬时可用容量。每个 DER 向网络提供有功功率和无功功率的能力根据不同因素而变化,例如安装容量和实时可用容量,因此每个 DER 对电压调节的贡献也会相应地变化。基于此,在第三阶段,可用 DER 容量  $P_{i\_rate}$  和  $Q_{i\_rate}$  被设计为下垂系数的决定性因素,以满足 DER 功率的灵活需求并实现可用容量的有效利用。实际功率的输出值分别根据式(18)和式(19)计算得出,其中  $\alpha$  和  $\beta$  分别表示由扰动法得到的电压灵敏度。

$$\Delta P_{DGi} = \alpha P_{i\_rate} (\Delta \bar{U})^{\frac{1}{6}} \quad (18)$$

$$\Delta Q_{DGi} = \beta Q_{i\_rate} (\Delta \bar{U})^{\frac{1}{6}} \quad (19)$$

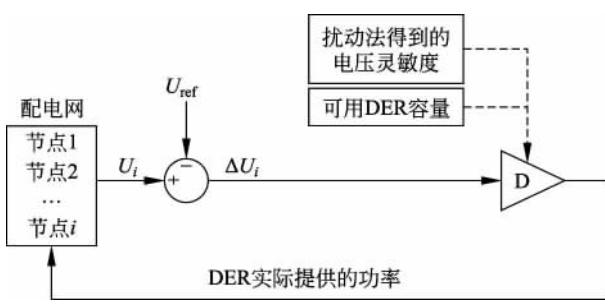


图 6 第三阶段下垂控制示意图  
Fig. 6 Diagram of third stage droop control

## 3 硬件及通讯设备要求

### 3.1 智能节点终端

考虑到物联网技术的普及及其未来在电力

系统中广泛应用的前景,引入了智能节点终端的概念,使得提出的电压调节方案可以在实际电网运行过程中得到实施。智能节点终端由先进的物联网设备构成,根据配备硬件的不同功能,提出的电压调控策略包括了 3 个主功能层,如图 7 所示。

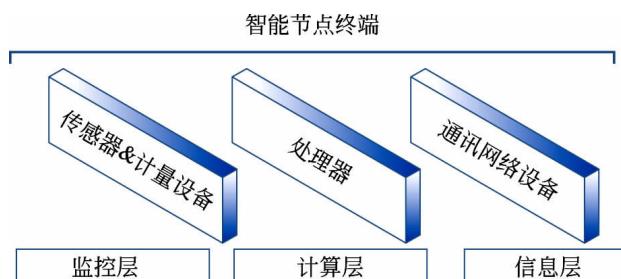


图 7 智能节点终端功能示意图

Fig. 7 Diagram of intelligent bus terminal

在监控层,智能节点终端的传感器和计量设备实时测量并收集节点电压。在计算层中,本地节点处理器根据先前设置好的软件指令进行计算。在信息层中,每个节点的过渡状态通过无控制中心的通信网络与其相邻节点交换,以最终实现本地控制决策。在上一部分提出的电压调控策略中,假设所有节点都启用了智能节点终端的功能。智能节点终端之间安全,稳定和快速的通信是可靠的分布式电压调节的基础。

### 3.2 5G 通讯应用于分布式控制的优势

由于提出的调节电压策略是完全分布的,没有中央控制中心,而是依靠每个节点的本地信息互相传递,因此对通信网络中通信信道的速度和准确性有着更高的要求,例如用于实时监控和信息收集的智能传感器需要只有几 ms 的延迟值以实现信息的及时处理<sup>[10]</sup>。由于可扩展性,灵活性以及较为经济的部署安装,无线通信已经成为一种可以应用于分布式网络的一种可靠通信手段<sup>[11]</sup>。5G 具有超高带宽,超低延迟和超大数量连接等一系列优势,将成为分布式网络的核心通信技术<sup>[12]</sup>。5G 广泛应用在未来的分布式智能配电网的核心优势有:

