

# 分布式光伏电源极端可接入容量极限研究

黄炜<sup>1</sup>, 刘健<sup>2</sup>, 魏昊焜<sup>2</sup>, 张志华<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为了防止大量分布式光伏电源接入配电网后可能引起电压偏差和电压波动越限, 建立了负荷和分布式光伏电源引起的电压偏差和电压波动的计算模型。并在此基础上定义了分布式光伏电源极端可接入容量极限的概念, 即负荷为0的极端情况下不致引起电压偏差和电压波动问题的分布式光伏电源接入容量极限。推导了6种典型分布情况下线路电压偏差和电压波动不越限时所能允许接入的极端容量极限。针对10 kV典型线路, 给出了不同线型下城市配电网和农村配电网中分布式光伏电源安全接入的极端容量极限值。结果表明, 分布式光伏电源极端可接入容量极限是保守的限值, 只要满足该容量极限, 无论分布式光伏电源和负荷的如何分布情况, 都不至于对配电网产生不可接受的电压偏差或电压波动。

**关键词:** 配电网; 分布式光伏电源; 电压偏差; 电压波动; 光伏接入容量极限

## Extreme capacity limitations of photovoltaic generators in distribution grids

HUANG Wei<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>, WEI Haokun<sup>2</sup>, ZHANG Zhihua<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to prevent voltage deviation and voltage fluctuation beyond its upper limit caused by the installation of large amount of distributed photovoltaic (PV) generators in distribution grids, the calculation models of PV generators are established to analyze the voltage deviation and voltage fluctuation. An index of the extreme capacity limitation of distributed PV generators interconnected into the idle feeder without causing the problem of voltage deviation and voltage fluctuation is defined. The extreme capacity limitations are deduced for six PV distribution patterns. The typical urban and rural distribution grids are used as examples to demonstrate the extreme capacity limitations in various cases. The results show that proposed index is rather conservative and neither problems of voltage deviation or voltage fluctuation could be avoided once the index was met.

**Key words:** distribution grids; distributed photovoltaic generation; voltage deviation; voltage fluctuations; capacity limitation of distributed photovoltaic generation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0022-07

## 0 引言

随着可再生资源发电和分布式电源的大规模接入, 通常依靠灵活的网络结构和较大的容量裕度来应对负荷的不确定性, 以保证电力系统的安全可靠性的传统配电网已无法应对高渗透率分布式电源的接入, 而且传统配电网运行控制方法也显得相对简单。大量高渗透率的分布式光伏电源接入电网, 改变了传统配电网中的潮流分布和潮流方向<sup>[1]</sup>, 这种潮流的变化对电网的稳态电压分布<sup>[2-5]</sup>产生一些影响。

分布式光伏电源的合理分布可对配电网的电压起到支撑作用<sup>[6]</sup>, 但是分布式光伏电源的无约束接入运行可能导致配电网某些节点产生电压偏差和电压波动<sup>[7-9]</sup>。为此, 就分布式光伏电源接入电网国内外已经颁布了相关技术规定<sup>[10-11]</sup>, 以便更好地引导和规范光伏电源的合理应用。

目前对于分布式光伏电源允许接入电网的容量已有大量文献资料对其进行了研究分析。文献[12]通过分析电压和潮流以及并网位置和功率因数对准入容量的影响, 建立电力系统静态安全约束条件下的分布式电源准入容量的数学模型; 文献[13]考虑

分布式电源接入对配电网继电保护的影响, 在尽量不改变现有配电保护装置的情况下, 提出了计及短路电流约束的分布式电源准入容量计算模型; 文献[14-15]通过仿真研究了小范围民用分布式光伏电源对电网电压的影响; 文献[16]就单个分布式光伏电源对低压馈线电压分布的影响, 给出了不发生电压越限的情况下允许接入的光伏容量。

为了掌握分布式光伏电源引起的电压偏差和电压波动的严重程度, 并进一步明确可以安全接入的分布式光伏电源的容量极限, 本文定义了分布式光伏电源极端可接入容量极限的概念, 并结合 6 种典型分布场景, 对城市配电网和农村配电网分布式光伏电源的安全容量接入条件进行分析。

