

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200563

# 考虑光伏逆变器电流裕度的主动配电网动态电压支撑策略

王景钢, 刘轶

(国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 大量分布式光伏接入配电网的电压稳定问题是影响电网安全稳定运行的关键环节。为了适应高渗透率分布式光伏发电系统的接入, 提高主动配电网的动态电压支撑能力, 提出了一种考虑光伏逆变器电流裕度的主动配电网动态电压支撑策略。该策略在分析配电网电压灵敏度的基础上, 考虑光伏逆变器的电流设计裕度, 能够在电压跌落故障情况下充分利用光伏逆变器的最大允许电流, 实现光伏逆变器有功功率输出最大化, 从而提高主动配电网的短期电压稳定性。最后分析了逆变器电流裕度对静止无功补偿系统的影响, 并与常规无功补偿系统进行了仿真对比分析, 验证了所提出策略的可行性和有效性。

**关键词:** 主动配电网; 光伏逆变器; 电压支撑; 电压敏感性; 电流裕度

## Dynamic voltage support strategy for an active distribution network considering the current margin of a photovoltaic inverter

WANG Jinggang, LIU Yi

(State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The voltage stability problem of a large number of distributed photovoltaics connected to distribution network is the key issue affecting the safe and stable operation of a power grid. In order to adapt to the access of a high permeability distributed photovoltaic power generation system and improve the dynamic voltage support capability of an active distribution network, a dynamic voltage support strategy for an active distribution network considering the current margin of photovoltaic inverters is proposed. Analyzing the voltage sensitivity of the distribution network, and considering the current design margin of photovoltaic inverters, the strategy can make full use of the maximum allowable current of photovoltaic inverters under a voltage sag fault to maximize the active power output of photovoltaic inverters, thereby improving the short-term voltage stability of the active distribution network. Finally, the influence of the current margin of the inverters on the static var compensation system is analyzed and compared with conventional reactive power compensation systems. The comparison verifies the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of the State Grid Corporation of China "Research and Application of Industrial System Multi-layer Coordination Anti-defense Technology Adapting to Source-Grid-Load Interaction" (No. 52100218000U).

**Key words:** active distribution network; photovoltaic inverter; voltage support; voltage sensitivity; current margin

## 0 引言

大量分布式光伏发电系统的接入使得原有配电网的运行方式发生了较大的变化, 也使得配电网的安全稳定运行和控制更加复杂化, 其中配电网电压暂降引起的短期电网稳定问题就是影响配电网电压

安全稳定的一个重要因素<sup>[1-2]</sup>。由逆变器构成的分布式光伏发电系统自身不具备传统同步发电机的动态无功支撑调节能力, 同时配电网过大的暂态电压跌落还会导致分布式光伏发生脱网故障, 进一步造成连锁故障。为适应高渗透率分布式光伏接入配电网, 保证配电网的电压质量, 主动配电网的无功电压控制技术是一种有效的手段<sup>[3-5]</sup>。

针对主动配电网的暂态电压稳定问题研究表明, 在配电网发生电压暂降事件时, 通过提供额外

**基金项目:** 国家电网总部科技项目资助“适应源网荷互动的工控系统多层协同防御技术研究及应用”(52100218000U)

的动态无功支撑能够有效改善分布式光伏接入配电网的暂态电压稳定性。目前针对电压暂降导致的主动配电网电压稳定问题主要集中在两个方面：配置无功补偿装置来提高无功支撑能力以及充分利用光伏逆变器等分布式电源的无功调节能力。

在额外配置无功补偿装置来提高无功支撑能力方面，其基本思路是在配电网的电压薄弱区域安装一定的无功调节设备，根据不同无功补偿设备的调节性能以及响应时间尺度，对多无功补偿设备进行优化配置<sup>[6-7]</sup>。文献[8]采用变压器分接头和无功调节设备来实现配电网的无功电压集中控制；文献[9]通过对配电网内的有载调压变压器、DSTATCOM 和电容器组进行协调优化控制。该类控制方法能够在一定程度上给配电网提供动态无功支撑，但是额外的配置会增加投资成本，同时多无功补偿设备的有序协调也是一个难点。

在利用光伏逆变器等分布式电源的无功调节能力方面，其基本思路是根据光伏逆变器的四象限运行特性，通过控制策略的改进来提供一定的无功支撑<sup>[10-11]</sup>。文献[12]利用光伏逆变器的无功调节能力，提出了一种主动配电网多阶段的无功电压协调控制策略；文献[13]在含分布式电源、储能单元的配电网基础上，提出了一种基于逆变器的主动配电网有功及无功综合控制策略。另外，文献[14]综合利用外部无功调节设备和分布式电源逆变器无功调节能力，利用分布式发电与传统有载调压、电容器等无功补偿设备提出了一种主动配电网自适应多目标协调优化控制策略。但该类方法均未考虑配电网的电压灵敏度对光伏逆变器在无功电压支撑性能上的影响。为此，文献[15]充分考虑含光伏电站配电网中有功无功对线路各节点电压的影响，利用灵敏度指标对薄弱线路进行判断，从而确定无功补偿装置的位置；文献[16-17]采用灵敏度法对配电网各个节点的灵敏度进行分析，在此基础上提出了多类型无功调节资源协调的主动配电网无功电压控制策略。然而上述研究均未考虑光伏逆变器电流裕度对动态无功支撑的影响，因此很难高效率地实现电压暂降严重时的短期电压稳定支撑。