1) 5G 边缘计算技术可以支持实现本地计算的分布式网关部署,从而节省带宽,并且可以减少延迟。

2) 大规模接入( $1000$  万连接/ $\text{km}^2$ )网络功能可满足具有大量设备终端的分布式网络。

3) 与专用光纤网络相比,可以在同级别实现

安全性和隔离级别,显著降低了建设成本。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真平台介绍

OpenDSS 是一个专门用于非平衡多相配电系统建模的配电系统仿真软件,可以由用户定义的 COM 接口(如 MATLAB)来驱动。本文建立了 OpenDSS 与 MATLAB 交互的平台来进行算例网络的搭建,如图 8 所示。其中,OpenDSS 用来构建三相不平衡配电网,而 MATLAB 用来进行电压灵敏度分析和执行相应的电压调控方案。

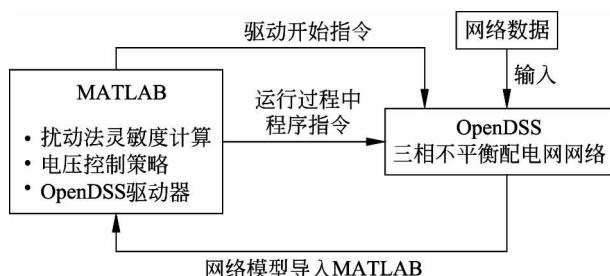


图 8 OpenDSS 与 MATLAB 交互工作流程  
Fig. 8 Workflow of OpenDSS and MATLAB

在下面的算例分析中,图 2 所示的改进的 IEEE-13 节点配电网仍被用作测试网络。根据第 1 部分中的分析结果,为了达到更有效的电压调节效果,网络中节点 9、节点 11、节点 12 和节点 14 被选为重要节点安装 DER 并提供电压支持。

### 4.2 扰动法确定调节电压的有效功率类型

首先用扰动法来选择特定  $R/X$  下合适的调节功率类型,有如下两个步骤:

- 1) 选择带有 DER 的节点(此处选择节点 13)以注入有功/无功功率并收集节点 13 的电压。
- 2) 通过比较线的斜率(也就是电压灵敏度系数)可以了解哪种类型的功率能够更有效地调节电压。

4 组不同  $R/X$  的仿真结果如图 9 所示。从结果中可以发现,当  $R/X$  远大于 1 时,有功功率可以提供更有效的电压调节;而当  $R/X$  远小于 1 时无功功率更为有效;在  $R/X$  接近于 1 的情况下,两种功率的注入对同一个节点的电压影响基本相同,而此时提供功率的节点的位置就比较重要,离目标节点越近,电压调节效果越好。

