

DOI: 10.7667/PSPC152252

# 智能配电系统分区电压控制技术综述

张玮亚<sup>1</sup>, 王紫钰<sup>2</sup>

(1. 南京供电公司, 江苏 南京 210000; 2. 徐州供电公司, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 配电系统电压控制已经成为配电运行控制系统中最重要的功能之一。有效的电压控制可以降低线损, 改善馈线电压水平以及提高系统安全性。在对 DG 接入配电系统带来的复杂电压波动问题产生的原因进行分析的基础上, 分析配电系统电压控制的主要手段, 指出分层电压控制是智能配电系统中广泛使用的电压控制方案, 而其中的分区电压控制层是提高系统电压质量、提升系统电压调节速度、保障系统电压稳定的中坚环节, 同时也是连接中央电压控制和本地电压控制的关键环节。继而对分区电压控制在微网和主动配电网中的研究成果进行针对性的回顾与评述。最后对智能配电系统分区电压控制技术发展方向进行了展望。

**关键词:** 微网; 主动配电网; 分布式电源; 分区电压控制

## Review of zonal-voltage control techniques of smart distribution system

ZHANG Weiya<sup>1</sup>, WANG Ziyu<sup>2</sup>

(1. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210000, China; 2. Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** The voltage control technique has become one of the most important functions of distribution management system. Effective voltage control measures can reduce the line loss, improve the voltage quality and enhance system security. The influence on the voltage quality of distribution system with the introduction of DG is discussed first; then the voltage control techniques are summarized, indicating that the hierarchical voltage control is more widely used than the other voltage control methods, in which the zonal-voltage control layer is the backbone of improving the voltage quality, voltage control speed and the system security. Overview of the voltage control of microgrid and active distribution network is presented and evaluated. At last, the development tendency of voltage control techniques is appraised.

**Key words:** microgrid; active distribution network; distributed generation; zonal-voltage control

## 0 引言

智能配电系统由低压层面的微网和中高压层面的主动配电网组成<sup>[1]</sup>, 微网是智能配电系统发展的初级阶段, 初步解决了分布式电源(DG)如何接入配电系统的问题, 而主动配电网是降低分布式电源并网成本和提高分布式电源渗透率的根本性解决方案, 能够应对大量分布式电源接入配电网的需求, 解决分布式电源控制和管理的难题, 是智能配电系统发展的高级阶段。

在智能配电系统中, DG 的接入改变了配电系统原有的电压分布情况, 不仅会导致单一类型的电压暂降、电压不平衡等问题, 还可能引发更为复杂的随机电压波动问题<sup>[2]</sup>。一般来讲, 配电系统电压控制在时间尺度上可以分为长时间尺度(分钟~小时)的电压优化控制以及短时间尺度(秒~分钟)的快速

电压控制两个维度。智能配电系统中的电压波动问题给电压控制提出了第三个时间维度的要求, 即更短时间尺度(毫秒~秒)的动态电压控制。配电系统的动态电压控制是指在更短时间尺度内, 通过动态电压和无功控制, 使得电网电压发生一定程度的波动之后, 能够快速恢复到较高的水平, 确保配电系统连续高效地运行<sup>[3-4]</sup>。

配电系统电压控制多采用分层控制方案, 自底而上分别是就地控制(一级控制)、分区控制(二级控制)、中央控制(三级控制)<sup>[5]</sup>。在分层电压控制体系中, 分区电压控制是提高系统电压水平、提升系统电压调节速度、保障系统电压稳定的中坚环节, 同时也是连接中央电压控制和本地电压控制的关键环节。其首要任务是, 根据区域内主节点的电压偏差, 实时协调并重新设置分区内各本地电压控制设备的参考值或整定值, 快速、合理地调动分区内各无功

支撑源, 利用分区内的无功储备, 维持区域电压水平, 在一定程度上提高全网电压控制水平。

国内外对智能配电系统分区电压控制相关的研究和实践已经取得了一些阶段性的成果。本文将在对 DG 接入配电系统带来的复杂电压波动问题产生的原因进行分析的基础上, 结合已有成果分析配电系统电压控制的主要手段, 并在微网和主动配电网两个层面对智能配电系统分区电压控制的研究现状进行针对性评述。在此基础上, 进一步展望智能配电系统分区电压控制技术的未来发展方向。

## 1 DG 接入配电网带来的电压波动问题分析

传统的配电系统是无源的网络, 潮流自变电所单向流向负载, 电压波动问题很少出现。而智能配电系统中, 由于间歇性 DG 如光伏等的大量接入, 会出现较为严重的电压波动问题。在智能配电系统中, 电压波动问题已经成为取代电压暂降而最严重的短时电压质量问题。本部分将对并网 DG 输出有功波动引起 PCC 电压波动的机理进行分析。单 DG 接入配电网后的单相等效电路如图 1 所示。

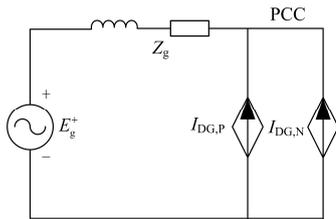


图 1 DG 接入配电网的单相等效电路  
Fig. 1 Single-phase equivalent circuit for DG access to distribution network

