

DOI: 10.7667/PSPC160704

# 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法

金卓劼, 向铁元, 陈红坤, 陈若男, 陶圆

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 分布式光伏电源由于其自身特点及其出力会随环境因素变化, 接入后容易造成电网的电能质量越限。将在分布式光伏发电接入配电网的规划阶段考虑电能质量问题, 提出一种考虑电能质量问题的分布式光伏发电的规划方法。在确定基于最大接入容量的光伏电源优化配置的接入方案后, 取接入点的电流总谐波畸变率、电压偏差和电压波动作为表征配电网电能质量的特征量, 用数据包络分析的方法评估接入点的电能质量, 对不符合电能质量标准的接入点给出修正方案。最后得到一种电能质量水平达标的分布式光伏发电的规划方案, 并在算例中结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 分布式光伏发电; 配电网规划; 电能质量评估; 随机粒子群算法; 数据包络分析

## Planning method of distributed photovoltaic power generation considering power quality

JIN Zhuoqing, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, CHEN Ruonan, TAO Yuan

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Because the characteristic of distributed photovoltaic and its output varies from environment, it's likely to cause power quality problems after it is accessed to grid. This paper considers power quality problems in distributed PV planning stage in distributed network and introduces a planning method considering power quality problems of distributed photovoltaic power generation. After determining the planning method based on the optimal configuration about maximum allowed capacity of photovoltaic power, this paper selects the total harmonic distortion of access point, voltage deviation and voltage fluctuations as characteristic quantity data of network power quality; and uses envelopment analysis methods to assess power quality levels at access point; aiming at the proposals which do not meet the power quality standards, the correction programs are given. Then a distributed photovoltaic power generation planning program whose power quality meets standard level is proposed. And the effectiveness will be demonstrated in calculation example.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207113).

**Key words:** distributed photovoltaic power generation; distribution network planning; power quality assessment; stochastic particle swarm; data envelopment analysis

## 0 引言

随着智能电网技术的迅速发展, 越来越多的新能源或节能低损的分布式发电设备(DG)接入配电网, 其中分布式光伏电源因其本身受太阳辐射强度的影响, 具有随机性和波动性, 接入后会改变系统的原拓扑结构和潮流, 并对电网的电能质量产生影响<sup>[1-3]</sup>。随着分布式光伏发电在配电网中的渗透率不断上升, 对配电网的电能质量影响严重时会对电网的安全经济运行构成威胁<sup>[4-6]</sup>。因此在含分布式光伏

的电网规划阶段计及电能质量评估是必要的。

传统的含分布式光伏的电网规划通常分为两大类: 一种是在已有配电网中进行 DG 的选址定容规划; 另一种是考虑 DG 的配电网综合扩展规划<sup>[7]</sup>。它们是以电源或电网规划出发点, 确定分布式电源的最佳安装位置和容量, 得到满足电网安全、经济运行的规划方案。传统的含 DG 的电能质量综合评估是在 DG 接入后根据电能质量检测装置采集的数据, 用适当的评估方法计算 DG 接入点的电能质量水平<sup>[8-10]</sup>。传统的研究方法并没有把分布式电源的规划和电能质量评估结合起来。

目前对计及电能质量指标的电网规划已有一些

文献进行了初步研究。文献[11]提出了基于改进层次分析法的电能质量综合评估方法, 综合量化电能质量指标, 得到配电网中单个及所有微网对电能质量影响的综合评估结果。文献[12]针在规划阶段对 DG 接入不同结构微网的配电网, 运用层次分析法进行电能质量评估, 分析了微网中不同种类 DG 以不同方式接入配电网时对电能质量产生的影响。文献[13]在规划分布式光伏接入时首先对配电网电能质量进行评估, 建立了关键特征量健康状况的模糊隶属函数来评价配电网电能质量, 进而给出符合电能质量要求的分布式光伏发电接入方法。

