Vol.40 No.3 Mar. 2020

基于配电网馈线首端电压追踪的分布式光伏 变斜率下垂控制策略

孙 旻,陈 波,曾 伟,何 伟,黄扬琪,何 吴 (国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西 南昌 330096)

摘要:分析了分布式光伏电站无功出力与并网点电压之间的关系,研究了光伏电站无功功率吸收量对配电网 线路损耗的影响。在传统下垂控制策略的基础上,提出了一种基于馈线首端母线电压追踪的分布式光伏变 斜率下垂控制策略,并介绍了控制系统的架构与软件控制逻辑。在所提改进控制策略下,线路电压水平略高 于传统下垂控制策略下的线路电压水平,但线损率指标则更接近线损最优控制策略下的线损率。以IEEE 33 节点配电网系统为算例,在OpenDSS上进行时序仿真,并与传统下垂控制策略和线损最优控制策略进行对 比,仿真结果表明,所提改进控制策略可以牺牲较少的降压效果来换取更多的降损收益,验证了所提控制策 略的正确性和实用性。

关键词:分布式光伏;配电网线路;线路损耗;电压调节;首端电压追踪控制;变斜率下垂控制 中图分类号:TM 615 文献标志码:A DOI:10.16081/j.epae.202003001

0 引言

近年来,随着光伏扶贫计划的大力实施,农村分 布式光伏的接入容量持续增长,分布式光伏高渗透 率地区的配电网线路潮流反送及电压越限问题开始 凸显,对配电网的安全运行及光伏消纳产生了不利 的影响^[1-3],配电网电压越限控制迫在眉睫。与增加 导线半径以减小阻抗、增加无功补偿装置和储能设 备等传统电压越限控制方案相比,充分利用逆变器 无功调节容量的控制策略具有明显的经济性^[4],从 而受到越来越多的学者和工程技术人员的关注。国 家标准明确要求并网分布式光伏电站具备无功--电 压控制能力^[5],IEEE1547技术标准^[6]也规定了电力 系统应当要求分布式能源主动参与电压调节。

德国电气工程师协会提出了适用于分布式光伏的4种标准化无功控制策略,分别为恒定无功功率控制、恒定功率因数控制、基于光伏有功出力的 cosφ(P)控制和基于并网点电压幅值的下垂控制^[7]。分布式光伏具有容量小、数量多且通信和自动化手段缺乏等特点,国内外学者在此基础上进行了众多改进控制策略研究,总体而言主要集中在局部自适应控制和全局协调控制两方面。文献[8]利用分布式光伏逆变器的自动电压与功率因数控制方式来降

收稿日期:2019-05-28;修回日期:2020-01-04

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(52182017000W); 江西省政府重点研发计划项目(20171BBE50017)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (52182017000W) and the Key Research and Development Program of Jiangxi Provincial Government(20171BBE50017) 低高渗透率光伏接入对电压的影响;文献[9]提出了 包括就地预防控制、分布式无功协调控制、分布式有 功缩减和功率恢复的多过程电压控制策略;文献 [10]针对阻抗比*R/X*较高的配电网,将储能设备与 光伏逆变器控制相结合,在降低线路电压的同时可 以避免不必要的有功削减。上述局部自适应控制方 案利用本地测量仪器监测并网点的电压水平及其变 化,可以将电压控制在可接受的范围之内。由于只 考虑了光伏电站的本地信息,无法辨别是否由馈线 首端电压过高引起的并网点电压越限,容易造成光 伏电站从电网吸收大量的无功但调压效果不佳,反 而增加配电线路损耗。全局协调控制基于分布式光 伏电站的多级电压控制系统设计[11-13],集群控制主 站收集终端测量信息,采用优化算法求得各分布式 光伏的最优出力解,并下发无功控制信号给分布式 光伏控制终端执行。文献[14]基于馈线全状态监 测,利用测量单元采集各个节点的发电、负荷、电压 等潮流计算所需的信息,以无功吸收总量最低为优 化目标,提出了 $\cos \varphi(P)$ 和下垂控制的加权方案,在 降损、降压上有较好的效果;文献[15]提出一种基于 灵敏度分析的无功功率控制方法,将与接入位置相 关的功率因数设定值分配给各台光伏逆变器,从而 实现以较少的总无功功率消耗来抑制电网电压过 高。但是多级电压协调优化控制基于大量的终端测 量与控制装置,依赖可靠的组网通信,成本投入高, 实现难度大。

