

基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略

高鹏程¹,王 蕾¹,李立生¹,徐丙垠¹,周 健²

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院,山东 淄博 255049;

2. 国网上海市电力公司 电力科学研究院,上海 200437)

摘要:高渗透率光伏电站并网会导致配电系统潮流逆向和节点电压越限。因此,为保证电网的安全稳定运行,必须对光伏电站接入点的越限电压进行调整。根据光伏逆变器的容量特性和技术规范,以调整逆变器有功/无功功率为手段,提出了光伏电站逆变器电压控制策略和逆变器有功/无功功率调整的计算方法。所提电压控制策略充分利用了逆变器容量进行电压调整,具有良好的控制效果和经济性,计算简便且无需获取馈线负荷水平和分布情况。仿真分析表明,所提逆变器电压控制策略能够较好地解决光伏电站接入点的电压越限问题。

关键词:光伏电站;逆变器;电压控制;功率因数

中图分类号:TM 615

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.028

0 引言

10 kV 及以下电压等级的配电网三相供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ ^[1]。高渗透率光伏(PV)电站并网给配电系统注入了大量的有功功率,改变了系统原有的潮流方向,并对节点电压造成严重影响^[2]。由于光伏电站并网对电压的抬升效应,使线路节点电压面临越限的风险,这将严重危害电力设备和配电网的安全稳定运行,因此对于含高渗透率分布式电源的配电网,必须采取简便、快速、有效的电压控制措施。

光伏电站并入配电网后的电压控制问题是目前研究的重点和关键^[3-5]。文献[6]综述了低压配电网中基于有功调节、无功调节、分接头调节以及多设备协同等控制方法的特点和适用场景,并指出目前低压配电网的电压调整现状如下:当配电网的通信条件不健全时,协同控制方案一般难以广泛应用,只能通过对电压越限节点实施就地控制方案解决电压越限问题;由于传统的含有载调压分接头的变压器和并联电容器设备响应速度和机械磨损的限制,故系统很难即时响应并网光伏功率的快速和频繁变化;在线路电阻 R 和电抗 X 数值相当的配电网中,光伏逆变器不仅可以快速连续调节,其有功/无功功率控制相较于设备分接头调整、蓄电池储能以及无功设备补偿等其他调压方式更加快速、经济、有效,适用于分布式光伏电源接入配电网的电压控制。文献[7-8]提出了满足光伏逆变器容量特性和节点电压偏移限制条件的低压配电网无功功率裕度的评估方法和充裕性指标,设计了就地有功/无功综合控制

策略。文献[9]通过削减逆变器有功功率并利用逆变器剩余无功功率对节点越限电压进行治理。文献[10]基于电压灵敏度理论推导了有功功率和无功功率之间的折算方法,并实现了无通信条件下的节点电压控制。文献[11]将双层规划数学模型变换为求解多次的单层规划问题,计算了满足电压限制条件下的最大光伏接入容量。文献[12]分析了光伏电站并网点电压升高的原理,提出了一种基于PI控制的瞬时跟踪电压调整策略,仿真结果表明有功电流和无功电流对电压控制都具有良好的稳态精度。文献[13]提出了光伏电站注入配电网有功功率实时限值的计算方法,并利用光伏逆变器的剩余容量进行电压控制。

综上所述,目前针对光伏电站接入配电网电压控制技术的研究大多是直接对当前电网中的分接头设备、储能设备和无功补偿设备等可控设备进行优化协调。本文以光伏电站接入配电网节点电压越限的工程实际为背景,分析了光伏逆变器有功/无功功率的容量特性,提出了一种基于逆变器光伏电站电压控制方法,推导了控制方案中逆变器所需调整的有功功率和无功功率的简化计算公式,分析了测量参数不准确对控制策略的影响,提出了考虑其计算误差的修正公式和修正方法。仿真分析表明,该方案能够较好地解决高渗透率光伏接入下节点电压越限问题。该方法与现有方法的区别和优势在于:对电网通信依赖小,降低了通信系统负担;所提电压控制策略采用线性计算方法,计算简便,计算量小;避免额外设备成本投资,具有良好的经济性和电压控制效果,适用于工程实际应用和在线电压控制。

1 光伏电站逆变器电压控制策略

1.1 光伏逆变器的容量特性分析

光伏电站并网逆变器应在其无功调节范围内按

收稿日期:2018-06-02;修回日期:2019-01-14

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902800)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902800)

光伏电站无功电压控制系统的协调要求进行无功-电压控制。图1为逆变器有功/无功容量曲线,逆变器功率因数的理论范围在图中所示的半圆内。在光伏逆变器参与电压调节的过程中,当逆变器输出的有功功率大于其额定功率的50%时,功率因数应不小于0.98(超前或滞后)^[14]。