通过总结含分布式光伏发电的电网规划方法以及电能质量综合评估的方法, 在现有研究的基础上, 本文将提出考虑电能质量问题的光伏发电接入规划方法。首先, 对分布式光伏接入配电网进行选址和定容, 在考虑经济性和可靠性的同时使分布式光伏接入电网的容量最大; 接着, 用数据包络分析(Data Envelopment Analysis, DEA)的方法评估各接入点的电能质量, 在规划阶段对接入方案进行电能质量评估, 给出不符合光伏电源接入标准的修正方案; 最后得到电能质量水平良好的分布式光伏接入方案。

## 1 分布式光伏接入配网的电能质量指标

如图 1 所示, 太阳能光伏发电系统由光伏组件、DC-DC、直流汇流母线、逆变器、控制器和检测系统等元件组成。通过光伏阵列将太阳能转化为直流电能, 由 DC-DC 传至直流母线, 经过逆变器, 将 DC 转化为与电网同频、同相的 AC, 然后输入到电网中或直接供给用户使用<sup>[14-16]</sup>。

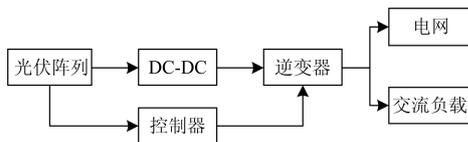


图 1 典型光伏发电系统结构图

Fig. 1 Typical configuration diagram of PV system

由于光伏发电系统本身的结构组成及外界因素的影响, 并网后会对电网产生电能质量问题。光伏逆变器采用了大量的电力电子装置, 在并网后不可避免地给电网注入大量的谐波<sup>[17]</sup>。由于温度、光照等外界因素具有波动性和间歇性, 光伏逆变器的输出功率也会随之呈现出相对应的波动性和间歇性, 会引起光伏发电系统并入电网产生电压波动和闪变<sup>[18]</sup>。分布式光伏发电系统工作在单位功率因数模式下时, 接入配电网后对该支路的电压会起到抬升作用, 当其接入容量较大时, 可能会给配电网带来

电压越限的问题<sup>[19]</sup>。

当单相光伏电源大量接入系统时, 会带来电压三相不平衡的问题<sup>[19]</sup>。目前, 单相光伏发电还未大规模应用, 因而对电网电压三相不平衡度的影响较小。

综上所述, 本文将总谐波电流畸变率、电压偏差、电压波动 3 项指标作为分布式光伏电源接入电网时的主要电能质量评估指标。

### 1.1 总电流谐波畸变率

光伏逆变器中含有的大量电力电子元器件, 在逆变过程中会产生谐波, 对电网造成谐波污染。因此在光伏电源接入后, 需降低该线路电流谐波总含量。

流经用电负荷的基波电流等于电网的基波电流和逆变器输出的基波电流之和。当用电负荷不变时, 电流高次谐波不变, 配电网基波电流减小, 接入点处的总电流谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)变大。随着接入容量的增大, 配电网总电流谐波畸变率可能会超过并网规定的标准限值。并网前总电流谐波畸变率为

$$T_{\text{HDI}} = \left( \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2} / I_1 \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $I_1$  为基波电流;  $I_h$  为高次谐波电流。并网后总电流谐波畸变率  $T_{\text{HDI}_a}$  为

$$T_{\text{HDI}_a} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1 - I_{\text{PV}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $I_{\text{PV}}$  为光伏电源向配电网注入的基波电流。

由式(1)和式(2)可知

$$T_{\text{HDI}_a} = \frac{I_1}{I_1 - I_{\text{PV}}} T_{\text{HDI}} \quad (3)$$

### 1.2 电压偏差

根据国标 GB/T 12325-2008 对电压偏差的定义, 系统在正常运行方式下, 某一节点的实际电压与系统标称电压之差对系统标称电压的百分数称为该节点的电压偏差。其数学表达式为

$$\delta U = \frac{|U_{\text{re}} - U_{\text{N}}|}{U_{\text{N}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $U_{\text{re}}$  表示节点实际电压;  $U_{\text{N}}$  为系统标准电压。