图中:  $E_g^+$  为系统等效电压;  $Z_g = R_g + jX_g$  为系统和线路的集中等效阻抗;  $I_{DG,P}$  为 DG 输出的正序电流;  $I_{DG,N}$  为单相 DG 贡献的负序电流。设  $dU_p$  为正序电压有效值与配电网额定电压  $E_N$  之差,  $dU_N$  为负序电压有效值与 0 之差, 定义 PCC 处正序、负序相对电压变动值为  $d_p$  和  $d_N$ , 则有:

$$\begin{cases} d_p = \left| \frac{dU_p}{E_N} \right| \times 100\% \\ d_N = \left| \frac{dU_N}{E_N} \right| \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

设 DG 输出正序电流的变化值为  $dI_{DG,P} = \Delta I_{DG,P} + j\delta dI_{DG,P}$ , 则 PCC 点的电压变化量为

$$dU_{PCC,P} = |dI_{DG,P}| |Z_g| e^{j(\varphi+\theta+\alpha)} = |dI_{DG,P}| \frac{E_N^2}{S_d} e^{j(\varphi+\theta+\alpha)} \quad (2)$$

式中:  $S_d$  为 PCC 点系统侧短路容量;  $\varphi$  为线路阻抗角;  $\theta$  为 DG 的功率因数角, 一般 DG 为单位功率因数运行;  $\alpha$  为电压相位角。因线路两端的相角差一般很小, 忽略  $dU_{PCC,P}$  的垂直分量, 为简化分析, 取  $\alpha=0$ , 而 DG 正常情况下运行在单位功率因数状态, 则由  $I_{DG,P}$  变化引起的 PCC 正序电压变化量可以表示为

$$dU_{PCC,P} = |dI_{DG,P}| \frac{E_N^2}{S_d} \cos \varphi \quad (3)$$

而正序电压相对波动值可以表示为

$$d_p = |dI_{DG,P}| \frac{E_N}{S_d} \cos \varphi \times 100\% \quad (4)$$

同理, 由于  $I_{DG,N}$  变化引起的 PCC 负序电压变化量可表示为

$$dU_{PCC,N} = |dI_{DG,N}| \frac{E_N^2}{S_d} \cos \varphi \quad (5)$$

而负电压相对波动值可以表示为

$$d_N = |dI_{DG,N}| \frac{E_N}{S_d} \cos \varphi \times 100\% \quad (6)$$

图 2、图 3 分别为不同线路阻抗角和短路容量条件下,  $I_{DG,P}$  和  $I_{DG,N}$  的变化引起 PCC 处正序和负序电压不同的波动情况。

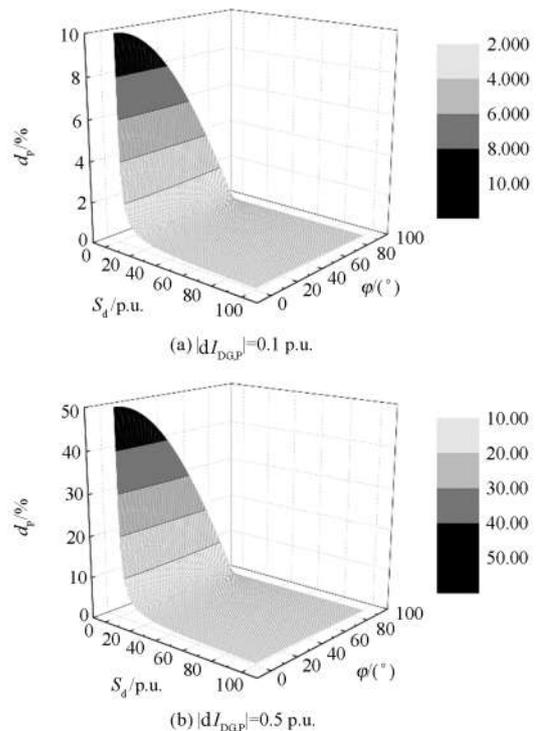


图 2  $|dI_{DG,P}|=0.1$  p.u.、 $0.5$  p.u. 时 PCC 正序相对电压变动  
Fig. 2  $d_p$  for  $|dI_{DG,P}|=0.1$  p.u.,  $0.5$  p.u.

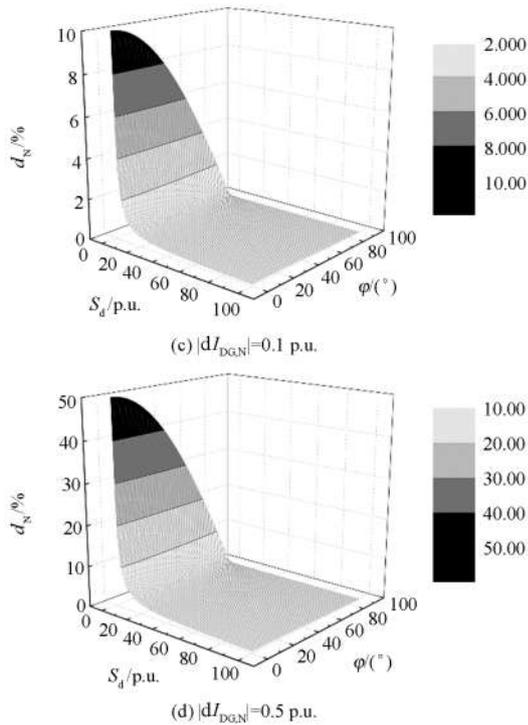


图3  $|dI_{DG,N}|=0.1$  p.u.、 $0.5$  p.u.时 PCC 负荷相对电压变动  
Fig. 3  $d_p$  for  $|dI_{DG,N}|=0.1$  p.u.,  $0.5$  p.u.

