

DOI: 10.7667/PSPC180568

含源配电网的无功电压分段自适应自治控制策略

黄祖委¹, 黄智鹏¹, 杨夏¹, 羿应棋², 高小镜², 翟建伟³

(1. 广东电网有限责任公司河源供电局, 广东 河源 517000; 2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510670; 3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对分布式电源(DG)接入配电网产生的电压越限问题, 可以利用DG逆变器输出的无功功率为含源配电网提供无功支撑以解决电压越限问题。提出含源配电网的无功电压分段自适应自治控制策略。首先通过采集当前时刻DG并网点电压和并网点处馈线流过的有功功率方向。然后根据采集到的信息动态自适应调整触发电压临界值, 触发电压临界值将并网点电压运行值划分为五个区间。其次根据DG并网点电压所处区间使用 $Q(U)$ 控制策略计算DG无功输出目标值。最后控制DG逆变器输出无功跟踪该目标值。将所提方法与不考虑DG无功调控能力方案、基于定参数的 $Q(U)$ 控制方案进行综合比较, 仿真结果表明所提控制策略在解决电压越限问题、抑制电压扰动、提高电压质量等方面均有显著的效果。

关键词: 含源配电网; 电压越限; 分段自适应; 自治; $Q(U)$ 控制

Reactive voltage control strategy based on adaptive autonomous segment for distribution network with sources

HUANG Zuwei¹, HUANG Zhipeng¹, YANG Xia¹, YI Yingqi², GAO Xiaojing², ZHAI Jianwei³

(1. Heyuan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Heyuan 517000, China;
2. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 510670, China;
3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper focuses on the problem that the voltage exceeds the limit range when Distributed Generation (DG) is connected to distribution network. Reactive power of DG inverter can offer reactive support to solve the voltage problem. The reactive voltage control strategy based on adaptive autonomous segment for Distribution Network with Sources (DNS) is put forward in this paper. Firstly, this strategy can adaptively adjust the trigger voltage thresholds by collecting the information about the voltage of Point of Common Coupling (PCC) of DG and the direction of active power flow through next feeder adjoining the PCC of DG. Then, the threshold value of trigger voltage is adjusted dynamically according to the collected information. The run value of the PCC of DG can be divided to five intervals by the trigger voltage thresholds. Secondly, according to the interval that the voltage of PCC of DG is in the reference values about reactive power outputs of DG inverter can be calculated by using the $Q(U)$ control method. Finally, the reactive output of the DG inverter is controlled to trace the reference value. This research is comprehensively compared with the case without the reactive support of DG inverter and the case where DG inverter operates using the $Q(U)$ control strategy with constant segmented voltage threshold. The simulation result shows that the proposed method has a significant improvement on reducing the voltage exceeding the limits range, restraining the voltage disturbance and improving the voltage quality.

This work is supported by Guangdong Power Grid Co., Ltd. Science and Technology Project (No. GDKJXM20162615) and National Natural Science Foundation of China (No. 51777077).

Key words: distribution network with source; voltage exceeding the specified limits; adaptive segment; autonomy; $Q(U)$ control

0 引言

随着分布式电源(Distributed Generation, DG)发

电成本的逐步降低, 且 DG 作为可再生能源在减少火力发电带来的环境污染问题中起重要作用, 国家主张在配电网中增加 DG 电站投建率^[1]。但随着越来越多的 DG 并网后, 配电网由原来的单电源辐射状结构向多电源结构转变从而引起潮流逆向流动, 并可能导致 DG 并网点电压越限^[2-3], 而电压越限是

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM 20162615); 国家自然科学基金资助 (51777077)

限制 DG 容量和渗透率的主要因素之一。

为解决含源配电网(Distribution Network with Sources, DNS)中的电压越限问题, DNS 的无功电压协调控制方法是解决该问题的主要手段。DNS 的无功电压协调控制方法主要分为三类:分散自治控制、集中优化控制和分区协同自治控制^[4-6]。文献[7]提出一种基于调节有功无功输出的自适应下垂控制算法来集中治理 DG 接入 DNS 后产生的过电压问题。文献[8]提出一种新型电压分层分散控制方法, 基于多代理系统架构, 以 DG 为中心将配电网划分为多个跟随系统运行状态变化而具有自适应的本地控制区域, 在分散控制架构下实现与传统变压器调节手段相配合的配网综合电压调控。文献[9]提出一种基于分布式光伏系统的配电网网络分区协同自治电压控制策略, 该策略以无功补偿和有功削减量最小为目标以解决光伏(Photovoltaic, PV)并网产生的电压越限问题。文献[10]提出了基于控制 DG 逆变器输出电流以调节 DG 逆变器无功的分散自治方法, 该方法在改善电压分布的同时减少 DNS 网损并增大系统容量。文献[11]提出了光伏电站三层无功功率分散自治模型, 通过调节无功补偿装置与 DG 逆变器的无功对 DG 电站进行无功电压控制。文献[12]提出了一种追踪低压配网 PV 有功的无功潮流 $Q(P)$ 自治控制策略。文献[13]在分析高渗透率 PV 并网后产生的电压越限问题的基础上提出一种基于 PV 并网点电压调节 PV 功率因数的 $\cos\varphi(U)$ 自治方法。