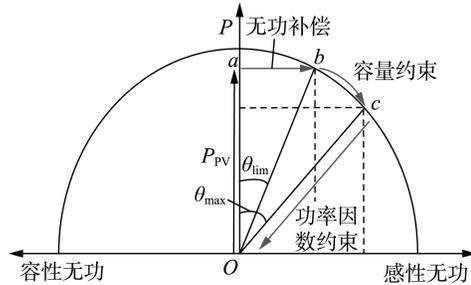


图1 逆变器输出有功功率和无功功率的关系

Fig.1 Relationship between active power and reactive power of inverter

逆变器参与电压调整的过程可以分为如下3个阶段。

ab段:逆变器的无功补偿阶段。在此阶段中,逆变器的有功功率 P_{PV} 保持不变;随着逆变器功率因数角 θ 的增加,逆变器的无功功率 Q_{PV} 变大。该阶段中逆变器各参量之间的关系如式(1)所示^[14]。随着无功功率的增加,逆变器在**b**点达到最大功率 S_{max} ,记此时逆变器的功率因数角为逆变器的容量约束角 θ_{lim} ,逆变器各参量关系满足式(2)。

$$\cos \theta = P_{PV} / \sqrt{P_{PV}^2 + Q_{PV}^2} \quad (1)$$

$$\theta_{lim} = \arccos(P_{PV} / S_{max}) \quad (2)$$

bc段:逆变器的容量约束阶段。在此阶段中,逆变器的功率 S 保持在最大值 S_{max} 不变;逆变器输出的感性无功功率 Q_{PV} 随功率因数角 θ 的增大而继续增大,而逆变器输出的有功功率 P_{PV} 变小。该阶段逆变器各参量的关系满足:

$$P_{PV} = S_{max} \cos \theta, \quad Q_{PV} = S_{max} \sin \theta \quad (3)$$

cO段:逆变器的功率因数约束阶段,即逆变器功率缩减阶段。在此阶段中,逆变器保持运行在最大功率因数角 θ_{max} 不变,缩减功率 S 。该阶段逆变器各控制参量的关系满足:

$$P_{PV} = S \cos \theta_{max}, \quad Q_{PV} = S \sin \theta_{max} \quad (4)$$

上述3个阶段描述了逆变器参与电压调整过程中所有可能出现的状态。在不同阶段中,逆变器的有功功率 P_{PV} 、无功功率 Q_{PV} 、功率 S 和功率因数角 θ 的取值及范围列于表1。值得注意的是,经过无功补偿阶段后,若逆变器功率 S 在达到最大功率 S_{max} 前已经达到最大功率因数角 θ_{max} ,则不会出现逆变器容量约束的情况,即逆变器参与调压的过程中并不一定都会经历3个阶段,这与逆变器的当前工作

状态相关。

表1 不同阶段下逆变器各参量之间的关系

Table 1 Relationship among inverter parameters under three stages

运行阶段	P_{PV}	Q_{PV}	S	θ
ab段	P_{PV}	$P_{PV} \tan \theta$	$P_{PV} \sqrt{1 + \tan^2 \theta}$	$0 \sim \theta_{lim}$
bc段	$S_{max} \cos \theta$	$S_{max} \sin \theta$	S_{max}	$\theta_{lim} \sim \theta_{max}$
cO段	$S \cos \theta_{max}$	$S \sin \theta_{max}$	$0 \sim S_{max}$	θ_{max}

1.2 光伏逆变器电压控制策略分析

在光伏逆变器参与电压调整的过程中,通过调节功率因数角发出感性无功功率进行调压,在提高逆变器容量利用率的同时,减少了线路上的无功功率传输,可以降低配电网的功率损耗和电压损失,因此光伏逆变器发出感性无功功率对电力系统中出现的节点电压越上限情况具有非常积极的作用。由此,将调整逆变器功率因数角作为光伏逆变器调压过程中的第一选择。

光伏电站注入配电线路的有功功率过剩是导致节点电压越限的根本原因^[13]。虽然在逆变器功率因数约束阶段(**cO**段)中会牺牲光伏电站发出的部分有功功率,但可以从源头上缓解电压越限对众多电力设备及配电线路造成的严重危害。考虑到该阶段会减小光伏电站的有功出力,经济性较差,因此将削减光伏逆变器有功功率作为电压调整策略中的最后手段。

本文以调整逆变器功率因数角且最大限度地避免有功功率缩减为原则,提出了一种光伏逆变器电压控制策略,其控制流程如附录中图A1所示。

光伏并网后,对光伏电站接入点目标电压限值 $U_{k,lim}$ 和逆变器最大功率因数角 θ_{max} 进行设置,并对光伏逆变器的功率 S 、功率因数角 θ 和光伏电站接入点电压 U_k 进行监测,其中下标 k 为光伏接入节点号。

无功功率补偿阶段:当 $U_k > U_{k,lim}$ 时,若逆变器的功率 S 未达到最大值 S_{max} 且功率因数角 θ 也未达到最大值 θ_{max} ,则进入光伏逆变器的无功功率补偿阶段(**ab**段),即通过调大光伏逆变器的功率因数角 θ ,在不牺牲有功功率输出的情况下,发出感性无功功率进行补偿。

最大功率调整阶段:当 $U_k > U_{k,lim}$ 时,若逆变器的功率 S 已达到最大值 S_{max} 而功率因数 θ 还未达到最大值 θ_{max} ,则进入光伏逆变器的最大功率调整阶段(**bc**段),即调整光伏逆变器的功率因数角 θ ,通过牺牲有功功率输出的方式多发出无功功率 Q_{PV} 进行补偿。

功率缩减阶段:当 $U_k > U_{k,lim}$ 且功率因数角 θ 达到最大值 θ_{max} 时,则进入光伏逆变器的功率缩减阶段(**cO**段),即通过削减光伏逆变器功率的方式进行电压控制。

