

含分布式光伏的配电网无功电压控制策略研究

王 博, 严 洋, 夏展鹏, 戴 炜

(国网四川省电力公司攀枝花供电公司, 四川 攀枝花 617099)

摘要:随着配电网中分布式光伏等清洁能源渗透率的不断增加,有效地缓解了能源压力。但其并网点的电压越限问题不容忽视,为此,提出了一种含分布式光伏的配电网无功电压自适应控制策略。首先,分析了光伏并网点电压越限的基本原理;其次,针对负荷大扰动和光伏有功功率输出波动性引起的电压越限问题,分别提出自适应控制策略,通过降低光伏逆变器的有功功率以及增加无功功率的调节能力提高控制效果;最后,结合仿真算例进行分析,结果表明所提策略可以有效降低并网点电压,证明了所提策略的有效性。

关键词:分布式光伏;配电网;光伏逆变器;自适应控制策略;电压越限

中图分类号:TM 761 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)03-0001-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240301

Research on Reactive Voltage Control Strategy of Distribution Network with Distributed Photovoltaic

WANG Bo, YAN Yang, XIA Zhanpeng, DAI Wei

(State Grid Panzhihua Electric Power Supply Company, Panzhihua 617099, Sichuan, China)

Abstract:With the continuous increase of penetration rate of clean energy such as distributed photovoltaic in distribution network, the energy pressure has been effectively alleviated. However, the problem of voltage violation at point of interconnection cannot be ignored. For this reason, an adaptive control strategy for reactive voltage of distribution network with distributed photovoltaic is proposed. Firstly, the basic principle of voltage violation of photovoltaic at point of interconnection is analyzed. Secondly, in view of voltage violation caused by large load disturbances and volatility of photovoltaic active power output, adaptive control strategies are proposed respectively to improve the control effect by reducing the active power of photovoltaic inverters and increasing the adjustment ability of reactive power. Finally, combined with the analysis of simulation examples, the results show that the proposed strategy can effectively reduce the voltage at point of interconnection, which proves the effectiveness of the proposed strategy.

Key words:distributed photovoltaic; distribution network; photovoltaic inverter; adaptive control strategy; voltage violation

0 引 言

随着中国“双碳”战略政策的落地,以光伏发电(photovoltaic, PV)为代表的分布式能源大规模建设,并网容量不断提高^[1]。分布式光伏并网能够提高系统清洁能源的比例,有效缓解能源压力。但随着PV电站并入电网,配电网由辐射式网络变成有源的主动配电网,增加了系统电压的控制难度。当

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(521913230001)

PV通过线路向系统传输大量功率时,并网容量过大会导致用户侧节点电压越限^[2]。

为了提高PV的高渗透率,解决光伏并网引起电压越限的问题,国内外研究者开展了大量研究。文献[3]研究了多个光伏发电并网对辐射式馈线的影响,仿真验证光伏的出力以及接入位置对电压的影响。文献[4]提出配电网分布式电压控制策略,通过无功功率补偿和有功功率缩减实现电压快速控制。文献[5]提出一种配电网多电压层级的无功电压协调控制策略,并经算例进行验证。文献[6]基

于并网点的电压幅值以及 PV 有功功率输出,提出一种无功电压控制策略。

下面针对 PV 输出的波动性以及负荷扰动引起的电压越限问题,提出一种自适应电压控制策略:一方面,针对光伏输出波动引起的电压越限问题,通过自适应设置有功功率极限来抑制过电压,同时提出逆变器的无功电压控制策略,对于无功功率(感性)采用逆变器的剩余容量进行吸收,以避免有功功率降低;另一方面,针对负荷变化引起的电压越限问题,设计了无功功率下垂控制策略,以最大限度地提高逆变器的无功补偿能力,当逆变器剩余容量不足时,通过分析有功功率降低的效果,自适应地降低有功功率。最后,结合仿真算例进行验证,证明所提策略的有效性以及可行性。