可以看到, 系统的短路容量越小, 在相同的  $I_{DG,P}$  和  $I_{DG,N}$  注入量变化条件下, PCC 点的正序和负序电压波动越大; 在相同的系统短路容量条件下,  $I_{DG,P}$  和  $I_{DG,N}$  注入量变化越大, PCC 的正序和负序电压波动越大。

## 2 配电系统的电压控制技术研究

现有的配电系统电压控制主要分为集中控制(协调电压控制)、分布式控制(有限协调控制)以及集中-分布式控制三种。集中控制利用通信系统建立起集中控制器和全网调压设备之间的联系, 提供全局电压控制; 分布式控制利用调压设备本地信息或其有限的临近设备信息进行电压控制, 强调电压的局部治理, 兼顾一定的全局优化性, 对通信要求较低。集中-分布式控制是一种把集中控制和分布式控制结合起来的控制方式, 兼顾两者的优点, 是一种效果更为优异的控制方式, 它将电压控制分为不同的层级, 各个层级既接受整体控制目标的约束又独立地进行局部的控制和管理<sup>[6-7]</sup>。

### 2.1 分布式电压控制(有限协调电压控制)

分布式电压控制的最大优点就是利用本地信息进行电压控制, 解决了集中电压控制速度慢的缺陷, 且对通信的要求低。在这种控制模式下, DG 基于接入点电压, 控制自身的有功和无功输出, 无需其

他电压控制设备, 仅利用 DG 即可解决自身接入配电网带来的电压水平变化大的问题; 无功补偿专用装置基于本地测量信息进行自动投切及相关的控制。分布式电压控制可以简单地应用在现有的配电控制系统中, 大幅提升配电系统对 DG 的接纳能力, 一般有两种实现方案。

#### (1) 基于无功控制的分布式电压控制方案

DG、同步发电机或者无功补偿专用装置均可通过调节无功实现接入点的本地电压控制。DG 通过调节输出无功可实现对其接入点的电压调节, 对于配电系统中可能出现的大量分布式接入的 DG, 这种基于 DG 无功控制的手段对于改善全网的电压水平是很有效的<sup>[8-10]</sup>。如文献[11]提出一种基于 DG 的分布式无功控制策略, 解决 DG 接入配电网带来的电压波动问题, 在这种控制方式下, 每一个接入配电网的 DG 均能够通过吸收或发出无功, 解决自身输出有功波动带来的出口电压波动问题。在文献[12]中, 作者讨论了两种弱电网环境下解决 DG 接入点电压波动问题的 DG 本地智能控制策略, 一种是基于线性确定关系的控制策略, 另外一种是基于模糊控制器的控制策略, 实时解决出口电压波动问题。另外, 同步发电机通过自动电压调节器(automatic voltage regulator, AVR)也可对其接入点电压进行调节, 现代同步发电机可以主动在单位功率因数输出模式和电压控制模式切换, 实现灵活的运行。

主变压器的分接头也应配合本地无功控制进行调整, 包括变电所的无功补偿器亦可配合, 当然, 这种配合均是在本地无功控制进行后, 根据线路电压水平而选择进行的后续操作, 和集中控制中全部调压设备的全局协同工作是截然不同的。

#### (2) 基于有功控制的分布式电压控制方案

通过调节电源的有功输出亦可改善配电系统电压水平。目前接入配电系统的 DG 和电网是“硬连接”, 即任何情况下都按照额定有功进行输出, 这可能会在用电低谷时造成 DG 接入点乃至全网电压的升高。所以, 将 DG 和电网进行“软连接”是非常有必要的, 即 DG 可根据接入点电压进行有功输出调整, 继而改善配电网的电压水平。

分布式电压控制的有功控制方案和无功控制方案在实际中可以结合使用, 文献[13]给出了一种利用 DG 实现两阶段本地电压控制的方法, 第一阶段利用 DG 无功控制能力进行电压控制, 当无功控制不能满足电压控制要求时, 在第二阶段投入有功控制策略, 进一步调节本地电压, 实现 DG 电压控制能力最大限度地发挥。虽然分布式控制具有无需通信、速度快的优点, 但是在实际应用中存在一些局

限性:①参与分布式电压控制的设备工作强度较大;②仅使用分布式电压控制不能实现全网无功优化,无法解决因无功流动引起的线损问题;③分布式电压控制参与设备之间缺乏协调,可能会出现设备之间的运行冲突,恶化电压控制效果。