针对 DNS 的分散自治控制分析, 目前国内有关 DNS 的无功电压控制研究主要集中在针对 DG 系统与无功补偿的联合控制, 适用于对负载的无功补偿, 不适合 DG 的无功独立控制^[14]。针对 DG 逆变器的无功电压控制, 德国电气工程协会提出了: 定无功 Q 控制、定功率因数 $\cos\varphi$ 控制、基于 DG 有功出力的 $\cos\varphi(P)$ 控制及基于并网点电压幅值 U 的 $Q(U)$ 控制。文献[15]将 $\cos\varphi(P)$ 与 $Q(U)$ 控制策略结合, 提出基于并网点电压幅值和 PV 有功出力的 $Q(U, P)$ 无功功率控制策略, 在该策略下, PV 系统所有逆变器均参与电网电压调节, 在保证电压在合格范围的前提下, 无功吸收总量最低, 电网有功、无功损耗最小。文献[11-21]都是在 $Q(U)$ 策略上进行改进研究, 但 $Q(U)$ 方法中电压临界值是常数, 电压临界值的选取需要准确调查负荷功率曲线和 DG 出力曲线, 该方法只能减少 DG 并网点的电压越限问题, 配网中其他区域的电压越限问题该方法并不能解决, 并且该方法不能实现 DG 逆变器互相之间的无功支撑。

基于此, 本文在深入分析电压越限机理及无功电压控制策略的基础上提出含源配电网的无功电压

分段自适应自治控制策略, 为每个逆变器提供最优无功功率参考值。在该方法下, DG 系统中的每个逆变器都自适应参与了无功电压调节, 且能很好地解决 DNS 中的电压越限问题。

1 电压越限机理及无功电压控制策略分析

如图1所示为 DG 并入配电网的等值电路模型, 其中 P 和 Q 分别是 DG 的有功和无功出力, P_L 和 Q_L 分别是 DG 并网点的有功和无功负荷, R 和 X 分别是线路电阻和电抗, U 是 DG 并网点的电压, U_s 为电网电压。

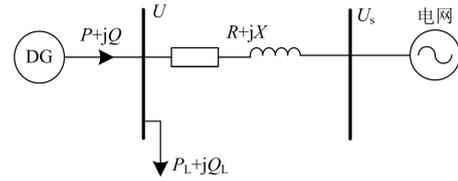


图1 DG 并网等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of grid-connected DG system

当 DG 并入配电网后, 以电网电压 U_s 为电压参考向量, 可得

$$R_L(t) = f\left[\sum_{i=1}^M W_{1ij}(t)X_i(t) + \sum_{r=1}^N W_{2rj}(t)R_{cr}(t)\right] \quad (1)$$

假设电网电压保持不变, DG 未接入配电网时, 线路电压沿馈线潮流方向逐渐降低; DG 接入配电网后, 若 $P \gg P_L$ 且 $Q \gg Q_L$, 则潮流方向由 DG 并网点向电网流动, DG 并网点可能发生电压越上限现象。忽略电压变化的横分量, 则 DG 并网点与配网馈线之间的电压差为

$$\Delta U = \frac{(P - P_L)R + (Q - Q_L)X}{U} \quad (2)$$

DG 逆变器一直以单位功率因数运行直到 DG 并网点的电压达到了配网允许电压波动范围的上下界, DG 逆变器开始输出无功以防止 DG 并网点发生电压越限行为。假设当 DG 有功输出为 P_1 时, DG 并网点电压达到最大值, 此时电压差为

$$\Delta U_1 = \frac{(P_1 - P_{L1})R - Q_{L1}X}{U_{\max}} \quad (3)$$

假设 P_1 不是 DG 输出的最大值, 则当 DG 的有功出力增大到 P_2 时, 若保持 DG 并网点的电压不变, 则 DG 逆变器需发出无功为 Q_2 。若要维持 DG 并网点电压保持不变, $\Delta U_1 = \Delta U_2$, 则有

$$\frac{(P_1 - P_{L1})R - Q_{L1}X}{U_{\max}} = \frac{(P_2 - P_{L2})R + (Q_2 - Q_{L2})X}{U_{\max}} \quad (4)$$

由式(4)可得, 当保持 DG 并网点电压为最大值时, DG 逆变器的无功出力为

$$\begin{cases} Q_2 = -\Delta P \frac{R}{X} + (Q_{L2} - Q_{L1}) \\ \Delta P = (P_2 - P_1) - (P_{L2} - P_{L1}) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,当负荷和 DG 有功出力变化时,欲维持 DG 并网点电压的恒定, DG 需要输出无功功率,无功功率的大小与负荷的变化量、DG 有功变化量和线路阻抗比有关。

2 DNS 无功电压分段自适应自治控制策略

2.1 逆变器控制模型

如图 2 所示为并网模式下 DG 逆变器的控制模型。其中 P_{ref} 和 Q_{ref} 分别是 DG 有功出力和无功出力参考值; P_{DG} 和 Q_{DG} 分别是 DG 逆变器实际有功出力和无功出力。

DG 逆变器与电网同步一般采用锁相环实现。为了最大程度地利用 DG 发电,需对 DG 实施最大功率追踪以获得 DG 最大有功出力作为逆变器有功功率输出参考值 P_{ref} 。DG 逆变器中主要包括电流控制环、有功控制环和无功控制环^[15-16],其中无功控制环建模与控制的目的是为实现无功功率的独立控制^[22],DG 系统输出无功可快速准确跟踪无功功率给定调节量的变化。无功功率参考值 Q_{ref} 的合理设置是无功控制环的关键。

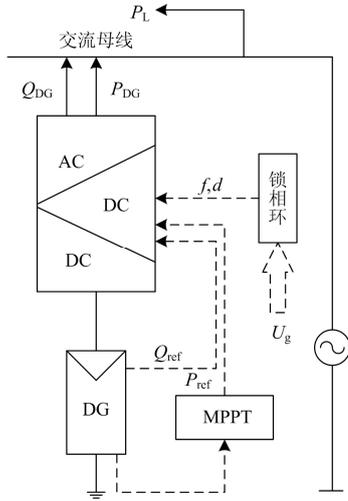


图 2 并网模式下 DG 逆变器的控制模型
Fig. 2 Control model of DG inverter under grid-connected condition

