

# 分布式电源的本地电压控制策略

魏昊焜<sup>1,2</sup>, 刘健<sup>1,2</sup>, 高慧<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 国网陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054; 3. 国网西安供电公司, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 分布式电源(DG)发展迅速,给配电网带来的影响日益显著,其中对配电网电压的影响尤其明显。研究了配电网中DG的本地电压控制策略。首先,证明了配电网中DG接入点最容易出现电压越限,说明了本地电压控制的可行性。然后,提出了基于无功调节和有功调节的本地电压控制策略,推导出本地无功控制和本地有功控制的调节量表达式,得到调节量为节点电压测量值的线性函数,并给出本地电压控制策略的实现方法。最后,对IEEE 33节点配电系统进行算例分析,结果表明所提的本地电压控制策略可有效地消除DG接入带来的电压越限问题。

**关键词:** 分布式电源; 本地控制; 配电网; 电压偏差

**中图分类号:** TM 732

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.006

## 0 引言

随着技术的进步和政策的扶持,我国分布式发电产业发展迅速,分布式光伏发电的发展尤其迅猛,截至2015年底,我国分布式光伏发电累计装机容量已经达到6.06 GW,其中新增1.39 GW,同比增长29.8%<sup>[1]</sup>。分布式发电产业的快速增长,对社会经济发展起着良好的推动作用,但同时也给电网的安全稳定运行带来了隐患。由于分布式电源(DG)装机容量占总装机容量的比例仍然较低,对主网的影响仍十分有限,但对局部配电网的影响日益突出。DG的接入对配电网的影响<sup>[2]</sup>主要表现在电能质量<sup>[3-4]</sup>、继电保护<sup>[5]</sup>和可靠性<sup>[6]</sup>等方面。由于DG一般经过升压变压器并网,因此其谐波影响问题并不突出;由于DG容量不大且多为逆变器或异步机并网型,因此其对短路电流和继电保护的影响较小也容易应对;影响DG消纳的关键在于因其引起的电压偏高问题,因此应对DG接入对配电网电压的影响、提高其消纳能力成为当前的一个研究热点。

文献[7-8]通过对电源、负荷和配电网的主动协调控制和管理提高配电网对DG的消纳能力,为提高配电网对DG的消纳能力提供了一种可行的解决方案,是未来配电网的发展方向之一。但该控制技术依赖高速可靠的通信和先进的计量设施,而我国配电网的信息化建设基础相对薄弱,短期内难以满足要求。另外,过分依赖高速可靠的通信通道,也会使配电网十分脆弱而不够安全可靠。基于配电网建设现状,采取简单有效的措施以提高配电网对DG的消纳能力显得十分必要和迫切。

本地控制技术是根据接入点的电气量对配电网

中的可控元件进行就地控制的技术,因不进行多个对象的协调控制而不依赖通信手段(甚至可以不建设通信通道),仅在控制点加装本地控制组件即可。现阶段,对配电网中DG实施有效的本地控制是提高配电网运行水平和对DG消纳能力的切实可行的解决方案。

国外许多学者已经展开了含DG配电网的本地电压控制研究。文献[9]对基于逆变器并网的DG的本地电压控制展开研究,建立两自由度的控制器动态模型,可使DG具有不间断电源的运行特性。文献[10]提出一种电压自适应控制器以实现含光伏发电配电网的本地电压控制,并通过电磁仿真验证所提方法的有效性。文献[11]针对高渗透率分布式光伏接入的配电网,提出了基于热泵式热水器的本地电压控制策略。文献[12]提出基于光伏发电和储能的本地电压控制技术,通过控制储能的充放电和光伏的弃光来实现电压的控制目标。但现有的研究大多基于储能装置,这会大幅增加建设成本,使得方案的经济可行性较低。因此,简单有效的本地控制策略还有必要进一步深入研究。

## 1 DG接入对配电网局部电压的影响

不失一般情况,考虑配电网主馈线如图1(a)所示,图中0、1、2、 $\dots$ 、 $i$ 、 $j$ 、 $k$ 、 $\dots$ 、 $n$ 为节点序号,节点0代表母线,设于 $j$ 点接入DG, $i$ 和 $k$ 分别为其上游和下游相邻的无DG接入的节点,沿线电压幅值分布如图1(b)所示。

