

分布式光伏系统并网对配电网电压的影响及电压越限治理方案

陈良耳,王恩荣,王琦,林琬钧,居佳琪

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 随着大规模分布式光伏系统并网,配电网电压问题成为分布式光伏发展的最大挑战之一. 以辐射状结构配电网为研究对象,从电压降落角度研究分布式光伏系统并网前后配电网电压分布的变化,分别分析了单个和多个光伏系统并网对配电网电压的改变,探讨了改变电压分布的各种因素,包括接入容量、接入位置、负荷大小、工作方式和接入方式. 通过美国 PG&E69 节点系统对理论分析进行了验证,得出线路电压随光伏系统并网而升高,且升高幅度与负荷分布和光伏出力有密切关系的结论,并提出了配电网电压越限的治理方案,该方案充分利用逆变器的剩余容量吸收无功,有效解决了分布式光伏系统并网引起的电压越限问题.

[关键词] 分布式光伏,配电网,电压越限,影响因素,无功控制

[中图分类号] TM615 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2017)03-0015-07

Influence of Distributed PV Systems on Voltage in Distribution Network and Countermeasure of Voltage Beyond Limits

Chen Lianger, Wang Enrong, Wang Qi, Lin Wanjuan, Ju Jiaqi

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: With the large scale distributed photovoltaic systems connected to the grid, the voltage problem of distribution network becomes one of the biggest challenges in the development of distributed photovoltaic. Taking the radial distribution network as the research object, from the viewpoint of voltage drop in power grid, the paper studies the voltage variation of distribution network before and after the connection of photovoltaic systems to distribution network. The influences of connecting single photovoltaic system and multi photovoltaic systems to distribution network on voltage of distribution network are analyzed respectively. The factors that affect the distribution network voltage distribution are discussed, including the access capacity, access location, load size, operation mode and access mode. The theoretical analysis is verified by America PG&E69 nodes system, and the obtained conclusions are as follows: the photovoltaic systems increase the line voltage and the voltage variation is directly related to the distribution of loads and the output of photovoltaic systems. Meanwhile, the countermeasure of voltage beyond limits in distribution network is put forward. The countermeasure can make full use of the residual capacity of the inverter to absorb reactive power, and solve effectively the problem of voltage beyond limits caused by distributed photovoltaic systems connected to the grid.

Key words: distributed photovoltaic, distribution network, voltage beyond limits, influence factor, reactive power control

随着能源危机、环境污染问题的加剧,世界各国加快对新能源的开发和利用. 光伏(photovoltaic, PV)发电作为一种清洁无污染的可再生能源,近年来在电力系统中的装机容量越来越大,并且从大型集中式向大规模分布式建设方向发展^[1]. 而光伏发电的出力具有随机性和不确定性,会对电力系统的电压稳定产生影响^[2],因此需要研究各种因素下分布式光伏系统并网对配电网电压的影响,为分布式光伏的规划建设提供理论依据.

分布式光伏系统的接入会影响配电网的潮流分布,可能改变部分支路的潮流方向,从而影响电力平

收稿日期:2017-03-20.

基金项目:国网江苏省电力公司科技项目(JSDL-XLFW-LYG-2015-06-034).

通讯联系人:王恩荣,博士,教授,研究方向:智能车辆悬架控制,磁流变阻尼器减振应用,工业系统智能控制. E-mail:erwang@njjnu.edu.cn

衡、电能质量、供电可靠性等各个方面^[3],甚至引起部分节点电压越限^[4].文献[5-7]建立了含分布式光伏系统的配电网数学模型,并以最大允许电压偏差为约束条件推导出不同情况下的分布式光伏系统准入容量.文献[8]采用可靠性评估算法,对含分布式光伏的配电网可靠性进行评估和分析,为光伏电站的选址提供一定的理论参考.文献[9]从渗透率角度分析了配电网接入光伏系统后的电压变化,并研究了传统配电网中光伏渗透率的极限.文献[10]通过研究加拿大郊区配电系统,得出在光伏渗透率不同的条件下,不同馈线参数和变压器阻抗对电压的影响.文献[11-13]针对光伏接入可能导致的配电网电压越限的情况,分析配电网电压越限的原因,提出了相应的解决方案,并就其可靠性、经济性、合理性和有效性进行了比较分析.