馈线损耗是衡量无功-电压控制性能的重要指标^[16],为了兼顾调压效果与线路损耗,同时尽量减少 控制系统的建设成本,本文提出一种基于馈线首端 1)

电压追踪的分布式光伏无功-电压控制策略。所提 控制策略采用不完全观测手段,引入馈线首端母线 电压作为下垂控制曲线的关键参数,可以在首端母 线电压较高的情况下,合理减少光伏电站的无功吸 收量,在满足调压需求的基础上较大程度地降低线 路损耗。

1 分布式光伏并网特性分析

1.1 光伏无功出力与并网点电压的关系

光伏并网等值电路如图1所示。图中, V_0 为 10 kV配电网馈线首端母线电压; V_x 为光伏并网点电 压;R + jX为线路阻抗,R为线路电阻,X为线路电 抗;P + jQ为馈线首端注入并网节点的功率; P_g + j Q_g 为光伏的注入功率; P_e + j Q_e 为光伏接入点的负荷 功率。



图1 光伏并网等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of grid-connected photovoltaic

忽略电压降落的横分量,有:
$$V_0 - V_x = (PR + QX)/V_x$$

根据无功功率关系可知:

$$Q + Q_{\rm g} = Q_{\rm c} \tag{2}$$

将式(2)代入式(1),
$$Q_{g}$$
用 V_{x} 可表示为:

$$Q_{g} = \frac{1}{X}V_{x}^{2} - \frac{V_{0}}{X}V_{x} + \frac{PR}{X} + Q_{c}$$
(3)

由式(3)可知,在其他条件一定的情况下,光伏 电站的无功出力 Q_g 关于并网点电压 V_x 的函数曲线 是一条开口向上的抛物线。

1.2 光伏无功出力对线损的影响

由图1可知,线路损耗 P_{loss} 可以表示为:

$$P_{\rm loss} = R \frac{P^2 + Q^2}{V_{\rm v}^2}$$
(4)

将式(2)代入式(4),有:

$$P_{\rm loss} = R \frac{P^2 + (Q_{\rm c} - Q_{\rm g})^2}{V_{\rm c}^2}$$
(5)

当 Q_g >0时,表示光伏电站发出感性无功;当 Q_g <0时,表示光伏电站吸收感性无功。通常无功负荷 呈感性,即 Q_c 为正值。不难看出,当光伏电站吸收 的无功 Q_g 从0开始不断增大时, $Q_c - Q_g$ 的值同样不 断增加,而由式(3)可知,在抛物线的右半部分, V_x 随 着 Q_g 的减小而减小,故线路损耗 P_{loss} 在 $Q_g \in (Q_{min}, 0]$ (Q_{min} 为光伏电站所能吸收的最大无功)范围内是 单调递减的。因此,在并网点电压偏高需要通过 光伏电站吸收无功来降低节点电压时,吸收的无功 越多,虽然降压效果越明显,但是线损也会随之 增加。

2 变斜率下垂控制策略

2.1 传统下垂控制策略

传统控制策略下,分布式光伏电站基于并网点 电压幅值进行就地控制,按给定的无功-电压下垂曲 线发出或吸收无功功率^[7],通过设置控制死区和改 变下垂曲线斜率来调整调压效果。关键点参数设定 后,下垂控制曲线是固定不变的。传统的无功-电压 下垂控制曲线如图2所示。图中, $p_1 - p_4$ 为下垂控制 曲线的几个关键点; V_n 为额定电压; V_{min} 、 V_{max} 分别为 斜率控制电压最小值、最大值; Q_{max} 为光伏电站所能 发出的最大无功。当 p_3 和 p_4 的横坐标与 V_n 重合时, 下垂控制策略无控制死区。