2.2 DNS 的无功电压分段自适应自治控制策略

DNS 的无功电压分段自适应自治控制策略在德国电气工程协会提出的 $Q(U)$ 控制策略上进行改进,仅依靠 DG 并网点当地电气信息参数可实现自治控制,且其控制参数可根据 DG 出力与负荷变化

自适应改变,且该控制策略的参数设定不受 DG 位置的影响。本文所提 DNS 的无功电压分段自适应自治控制策略可以很好地解决电压越限问题。

DNS 的无功电压分段自适应自治控制策略如下:

1) 获取配电网架信息数据。

2) 在该时间断面运行方式下的网架结构中,如图 3 所示将含 DG 的配电网等效为 DNS 辐射状配电网,对各个 DG 按照离配电网首端母线距离远近进行序号编写,分别编写为 $DG_1, \dots, DG_{i-1}, DG_i, DG_{i+1}, \dots, DG_n$ 。图中 P_{DG_i} 和 Q_{DG_i} 分别是 DG_i 向 DG_{i+1} 输送的有功功率和无功功率(若 $P_{DG_i} < 0$, 表示有功潮流是从 DG_{i+1} 流向 DG_i ; 若 $P_{DG_i} > 0$, 表示有功潮流是从 DG_i 流向 DG_{i+1})。

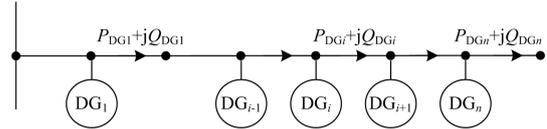


图 3 DNS 等效辐射状配电网
Fig. 3 Equivalent circuit of DNS

3) 采集 DG_i 并网点的电压 U_{DG_i} 并使用自适应性无功电压 $Q(U)$ 自治控制策略输出 DG 逆变器无功输出值 Q_i , 基于并网点电压的 $Q(U)$ 策略的下垂曲线如图 4 所示, $Q(U)$ 策略按照式(6)进行选取。

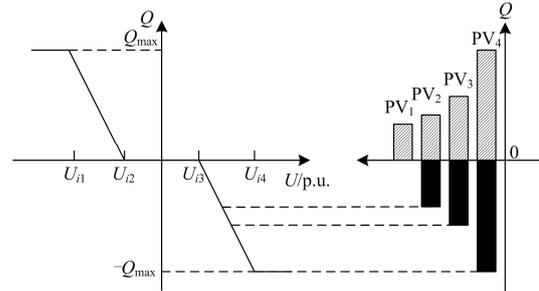


图 4 $Q(U)$ 控制策略的下垂曲线

Fig. 4 Droop curve for $Q(U)$ control method

$$Q_i = \begin{cases} Q_{i\max}, & U_i < U_{i1} \\ \frac{Q_{i\max}}{U_{i1} - U_{i2}}(U_i - U_{i1}) + Q_{i\max}, & U_{i1} \leq U_i \leq U_{i2} \\ 0, & U_{i2} < U_i \leq U_{i3} \\ \frac{Q_{i\max}}{U_{i3} - U_{i4}}(U_i - U_{i3}), & U_{i3} < U_i \leq U_{i4} \\ -Q_{i\max}, & U_i > U_{i4} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: $Q_{i\max}$ 是 DG_i 逆变器无功输出最大值; U_{i1} 、 U_{i2} 、 U_{i3} 、 U_{i4} 表示 DG_i 的分段电压临界值。其中电压临界值的选择如下所述。

I: 当 $i < n$

① 当 $P_{DG_i} > 0$, 则对 DG_i 的电压临界值按照式(7)进行选取;

② 当 $P_{DG_i} < 0$, 则对 DG_i 的电压临界值按照式(8)进行选取。

II: 当 $i = n$, 则对 DG_i 的电压临界值按照式(7)进行选取

$$\begin{cases} U_{i1} = \min[0.93 + \frac{P_{DG_i} R_{DG_{iend}} + Q_{DG_i} X_{DG_{iend}}}{U_{DG_i}}, 1.07] \\ U_{i2} = \frac{(1.07 - U_{i1}) \times 3}{10} + U_{i1} \\ U_{i3} = \frac{(1.07 - U_{i1}) \times 7}{10} + U_{i1} \\ U_{i4} = 1.07 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: 当 $P_{DG_i} > 0$, 配网末端可能是电压最低点, U_{i1} 的选择原则是考虑配电网末端节点电压不越下限 0.93 p.u., U_{i1} 的值若等于 DG_i 与配网末端电压差加上 0.93 p.u., 则当配网末端电压有越下限风险时, DG_i 的 DG 逆变器就可以根据 $Q(U)$ 策略进行预防, 防止配网末端电压越下限; U_{i4} 选为 1.07 p.u., 其目的是为防止 DG 并网节点电压越上限; $R_{DG_{iend}}$ 和 $X_{DG_{iend}}$ 分别是 DG_i 并网节点与末端节点之间的电阻和电抗; U_{DG_i} 是 DG_i 并网节点的电压幅值。

$$\begin{cases} U_{i4} = \max[1.07 - \frac{P_{DG_i} R_{ij} + Q_{DG_i} X_{ij}}{U_{DG_i}}, 0.93] \\ U_{i3} = U_{i4} - \frac{(U_{i4} - 0.93) \times 3}{10} \\ U_{i2} = U_{i4} - \frac{(U_{i4} - 0.93) \times 7}{10} \\ U_{i1} = 0.93 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: R_{ij} 和 X_{ij} 分别是 DG_i 与 DG_j 之间的电阻和电抗; U_{i4} 的值若等于 1.07 p.u. 减去 DG_i 与 DG_j 之间的电压差, 则当 DG_j 有电压越上限风险且 DG_j 的逆变器容量不足以解决 DG_j 的电压越限问题时, DG_i 的逆变器可以动作协助解决 DG_j 的电压越上限问题; U_{i1} 选为 0.93 p.u., 其目的是为防止 DG 并网节点电压越下限。