针对以上研究中的不足，本文提出一种基于考虑光伏逆变器电流裕度的主动配电网动态电压支撑策略，在分析主动配电网中光伏发电并网节点电压灵敏度的基础上，充分考虑光伏逆变器的电流裕度，以最大限度地提高端电压为优化目标实现主动配电网的动态电压恢复，有效提升了配电网的短期电压稳定性。

## 1 光伏发电控制原理

光伏并网发电系统是通过并网逆变器将直流电转换成交流电<sup>[18]</sup>，其中光伏并网逆变器是实现电能转换的关键，其基本控制框图如图 1 所示。光伏并网逆变器的常用控制策略是电流控制或功率控制，其基本实现手段采用的是基于  $dq$  坐标变换，控制器将检测到的电流信号转换成  $dq$  坐标系下的有功分量和无功分量，再和参考值比较并通过比例积分控制来生成逆变器开关管的控制信号。

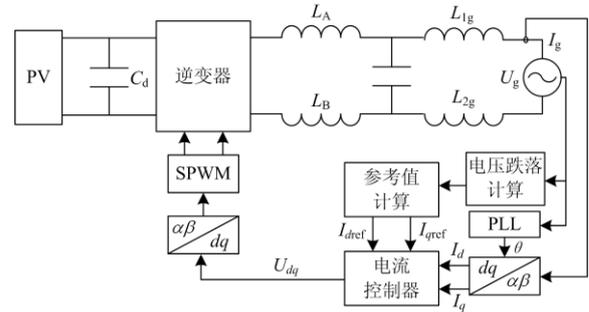


图 1 光伏并网逆变器控制策略

Fig. 1 Control strategy of photovoltaic grid-connected inverter

一般而言，为保证光伏并网逆变器的并网安全稳定运行，光伏并网逆变器一般在控制系统中安装过流保护系统，要求逆变器在遭受严重故障而导致过电流时，应立即与电网断开连接，即光伏逆变器一旦检测到过流故障，逆变器将不再向电网传输功率<sup>[19]</sup>。因此，光伏并网逆变器的有功和无功电流分量可表示为

$$\begin{cases} I_d = I_n, I_q = 0 & 0.95 < U_g < 1.05 \\ I_d = 0, I_q = 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $I_d$ 、 $I_q$  分别是逆变器的有功和无功电流； $I_n$  是逆变器的额定电流； $U_g$  是电网电压的瞬时标幺值。

实际上，为进一步提高光伏并网逆变器在故障期间的抗干扰能力，目前光伏并网逆变器并网网则已要求其具备一定的低电压穿越能力，即故障发生时要求并网逆变器保持与电网的连接，最好在故障排除后尽快恢复正常运行<sup>[20-21]</sup>。值得注意的是，为了避免过电流保护引起的意外跳闸，并网逆变器的输出有功功率应仅在故障时为零，而无功功率始终为零。光伏并网逆变器的低电压穿越具体要求如下：(1) 当电网电压标幺值  $U_g > 0.5$  时，逆变器保持正常运行；(2) 当电网电压标幺值  $U_g \leq 0.5$  时，逆变器仍保持并网运行，但是其有功和无功输出均为零；(3) 当电网电压标幺值  $< 0.2$  且持续时间  $> 0.2$  s 时，

逆变器将与电网断开连接。

## 2 主动配电网动态电压控制策略

### 2.1 基本原理

光伏并网逆变器的动态电压控制是指逆变器在故障时能够向电网注入无功功率且在故障排除后立即支持电网电压。根据逆变器并网导则, 当电网电压标幺值低于 0.5 时, 光伏逆变器应注入 100% 无功电流。根据逆变器输出有功和无功的耦合关系, 并网逆变器注入的无功电流和电压暂降时的电网电流可表示为

$$\begin{cases} I_q = \lambda(1 - U_g)I_n & 1 - 1/\lambda < U_g \leq 0.95 \\ I_q = I_n & U_g < 1 - 1/\lambda \end{cases} \quad (2)$$

$$I_g = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = I_n \leq I_{\max} \quad (3)$$

式中:  $I_g$  是逆变器并网电流的幅值;  $I_{\max}$  是逆变器并网电流的最大值;  $\lambda$  是无功电流分量的比例系数。

进一步, 假设故障之前的逆变器无功电流分量的值为  $I_{q0}$ , 则可求得无功电流分量比例系数的表达式为

$$\lambda = \frac{(I_q - I_{q0})}{I_g(1 - U_g)} \quad (4)$$

如果光伏并网逆变器初始是运行在非故障状态下的单位功率因数状态, 则  $I_{q0}$  的值设置为零。又根据光伏逆变器电流裕度设计要求, 无功电流分量比例系数  $\lambda$  的取值应不小于 2, 则根据式(4)可求出光伏逆变器无功电流分量的曲线如图 2 所示。由图可知, 在无功电流分量比例系数  $\lambda$  取 2 时, 当电网电压跌落至 0.5 p.u. 时, 光伏逆变器即可注入 100% 的无功电流。

