

考虑概率分布的分布式光伏无功下垂控制策略

钱乙卫¹, 田浩², 刘财华², 田昕泽³, 周霞^{3*}, 戴剑丰³

(1. 国网陕西省电力有限公司, 陕西省 西安市 710048; 2. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏省 南京市 211000; 3. 南京邮电大学自动化学院、人工智能学院, 江苏省 南京市 210023)

Droop Control Strategy of Distributed Photovoltaic Reactive Power Considering Probability Distribution

QIAN Yiwei¹, TIAN Hao², LIU Caihua², TIAN Xinze³, ZHOU Xia^{3*}, DAI Jianfeng³

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, Shaanxi Province, China; 2. NARI Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 211000, Jiangsu Province, China; 3. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu Province, China)

摘要: 分布式光伏接入配电网逐渐成为趋势, 然而大规模分布式光伏并网将引起严重的潮流逆向, 导致电压越限和网络损耗增加。针对分布式光伏接入配电网产生的电压越限问题, 提出一种考虑概率分布的分布式光伏无功下垂控制策略, 首先, 考虑光伏出力的概率分布对光伏电站不同光伏单元当前有功功率的影响, 评估计算每个光伏逆变器的可用无功容量; 然后, 根据各光伏单元当前可用无功容量大小对无功下垂系数进行调整, 在不牺牲有功功率的情况下最大限度地利用光伏电站的无功支撑能力; 最后, 通过PSCAD/EMTDC仿真软件, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 分布式光伏; 电压越限; 光伏概率分布; 无功电压控制; 下垂控制

ABSTRACT: Distributed photovoltaic access to the distribution network has gradually become a trend, but the large-scale distributed photovoltaic grid connection will cause serious power flow reversal, resulting in out-of-limit voltage and network loss increase. Aiming at the out-of-limit voltage problem generated by distributed photovoltaic access to distribution network, a distributed photovoltaic reactive power droop control strategy considering the probability distribution was proposed. Firstly, the influence of probability distribution of photovoltaic output on the current active power of different photovoltaic units of photovoltaic power plants was considered, and the available reactive capacity of each

photovoltaic inverter was evaluated and calculated. Then, the reactive power droop coefficient was adjusted according to the current available reactive capacity of each photovoltaic unit, and the reactive power support capacity of the photovoltaic power station was maximized without sacrificing active power. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy was verified by PSCAD/EMTDC simulation software.

KEY WORDS: distributed photovoltaic; out-of-limit voltage; photovoltaic probability distribution; reactive power and voltage control; droop control

0 引言

在光伏扶贫、煤改电的政策引导下, 大量分布式光伏接入城市配电网末端^[1-2]。由于分布式光伏发电系统接入容量持续增长, 高渗透率分布式光伏发电系统中配电网电流反送和电压越限现象也越来越明显, 已经对配电网运行的稳定性和光伏发电系统的消纳能力造成了不良影响^[3-7], 配电网电压的越限控制已经迫在眉睫。目前采用的技术手段主要是利用传统城市配电网的调压手段, 包括采用有载调压变压器、在城市配电网的特定节点上设置无功补偿装置等。这些方法由于暂时还未能考虑分布式光伏的调节能力, 且普遍存在调度能力受限、操作与维修成本高昂、经济效益不好等问题, 因此不再适用于含大量分布式光伏

基金项目: 国家自然科学基金项目(61933005)。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China (61933005).

的配电网^[8-11]。

无功电压协调控制方法是解决有源配电网中的电压越限问题的主要手段。无功电压协调控制方法主要分为3类：就地控制、集中优化控制和分布式控制^[12]。文献[13-16]均采用就地电压控制策略，即不借助通信基础的条件，以逆变器并网点的电压为调节依据，尽可能充分利用电压越限节点逆变器的剩余容量来输出无功。文献[13]根据灵敏度矩阵改进了标准的 $\cos\phi(P)$ 策略，在不同的灵敏度下改变曲线的下垂系数，使之更加适应电压调整的需要。文献[14]通过将光伏输出的有功和无功进行折算，提出一种虚拟有功功率的概念，并根据电压灵敏度理论构建了不同光伏节点的控制优化模型，分为过电压、欠电压、电压正常3种模式进行不同的优化控制。文献[15]提出了一种光伏并网逆变器自动电压调节与功率因数控制策略，降低了光伏接入对配电网电压造成的影响。文献[16]提出将传统的无功补偿器件与逆变器结合使用，使得可调节的无功容量相比逆变器剩余容量大幅增加。文献[17-18]均采用集中电压控制策略，可以调用馈线上所有逆变器的剩余容量来输出无功功率调节电压，并完成一项或多项优化目标。文献[19-20]均采用分布式电压控制策略，各控制器可与临近节点进行通信，通信要求更低，且能够较为充分地调用系统可控资源调压。