2 逆变器有功/无功功率的计算方法

在逆变器参与电压控制的不同阶段中,需要通过调整逆变器有功/无功功率实现光伏电站接入点电压的控制,因此本文提出一种逆变器有功/无功功率调整量的计算方法。

光伏电站并入有 n 个节点的配电网的分析模型如图 2 所示。图中节点 0 表示变电站出口母线且为平衡节点,其以上部分可近似等效为无穷大系统。节点 k 为光伏电站的接入点,记其节点电压幅值为 U_k ,所接入的负荷为 P_k+jQ_k ,节点 0 到节点 k 间的线路阻抗为 $R_{\Sigma k}+jX_{\Sigma k}$,光伏电站的输出功率为 $P_{PV}+jQ_{PV}$ 。分析过程中,视变压器为理想变压器模型,忽略线路间的互感和对地分布电容。本文的电压控制策略采用线性计算方法,其计算和控制响应速度快,因此在电压调整过程中可以认为负荷变化很小或近似不变。

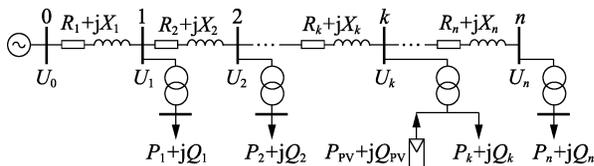


图 2 光伏电站并网模型

Fig.2 Model of grid-connected PV station

2.1 逆变器无功功率补偿阶段

当光伏电站正常运行时,逆变器一般工作在最大功率因数点,光伏电站接入点电压 U_k 满足:

$$U_0 = U_k + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_j \right) R_{\Sigma i} + \left(\sum_{j=i}^n Q_j \right) X_{\Sigma i} \right]}{U_k} - \frac{P_{PV} R_{\Sigma k}}{U_k} \quad (5)$$

在无功功率补偿阶段,通过逆变器发出无功功率将光伏电站接入点电压调整为目标电压 $U_{k,lim}$,则满足:

$$U_0 = U_{k,lim} + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_j \right) R_{\Sigma i} + \left(\sum_{j=i}^n Q_j \right) X_{\Sigma i} \right]}{U_{k,lim}} - \frac{P_{PV} R_{\Sigma k} + Q_{PV,b} X_{\Sigma k}}{U_{k,lim}} \quad (6)$$

其中, $Q_{PV,b}$ 为将光伏电站接入点电压 U_k 降低到目标电压 $U_{k,lim}$ 逆变器所需发出的感性无功功率。整理式(5)和(6)可得:

$$Q_{PV,b} = A/X_{\Sigma k} \quad (7)$$

其中, $A = U_0(U_k - U_{k,lim}) + U_{k,lim}^2 - U_k^2$ 。

当光伏逆变器功率 S 达到了最大值 S_{max} 时,若光伏电站接入点的电压依旧越限,则进入逆变器最大功率调整阶段。

2.2 逆变器最大功率调整阶段

当逆变器达到最大容量时,逆变器的功率因数角为 θ_{lim} ,光伏电站接入点电压 U_k 满足:

$$U_0 = U_k + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_j \right) R_{\Sigma i} + \left(\sum_{j=i}^n Q_j \right) X_{\Sigma i} \right]}{U_k} - \frac{S_{max} (R_{\Sigma k} \cos \theta_{lim} + X_{\Sigma k} \sin \theta_{lim})}{U_k} \quad (8)$$

进入最大功率调整阶段后,逆变器功率始终保持在最大值 S_{max} ,经过功率因数调整后,光伏电站接入点电压调整为目标电压 $U_{k,lim}$,且满足:

$$U_0 = U_{k,lim} + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_j \right) R_{\Sigma i} + \left(\sum_{j=i}^n Q_j \right) X_{\Sigma i} \right]}{U_{k,lim}} - \frac{R_{\Sigma k} P_{PV,t} + X_{\Sigma k} \sqrt{S_{max}^2 - P_{PV,t}^2}}{U_{k,lim}} \quad (9)$$

联立式(8)和(9),可得经逆变器最大功率调整阶段后光伏逆变器发出的有功功率 $P_{PV,t}$ 为:

$$P_{PV,t} = \frac{(A+B)R_{\Sigma k} + CX_{\Sigma k}}{R_{\Sigma k}^2 + X_{\Sigma k}^2} \quad (10)$$

其中, $B = S_{max} (R_{\Sigma k} \cos \theta_{lim} + X_{\Sigma k} \sin \theta_{lim})$; $C = [(S_{max} R_{\Sigma k})^2 + (S_{max} X_{\Sigma k})^2 - (A+B)^2]^{1/2}$ 。

2.3 光伏逆变器功率缩减阶段

若经过上述 2 个阶段后依旧无法抑制光伏电站接入点的越限电压,则必须要对逆变器有功功率进行削减。削减量的计算方法如下。

当逆变器达到最大功率因数角 θ_{max} 时,光伏电站接入点电压 U_k 满足:

$$U_0 = U_k + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_j \right) R_{\Sigma i} + \left(\sum_{j=i}^n Q_j \right) X_{\Sigma i} \right]}{U_k} - \frac{S_{max} \cos \theta_{max} (R_{\Sigma k} + X_{\Sigma k} \tan \theta_{max})}{U_k} \quad (11)$$