设母线额定电压为 $U_N$ , $\Delta U_y$ 为综合考虑DG和负荷时节点较母线的电压变化幅值, $\Delta U_{yz}^L$ 为负荷在节点 $y$ 和 $z$ 之间造成的电压降落幅值, $\Delta U_{yz}^D$ 为DG在节点 $y$ 和 $z$ 之间造成的电压升高幅值。由于实际负

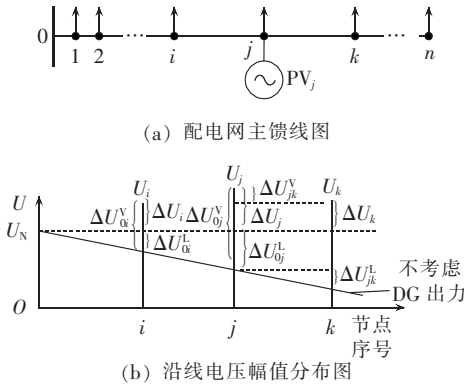


图 1 DG 接入位置及电压偏差示意图

Fig.1 DG integration location and voltage deviation

荷的功率因数较高,因此总是引起电压幅值降落,即可以认为有  $\Delta U_{je}^L > 0$ ; 由于 DG 引起的电压幅值升高是限制其接入容量的瓶颈,因此分析中仅考察其引起电压幅值升高的情形,也即  $\Delta U_j > 0, \Delta U_{je}^V > 0$ 。

因此,节点  $k$  的电压偏差可表示为:

$$\Delta U_k = \Delta U_j - \Delta U_{jk}^L < \Delta U_j \quad (1)$$

节点  $j$  的电压偏差可表示为:

$$\Delta U_j = \Delta U_{0j}^V - \Delta U_{0j}^L < \Delta U_{0j}^V - \Delta U_{0j}^{L(j,n)} \quad (2)$$

其中,  $\Delta U_{0j}^{L(j,n)}$  为节点  $j$  下游的负荷在母线和节点  $j$  之间造成的电压降落幅值。

由于  $\Delta U_j > 0$ , 因此有:

$$\Delta U_{0j}^V - \Delta U_{0j}^{L(j,n)} = L_{0j} \Delta u_{(j,n)} > \Delta U_j > 0 \quad (3)$$

其中,  $L_{0j}$  为母线到节点  $j$  的距离;  $\Delta u_{(j,n)}$  为 DG 与节点  $j$  下游的负荷在母线和节点  $j$  之间造成的单位长度电压降落幅值。则有:

$$\Delta u_{(j,n)} > 0 \quad (4)$$

节点  $i$  的电压偏差可表示为:

$$\Delta U_i = \Delta U_j - L_{ij} \Delta u_{(j,n)} < \Delta U_j \quad (5)$$

其中,  $L_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的距离。

综上所述,当配电网中存在电压越上限风险时, DG 接入点的电压最高。

将配电网中负荷看作恒功率节点,则配电网为线性系统。于是,对于馈线上接入多个 DG 的情形,根据叠加定理<sup>[13]</sup>,各个 DG 接入点的电压抬升作用最大,沿线在各个 DG 的接入点形成多个<sup>[13]</sup>电压极大值点,只需要消除 DG 接入点处电压偏差越上限的状况,即可消除整个配电网电压偏差越上限的状况,这为 DG 的本地电压控制可行性提供了理论基础。

## 2 本地电压控制策略

DG 并网方式可以分为电力电子逆变器接口和常规旋转电机接口,由于前者性能更加优越,所以目前主要并网装置是并网逆变器<sup>[14]</sup>,其输出有功功率通常采用最大功率点追踪(MPPT)控制,而无功功率通常采用脉宽调制(PWM)控制,控制方式可以分为

恒功率因数、恒电压、有功和无功解耦控制 3 类<sup>[15]</sup>。并网逆变器灵活的控制方式为实现本地电压控制提供了极大便利。

### 2.1 本地电压控制策略

本地电压控制策略只需针对较大容量的 DG 即可,不必借助通信网络和协调控制,而仅仅根据 DG 本地采集到的接入点实时电压信息,对其输出的无功功率或有功功率进行本地调节,以满足轻载或重载条件下的电压偏差越上限的要求。