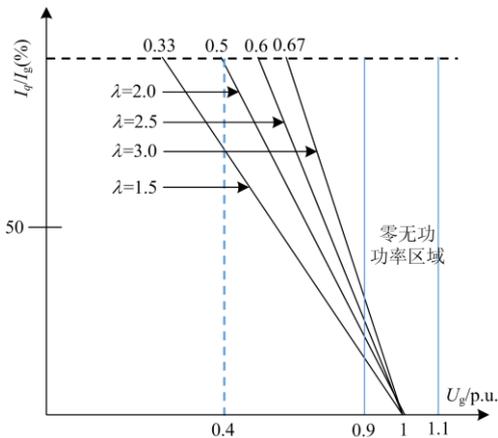


图 2 不同  $\lambda$  值时的无功电流注入

Fig. 2 Reactive current injection at different values of  $\lambda$

### 2.2 动态电压控制策略

结合上述并网逆变器注入的无功电流和电压暂降时的电网电流关系, 根据电压暂降时的有功和无功注入策略来评估光伏逆变器的动态电压支撑能力。

根据瞬时无功理论可知, 光伏并网逆变器的输出有功功率可表示为

$$P = \frac{1}{2} U_g I_g \quad (5)$$

当电网电压处于正常状态时, 光伏并网逆变器处于单位功率因数运行, 见式(1)。此时的光伏逆变器输出有功功率可表示为

$$P = \frac{1}{2} U_g I_g = \frac{1}{2} U_g I_d \quad (6)$$

因此, 光伏逆变器在电网电压受到扰动时, 为给电网电压提供一定的无功支撑, 其既要注入有功功率, 又要注入无功功率。因此, 根据光伏并网逆变器有功和无功控制需求的不同, 从并网逆变器角度出发, 常用的动态电压控制策略是恒峰值电流控制策略<sup>[22]</sup>。

在恒峰值电流控制下, 电网电压发生暂降时, 光伏逆变器的最大注入电流  $I_{g\max}$  始终保持恒定, 等于逆变器的额定电流。根据该控制策略, 逆变器的最大电流定义为

$$I_{g\max} = NI_n = \text{const} \quad (7)$$

式中:  $N$  是降额操作中引入的峰值电流比例因子, 其取值范围为 1 到  $\sqrt{2}$  之间;  $\text{const}$  表示的是恒定值。

当电网瞬时电压跌落至  $(1 - 1/\lambda) \leq U_g \leq 0.95$  范围内时, 并网电流在  $dq$  坐标系下的有功分量和无功分量可分别表示为

$$I_d = I_n \sqrt{N^2 - \lambda^2 (1 - U_g^2)} \quad (8)$$

$$I_q = \lambda(1 - U_g)I_n \quad (9)$$

另外, 当电网发生严重故障, 电网瞬时电压跌落至  $U_g < (1 - 1/\lambda)$  时, 并网电流在  $dq$  坐标系下的有功分量和无功分量可分别表示为

$$I_d = I_n \sqrt{N^2 - 1} \quad (10)$$

$$I_q = I_n \quad (11)$$

在该控制策略下, 光伏逆变器输出电流总是保持额定电流不变。相反, 逆变器的有功电流根据电网电压条件在  $I_n$  到 0 之间变化。

### 2.3 主动配电网动态电压支撑策略

为有效发挥光伏逆变器动态无功支撑策略在主动配电网的应用, 文中充分考虑光伏逆变器的电流

设计裕度，并结合电压灵敏度的影响，提出一种主动配电网电压动态支撑策略。

### 1) 电压灵敏度分析

为不失一般性，以无支路低压配电网拓扑结构为例进行分析，如图 3 所示。假设线路有  $n$  个节点，在第  $n$  个节点处注入功率为  $P_n + jQ_n$ ；线首端电压的幅值为  $U_0$ ，第  $n$  个节点处对应的电压幅值依次为  $U_n$ ；相邻节点之间的阻抗分别为  $R_n + jX_n$ ；第  $k$  段线路处对应传输的有功功率和无功功率分别为  $P_k$  和  $Q_k$ 。

配电网第  $k$  段线路处的电压压降为

$$\Delta U = U_k - U_{k-1} = -\frac{P_k R_k + Q_k X_k}{U_k} \quad (12)$$

式中： $U_k$  和  $U_{k-1}$  分别是第  $k$  段线路前后节点的电压； $P_k$  和  $Q_k$  分别是第  $k$  段线路流过的有功功率和无功功率； $R_k$  和  $X_k$  分别是第  $k$  段线路的等效电阻和电感。

由于光伏发电系统接入只会对接入点之前的传输功率产生影响，因此需要区分接入点之前还是之后。当改变光伏逆变器的有功和无功注入时，第  $k$  段线路处的电压压降的增量能够近似地表示为

$$\Delta(\Delta U_k) = \frac{\delta U_k}{\delta P} P + \frac{\delta U_k}{\delta Q} Q \quad (13)$$

因此能够求出第  $k$  段线路末端所对应的节点电压变化为

$$\Delta U_{c-k} = \sum_{i=1}^k \Delta(\Delta U_i) = \sum_{i=1}^k \frac{\delta U_i}{\delta P} P + \sum_{i=1}^k \frac{\delta U_i}{\delta Q} Q \quad (14)$$