### 1.3 电压波动

由于分布式光伏发电的输出功率会随光照温度变化而变化, 接入配电网后在接入点处引起的电压波动  $\Delta d$  为

$$\Delta d = \frac{\Delta I Z}{U_N} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $U_N$  为额定电压;  $\Delta I$  为接入点处随输出功率变化引起的电流变化;  $Z$  为在接入点处看二端口网络配电网的等效阻抗。假设光伏电源均处于单位功率因数的工作模式下, 则式(5)可写成

$$d = \frac{\Delta P_{PV}}{U_{PCC}} \frac{U_N}{S_d} \cos \varphi \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $\Delta P_{PV}$  为分布式光伏发电有功功率输出的变化值;  $S_d$  为接入点处的系统短路容量;  $\varphi$  为电网阻抗角。

由于电力电子器件的过流能力限制, 分布式光伏电源接入后, 接入点处的系统短路容量变化不大。理想的分布式电源处于单位功率因数工作模式下, 并网后不会改变系统阻抗。因此, 电压波动主要与分布式光伏发电的输出功率变化有关。

## 2 考虑电能质量指标问题的分布式光伏接入评估

### 2.1 基于数据包络分析的电能质量综合评估方法

数据包络分析是对相同类型的多指标投入和多指标产出进行相对效率评估的一种综合评估方法<sup>[20-21]</sup>。该方法由各个决策单元(Decision Making Units, DMU)的实际数据确定输入和输出变量的最优权重, 从最有利于决策单元的角度进行评估, 可以避免主观因素的影响; 并且, 不必确定输入和输出的显示表达式, 简化了输入指标和输出指标内化关系, 在输入指标和输出指标关系复杂、不易确定的情况下, 可以体现出其明显的优越性。

#### 2.1.1 C<sup>2</sup>R 模型

C<sup>2</sup>R 模型是最基本的 DEA 模型。假设有  $n$  个评价对象, 每个 DMU 有  $m$  种类型的输入指标,  $q$  种类型的输出指标。构造以下 C<sup>2</sup>R 模型。

$$w_j = \frac{\sum_{r=1}^s v_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m u_i x_{ij}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{r=1}^s v_r x_{rj} / \sum_{i=1}^m u_i y_{ij} \leq 1 \\ u_r \geq 0 \quad i=1,2,\dots,n; \quad v_i \geq 0 \quad r=1,2,\dots,m \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $w_j$  为相对生产效率;  $u_r$  表示第  $r$  种类型投入的权重( $i=1,2,\dots,m$ );  $v_i$  表示第  $i$  种类型产出的权重( $j=1,2,\dots,n$ );  $x_{ij}$  表示第  $j$  个 DMU 中第  $i$  种类型投入的输入指标;  $y_{ij}$  表示第  $j$  个 DMU 中第  $r$  种

类型产出的输出指标( $r=1,2,\dots,q$ )。

选择合理的输入权重向量  $v_i$  和输出权重向量  $u_r$ , 使得  $w_j \leq 1$ 。当  $w_j = 1$  时, 则认为第  $j$  个 DMU 相对最有效。

#### 2.1.2 Charnes-Cooper 变换

由于 C<sup>2</sup>R 模型求解困难, 利用 Charnes-Cooper 变换, 把分式规划转化为等价的线性规划问题, 利用对偶理论, 得到对偶模型<sup>[22]</sup>。

对式(8)进行 Charnes-Cooper 变换, 得到等价线性规划形式的模型如式(9)。

$$\begin{cases} \min [\theta - \varepsilon (\hat{e}^T s^- + \hat{e}'^T s^+)] \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j + s^- = \theta x_0; \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j + s^+ = y_0 \\ \lambda_j \geq 0, j=1,2,\dots,m; \quad s^- \geq 0, s^+ \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $x_j$  和  $y_j$  分别表示第  $j$  个 DMU 的“输入”和“输出”;  $s^- = (s_1^-, s_2^-, \dots, s_m^-)^T$ ,  $s^+ = (s_1^+, s_2^+, \dots, s_q^+)^T$  是松弛变量;  $\lambda_j$  表示 DMU <sub>$j_0$</sub>  的权重;  $\theta$  是第  $j$  个 DMU 的效率值;  $\varepsilon$  实际中一般取  $\varepsilon = 10^{-7}$ ;  $\hat{e}^T = (1, 1, \dots, 1) \in R_m$ ,  $\hat{e}'^T = (1, 1, \dots, 1) \in R_s$  均用来调节松弛变量。