4) 使用牛顿拉夫逊潮流计算方法计算该配电网潮流, 通过使用步骤 3) 的含源配电网的自适应性无功电压自治控制方法控制 DG 逆变器的无功输出, 将配电网的电压约束在合理范围之内。

3 算例分析

仿真算例选取线路型号为 LGJ-120 的某 10 kV 配电网, 为了突出关键节点的电压变化将其配电网

等效简化为如图 5 所示的网络拓扑结构, 网络线路参数见附表 1。使用 Matlab 建立该 10 kV 配电网的仿真模型, 其中, 将线路首端节点 1 设置为平衡节点, $V_1 = 1.05$ p.u.。为了验证本章所提基于 DNS 的无功电压分段自适应自治控制策略的控制效果, 对仿真算例分单 DG 接入和多 DG 接入进行仿真分析, 将本文所提策略与不考虑 PV 无功调控方案和定参数的 $Q(U)$ 控制方法^[14-17]进行对比, 从而构成了 3 个测试方案。

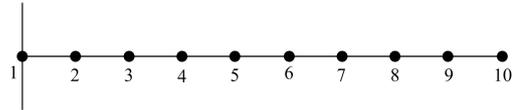


图 5 10 kV 配网网络拓扑结构

Fig. 5 Network topology of 10 kV distribution network

3.1 单 DG 接入的算例仿真

节点 6 为 PV 并网节点, 其装机容量为 4.6 MW, PV 逆变器的容量也为 4.6 MW, PV 渗透率为 81.1%。PV 出力按照未来一天的光伏预测输出特性曲线变化。该算例选取一天之内的 24 h 时间断面进行仿真, 其中负荷预测数据和光伏出力预测数据分别如附图 1 和附图 2 所示。

1) 方案 1: 不考率 PV 无功调控能力

使用 Matpower 对算例中的配电网进行潮流计算, 得到各个节点的电压分布, 为了研究 PV 接入对配电网电压的影响, 算例选取节点 2、4、6、9、10 为关键节点, 方案 1 中关键节点的电压变化曲线如图 6 所示。

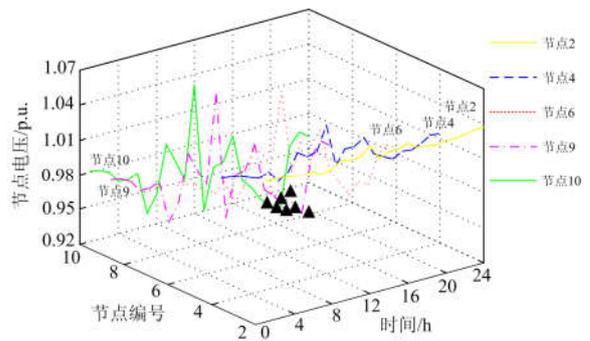


图 6 方案 1 电压曲线

Fig. 6 Voltage curves in case 1

算例结果为电压标么值, 10 kV 配电网的电压安全范围为 0.93 ~ 1.07 p.u., 电压曲线中使用 “▲” 标记配电网中电压越限的节点。节点 6 处于光伏接入点, 其电压由于 PV 自由输出的间歇性和随机性而不断波动变化, 电压变化相对于其他节点稍微剧烈, 但是节点 6 并没有出现电压越限现象。而配电网

网靠近末端的节点9和节点10在夜间光伏出力为零而负荷重时发生了电压越下限的情况。由图6可知,光伏的功率因数设定为1.0运行的情况下,配电网的各个节点的电压波动范围较大,甚至有局部节点会在某时刻出现电压越限的现象。

2) 方案2: 定参数的 $Q(U)$ 控制方法

此方案 PV 逆变器的无功输出受控于 PV 接入点电压,通过依据 PV 接入点的电压根据式(6)调节 PV 逆变器, U_{i1} 、 U_{i2} 、 U_{i3} 、 U_{i4} 的整定值按照德国电气工程协会所提标准分别为 0.95、0.98、1.02、1.05 p.u.^[15]。关键节点的电压变化曲线如图7所示。

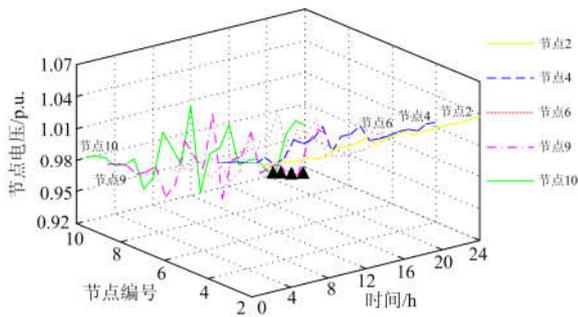


图7 方案2 电压曲线

Fig. 7 Voltage curves in case 2

对比方案1,方案2关键节点的电压变化没有明显比方案1平缓,且节点9和节点10在20点和21点都出现了电压越下限的情况,该情况的出现主要是由于 $Q(U)$ 控制方法针对的是 PV 接入点存在的电压越限问题,对配电网中的其他节点的电压越限问题不予考虑。

3) 方案3: DNS 无功电压分段自适应自治控制策略

此方案以解决配电网存在的电压扰动为目标,在 $Q(U)$ 控制策略的基础上进行改进,该策略的电压参考值根据 PV 并网点的电气信息实时变化,并且对于单 PV 接入,考虑了配电网末端可能存在的电压越下限问题。在方案3的控制策略下,关键节点的电压变化曲线如图8所示。方案2和方案3的逆变器无功出力对比如图9所示,方案3中电压整定值 U_1 变化曲线如图10所示。