上述研究中均没有考虑到分布式电源输出功率的概率分布情况，本文考虑到当前光伏逆变器无功控制面临的技术困难，首先分析分布式光伏接入配电网的电压越限机理，提出考虑概率分布的分布式光伏无功下垂控制策略，计及光伏出力的概率分布及其对光伏电站内各个光伏单元有功功率的影响，并计算各光伏逆变器可利用的无功容量；然后，按照各个光伏单元当前可使用的无功容量情况对无功下垂系数进行自适应调节，充分考虑光伏出力概率分布的情况，针对不同的光照强度进行不同的无功电压支撑，保证光伏电站的安全稳定运行。

1 分布式光伏对配电网电压越限影响机理

以图1所示分布式光伏并入配电网的等值模

型为例，分布式光伏经逆变器将光伏产生的直流电转换为交流电，并通过变压器调压后接入配电网，分布式光伏向配电网系统注入有功功率，因而会对馈线各节点电压产生影响，甚至造成电压越限问题^[21-22]。图中， P_{PV} 和 P_L 分别为分布式光伏的有功功率和并网点的有功负荷； Q_{PV} 和 Q_L 分别为分布式光伏的无功功率和并网点的无功负荷； R 和 X 分别为线路电阻和电抗； U 为并网点的电压； U_s 为电网电压。

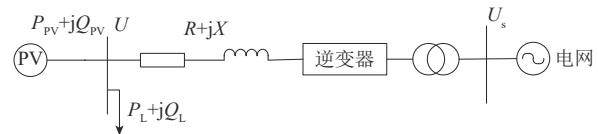


图1 分布式光伏并网等值电路

Fig. 1 Distributed photovoltaic grid-connected equivalent circuit

假设电网电压基本维持恒定，在配电网中未接入分布式光伏时，配电网电压沿馈线的潮流方向逐渐降低；在配电网中接入分布式光伏后，若 $P \gg P_L$ 且 $Q \gg Q_L$ ，则配电网的潮流方向改为由分布式光伏并网点向电网流动，且并网点极有可能发生电压越上限现象。分布式光伏并网点与配电网馈线之间的电压差为

$$\Delta U = \frac{(P_{PV} - P_L)R + (Q_{PV} - Q_L)X}{U} \quad (1)$$

分布式光伏并网逆变器一直以单位功率因数运行，直到并网点的电压达到允许电压波动范围的上下界，光伏逆变器开始输出无功以防止并网点发生电压越限行为。假设在分布式光伏系统有功输出为 P_{PV1} 时，并网点电压达到峰值 U_{max} ，此时电压差为

$$\Delta U_1 = \frac{(P_{PV1} - P_{L1})R - Q_{L1}X}{U_{max}} \quad (2)$$

式中 P_{L1} 、 Q_{L1} 分别为并网点的有功负荷和无功负荷。

假设 P_{PV1} 不是分布式光伏输出功率的最大值，那么当分布式光伏的有功出力增大到 P_{PV2} 时，如果保持并网点的电压不变，则光伏逆变器需发出无功为 Q_{PV2} 。如果要维持并网点电压恒定，那么有

$$\frac{(P_{PV} - P_L)R + (Q_{PV} - Q_L)X}{U} = \frac{(P_{PV1} - P_{L1})R - Q_{L1}X}{U_{\max}} \quad (3)$$

由式(3)可得,当保持并网点电压为最大值时,光伏逆变器的无功出力为

$$\begin{cases} Q_{PV2} = -\Delta P_{PV} \frac{R}{X} + (Q_{L2} - Q_{L1}) \\ \Delta P_{PV} = (P_{PV2} - P_{PV1}) - (P_{L2} - P_{L1}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 P_{L2} 、 Q_{L2} 分别为分布式光伏有功功率最大情况下并网点的有功负荷和无功负荷。

由式(4)可知,当负荷功率和分布式光伏的有功出力变化时,若想维持并网点电压稳定,光伏逆变器必须要输出无功功率,而无功功率的大小与负荷的变化量、分布式光伏的有功变化量和线路阻抗比密切相关。