图 2 传统无功-电压下垂控制曲线 Fig.2 Traditional reactive power-voltage droop control curve

设光伏电站的有功出力为 P_{g} ,逆变器容量为 S_{g} , 任意时刻光伏电站的无功出力限值 Q_{max} 和 Q_{min} 随着 有功出力的变化而变化,如式(6)所示。

$$Q_{\rm max} = \sqrt{S_{\rm g}^2 - P_{\rm g}^2}, \ Q_{\rm min} = -\sqrt{S_{\rm g}^2 - P_{\rm g}^2}$$
 (6)

则当并网点电压 $V_x \in [V_{\min}, V_{\max}]$ 时,光伏电站的 无功出力满足:

$$Q_{g} = \begin{cases} Q_{\max} \frac{V_{n} - V_{x}}{V_{n} - V_{\min}} & V_{\min} \leq V_{x} < V_{n} \\ Q_{\min} \frac{V_{x} - V_{n}}{V_{\max} - V_{n}} & V_{n} \leq V_{x} \leq V_{\max} \end{cases}$$
(7)

2.2 基于首端电压追踪的改进控制策略

本文所提基于馈线首端电压追踪的变斜率下 垂控制策略,在传统的无功-电压下垂曲线中引入 首端电压变量 V_0 ,当 $V_0 < V_n$ 时,沿用传统控制策略; 当 $V_0 \ge V_n$ 时,对传统控制策略中下垂控制曲线的右 半部分进行修正。当并网点电压 $V_x < V_n$ 时,按传统 控制策略发出无功;当 $V_n \le V_x \le V_0$ 时,光伏电站与配 电网不发生无功交换;当 $V_x \ge V_0$ 时,按照点(V_0 ,0)和 点 p_2 的连线下垂特性吸收无功。因为 V_0 是变化的, 故下垂控制曲线的斜率也随着 V_0 变化,下垂控制曲 线不再固定不变,而是随着 V_0 在横轴上滑动,形成 下垂控制曲线簇,如图3中虚线部分所示。

当并网点电压在[V_{min},V_{max}]范围内时,根据控制曲线下垂特性,光伏逆变器吸收的无功功率满足式(8)。



图 3 基于首端电压追踪的变斜率下垂控制策略 Fig.3 Variable slope droop control strategy based on head-end voltage tracking

$$Q_{g} = \begin{cases} Q_{\max} \frac{V_{n} - V_{x}}{V_{n} - V_{\min}} & V_{\min} \leq V_{x} < V_{n} \\ 0 & V_{n} \leq V_{x} \leq V_{0} \\ Q_{\min} \frac{V_{x} - V_{0}}{V_{\max} - V_{0}} & V_{0} < V_{x} \leq V_{\max} \end{cases}$$
(8)

2.3 无功-电压平衡分析

将并网点电压与光伏无功出力的关系曲线映射 到下垂控制曲线的坐标轴上,如图4所示,在传统下 垂控制策略下,抛物线与下垂控制曲线L₁的交点A 确定了并网点电压V_{x1},对应的光伏电站无功出力为 Q_{s1};在首端电压追踪控制策略下,抛物线与下垂控 制曲线L₂的交点B确定了并网点电压V_{x2},对应的光 伏电站无功出力为Q_{s2}。





下垂控制曲线 L_1 的斜率 k_1 和下垂控制曲线 L_2 的斜率 k_2 可以表示为:

$$\begin{cases} k_1 = Q_{\min} / (V_{\max} - V_n) \\ k_2 = Q_{\min} / (V_{\max} - V_0) \end{cases}$$
(9)