1 光伏并网电压越限原理

单个 PV 连接到配电网的等值电路如图 1 所示^[7]。图中: P 和 Q 分别为 PV 的有功功率和无功功率输出; Q_{load} 和 P_{load} 分别为并网点的无功负荷和有功负荷; Q_s 和 P_s 分别为光伏输出满足本地负荷后剩余的无功功率和有功功率; R 和 X 分别为线路电阻和电抗; U 为光伏并网点的电压; U_s 为电网电压。

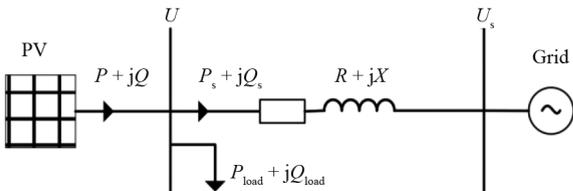


图 1 单个 PV 并网等值电路

从图 1 中可以得到:

$$\begin{cases} P_s = P - P_{\text{load}} \\ Q_s = Q - Q_{\text{load}} \end{cases} \quad (1)$$

在 PV 连接之前,设置 U_s 作为参考矢量,并网点电压 U_a 为

$$U_a = U_s - \frac{P_{\text{load}}R + Q_{\text{load}}X}{U_s} \quad (2)$$

在 PV 连接后,并网点电压 U 为

$$U = U_s + \frac{P_sR + Q_sX}{U} \quad (3)$$

并网点的电压降落 ΔU 为

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} + (P_{\text{load}}R + Q_{\text{load}}X) \left(\frac{1}{U_s} - \frac{1}{U} \right) \quad (4)$$

式(4)中右侧的第二项比第一项小得多,忽略第二项后,电压降可近似表示为

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} \quad (5)$$

假设当 U 达到最大限制 U_{max} 时,光伏电源发出的有功功率为 P_1 ,光伏电源发出的有功功率增加到 P_2 ,逆变器必须从电网系统吸收无功功率(感性) ΔQ 。

$$\Delta Q = \frac{(P_2 - P_1)R}{X} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,当负载和有功输出发生变化时,光伏需要输出无功功率来维持并网点的恒压。

2 自适应电压控制策略

在第 1 章分析的基础上,提出了一种光伏电源并网电压自适应控制策略。当电压因光伏有功功率输出增加引起越限时,预测光伏有功功率输出限制极限,利用光伏逆变器的剩余容量吸收无功功率以防止产生过电压。当电压因负荷变化而越限时,首先由逆变器进行无功电压控制,若逆变器剩余容量不足,则降低有功功率从而释放较大的容量进行无功电压控制;另一方面,当电压超过下限时,将逆变器进行反转,如果逆变器剩余容量不足,首先分析有功功率降低对并网点电压治理的影响,当治理效果为正时,降低有功功率。

2.1 光伏输出功率增加时的电压控制策略

1) 有功功率自适应限制控制

假设 t_1 时,并网点的电压为 U_1 ,有功功率输出为 P_1 ; t_2 ($t_2 > t_1$) 时,并网点的电压为 U_2 ($U_2 > U_1$),有功功率输出为 P_2 ($P_2 > P_1$)。当很小的时间跨度从 t_1 到 t_2 , U 和 P 的变化关系近似线性。此时,可以获得变化率 k 为

$$k = \frac{P_2 - P_1}{U_2 - U_1} \quad (7)$$

根据在时间 t_1 和 k 的采样值 (P_1, U_1),可近似地认为,当 U 达到极限值 U_{max} 时,相应注入配电网光伏的有功功率极限为

$$P_{\text{limit}} = k(U_{\text{max}} - U_1) + P_1 \quad (8)$$

为了抑制过电压的产生,光伏的实际有功功率输出设定为

$$P = \min\{P_{\text{limit}}, P_{\text{MPPT}}\} \quad (9)$$

式中, P_{MPPT} 为 PV 处于最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 模型时的有功功率输出。