## 2.2 集中电压控制(协调电压控制)

集中电压控制的实现需要全配电系统的信息,此时各节点的电气量数据需通过通信系统传输至集中电压控制器,根据通信网络完整性和速度的不同,实现不同复杂性、不同性能的电压控制。集中电压控制涵盖从最简单的基于单一控制逻辑单一被控对象的方案到基于先进优化计算的全网全设备控制方案,相较于基于本地信息的分布式电压控制方案,可以更大幅度地提升配电系统消纳 DG 的能力<sup>[14]</sup>。绝大部分集中电压控制在单一中央控制器完成,仅需将控制信号下发至全网设备,本地控制器仅需增加通信装置接收控制参考值信号,而控制策略无需改变。

集中电压控制一般按照一定优化方案,结合全网信息,通过对全网调压设备的控制实现。优化方案可以通过预先设计的控制逻辑直接生成,或通过优化算法计算生成;全网信息的获取可以直接测量得到,也可以通过部分数据经状态估计得到。

### (1) 基于控制逻辑的集中电压控制方法

这种方法一般适用于简单的配电系统,其运行状态容易预期,传统的辐射式配电系统即可使用。传统辐射式配电网中最简单的电压控制逻辑即当馈线电压偏高时,调节变电所变压器分接头降低源端电压,当馈线电压偏低时,调节主变压器分接头升高源端电压。这种简单的控制逻辑对于传统辐射型配电网来说是行之有效的<sup>[15-16]</sup>。

绝大多数的基于控制逻辑生成的集中电压控制方案都以 DG 和 OLTC 为被控对象。文献[17]提出了一种以 DG 和 OLTC 为被控对象的连续电压控制方法,旨在维持电压水平尽量接近额定值。文献[18]对其进行发展,加入了最低网损的控制目标。文献[19]提出一种首先利用 OLTC 调压,若电压仍不满足要求再投入 DG 配合调压的控制方案。集中电压控制方案亦可仅依靠 DG 完成,如文献[20]提出一种根据电压敏感系数选择被控 DG 进行电压控制的方案,正常情况下 DG 按照单位功率因数输出运行,当电压升高时,对过电压节点具有最大控制能力的 DG 会开启无功吸收模式。

基于控制逻辑实现的集中电压控制方案一般都比较简单,易于实现,一般都是时域上的顺序控制,不会出现控制量不收敛的问题,并且在原理上易于理解,因而对于电网管理者更具吸引力。但是,随

着智能配电系统的发展以及被控设备的增加,控制逻辑也因需要结合电压管理、最低网损和最少设备动作次数等越来越多的控制目标而变得越来越复杂。在这样的情况下,基于优化算法实现的集中电压控制方案就更具优势。

### (2) 基于优化计算的集中电压控制方法

基于优化计算的集中电压控制实质上可以被视为一个混合整数非线性规划问题的求解。求解这个优化问题的首要工作就是,寻找合适的线性化方法简化计算过程。线性化的方法主要有文献[14]提到的线性规划法和文献[21]提到的非线性规划法两类。文献[21]提出了一种基于求解非线性约束方程,通过合理控制变压器分接头和 DG 有功、无功出力实现电压优化控制的方案,非常适合于 DG 高度渗透的主动配电网。文献[22]提出一种重载配电网的电压控制策略,通过线性规划法进行集中优化,实现全网电压的最优控制。文献[23]提出了一种基于非线性规划法对全网 DG 进行有功和无功输出控制、以配电网电压波动最小为目标的最优控制方案。基于优化计算实现的集中电压控制方案可根据电网运行状况随时调整优化目标和限制条件,适合多目标、多变量、时变性强的配电网。

中央集中控制虽然可以解决全局的电压控制问题,但是其在实施过程中依然存在以下几个主要的缺陷:①中央集中控制需要每一个节点均具备通信条件,实用性较差;②集中控制需在每个时间步长内计算潮流解,因而计算压力较大,还可能会出现数据稳定性差的问题;③全局通信的可靠性会伴随配电网规模变大而降低。

## 2.3 集中-分布式控制

集中-分布式电压控制兼具集中电压控制和分布式电压控制的优点。主要的集中-分布式电压控制有基于多代理技术的方法和基于分层控制的方法。

(1) 基于多代理技术的电压控制是一种兼顾集中和分布式两者优势的先进策略,可以以一个中央代理统筹分散分布的代理运行,也可以全部代理对等运行,具有良好的系统适应性和灵活性。文献[24]提出一种应用于三相四线制系统中的三代理结构,分别是 AVR 代理、SVC 代理和静止同步补偿器(Distribution Static Synchronous Compensator, DSTATCOM)代理,实现短时电压控制。文献[25]提出一种四代理结构,分别有两个 SVC 代理和两个 DSTATCOM 代理,旨在对一个大规模配电网进行分区域的电压控制。文献[26]提出一种解决多代理系统各代理之间通信难题的方案,通过引入一个通信专用代理辅助协调各个主代理之间的通信和协

作。但是,多代理技术在实际中的应用推广有两个设计难点,其一是多个代理在系统中的分布结构和相互之间的组织形式的设计,以及局部代理之间内在联系的建立方式;另外一个或多个代理之间的谈判机制以及合作机制的设计。多代理技术的研究还有待完善,其在电压控制中的应用还处于初级阶段。