则节点  $k$  处电压对有功功率和无功功率的注入灵敏度分别为

$$L_{P,k} = \sum_{i=1}^k \frac{\delta U_i}{\delta P} \quad (15)$$

$$L_{Q,k} = \sum_{i=1}^k \frac{\delta U_i}{\delta Q} \quad (16)$$

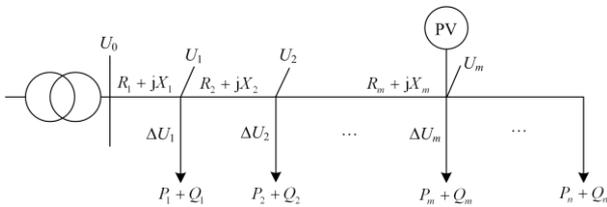


图 3 无支路低压配网

Fig. 3 No branch low-voltage distribution network

以此类推，对于含光伏发电单元的主动配电网而言，某一节点处母线电压对其有功和无功注入的

灵敏度可表示为

$$[\Delta U] = [L_P \quad L_Q] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta U}{\delta P} & \frac{\delta U}{\delta Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中， $L_P$  和  $L_Q$  分别是终端电压有功和无功注入时的灵敏度。

因此，由于有功和无功注入引起的端电压变化可表示为

$$\Delta U = L_P * \Delta P + L_Q * \Delta Q \quad (18)$$

根据式(18)可知，配电网线路终端电压的增加取决于对应有功功率和无功功率的注入，因此在具有更高电阻特性的分布式网络配电网情况下， $L_P$  和  $L_Q$  不能被忽略。

为进一步定量分析主动配电网线路阻抗对灵敏度的影响，以 IEEE 4 节点配电网系统为例计算和分析了母线 4 在不同  $R/X$  值下的灵敏度，如图 4 所示，其中 IEEE 4 配电网系统的基本数据见参考文献 [23]。根据图 4 可知， $L_P$  和  $L_Q$  随配电网的  $R/X$  比值增大而分别呈现增大、减小的变化趋势，且在较高  $R/X$  比时  $L_P$  要远远大于  $L_Q$ 。因此，当分布式配电网具有较高的电阻特性时，电压的增加更取决于有功功率的注入。

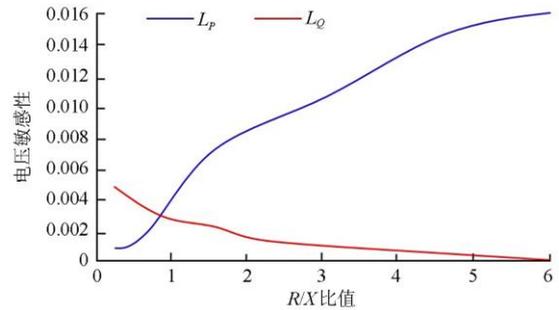


图 4 电压灵敏度和  $R/X$  比值的关系

Fig. 4 Relationship between voltage sensitivity and  $R/X$  ratio

### 2) 动态电压支撑策略

如前一节所述，高  $R/X$  比的分布式配电网的电压增长会随着有功功率  $P$  的增加而加速。为此，文中提出了一种利用光伏逆变器最大允许电流的控制策略，以最大限度地提高配电网短期电压稳定性的有功注入量。需要指出的是，大多数逆变器都设计有过载能力，允许输出电流比额定电流更高的电流，在一定的时间内能够确保可靠性。因此提出的动态电压支撑策略可表示为

$$I_g = \alpha I_n \leq I_{max} \quad (19)$$

式中： $I_{max}$  是逆变器允许输出的最大电流； $\alpha$  是逆变

器的设计裕度。

逆变器的设计裕度是一种为确保过载安全稳定而设计的, 其可以定义为

$$\alpha = \frac{I_{\max}}{I_n} > 1 \quad (20)$$

当电网瞬时电压跌落至  $(1-1/\lambda) \leq U_g \leq 0.95$  范围内时, 并网电流在  $dq$  坐标系下的有功分量和无功分量可分别表示为

$$I_d = \frac{1}{U_g} I_n \text{ 且 } I_g \leq I_{\max} \quad (21)$$

$$I_q = \lambda(1-U_g)I_n \quad (22)$$

另外, 当电网发生严重故障, 电网瞬时电压跌落至  $U_g < (1-1/\lambda)$  时, 并网电流在  $dq$  坐标系下的有功分量和无功分量可分别表示为

$$I_d = I_n \sqrt{\alpha^2 - 1} \quad (23)$$

$$I_q = I_n \quad (24)$$

为充分考虑前一节所述电压灵敏度的影响, 以最大限度地提高端电压为目标, 根据式(17)定义通过注入有功功率和无功功率的目标函数为

$$\max F = \Delta U = L_p * \Delta P + L_q * \Delta Q \quad (25)$$

对应的约束条件为

$$P \geq 0, Q \geq 0 \quad (26)$$

为简化分析, 式(25)中的灵敏度系数可定义为

$$L_p = \varepsilon \rho, L_q = \rho, \text{ 且 } \varepsilon = L_p / L_q \quad (27)$$