当 U_1 、 U_2 的选择接近 U_{max} , P_{limit} 较大, 抑制过电压的能力也相应较弱。从式(9)可以看出, 只有当 P_{MPPT} 超过 P_{limit} 时实际有功输出将会减少。同时, 设置有功率限制的工作电压为 U_b ($U_2 < U_b < U_{\text{max}}$)。

2) 光伏逆变器无功功率控制策略

当逆变器有剩余容量时, 电压越限后直接进行逆变器的无功控制, 并降低并网点电压使其保持在安全范围内, 而不降低光伏的有功功率输出。

逆变器可吸收的最大无功功率 Q_{max} 为

$$Q_{\text{max}} = \sqrt{S^2 - P_{\text{limit}}^2} \quad (10)$$

式中, S 为逆变器视在功率。

利用逆变器的剩余容量进行无功功率控制, 以进一步降低电压。根据 U 确定逆变器吸收的无功功率的参考值 Q_{ref} , Q_{ref} 与 U 的分段函数表达式为

$$Q_{\text{ref}} = \begin{cases} 0, & U < U_2 \\ \frac{Q_{\text{max}}(U - U_2)}{U_2 - U_b}, & U_2 \leq U \leq U_b \\ -Q_{\text{max}}, & U > U_b \end{cases} \quad (11)$$

2.2 光伏负荷扰动电压控制策略

1) 无功功率下垂控制策略

针对配电网负荷变化引起的电压越限问题, 假设光伏并网点电压在负荷变化之前为 U_c , 当并网点增加的负荷为 $P_{\text{load1}} + jQ_{\text{load1}}$ 时电压变为 U_d , U_d 可以用式(12)表示。如果要恢复电压 U_c , 逆变器吸收或释放的无功功率为 Q_{need} , Q_{need} 可以通过式(13)进行计算。

$$U_d = U_s + \frac{(P_s - P_{\text{load1}})R + (Q_s - Q_{\text{load1}} + Q_{\text{need}})X}{U_d} \quad (12)$$

$$Q_{\text{need}} = \frac{(U_d - U_c)(P_s R + Q_s X)}{U_c X} + \frac{U_c(P_{\text{load1}}R + Q_{\text{load1}}X)}{U_c X} \quad (13)$$

逆变器的可调无功功率容量 Q_{pvmax} 为

$$Q_{\text{pvmax}} = \sqrt{S^2 - P_{\text{pv}}^2} \quad (14)$$

式中, P_{pv} 为光伏的有功功率。因此, 当 U 超过极限

时, 可以通过式(12)计算逆变器需要输出或吸收的无功功率, 以使 U 返回到安全阈值范围。

当逆变器容量足够时, 仅通过无功功率下降控制即可调整 U 。由式(15)得到分段表达式。

$$Q_{\text{ref}} = \begin{cases} Q_{\text{pvmax}}, & U < U_{I1} \\ \frac{Q_{\text{pvmax}}(U - U_{I2})}{U_{I1} - U_{I2}}, & U_{I1} < U < U_{I2} \\ 0, & U_{I2} < U < U_{I3} \\ \frac{Q_{\text{pvmax}}(U - U_{I3})}{U_{I3} - U_{I4}}, & U_{I3} < U < U_{I4} \\ -Q_{\text{pvmax}}, & U > U_{I4} \end{cases} \quad (15)$$

式中: U_{I1} 和 U_{I4} 分别为电压安全范围的下限和上限; U_{I2} 和 U_{I3} 分别为控制盲区的下限和上限; $Q_{\text{ref}} < 0$ 表示逆变器吸收无功功率, 否则表示逆变器发出无功功率。

2) 有功功率削减控制策略

当逆变器容量不足时, 仅靠无功功率下垂控制无法将 U 调回安全范围。此时, 为了提高逆变器对电网电压的支持能力, 需要降低 P 以释放逆变器更多的闲置容量来调节电网电压。