本文首先分析了单个和多个光伏系统并网对配电网电压的影响机理,推导了配电网中光伏系统的最大接入容量.其次以美国 PG&E69 节点系统为例,分析了不同接入容量、接入位置、负荷大小、工作方式和接入方式下分布式光伏接入对配电网电压的影响.最后,提出了采用逆变器无功控制的方案解决可能出现的电压越限问题.

1 光伏系统并网对配电网电压的影响机理

1.1 单个光伏系统并网

图 1 为有 N 个用户的配电线路负荷分布情况,接入单个光伏系统,假定 U_0 为线路初始端电压,其中 U_n 、 P_n 和 Q_n 分别代表第 n 个用户的电压及消耗的有功功率和无功功率($n=1,2,\dots,N$),第 $n-1$ 个用户和第 n 个用户之间线路阻抗为 $R_n+jX_n=l_n(r+jx)$,其中 r 表示配电线路上单位长度的电阻值, x 表示单位长度的电抗值, l_n 表示相邻用户之间线路的长度, P_V 表示第 p 个用户接入的光伏容量.

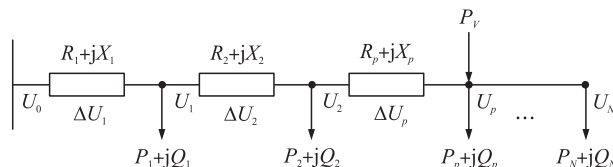


图 1 单个光伏系统接入配电线路负荷分布

Fig. 1 Load distribution of single PV system accessed to distribution network

(1) 光伏系统接入前.忽略线路损耗,线路上某一用户与前一用户之间的电压差如式(1)所示,规定功率流向负载方向为正值.

$$\Delta U_m = U_m - U_{m-1} = - \frac{\sum_{n=m}^N P_n R_m + \sum_{n=m}^N Q_n X_m}{U_{m-1}}. \quad (1)$$

由于用户消耗的功率均大于 0,故 $\Delta U_m < 0$, $U_m < U_{m-1}$,即线路上每一点的电压都小于前一点电压,也即配电线路上的用户距离初始点越远,电压越低.线路上第 m 个用户处的电压 U_m 为

$$U_m = U_0 + \sum_{k=1}^m \Delta U_k = U_0 - \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{n=k}^N P_n R_k + \sum_{n=k}^N Q_n X_k}{U_{k-1}}. \quad (2)$$

(2) 光伏系统接入后.当 $0 < m < p$,即光伏并网前某一点的电压为

$$U_m = U_0 - \sum_{k=1}^m \frac{\left(\sum_{n=k}^N P_n - P_V \right) R_k + \sum_{n=k}^N Q_n X_k}{U_{k-1}}. \quad (3)$$

在配电线路实际运行中,可忽略消耗的无功功率,则 m 点电压经简化后得

$$U_m = U_0 - \sum_{k=1}^m \frac{\left(\sum_{n=k}^N P_n - P_V \right) R_k}{U_{k-1}} > U_0 - \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{n=k}^N P_n R_k}{U_{k-1}}. \quad (4)$$

由式(4)可知,光伏系统并网后,配电线路电压升高,且光伏系统的输出功率以及并网点的位置、线路的参数和负荷的大小等都会影响电压上升的幅度.

第 m 户和第 $m-1$ 户之间的电压降为

$$U_m - U_{m-1} = - \frac{\left(\sum_{n=m}^N P_n - P_V \right) R_m}{U_{m-1}}. \quad (5)$$

当 $\sum_{n=m}^N P_n < P_V$, 即第 m 户往后用户消耗的全部有功功率小于光伏出力时, $U_m - U_{m-1} > 0$, 电压上升. 当 $\sum_{n=m}^N P_n > P_V$, 即第 m 户往后用户消耗的全部有功功率大于光伏出力时, $U_m - U_{m-1} < 0$, 电压下降.