与方案2和方案1进行对比,方案3的关键节点电压曲线明显比方案2和方案1平缓,并且不会出现电压越限的情况。方案3考虑了单 PV 接入时末端可能出现电压越下限的情况,可以有效地减少配电网的电压扰动并实现 DG 的无功电压自治。

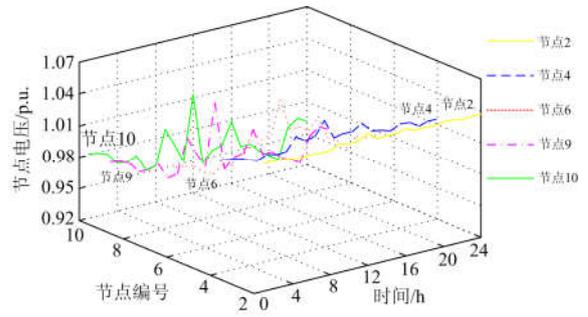


图8 方案3 电压曲线

Fig. 8 Voltage curves in case 3

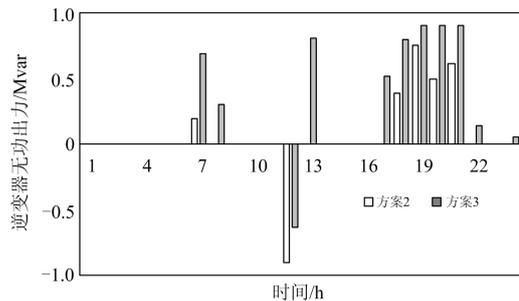


图9 DG 逆变器无功出力对比

Fig. 9 Comparison for the reactive output of DG inverter

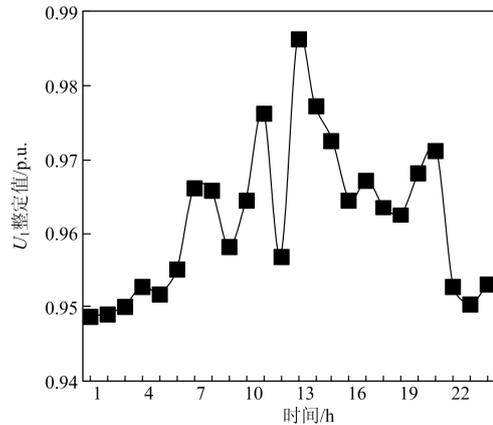


图10 方案3 中电压整定值 U_1 变化曲线

Fig. 10 Changing curve of voltage threshold U_1 in case 3

3.2 多 DG 接入的算例仿真

节点4和节点9为 PV 并网点,其装机容量分别为 2.1 MW 和 5.1 MW, PV 逆变器的容量与 PV 装机容量相同,同样进行全天 24 h 连续时间断面仿真,其中负荷和 PV 出力数据分别如附图3和附图4所示。

1) 方案1: 不考虑 PV 无功调控能力

方案1中关键节点的电压变化曲线如图11所示。由图11可知,在不考虑光伏无功调控能力的情况下,

配电网的各个节点的电压波动范围较大, 甚至有局部节点会在某些时刻出现电压越上下限的现象。

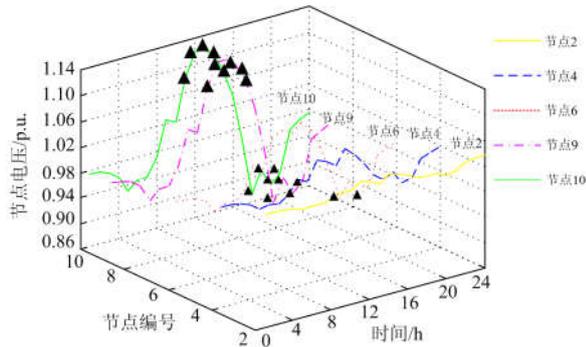


图 11 方案 1 电压曲线

Fig. 11 Voltage curves in case 1

2) 方案 2: 定参数的 $Q(U)$ 控制方法

此方案 PV 逆变器通过依据 PV 并网点的电压根据式(6)调节 PV 逆变器, 参数设定与单 DG 接入仿真算例相同。观测节点的电压变化曲线如图 12 所示。

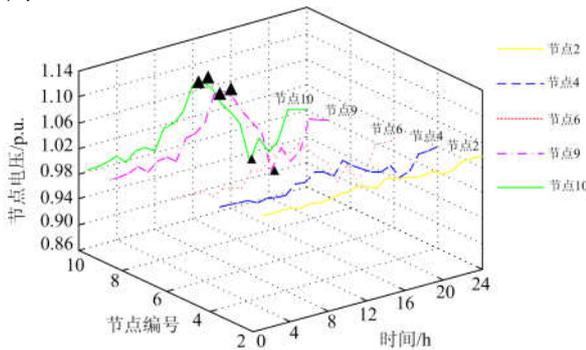


图 12 方案 2 电压曲线

Fig. 12 Voltage curves in case 2

对比方案 1, 方案 2 关键节点的电压变化明显比方案 1 平缓, 且电压越限问题发生的频率也减少了。但节点 9 和节点 10 都在 12 点和 13 点出现了电压越上限的问题, 并且在 18 点都出现了电压越下限的情况。越下限情况的出现主要是由于 $Q(U)$ 控制策略针对的是 PV 并网点存在的电压越限问题。在 12 点和 13 点时, 节点 9 的光伏逆变器已经达到最大出力了, 仍不能解决本地的电压越限问题, 而在此时, 节点 4 的电压并没有出现电压越限问题, 节点 4 的 PV 逆变器的出力没有达到最大值。该控制策略没有充分考虑多光伏无功调控能力之间相互支撑作用。