当 U 超过 U_{I4} 时, 减少 P , 增加逆变器吸收的 Q 可以减少 U , 因此可以减少 P 以抑制电压越限; 当 U 低于 U_{I1} 时, 此时, 增加逆变器释放的 Q 可以增加 U , 但减少 P 会降低 U 。如果有功功率减少过大, 电压越限可能会更严重。基于此, 提出了一种在电压低于下限值时降低有功功率和增加无功功率的调节方法。

当 U 超过 U_{I4} 时, 光伏功率变化对 U 的影响表达式为

$$\Delta U_{\text{ud}} = \frac{\Delta P_{\text{cur}}R + \Delta Q_{\text{inc}}X}{U_0} \quad (16)$$

式中: ΔU_{ud} 为电压降落量; ΔP_{cur} 为光伏有功功率的减少量; ΔQ_{inc} 为逆变器无功功率吸收增加量。

当 U 低于 U_{I1} 时, 光伏功率变化对 U 的影响的表达式为

$$\Delta U_{\text{uu}} = \frac{-\Delta P_{\text{cur}}R + \Delta Q_{\text{inc2}}X}{U_0} \quad (17)$$

式中: ΔU_{uu} 为电压提升量; ΔQ_{inc2} 为逆变器无功功率发出增加量。

ΔP_{cur} 和 ΔQ_{inc} 的关系为

$$\Delta Q_{\text{inc}} = \sqrt{S^2 - (P - \Delta P_{\text{cur}})^2} - \sqrt{S^2 - P^2} \quad (18)$$

因此, 只有当 ΔU_{uu} 为正值时, 定量有功功率(额

定容量的 5%)才减少,而当 ΔU_{un} 为负值时,停止减少且功率保持不变。

3 光伏逆变器的控制模型

光伏逆变器的控制模型如图 2 所示。图中, P_{ref} 和 Q_{ref} 为光伏电源有功输出和无功输出的参考值。

光伏逆变器一般使用锁相环 (phase locked loop, PLL) 来实现与电网的同步。当 U 超过限制时, P_{ref} 由有源弃电控制策略提供, 逆变器工作在恒功率 (constant power generation, CPG) 模式下。光伏逆变器主要包括电流控制回路、有功功率控制回路和无功功率控制回路。无功功率控制回路实现无功功率的独立控制。 Q_{ref} 从无功功率下降控制获得。