(2) 分层电压控制同样也是一种结合集中控制和分布式控制优点的控制方式。分层电压控制一般按照控制区域和控制时间尺度进行分层,下层为分布式电压控制,侧重于快速调节电压防止电压偏移,一般在局部分散进行,兼顾全局的调压效果;上层为中央优化电压控制,侧重无功优化和经济性调节,旨在完成全局的无功电压协调优化,实现全网最优运行。常见的分层电压控制一般分为三层。

A. 一级电压控制:本地的毫秒或秒级控制,控制设备是 DG 的电压控制系统(对于同步机型 DG,指的是 AVR 励磁系统,对于逆变型 DG,指的是其控制器)。其目标是实现接入点电压达到参考值或者尽量接近参考值。各设备的一级电压控制参考值由二级电压控制器下发。一级电压控制是设备级的独立控制,不考虑各个设备之间的配合。

B. 二级电压控制:区域的分钟级控制,控制设备是区域内的 SVC, OLTC 等电压控制设备,同时二级控制还会调整区域内各 DG 的参考值。其目标是调整区域电压水平,减小线路上的无功潮流。

C. 三级电压控制:全网的长时间优化控制,控制设备是全网全部可控的电压控制设备。其目标是协调二级电压控制进行全网技术和经济性优化。

分层电压控制不仅是空间上的分层,也是逻辑上和时间上的分层,具有以下两个主要优点:①分层电压控制使得电压控制的分工更加明确。在各分层之间的通信接口建立完毕、信息传递无碍的基础上,各个分层的控制器都有各自明确的功能目标,所有功能可以同时执行;在分层控制中,各个电压控制分区之间是松散耦合的关系,避免了区域控制之间的干扰,电压控制效果不会因不同分区控制速度和延时的不同而相互影响恶化。②分层电压控制降低了层与层之间的依赖性,可以根据电网规模不同对控制层级进行扩展,并且各个功能模块当定义好统一的接口后即可被各个控制层级调度复用,无需在各个层级上重复开发相同的功能模块。

分层电压控制的结构明确,并且很容易将新的控制策略集成在不同的功能层上,结合了集中控制和分布式控制的优点,且不像多代理技术一样需要复杂的谈判逻辑、合作逻辑及通信网络,因而在智能配电系统中得到了广泛的应用。

### 3 智能配电系统分区电压控制技术

在分层电压控制体系中,第二级控制——分区电压控制是提高系统电压水平、提升系统电压调节速度、保障系统电压稳定的中坚环节,同时也是连接中央电压控制和本地电压控制的关键环节。对维持区域电压水平,提高全网电压控制效果具有重要的意义<sup>[27-28]</sup>。近年来,迅速发展的电力电子技术和控制技术为智能配电系统分区电压控制的研究带来了新的契机。本部分将分别针对微网和主动配电网分区电压控制进行针对性的回顾与评述。

#### 3.1 微网分区电压控制的研究

基于微网中大量分散接入的 DG 进行分区电压控制已经成为了目前主流的微网分区电压控制方案<sup>[29-34]</sup>。文献[29]提出一种分层电压控制方案,一级控制为基于 DG 的下垂控制,二级控制为修正第一级电压调节误差的分区控制,三级控制为调节微网和外部电网功率交换的优化控制。在文献[29]中,二级控制在一级控制结束后进行,通过修正 DG 下垂控制的参考值,实现区域电压二次恢复,具有良好的精度。文献[30]详细分析了目前微网控制系统的设计方案的异同,提出了一种基于 IEC 62246 的微网分层电压控制系统,但其分区电压控制由于 DG 容量的限制,在响应速度上慢于一级控制。文献[29-30]所提的分区电压控制均是针对三相平衡电压,难以应对电压不平衡问题,针对这个问题,文献[35]提出了一种基于 DG 阻抗重塑技术的不平衡电压控制策略,其核心是通过建立电压控制目标和 DG 输出导纳之间的联系,改变负序功率在微网中线路上的流动方向,以实现降低 DG 出口电压不平衡度的目标,但其电压控制环节中引入了扰动变量,导致电压调节的准确性大受影响。文献[36]针对文献[35]的问题,提出了一种对 DG 接入点电压进行直接控制的方法,该方法有效的解决了电压控制环节中出现扰动的问题,并且由于直接对负序电压进行补偿,控制效果非常优异,但其问题是没有考虑多个 DG 之间的负序无功分配问题。

综上,目前微网分区电压控制主要存在以下问题。

(1) 目前的微网基于 DG 的分区电压控制多是在 DG 本地电压控制结束之后相继进行的二次电压调整,虽然将 DG 纳入了微网分层电压控制体系中,但是没有真正的发挥 DG 快速响应的特点,制约了分区电压控制对更短时间尺度电压问题的有效抑制。因而有必要研究提升分区电压控制速度的方案。

(2) 分区电压控制缺少对 DG 治理电压不平衡

功能的研究, 已有的研究成果没有很好的解决负序无功在多个 DG 之间的分配问题, 缺少合理的多 DG 电压不平衡治理方案。

(3) 国内外学者针对微网分区电压控制的研究, 没有考虑分区电压控制和微网已有的安全防御体系的配合和共存问题。在研究微网安全防御体系时, 主要围绕保护和紧急控制的设计, 实现故障区域快速隔离并形成区域型孤岛<sup>[37-40]</sup>, 而未考虑此时可能出现的复杂电压波动问题<sup>[41]</sup>; 在研究微网分区电压控制时, 仅将关注点聚集在如何进一步提高电压控制的效果和快速性, 而未考虑微网故障时的快速电压控制对微网保护和紧急控制的影响。微网保护和紧急控制以维持全局安全为目标, 电压控制以维持局部电压为目标, 两者存在“点-面”矛盾。微网的保护和紧急控制、微网电压控制之间长期割裂开来的研究现状, 给微网电压控制的实用化和推广带来巨大的障碍。因而, 很有必要研究将微网分区电压控制纳入到微网安全防御体系的方案。