## 1 电压偏差和电压波动分析

对于处于正常运行方式的馈线, 均可以等效为一个单电源辐射状结构。由于配电网中馈线长度较

短、电压等级较低, 分析中可以略去馈线间的互感和对地分布电容, 而只计及馈线自阻抗。负荷采用恒功率静态模型并假设三相负荷平衡。光伏电源采用有功功率源模型, 且不参与配电网电压调节。配电母线以上系统等效为具有一定串联阻抗的电压源。分析中, 将配电网电压近似为额定电压  $U_N$ 。

在上述近似条件下, 含分布式光伏电源的配电网的分析模型如图 1 所示。为了不失一般性设其共有  $n$  个节点, 每个节点均接有负荷和光伏电源, 若某节点不存在光伏电源或负荷时, 将相应功率设为零即可。图中, 0 号节点代表配电母线,  $R_0+jX_0$  代表主电源侧系统阻抗,  $R_k+jX_k$  代表第  $k$  段馈线的等值阻抗,  $P_{L,k}+jQ_{L,k}$  代表第  $k$  个节点的负荷功率,  $P_{PV,k}$  代表第  $k$  个节点上的光伏功率。设第  $k$  个节点配电变压器的额定容量为  $S_{NT,k}$ , 其无功损耗幅值占  $S_{NT,k}$  的比率为  $\alpha_k$ , 负荷功率因数为  $\phi$ , 负荷有功功率占  $S_{NT,k}$  的比率为  $\beta_k$ 。

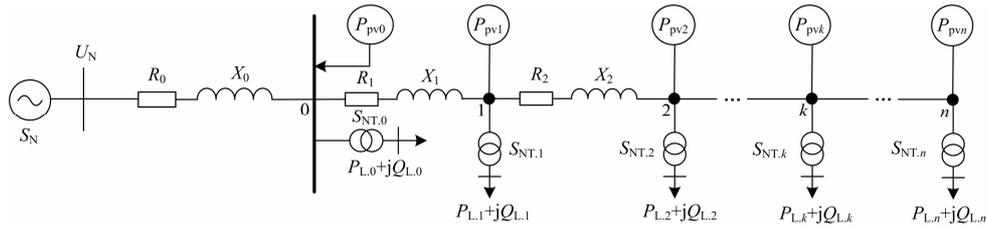


图 1 含分布式光伏的配电网模型

Fig. 1 Distribution network model with distributed photovoltaic

根据上述符号定义, 有

$$P_{L,k} = \beta_k S_{NT,k} \quad (1)$$

$$Q_{L,k} = \alpha_k S_{NT,k} + \tan(\arccos \phi) P_{L,k} = [\alpha_k + \tan(\arccos \phi) \beta_k] S_{NT,k} \quad (2)$$

总负荷功率为

$$P_L = \sum_{k=0}^n P_{L,k} = \beta S_{NT} \quad (3)$$

$$Q_L = \sum_{k=0}^n Q_{L,k} = [\alpha + \tan(\arccos \phi) \beta] S_{NT} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)有

$$Q_L = \left[ \frac{\alpha}{\beta} + \tan(\arccos \phi) \right] P_L \quad (5)$$

由图 1 可知当分布式光伏电源未接入时(即  $P_{PV}=0$ ), 则可得到节点  $k$  的电压偏差  $\Delta U_k\%$  可表示为

$$\Delta U_k \% = - \frac{\sum_{i=0}^k \left[ R_i \sum_{k=i}^n P_{L,k} + X_i \sum_{k=i}^n Q_{L,k} \right]}{U_N^2} \times 100\% \quad (6)$$