### 4.3 不同 $R/X$ 下的电压调节效果

基于上一部分得到的结果,验证在不同  $R/X$  情况下以相应功率来调节节点相电压的有效性。首

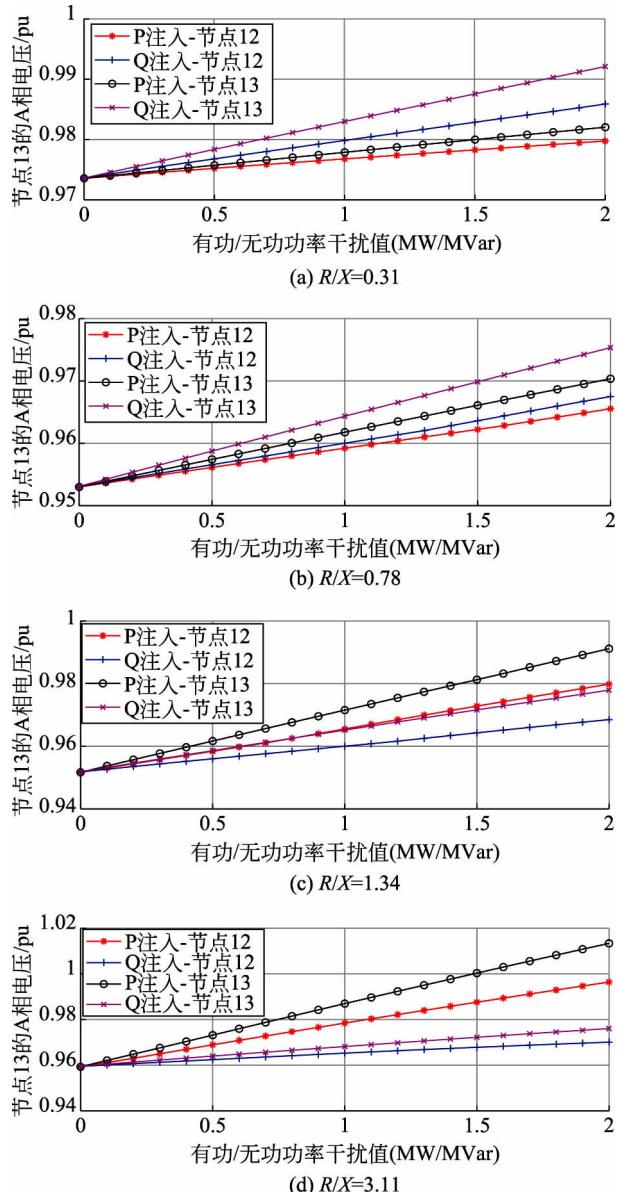
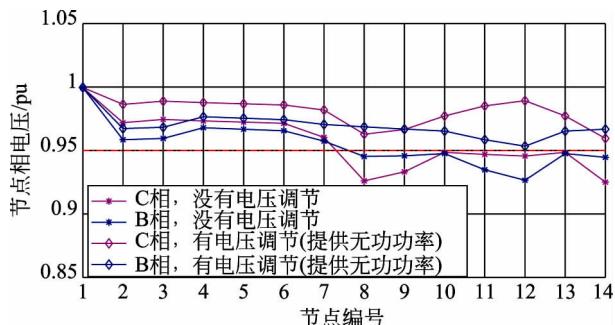
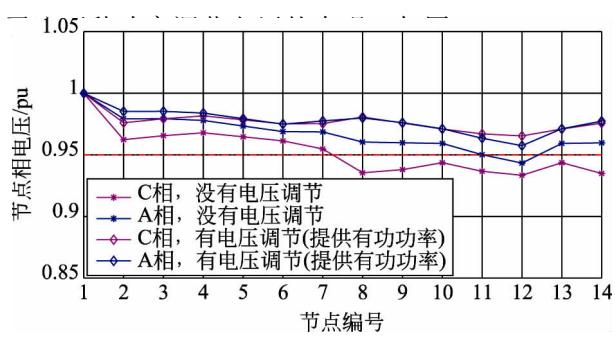
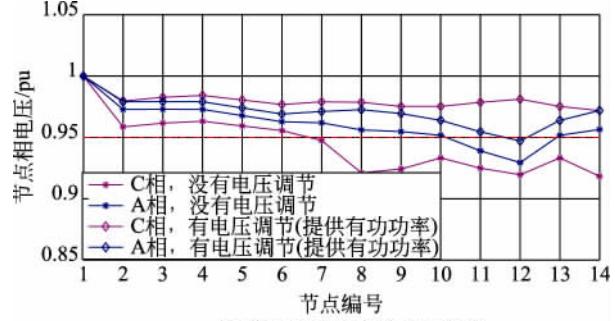


图 9 在不同  $R/X$  下节点 13 相对于节点 12 和 13 处有功和无功功率注入的电压灵敏度  
Fig. 9 Voltage sensitivity of bus 13 with respect of real and reactive power injection at bus 12 and 13 under various  $R/X$

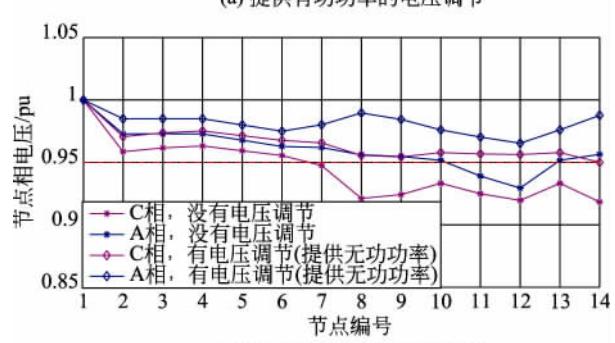
先,在  $R/X=0.31$  的网络中,在没有电压调节前,所有节点的 A 相电压完全处于正常状态,而位于网络较远端的节点 8 到 14 的 B 相和 C 相电压低于最低电压标准 0.95 pu。因此,这里仅针对 B 相和 C 相启动调节机制。由于  $R/X=0.31$ ,无功功率补偿被认为是更为有效调节电压的功率类型。电压调节前后的相电压对比如图 10 所示,过低电压被调节回到了正常值。当  $R/X=3.11$  时, A 相和 C 相发生了电压越限,DER 有功功率调节相应地被激活。图 11 中可以看到在调节之后节点相电压回复到了正