### 3.2 主动配电网分区电压控制的研究

大量 DG 分散接入给 ADN 的电压控制带来极大的困难, 目前的研究成果表明, 有效的区域自治电压调节、充分发挥 DG 的灵活控制优势是解决这个难题的两个关键思路<sup>[42-45]</sup>, 对 ADN 进行分区电压控制尽管给中央控制系统带来了海量数据分析处理的压力, 但它创造了电压弱耦合区域分散自治的局面, 极大的提高了电压控制的效果<sup>[42]</sup>。

在 ADN 电压控制分区划分方面, 不同于输电网经常使用的按照电气距离和无功耦合程度进行的电压控制分区划分方法, ADN 一般按照物理结构进行分区。如文献[46]针对含有多微网的 ADN, 提出一种分层分区电压控制方案, 将每个微网作为一个电压控制分区, 并在其中装设分区控制器, 实现微网内部的电压控制, 各个微网分区的电压控制相互解耦, 由中央控制执行统一协调。文献[47]提出一种将 ADN 中的用户和负荷根据所在位置以及接线情况进行电压控制分区划分的方法, 一般的每个 ADN 上的母线及其所挂 DG 和负荷为一个单独分区, 如果某一个母线上连接的 DG 和负荷较少, 可以将其并入临近母线的分区, 最终形成各个分区的 DG、负荷容量基本一致的分区方案, 类似分区方案也在文献[48]提到。文献[43]提到一种在 ADN 馈线上按照有载调压变压器 OLTC 或 SVR 进行天然分段的电压控制分区划分方案。按照物理结构对 ADN 进行电压控制分区划分的方法满足分区控制的需求且可操作性强, 得到了广泛应用。

对 ADN 进行电压控制分区后, 还可利用自适

应的分区合并提高 ADN 运行灵活性。文献[49]提出一种分层分区电压控制策略, 依据电压敏感系数以及 DG 的无功储备进行自适应分区, 确保各个分区之间的低无功交换水平, 实现各分区独立完成电压控制。文献[43]提出一种考虑了不同设备的特点、优先级以及局限性的通用电压控制分区划分和自适应合并的方法, 适用于各种配电网拓扑。文献[43]提出的电压控制分区是固定的, 避免了实时分区调整带来的复杂性, 但是在相邻两个或多个分区出现类似的电压波动时, 这几个分区可以自适应合并成为一个新的分区, 而各个子分区的控制依然是独立的, 这就将电压问题限制在 ADN 一个较大的分区内, 仅需要对这个大分区内的设备进行控制。ADN 电压控制分区的自适应合并兼具易操作性和灵活性, 需要注意的主要是分区合并之后各子分区主电压调节设备的配合问题。

对 DG 进行灵活控制是解决 ADN 电压控制难题的重要手段。文献[44]的研究发现增加 DG 在 ADN 中的接入数量, 并充分利用 DG 的无功输出能力, 可以有效的抑制电压暂降程度。文献[20]通过在 ADN 中控制 DG 输出的功率因数实现了多 DG 协调对关键母线电压进行控制, 但是该方案响应速度慢, 缺少动态电压控制的能力。文献[45]提出一种利用 DG 进行 ADN 电压跌落支撑的控制方案。由于 DG 容量有限, 因而仅利用 DG 进行 ADN 分区电压控制往往难以取得最好的效果, 因此一些学者提出了将 DG 联合传统电压控制装置如有载调压变压器 OLTC, SVR, SC 等进行综合分区电压控制的方案。文献[50]提出一种使用 DG, OLTC 和 SVR 进行在线分区电压控制的 ADN 电压控制策略, 并应用在一个实际的 ADN 中。该策略通过对设备投入优先级进行控制减小了调压设备之间的冲突, 同时最大限度发挥 DG 的调压作用。文献[18]提出一种 OLTC 和 DG 联合进行的分区电压控制的策略。该策略是只需要本地测量量就可通过估计器得到节点电压控制参考值, 无需远端信号测量设备和通信设备, 相比较传统的基于全网测量量的全局无功优化方法, 经济性更好。

综上, 目前主动配电网分区电压控制主要存在以下问题:

