

DOI: 10.7667/PSPC170594

# 监测点优化配置下考虑谐波约束的多节点分布式 光伏最大配置方案研究

任明珠<sup>1</sup>, 管晟超<sup>2</sup>, 谭佳<sup>1</sup>, 孙诗航<sup>3</sup>, 程浩忠<sup>4</sup>

(1. 国网上海青浦供电公司, 上海 201799; 2. 国网台州供电公司, 浙江 台州 318000; 3. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 4. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 随着中国分布式光伏渗透率不断提高, 其对配电网谐波的影响也越发严重。通过研究系统中谐波监测点的最佳配置, 并以对谐波监测点处谐波影响最小为目标提出了多节点的分布式光伏配置方法, 从而降低分布式光伏对配电网谐波影响。首先根据单节点接入分布式光伏发电(Distributed Photovoltaic Generation, DG)达到极限时全网其余各节点是否可观测到该节点产生的谐波, 定义了谐波监测范围, 进而利用敏感因子法以监测点数量少和监测范围全覆盖为目标, 计算了谐波监测点的最佳配置方案。此后, 以监测点谐波含量最少及系统光伏最大消纳为目标, 使用粒子群算法计算得到了分布式光伏配置方案。通过上海某配电系统算例, 验证了方案的有效性。

**关键词:** 分布式光伏; 谐波监测; 最大准入容量; 粒子群算法

## Configuration analysis of multi-node distributed photovoltaic generation considering harmonic constraints under optimal monitoring program

REN Mingzhu<sup>1</sup>, GUAN Shengchao<sup>2</sup>, TAN Jia<sup>1</sup>, SUN Shihang<sup>3</sup>, CHENG Haozhong<sup>4</sup>

(1. State Grid Shanghai Qingpu Electric Power Supply Company, Shanghai 201799, China; 2. State Grid Taizhou Power Supply Company, Taizhou 318000, China; 3. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 4. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** With the increasing penetration of distributed PV generation, its influence on harmonic of distribution network is becoming more and more serious. The optimal configuration of harmonic monitoring program is studied, and a multi node distributed photovoltaic allocation method is proposed to minimize harmonic contents of harmonic monitoring points, which reduces the influence of distributed PV on the harmonic of distribution network. First, the Monitor Reach Area (MRA) is defined according to the result whether the monitor point can observe harmonics generated by the single DG node when its capacity get to the penetration limit. Then the optimal monitor point configuration is calculated with the purpose of getting the less monitor point number and the larger MRAs. At last, a distributed PV configuration scheme is proposed using particle swarm optimization algorithm to reduce the PV harmonic and get the maximum PV penetration in the system. The performance of the scheme is illustrated in a distribution network in Shanghai, and the result implies the effectiveness of the method proposed.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2014CB23903).

**Key words:** distributed photovoltaic generation; harmonic monitor; maximum penetrating capacity; particle swarm optimization algorithm

## 0 引言

随着当前世界范围内对清洁可再生能源应用的

倡导, 分布式光伏发电(Distributed Photovoltaic Generation, DG)因为其资源丰富、不受地域限制等因素, 易于在城市范围内推广, 成为中国重点发展对象之一。但是, 由于光伏设备的核心器件逆变器属于非线性设备, 工作中会产生一定的谐波污染, 随着配电网中光伏渗透率的提升, 光伏设备的输出

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目资助(973项目)(2014CB23903)

特性对电网电能质量的影响也日渐突出。谐波、电压偏差等电能质量问题日益严重,可能会对电网系统的运行造成巨大危害,需要从多个角度入手,减少谐波对电网的影响。

为了降低谐波对电网系统的影响,降低损失,一方面可以通过建立完备的监测系统,及时发现谐波源并使用适当的辅助措施,降低谐波水平,文献[1-5]即从上述角度展开了相应的研究,此类办法均属于谐波产生后的补偿纠正;另一方面可以在 DG 规划阶段对接入的 DG 位置及容量进行合理约束,从源头上降低谐波发生水平,但此种方式仍需提前考虑系统中谐波源的定位。因此研究谐波监测及 DG 配置就成了两个重要环节。文献[6-7]通过支持向量机方法对谐波源定位,并结合敏感因子选取了监测点。文献[8]通过回归估计的方法,研究了多谐波源对固定节点的影响。对于 DG 接入容量的研究,文献[9]通过多种 DG 场景,分析了不同 DG 接入量及分散程度对配电网谐波含量的影响。文献[10]分析了 DG 的不同接入位置及接入容量对谐波畸变率的影响。文献[11]利用 PSCAD 时域仿真,探究了多个谐波源对电网的影响过程。然而,当前的研究仍存在不足之处。首先,当前研究对于监测点位置的优选、监测范围的覆盖程度以及监测点的成本等内容涉及较少。加之当前的研究主要通过设定几个特定场景,分析 DG 的接入位置、分散程度及接入容量对系统谐波的影响。此外,当前研究中对功率传输极限考虑较少,对系统实际消纳 DG 的能力分析不足,需要进一步改进。