3) 方案 3: DNS 的无功电压分段自适应自治控制策略

此方案以解决配电网存在的电压扰动为目标, 在 $Q(U)$ 控制策略的基础上进行改进。该策略的电压

参考值根据 PV 并网点的电气信息实时变化, 并且对于多 PV 接入, 考虑了配电网末端可能存在的电压越下限问题和相邻 PV 并网点可能存在的电压越上限问题。在方案 3 的控制策略下, 关键节点的电压变化曲线如图 13 所示。图 14 和图 15 分别是节点 4 和节点 9 的 PV 逆变器在方案 2 和方案 3 下的无功出力对比图形, 图 16 是方案 3 电压整定值变化曲线。

与方案 2 和方案 1 进行对比, 方案 3 的关键节点电压曲线明显比方案 2 和方案 1 平缓, 并且不会出现电压越限的情况。方案 3 考虑了多 PV 接入时末端可能出现电压越下限的情况和相邻 PV 并网点可能存在的电压越上限情况, 可以有效地减少配电网的电压扰动并实现分布式电源的无功电压自治。

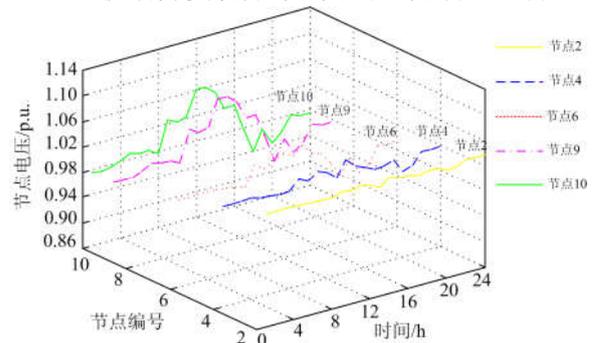


图 13 方案 3 电压曲线

Fig. 13 Voltage curves in case 3

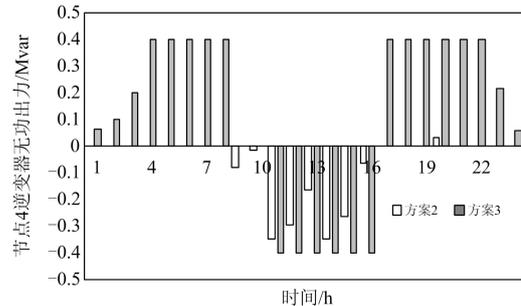


图 14 节点 4 PV 逆变器无功出力对比

Fig. 14 Comparison for the reactive output of PV inverter in bus 4

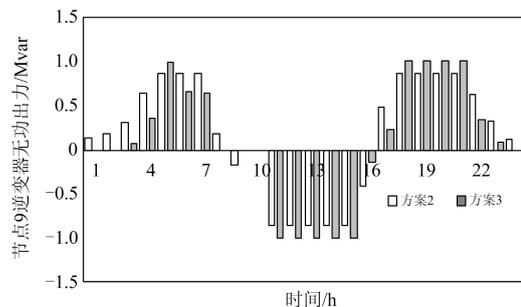


图 15 节点 9 PV 逆变器无功出力对比

Fig. 15 Comparison for the reactive output of PV inverter in bus 9

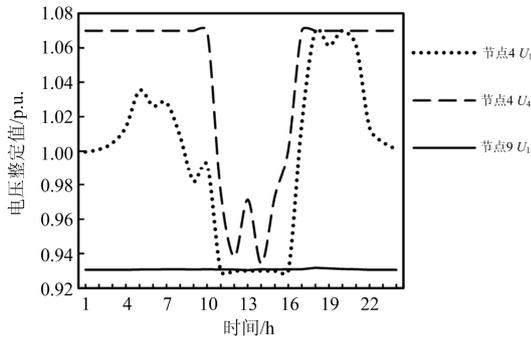


图 16 方案 3 中电压整定值变化曲线

Fig. 16 Changing curves of voltage thresholds in case 3

4 结论

本文提出 DNS 的无功电压分段自适应自治控制策略基于 DG 并网点的电气信息实时调节 DG 逆变器的无功输出达到解决 DNS 电压越限问题。主要结论如下：

1) 该控制方法通过采集 DG 并网点电压和 DG 并网点附近馈线流过的有功功率方向等本地电气信息，动态整定电压临界值 U_{i1} 、 U_{i2} 、 U_{i3} 、 U_{i4} ，从而实现实时调节 DG 逆变器的无功出力以减少配电网的电压越限的目的，实现了 DNS 自治；

2) 该控制方法中电压临界值的整定能够根据系统运行方式的变化而调整实现 DNS 的无功电压自适应控制；

3) 该控制方法仅使用 DG 并网点处的电气信息，通过动态调整触发电压临界值实现 DG 无功输出优化控制，不仅可以避免重载时馈线末端节点电压的越下限问题，也能够实现多 DG 接入相同馈线时的无功协调配合，从而避免 DG 并网点电压越上限的问题。

下一步将考虑光伏逆变器的调节代价，并且建立基于 DG 逆变器的无功电压控制方法的精确数学模型。

附录

表 1 系统线路参数

Table 1 Line parameters of the distribution system

| 首节点号 | 末节点号 | 线路长度/km | 支路电阻/ Ω | 支路电抗/ Ω |
|------|------|---------|----------------|----------------|
| 1 | 2 | 1 | 0.285 | 0.392 |
| 2 | 3 | 1 | 0.285 | 0.392 |
| 3 | 4 | 1 | 0.285 | 0.392 |
| 4 | 5 | 2 | 0.57 | 0.784 |
| 5 | 6 | 2 | 0.57 | 0.784 |
| 6 | 7 | 2 | 0.57 | 0.784 |
| 7 | 8 | 2 | 0.57 | 0.784 |
| 8 | 9 | 2 | 0.57 | 0.784 |
| 9 | 10 | 1 | 0.285 | 0.392 |