(1) 目前 ADN 的分区电压控制一般基于全区域电气量信息, 通过无功优化得到分区内各个设备的控制参考值进行控制, 响应速度慢, 难以满足动态电压控制的要求。

(2) 大多数的 ADN 的分区电压控制是基于 OLTC, SVR, DG 等不同响应速度的设备, 各种设

备在动态性能上的差异会引起在进行电压控制时的相互影响,虽然已有文献提出通过综合配合避免各个设备之间的影响,但是这些控制策略由于过于复杂,在实际应用中有难度。

#### 4 结论和展望

智能配电系统正经历由系统外单一电源供电向系统内多电源分布式供电的转变。分布式电源的大规模接入,形成了智能配电系统独特的“集中-分散”供电运行方式。然而,智能配电系统对分布式电源多采用被动式的管理策略,不仅使配电系统面临严重的潮流不确定、电压快速波动等运行难题,还制约着分布式电源渗透率的进一步提高。对分布式电源进行主动管理提升智能配电系统电压控制能力是解决这些问题的有效途径。从本文的研究看到,目前的智能配电系统分区电压控制没有有效利用分布式电源大量“集中-分散”接入的结构优势,这阻碍了智能配电系统电压控制速度的提升和分布式电源渗透率的提高。因而,未来的研究还应充分利用 DG 大量“集中-分散”接入智能配电系统的供电结构对 DG 采取主动控制,研究集成动态电压控制功能的智能配电系统分区电压控制方案,这对提升系统电压控制速度,进一步提高 DG 渗透率有重要的意义。具体的可着眼于以下几个方面:

(1) 在微网层面研究基于 DG 本地控制的分区电压控制方案,解决微网电压波动和不平衡问题。同时考虑如何将微网分区电压控制纳入到微网安全防护体系中。

(2) 在主动配电网层面研究结合 DG 快速调节能力和原有电压控制设备的多时间尺度电压控制方案,解决配电网不同时间尺度下的电压控制难题。

(3) 目前的分区电压控制主要采用基于物理结构的电压控制分区划分方法,这种分区方法操作性强,但是面对未来更为复杂的智能配电系统结构,还应继续研究更为灵活的自适应分区方法。

#### 参考文献

- [1] 王成山,王丹,周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 2-9.  
WANG Chengshan, WANG Dan, ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 2-9.
- [2] 崔红芬,汪春,叶季蕾,等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.  
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [3] MITHULANANTHAN N, CANIZARES C A, REEVE J, et al. Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 786-792.
- [4] KAYK M, MILANOVI J V. Reactive power control strategies for DFIG-based plants[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2): 389-396.
- [5] 陈楷,孙建华,王卉. 节能调度模式下的河南电网 AGC 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 58-61.  
CHEN Kai, SUN Jianhua, WANG Hui. The AGC strategy of Henan Power Grid for energy-saving dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 58-61.
- [6] TONKOSKI R, LOPES L A C, EL-FOULY T H M. Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 139-147.
- [7] BORGHETTI A, BOSETTI M, GRILLO S, et al. Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources[J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(3): 313-322.
- [8] 王旭强,刘广一,曾沅,等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.  
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [9] 陈春,汪飒,刘蓓. 一种智能配电网安全运行控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 357-366.  
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei. A method of safe operation control of smart distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 357-366.
- [10] 王威,黄大为. 含可调度分布式电源的配电网综合优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 429-433.  
WANG Wei, HUANG Dawei. The coordination optimization of distribution networks with dispatched distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 429-433.
- [11] CARVALHO P M S, CORREIA P F, FERREIRA L A F. Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 766-772.
- [12] KIPRAKIS A E, WALLACE A R. Maximising energy capture from distributed generators in weak networks[J].

- IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(5): 611-618.
- [13] SANSAWATT T, OCHOA L F, HARRISON G P. Integrating Distributed Generation Using Decentralised Voltage Regulation[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, MN, 2010: 1-6.
- [14] LIEW S N, STRBAC G. Maximizing penetration of wind generation in existing distribution networks[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(3): 256-262.
- [15] 李晓东, 刘广一, 贾红杰, 等. 基于电压调节的分布式可再生能源发电功率波动平抑策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 76-82.
- LI Xiaodong, LIU Guangyi, JIA Hongjie, et al. Mitigation of output power fluctuations for distributed renewable energy generation based on voltage regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 76-82.
- [16] 潘琪, 徐洋, 高卓. 含分布式光伏电站接入的配电网三级电压控制系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 64-68.
- PAN Qi, XU Yang, GAO Zhuo. Design of three level voltage control system in distribution network with the connection of many distributed photovoltaic power plants[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 64-68.
- [17] CALDON R, SPELTA S, PRANDONI V, et al. Coordinated voltage regulation in distribution networks with embedded generation[C] // 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005), Turin, Italy, 2005: 1-4.
- [18] BIGNUCOLO F, CALDON R, PRANDONI V. Radial MV networks voltage regulation with distribution management system coordinated controller[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(4): 634-645.
- [19] PFAJFAR T, PAPIĆ I, BLETTERIE B, et al. Improving power quality with coordinated voltage control in networks with dispersed generation[C] // 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007), Barcelona, 2007: 1-6.
- [20] BRENNAM, DE BERARDINIS E, DELLI Carpini L, et al. Automatic distributed voltage control algorithm in smart grids applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 877-885.
- [21] VIEHWEIDER A, BLETTERIE B, DE CASTRO D B. Advanced coordinated voltage control strategies for active distribution network operation[C] // The 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2009), Prague, Czech Republic, 2009: 1-4.
- [22] YU L, CZARKOWSKI D, DE LEON F. Optimal distributed voltage regulation for secondary networks with DGs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 959-967.
- [23] STIFTER M, BLETTERIE B, BRUNNER H, et al. DG DemoNet validation: voltage control from simulation to field test[C] // 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe 2011), Manchester, 2011: 1-8.
- [24] WANG H F. Multi-agent co-ordination for the secondary voltage control in power-system contingencies[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(1): 61-66.
- [25] WANG H F, LI H, CHEN H. Coordinated secondary voltage control to eliminate voltage violations in power system contingencies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 588-595.
- [26] TOUSI M R, HOSSEINIAN S H, JADIDINEJAD A H, et al. Multi-agent based voltage control of STATCOMs to enhance elimination of voltage disturbances in power system contingencies[C] // 43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2008), Padova, 2008: 1-5.
- [27] 刁浩然, 杨明, 陈芳, 等. 基于强化学习理论的地区电网无功电压优化控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 408-414.
- DIAO Haoran, YANG Ming, CHEN Fang, et al. Reactive power and voltage optimization control approach of the regional power grid based on reinforcement learning theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 408-414.
- [28] 李昌超, 鲁宝春, 陈凤英, 等. 基于向量相似度的无功电压分区方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 14-18.
- LI Changchao, LU Baochun, CHEN Fengying, et al. Reactive power voltage control partitioning based on vector similarity[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 14-18.
- [29] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids — a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [30] PALIZBAN O, KAUHANIEMI K, GUERRERO J M. Microgrids in active network management — part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 36: 428-439.
- [31] BIDRAM A, DAVOUDI A. Hierarchical structure of microgrids control system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1963-1976.
- [32] MOHAMED Y A I, RADWAN A A. Hierarchical control