由于调节无功功率对电压幅值的调节效果比较明显,而且为了充分利用自然资源提供有功功率和保护 DG 业主的利益,本地控制宜在保证有功功率的前提下,在剩余容量允许的范围内优先调节 DG 的无功功率,在无功功率调节到剩余容量极限还不能解决电压偏差问题(或该 DG 只能提供有功功率)的情况下,再对 DG 的有功功率进行调节。为了避免各个 DG 之间出现无功振荡现象,并且考虑到影响 DG 消纳能力的主要矛盾是接入点电压越上限问题,因此本地控制中只考虑令各个 DG 根据需要适当提供容性无功功率支撑,即  $Q_{DG} < 0$ 。

本文所提出的控制策略按固定时间间隔对 DG 的出力进行调整。当接入点电压越上限时进行无功功率调节并在有必要时配合以有功功率调节以消除电压越限;当接入点不出现电压越上限时,计算该点实时可继续接纳的 DG 的有功功率,并释放相应的受限上网出力以实现最大化接纳 DG;另外在电压不越限的条件下调节并网的无功功率,以减小 DG 无功功率带来的损耗并释放无功功率所占用的并网逆变器容量。

### 2.2 本地无功控制与本地有功控制

#### 2.2.1 本地无功功率调节

(1) 电压越限时的本地无功功率调节。

设节点  $m$  处 DG 当前的无功功率输出为  $Q_{DG,m}$ , 该处观测到的电压偏差为  $\Delta U_m\%$  ( $\Delta U_m\% = (U_m - U_N) \div U_N \times 100\%$ ,  $U_m$  为节点  $m$  处测量电压), 则当  $\Delta U_m\%$  越上限  $\Delta U_s^+\%$  和越下限  $\Delta U_s^-\%$  时,可对该 DG 的无功功率进行调节。

以  $\Delta U_m\%$  越上限的情形为例进行分析,由叠加定理可知,调整后的电压偏差  $\Delta U_m^-\%$  为:

$$\Delta U_m^-\% = \Delta U_m\% + \frac{\Delta Q_{DG,m} \sum_{i=0}^m X_i}{U_N^2} \quad (6)$$

其中,  $\Delta Q_{DG,m}$  为节点  $m$  处 DG 的无功调节量;  $X_i$  为第  $i$  段线路的电抗值。

期望  $\Delta U_m^-\% < \Delta U_s^+\%$ , 则最小无功调节量为:

$$\Delta Q_{DG,m} = -\frac{U_N^2}{\sum_{i=0}^m X_i} U_m + (\Delta U_s^+ \% + 1) \frac{U_N^2}{\sum_{i=0}^m X_i} = -a(U_m - c) \quad (7)$$

其中,  $a = U_N^2 / \sum_{i=0}^m X_i$ ,  $c = \Delta U_s^+ \% + 1$ , 对于给定的配电网,  $a$  和  $c$  都是常量;  $U_m$  可直接测量得到。

本轮调节后, 该 DG 的无功功率出力为:

$$Q_{DG,m}^{(k+1)} = Q_{DG,m}^{(k)} + \alpha \Delta Q_{DG,m} \quad (8)$$

其中, 上标  $\langle k \rangle$  和  $\langle k+1 \rangle$  分别表示第  $k$  轮和第  $k+1$  轮调节;  $\alpha$  为范围为 0~1 的参数, 用来防止过于剧烈的调整。

若  $Q_{DG,m}$  超过了 DG 的能力, 即:

$$|Q_{DG,m}| > Q_{m,\max} = \sqrt{S_m^2 - P_{m,\max}^2} \quad (9)$$

则令:

$$|Q_{DG,m}| = Q_{m,\max} \quad (10)$$

其中,  $Q_{m,\max}$  为当前节点  $m$  处 DG 所能提供的最大无功功率;  $S_m$  为该 DG 的容量;  $P_{m,\max}$  为最大功率点跟踪方式下该 DG 的有功出力。