当 $p < m < N$, 即光伏系统并网后, 某一点的电压为

$$U_m = U_0 - \sum_{k=1}^p \frac{\left(\sum_{n=k}^N P_n - P_V \right) R_k}{U_{k-1}} - \sum_{k=p+1}^m \frac{\sum_{n=k}^N P_n R_k}{U_{k-1}}, \quad (6)$$

$$U_m - U_{m-1} = \sum_{k=p+1}^{m-1} \frac{\sum_{n=k}^N P_n R_k}{U_{k-1}} - \sum_{k=p+1}^m \frac{\sum_{n=k}^N P_n R_k}{U_{k-1}} = - \frac{\sum_{n=m}^N P_n R_m}{U_{m-1}} < 0. \quad (7)$$

分析式(7)得, 光伏系统并网点后的电压沿馈线方向逐渐降低.

1.2 多个光伏系统并网

图2为多个光伏系统并网时配电线路负荷, 未装设光伏系统的按光伏系统输出功率0计算.

多个光伏系统并网后, 不计消耗的无功功率, 则 m 点电压简化为

$$U_m = U_0 - \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{n=k}^N (P_n - P_{Vn}) R_k}{U_{k-1}}. \quad (8)$$

第 m 户和第 $m-1$ 户之间的电压差为

$$U_m - U_{m-1} = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\sum_{n=k}^N (P_n - P_{Vn}) R_k}{U_{k-1}} - \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{n=k}^N (P_n - P_{Vn}) R_k}{U_{k-1}} = - \frac{\sum_{n=m}^N (P_n - P_{Vn}) R_m}{U_{m-1}}. \quad (9)$$

上式 P_{Vn} 为光伏系统向第 n 户输出的功率.

当 $\sum_{n=m}^N P_n < \sum_{n=m}^N P_{Vn}$, 则 $U_m - U_{m-1} > 0$, 即第 m 户往后用户消耗的全部有功小于所有光伏系统出力时, 电压上升. 当 $\sum_{n=m}^N P_n > \sum_{n=m}^N P_{Vn}$, 则 $U_m - U_{m-1} < 0$, 即第 m 户往后用户消耗的全部有功大于所有光伏系统出力时, 电压下降. 多个光伏系统并网的情况下, 线路电压的最大值可能是任一点电压.

1.3 光伏系统最大接入容量

(1) 单个光伏系统并网时最大接入容量

如果线路首端电压 U_0 确定为最大允许限值 U_{\max} , 且恒定不变, 因此在式(4)和式(6)中, 应使 $U_m \leq U_0$, 可得结果如式(10)所示:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^m \frac{\left(\sum_{n=k}^N P_n - P_V \right) R_k}{U_{k-1}} \geq 0, \\ \sum_{k=1}^p \frac{\left(\sum_{n=k}^N P_n - P_V \right) R_k}{U_{k-1}} - \sum_{k=p+1}^m \frac{\sum_{n=k}^N P_n R_k}{U_{k-1}} \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

将 $U_m = 1$ 近似处理, 因此可求得各节点光伏系统可接入的最大容量近似结果如式(11)所示:

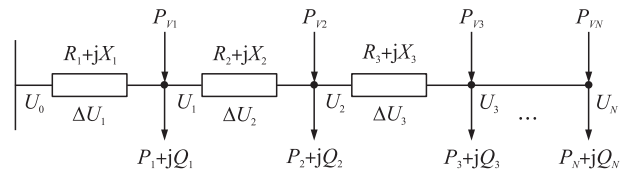


图2 多个光伏系统接入配电线路负荷分布

Fig. 2 Load distribution of multi PV systems accessed to distribution network

$$P_V \leq \min \left\{ \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{n=k}^N P_n R_k}{\sum_{k=1}^m R_k}, \frac{\sum_{k=1}^p \left(\sum_{n=k}^N P_n R_k \right) - \sum_{k=p+1}^m \left(\sum_{n=k}^N P_n R_k \right)}{\sum_{k=1}^p R_k} \right\}. \quad (11)$$

由式(11)和线路以及节点参数便可求得配网线路中各节点光伏系统可接入的最大容量,可以看出不同节点可接入光伏系统的最大容量是不同的.