由于*V*_n < *V*₀ < *V*_{max},故在首端电压滑动区间内下 垂曲线斜率始终满足*k*₂ < *k*₁ < 0。

由式(7)和式(8)可知,在2种控制策略下,电压 平衡后光伏电站的无功出力可以表示为:

$$Q_{g1} = k_1 (V_{x1} - V_n), \ Q_{g2} = k_2 (V_{x2} - V_0)$$
(10)
联立式(3)和式(10),可得:

$$\frac{1}{X}V_{x1}^2 - \frac{V_0}{X}V_{x1} + \frac{PR}{X} + Q_c = k_1(V_{x1} - V_n) \quad (11)$$

$$\frac{1}{X}V_{x2}^2 - \frac{V_0}{X}V_{x2} + \frac{PR}{X} + Q_e = k_2(V_{x2} - V_0) \quad (12)$$

式(12)减式(11),整理可得:

$$V_{x1} - V_{x2} = \frac{X \left[(k_1 - k_2) V_{x2} - k_1 V_n + k_2 V_0 \right]}{V_{x1} + V_{x2} - V_0 - k_1 X}$$
(13)

将式(9)代入式(13),消去分子中的*V*_a和*V*₀,可 得式(14)或者式(15)。

$$V_{x1} - V_{x2} = \frac{X(k_1 - k_2)(V_{x2} - V_{max})}{V_{x1} + V_{x2} - V_0 - k_1 X}$$
(14)

$$V_{x1} - V_{x2} = \frac{X(k_1 - k_2)(V_{x1} - V_{max})}{V_{x1} + V_{x2} - V_0 - k_2 X}$$
(15)

由图4可知,变斜率下垂控制策略中并网点电 压 V_x 的有效区间为 (V_n, V_{max}) ,因此 $V_{x1} < V_{max}$, $V_{x2} < V_{max}$,又不难看出 $V_{x1} + V_{x2} - V_0 - k_1X > 0$, $V_{x1} + V_{x2} - V_0 - k_2X > 0$,故式(14)和式(15)恒小于0,即交点B的横坐标 V_{x2} 恒大于交点A的横坐标 V_{x10} 由式(3)可知,当 $V_x > V_0/2$ 时, Q_g 随着 V_x 单调递增,故 $Q_{g2} > Q_{g1}$,即当并网点电压高于额定电压 V_n ,采用变斜率下垂控制策略时,光伏电站吸收的无功功率总是会小于采用传统下垂控制策略时吸收的无功功率,从而实现降低线路损耗的目标。

2.4 系统架构及控制逻辑

整个控制系统由智能采集装置和分布式光伏控 制终端构成。智能采集装置布置在变电站内,负责 采集站内低压侧的母线电压,并通过4G无线网络与 馈线上所有分布式光伏控制终端通信,实时下发首 端电压信号。控制终端具备首端电压信息接口,在 传统下垂控制逻辑中增加首端电压判据,并引入首 端电压信号作为下垂控制曲线关键参数,实现下垂 控制曲线斜率的实时调整。控制系统整体架构如图 5所示,控制逻辑及流程如图6所示。

3 仿真分析

3.1 案例情景

以修改后的 IEEE 33 节点配电网系统为例进行



图 5 智能采集装置与控制终端的通信架构 Fig.5 Communication structure between intelligent acquisition device and control terminals



Fig.6 Logic and flowchart of head-end voltage tracking control

仿真分析,线路拓扑结构见附录中图A1。节点1为 变电站低压侧10kV母线,节点2—33均带有一定 功率的负荷。其中节点12、22、31分别接有分布式 光伏电站PV₁—PV₃,额定功率分别为1600、1800、 1000kW,逆变器的额定容量为光伏电站额定有 功的1.1倍。配电网24h的负荷特性曲线如图7所 示,全天最大负荷为1200+j360kV·A,任意时刻的 无功负荷为有功负荷的30%。各节点间线路阻抗 以及最大负荷时刻各节点负荷分配如附录中表A1 所示。