### 2.2 基于最大接入容量的光伏发电优化配置模型

#### 2.2.1 目标函数

本文选取待规划地区分布式光伏发电接入容量最大作为目标函数

$$f_{\max} = \max \sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} \quad (10)$$

其中:  $n_{DG}$  为待选光伏发电接入节点集合;  $P_{DG_i}$  为第  $i$  个接入点的光伏电源有功功率。

#### 2.2.2 约束条件

##### 1) 潮流约束方程

为确保配电网安全、稳定的运行, 潮流分布需满足潮流约束方程:

$$P_{i+1} = P_i - R_{i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{i-1}^2} - P_{li} + P_{DG_i} \quad (11)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - X_{i+1} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{i-1}^2} - Q_{li} + Q_{DG_i} \quad (12)$$

$$U_{i+1}^2 = U_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i) + (R_i^2 + X_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{i-1}^2} \quad (13)$$

##### 2) 不等式约束

本文除了考虑网损约束, 还将考虑支路功率约束和系统旋转备用约束, 以保证电网运行的安全稳

定, 并留出更大的电量裕度<sup>[23-25]</sup>。

$$\begin{cases} |P_i| \leq P_{L,max} \\ \max\{P_{DG_i}\} \leq P_{s,max} - P_s \\ L_{DG} < \varepsilon_1 \times L_{dis} \\ P_{loss,DG} \leq \varepsilon_2 \times P_{loss,dis} \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $U_N$  为节点额定电压;  $L_{DG}$ 、 $L_{dis}$  分别为分布式光伏电源接入配电网前后的电压水平指标;  $P_{loss,DG}$ 、 $P_{loss,dis}$  分别为分布式光伏电源接入配电网前后的有功损耗;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  介于 0 和 1 之间;  $P_i$ 、 $P_{L,max}$  分别为配电网各支路实际的有功功率和最大的有功功率限值;  $P_s$  为分布式光伏发电注入配电网的实际功率;  $P_{s,max}$  为分布式光伏发电注入配电网的最大功率。

### 2.3 考虑电能质量约束的分布式光伏发电接入方法

#### 2.3.1 分布式光伏电源规划方案的电能质量评估

对电能质量进行评估首先需要对其进行分级, 等级的划分很多种, 其中 IEC61000 国际标准分为三级。国内的文献主要分为 3、5、7、9、10 等级, 各等级区间按照均分或者不同百分比进行设定。本文将电能质量指标的评估等级分为 5 级, 评估等级为 Q, 从 Q1-Q5 依次递减: 优质、良好、一般、合格、不合格。

分别用  $X1$ ,  $X2$ ,  $X3$  表示本文选取的评估指标: 总电流谐波畸变率、电压偏差、电压波动。根据 GBT 29319-20112 的标准, 分布式光伏发电接入后总电流谐波畸变率应  $\leq 5\%$ <sup>[26-27]</sup>。10 kV 配电网电压波动应  $\leq 3\%U_N$ <sup>[28]</sup>。电压偏差取绝对值  $\leq 7\%$ <sup>[29]</sup>。根据国标的标准上限均分等级区间, 具体分级标准如表 1。

本文用 DEA 的电能质量评估方法, 以电能质量各指标作为投入, 评估等级作为输出, 建立 DMU。DMU 形式为( $X1, X2, X3, Q$ )。将表 1 中的每个等级区间的中位数与评估等级作为单个决策单元, 分级标准决策单元的数据如表 2。表 1 中的电能质量指标等级标准和表 2 中的分级标准的 DMU 一起作为总决策单元, 进行 DEA 有效性评估。

表 1 电能质量指标等级划分

Table 1 Classification of power quality indicators

评估等级	评估指标		
	$X1$	$X2$	$X3$
Q1	[0,1.25%]	[0,1.75%]	[0,0.75%]
Q2	[1.25%,2.5%]	[1.75%,3.5%]	[0.75%,1.5%]
Q3	[2.5%,3.75%]	[3.5%,5.25%]	[1.5%,2.25%]
Q4	[3.75%,5%]	[5.25%,7%]	[2.25%,3%]
Q5	[5%,30%]	[7%,30%]	[3%,30%]