结合瞬时无功理论中的有功功率和无功功率定义, 在考虑电压灵敏度影响的基础上, 可以求得传统峰值电流控制策略和本文提出控制策略所对应的目标函数为

$$F_C = -\frac{\rho}{2} U_g I_n \quad (28)$$

$$F_P = \frac{\rho}{2} U_g I_n (\varepsilon \sqrt{\alpha^2 - 1} - 1) \quad (29)$$

式中,  $F_C$  和  $F_P$  分别是传统峰值电流控制策略和本文提出控制策略所对应的目标函数名。

因此, 为体现本文所提控制策略要优于传统的控制策略, 只需要满足式(30)。

$$\varepsilon > 0 \text{ 且 } \alpha > 1 \quad (30)$$

由此可知, 设计具备一定过载能力(电流裕度)的逆变器能够提高其在电网电压扰动瞬间的安全性, 且与传统的恒定峰值电流控制策略相比, 更有利于干扰后电压恢复速度加快。

### 3) 电流裕度对短期电压稳定的影响

为进一步从理论上分析所提控制策略的有效

性, 本节研究了电压增加灵敏度对逆变器设计裕度的影响。由于所提出的控制策略适用于突发电压暂降事件中的动态电压支撑, 同样地对 IEEE-4 节点为例, 对该配电网测试系统在不同电压暂降程度条件下进行了灵敏度研究。假设光伏发电穿透率为 50%, 且逆变器的额定电流为 1.0 p.u., 设定其输出电流由 1.0 p.u. 增加到 1.5 p.u., 对电压增加灵敏度进行了计算和分析, 如图 5 所示。

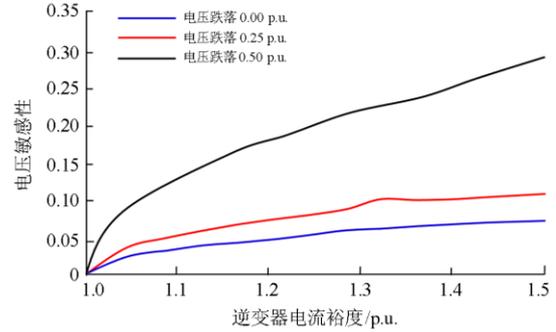


图 5 逆变器电流裕度和电压增加灵敏度关系

Fig. 5 Relationship between the current margin and the voltage increase sensitivity of the inverter

由图 5 结果可以看出, 随着光伏逆变器电流裕度的增加, 电压增加灵敏度逐渐增加。同时电压暂降越高, 对应的电压暂降灵敏度也越大。这可能是由于在线路低压条件下损耗增加所致, 由于在低压条件下损耗较大, 光伏逆变器并网处的注入电流引起的电压增强也会较大。因此, 文中所提的考虑光伏逆变器电流裕度的主动配电网动态电压支撑策略对电网电压暂降条件下的动态电压支撑具有较好的效果。然而需要强调的是, 光伏逆变器的成本与电流设计裕度成正比, 较高的逆变器电流裕度势必会带来较高的成本, 折中考虑的逆变器电流设计裕度为 1.25 p.u.。因此, 文中逆变器的设计裕度  $\alpha$  取值为 1.25 p.u., 不仅有效提高了应对电压暂降的动态电压支撑效果, 同时避免了额外的投资浪费。若要设计逆变器的电流裕度值大于 1.25, 则要综合权衡短期电压稳定支撑效果和其他投资问题等因素。

## 3 仿真验证

为了验证所提出的控制策略在改善配电网短期电压稳定性方面的有效性, 本文在 PSCAD/EMTDC 环境中采用改进后的 IEEE-4 节点和 IEEE-13 节点的配电网系统进行了仿真验证, 将本文所提的控制策略分别与未采取控制策略、传统控制策略进行了对比分析, 其中传统的控制策略是指光伏逆变器无

功电压控制策略未考虑光伏逆变器的电流裕度和主动配电网的无功电压灵敏度等因素。

### 3.1 IEEE-4 节点测试系统

IEEE-4 节点配电网测试系统如图 6 所示。测试系统中光伏发电系统通过变压器与 IEEE-4 总线系统相连接,这样就形成了一个新的总线,图 6 所示为母线 5 处,即是 PCC 点。仿真系统中的稳态电压是 1.0 p.u.,光伏发电的渗透率设置为 50%,通过在母线 1 处产生三相短路接地故障,故障开始时刻是在 0.2 s 且持续时间为 0.2 s。

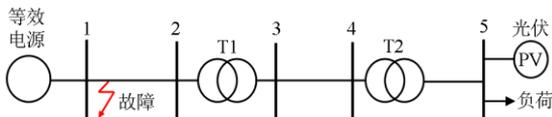


图 6 IEEE-4 节点配电网测试系统

Fig. 6 IEEE-4 node distribution network test system

图 7 是光伏逆变器参与配电网动态电压调节下的节点 5 处电压对比结果图。从图中可以看出,采用动态电压控制策略能够有效改善电压暂降事故后的电压恢复效果。与传统的电压调节策略对比,所提的动态电压调节策略能够加快电压恢复速度,而事故发生后不采取电压控制则会导致电压失稳。因此,文中所提的电压动态调节策略有效提升了配电网系统的短期电压稳定,这是由于光伏逆变器在电网电压暂降过程中注入的有功和无功功率在不同控制策略下是存在差异的,下文将对此进行详细讨论。