然而当分布式光伏电源接入电网时, 其输出的

有功功率和无功功率将减少线路上的电压损失, 其潮流方向与负荷潮流方向相反。对于分布式光伏发电逆变器功率因数在  $-0.95 \sim 0.95$ , 可以忽略无功影响, 那么接入分布式光伏电源后的  $k$  节点的电压偏差  $\Delta U_k\%$  为

$$\Delta U_k \% = \frac{\sum_{i=0}^k \left[ R_i \sum_{k=i}^n P_{PV,k} \right]}{U_N^2} \times 100\% - \frac{\sum_{i=0}^k \left[ R_i \sum_{k=i}^n P_{L,k} + X_i \sum_{k=i}^n Q_{L,k} \right]}{U_N^2} \times 100\% \quad (7)$$

将式(2)代入式(7)后整理得到

$$\Delta U_k \% = \frac{\sum_{i=0}^k \left[ R_i \sum_{k=i}^n P_{PV,k} \right]}{U_N^2} \times 100\% - \frac{\sum_{i=0}^k \left[ R_i \sum_{k=i}^n P_{L,k} + X_i \sum_{k=i}^n \left( \frac{\alpha_k}{\beta_k} + \tan(\arccos \phi) \right) P_{L,k} \right]}{U_N^2} \times 100\% \quad (8)$$

也即

$$\Delta U_k \% = \frac{\sum_{i=0}^k \left[ R_i \sum_{k=i}^n P_{PV,k} \right]}{U_N^2} \times 100\% - \frac{\sum_{i=0}^k \left[ R_i + X_i \left( \frac{\alpha_k}{\beta_k} + \tan(\arccos \phi) \right) \right] \sum_{k=i}^n P_{L,k}}{U_N^2} \times 100\% \quad (9)$$

近似认为馈线的导线类型始终一致,  $r+jx$  为馈线单位距离的等值阻抗, 则馈线的抗阻比  $K_z$  为

$$K_z = \frac{X_k}{R_k} \approx \frac{l_k x}{l_k r} = \frac{x}{r} \quad (10)$$

若忽略母线以上电源侧的系统阻抗, 并近似认为馈线的导线类型始终保持一致, 则距离母线  $l_k$  处第  $k$  个节点的短路容量  $S_{lk}$  近似为

$$S_{lk} \approx \frac{U_N^2}{\sqrt{l_k^2 r^2 + l_k^2 x^2}} = \frac{U_N^2 / r}{l_k \sqrt{1 + x^2 / r^2}} \quad (11)$$

分布式光伏电源通常最大输出功率受到外界光照日周期变化、云层变化、阴影效应等的影响, 除了产生电压偏差外, 还会产生明显的电压波动。假设分布式光伏电源输出功率瞬间变化的幅度占其额定输出功率的比例为  $\lambda$ , 则距母线距离为  $l_k$  处, 单纯由分布式光伏电源引起第  $k$  个节点的电压波动  $d_{pv,k} \%$  为

$$d_{pv,k} \% = \frac{\sum_{i=0}^k \left[ R_i \sum_{k=i}^n P_{PV,k} \right]}{\lambda U_N^2} \times 100\% \quad (12)$$

为了便于一般性研究, 得到负荷和分布式光伏电源在不同分布情况下的电压偏差和电压波动, 设馈线上有功负荷沿馈线长度  $x$  的分布函数为  $p_L(x)$ , 分布式光伏沿馈线长度  $x$  的分布函数为  $p_{PV}(x)$ , 馈线总长度为  $L$ 。

由式(9)可知, 负荷和分布式光伏电源任意分布条件下, 馈线上距母线距离为  $l_k$  处的电压偏差为

$$\Delta U_{(l_k)} \% = \frac{\int_0^{l_k} \left[ \int_y^L p_{PV}(x) dx \right] dy}{U_N^2} \times 100\% - \frac{\int_0^{l_k} \left\{ r + x \left[ \frac{\alpha}{\beta} + \tan(\arccos \phi) \right] \right\} \int_y^L p_L(x) dx dy}{U_N^2} \times 100\% \quad (13)$$