2 传统电压控制策略

2.1 光伏逆变器的无功调节容量

光伏逆变器的无功容量与其额定容量及其输出的最大有功功率直接相关,光伏逆变器输出的有功功率增大,逆变器的无功容量相应地会随之减小^[23]。通常情况下,若不计逆变器的无功损耗,逆变器的无功容量与逆变器额定容量的关系为

$$Q = \pm \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5)$$

式中: Q 为光伏逆变器的最大无功容量; S 为逆变器的额定容量; P 为逆变器输出的有功功率。

其中,逆变器的容量比额定有功容量高0%~10%。如果一个逆变器的额定并网有功功率为1 MW,其额定容量为1.1 MW,那么在并网有功输出为额定值时,逆变器的无功容量则为0.458 MV·A。

2.2 传统无功电压下垂控制原理

对于光伏并网控制系统,常常使用基于电网电压的定向矢量控制策略,从而将逆变器中的有功和无功进行解耦,解耦后便能实现独立调节。由逆变器的功率解耦原理再加上锁相环技术,就能得到光伏逆变器输出的有功及无功功率:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} V_d i_d \\ Q = \frac{3}{2} - V_d i_q \end{cases} \quad (6)$$

式中 V_d 、 i_d 、 i_q 分别为同步 dq 坐标系下光伏逆变

器的电压、电流值。

通过以上完成对有功功率及无功功率的解耦之后,二者便可分开调节,只需通过所给定的有功电流,便能对逆变器输出的有功和无功进行控制。对于无功控制部分,通常的策略是采用下垂控制^[24],在给定无功下垂曲线后,基于并网点的电压值便可以按照曲线进行无功的吸收或者发出,常见的下垂控制策略为

$$Q_g = \begin{cases} Q_{\max}, & V \leq V_{\min} \\ Q_{\max} \frac{V_n - V}{V_n - V_{\min}}, & V_{\min} \leq V < V_n \\ -Q_{\max} \frac{V - V_n}{V_{\max} - V_n}, & V_n \leq V \leq V_{\max} \\ -Q_{\max}, & V \geq V_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: V 为的电压值,可以是任意时刻的值; V_n 为额定电压; $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$ 分别为下垂控制中的最小电压和最大电压; $Q_{\max}$ 为光伏电站所发出的最大无功功率; $-Q_{\max}$ 为吸收的最大无功功率。

一般的下垂控制策略由下垂曲线来确定电站发出或者吸收的无功功率,从而实现对电压的控制。在这种控制模式下,整个控制过程中下垂曲线的斜率都是固定不变的,如图2控制曲线所示,并网点的电压赋值的大小就决定了逆变器的无功输出的大小。当前并网点电压幅值 $V > V_{\min}$ 时,逆变器开始吸收无功功率;当前并网电压的赋值越大,吸收的无功就会越多;当 $V > V_{\max}$ 时,为了能达到降低电压赋值的目的,逆变器开始大量吸收无功功率。

图3为通常情况下垂控制的原理图,可以将其控制的过程表示为

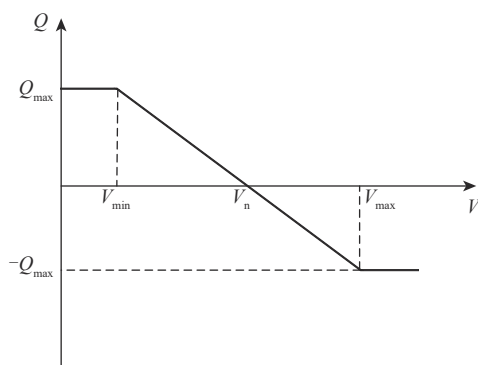


图2 传统下垂控制曲线

Fig. 2 Traditional droop control curve

$$i_{q\text{ref}} = (k_p + \frac{k_i}{s})[Q - k(V_{\text{ref}} - V_{\text{pcc}})] \quad (8)$$

式中： $i_{q\text{ref}}$ 表示逆变器无功电流的参考值； k_p 和 k_i 为PI控制器的参数； k 为下垂控制的系数； V_{ref} 为并网点电压参考值； V_{pcc} 为光伏电站并网点的电压。

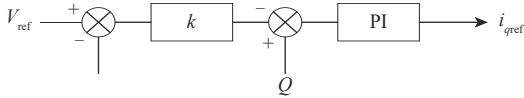


图3 传统下垂控制原理

Fig. 3 Traditional droop control principle

3 考虑概率分布的分布式光伏无功下垂控制策略

由于天气的状态会影响到光伏电站有功功率的输出值，光伏阵列输出的功率受到光照强度和温度的影响，当两者发生变化时，输出功率也会随之变化。虽然光照强度和温度都会影响光伏电站的有功输出，但光照强度对输出功率的影响程度要大得多。当光照强度不断增大时，输出的有功也会随着增大，与此同时，光照强度还会影响到逆变器输出的无功功率。由上述分析可知，需要考虑光照强度及光伏输出二者之间的概率分布特性，由此特性才能保证无论处于何种应用场景下，并网点的电压都不会产生越限，从而可保持配电网系统稳定可靠运行。