表 2 分级标准决策单元

Table 2 Grading decision unit

DMU	投入指标			输出指标
	$X1$	$X2$	$X3$	Q
DMU1	0.625%	0.875%	0.375%	1
DMU2	1.875%	2.625%	1.125%	2
DMU3	3.125%	4.375%	1.875%	3
DMU4	4.375%	6.125%	2.625%	4
DMU5	17.5%	18.5%	16.5%	5

#### 2.3.2 考虑电能质量约束的分布式光伏规划流程

假设待规划地区的光伏资源相似, 即日照温度等情况相差不大。各光伏电源的有功出力在同一天内的变化相同, 其大小跟接入容量大小成正比。

首先, 对待规划地区进行潮流分析计算, 根据待规划地区的光伏发展需求, 选择符合电压偏差要求的可接入点, 确定  $n_{DG}$  的集合; 接着, 按照基于最大准入容量的光伏电源优化配置模型, 本文采用随机粒子群算法计算出光伏电源接入配网的接入点和接入容量; 最后用数据包络分析(DEA)的电能质量评估方法对接入方案中的各接入点进行电能质量评估, 如果接入方案中有接入点的电能质量评估指标在第 5 级, 则给出修正方案, 最后给出电能质量水平良好的分布式光伏电源接入的规划方案。规划流程图如图 2 所示。

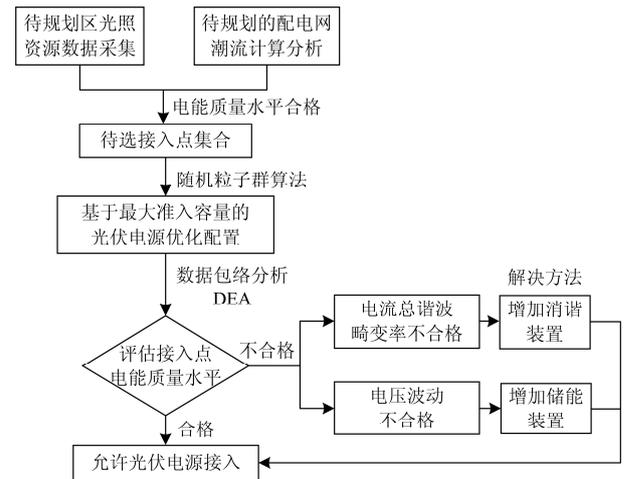


图 2 光伏发电规划方法

Fig. 2 PV placement method

### 3 算例分析

本文采用 IEEE-33 节点标准配电网作为算例, 配电网的结构如图 3。为了防止潮流倒送, 本文规定各待选节点接入的 DG 容量至少为 0.1 MW, 并低于该节点负荷。该规划方案规定  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  为 0.7。对系统进行潮流计算后, 选定待选接入节点集合为 {4, 5,

6, 7, 8, 24, 25, 26, 27, 28}。采用随机权重粒子群算法, 取种群规模为 80,  $\mu_{\min} = 0.5, \mu_{\max} = 0.8, \sigma = 0.2$ , 对 2.2 节中的优化配置模型进行求解, 得到优化配置结果如表 3, 总接入的容量为 1.36 MW。接入前后系统的潮流计算结果对比如表 4。

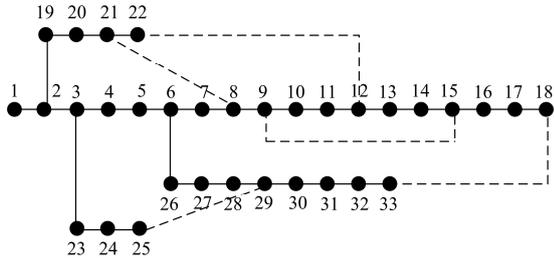


图 3 IEEE-33 节点配电系统

Fig. 3 Result of distributed PV power optimization

表 3 分布式光伏电源优化配置结果

Table 3 Result of distributed PV power optimization

节点编号	$P_{dg}/MW$	节点编号	$P_{dg}/MW$
4	0.1	24	0.4
5	0	25	0.4
6	0	26	0.05
7	0.18	27	0.05
8	0.18	28	0