图7 有功与无功负荷曲线

Fig.7 Active and reactive load curves

考虑到辐射强度、环境温度以及逆变器转换效 率等因素,典型单位容量光伏电站24h的出力特性可 由图8所示曲线描述。在00:00-06:00和20:00-



图8 光伏有功出力特性曲线

Fig.8 PV active power output characteristic curve

24:00时段,光伏电站不发出有功功率,逆变器同样 不会启动无功控制参与电压调节。

馈线首端电压 V_0 的24h变化曲线如图9所示。 下垂控制曲线参数设置如下:额定电压 V_n =10.35 kV, V_{max} =1.06 V_n , V_{min} =0.94 V_n 。





Fig.9 Head-end voltage curve

在相同的负荷、光伏有功出力、首端电压等运行 条件下,对光伏逆变器采用以下4种控制策略开展 仿真分析:策略1为线损最优控制;策略2为单位功 率因数控制;策略3为传统下垂控制;策略4为首端 电压追踪控制。其中策略1基于MATLAB的凸优化 工具箱^[17]进行计算,在线路潮流约束和节点电压约 束条件下,以线损最小为优化目标,得到各光伏电站 的无功出力以及各个节点电压;策略2-4基于 OpenDSS修改逆变器控制策略进行仿真。

3.2 光伏无功出力与并网点电压分析

图 10 和图 11 分别为 PV₁ — PV₃在上述4 种控制 策略下 24 h 的无功出力曲线和并网点电压曲线。

由图 10 可知,在首端电压追踪控制策略(策略 4)下,07:00—10:00 时段,光伏并网点电压均小于 10.35 kV,逆变器发出无功功率;11:00—17:00 时段, 随着光伏有功出力的增长,光伏并网点电压开始超 过首端母线电压,逆变器按变斜率下垂控制曲线吸 收无功功率;18:00 时刻,光伏并网点电压位于额定 电压和首端母线电压之间,逆变器既不发出无功也



图 10 不同控制策略下光伏电站无功出力曲线

Fig.10 Reactive power output curves of PV plants under different control strategies





under different control strategies

不吸收无功;随着光伏有功出力的减少和首端母线 电压的逐渐下降,光伏并网点电压在19:00时刻低于 额定电压,逆变器又重新开始发出无功。在首端电 压追踪控制策略下,光伏电站发出的无功功率与 传统下垂控制策略相同,但吸收的无功功率大幅减 少。在线损最优控制策略(策略1)下,光伏电站通 常处于发出无功功率的状态,但在线路电压最高的 13:00时刻,PV₁—PV₃均不同程度地吸收无功以控制 节点电压不越上限;在线路电压次高的15:00时刻, PV₁仍需要吸收一定量的无功功率。

由图11可知,07:00—10:00时段,光伏并网点电 压低于额定电压,逆变器在传统下垂控制策略(策略 3)和首端电压追踪控制策略(策略4)下发出的无功 最多,在线损最优控制策略(策略4)下发出的无功 较少,因此该时段内传统下垂控制策略和首端电压 追踪控制策略下并网点电压最高,线损最优控制策 略下次之,单位功率因数控制策略(策略2)下最低。 随着首端电压的升高,11:00—12:00时段,线损最优 控制策略下逆变器仍然发出无功,而传统下垂控制 策略和首端电压追踪控制策略下逆变器则吸收无 功,且首端电压追踪控制策略下吸收的无功相对较 少,故线损最优控制策略下电压最高,单位功率因数 控制策略、首端电压追踪控制策略下的电压次之,传 统下垂控制策略下的电压最低。

随着光伏有功出力的增长,并网点电压逐渐升高。在13:00时刻,单位功率因数控制策略下节点 12、22、31的电压均超过了上限值10.7 kV;而线损最 优控制策略下 PV₁—PV₃均不同程度地吸收无功功 率,使并网点电压不越上限;在传统下垂控制策略 和首端电压追踪控制策略下,光伏电站按不同斜 率下垂控制曲线吸收无功功率,并网点电压均低于 10.7 kV,满足运行要求。