将式(10)和式(11)代入式(13)整理后有

$$\Delta U_{(l_k)} \% = \frac{\int_0^{l_k} \left[ \int_y^L p_{PV}(x) dx \right] dy}{l_k S_{lk} \sqrt{1 + K_z^2}} \times 100\% - \frac{\int_0^{l_k} \left\{ \left[ 1 + K_z \left[ \frac{\alpha}{\beta} + \tan(\arccos \phi) \right] \right] \int_y^L p_L(x) dx \right\} dy}{l_k S_{lk} \sqrt{1 + K_z^2}} \times 100\% \quad (14)$$

由式(12)可知, 分布式光伏电源任意分布条件下, 馈线上距母线距离为  $l_k$  处引起的电压波动为

$$d_{pv,l_k} \% = \frac{\int_0^{l_k} \left( \int_y^L p_{PV}(x) dx \right) r dy}{\lambda U_N^2} \times 100\% \quad (15)$$

将式(10)和式(11)代入式(15)有

$$d_{pv,l_k} \% = \frac{\int_0^{l_k} \left( \int_y^L p_{PV}(x) dx \right) dy}{l_k \lambda S_{lk} \sqrt{1 + K_z^2}} \times 100\% \quad (16)$$

## 2 典型场景分析

### 2.1 典型分布函数

由于分布式光伏电源分布情况存在多样性, 为了便于分析并不失一般性, 按照分布式光伏容量设置了 6 种典型分布场景进行分析, 包括: 末端集中、递增分布、均匀分布、递减分布、中间大两头小分布和中间小两头大分布。

6 种典型分布的曲线及分布函数如图 2 所示,

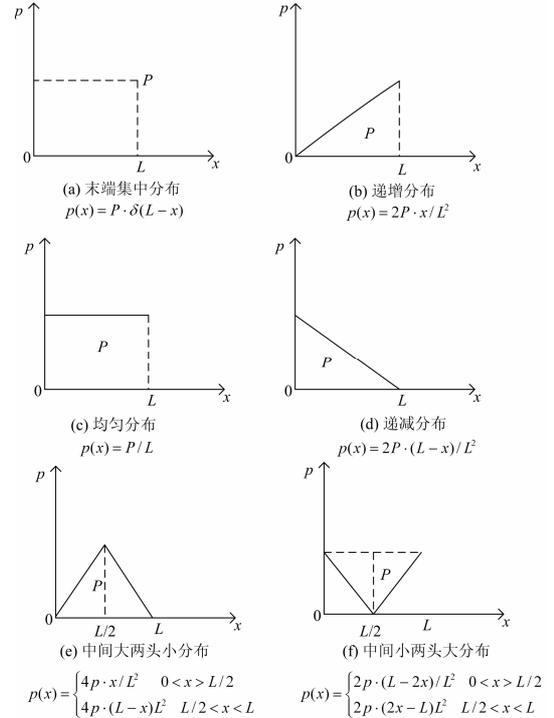


图 2 典型分布曲线和分布函数

Fig. 2 Typical distribution patterns and functions

其中,  $\delta$ 为冲激函数。

### 2.2 分布式光伏电源接入引起的电压问题分析

为了得出分布式光伏电源在对应 6 种典型场景下所能接入的极端容量极限, 为分布式光伏电源的安全接入提供科学决策依据, 在负荷为 0 的极端情况(即  $P_L=0$ )进行分析, 可以得到在此种极端情况下, 在 6 种典型分布情况下, 由分布式光伏电源引起的馈线上距母线距离为  $l_k$  处的电压偏差  $\Delta U_{PV(l_k)}\%$  和电压波动  $d_{pv(l_k)}\%$  如表 1 所示。

将表 1 中的 a,b,c,d 分布下的电压偏差  $\Delta U_{PV(l_k)}\%$  和电压波动  $d_{pv(l_k)}\%$  对  $l_k$  求导, 并令

$$\frac{d(\Delta U_{PV(l_k)}\%)}{dl_k} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{d(d_{pv(l_k)})}{dl_k} = 0 \quad (18)$$

可知: 对于表 1 中的 a,b,c,d 分布, 式(17)和式(18)均在  $l_k=L$  处成立, 而对于 e,f 分布, 经分析其在对应区间上为递增函数且通过比较在区间末端  $l_k=L$  取到最大值, 即表明由分布式光伏电源引起的电压偏差和电压波动总是在馈线末端为最大。将  $l_k=L$  分别代入表 1 中, 可以得到极端情况下各种分布的分布式光伏电源引起的最大电压偏差和电压波动。