(2) 多个光伏系统并网时最大接入容量

由式(8)可得,要使 $U_m \leq U_0$, 节点 m 处的光伏系统接入容量满足

$$\sum_{k=1}^m \frac{\sum_{n=k}^N (P_n - P_{Vn}) R_k}{U_{k-1}} \geq 0. \quad (12)$$

由式(12)可以看出,当多个光伏系统并网时,各节点光伏系统可接入的最大容量不仅与线路和节点参数有关,还与其它节点接入光伏系统的容量有关. 因此,节点 m 处的光伏系统最大接入容量应根据具体情况而定.

2 仿真分析

以图 3 所示美国 PG&E69 节点系统为算例,网络首端电源基准电压 12.66 kV,三相功率基准值取 10 MVA、网络总负荷 3 802.19+j2 694.60 kVA.

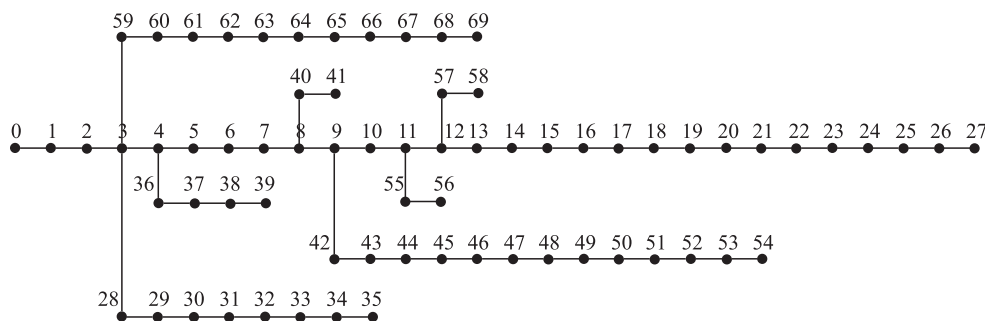


图 3 美国 PG&E69 节点系统

Fig. 3 America PG&E69 nodes system

2.1 单个光伏系统并网时线路电压的变化

图 4 为单个光伏系统在接入容量、接入位置、负荷大小不同的情况下,配电网主干线路 0~27 节点上的电压分布曲线.

单个光伏系统并网的算例中有三个控制变量,分别为接入容量、接入位置和负荷大小. 图 4(a)中,接入位置为节点 18,负荷大小为高峰时的负荷,在光伏系统接入容量不同时比较电压分布. 图 4(b)中,接入容量为 316 kW,负荷大小为高峰时的负荷,在光伏系统接入位置不同时比较电压分布. 图 4(c)中,接入容量为 316 kW,接入位置为节点 18,在负荷大小不同时比较电压分布.

由图 4 可得如下结论:

- (1) 线路电压会因单个光伏的并网而升高,光伏并网容量越大,线路电压上升的幅度越大.
- (2) 光伏系统容量相同时,并网位置离线路末端越近,线路电压升高幅度越大.
- (3) 线路电压上升幅度也会因负荷大小不同而不同,负荷越小,上升幅度越大.

2.2 多个光伏系统并网时线路电压的变化

图 5 为多个光伏系统在接入容量、工作方式、接入方式不同的情况下,配电网主干线路 0~27 节点上的电压分布曲线.

多个光伏系统并网的算例中有三个控制变量,分别为接入容量、工作方式和接入方式. 图 5(a)中,光伏系统功率因数设为 1,接入方式为分散接入节点 9、18、27,在光伏系统接入容量不同时比较电压分布. 图 5(b)中,单个光伏系统接入容量为 316 kW,接入方式为分散接入节点 9、18、27,在光伏系统工作方