- system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 352-362.
- [33] GUERRERO J M, CHANDORKAR M, LEE T, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids — part I: decentralized and hierarchical control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1254-1262.
- [34] VASQUEZ J C, GUERRERO J M, SAVAGHEBI M, et al. Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1271-1280.
- [35] PO-TAI C, CHIEN-AN C, TZUNG-LIN L, et al. A Cooperative imbalance compensation method for distributed generation interface converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2): 805-815.
- [36] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 797-807.
- [37] 黄文焘, 邵能灵, 唐跃中. 交流微电网系统并网保护分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 114-120.  
HUANG Wentao, TAI Nengling, TANG Yuezhong. Analysis of interconnection protection in AC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 114-120.
- [38] 林湘宁, 袁硕, 翁汉琮, 等. 实现有限选择性的低压微电网区域保护[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 149-154.  
LIN Xiangning, YUAN Shuo, WENG Hanli, et al. Study on finite selectivity based regional protection suitable for low-voltage microgrids[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 149-154.
- [39] 童荣斌, 牟龙华, 庄伟. 微电网的有限区域集成保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 90-96.  
TONG Rongbin, MU Longhua, ZHUANG Wei. Limited area integrated protection of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 90-96.
- [40] 李永丽, 金强, 李博通, 等. 低电压加速反时限过电流保护在微电网中的应用[J]. 天津大学学报, 2011, 44(11): 955-960.  
LI Yongli, JIN Qiang, LI Botong, et al. Application of inverse-time overcurrent protection based on low voltage acceleration in micro-grid[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(11): 955-960.
- [41] 兴胜利, 孙成, 杨莉, 等. 微电网紧急控制研究综述[J]. 华东电力, 2012, 40(10): 1758-1762.  
XING Shengli, SUN Cheng, YANG Li, et al. Overview of microgrid emergency control[J]. East China Electric Power, 2012, 40(10): 1758-1762.
- [42] REPO S, LU S, POHO T, et al. Active distribution network concept for distributed management of low voltage network[C] // 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE 2013), Lyngby, 2013: 1-5.
- [43] BARR J, RITWIK M. Integration of distributed generation in the volt/var management system for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 576-586.
- [44] ROGERS K M, KLUMP R, KHURANA H, et al. An authenticated control framework for distributed voltage support on the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 40-47.
- [45] MIRET J, CAMACHO A, CASTILLA M, et al. Control scheme with voltage support capability for distributed generation inverters under voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5252-5262.
- [46] MADUREIRA A G, LOPES J A P. Coordinated voltage support in distribution networks with distributed generation and microgrids[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(4): 439-454.
- [47] LO C, ANSARI N. Decentralized controls and communications for autonomous distribution networks in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 66-77.
- [48] DI FAZIO A R, FUSCO G, RUSSO M. Decentralized control of distributed generation for voltage profile optimization in smart feeders[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1586-1596.
- [49] PACHANAPAN P, ANAYA-LARA O, DYSKO A, et al. Adaptive zone identification for voltage level control in distribution networks with DG[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1594-1602.
- [50] RANAMUKA D, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M. Online voltage control in distribution systems with multiple voltage regulating devices[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 617-628.

收稿日期: 2015-12-29

作者简介:

张玮亚(1988-), 男, 博士, 主要从事电力系统保护与控制、配电系统设计、主动配电网技术的研究; E-mail: zhangweiyatju@126.com

王紫钰(1987-), 女, 硕士, 主要从事调度自动化技术、分布式电源和储能技术的研究。E-mail: jsepc\_wangziyu@126.com

(编辑 魏小丽)