本文首先分析了不同节点 DG 消纳最大时的谐波监测范围,以监测全覆盖和监测点数量最少为目标,并基于敏感因子法给出了最佳监测点配置。此后,根据已确定的监测点位置,以监测点谐波含量较少为目标,建立了 DG 最大准入容量计算模型,利用粒子群算法求解,为 DG 及相关监测点的配置提供了参考。

## 1 DG 出力与谐波特性

### 1.1 DG 的谐波特性

DG 主要通过光伏电池吸收太阳能转换成直流电,并通过逆变器、变压器等器件将电能送入电网。逆变器是整个 DG 系统中非常重要的环节,但是其含有大量的电力电子器件,在运行过程中会对电网造成谐波污染<sup>[12]</sup>。

逆变器产生的谐波大小主要跟 DG 出力有关。此外,当逆变器轻载,输出功率在额定功率的 20% 以下时,其谐波含量也会增大。图 1 为某光伏设备

逆变器在一个晴天典型日内的负载变化情况。从图中可以看出,在光伏系统工作时间段 6:00—18:00,逆变器的负载率在大部分时间段均超过了 20%。因此,为研究 DG 对系统谐波的影响,可以测量峰值时间段内的逆变器出口谐波含量。该光伏设备在峰值时间段内的谐波电流含量如表 1 所示。

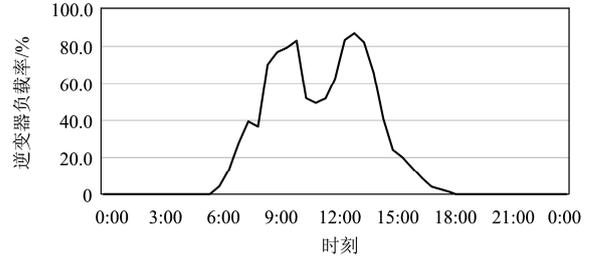


图 1 10 kV 并网光伏逆变器日负载曲线

Fig. 1 Daily load curve of PV inverter in 10 kV distribution network

表 1 10 kV 并网光伏谐波电流含量

Table 1 Harmonic current content of PV in 10 kV

distribution network

谐波次数	2	3	4	5	6	7
含量/%	1.68	0.55	1.05	1.12	0.84	1.05
谐波次数	8	9	10	11	12	13
含量/%	1.36	0.12	0.11	1.38	0	0.14
谐波次数	14	15	16	17	18	19
含量/%	0.1	0.2	0.11	0.38	0	0.11
谐波次数	20	21	22	23	24	25
含量/%	0	0	0	0.11	0	0

逆变器对第  $h$  次谐波的影响可以通过谐波潮流进行分析<sup>[13]</sup>,节点电压方程为

$$\mathbf{I}_h = \mathbf{Y}_h \mathbf{U}_h \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{I}_h$  表示第  $h$  次的谐波电流注入量;  $\mathbf{Y}_h$  为第  $h$  次的节点导纳矩阵;  $\mathbf{U}_h = [\mathbf{U}_{h1}, \mathbf{U}_{h2}, \dots, \mathbf{U}_{hm}]^T$  表示各个节点第  $h$  次的谐波电压。基于各节点各次谐波电压,可以根据文献[14]计算得到节点  $i$  的谐波电压含有率  $H_{i,h}$  和总谐波畸变率  $T_{i,u}$ 。

### 1.2 谐波影响下的 DG 消纳能力

为了保障系统的安全稳定运行,需要研究 DG 的消纳能力,综合考虑线路容量、系统谐波水平等因素计算各个接入方案的最大准入容量。其目标函数为

$$\max \sum_{i=1}^N P_{DG,i} \quad (2)$$

式中:  $P_{DG,i}$  表示第  $i$  个节点的 DG 有功出力;  $N$  为安装 DG 的节点总数。

此外, DG 接入容量还需要满足以下几个约束

条件。

### 1) 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = P_{DG,i} - P_{D,i} \\ U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = Q_{DG,i} - Q_{D,i} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{DG,i}$  和  $Q_{DG,i}$  分别表示节点  $i$  接入 DG 的有功和无功出力;  $P_{D,i}$  和  $Q_{D,i}$  分别表示节点  $i$  的有功和无功负荷;  $U_i$  和  $U_j$  表示节点  $i$  和  $j$  的电压幅值;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  的电压相角。