3.1 光伏出力概率分布特性

光伏输出的有功功率会受到自然光照强度的强弱、自然环境温度的高低等因素的影响，并且这种影响是不确定的，如果这种随机性导致光伏输出功率波动，将会导致配电网处于不确定的非可靠运行状态。因此，需要将这种随机性和不确定性进行综合考虑，并以此建立光伏输出功率的概率模型。

由上述分析可知，光照强度会对光伏输出的有功功率产生重要影响，太阳光照强度服从Beta分布，从而便可得到光强的概率密度函数为

$$f(i) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{i}{i_{\text{max}}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{i}{i_{\text{max}}}\right)^{\beta-1} \quad (9)$$

式中： Γ 代表Gamma函数； α 与 β 为Beta分布的参数； i 与 i_{max} 分别为真实的光照强度和光照强度的

最大值。

从式(9)可得出光伏输出的有功功率也服从Beta分布，那么便可得到光伏输出有功功率的概率密度函数为

$$f(P_{\text{PV}}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{max}}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{max}}}\right)^{\beta-1} \quad (10)$$

式中 P_{max} 最大输出有功功率。光伏输出有功功率的期望值为

$$E(P_{\text{PV}}) = \int_0^{P_{\text{max}}} P_{\text{PV}} f(P_{\text{PV}}) dP_{\text{PV}} \quad (11)$$

光伏输出有功功率概率分布如图4所示。

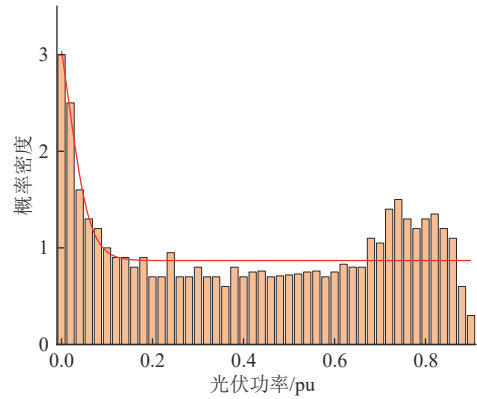


图4 光伏输出有功功率概率密度曲线

Fig. 4 Probability density curve of the photovoltaic output active

3.2 基于光伏概率分布的改进下垂控制策略

传统无功下垂控制的下垂斜率是固定值，但是不同时刻的光伏单元输入光照强度和无功容量不可能完全相同，当光伏电站并网点电压下降而需要光伏单元输出无功进行调压时，若光伏单元输出有功功率较小，则其无功容量较大，此时该光伏单元应充分利用其无功补偿能力进行调压。

传统无功下垂控制没有考虑到光照强度的波动性对光伏输出有功的影响，进而影响到光伏逆变器的无功功率水平，针对传统无功下垂控制存在的不足，改进下垂控制原理框图如图5所示，改进后无功下垂控制过程可描述为

$$i_{q\text{ref}} = (k_p + \frac{k_i}{s})[Q - K(V_{\text{ref}} - V_{\text{pcc}})] \quad (12)$$

式中 K 为光伏逆变器的无功下垂增益，即改进后的下垂增益。

光伏电站无功电压下垂增益的取值与光伏电

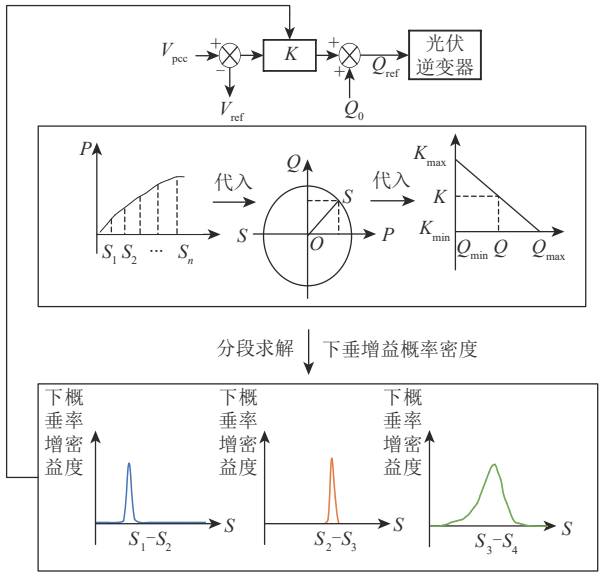


图 5 改进下垂控制原理

Fig. 5 Improved droop control principle

站无功容量有关。无功容量越大，光伏电站无功电压下垂增益就越大，输出的无功功率也越大；反之，则光伏电站无功电压下垂增益越小，输出的无功功率也越小。为了能更好地对并网点电压进行调控，改进下垂增益应根据光伏单元的逆变器无功容量进行设定，下垂增益应与光伏逆变器的最大无功容量成正比，可表示为