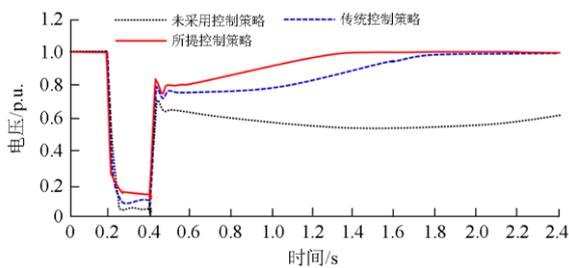


图 7 动态电压调节效果对比

Fig. 7 Comparison of dynamic voltage regulation effects

光伏逆变器在电网电压暂降过程中注入的有功和无功功率以及入网电流分别如图 8 和图 9 所示。由仿真结果可知,当不采取电压控制策略时,光伏逆变器的输出功率变为零,且在事故发生后不再恢复。对于传统的电压控制策略,光伏逆变器在故障期间不提供任何的有功功率,而随着电压逐渐恢复,光伏逆变器向电网注入更多的有功功率和无功功率。而采用所提控制策略的光伏逆变器在故障过程

中同时注入有功和无功功率,并在故障排除后提供几乎额定的有功功率。另外,本文所提的电压支撑控制策略和传统电压支撑策略分别需要 0.38 s 和 1.19 s 恢复电压稳定,因此本文所提的电压支撑策略具有更好的电压恢复效果。

另外,由图 9 的光伏逆变器注入电网电流特性可知,所有情况下注入的电网电流都限制在逆变器允许的最大电流范围内。因此,在任何情况下都可以避免逆变器因过电流保护而发生的可能性。

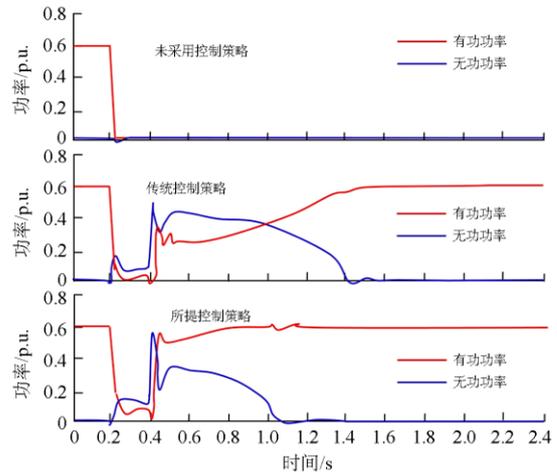


图 8 光伏逆变器输出功率特性

Fig. 8 Output power characteristics of photovoltaic inverters

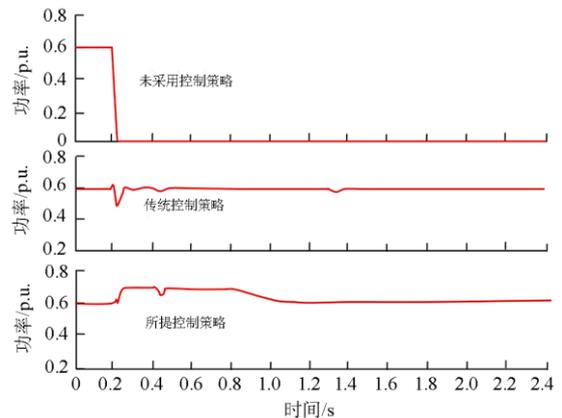


图 9 光伏逆变器注入电网电流特性

Fig. 9 Current characteristics of photovoltaic inverters injected into the grid

### 3.2 IEEE-13 节点测试系统

进一步, IEEE-13 节点配电网的测试系统如图 10 所示,系统参数见文献[24]。测试系统中光伏发电系统接在 611 节点处,其渗透率水平设置为 20%,故障设置在 684 节点和 671 节点之间,仿真场景同前述 IEEE-4 节点系统一致。

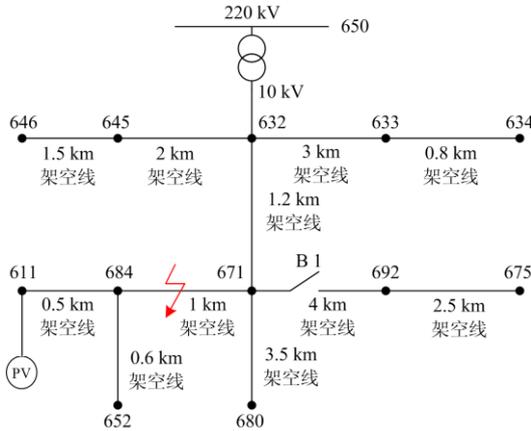


图 10 IEEE-13 节点配电网测试系统

Fig. 10 IEEE-13 node distribution network test system

节点 611 处在故障场景下的电压动态响应特性如图 11 所示。从图中可以看出, 采用动态电压控制策略能具有更快的电压恢复速度以及电压改善效果。因此, 在上述 IEEE-4 节点配电网算例研究中得出的结论在 IEEE-13 节点测试系统中得到了进一步的验证。也就是说, 与其他传统的动态电压调节策略相比, 所提出的动态电压调节策略在改善主动配电网短期暂态电压稳定方面具有更好的性能。