在逆变器功率缩减阶段中,逆变器始终保持最大功率因数角 θ_{max} ,经过功率缩减将光伏电站接入点电压调整为目标电压 $U_{k,lim}$,且满足:

$$U_0 = U_{k,lim} + \frac{\sum_{i=0}^k \left[\left(\sum_{j=i}^n P_j \right) R_{\Sigma i} + \left(\sum_{j=i}^n Q_j \right) X_{\Sigma i} \right]}{U_{k,lim}} - \frac{P_{PV,s} (R_{\Sigma k} + X_{\Sigma k} \tan \theta_{max})}{U_{k,lim}} \quad (12)$$

联立式(11)和(12),可得经过逆变器功率缩减阶段后光伏逆变器的有功功率 $P_{PV,s}$ 为:

$$P_{PV,s} = S_{max} \cos \theta_{max} + \frac{A}{R_{\Sigma k} + X_{\Sigma k} \tan \theta_{max}} \quad (13)$$

由式(7)、(10)和(13)可以看出,在整个光伏逆变器的电压控制策略中,逆变器发出的有功功率 P_{PV} 和无功功率 Q_{PV} 仅与变电站低压母线电压 U_0 、分布式电源接入节点电压 U_k 、线路阻抗 $R_{\Sigma k}$ 和 $X_{\Sigma k}$ 有关。其中,通过光伏电站的测量元件和历史数据记录获取 U_k 的实时和历史数据,借助通信手段可获得变电站低压母线电压 U_0 ,通过对线路具体参数的测量和计算可获得线路阻抗 $R_{\Sigma k}$ 和 $X_{\Sigma k}$ 。

3 光伏逆变器电压控制策略的灵敏度分析

变电站低压母线电压 U_0 、分布式电源接入节点电压 U_k 、线路阻抗 $R_{\Sigma k}$ 和 $X_{\Sigma k}$ 为本文控制策略中计算所需的控制参数,逆变器有功/无功功率 P_{PV} 和 Q_{PV} 为本文策略中的状态变量。

线路阻抗 $R_{\Sigma k}$ 和 $X_{\Sigma k}$ 虽然可以经过测量和计算获得,但考虑到在实际现场中难免会出现测量误差,其数值并不精确,并且当通信设备受到干扰时,会出现 U_0 获取不及时等情况。这些误差有可能使得有功/无功功率计算存在偏差并导致节点电压存在控制偏差。因此需要分析逆变器电压控制策略对控制参数 (U_0 、 $R_{\Sigma k}$ 和 $X_{\Sigma k}$) 的灵敏度。控制策略对控制参数的灵敏度计算方法参见文献[15]。

3.1 控制策略对控制参数的灵敏度分析

当光伏电站接入点电压越限时,逆变器执行电压控制策略进行调压。控制参数产生误差时,该误差引起光伏电站接入点电压的偏差矩阵 ΔU_k 为:

$$\Delta U_k = S [\Delta R_{\Sigma k} \quad \Delta X_{\Sigma k} \quad \Delta U_0]^T \quad (14)$$

其中, $\Delta R_{\Sigma k}$ 、 $\Delta X_{\Sigma k}$ 和 ΔU_0 为各控制参数的偏差;矩阵 S 为光伏电站节点电压 U_k 对各个控制参数的灵敏度矩阵。

$$S = \begin{bmatrix} S_R^{U_k} \\ S_X^{U_k} \\ S_U^{U_k} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} S_Q^{U_k} \\ S_P^{U_k} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} S_R^Q & S_X^Q & S_U^Q \\ S_R^P & S_X^P & S_U^P \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $S_U^{U_k}$ 、 $S_R^{U_k}$ 和 $S_X^{U_k}$ 分别为光伏电站节点电压 U_k 对变电站低压母线电压 U_0 、线路参数 $R_{\Sigma k}$ 和 $X_{\Sigma k}$ 的灵敏度矩阵; $S_P^{U_k}$ 和 $S_Q^{U_k}$ 分别为光伏电站节点电压 U_k 对逆变器有功功率 P_{PV} 和无功功率 Q_{PV} 的灵敏度矩阵,可由潮流计算中的雅可比矩阵求得,其他变量类似。

3.2 光伏逆变器有功/无功功率修正计算

在上述电压控制策略中,忽略了在实际现场获取控制参数的测量偏差和计算中电压降落的横分量,为了实现对接入点电压的调整,本文在逆变器有功/无功功率计算方法的基础上,提出一种根据接入点电压对逆变器有功/无功功率进行实时修正的计算方法。以逆变器无功补偿阶段为例进行说明。