$$K = CQ = C \sqrt{S^2 - P^2} \quad (13)$$

式中 C 为固定常数。

将式(10)、(11)代入式(13)，得到随光照强度变化而变化的下垂曲线增益表达式，将光照强度划分为多个区间，对每个光照强度区间的下垂增益进行概率密度计算。不同光照强度下，下垂增益的概率分布如图 6 所示，通过概率密度得到不同光照强度的无功电压下垂增益期望值。

光照强度在一天内会随着时间发生改变，对光伏单元的影响也会随之变化，如果光伏电站拥有越大的光照强度，其无功容量相对而言就越小，因此，光伏单元中的无功容量便也会随之而改变，并且按照不同的光照强度进行下垂增益的调整。为了获得更好的电压支持，如果光伏单元具有更大的无功容量，所设置的无功下垂增益就随之增大；而对于无功容量较少的光伏单元，则需设置较少的增益。此外，如果光照的强度比额定的光

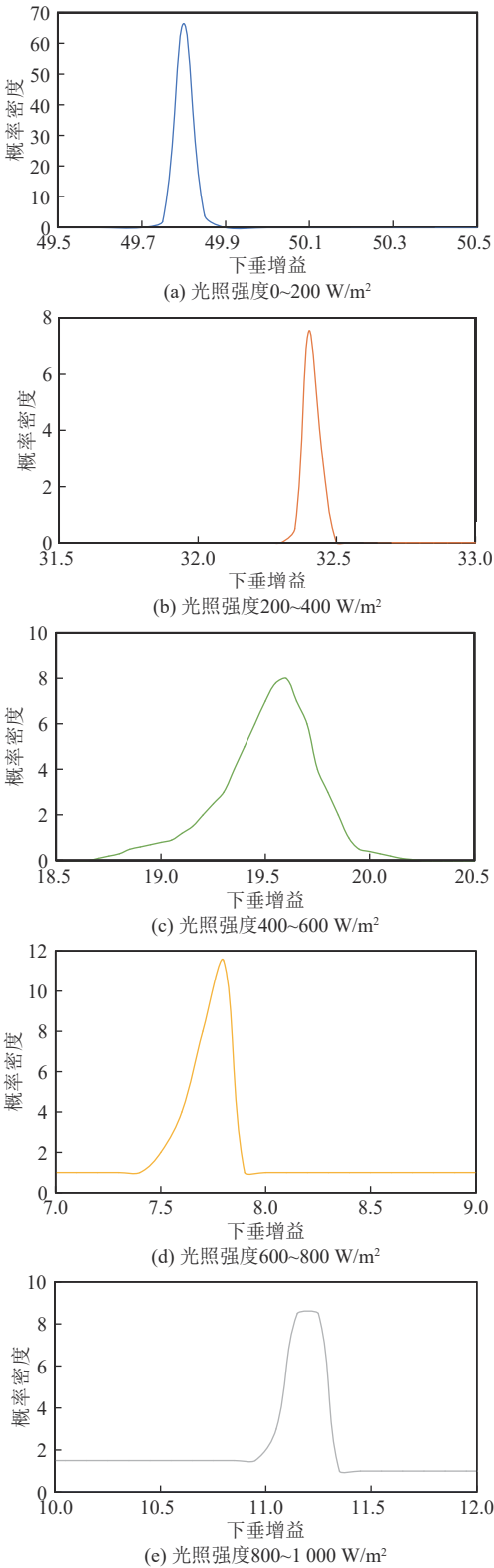


图 6 不同光照强度区间下垂增益概率密度

Fig. 6 Droop gain probability density for different light intensity zones

照强度大，或者等于额定的光照强度，那么下垂增益则要设置为零，这样设置的目的是使得光伏

逆变器能够提供更多的电压支持，从而保证其可靠稳定地运行。

4 算例分析

为验证所提分布式光伏无功下垂控制策略的有效性，本文采用如图7所示的IEEE33节点配电网模型进行仿真分析。系统基准电压为12.66 kV，设定配电网的电压上下限分别为1.05 pu和0.9 pu，变压器出口电压为1.03 pu，在节点5、10、15、20、23、30处分别接入光伏，安装容量均设为1.5 MW，各逆变器的最小运行功率因数均设为0.95，每5 min对光伏出力和负荷数据进行一次采样。