为了避免 DG 间无功振荡, 可采取避免 DG 发出容性无功功率的措施, 即若  $Q_{DG,m} > 0$ , 则令:

$$Q_{DG,m} = 0 \quad (11)$$

DG 的无功功率对于减少电压偏差的作用可以根据式(6)计算得出, 但尚未调整到位, 剩余部分电压偏差需要调节有功功率来配合完成。

(2) 电压处于正常范围时的本地无功功率调节。

若  $|Q_{DG,m}| < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为给定的极小值), 则不进行无功功率调节; 否则, 根据当前量测数据和当前电压与电压上限的差, 由式(7)计算出  $\Delta Q_{DG,m}$ , 按照式(8)—(11)调节 DG 的无功功率输出。

### 2.2.2 本地有功功率调节

(1) 电压偏差越限时的本地有功功率调节。

设节点  $m$  处 DG 当前的有功功率输出为  $P_{DG,m}$ , 该处观测到的电压偏差为  $\Delta U_m \%$ , 与无功控制的推导过程类似, 可得最小有功调节量为:

$$\Delta P_{DG,m} = -b(U_m - c) \quad (12)$$

其中,  $b = U_N^2 / \sum_{i=0}^m R_i$ ,  $R_i$  为第  $i$  段线路的电阻值,  $c$  同式(7),  $b$  和  $c$  都是常量;  $U_m$  可直接测量得到。

本轮调节后, 该 DG 的有功功率出力为:

$$P_{DG,m}^{(k+1)} = P_{DG,m}^{(k)} + \beta \Delta P_{DG,m} \quad (13)$$

其中,  $\beta$  为范围为 0~1 的参数, 作用同式(8)中的  $\alpha$ 。该 DG 的有功功率出力能力范围为:

$$0 \leq P_{DG,m} \leq P_{m,\max} \quad (14)$$

若  $P_{DG,m}$  超过了 DG 的最大或最小有功出力能力, 则令  $P_{DG,m} = P_{m,\max}$  或  $P_{DG,m} = 0$ 。

(2) 电压处于正常范围时的本地有功功率调节。

为了充分利用清洁能源, 当电压处于正常范围

时, 若还有继续增大 DG 有功功率输出的潜力, 则应调节 DG 接入电网的有功功率, 尽量发挥其潜力。

为了保证调节后的电压仍满足要求, 增大的有功功率不应该超过根据实时观测信息由式(12)所得的  $\Delta P_{DG,m}$ , 由此可得该 DG 的有功功率出力为:

$$P_{DG,m}^{(k+1)} = P_{DG,m}^{(k)} + \beta \min \{ \Delta P_{DG,m}, \Delta P_p \} \quad (15)$$

其中,  $\Delta P_p$  为该 DG 可增大的有功功率;  $\beta$  与式(13)中相同, 亦可根据实际情况选取不同的值。

### 2.3 本地电压控制的实现

配电网中若有多处 DG 并网点处安装本地电压控制装置, 各处本地控制装置各自以固定的时间间隔自动执行, 各本地控制装置之间无需同步。本地电压控制装置的单轮控制流程如图 2 所示。在一轮本地控制启动后, 若监测到电压越上限, 则优先执行该轮电压偏差越限时的本地无功功率控制, 若仍存在越限, 则执行该轮电压偏差越限时的本地有功功率控制; 若监测到电压越下限, 则优先执行该轮电压偏差越限时的本地有功功率控制, 若仍存在越限, 则执行该轮电压偏差越限时的本地无功功率控制; 若监测到电压在正常范围, 则优先执行该轮电压处于正常范围时的本地有功功率控制, 若  $|Q_{DG}| > \varepsilon$ , 则执行该轮本地无功功率控制。如此反复进行, 不断跟踪 DG 出力变化和负荷变化, 进行电压调节。