表 1 6 种分布式光伏电源分布情况下由分布式光伏电源引起的电压偏差和电压波动

Table 1 Voltage deviation and voltage fluctuation due to photovoltaic devices in case of the six distribution patterns

分布式光伏分布情况	电压偏差	电压波动
a 集中末端	$\Delta U_{PV(l_k)}\% = \frac{P_{PV}r}{U_N^2} l_k \times 100\% (0 < l_k < L)$	$d_{PV(l_k)}\% = \frac{P_{PV}r}{\lambda U_N^2} l_k \times 100\% (0 < l_k < L)$
b 递增分布	$\Delta U_{PV(l_k)}\% = \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{l_k^2}{3L^2}\right)}{U_N^2} l_k \times 100\% (0 < l_k < L)$	$d_{PV(l_k)}\% = \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{l_k^2}{3L^2}\right)}{\lambda U_N^2} l_k \times 100\% (0 < l_k < L)$
c 均匀分布	$\Delta U_{PV(l_k)}\% = \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{l_k}{2L}\right)}{U_N^2} l_k \times 100\% (0 < l_k < L)$	$d_{PV(l_k)}\% = \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{l_k}{2L}\right)}{\lambda U_N^2} l_k \times 100\% (0 < l_k < L)$
d 递减分布	$\Delta U_{PV(l_k)}\% = \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{l_k}{L} + \frac{l_k^2}{3L^2}\right)}{U_N^2} l_k \times 100\% (0 < l_k < L)$	$d_{PV(l_k)}\% = \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{l_k}{L} + \frac{l_k^2}{3L^2}\right)}{\lambda U_N^2} l_k \times 100\% (0 < l_k < L)$
e 中间大两头小分布	$\Delta U_{PV(l_k)}\% = \begin{cases} \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{2l_k^2}{3L^2}\right)}{U_N^2} l_k \times 100\% & (0 < l_k < L/2) \\ \frac{P_{PV}r \left(2 - \frac{2l_k}{L} + \frac{2l_k^2}{3L^2} - \frac{L}{6l_k}\right)}{U_N^2} l_k \times 100\% & (L/2 < l_k < L) \end{cases}$	$d_{PV(l_k)}\% = \begin{cases} \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{2l_k^2}{3L^2}\right)}{\lambda U_N^2} l_k \times 100\% & (0 < l_k < L/2) \\ \frac{P_{PV}r \left(2 - \frac{2l_k}{L} + \frac{2l_k^2}{3L^2} - \frac{L}{6l_k}\right)}{\lambda U_N^2} l_k \times 100\% & (L/2 < l_k < L) \end{cases}$
f 中间小两头大分布	$\Delta U_{PV(l_k)}\% = \begin{cases} \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{l_k}{L} + \frac{2l_k^2}{3L^2}\right)}{U_N^2} l_k \times 100\% & (0 < l_k < L/2) \\ \frac{P_{PV}r \left(\frac{L}{6l_k} + \frac{l_k}{L} - \frac{2l_k^2}{3L^2}\right)}{U_N^2} l_k \times 100\% & (L/2 < l_k < L) \end{cases}$	$d_{PV(l_k)}\% = \begin{cases} \frac{P_{PV}r \left(1 - \frac{l_k}{L} + \frac{2l_k^2}{3L^2}\right)}{\lambda U_N^2} l_k \times 100\% & (0 < l_k < L/2) \\ \frac{P_{PV}r \left(\frac{L}{6l_k} + \frac{l_k}{L} - \frac{2l_k^2}{3L^2}\right)}{\lambda U_N^2} l_k \times 100\% & (L/2 < l_k < L) \end{cases}$

### 2.3 极端可接入容量极限分析

为了满足在负荷为 0 的极端情况下, 分布式光伏电源接入电网后其电网电压偏差不超越允许的电压的上限, 并不超越由分布式光伏电源引起的电压波动限值, 给出分布式光伏 6 种典型分布情况下在