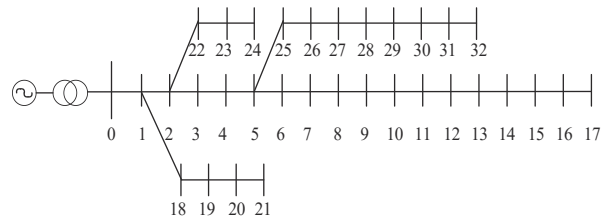


图7 IEEE33节点配电网拓扑
Fig. 7 IEEE33 node network configuration topology

1) 算例1

假设仿真系统光照强度不变，并于第5 s向节点20投入无功负荷，此时配电网系统由于无功缺额而发生电压越限。将本文所提控制策略与未采用控制策略及传统控制策略的控制效果进行对比，以验证本文控制策略的有效性。

首先通过计算求得不同节点处的输入光照强度，然后计算每个节点的无功容量和下垂控制增益，如表1所示。

表1 不同节点的下垂增益和无功容量
Tab. 1 Droop gains and reactive capacities of different nodes

参数	节点5	节点10	节点15	节点20	节点23	节点30
下垂增益	11.2	11.2	32.4	32.4	49.8	49.8
无功容量	0.22	0.22	0.70	0.70	0.95	0.95

图8为未采用控制策略、传统控制策略以及本文控制策略3种控制策略下的光伏电站并网点电压对比结果，其中未采用控制策略的并网电压为0.88 pu，传统控制策略下的电压恢复值为0.88 pu，本文控制策略下的并网点电压为0.96 pu。

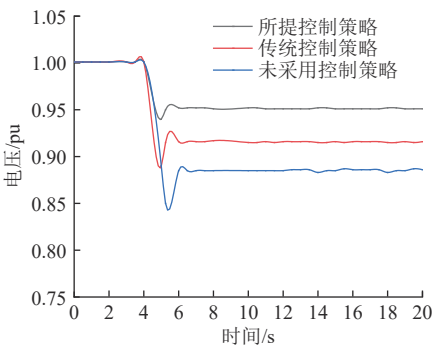


图8 配电网并网点电压
Fig. 8 Distribution and connection point voltage

由图8可见，本文控制策略下的电压恢复效果最好。

2) 算例2

选取我国某地夏季典型日为例，系统在一天24 h内光伏总有功出力和总负荷的变化情况见图9。

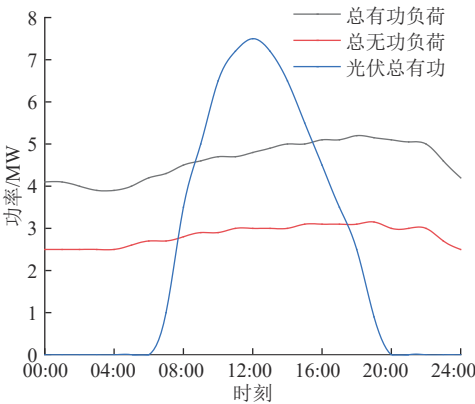


图9 系统24 h内总光伏出力及负荷曲线
Fig. 9 Total photovoltaic output and load curve within 24 h of the system

在未施加任何电压控制措施的情况下，经过仿真计算，系统光伏并网关键节点电压变化曲线见图10。结合图9和图10可以看出，随着光伏逆变器有功出力的增大，系统各光伏并网节点的电压幅值不同程度上升，系统24 h的节点电压越限率达到17.97%，其中末端节点32的电压幅值最高，达到1.113 pu。为使配电网电压趋于理想安全范围，应采取适当的电压控制策略。

采用本文所提的控制策略后，系统中光伏接入节点24 h内的电压情况见图11，图12为采用本文策略在不同光照强度下对应的下垂增益，在光照强度波动的情况下可以采取合适的下垂增益对