光伏电站接入点电压 U_k 是逆变器输出无功功率 Q_{PV} 的函数,记其函数关系为 $U_k = f(Q_{PV})$ 。为使

接入点电压 U_k 调整到电压上限 $U_{k,lim}$ 以下,实际逆变器所需发出的无功功率为 $Q_{k,PV}$,则有:

$$Q_{k,PV} = Q_{PV,b} + \Delta Q_{PV,b} \quad (16)$$

其中, $Q_{PV,b}$ 为式(7)中无功补偿阶段的无功功率计算量; $\Delta Q_{PV,b}$ 为无功功率的修正值,且满足式(17)。

$$f(Q_{PV,b} + \Delta Q_{PV,b}) = U_{k,lim} \quad (17)$$

由于控制参数误差相对于真实值比较小,因此 $\Delta Q_{PV,b}$ 也较小,故将式(17)在 $Q_{PV,b}$ 处进行一阶泰勒级数展开,可得:

$$f(Q_{PV,b}) + \left. \frac{\partial f}{\partial Q} \right|_{Q_{PV,b}} \Delta Q_{PV,b} - U_{k,lim} = 0 \quad (18)$$

其中, $f(Q_{PV,b})$ 为应用式(7)后接入点的电压值,记为 $U_{k,b}$ 。由于测量和计算的误差较小,因此认为接入点电压和逆变器无功功率呈线性关系,故 $U_k - Q_{PV}$ 曲线在 $Q_{PV,b}$ 处的斜率可做如下近似:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial Q} \right|_{Q_{PV,b}} = \frac{U_{k,lim} - f(0)}{Q_{PV,b}} \quad (19)$$

其中, $f(0)$ 为在逆变器未进行无功功率补偿前接入点的电压,记为 $U_{k,0}$ 。将式(19)代入式(18),可最终整理得到逆变器无功功率的修正量 $\Delta Q_{PV,b}$ 为:

$$\Delta Q_{PV,b} = \frac{U_{k,lim} - U_{k,b}}{U_{k,b} - U_{k,0}} Q_{PV,b} \quad (20)$$

同理,分别令应用式(10)、(13)后的接入点电压为 $U_{k,t}$ 、 $U_{k,s}$ 。可以得到逆变器在最大功率调整阶段和功率缩减阶段的有功功率修正值 $\Delta P_{PV,t}$ 和 $\Delta P_{PV,s}$ 分别为:

$$\Delta P_{PV,t} = \frac{(U_{k,lim} - U_{k,t})(P_{PV,t} - S_{max} \cos \theta_{min})}{U_{k,t} - U_{k,l}} \quad (21)$$

$$\Delta P_{PV,s} = \frac{(U_{k,lim} - U_{k,s})(P_{PV,s} - S_{max} \cos \theta_{max})}{U_{k,s} - U_{k,m}} \quad (22)$$

其中, $U_{k,l}$ 和 $U_{k,m}$ 分别为逆变器在达到容量约束角 θ_{lim} 和最大功率因数角 θ_{max} 时光伏电站接入点的电压值。

4 基于光伏逆变器调节的电压控制策略

本文提出的基于逆变器电压控制策略的具体实现步骤如下。

步骤1:根据本地负荷情况,设置光伏电站接入点的目标电压限值 $U_{k,lim}$ 和逆变器最大功率因数角 θ_{max} 。

步骤2:对逆变器功率 S 、功率因数角 θ 和节点电压 U_k 进行监测,并根据式(2)计算逆变器容量约束角 θ_{lim} 。

a. 当节点电压 U_k 越限且逆变器功率因数角 θ 小于容量约束角 θ_{lim} 时,执行步骤3;

b. 当节点电压 U_k 越限,逆变器达到最大容量

S_{\max} 但还未达到最大功率因数角 θ_{\max} 时, 执行步骤 4;

c. 当逆变器达到最大功率因数角 θ_{\max} 时, 执行步骤 5;

d. 当逆变器节点电压 U_k 不越限时, 继续执行步骤 2。

步骤 3: 进入逆变器电压控制策略的无功补偿阶段。通过式 (7) 计算逆变器所需发出的无功功率 $Q_{PV,b}$, 并根据式 (20) 对 $Q_{PV,b}$ 进行修正。然后转至步骤 6。

步骤 4: 进入逆变器电压控制策略的最大功率调整阶段。通过式 (10) 得到逆变器的有功功率 $P_{PV,t}$, 并根据式 (21) 对 $P_{PV,t}$ 进行修正。然后转至步骤 6。

步骤 5: 进入逆变器电压控制策略的功率缩减阶段。通过式 (13) 计算逆变器的有功功率 $P_{PV,s}$, 并根据式 (22) 对 $P_{PV,s}$ 进行修正。然后转至步骤 6。

步骤 6: 对逆变器输出控制命令和控制量大小实施电压控制, 然后继续执行步骤 2。

5 仿真验证

本文以 IEEE 33 节点配电网标准算例^[16] 为模型, 对所提电压调整策略的有效性进行验证。仿真中联络开关均为断路, 负荷采用三相平衡静态负荷模型。设定节点目标电压上限 $U_{lim} = 1.05$ p.u., 逆变器最低功率因数 $\cos \theta_{\max} = 0.98$ ^[14]。

5.1 逆变器无功补偿阶段电压控制结果分析

在节点 15 处接入一光伏电站, 其有功功率 $P_{PV} = 2.475$ MW, 逆变器最大功率 $S_{\max} = 2.5$ MV·A。假设在一天 24 h 内, 光照强度的变化曲线呈正态分布。

图 3 为在光伏逆变器电压控制策略下, 光伏电站接入点电压及逆变器输出功率在一天内的变化曲线。图中, 节点电压为标么值, 后同。图 3(b) 中的实线为一天内光伏逆变器有功功率随光照强度变化的曲线。