表 4 分布式光伏电源接入前后的节点电压

Table 4 Node voltage of distributed PV before and after access

电压偏差大于 7% 的点集合	
接入前	{10,11,12,13,14,15,16,17,18,29,31,32,33}
接入后	{16,17,18,32,33}

选用大中型逆变器的谐波参数, 根据春秋季节的光照角度变化预测光伏一天内的有功功率输出如图 4。按式(1)一式(6)分别计算接入节点在当日的电能质量各项质量指标, 分别计算各项指标的平均值, 结果如表 5。在该天内总谐波电流畸变率、电压偏差、电压波动的变化图如图 5—图 7。

表 5 电能质量各指标数据

Table 5 Power quality indexes data

接入点	电能质量指标		
	$X1$	$X2$	$X3$
4	3.340%	2.075%	0.118%
7	4.008%	4.753%	0.198%
8	4.359%	5.191%	0.215%
24	5.200%	2.054%	0.208%
25	5.391%	2.258%	0.247%
26	2.489%	4.608%	0.193%
27	2.691%	4.856%	0.198%

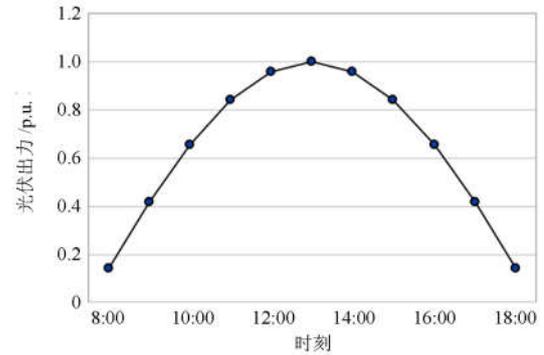


图 4 光伏电源在某日的有功功率输出

Fig. 4 Photovoltaic power active output within a day

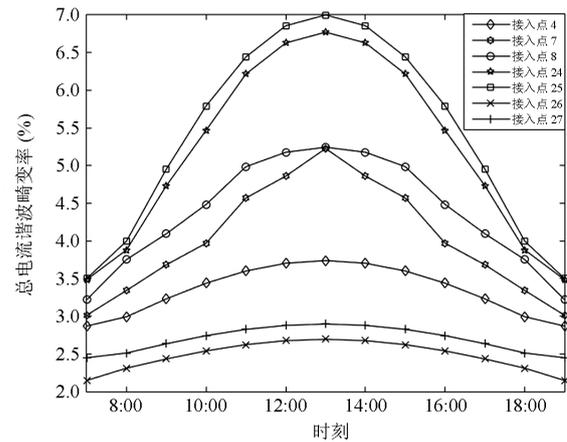


图 5 各接入点一天内的总谐波电流畸变率

Fig. 5 Total harmonic current distortion rate of each access point within a day

将各接入点的电能质量指标相对于各个等级的效率值分别与决策单元做差, 记为  $\delta_{Q_i}$ , 取  $\delta_{Q_i}$  的绝对值最小的等级为评估等级。数据包络分析方法计算出来的各接入点的电能质量评估结果如表 6 所示。

表 6 各决策单元与标准单元综合有效率接近度

Table 6 DMUs and standard cell integrated efficient proximity

接入点	$\delta_{Q1}$	$\delta_{Q2}$	$\delta_{Q3}$	$\delta_{Q4}$	$\delta_{Q5}$	评估等级
4	-0.679	-0.186	0.073	0.298	0.816	3
7	-0.729	-0.287	-0.078	0.096	0.578	3
8	-0.741	-0.310	-0.114	0.049	0.518	4
24	-0.679	-0.186	0.073	0.298	0.816	3
25	-0.696	-0.221	0.020	0.227	0.741	3
26	-0.679	-0.186	0.073	0.298	0.816	3
27	-0.689	-0.207	0.041	0.256	0.777	3

由表 4 的对比可以看出, 未接入分布式光伏电源前, 配电网的整体电压水平较差, 有较多节点的

电压与标准电压之间的偏差 $>7\%$ 。本文为保证在光伏电源出力最小时，接入点的电压偏差能满足光伏电源接入配电网  $7\%$  以内的标准，以此来确定待选接入点的集合，进而进行光伏电源的优化配置。由表 4 分析可以看出接入分布式光伏电源后，配电网整体电压水平有大幅度的提高。