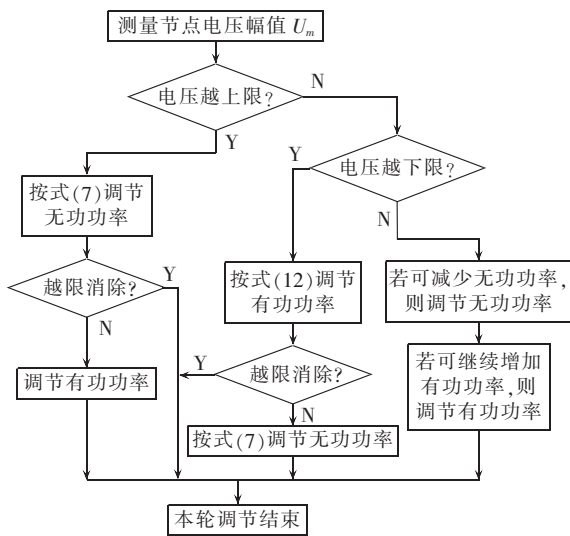


图 2 单轮本地电压控制流程图

Fig.2 Flowchart of local voltage control as single round

值得注意的是, 在消除电压越上限时, 由式(7)所求得的是实现控制目标的最小调节量, 在实际应用中为了保证控制的稳定性和鲁棒性, 控制目标应略低于配电网运行要求的电压上限值。另外, 实际应用中可同时加入积分环节以增加控制系统的稳定性。

### 3 算例分析

本文采用 IEEE 33 节点配电网为算例, 验证所

提出本地电压控制策略的有效性。IEEE 33 节点配电网的拓扑结构如图 3 所示,有 32 条支路,网络首端电压为 12.66 kV,总负荷为  $(3.715+j2.300)\text{MV}\cdot\text{A}$ ,负荷大致均匀分布于各负荷节点,详细参数见文献[16]。主馈线和分支馈线上接入的各 DPV 额定容量分别为 0.75 MW<sub>p</sub> 和 0.6 MW<sub>p</sub>。在计算中采用标幺制,基准容量为 1 MV·A,基准电压为 12.66 kV。电压偏差上下限标准要求为  $\pm 7\%$ <sup>[17]</sup>,参数  $\alpha$  和  $\beta$  取为 0.8,  $\varepsilon$  取为  $1\times 10^{-4}$ ,考虑到调节的裕度, $\Delta U_s^+\%$  取为 6.5%, $\Delta U_s^-\%$  取为 -6.5%,本地控制时间间隔取为 5 s。

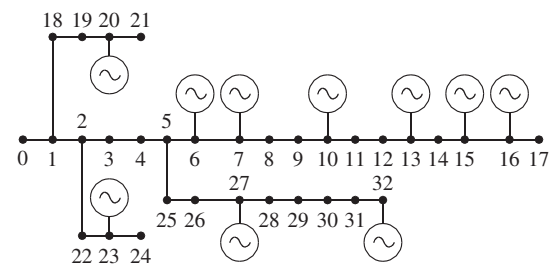


图 3 测试系统拓扑图  
Fig.3 Topology of test system

计算式(7)和式(12)中的参数得到各分布式光伏的控制参量如表 1 所示。

表 1 控制参量  
Table 1 Control parameters

| 光伏<br>接入点 | 控制参量     |          | 光伏<br>接入点 | 控制参量     |          |
|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|           | <i>a</i> | <i>b</i> |           | <i>a</i> | <i>b</i> |
| 6         | 79.96    | 68.54    | 16        | 18.71    | 15.51    |
| 7         | 71.57    | 52.55    | 20        | 78.67    | 73.86    |
| 10        | 42.35    | 30.12    | 23        | 121.80   | 82.86    |
| 13        | 27.75    | 20.80    | 27        | 62.43    | 43.35    |
| 15        | 23.41    | 17.73    | 32        | 29.78    | 24.16    |

为了更好地验证所提的控制策略,选取电网运行中 4 种典型的配电网状态变化情景,如表 2 所示(表中数据均为标幺值)。系统初始状态中,各节点的负荷为 IEEE 33 节点配电网原始数据,各处 DPV 出力均为 0.55 MW,此时无电压越限,系统中电压最高处电压为 1.06 p.u.。情景 1 与初始状态相比,负荷不变,但因云移动露出太阳,光照迅速增强,主馈线各 DPV 最大可用有功出力为 0.725 MW,分支馈线各 DPV 最大有功出力为 0.6 MW;情景 2 反映云移动再次遮住太阳,即在情景 1 的基础上恢复到系统初始状态;情景 3 与初始状态相比,仅负荷等比例减