3.3 线路潮流与节点电压分析

以系统电压最高的13:00时刻为例进行线路潮流与节点电压分析。此时的节点电压如图12所示。 由图12可知,从节点电压变化趋势来看,干线以节点12为界分为2段,节点1—12的电压逐渐升高,节点13—18的电压逐渐降低;馈入节点2的支路为1 段,节点19—22的电压逐渐升高;馈入节点3的支路为1段,节点23—25的电压逐渐降低;馈入节点5 的支路以节点31为界分为2段,节点26—31的电压 逐渐上升,节点32、33的电压逐渐降低。4种控制策略下节点电压的变化趋势一致。



图 12 不同控制策略下的节点电压曲线(13:00) Fig.12 Node voltage curves under different control strategies(13:00)

13:00时刻的线路潮流如图 13 所示。功率从节 点*i*流向节点*j*时为正,反之为负。由图 13(b)可知, 4种控制策略下线路无功功率均未发生反送,上述 干线和支路节点电压逐渐升高的区段,电压升高均 为有功潮流反送引起。由式(1)可知,正向无功潮流 对反向有功潮流造成的电压抬升效应具有抑制作 用。在传统下垂控制策略下,所有线路正向流动的 无功最多,故线路节点电压最低,电压抬升趋势最为 平缓。同理,在单位功率因数控制策略下,所有线路 正向流动的无功最少,故线路节点电压最高,电压抬 升趋势也最为陡峭。



相比于传统下垂控制策略,首端电压追踪控制 策略下所有线路正向无功潮流大幅减少;在线路有 功潮流相同的条件下,线路损耗必然有所下降。

3.4 降损分析

在上述4种控制策略下,线路24h的线损率及 光伏电站总无功电量(数值为正表示发出无功,数值 为负表示吸收无功)如表1所示。

表1 不同控制策略下的线损率及光伏电站 无功电量统计

 Table 1
 Line loss rate and reactive power statistics of

 PV plants under different control strategies

控制策略	线损率/%	无功电量/(kvar•h)
线损最优控制	1.3705	2143.11/-691.65
单位功率因数控制	1.3350	0
传统下垂控制	1.7745	3229.04/-8374.68
首端电压追踪控制	1.5234	3229.84/-4730.67

在首端电压追踪控制策略下,节点电压水平和 线损率指标均位于线损最优控制策略和传统下垂控 制策略下相应指标值范围内。为了说明首端电压追 踪控制策略在调压、降损方面的效果,将电压水平和 线损率指标分别与线损最优控制和传统下垂控制策 略下的电压水平和线损率指标进行比较。设t时刻 节点 $i(i \neq 1)$ 在首端电压追踪控制策略下的电压为 $V_{i,h}(t)$,在线损最优控制策略下的电压为 $V_{i,d}(t)$;全天线损率 在首端电压追踪控制策略下为 K_h ,在线损最优控制 策略下为 K_c ,在传统下垂控制策略下为 K_{do} 。令:

$$\Delta \delta_{V_i} = \frac{\sum_{t=1}^{24} (V_{i,h}(t) - V_{i,d}(t))}{\sum_{t=1}^{24} |V_{i,e}(t) - V_{i,d}(t)|} \times 100\%$$
(16)

$$\Delta \delta_{K} = \frac{K_{\rm d} - K_{\rm h}}{K_{\rm d} - K_{\rm c}} \times 100 \% \tag{17}$$

 $\Delta \delta_{V_i}$ 越小,表明节点*i*在首端电压追踪控制策略 下的电压水平越接近传统下垂控制策略; $\Delta \delta_{\kappa}$ 越大, 表明馈线在首端电压追踪控制策略下的全天线损率 越接近线损最优控制策略。根据表1可得 $\Delta \delta_{\kappa}$ = 62.15%。由式(16)可得节点2—33的 $\Delta \delta_{V_i}$ 如图14 所示。



图 14 节点 2 — 33 的 $\Delta \delta_V$ 值

Fig.14 Values of $\Delta \delta_{V_i}$ for Node 2-33

由图14不难看出,在首端电压追踪控制策略

下, $\Delta\delta_{V_i}$ (*i*=2,3,...,33)值均处于30%~33%之间, 远小于 $\Delta\delta_k$ 的值,说明线路电压水平更接近传统下 垂控制策略,而线损率指标则更加接近线损最优控 制策略。