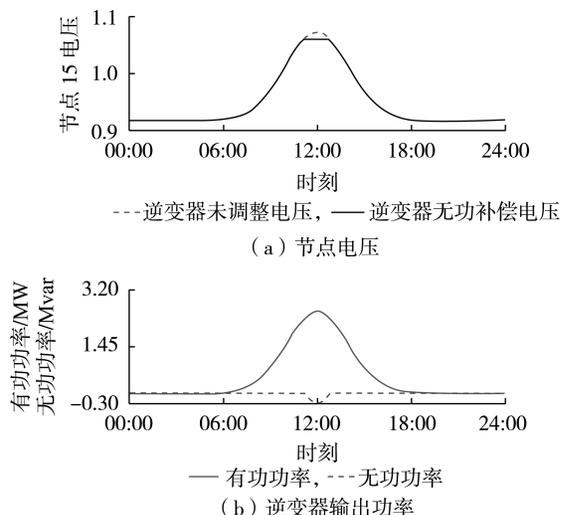


图 3 一天内的节点 15 电压及逆变器输出功率曲线
Fig.3 Curve of U_{15} and inverter output power in a day

由图 3(a) 可以看出, 节点 15 的电压随着光伏逆变器输出有功功率的增加而不断升高。如果不采取电压控制手段, 在 11:18—12:42 时间段内节点 15 电压越限。应用本文所提电压控制策略, 光伏逆变器从 11:18 时刻开始对光伏电站进行感性无功功率补偿, 逆变器的无功功率变化曲线如图 3(b) 中所示。最终, 经过逆变器无功功率补偿阶段, 节点 15 电压稳定在 U_{lim} 。

图 4 为在 12:00 时逆变器应用电压控制策略前、后各节点电压分布对比图。可见, 在逆变器参与电压调整前, 节点 15 电压 $U_{15} = 1.058$ 2 p.u.。实施逆变器电压控制策略后的计算结果如表 2 所示(表中节点电压幅值为标么值, 后同)。在光伏逆变器无功补偿阶段中, 应用式 (7) 计算可得到光伏逆变器发出感性无功功率 $Q_{PV} = 0.212$ 7 Mvar, 此时节点 15 的电压调整为 1.051 2 p.u.。经过式 (20) 的修正计算, 逆变器发出的感性无功功率调整为 0.248 7 Mvar, 光伏电站接入点的电压稳定在 1.05 p.u.。

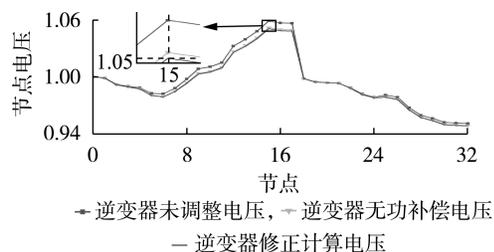


图 4 不同控制策略下的节点电压对比

Fig.4 Comparison of node voltage among different control strategies

表 2 不同控制策略下的结果对比

Table 2 Comparison of results among different control strategies

逆变器电压控制	节点电压幅值 U_k	有功功率 P_{PV}/MW	无功功率 Q_{PV}/Mvar	功率因数 $\cos \theta/\%$	逆变器功率 $S/(\text{MV}\cdot\text{A})$
未调节	1.058 2	2.475	0	100	2.475 0
无功补偿	1.051 2	2.475	0.212 7	99.63	2.484 1
修正计算	1.050 0	2.475	0.248 7	99.50	2.487 5

可见, 采用光伏逆变器电压控制策略的计算方法可以有效降低光伏电站接入点的越限电压, 其修正计算可以实现对接入点电压的准确控制。

5.2 光伏逆变器电压控制策略有效性分析

在节点 16 处接入一光伏电站, 逆变器最大功率 $S_{\max} = 2.5$ MV·A, 当其有功功率 $P_{PV} = 2.475$ MW 时, 光伏电站接入点的电压 $U_{16} = 1.075$ 2 p.u.。

图 5 为光伏逆变器在无功功率补偿、最大功率调整和功率缩减阶段的节点电压分布图。逆变器电压控制策略的计算结果如表 3 所示, 计算过程如下。

a. 根据第 4 节的光伏逆变器电压控制策略实现流程, 首先进入逆变器无功功率补偿阶段。经式 (7) 计算, 若光伏逆变器通过无功功率补偿的方式

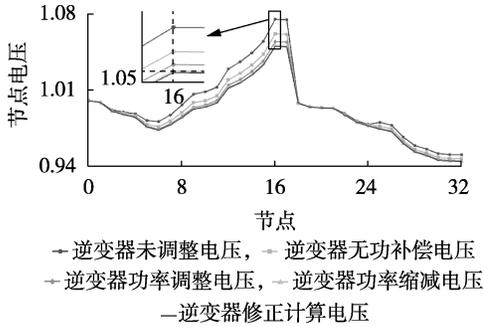


图 5 不同控制策略下的节点电压对比

Fig.5 Comparison of node voltage among different control strategies

表 3 不同控制策略下的结果对比

Table 3 Comparison of results among different control strategies

逆变器电压控制	节点电压幅值 U_k	有功功率 P_{PV}/MW	无功功率 $Q_{PV}/Mvar$	功率因数 $\cos \theta/\%$	逆变器功率 $S/(MV \cdot A)$
未调节	1.075 2	2.475 0	0	100	2.475 0
无功补偿	1.061 6	2.475 0	0.352 7	99	2.500 0
功率调整	1.054 5	2.450 0	0.497 5	98	2.500 0
功率缩减	1.050 9	2.384 3	0.484 2	98	2.433 0
修正计算	1.050 0	2.367 9	0.480 8	98	2.416 2