满足电压偏差和电压波动两个指标情况下的容量约束条件, 其中  $\Delta U_{pv,标}\%$  表示电压偏差国家标准限值,  $\Delta d_{pv,标}\%$  表示电压波动国家标准限值, 如表 2 所示。

表 2 反映了能够确保不引起电压问题前提下分

布式光伏电源的极端可接入容量极限，只要满足表中要求，无论光伏电源以什么样的场景和分布情况接入，都不至于对配电网产生不可接受的电压偏差或电压波动。

显然，由于分布式光伏电源的极端可接入容量极限是在负荷为 0 的条件下得出的，而实际当中即使在最轻载情况下沿线负荷也不会完全为 0，因此该极限容量是比较保守和严格的。

表 2 分布式光伏电源的极端接入容量极限  
Table 2 Extreme capacity limitations of photovoltaic devices in six cases

分布式光伏分布情况	分布式电源接入容量的约束
a 集中末端	$\begin{cases} P_{pv} < \frac{3}{2}  \Delta U_{pv,标}  S_L \sqrt{1+K_z^2} \\ P_{pv} < \frac{3}{2}  \Delta d_{pv,标}  \lambda S_L \sqrt{1+K_z^2} \end{cases}$
b 递增分布	$\begin{cases} P_{pv} < \frac{3}{2}  \Delta U_{pv,标}  S_L \sqrt{1+K_z^2} \\ P_{pv} < \frac{3}{2}  \Delta d_{pv,标}  \lambda S_L \sqrt{1+K_z^2} \end{cases}$
c 均匀分布	$\begin{cases} P_{pv} < 2  \Delta U_{pv,标}  S_L \sqrt{1+K_z^2} \\ P_{pv} < 2  \Delta d_{pv,标}  \lambda S_L \sqrt{1+K_z^2} \end{cases}$
d 递减分布	$\begin{cases} P_{pv} < 3  \Delta U_{pv,标}  S_L \sqrt{1+K_z^2} \\ P_{pv} < 3  \Delta d_{pv,标}  \lambda S_L \sqrt{1+K_z^2} \end{cases}$
e 中间大两头小分布	$\begin{cases} P_{pv} < 2  \Delta U_{pv,标}  S_L \sqrt{1+K_z^2} \\ P_{pv} < 2  \Delta d_{pv,标}  \lambda S_L \sqrt{1+K_z^2} \end{cases}$
f 中间小两头大分布	$\begin{cases} P_{pv} < 2  \Delta U_{pv,标}  S_L \sqrt{1+K_z^2} \\ P_{pv} < 2  \Delta d_{pv,标}  \lambda S_L \sqrt{1+K_z^2} \end{cases}$

### 3 实例分析

本节具体分析典型 10 kV 配电网的分布式光伏电源接入的极端容量极限。本文主要是考虑在负荷最轻载的极限情况下所能接入的光伏极限容量。

分析中城市配电网的供电半径按  $L=5\text{ km}$  考虑，农村配电网的供电半径按  $L=15\text{ km}$  考虑。其他供电半径的情形可以参照表 2 中的公式进行计算，在此不再赘述。

大量实际观测结果表明：对于光伏电源，由于天气等原因造成的其输出功率的变化幅度一般不超过其最大输出功率的一半<sup>[17]</sup>，即  $\lambda = 2$ 。

电压偏差和电压波动按照国家电能质量标准限值，即  $\Delta U_{pv,标}$  分别取  $-0.07$  和  $+0.07$ ， $\Delta d_{pv,标}$  取  $0.03$ <sup>[18-19]</sup>。

基于上述数据，分别得到城市配电网和农村配电网的分布式光伏电源的极端容量极限，如表 3 和表 4 所示。

表 3 5 km 供电半径城市配电网的光伏电源极端容量极限  
Table 3 Extreme capacity limitations of photovoltaic devices in urban distribution grids with service radius of 5 km