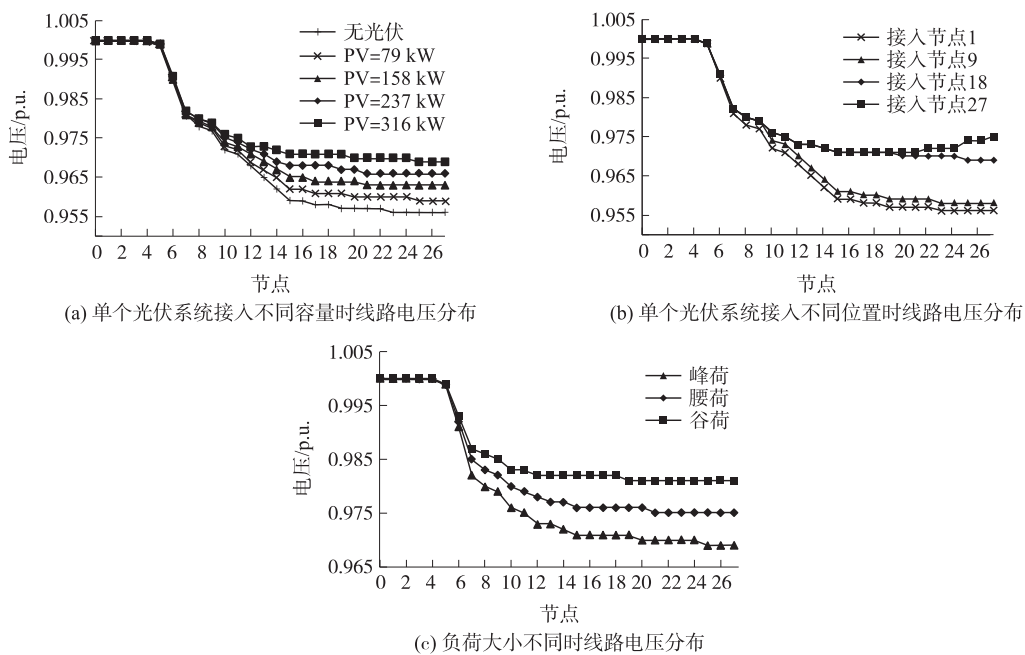


图4 光伏系统接入容量、接入位置、负荷大小不同时电压分布曲线

Fig. 4 Voltage distribution curve under the condition of different access capacities, access locations and load sizes

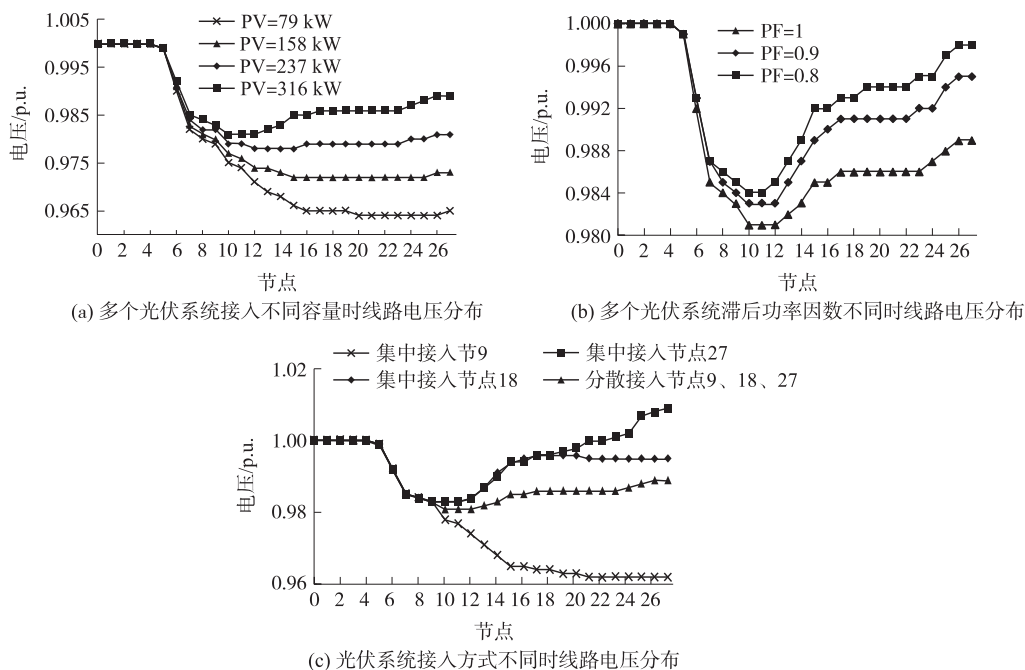


图5 多个光伏系统接入容量、功率因数、接入方式不同时电压分布曲线

Fig. 5 Voltage distribution curve under the condition of different access capacities, operation modes and access modes

式不同时比较电压分布. 图 5(c) 中, 光伏系统功率因数设为 1, 比较在节点 9 或节点 18 或节点 27 集中接入 948 kW 单个光伏系统和在节点 9、18、27 平均分散接入总量为 948 kW 多个光伏系统时电压分布.