将节点电压调整至 U_{lim} , 需要光伏逆变器提供的感性无功功率 $Q_{PV} = 0.659 6$ Mvar。当光伏逆变器达到最大功率时, 功率因数为 0.99, 发出的感性无功功率 $Q_{PV} = 0.352 7$ Mvar, $U_{16} = 1.061 6$ p.u., 电压依旧越限, 电压控制策略转入逆变器最大功率调整阶段。

b. 在逆变器最大功率调整阶段中, 经式(10)计算, 若通过调整逆变器功率因数的方式将节点 16 电压调整至 U_{lim} , 逆变器的有功功率 P_{PV} 应调整为 2.438 8 MW。但当逆变器达到功率因数限值 $\cos \theta_{max}$ 时, 逆变器发出 2.45 MW 的有功功率以及 0.497 5 Mvar 的感性无功功率。此时 $U_{16} = 1.054 5$ p.u., 电压依旧越限, 电压控制策略转入逆变器功率缩减阶段。

c. 在逆变器功率缩减阶段中, 经式(13)计算, 将逆变器有功功率 P_{PV} 缩减为 2.384 3 MW, 此时节点 16 电压降至 1.050 9 p.u.。然后经式(22)对逆变器有功功率进行修正计算, 逆变器有功功率修正值 $\Delta P_{PV} = -0.016$ MW。最终光伏逆变器发出 2.367 9 MW 有功功率和 0.480 8 Mvar 感性无功功率, 节点 16 电压稳定在 1.05 p.u.。

该算例中, 逆变器经历了 3 个阶段, 最终实现了光伏电站接入点电压的精确控制。可见, 光伏逆变器电压控制策略能够有效解决高渗透率光伏电站接入造成的节点电压越限问题。

5.3 电压控制策略对控制参数的误差灵敏度分析

在 5.2 节算例的基础上进行灵敏度仿真。当节点 0 与节点 16 电阻值的相对偏差 $\Delta R_{\Sigma 16}/R_{\Sigma 16} = 1\%$, 电抗值的相对偏差 $\Delta X_{\Sigma 16}/X_{\Sigma 16} = 1\%$, 变电站低压母线电压的相对偏差 $\Delta U_0/U_0 = 1\%$ 时, 会造成控制目

标逆变器有功功率 P_{PV} 存在 5% 和节点电压 U_{16} 存在 1% 的相对误差。最终, 经过修正后逆变器发出的有功功率 $P_{PV} = 2.367 2$ MW, 无功功率 $Q_{PV} = 0.480 6$ Mvar, 节点 16 电压稳定为 1.05 p.u.。

表 4 列出了控制参数存在偏差时, 本文所提控制策略下的电压变化情况。可见在控制参数存在误差时, 本文所提控制策略依旧可以通过修正计算实现电压的准确控制。

表 4 控制参数存在误差时的电压控制效果比较

Table 4 Comparison of voltage control effects in the case of error in control parameters

逆变器电压控制	节点电压幅值 U_k	有功功率 P_{PV}/MW	无功功率 $Q_{PV}/Mvar$	功率因数 $\cos \theta/\%$	逆变器功率 $S/(MV \cdot A)$
未调节	1.075 2	2.475 0	0	100	2.475 0
无功补偿	1.061 6	2.475 0	0.352 7	99	2.500 0
功率调整	1.054 5	2.450 0	0.497 5	98	2.500 0
功率缩减	1.051 0	2.385 6	0.484 4	98	2.434 2
修正计算	1.050 0	2.368 6	0.480 8	98	2.416 9

6 结论与展望

本文提出了基于光伏逆变器的电压控制策略, 并推导了逆变器在不同电压控制策略下的调整计算公式, 解决了光伏电站并入配电网节点的电压越限问题, 并通过仿真验证了所述方案的合理性和有效性, 得到了以下的结论。

a. 提出基于光伏逆变器的电压控制策略。为了尽量避免光伏电站有功功率削减, 保证光伏的最大功率跟踪, 所提策略优先通过调整光伏逆变器功率因数角的方式进行电压控制, 若逆变器功率因数角达到最大后节点电压依旧越限, 则对光伏电站的有功出力进行削减。

b. 为了对光伏电站接入点的越限电压进行调整, 本文结合配电网的拓扑特点、线路参数和逆变器的工作模式, 给出了逆变器有功/无功功率调整的计算公式。

c. 分析和仿真了控制参数的误差对逆变器有功/无功功率的敏感程度, 并在逆变器计算方法的基础上, 提出一种逆变器有功/无功功率的实时修正计算方法, 最终实现光伏电站接入点电压的精确控制。

d. 与传统增加无功补偿设备的调压方式相比, 本文方案充分利用了光伏逆变器的容量和逆变器能够快速连续进行功率调整的特点, 减少了设备的成本的投入, 计算简单快速, 适用于实际现场。