4 结论

(1)基于馈线首端电压追踪的变斜率下垂控制 策略,在电压较低的运行工况下,光伏逆变器能够发 出无功功率以提升电压水平,取得与传统下垂控制 策略相同的调节效果;在电压较高的运行工况下,光 伏逆变器能够吸收较少的无功功率以降低电压水 平,满足运行要求。与传统下垂控制和线损最优控 制策略相比,变斜率下垂控制策略可以牺牲较少的 降压效果来换取更多的降损收益。

(2)本文所提控制策略保留了传统下垂控制策 略快速响应电压波动的自适应控制优势,在硬件配 置上只需增加1台智能采集装置采集下发首端电压 信号,通信简单、可靠;相较于线损最优控制策略,本 文所提控制策略可以大幅减少全状态监测系统的建 设成本,并获得线损率次优的有益效果,可作为一种 分布式光伏无功-电压控制的工程实用方法。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]陈炜,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-32,39.
 CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):26-32,39.
- [2]魏吴焜,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.
- [3]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 Hongmin,DU Xinhui,LI Tingjun,et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology,2019,43(2):462-469.
- [4] 李翠萍,曹璞佳,李军徽,等. 大规模分布式光伏并网无功电压 控制方法综述[J]. 东北电力大学学报,2017,37(2):82-88.
 LI Cuiping, CAO Pujia, LI Junhui, et al. Review on reactive voltage control methods for large-scale distributed PV integrated grid[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017,37(2):82-88.
- [5]中国国家标准化管理委员会.光伏发电站监控系统技术要求: GB/T 31366—2015[S].北京:中华人民共和国国家质量监 督检疫总局,2015.
- [6] IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage. IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces: IEEE Std 1547[™]-2018[S]. New York, USA: IEEE-SA Standards Board, 2018.
- [7] BRAUN M, STETZ T, REIMANN T. Optimal reactive power

supply in distribution network-technological and economic assessment for PV systems[C] //European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Hamburg, Germany: European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2009:3872-3881.

[8] 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.

- [9] 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 Yuanyuan,GUO Li,WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in distribution networks with high penetration of PV[J]. Power System Technology,2018,42(3):738-746.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 潘琪,徐洋,高卓.含分布式光伏电站接入的配电网三级电压 控制系统设计[J].电力系统保护与控制,2014,42(20):64-68.
 PAN Qi,XU Yang,GAO Zhuo. Design of three level voltage control system in distribution network with the connection of many distributed photovoltaic power plants[J]. Power System Protection and Control,2014,42(20):64-68.
- [13] 王以笑,崔丽艳,雷振锋,等.分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(4):118-122.
 WANG Yixiao, CUI Liyan, LEI Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV

station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 118-122.

113

- [14] 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.
- [15] DEMIROK E, GONZÁLEZ P C, FREDERIKSEN K H B, et al. Local reactive power control methods for overvoltage prevention of distributed solar inverters in low-voltage grids[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2011, 1(2):174-182.
- [16] KABIRI R, HOLMES G, MCGRATH B, et al. LV grid voltage regulation using transformer electronic tap changing, with PV inverter reactive power injection [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 1182-1192.
- [17] HEN G Y, DENNICE F G, STEVEN H L. Adaptive var control for distribution circuits with photovoltaic generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3):1656-1663.