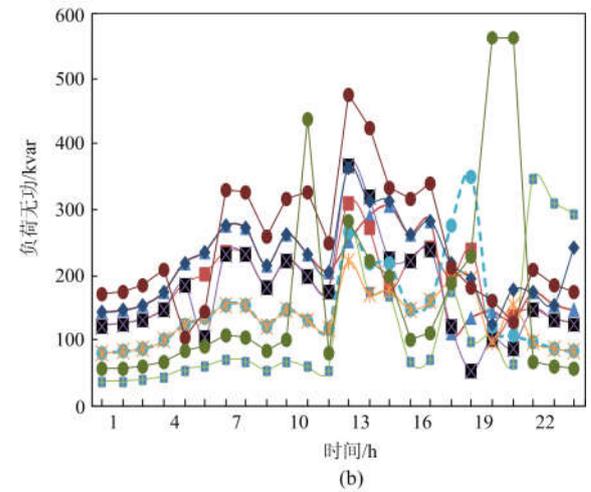
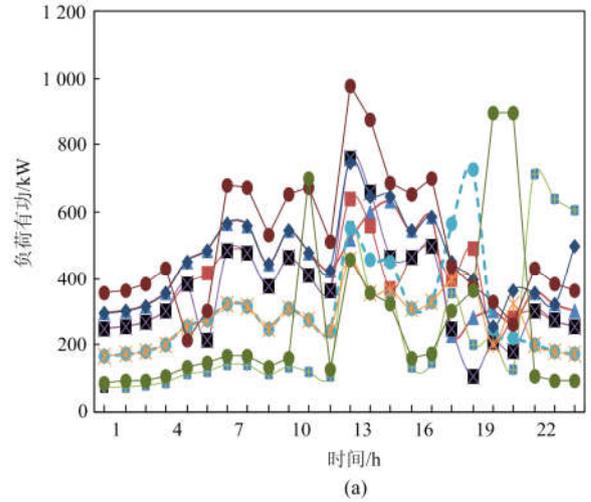


图 1 算例 1 负荷出力数据

Fig. 1 Output of load in case 1

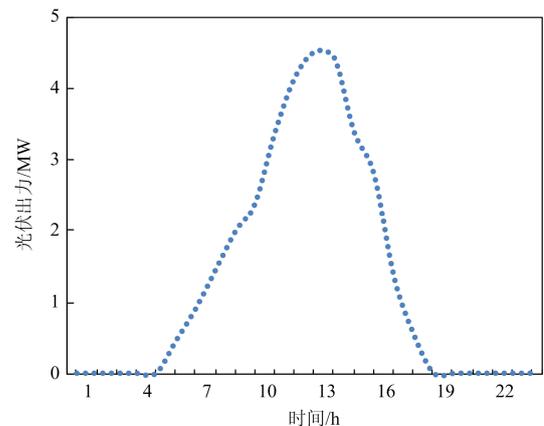


图 2 算例 1 光伏出力数据

Fig. 2 Output of photovoltaic in case 1

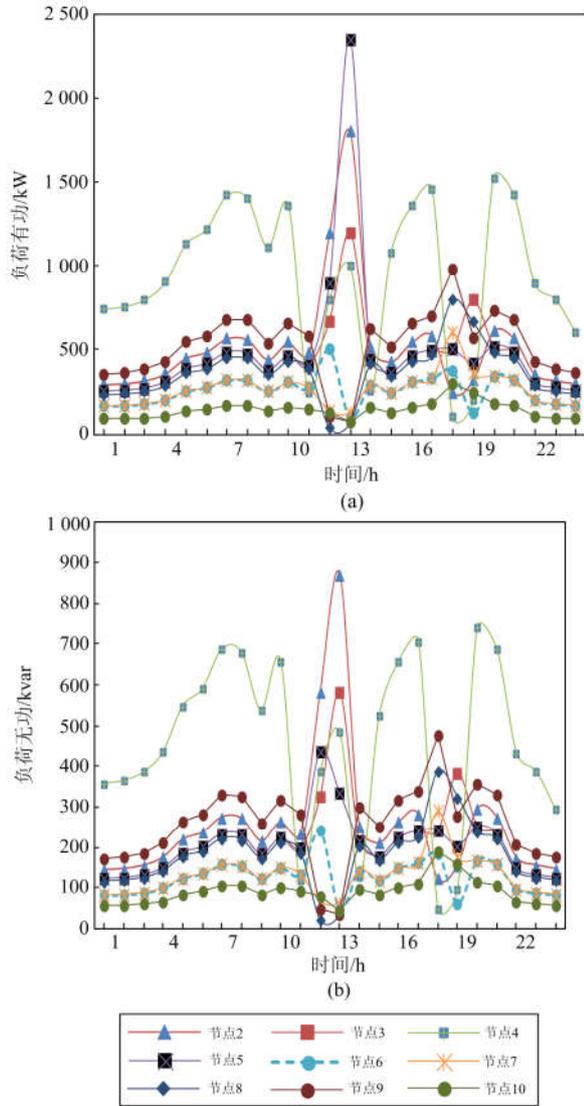


图3 算例4 负荷出力数据
Fig. 3 Output of load in case 2

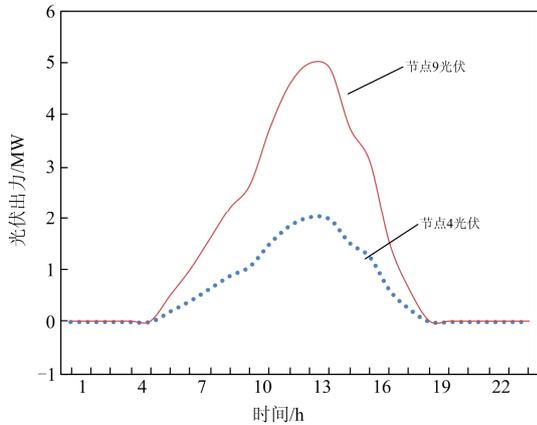


图4 算例2 光伏出力
Fig. 4 Output of photovoltaic in case 2

参考文献

[1] CALDO N, COPPO M, TURRI R. Distributed voltage control strategy for LV networks with inverter-interfaced generators[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 107: 85-92.