由图 5 可得如下结论:

- (1) 线路电压会因多个光伏系统的并网而升高, 且升高的幅度会随着光伏系统接入容量的增加而增大.
- (2) 当光伏系统以不同功率因数运行时, 若光伏系统输出的有功功率相同, 线路电压升高幅度随着功率因数的降低而增大.
- (3) 光伏系统接入方式不同, 对电压升高幅度产生的影响也会不同. 光伏系统集中并入馈线末端时电压升高幅度最大, 平均分散接入次之, 而集中并入馈线始端时电压上升幅度最小.

3 电压越限治理方案

在实际运行中,光伏发电出力往往是随机的,当光照较强或负荷容量较低时,就有可能导致并网点以及周围节点的电压越限,线路电压越限影响了负荷的供电质量,同时会引起变压器和线路等设备的损耗增加,而且可能会导致光伏发电系统保护装置将其从电网切除,限制了其并网能力. 本节研究采用光伏逆变器无功控制对电压越限的改善效果,多个光伏系统并网时可采取类似的措施.

光伏逆变器通过电压外环和电流内环控制实现有功和无功电流的解耦控制,从而实现既能向电网输出有功功率的同时又能对电网进行无功补偿. 当光伏逆变器额定容量大于有功输出时,剩余容量可用来进行无功补偿,调节光伏接入点电压. 光伏逆变器的视在功率是固定的,有功出力越小,无功出力越大. 逆变器输出的有功和无功功率的关系为(允许短时运行在 1.1 倍的视在功率下)

$$P^2 + Q^2 \leq (1.1S)^2. \quad (13)$$

因此,逆变器输出的无功功率范围为

$$-\sqrt{(1.1S)^2 - P^2} \leq Q \leq \sqrt{(1.1S)^2 - P^2}. \quad (14)$$

本文采用恒功率因数 $\cos \varphi$ 控制的逆变器无功控制策略,即无功输出正比于光伏有功输出且为一个恒定值 C.

$$\cos \varphi = \cos \arctan(Q/P), \quad (15)$$

$$Q/P = C. \quad (16)$$

以节点 27 为例,光伏系统有功输出为 2 MW 恒定不变,功率因数为超前,逆变器不同超前功率因数运行时的电压分布曲线如图 6 所示.

由图 6 可以看出,当没有光伏系统并网时,线路电压沿着线路方向降低,当光伏系统功率因数为 1 时,由于大量的有功功率注入到配电网中,线路末端电压达到 1.07 p.u.,出现了电压越限的情况,随着功率因数的降低,光伏系统吸收的无功功率逐渐增大,线路末端电压随之降低,当逆变器以超前功率因数 0.7 运行时,线路电压分布在 0.98 p.u.至 1.02 p.u.之间,有效治理了电压越限,且改善了配电网的电压分布状态. 但此种运行方式下,逆变器输出的视在功率已达到 2.86 MVA,所需容量较大.

光伏系统并网点电压越限通常是由光伏系统输出的有功功率过多引起的,且输出的有功功率越多,电压抬升的越高,恒功率因数 $\cos \varphi$ 控制策略简单,能有效治理并网点电压越限问题.