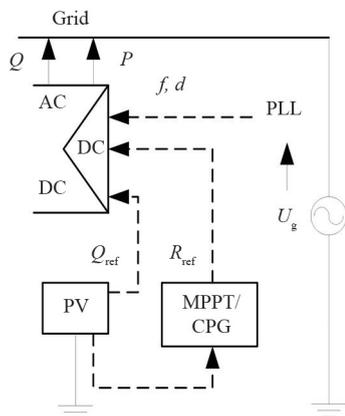


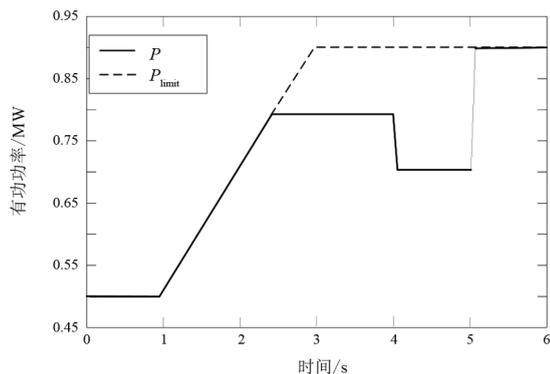
图 2 光伏逆变器的控制模型

4 案例分析

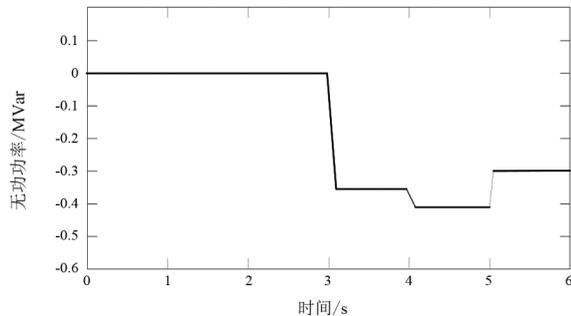
为了验证所提分布式光伏配电网无功电压控制策略的有效性,利用 Matlab 平台搭建了如图 1 所示的配电系统模型。并网点接入负荷为 $0.5+j0.1$ MVA; 逆变器额定容量为 1 MVA; 从并网点到电网的线路长度为 10 km, $R=0.732 \Omega/\text{km}$, $X=0.574 \Omega/\text{km}$; $U_1=1.06$ pu, $U_2=1.065$ pu, $U_b=1.068$ pu, U_{l1} 至 U_{l4} 分别为 0.93 pu、0.95 pu、1.05 pu、1.07 pu; 仿真中采样周期为 0.01 s; 并网点电压安全范围的上限和下限分别为 U_{l4} 和 U_{l1} 。

电压超过上限时的自适应电压控制策略如图 3 所示。1~3 s 内, 光伏电源的有功功率输出从 0.5 MW 增加到 0.9 MW, 此时仅采用有功功率自适应极限控制策略。注入配电网的光伏在有功功率限值控制下, 实际峰值功率为 0.794 MW, 并网点电压在安全

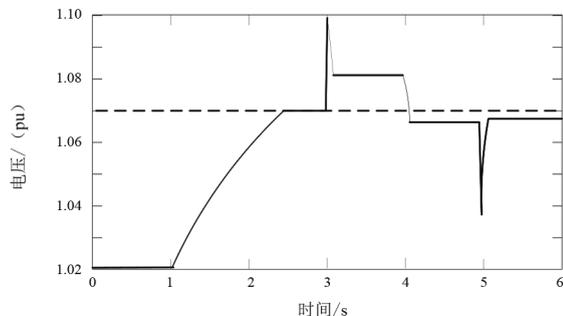
范围内。在 3 s 时, 输入 1 MVar 的容性负荷, 并网点的电压超过 U_{l4} 。此时, 通过无功功率下垂控制, 光伏逆变器利用剩余容量吸收无功功率进行电压越限控制, 但电压 (1.082 pu) 仍超限。为了验证有功功率降低策略的有效性, 在 4 s 时进行自适应有功功率降低, 以抑制电压越限, 释放逆变器更多的剩余容量。在自适应有功功率降低控制之后, 电压 (1.066 pu) 不再超过极限。在 5 s 时切断负荷, 同时通过逆变器无功功率控制策略, 在不降低有功功率输出的情况下, 使电压稳定在安全范围内。



(a) PV有功功率输出



(b) PV逆变器无功功率输出

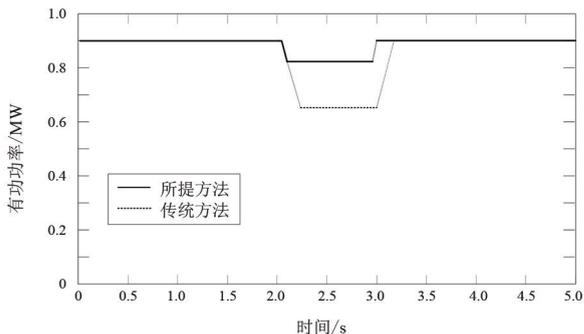


(c) 并网点电压

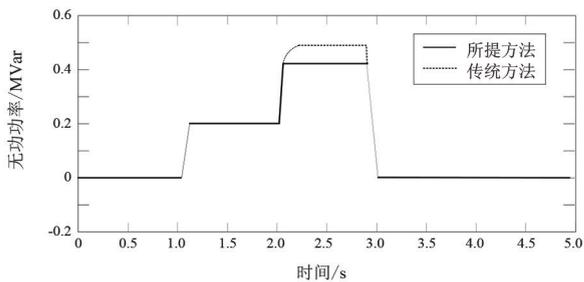
图 3 电压超过上限时的自适应电压控制策略分析

电压超过下限时的自适应电压控制策略如图 4 所示, 并与现有基于无功功率协调控制的电压越限治理策略进行对比。图中可以看出, 在 1 s 处将 0.5 MVar 的感性无功负荷投入并网点后, 电压降至