### 2) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (4)$$

式中:  $U_{\min}$  和  $U_{\max}$  分别表示节点电压允许的最小和最大限值。根据 GB/T 12325—2008《电能质量供电电压偏差》要求, 10 kV 配电系统限值分别为 0.93 p.u. 和 1.07 p.u.。

### 3) 传输功率约束

$$S_{\text{trans}} \leq S_{\text{trans,max}} \quad (5)$$

$$S_{l,ij} \leq S_{l,max} \quad (6)$$

式中:  $S_{\text{trans}}$  和  $S_{\text{trans,max}}$  分别表示配电线路与母线交换的功率及其限值;  $S_{l,ij}$  和  $S_{l,max}$  分别表示连接节点  $i$  和  $j$  线路的传输功率及其限值。式(5)保证 DG 的接入不会造成上级变压器的功率倒送, 限值大小根据同母线其他配电线路的负荷大小决定。式(6)保证了配电线路中的各条支路不会因为传输功率过大造成损坏。

### 4) 谐波约束

$$T_{i,u} \leq T_{u,max} \quad (7)$$

$$H_{i,h} \leq H_{h,max} \quad (8)$$

$$I_{\text{PCC}}^h \leq I_{\text{PCC,max}}^h \quad (9)$$

式中:  $T_{i,u}$  和  $T_{u,max}$  分别表示节点  $i$  的总谐波畸变率及其限值;  $H_{i,h}$  和  $H_{h,max}$  分别表示节点  $i$  第  $h$  次谐波含量及其限值;  $I_{\text{PCC}}^h$  和  $I_{\text{PCC,max}}^h$  分别表示公共连接点各次谐波注入电流及其限值。这三项约束指标需要根据接入的 DG 容量及接入位置进行换算, 并通过 1.1 节中介绍的谐波潮流计算得出。各个限值的大小及换算方法参考文献[14]。

## 1.3 谐波可监测范围

可监测范围定义为系统发生故障时监测点能观测到的故障点区域<sup>[15]</sup>。谐波监测点的配置需要考虑配置点的可监测范围, 合理配置监测点位置, 使全网均处于监测范围内, 可有效地发现谐波源位置, 及时进行补偿处理。

本文根据配电线路中各个节点接入的 DG 达到最大准入容量时, 对应的各节点谐波电压畸变率来确定监测点的可监测范围。根据文献[14]一般测量用的 B 级仪器的允许误差为  $0.15\%U_N$ , 在考虑仪器精确度情况下, 谐波畸变率阈值需要超过  $0.3\%U_N$ 。当有谐波源接入电网时, 其对监测点产生的谐波电压畸变率超过阈值时, 谐波接入点才处于该监测点的可监测范围内。

## 2 谐波监测点配置

### 2.1 监测点配置模型

谐波监测设备要求精度较高, 相应的成本也较高, 加之过多设备的接入会使谐波监测系统的故障率增加, 降低监测的可靠性。因此, 系统谐波监测点的配置应以监测点数目最小为目标。此外, 为了保证监测的完整性, 各个监测点的综合可监测范围应包含系统所有节点。

对于一个  $N$  节点配电系统, 设定  $N$  维状态向量  $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$  表示监测点配置情况<sup>[16]</sup>, 其中

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 配置监测点} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 不配置监测点} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

谐波监测点的可监测性通过可监测矩阵  $\mathbf{M}_p$  来表示, 元素  $M_p(i, j)$  表示第  $i$  个节点设置的监测点是否能观测到第  $j$  个节点的谐波情况, 其中

$$M_p(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{可以观测到 } j \text{ 节点} \\ 0 & \text{不可以观测到 } j \text{ 节点} \end{cases} \quad (11)$$

基于状态向量及可监测矩阵, 可以构建最优化模型如下。

目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^N X_i \quad (12)$$

约束条件为

$$\min \{\mathbf{M}_p^T \mathbf{X}\} > 0 \quad (13)$$

式中, 列向量  $\mathbf{M}_p^T \mathbf{X}$  表示的是各个节点可以被多少监测点观测到, 配置方案中需要所有节点均能被观测到, 即该向量中的元素均大于 0。通过求解该模型, 最终可得到谐波监测点的最优配置。

### 2.2 谐波的敏感因子

为了选取监测范围较广的谐波监测点, 加速计算过程, 可以通过谐波的敏感因子进行计算和筛选<sup>[17]</sup>。式(1)经过变换有

$$U_{hi} = \sum_{j=1}^N Z_{h,ij} I_{hj} \approx \sum_{j=1}^N Z_{h,ij} y_{shj} U_{hj} \quad (14)$$