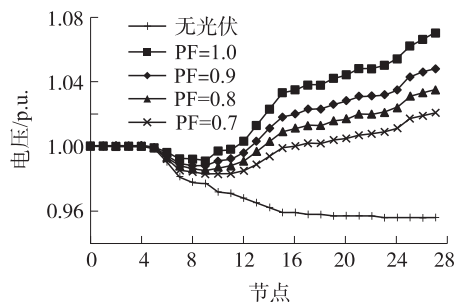


图 6 逆变器调节超前功率因数时的电压分布曲线
Fig. 6 Voltage distribution curve under the condition of different advance power factors of inverters operation

4 结论

本文分析了光伏系统并网对配电网电压的改变,研究了光伏系统并网容量、并网位置、负荷大小、工作方式、接入方式等因素对配电网电压的影响,得出了如下结论:

- (1) 光伏系统接入配电网后,线路电压上升,且电压升高幅度与负荷分布和光伏出力有密切关系.
- (2) 光伏系统接入容量越大,接入位置越接近线路末端,负荷越小,功率因数越低,线路电压升高幅度越大.
- (3) 光伏系统集中接入馈线末端时电压上升的幅度最大,分散接入次之,集中接入馈线始端时电压的上升幅度最小.
- (4) 通过光伏逆变器无功控制能够有效防止光伏并网点的电压产生越限,并能改善配电网的电压分布状态.

[参考文献] (References)

- [1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.

- DING M, WANG W S, WANG X L, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14. (in Chinese)
- [2] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4 999-5 008.
ZHOU X X, LU Z X, LIU Y M, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4 999-5 008. (in Chinese)
- [3] HU B, NONAKA Y, YOKOYAMA R. Influence of large-scale grid-connected photovoltaic system on distribution networks[J]. Automation of electric power systems, 2012(3): 254-261.
- [4] ENSLIN J H R. Network impacts of high penetration of photovoltaic solar power systems[J]. Power and energy society general meeting, 2010(10): 1-5.
- [5] 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(2): 299-306.
LIU J, HUANG W. Analysis on grid-connectible capacity of distributed PV generation in case of PV generation distribution close to load distribution[J]. Power system technology, 2015, 39(2): 299-306. (in Chinese)
- [6] 刘健, 同向前, 潘忠美, 等. 考虑过电压因素时分布式光伏电源的准入容量[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 45-51.
LIU J, TONG X Q, PAN Z M, et al. The maximum power of distributed PV generation according to over-voltage in distribution network[J]. Power system protection and control, 2014, 42(6): 45-51. (in Chinese)
- [7] 曹哲, 刘波, 袁智强. 高密度分布式光伏发电系统接入配电网准入容量研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 118-122.
CAO Z, LIU B, YUAN Z Q. Research on the maximum penetration level of multiple distributed PV generation[J]. Power system and clean energy, 2014, 30(11): 118-122. (in Chinese)
- [8] 姜楠, 王琦, 王恩荣, 等. 分布式光伏电源接入对配电网可靠性的影响研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2016, 16(2): 1-9.
JIANG N, WANG Q, WANG E R, et al. Research on influence of the distributed photovoltaic supply on distributed network reliability[J]. Journal of Nanjing normal university (engineering and technology edition), 2016, 16(2): 1-9. (in Chinese)
- [9] 赵波, 张雪松, 洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 95-100.
ZHAO B, ZHANG X S, HONG B W. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic sources integrated into smart distribution network[J]. Electric power automation equipment, 2012, 32(8): 95-100. (in Chinese)
- [10] TONKOSKI R, TURCOTTE D, EL-FOULY T H M. Impact of high PV penetration on voltage profiles in residential neighborhoods[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2012, 3(3): 518-527.
- [11] 李恒真, 谢志文, 吴树鸿, 等. 分布式发电电压协调控制策略研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2016, 16(4): 28-33.
LI H Z, XIE Z W, WU S H, et al. Research on autonomous control strategies for distributed generation voltage[J]. Journal of Nanjing normal university (engineering and technology edition), 2016, 16(4): 28-33. (in Chinese)
- [12] 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 Q R, ZHANG J C. Solutions of voltage beyond limits in distribution network with distributed photovoltaic generators[J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(22): 117-123. (in Chinese)
- [13] 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): 2 427-2 432.
ZHOU L, CHAO Y, LIAO B, et al. A voltage regulation strategy by grid-connected PV inverters in low-voltage networks[J]. Power system technology, 2013, 37(9): 2 427-2 432. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]