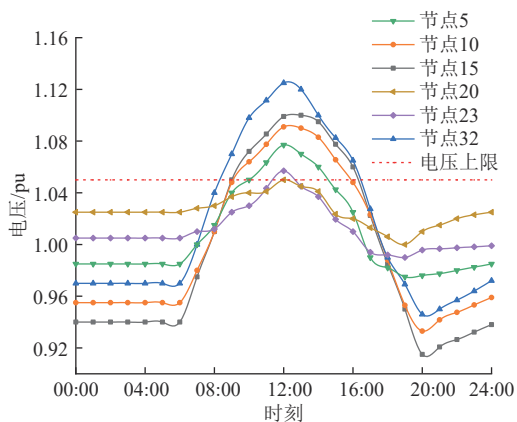


图10 未采用控制策略时光伏接入节点电压变化情况

Fig. 10 Voltage change of the photovoltaic access node when it is not controlled

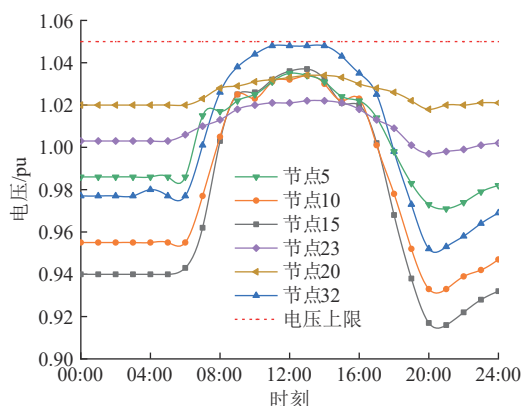


图11 采用所提控制策略后光伏接入节点电压变化情况

Fig. 11 Voltage change of the photovoltaic access point after the proposed control strategy is adopted

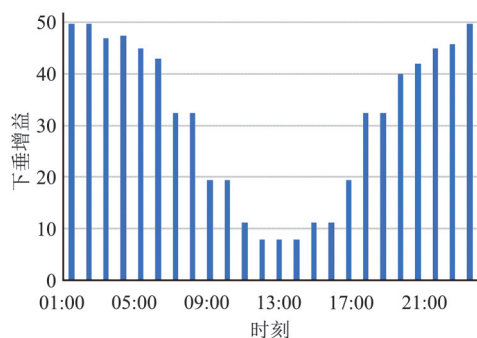


图12 所提控制策略下垂增益

Fig. 12 Droop gain of proposed control strategy

电压进行控制,通过对比可以看出,本文所提控制策略具有良好的电压控制效果。

5 结论

提出一种考虑概率分布的分布式光伏无功下

垂控制策略,计及光照强度概率分布,建立下垂增益和光照强度之间的函数关系,计算各光伏逆变器可利用的无功容量,该策略中光伏电站的无功下垂增益根据当前光伏电站无功容量的大小进行自适应调整。仿真结果表明,所提控制策略相较于传统控制策略具有更好的电压支撑性能,充分考虑光伏出力概率分布的情况,针对不同的光照强度能够自适应进行不同的无功电压支撑,保证光伏电站的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 肖瑶, 钮文泽, 魏高升, 等. 太阳能光伏/光热技术研究现状与发展趋势综述[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 392-404.
XIAO Y, NIU W Z, WEI G S, et al. Review on research status on developing tendency of solar photovoltaic/thermal technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 392-404.
- [2] 陆彬, 高山, 李德胜. 基于发电机运行实际的电力系统日前动态无功优化研究[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 122-130.
LU B, GAO S, LI D S. Research on day ahead dynamic reactive power optimization based on generator operation[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 122-130.
- [3] 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 H K, LIU J, GAO H. Local voltage control of distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 40-45.
- [4] 姚宏民, 杜欣慧, 李廷钧, 等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 462-469.
YAO H M, DU X H, LI T J, et al. Research on the simulation and voltage control strategy of distribution network consumption capacity under high penetration rate of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 462-469.
- [5] 王华伟, 程小虎, 赵蒙蒙, 等. 面向分布式光伏消纳的中压配电网储能规划模型和求解方法[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 58-67.
WANG H W, CHENG X H, ZHAO M M, et al. Method for energy storage planning in medium-voltage distribution networks for distributed photovoltaic consumption[J]. Electric Power Construction, 2023,