线型	R/ (Ω/km)	x/ (Ω/km)	分布式光伏接入的极限容量/MVA			
			分布 a	分布 b	分布 c e f	分布 d
LGJ-95	0.3019	0.35	3.974	5.962	7.948	11.922
LGJ-120	0.2364	0.35	5.076	7.614	10.152	15.228
LGJ-150	0.1962	0.35	6.116	9.174	12.232	18.348
LGJ-185	0.1564	0.35	7.672	11.508	15.344	23.016
LGJ-240	0.1209	0.35	9.926	14.890	19.852	29.778
LGJ-300	0.0952	0.35	12.606	18.910	25.212	37.818
YJLV-95	0.32	0.08	3.750	5.626	7.500	11.270
YJLV-120	0.253	0.08	4.744	7.116	9.488	14.232
YJLV-150	0.206	0.08	5.826	8.740	11.652	17.478
YJLV-185	0.164	0.08	7.318	10.978	14.636	21.954
YJLV-240	0.125	0.08	9.600	14.400	19.200	28.800
YJLV-300	0.1	0.08	12.000	18.000	24.000	36.000
YJV-95	0.193	0.08	6.218	9.328	12.436	18.654
YJV-120	0.153	0.08	7.844	11.766	15.688	23.532
YJV-150	0.124	0.08	9.678	14.518	19.356	29.034
YJV-185	0.099	0.08	12.122	18.184	24.244	36.366
YJV-240	0.0754	0.08	15.916	23.874	31.832	47.748
YJV-300	0.0601	0.08	19.966	29.950	39.932	59.898

表 4 15 km 供电半径农村配电网的光伏电源极端容量极限  
Table 4 Extreme capacity limitations of photovoltaic devices in rural distribution grids with service radius of 15 km

线型	r/ (Ω/km)	x/ (Ω/km)	分布式光伏接入的极限容量/MVA			
			分布 a	分布 b	分布 c e f	分布 d
LGJ-95	0.3019	0.35	1.325	1.987	2.649	3.974
LGJ-120	0.2364	0.35	1.692	2.538	3.384	5.076
LGJ-150	0.1962	0.35	2.039	3.058	4.077	6.116
LGJ-185	0.1564	0.35	2.557	3.836	5.115	7.672
LGJ-240	0.1209	0.35	3.309	4.963	6.617	9.926
LGJ-300	0.0952	0.35	4.202	6.303	8.404	12.606
YJLV-95	0.32	0.08	1.250	1.875	2.500	3.757
YJLV-120	0.253	0.08	1.581	2.372	3.163	4.744
YJLV-150	0.206	0.08	1.942	2.913	3.884	5.826
YJLV-185	0.164	0.08	2.439	3.659	4.879	7.318
YJLV-240	0.125	0.08	3.200	4.800	6.400	9.600
YJLV-300	0.1	0.08	4.000	6.000	8.000	12.000
YJV-95	0.193	0.08	2.073	3.109	4.145	6.218
YJV-120	0.153	0.08	2.615	3.922	5.229	7.844
YJV-150	0.124	0.08	3.226	4.839	6.452	9.678
YJV-185	0.099	0.08	4.041	6.061	8.081	12.122
YJV-240	0.0754	0.08	5.305	7.958	10.611	15.916
YJV-300	0.0601	0.08	6.655	9.983	13.311	19.966

## 4 结论

1) 在负荷为 0 的极端情况下, 无论分布式光伏电源接入的分布情况如何, 其在馈线末端所产生的电压波动和电压偏差是最严重的。

2) 分布式光伏电源的极端可接入容量极限是在负荷为 0 的极端情况下, 在由分布式光伏电源引起的电压偏差和电压波动满足要求的前提下, 分布式光伏电源可以接入的容量极限, 比实际情况更加保守和严格。

3) 农村配电网分布式光伏电源的极端可接入容量极限明显低于城市配电网, 反映农村配电网对于分布式光伏电源接入的容量要求更严格。

4) 供电半径越大或导线截面积越小所允许接入的光伏极端可接入容量极限越小, 在分布式光伏沿馈线递减分布下所允许接入的光伏极端可接入容量最大, 而分布式光伏集中馈线末端接入的光伏极端可接入容量最小, 同等导线截面积下电缆线所允许接入的极端可接入容量极限较架空线大。