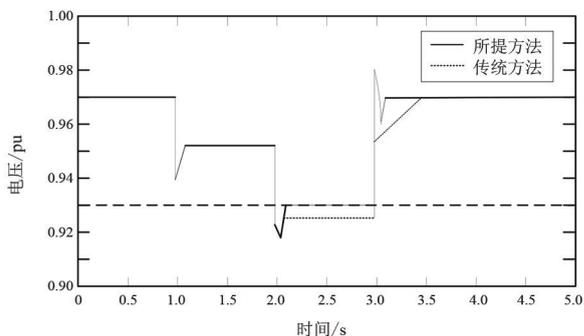
0.939 pu。此时,通过无功功率下垂控制,光伏逆变器利用剩余容量释放无功功率进行电压管理,电压(0.953 pu)回到安全范围。在2 s时,再次输入0.5 MVar的感性无功负荷,电压低于 U_n 。此时进行自适应有功功率降低,以释放更多的剩余容量。当 P 为0.801 MW, Q 为0.416 MVar时,电压控制效果为负,停止有功功率降低。此时电压为0.931 pu,超限情况得到控制。在3 s时,1 MVar无功负荷移除后电压恢复正常。停止电压支持并恢复有功功率输出。



(a) PV有功功率输出



(b) PV逆变器无功功率输出



(c) 并网节点电压

图4 电压超过下限时的自适应电压控制策略分析

5 结论

上面综合考虑分布式光伏有功功率波动和负荷变化引起的电压越限问题,提出了一种自适应电压控制策略,以适应电压越限情景和光伏出力变化。当光伏输出的增加可能导致并网点的电压超过极限

时,一方面根据电压值设定注入配电网的有功功率的上限值;另一方面,利用光伏逆变器的剩余容量吸收感性无功功率,从而进一步降低电网电压。当面临负荷引起的电压超过极限的问题时,首先,利用光伏逆变器的剩余容量释放无功功率,当逆变器剩余容量不足时,分析降低有功功率和发出无功功率的电压控制效果,避免不必要的有功功率降低;然后,设计自适应有功功率降低策略和无功功率下垂控制策略来提高电网电压;最后,结合仿真实验验证了所提含分布式光伏的配电网无功电压控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 陈志华,柯强,胡经纬,等.含分布式光伏的有源配电网无功电压控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(2):16-24.
- [2] WANG H, LI Q Y, WANG S Q, et al. Modeling and control strategy of reactive power coordination in the combined system of new energy plant and nergy storage station[C] // 9th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR2023), 24-26 Feb 2023, Wuhan, China. 2023:235-239.
- [3] 石博隆,丁磊明,杨晓雷,等.含分布式光伏的有源配电网无功电压控制研究[J].浙江电力,2020,39(5):82-87.
- [4] 张波,高远,李铁成,等.计及IGBT结温约束的光伏高渗透配电网无功电压优化控制策略[J].电工技术学报,2024,39(5):1313-1326.
- [5] 周文俊,曹毅,李杰,等.考虑风电场调控裕度的风火打捆直流外送系统无功电压紧急控制策略[J].中国电力,2023(4):77-87.
- [6] 马庆,邓长虹.基于单/多智能体简化强化学习的电力系统无功电压控制方法[J].电工技术学报,2024,39(5):1300-1312.
- [7] 高波,彭程,路文梅,等.基于改进粒子群算法的电网系统无功电压控制[J].计算机仿真,2022,39(9):86-90.

作者简介

王博(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统;

夏展鹏(1991),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统分析;

严洋(1979),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统;

戴炜(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力工程。

(收稿日期:2023-09-06)