- 44(9): 58-67.
- [6] 陈璨, 白明辉, 张婉明, 等. 分布式光伏边界渗透率快速定位及消纳方案择优[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 40-50.
- CHEN C, BAI M H, ZHANG W M, et al. Fast positioning of marginal hosting capacity and optimal selection of accommodation scheme for distributed PVs[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 40-50.
- [7] 张锐, 饶欢, 徐睿烽, 等. 多运行目标下的分布式光伏接入配电网极限容量多模型评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 143-150.
- ZHANG R, RAO H, XU R F, et al. An evaluation method for the maximum distributed photovoltaic power capacity absorbed in the distribution networks considering multiple operation targets[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 143-150.
- [8] LI P, ZHANG C, WU Z, et al. Distributed adaptive robust voltage/var control with network partition in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2245-2256.
- [9] 陈灵, 黄兴华, 张功林, 等. 考虑削峰填谷的分布式电源集群协同控制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 8-15.
- CHEN L, HUANG X H, ZHANG G L, et al. Distributed generations clusters collaborative control method considering peak load shifting[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 8-15.
- [10] BONFIGLIO A, BRIGNONE M, DELFINO F, et al. Optimal control and operation of grid-connected photovoltaic production units for voltage support in medium-voltage networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 254-263.
- [11] 袁昌昊, 朱金大, 倪建富. 含分布式光伏的配电网双层协调电压优化方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 74-82.
- YUAN C H, ZHU J D, NI J F. Coordinated voltage optimization method in distribution network with distributed photovoltaic[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 74-82.
- [12] 邹文斌, 韩松, 荣娜, 等. 基于分布式共识协同的光伏逆变器电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 166-173.
- ZOU W B, HAN S, RONG N, et al. Voltage control strategy for a PV inverter based on distributed consensus collaboration[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 166-173.
- [13] SAMADI A, ERIKSSON R, SODER L, et al. Coordinated active power-dependent voltage regulation in distribution grids with PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1454-1464.
- [14] 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 Y X, TANG W, ZHANG L, et al. Multi-mode voltage control of low-voltage distribution network based on photovoltaic inverter reactive power regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 133-141.
- [15] 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 Y, WEN F S, ZHAO B, et al. Analysis and countermeasures of voltage exceeding limit under high-density distributed photovoltaic access[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1200-1206.
- [16] WANDHARE R G, AGARWAL V. Reactive power capacity enhancement of a PV-grid system to increase PV penetration level in smart grid scenario[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1845-1854.
- [17] ISHAQ J, FAWZY Y T, BUELO T, et al. Voltage control strategies of low voltage distribution grids using photovoltaic systems[C]//2016 IEEE International Energy Conference. Leuven, Belgium: IEEE, 2016: 156-163.
- [18] 刘辉, 邓长虹, 张志刚, 等. 基于光伏逆变器功率协调控制的电压调节方法[J]. 现代电力, 2016, 33(5): 18-23.
- LIU H, DENG C H, ZHANG Z G, et al. A voltage regulation method based on coordinated power control of distributed photovoltaic inverter[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(5): 18-23.
- [19] 刘星, 陈众, 陈李杰, 等. 含高渗透率光伏的配电网就地-分布式电压控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 268-275.
- LIU X, CHEN Z, CHEN L J, et al. Local-distributed voltage control in distribution networks with high permeability of PVs[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 268-275.
- [20] 柴园园, 郭力, 王成山, 等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 738-746.
- CHAI Y Y, GUO L, WANG C S, et al. Distributed voltage control in distribution networks with high permeability of PV[J]. Power System Technology,

- 2018, 42(3): 738-746.
- [21] 肖浩, 裴玮, 邓卫, 等. 分布式电源对配电网电压的影响分析及其优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(S1): 203-213.
- XIAO H, PEI Y, DENG W, et al. Analysis of the impact of distributed generation on distribution network voltage and its optimal control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S1): 203-213.
- [22] 杨苏, 黄俊辉, 关志坚, 等. 含光伏电站发电系统可靠性评估方法研究[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(4): 23-28.
- YANG S, HUANG J H, GUAN Z J, et al. Research of reliability analysis of generation systems with photovoltaic stations[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(4): 23-28.
- [23] 蔡永翔, 张璐, 唐巍, 等. 考虑逆变器无功充裕性的含高比例户用光伏低压配电网电压控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2799-2807.
- CAI Y X, ZHANG L, TANG W, et al. A voltage control strategy for LV distribution network with high proportion residential PVs considering reactive power adequacy of PV inverters[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2799-2807.
- [24] 杨乐新, 姚荣斌. 布式光伏的多模型自适应无功电压

控制策略[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(1): 75-80.

YANG L X, YAO R B. The control strategy for the multi-model adaptive reactive voltage of distributed photovoltaic[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(1): 75-80.

收稿日期: 2023-04-22。

作者简介:



钱乙卫

钱乙卫(1971), 男, 高级工程师, 研究方向为电力调度及电力系统安全稳定运行分析, 22037235@qq.com;



周霞

周霞(1978), 女, 博士, 副教授, 从事电力通信、电力系统分析与控制研究, 本文通信作者, zhouxia@njupt.edu.cn.

(责任编辑 辛培裕)