用数据包络分析的方法对各接入点进行电能质量评估的结果，由图 6、图 7 分析可知，接入点的电压偏差和电压波动值都在国标规定的范围内。由图 5 分析可知，接入点 24、25 号点因接入容量随光照强度的增大而增大时，会出现总谐波畸变率超标的情况。可在接入点 24、25 号增加消谐装置以抑制谐波。除了 8 号接入点的电能质量评估等级是 4 级偏差的水平，大多接入等级都在 3 级中等的水平，没有接入点的评估等级是 5 级不合格，说明该接入方案可行，接入点的各项指标都能达到规定的标准。

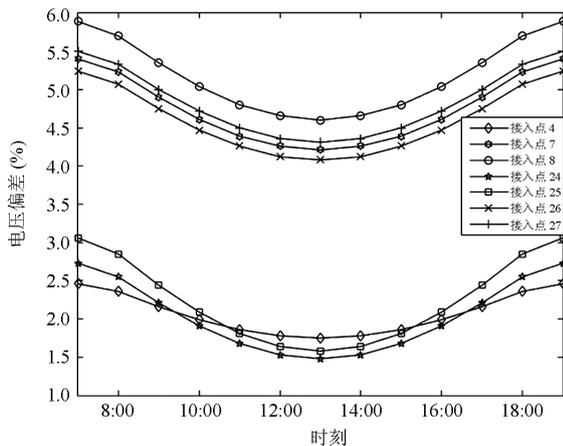


图 6 各接入点一天内的电压偏差

Fig. 6 Voltage deviation of each access point within a day

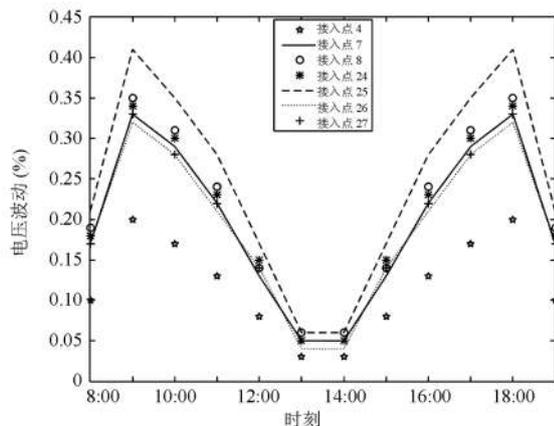


图 7 各接入点一天内的电压波动

Fig. 7 Voltage fluctuation of each access point within a day

## 4 结论

本文提出的考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法，在规划阶段对接入方案预先进行电能质量评估，针对不满足光伏接入标准的接入方案进行修正，从而得到电能质量水平较好的接入方案。在研究过程中得到如下结论。

1) 分布式光伏电源接入配电网后整体抬升了电网的电压水平。如果待规划的配电网电压水平偏低，在选择接入点时尽量选择电压水平较好的点，使光伏电源接入后在弱光照的情况下也能正常的工作。

2) 由于光伏电源接入配电网后会带来大量电力电子原件，会向电网注入大量谐波，从而使电网的电流电压谐波含有率上升。因此，当配电网在接入容量较大的光伏电源后可能使配电网的总电流谐波畸变率超标，如果接入前配电网的谐波水平良好，则可在接入时加入消谐装置以抑制谐波；如果接入前接入点的配电网谐波水平很差，则需要重新选择接入点，按照图 2 的规划流程重新制定分布式光伏发电接入的规划方案。

## 参考文献

[1] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.  
 CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.

[2] 黄冬冬, 吴在军, 窦晓波, 等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 107-112.  
 HUANG Dongdong, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A power quality composite control strategy based on large-scale grid-connected photovoltaic power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 107-112.

[3] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 69-74.  
 YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, et al. A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regulatory systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 69-74.