图 10  $R/X=0.31$  节点相电压幅值Fig. 10 Phase voltage under  $R/X=0.31$ 

常值。当  $R/X=1.34$  时,理论上有功功率和无功功率对电压调节有着等同的作用,所以我们分别研究

图 11  $R/X=3.11$  节点相电压幅值Fig. 11 Phase voltage under  $R/X=3.11$ 

(a) 提供有功功率的电压调节



(b) 提供无功功率的电压调节

图 12  $R/X=1.34$  节点相电压幅值Fig. 12 Phase voltage under  $R/X=1.34$ 

所示,可以观察到有功功率对于 C 相中节点电压的调节更有效,而无功功率对于 A 相中节点电压的调节更有效。这里再次验证一个结论,即为当  $R/X$  近

似为 1 时,两种功率的电压调节效果没有绝对的优势。

## 5 结论

考虑到物联网先进设备在电力系统的应用以及 5G 通信技术的快速发展,完全分布式的控制在未来的配电网网的发展规划中有很大的应用前景。本文提出了一种三阶段相位独立的电压调节策略。基于一致性控制算法,节点的本地信息在通信网络中与相邻节点进行传输,网络中 DER 可用的有功和无功功率可以被协调分配从而调节配电网中的三相不平衡的越限电压问题。本文还提出了配备三种功能的智能终端节点的概念,在硬件和通信网络上更好的配合分布式电压调节策略的具体实施。另外,提出了一种扰动法分析来量化  $R/X$  对于电压灵敏度的影响,进而为设计电压调控策略和规划 DER 的安装位置提供了参考。算例验证了提出的电压调策略在不同  $R/X$  的配电网中调控电压的有效性。

## 参考文献

- [1] KEANE A, OCHOA L F, VITTAL E, et al. Enhanced utilization of voltage control resources with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 252-260.
- [2] TREHAN N K. Ancillary services-reactive and voltage control [C]//Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001, 3: 1341-1346.
- [3] ZHANG K, RECALDE D, MASSIER T, et al. Fast online distributed voltage support in distribution grids using consensus algorithm [C]//Proceedings of International Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Asia 2018), 2018: 350-355.
- [4] XU Y, SUN H, GU W, et al. Optimal distributed control for secondary frequency and voltage regulation in an islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(1): 225-235.
- [5] LOU G, GU W, WANG J, et al. Optimal design for distributed secondary voltage control in islanded microgrids: Communication topology and controller[J]. IEEE Transaction of Power System, 2019, 34(2): 968-981.
- [6] WANG D, MENG K, GAO X, et al. Coordinated dispatch of virtual energy storage systems in LV grids for voltage regulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017: 1-1.

- [7] Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 877-885.
- [8] AGHATEHRANI R, KAVASSERI R. Sensitivity-analysis-based sliding mode control for voltage regulation in microgrids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 50-57.
- [9] ZHANG L, CHEN Y, SHEN C, et al. Coordinated voltage regulation of hybrid AC/DC medium voltage distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2018, 6(3): 463-472.
- [10] SHAFIE-KHAH M, SIANO P, AGHAEI J, et al. Comprehensive review of the recent advances in industrial and commercial DR [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(7): 1-1.
- [11] BAG G, THRYBOM L, HOVILA P. Challenges and opportunities of 5G in power grids[J]. CIRED-Open Access Proceedings Journal, 2017, 1: 2145-2148.
- [12] “5G Network Slicing Enabling the Smart Grid”, www-file.huawei.com, 2019. [Online]. Available: <http://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/News/5g-network-slicing-enabling-the-smart-grid.pdf>.



胡 倩

收稿日期:2019-09-20

作者简介:

胡 倩(1994—),女,硕士,研究方向为配电网的分布式控制,Qianhu.hu@connect.polyu.hk;

卜思齐(1984—),男,博士,副研究员,博士生导师,主要从事电力电子化和智能化电力系统稳定控制分析与运行规划研究;

周博文(1987—),男,博士,讲师,主要从事电力系统运行、稳定与控制及电动汽车接入电网研究;

张 沛(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析,电力信息化方面的研究。

(编辑 蒋毅恒)