表 2 4 种典型情景的参数  
Table 2 Parameters of 4 typical scenarios

| 情景         | 可用 DPV 出力 |       | 各负荷   |       |
|------------|-----------|-------|-------|-------|
|            | 前一状态      | 当前状态  | 前一状态  | 当前状态  |
| 1.DPV 出力增加 | 5.500     | 6.750 | 3.715 | 3.715 |
| 2.DPV 出力减小 | 6.750     | 5.500 | 3.715 | 3.715 |
| 3.负荷减小     | 5.500     | 5.500 | 3.715 | 2.601 |
| 4.负荷增加     | 5.500     | 5.500 | 2.601 | 3.715 |

小,各节点负荷减小为原来的 70%;情景 4 在情景 3 的基础上恢复为系统初始状态。

3.1 情景 1——DPV 出力增加

此情形下各处 DPV 出力较大而负荷较轻,配电网中各节点电压将处于较高的水平,本地控制器将调节光伏并网逆变器的出力以消除过大的电压偏差。仿真显示主要是 DPV-13(节点 13 处分布式光伏发电及并网装置,下同)、DPV-15 和 DPV-16 处触发本地调节,经过 15 轮调节后系统基本趋于稳定,22 轮后系统稳定,调节过程如图 4 所示。

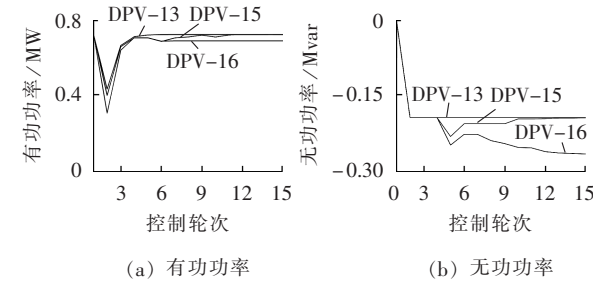


图 4 情景 1 的调节过程  
Fig.4 Regulation process of Scenario 1

控制稳定后,DPV-13、DPV-15 和 DPV-16 处有功出力分别为 0.725 MW、0.725 MW 和 0.691 5 MW,无功出力分别为 -0.192 0 Mvar、-0.192 0 Mvar 和 -0.265 17 Mvar。在调整过程中,电压的变化曲线如图 5 所示,图中电压为标幺值。

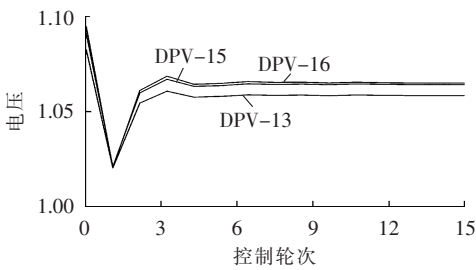


图 5 情景 1 的电压调整曲线  
Fig.5 Voltage regulation curves of Scenario 1

为了研究参数  $\alpha$  和  $\beta$  对控制系统性能的影响,分别对  $\alpha$  和  $\beta$  同时取 1.0、0.9、0.7 和 0.6 的情况进行仿真。 $\alpha$  和  $\beta$  取值为 1.0 时,系统不能趋于稳定,其他取值时 DPV-15 的电压变化情况如图 6 所示,图中电压为标幺值。由图 6 中曲线可看出,当  $\alpha$  和  $\beta$  取值较小时,系统电压振荡的幅值较小且能较快趋于稳定,所以  $\alpha$  和  $\beta$  的取值不宜过大。

由以上结果可知:①仅部分 DPV 启动并进行了本地控制;②在本地控制的调节过程中,DPV 出力和电压存在起伏,最终趋于平稳;③稳定后,DPV-16 的有功出力受限。

3.2 情景 2——DPV 出力减小

通过情景 1 的调节后,DPV-16 的有功出力受限,

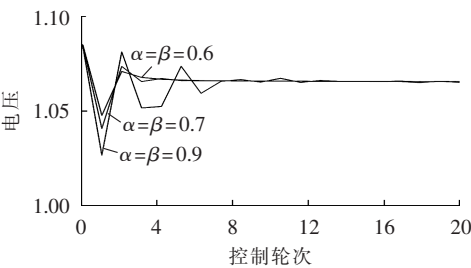


图 6 不同  $\alpha$  和  $\beta$  取值时 DPV-15 的电压调整曲线  
Fig.6 Voltage regulation curves of DPV-15 for different values of  $\alpha$  and  $\beta$