目前本文所提光伏电站逆变器电压控制策略应用于就地解决单个光伏电站接入点电压越限问题。笔者后续将在光伏逆变器就地电压控制策略的基础上, 进一步解决多个光伏电站越限电压的协同控制问题。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电能质量 供电电压允许偏差:GB/T 12325—2008 [S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [2] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化,2001,25(12):53-56.
LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [3] 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(12):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(12): 299-306.
- [4] 魏昊焜,刘健,高惠. 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.
- [5] 彭琰,余一平,鞠平,等. 计及不确定性的电力系统电压波动分析方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):137-142.
PENG Yan, YU Yiping, JU Ping, et al. Voltage fluctuation analysis method considering uncertainties of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 137-142.
- [6] 蔡永翔,唐巍,徐鸥洋,等. 含高比例用户光伏的低压配电网电压控制研究综述[J]. 电网技术,2018,42(1):220-229.
CAI Yongxiang, TANG Wei, XU Ouyang, et al. Review of voltage research in LV distribution network with high proportion of residential PVs[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 220-229.
- [7] 蔡永翔,张璐,唐巍,等. 考虑逆变器无功充裕性的含高比例用户光伏低压配电网电压控制策略[J]. 电网技术,2017,41(9):2799-2808.
CAI Yongxiang, ZHANG Lu, TANG Wei, 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): 2799-2808.
- [8] STETZ T, MARTEN F, BRAUN M. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 534-542.
- [9] 赵倩,张建成. 并网逆变器的有功无功综合控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(5):154-158.
ZHAO Qian, ZHANG Jiancheng. Comprehensive control strategy of active and reactive power for grid-connected inverter [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(5): 154-158.
- [10] 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. Multi-mode voltage control in low distribution networks based on reactive power regulation of photovoltaic inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 133-141.
- [11] 刘科研,刘永梅,盛万兴,等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):81-87.
LIU Keyan, LIU Yongmei, SHENG Wanxing, et al. Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 81-87.
- [12] 黄欣科,王环,王一波,等. 光伏发电系统并网点电压升高调整原理及策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(3):112-117.
HUANG Xinke, WANG Huan, WANG Yibo, et al. Principle and strategies of voltage rise regulation for grid-connected photovoltaic generation system at point of common coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 112-117.
- [13] 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. Solutions of voltage beyond limits in distribution network with distributed photovoltaic generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 117-123.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 光伏发电站无功补偿技术规范:GB/T 29321—2012 [S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [15] 吴宁. 电网络分析与综合[M]. 北京:科学出版社,2003:213-219.
- [16] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京:高等教育出版社,2014:245-247.

作者简介:



高鹏程

高鹏程(1993—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电及其并网技术(E-mail:gao93d@outlook.com);

王蕾(1978—),女,山东烟台人,副教授,博士,主要研究方向为非线性理论与计算、电力系统稳定性分析与控制(E-mail:wanglei@sdut.edu.cn);

李立生(1973—),男,江苏连云港人,高级工程师,硕士,主要研究方向为智能电网、电力系统运行与维护(E-mail:lls16@sina.com)。

Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network

GAO Pengcheng¹, WANG Lei¹, LI Lisheng¹, XU Bingyin¹, ZHOU Jian²

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: High penetration of PV (PhotoVoltaic) power stations in distribution networks may result in reverse power flow and voltage violation. Hence, in order to ensure the safe and stable operation of the power grid, it is necessary to adjust the violating voltage of the access point of PV power station. According to the capacity characteristics and technical specifications of PV inverters, a voltage control scheme using active/reactive power adjustment of PV inverters and the active/reactive power calculation approach of PV inverters are proposed. The proposed voltage control strategy that makes full use of the inverter capacity to adjust voltage is effective and economical. At the same time, the calculation is convenient and does not depend on the load level and distribution of feeders. Simulative results show that the proposed voltage control scheme effectively addresses the voltage violation problem caused by PV power stations.

Key words: photovoltaic power station; electric inverters; voltage control; power factor

附录

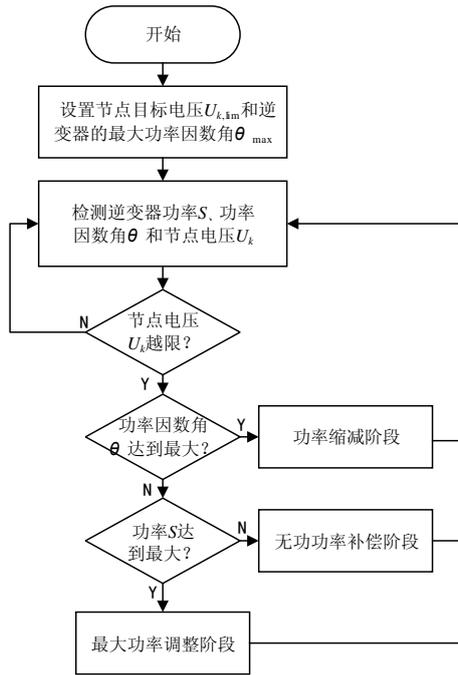


图 A1 光伏逆变器电压控制策略流程图

Fig. A1 Flowchart of voltage control strategy for PV inverter