[2] ZHANG D, LI J, HUI D. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.

[3] 黄弘扬, 王波, 黄晓明, 等. 基于双馈风电机组的分布式动态无功支撑系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 140-147.

HUANG Hongyang, WANG Bo, HUANG Xiaoming, et al. Distributed dynamic reactive power support system based on doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 140-147.

[4] 陈旭, 杨雨瑶, 张勇军, 等. 光伏光照概率性对配电网电压的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 112-118.

CHEN Xu, YANG Yuyao, ZHANG Yongjun, et al. Influence of illumination probability of photovoltaic system on voltage of power distribution networks[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(4): 112-118.

[5] 刘泽槐, 翟世涛, 张勇军, 等. 基于扩展 QV 节点潮流的光储联合日前计划[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3435-3441.

LIU Zehuai, ZHAI Shitao, ZHANG Yongjun, et al. A joint day-ahead scheduling for photovoltaic-storage systems based on extended QV bus-type power flow[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3435-3441.

[6] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配电网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 120-125.

ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 120-125.

[7] GHASEMI M, PARNIANI M. Prevention of distribution network overvoltage by adaptive droop-based active and reactive power control of PV systems[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 133: 313-327.

[8] 骆晨, 陶顺, 赵晨雪, 等. 主动配电网区域自适应电压分层分区控制[J]. 现代电力, 2016, 33(3): 29-34.

LUO Chen, TAO Shun, ZHAO Chenxue, et al. Hierarchical

- and distributed voltage control with regional adaptability in active distribution networks[J]. *Modern Electric Power*, 2016, 33(3): 29-34.
- [9] ZHAO B, XU Z, XU C, et al. Network partition based zonal voltage control for distribution networks with distributed PV systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 4087-4098.
- [10] DARWISH E, HASANIEN H, ATALLAH A, et al. Reactive power control of three-phase low voltage system based on voltage to increase PV penetration levels[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, 9(4): 1831-1837.
- [11] 周林, 任伟, 廖波, 等. 并网型光伏电站无功电压控制[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(20): 168-175.
ZHOU Lin, REN Wei, LIAO Bo, et al. Reactive power and voltage control for grid-connected PV power plants[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(20): 168-175.
- [12] MOLINA-GARCÍA A, MASTROMAURO R, GARCÍA-SÁNCHEZ T, et al. Reactive power flow control for PV inverters voltage support in LV distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(1): 447-456.
- [13] 王颖, 文福拴, 赵波, 等. 高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(5): 1200-1206.
WANG Ying, WEN Fushuan, ZHAO Bo, et al. Analysis and countermeasures of voltage violation problems caused by high-density distributed photovoltaics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(5): 1200-1206.
- [14] 陶维青, 鲁胜清, 杨刚, 等. 低压配网中光伏发电系统调压策略[J]. *可再生能源*, 2015, 33(9): 1323-1328.
TAO Weiqing, LU Shengqing, YANG Gang, et al. A voltage regulation strategy of PV system in low-voltage networks[J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(9): 1323-1328.
- [15] 周林, 晁阳, 廖波, 等. 低压网络中并网光伏逆变器调压策略[J]. *电网技术*, 2013, 37(9): 2427-2432.
ZHOU Lin, CHAO Yang, LIAO Bo, et al. A voltage regulation strategy by grid-connected PV inverters in low-voltage networks[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(9): 2427-2432.
- [16] CRACIUN B I, SERA D, MAN E A, et al. Improved voltage regulation strategies by PV inverters in LV rural networks[M]. *Aalborg: IEEE Press*, 2012: 775-781.
- [17] 武兆亮, 赵庆生, 郭贺宏, 等. 光伏智能逆变器电压/无功控制研究[J]. *可再生能源*, 2015, 33(1): 32-36.
WU Zhaoliang, ZHAO Qingsheng, GUO Hehong, et al. Research on volt/var control of photovoltaic intelligent inverter[J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(1): 32-36.
- [18] 李清然, 张建成. 含分布式光伏电源的配电网电压越限解决方案[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(22): 117-123.
LI Qingran, ZHANG Jiancheng. Solution of voltage beyond limits in distribution network with distributed photovoltaic generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(22): 117-123.
- [19] 魏昊焜, 刘健, 高慧. 分布式电源的本地电压控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(9): 40-45.
WEI Haokun, LIU Jian, GAO Hui. Local voltage control of distributed generations[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(9): 40-45.
- [20] 李鹏, 于航, 夏曼, 等. 分布式光伏集群分层多模式无功控制策略[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 3038-3044.
LI Peng, YU Hang, XIA Man, et al. A hierarchical multi-mode var control strategy for grid-connected PV clusters[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 3038-3044.
- [21] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(6): 1578-1587.
XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distribution networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(6): 1578-1587.
- [22] 张玮亚, 王紫钰. 智能配电系统分区电压控制技术研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(1): 146-154.
ZHANG Weiya, WANG Ziyu. Review of zonal-voltage control techniques of smart distribution system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 146-154.

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-11-06

作者简介:

黄祖委(1987—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为配电网运行与优化; E-mail: 595033260@qq.com

高小镜(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为配电网规划、电力系统建模仿真。E-mail: 1282672838@qq.com

(编辑 魏小丽)