[4] 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): 26-39.
- 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): 26-39.
- [5] SARA E, GERALD T, VIJAY V, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 317-325.
- [6] TAN Sicong, XU Jianxin, SANJIB K. Optimization of distribution network incorporating distributed generators: an integrated approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2421-2432.
- [7] 苏小玲, 韩民晓, 赵正奎, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 87-92.
- SU Xiaoling, HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, et al. Research on maximum capacity of grid-connected distributed generation in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 87-92.
- [8] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 43(2): 138-147.
- ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 43(2): 138-147.
- [9] 付学谦, 陈皓勇, 刘国特, 等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4270-4276.
- FU Xueqian, CHEN Haoyong, LIU Guote, et al. Power quality comprehensive evaluation method for distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4270-4276.
- [10] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 一种考虑排序稳定分析的电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 70-76.
- LIU Junhua, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. A new method for power quality comprehensive evaluation considering the analysis of sequence stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 70-76.
- [11] 阎鼎, 龙禹, 程浩忠, 等. 规划阶段含微网的配电网电能质量评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 9-15.
- YAN Ding, LONG Yu, CHENG Haozhong, et al. Power quality assessment for distribution network incorporation micro-grid in planning stage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 9-15.
- [12] 何吉彪, 程浩忠. 含微网配电网规划中的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 209-214.
- HE Jibiao, CHENG Haozhong. Comprehensive power quality assessment on distribution network planning containing micro-grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 209-214.
- [13] 左伟杰, 马钊, 周莉梅, 等. 基于配电网电能质量健康评估策略的分布式光伏接入方法[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3442-3448.
- ZUO Weijie, MA Zhao, ZHOU Limei, et al. Access method of grid-connected photovoltaic generation based on distribution network health evaluation strategy[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3442-3448.
- [14] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [15] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-131.
- YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-131.
- [16] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [17] 李海英, 闵建平. 兼顾分布式光伏发电系统特征的电能质量评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 31-36.
- LI Haiying, MIN Jianping. Power quality assessment considering characteristics of distributed generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 31-36.
- [18] WU Yuankang, LEE Chingyin, LIU Lechang, et al. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2029-2036.
- [19] 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.

- [20] 王宗耀, 范莉, 苏浩益. 基于区间数理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 41-50.  
WANG Zongyao, FAN Li, SU Haoyi. A comprehensive power quality evaluation model based on interval number theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 41-50.
- [21] 冯增哲, 刘建波, 刘桂娟. 基于 DEA 法的社区医疗资源配置效率研究[J]. 中国医学装备, 2007, 4(7): 9-11.  
FENG Zengzhe, LIU Jianbo, LIU Guijuan. Research on the collocation efficiency of community medical resource based on DEA[J]. China Medical Equipment, 2007, 4(7): 9-11.
- [22] 柴鹏飞. 电能质量综合评估方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.  
CHAI Pengfei. Research on power quality comprehensive assessment method[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [23] 欧阳聪, 刘明波. 考虑网络传输约束的并网光伏发电消纳容量计算[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 17-23.  
OUYANG Cong, LIU Mingbo. Computing of accommodation capacity of grid-integrated photovoltaic generation considering network's transmission constraints[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 17-23.
- [24] 张雷, 李鸿, 韩聪. 一种含光伏储能与电动汽车的节点功率电压控制策略[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 20-23, 27.  
ZHANG Lei, LI Hong, HAN Cong. Control strategy for node power-voltage considering PV energy storage and EV charging[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 20-23, 27.
- [25] 耿晓娜, 刘伟东, 范振亚. 光伏电源与电动汽车充电站在配电网中的选址定容[J]. 陕西电力, 2015, 43(10): 24-29.  
GENG Xiaona, LIU Weidong, FAN Zhenya. Locating and sizing of photovoltaic power and electric vehicle charging stations in distribution network[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(10): 24-29.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会. GBT 29319—2012 光伏发电系统接入配电网技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会. GBT 24337—2009 电能质量公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会. GBT 12326—2008 电压波动和闪变[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会. GBT 12325—2008 电能质量供电电压偏差[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

收稿日期: 2016-05-16; 修回日期: 2016-08-27

作者简介:

金卓劼(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: kim19920610@163.com

向铁元(1992-), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: xty01@163.com

陈红坤(1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统及其自动化. E-mail: chenhongkun@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)