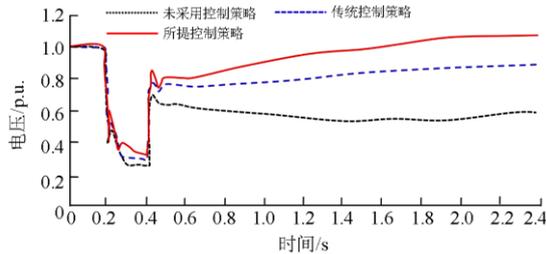


图 11 节点 611 处电压调节效果对比

Fig. 11 Comparison of voltage regulation effect at 611 nodes

另外, 为了定量检测配电网短期电压不稳定的严重程度并比较其性能, 采用一种暂态电压严重程度指数(VSI)的指标<sup>[25]</sup>对本文所提控制策略可行性进行验证, 其定义如式(31)所示。

$$VSI = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=T_c}^T VDI_{i,t}}{N * (T - T_c)} \quad (31)$$

式中:  $N$  是配电系统母线的数量;  $T$  和  $T_c$  分别是故障发生时刻和故障清除时刻;  $VDI$  是暂态电压偏移指标。

以 IEEE-4 节点配电网系统为例, 本文所提的控制策略分别与未采取控制策略、传统控制策略的  $VSI$  进行了对比分析, 结果如图 12 所示。可以看出, 不

采取电压控制策略下的  $VSI$  值特别高, 当采用文中所提控制策略之后,  $VSI$  值明显地减小, 也进一步说明了所提控制策略在改善暂态电压稳定性方面的有效性。

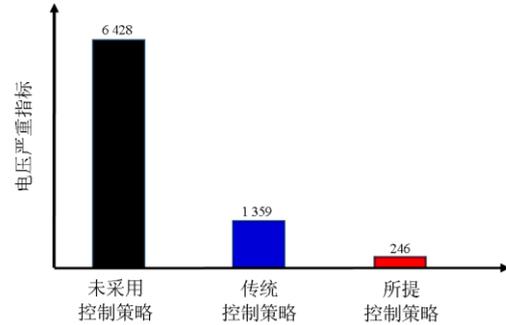


图 12 不同控制策略下的 VSI 值

Fig. 12 VSI values under different control strategies

## 4 结论

本文通过主动配电网暂态无功电压控制策略的研究, 针对配电网系统存在的电压暂降问题, 充分考虑光伏逆变器的电流裕度, 提出了一种新的主动配电网动态电压支撑策略。

1) 结合配电网系统电压增加灵敏度的影响, 所提策略能够最大限度地提高光伏发电系统在电网电压暂降时的有功功率注入。

2) 分析了逆变器电流裕度对短期电压稳定性的影响, 发现逆变器电流裕度对配电网短期电压稳定性的提高是非常有益的, 在考虑逆变器电流裕度 1.25 p.u. 的情况下, 所提出的动态电压控制策略具有较好的效果。

3) IEEE-4 和 IEEE-13 节点系统测试结果表明, 提出的动态电压支撑策略与传统的电压支撑策略相比, 在改善短期电压稳定方面具有更快的电压恢复速度和更好的恢复效果。

## 参考文献

- [1] 钟庆, 姚蔚琳, 许中, 等. 基于平均点线距的电压暂降系统级评估方法[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 13-18.  
ZHONG Qing, YAO Weilin, XU Zhong, et al. A system assessment method for voltage sag severity based on average point-to-line distance index[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 13-18.
- [2] 赵岩, 胡学浩. 分布式发电对配电网电压暂降的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 5-9.  
ZHAO Yan, HU Xuehao. Influence of distributed generation on voltage sag of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 5-9.
- [3] 孙健, 袁晓冬, 刘建坤, 等. 智能配电网无功电压控制