一段时间后,由于光照条件的限制,各 DPV 最大可用出力降低为 0.55 MW,各 DPV 的有功出力被动减少,因此配电网中节点电压会有所降低,此时,触发 DPV-13、DPV-15 和 DPV-16 的本地控制,7 轮调节后稳定,调节过程如表 3 所示(表中数据均为标么值)。稳定后系统状态恢复到初始状态,各处 DPV 并网装置不再向配电网提供无功功率,电压也在允许范围内。可见,所提算法可以在电压越限状况缓解时有效地释放 DPV 的无功出力。

表 3 情景 2 下相关 DPV 的无功出力

Table 3 Reactive power output of DPVs in Scenario 2

| 轮次 | 无功出力    |         |          | 轮次 | 无功出力    |         |          |
|----|---------|---------|----------|----|---------|---------|----------|
|    | DPV-13  | DPV-15  | DPV-16   |    | DPV-13  | DPV-15  | DPV-16   |
| 1  | -0.1920 | -0.1920 | -0.26517 | 5  | -0.0003 | -0.0003 | -0.00070 |
| 2  | -0.0384 | -0.0384 | -0.09120 | 6  | 0       | 0       | -0.00010 |
| 3  | -0.0077 | -0.0077 | -0.01820 | 7  | 0       | 0       | 0        |
| 4  | -0.0015 | -0.0015 | -0.00360 |    |         |         |          |

为了研究参数  $\alpha$  对控制系统性能的影响,分别对不同  $\alpha$  下系统稳定需要的调节轮次进行统计,结果如表 4 所示。可见,随着  $\alpha$  取值的减小,所需要的调节轮次数目大幅增长,所以在实际应用中  $\alpha$  取值也不宜过小。综合场景 1 中的分析可知, $\alpha$  和  $\beta$  的取值既不宜过大,也不宜过小,对于本文所研究的系统, $\alpha, \beta$  取值为 0.6~0.8 时控制系统性能较好。

表 4 情景 2 下系统稳定所需要的轮次

Table 4 Number of rounds needed for system stabilization in Scenario 2

| $\alpha$ 取值 | 稳定所需的调节轮次 | $\alpha$ 取值 | 稳定所需的调节轮次 |
|-------------|-----------|-------------|-----------|
| 1           | 3         | 0.4         | 17        |
| 0.8         | 7         | 0.2         | 37        |
| 0.6         | 10        |             |           |

3.3 情景 3 和情景 4——负荷变化

当负荷减小后,配电网电压将会升高,从而使节点 15 和节点 16 出现电压越上限的情况,触发相应的本地控制,经 10 轮调节后系统电压稳定,调节过程见图 7(a)。系统稳定后,DPV-15 和 DPV-16 的无功出力分别为 -0.0043 Mvar 和 -0.0500 Mvar。

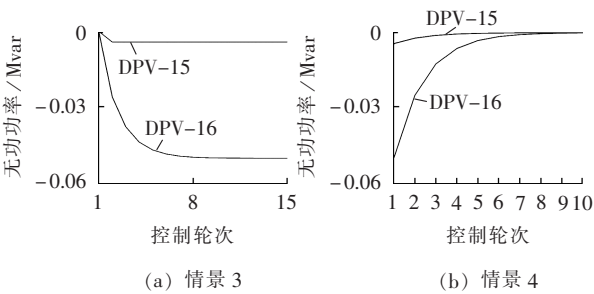


图 7 情景 3 和情景 4 的无功功率调节过程  
Fig.7 Reactive power regulation process of Scenario 3 and 4

通过情景 3 的调节后,DPV-16 处需要吸收配电网中的部分无功功率才能保持电压不越限。当负荷增大时,配电网中节点电压会有所降低,这将触发 DPV-16 处的本地控制触发,使 DPV-16 无功出力降为 0,系统恢复到初始状态,6 轮调节后系统电压稳定,调节过程如图 7(b)所示。可见,系统负荷增大和 DPV 有功受限一样,都可以使系统电压降低,缓解配电网电压越上限的压力,释放 DPV 的无功出力。

可见,在负荷发生变化时所提的本地电压控制策略也能有效地消除配电网中电压越上限的问题。

4 结论

本文提出了一种 DG 的本地电压控制策略,并进行了算例研究,得出主要结论如下:

- a. 含 DG 接入的配电网中,DG 接入点处出现电压极大值点,仅需在接入点加装本地电压控制装置,即可消除配电网中的电压越上限问题;
- b. DG 所需调节的无功功率出力和有功功率出力与实时观测到的电压偏差呈线性关系;
- c. 所建议的 DG 有功功率调节和无功功率调节相结合的本地电压控制策略,易于实现,能够较好地消除电压越限,并不依赖于通信通道的建设,具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 国家能源局. 2015 年光伏发电相关统计信息[EB/OL]. (2016-02-05)[2016-03-15]. [http://www.nea.gov.cn/2016-02/05/c\\_135076636.htm](http://www.nea.gov.cn/2016-02/05/c_135076636.htm).  
[2] 刘伟,彭冬,卜广全,等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J]. 电网技术,2009,32(19):71-76.  
LIU Wei,PENG Dong,BU Guangquan,et al. A survey on system problems in smart distribution network with grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology,2009,32(19): 71-76.  
[3] 许晓艳,黄越辉,刘纯,等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术,2010,34(10):140-146.  
XU Xiaoyan,HUANG Yuehui,LIU Chun,et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits[J]. Power System

- Technology, 2010, 34(10): 140-146.
- [4] 刘健,黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 299-306.  
LIU Jian, HUANG Wei. Analysis on grid-connectable capacity of distributed PV generation in case of PV generation distribution close to load distribution[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 299-306.
- [5] 刘健,林涛,同向前,等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2080-2085.  
LIU Jian, LIN Tao, TONG Xiangqian, et al. Simulation analysis on influences of distributed photovoltaic generation on short-circuit current in distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2080-2085.
- [6] 王震,鲁宗相,段晓波,等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 18-24.  
WANG Zhen, LU Zongxiang, DUAN Xiaobo, et al. Reliability model and indices of distributed photovoltaic power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 18-24.
- [7] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.  
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [8] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.  
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [9] JAEHONG K, JUNGGI L, KWANGHEE N. Inverter-based local AC bus voltage control utilizing two DOF control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1288-1298.
- [10] TRAN-QUOC T, LE T M C, KIENY C, et al. Local voltage control of PVS in distribution networks[C]//20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-Part 1. Prague, Czech Republic: IET, 2009: 1-4.
- [11] MUFARIS A L M, BABA J. Local control of heat pump water heaters for voltage control with high penetration of residential PV systems[C]//IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems. Peradeniya, Sri Lanka: IEEE, 2013: 18-23.
- [12] VON A J, STETZ T, BRAUN M, et al. Local voltage control strategies for PV storage systems in distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1002-1009.
- [13] 邱关源. 电路[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 82-88.
- [14] 刘杨华,吴政球,涂有庆,等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.  
LIU Yanghua, WU Zhengqiu, TU Youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76.
- [15] 刘东冉,陈树勇,马敏,等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52.  
LIU Dongran, CHEN Shuyong, MA Min, et al. A review on models for photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 47-52.
- [16] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 电能质量-供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2009.

#### 作者简介:



魏昊焜

魏昊焜(1986—),男,陕西西安人,工程师,博士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化技术(E-mail: haokun.wei@foxmail.com);

刘健(1967—),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为配电网及其自动化技术(E-mail: powersys@263.net);

高慧(1975—),女,陕西户县人,助理工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化技术(E-mail: gaohui\_xian@163.com)。

## Local voltage control of distributed generations

WEI Haokun<sup>1,2</sup>, LIU Jian<sup>1,2</sup>, GAO Hui<sup>3</sup>

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China;

3. State Grid Xi'an Electric Power Supply Company, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** The quickly developed DG(Distributed Generation) brings great influence on the distribution network, especially on its voltage. The local voltage control of DGs in the distribution network is studied, which proves that the voltage violation occurs easily at the DG integration points, showing the feasibility of local voltage control. The strategy of local voltage control based on the reactive and active power regulations is proposed and the regulation expressions of local reactive and active power controls are deduced, which are the linear function of nodal voltage measurement. The implementation method of local voltage control strategy is given and the simulative results of IEEE 33-bus system indicate that the proposed strategy can effectively eliminate the voltage violation caused by the DG integration.

**Key words:** distributed power generation; local control; distribution network; voltage deviation