## 参考文献

- [1] 王振树, 林梅军, 刘岩, 等. 考虑光伏并网的配电网潮流计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 178-185.  
WANG Zhenshu, LIN Meijun, LIU Yan, et al. Power flow algorithm for distribution network with photovoltaic system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 178-185.
- [2] 刘伟, 彭冬, 卜广全, 等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 1-6.  
LIU Wei, PENG Dong, BU Guangquan, et al. A survey on system problems in smart distribution network with grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 1-6.
- [3] HU BO, NONAKA Y, YOKOYAMA R. Influence of large-scale grid-connected photovoltaic system on distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 34-38.
- [4] 冯希科, 邵能灵, 宋凯, 等. DG 容量对配电网电流保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 38(22): 156-165.  
FENG Xike, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Research on the impact of DG capacity on the distribution network current protection and countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2011, 38(22): 156-165.
- [5] 王艳玲, 韩学山, 周晓峰. 含分布式电源的主从联合系统扩展连续潮流计算[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 93-100.  
WANG Yanling, HAN Xueshan, ZHOU Xiaofeng. Expanded continuous power flow calculation of master-slave joint power system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 93-100.
- [6] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56-60.  
WANG Zhiqun, ZHU Shouzhen, ZHOU Shuangxi, et al. Impact of distributed generation on the distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [7] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.  
XU Xiaoyan, HUANG Yuehui, LIU Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146.
- [8] 许林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.  
XU Lin, ZENG Yi, GUO Ke, et al. Development of photovoltaic grid-connected system with power quality regulatory function[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 137-145.
- [9] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-96, 101.  
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-96, 101.
- [10] GB/T 20046-2006 光伏(PV)系统电网接口特性[S].
- [11] IEEE1547-2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S].
- [12] 夏成军, 崔弘, 王强, 等. 考虑静态安全约束的分布式电源准入容量计算[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 96-100.  
XIA Chengjun, CUI Hong, WANG Qiang, et al. Penetration capacity calculation for distributed generation considering static security constraints[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 96-100.
- [13] 连欣乐, 吴政球, 赵柯宇, 等. 计及短路电流约束的分布式电源准入容量的计算[J]. 电力科学与技术学报,

- 2008, 23(1): 50-55.
- LIAN Xinle, WU Zhengqiu, ZHAO Keyu, et al. Maximum penetration capacity calculation for distributed generation taking into account fault current constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(1): 50-55.
- [14] TONKOSKI R, TURCOTTE D, EL-FOULY T H M. Impact of high PV penetration on voltage profiles in residential neighborhoods[J]. IEEE Transactions on Sustain Energy, 3(3): 518-527.
- [15] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.
- CHEN Quan, LI Lingdong, WANG Qunjing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions on of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [16] CONTI S, RAITI S, TINA G, et al. Study of the impact of PV generation on voltage profile in LV distribution networks[C] // 2001 IEEE Porto Power Technology Conference, Porto, Portugal: IEEE, 2001.
- [17] 马胜红, 陆虎俞. 太阳能光伏发电技术[J]. 大众用电, 2006(4): 40-43.
- MA Shenghong, LU Huyu. Photovoltaic generation technology 4: energy storage battery[J]. Popular Utilization of Electricity, 2006(4): 40-43.
- [18] GBT12325-2008 电能质量供电电压偏差[J]. GBT12325-2008 power quality supply voltage deviation[J].
- [19] GBT12326-2008 电能质量电压波动与闪变[J]. GBT12326-2008 power quality voltage fluctuation and flicker[J].
- 
- 收稿日期: 2014-05-15; 修回日期: 2014-08-26
- 作者简介:
- 黄 炜(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网及其自动化技术;
- 刘 健(1967-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 百千万人才工程国家级人选, 国家电网公司科技领军人才, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: powersys@263.net
- 魏昊焜(1986-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化技术。