- 系统研究及应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(5): 1-9.
- SUN Jian, YUAN Xiaodong, LIU Jiankun, et al. Research and application of the reactive power and voltage control system in the smart distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(5): 1-9.
- [4] BIDGOLI H S, VAN CUTSEM T. Combined local and centralized voltage control in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(2): 1374-1384.
- [5] 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(1): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.
- [6] 严俊, 陈中, 朱政光, 等. 基于解耦安全域的多馈入交直流系统无功补偿装置落点研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 80-90.
- YAN Jun, CHEN Zhong, ZHU Zhengguang, et al. Research on the location of reactive power compensation devices for multi-infeed AC/DC systems based on decoupling security region[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 80-90.
- [7] 严艺芬, 吴文宣, 张逸, 等. 考虑主动管理措施的配电网无功补偿双层优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 60-66.
- YAN Yifen, WU Wenxuan, ZHANG Yi, et al. Two level optimal allocation of reactive power compensation in distribution network considering active management measures[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 60-66.
- [8] 杨素琴, 罗念华, 韩念杭. 分布式电源并网动态无功优化调度的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 122-126.
- YANG Suqin, LUO Nianhua, HAN Nianhang. Research on dynamic reactive power optimal dispatching of distributed power grid connection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 122-126.
- [9] MAJUMDER R. Aspect of voltage stability and reactive power support in active distribution[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 8(3): 442-450.
- [10] 李祖明, 徐光福, 陈俊, 等. 大型光伏电站快速无功控制系统研制及应用[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 177-184.
- LI Zuming, XU Guangfu, CHEN Jun, et al. Development and application of fast reactive power control system for large-scale PV power plant[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 177-184.
- [11] 蔡永翔, 唐巍, 张璐, 等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 133-141.
- CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multimode voltage control of low-voltage distribution network based on reactive power regulation of photovoltaic inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 133-141.
- [12] 黄祖委, 黄智鹏, 杨夏, 等. 含源配电网的无功电压分段自适应自治控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 10-18.
- HUANG Zuwei, HUANG Zhipeng, YANG Xia, et al. Adaptive control strategy of reactive power and voltage in distribution network with source[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 10-18.
- [13] 严志伟, 赵巧娥, 杨艺, 等. ADS 并网点电压越限逆变器控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(1): 77-80.
- YAN Zhiwei, ZHAO Qiao'e, YANG Yi, et al. Study on control strategy of voltage out of limit inverter in ads parallel network[J]. Power Electronics Technology, 2018, 52(1): 77-80.
- [14] 符杨, 周晓鸣, 苏向敬. 多电压等级不平衡主动配电网电压无功自适应多目标协调优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2136-2147.
- FU Yang, ZHOU Xiaoming, SU Xiangjing. Adaptive multi-objective coordinated optimization of voltage and reactive power in multi voltage level unbalanced active distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2136-2147.
- [15] 王书征, 李先允, 许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 84-91.
- WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride through control of cascaded photovoltaic grid connected inverter with asymmetric grid fault [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 84-91.
- [16] 卓煜, 陈维荣, 戴朝华. 基于灵敏度分析的主动配电网无功电压控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(5): 21-27.
- ZHUO Yu, CHEN Weirong, DAI Chaozhua. Reactive voltage control of active distribution network based on sensitivity analysis[J]. Proceedings of CSU-EPSC, 2017, 29(5): 21-27.
- [17] 符杨, 周晓鸣, 苏向敬. 多电压等级不平衡主动配电网电压无功自适应多目标协调优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2136-2144.
- FU Yang, ZHOU Xiaoming, SU Xiangjing. Adaptive and coordinated volt/var optimization for unbalanced active distribution networks of multiple voltage levels[J]. Power

- System Technology, 2018, 42(7): 2136-2144.
- [18] 谭兴国, 冯高明, 王辉, 等. 兼顾有源滤波的三相四开关光伏并网逆变器[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3590-3596.  
TAN Xingguo, FENG Gaoming, WANG Hui, et al. Three phase four switch photovoltaic grid connected inverter with active filter[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3590-3596.
- [19] 孙功伟, 曾泽湖, 张春旺, 等. 大功率光伏逆变系统测试电网模拟器研究[J]. 华电技术, 2015, 37(4): 72-75.  
SUN Gongwei, ZENG Zehu, ZHANG Chunwang, et al. Study on grid simulator for testing high power photovoltaic inverter system[J]. Huadian Technology, 2015, 37(4): 72-75.
- [20] 杨春波, 王晶晶, 康鹏, 等. 基于混合型算法的光伏发电系统低电压穿越控制策略[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 18-27.  
YANG Chunbo, WANG Jingjing, KANG Peng, et al. Research on LVRT control strategy of photovoltaic system based on hybrid control algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 18-27.
- [21] 张雅静, 郑琼林, 卢远宏, 等. 光伏并网逆变器低电压穿越优化设计研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(6): 984-990.  
ZHANG Yajing, ZHENG Qionglin, LU Yuanhong, et al. Research on low voltage ride through optimization design of photovoltaic grid connected inverter[J]. Acta Energetica Sinica, 2013, 34(6): 984-990.
- [22] ISLAM M, NADARAJAH M, HOSSAIN J. Dynamic behavior of transformerless PV system on the short-term voltage stability of distribution network[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA: 1-5.
- [23] 孙钢虎, 王恩南, 贺婷, 等. 基于自适应暂态下垂控制的光伏频率快速响应方案[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 94-100.  
SUN Ganghu, WANG Ennan, HE Ting, et al. Fast response scheme of photovoltaic frequency based on self-adaptive transient droop control[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 94-100.
- [24] 吴健, 吴奎华, 冯亮, 等. 基于概率预测与谐波潮流的配电网谐波源识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 86-92.  
WU Jian, WU Kuihua, FENG Liang, et al. Identification method of harmonic source in distribution network based on probability prediction and harmonic flow[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 86-92.
- [25] XU Y, DONG Z Y, MENG K, et al. Multi-objective dynamic VAR planning against short-term voltage instability using a decomposition-based evolutionary algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2813-2822.

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-07-26

作者简介:

王景钢(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度控制、风险管控及系统运行管理工作;

刘轶(1980—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度控制、风险管控及系统运行管理工作。

(编辑 张爱琴)