作者简介:



孙 旻(1970—),男,江西南昌人,教 授级高级工程师,主要研究方向为分布式 电源并网稳定分析与控制(E-mail:zysyw@ 163.com);

陈 波(1986—),男,湖南澧县人,高级 工程师,博士,通信作者,研究方向为电力系 统稳定分析与控制(E-mail: orchis1986@ 126.com);

孙旻

曾 伟(1979—),男,重庆人,高级
 工程师,博士,主要研究方向为分布式光伏建模与仿真
 (E-mail:eric.zengw@gmail.com);

何 伟(1985—),男,湖北仙桃人,高级工程师,博士,研 究方向为新能源并网电能质量分析与治理(E-mail:lanlyhw@ 163.com)。

(编辑 陆丹)

Variable slope droop control strategy of distributed photovoltaic based on feeder head-end voltage tracking of distribution network

SUN Min, CHEN Bo, ZENG Wei, HE Wei, HUANG Yangqi, HE Hao

(State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: The relationship between the reactive power output of distributed PV (PhotoVoltaic) power stations and the voltage of interconnection point is analyzed, and the effect of reactive power absorption of PV power station on line loss of distribution network is studied. Based on the traditional droop control strategy, a variable slope droop control strategy of distributed PV based on feeder head-end voltage tracking of distribution network is proposed, and the architecture and software control logic of the control system are introduced. Based on the improved control strategy, the line voltage level is slightly higher than that under the traditional droop control strategy, but the line loss ratio is closer to that under the optimal line loss control strategy. Taking IEEE 33-bus distribution network system as an example, time series simulation is carried out on OpenDSS, and the proposed control strategy is compared with the traditional droop control strategy can sacrifice less voltage reduction effect to gain more loss reduction benefits, which verifies the correctness and practicability of the proposed control strategy.

Key words: distributed photovoltaic; distribution network line; line loss; voltage regulation; head-end voltage tracking control; variable slope droop control



图 A1 IEEE 33 节点系统的拓扑结构 Fig.A1 Topology structure of IEEE 33-bus system

表 A1 IEEE33 节点系统的参数 Table A1 Parameters of IEEE 33-bus system

节点 i	节点 <i>j</i>	线路编号	线路阻抗/Ω	节点 j 负荷/(kV·A)	节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>	线路编号	线路阻抗/Ω	节点 j 负荷/(kV·A)
1	2	L ₁	0.2160+j0.2640	19+j6	17	18	L ₁₇	0.1722+j0.2105	39+j12
2	3	L_2	0.1659+j0.2027	39+j12	2	19	L ₁₈	0.2163+j0.2228	19+j6
3	4	L ₃	0.1386+j0.1694	19+j6	19	20	L ₁₉	0.1283+j0.1322	48+j15
4	5	L_4	0.1049+j0.1282	48+j15	20	21	L ₂₀	0.1637+j0.1686	48+j15
5	6	L_5	0.1182+j0.1445	48+j15	21	22	L ₂₁	0.1480+j0.1524	39+j12
6	7	L_6	0.1810+j0.2213	19+j6	3	23	L ₂₂	0.2086+j0.2149	19+j6
7	8	L_7	0.1112+j0.1359	48+j15	23	24	L ₂₃	0.1672+j0.1723	48+j15
8	9	L_8	0.1730+j0.2115	19+j6	24	25	L ₂₄	0.2210+j0.2277	48+j15
9	10	L9	0.1466+j0.1792	19+j6	5	26	L ₂₅	0.1392+j0.1434	39+j12
10	11	L_{10}	0.1886+j0.2306	19+j6	26	27	L ₂₆	0.1484+j0.1529	19+j6
11	12	L_{11}	0.1044+j0.1276	19+j6	27	28	L ₂₇	0.1351+j0.1392	48+j15
12	13	L ₁₂	0.1378+j0.1685	19+j6	28	29	L ₂₈	0.1341+j0.1381	116+j35
13	14	L ₁₃	0.1070+j0.1308	19+j6	29	30	L ₂₉	0.2163+j0.2229	39+j12
14	15	L_{14}	0.1855+j0.2267	19+j6	30	31	L ₃₀	0.1838+j0.1894	19+j6
15	16	L ₁₅	0.0976+j0.1193	116+j35	31	32	L ₃₁	0.1805+j0.1860	48+j15
16	17	L ₁₆	0.1683+j0.2057	19+j6	32	33	L ₃₂	0.1351+j0.1392	48+j15