式中： $Z_{h,ij}$  为  $h$  次谐波阻抗矩阵中的元素； $y_{sh,j}$  为节点  $j$  的  $h$  次谐波短路阻抗。则节点  $i$  随节点  $j$  谐波电压变化的敏感因子为

$$\frac{\partial U_{hi}}{\partial U_{hj}} = Z_{h,ij} y_{sh,j} \quad (15)$$

系统各个节点第  $h$  次谐波电压的敏感因子构成的敏感因子矩阵  $H_h$  为

$$H_h = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\partial U_{h1}}{\partial U_{h2}} & \dots & \frac{\partial U_{h1}}{\partial U_{hn}} \\ \frac{\partial U_{h2}}{\partial U_{h1}} & 1 & \dots & \frac{\partial U_{h2}}{\partial U_{hn}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial U_{hn}}{\partial U_{h1}} & \frac{\partial U_{hn}}{\partial U_{h2}} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

选取敏感因子矩阵中各行中的最大敏感因子并进行排序，值越大代表该节点安装谐波监测点效果越好。

对于不同次谐波的影响，本文根据表 1 提供的谐波电流含量以及标准中的限值，主要选取 3、5、7 次谐波进行加权，权值正比于谐波电流含量。因此，各节点综合敏感因子可以表示为

$$P_i = \sum_h k_h \max_j \left\{ \frac{\partial U_{hi}}{\partial U_{hj}} \right\} \quad (h = 3, 5, 7) \quad (17)$$

本文算法首先随机配置几组监测点，作为搜索起点。某一方案的初始监测点确定后，根据矩阵  $M_p$  计算方案的监测范围，并根据综合敏感因子的大小，从小到大逐个去除，直到可监测范围不能覆盖全网为止。处于临界位置的  $d$  个谐波监测点即为该方案的最佳监测点配置。最后，结合各个方案的综合敏感因子进行比较，选取最佳的配置方案。

### 2.3 监测点谐波影响最小的最大接入 DG 容量

确定了系统中监测点配置后，需要合理规划用户的 DG 接入容量，使系统接入较大光伏容量，同时对监测点产生的谐波畸变率较小，从而降低系统中谐波的整体水平。

本文使用粒子群算法计算光伏容量配置。粒子群算法是一种群体智能算法，源于鸟类觅食行为的研究，适用于工程上的优化问题。该算法首先生成若干个粒子，并随机确定光伏容量，此后不断更新粒子中的参数，直到最大迭代次数<sup>[18-20]</sup>。其中，第  $i$  个粒子速度与位置的更新公式为

$$v_i^{t+1} = \omega_i v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (g^t - x_i^t) \quad (18)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (19)$$

$$\omega_i = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{K_{\max}} \cdot t \quad (20)$$

式中： $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$  和  $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$  分别表示第  $i$  个粒子的位置和速度； $\omega_i$  表示第  $i$  个粒子的惯性权重，其取值的上下限为  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$ ； $c_1$  和  $c_2$  为学习因子，取值为 2 时即具有良好的收敛效果； $r_1$  和  $r_2$  为  $[0,1]$  之间相互独立的随机数； $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN})$  和  $g = (g_1, g_2, \dots, g_N)$  分别表示第  $i$  个粒子局部最优位置和全局最优位置； $K_{\max}$  表示最大迭代次数。其计算流程如下所述。

1) 初始化粒子群信息。设定种群规模为 50，迭代次数上限为 50，权重系数初始值为 0.8，上下限分别为 0.8 和 0.4。随机生成各个粒子的初始位置和速度，计算初始潮流。

2) 根据适应度函数计算粒子适应度，比较粒子自身最优适应度和全局最优适应度，并对最优粒子信息进行更新。

3) 根据式(18)一式(20)更新粒子速度和位置，重新计算潮流。

4) 判断是否达到最大迭代次数，若没有达到则返回步骤 2)。若达到则输出全局最优解。

本文使用的适应度由总光伏装机容量与各个监测点的谐波含量确定，容量基准值为线路传输容量上限，谐波含量基准值为其允许上限。为使结果在达到较大接入容量的同时监测点谐波含量较小，其公式为

$$\max S = \omega_{DG} \sum_{i=1}^N P_{DG,i}^* - \omega_T \sum_{i=1}^d T_{i,u}^* \quad (21)$$

式中： $S$  为适应度指标； $\omega_{DG}$  为功率权重； $\omega_T$  为谐波畸变率权重，其值根据单个节点最大消纳时的容量和谐波畸变率的熵值确定。

## 3 算例分析

### 3.1 算例数据

本文采用上海某 10 kV 配电线路作为算例，其电压等级为 10 kV，总有功负荷为 1.177 MW，总无功负荷为 0.286 Mvar。该算例线路图如图 2 所示，节点所带负荷如表 2 所示。

表 2 节点有功负荷分布情况

节点	3	8	10	13	15	16
负荷/kW	7.7	742.0	38.3	38.3	4.6	61.0
节点	17	19	20	21	22	—
负荷/kW	211.6	1.3	3.3	2.1	67.2	—

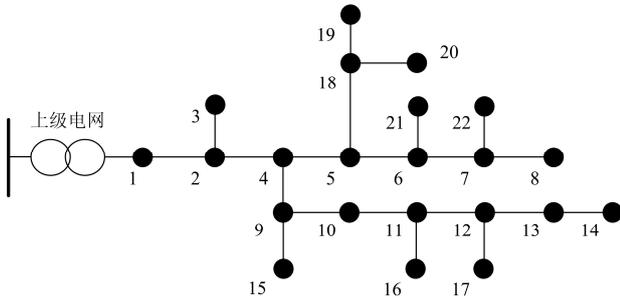


图 2 10 kV 配电线路单线图

Fig. 2 Single line diagram of 10 kV distribution network

10 kV 电压等级的供电电压偏差为 $\pm 7\%$ , 母线交换功率极限  $S_{trans,max}$  为 2.51 MVA, 线路传输容量极限  $S_{l,max}$  为 3.38 MVA。

### 3.2 谐波监测点配置

本节首先通过单节点最大准入容量的分析, 分别得到了 DG 接入配电线路不同节点时可以消纳的 DG 容量, 并通过谐波分析得到了对各个节点谐波水平的影响, 确定了谐波的可监测范围。根据确定的监测范围, 计算得到了谐波监测点的配置方案, 其结果如表 3 所示。传统的监测点配置方法主要根据敏感度因子确定位置<sup>[6-7]</sup>, 其配置数量需要预先确定。本节在监测点数目一致的情况下, 对比了考虑 DG 消纳与不考虑 DG 消纳配置的不同, 结果如表 4 所示。

表 3 单节点 DG 接入谐波监测范围

Table 3 Harmonic monitoring area of one DG penetrating

监测节点	监测范围
3	1,2,3,4,5,6,7,8,18,19,20,21,22
22	1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,21,22

表 4 谐波监测方案指标

Table 4 Harmonic monitoring index of two schemes

	监测点配置	监测范围	灵敏度
考虑 DG 消纳	3、22	100%	3.32
不考虑 DG 消纳	7、22	81.8%	3.98

由表 4 可见, 在考虑 DG 消纳情况下, 本方法能得到覆盖范围广且监测点数量较少的配置方案。普通的配置结果虽然具有较高的灵敏度, 但是其监测范围较窄, 无法满足系统谐波监测需要。

### 3.3 对监测点谐波影响最低的 DG 容量配置

为研究考虑监测点谐波含量的配电网 DG 容量配置, 本文选取了线路中带有负荷的节点作为 DG 接入点, 分析其最大准入容量, 设定粒子群算法种群数量为 100, 迭代上限为 50; 设定权重  $\omega_{DG}$  为 0.49;  $\omega_T$  为 0.51。此外, 配置方案应当使公共连接点(Point

of Common Coupling, PCC)点的谐波畸变率尽可能小。为了比较考虑对监测点谐波水平影响和不考虑对监测点谐波水平影响的 DG 配置的不同, 配置计算结果如表 5 所示。

表 5 DG 接入容量配置

Table 5 Configuration of DG penetrating capacity

接入节点	接入容量/MW	
	考虑对监测点谐波水平影响	不考虑对监测点谐波水平影响
3	0.356	0.177
8	0.391	0.601
10	0.171	0
13	0.331	0.271
15	0.232	0.694
16	0.364	0.273
17	0.337	0.083
19	0.362	0.181
20	0.354	0.363
21	0.354	0.467
22	0.291	0.438
总计	3.543	3.548

两种配置结果对监测节点和 PCC 点谐波畸变率的影响指标以及计算过程中达到收敛时的迭代次数如表 6 所示。

表 6 配置方案谐波影响

Table 6 Harmonic impact of configuration schemes

	谐波畸变率/%			迭代次数
	节点 3	节点 22	PCC	
考虑监测点谐波	0.14	0.20	0.15	14
不考虑监测点谐波	0.30	0.55	0.30	28

由表 5 和表 6 可知:

1) 考虑监测点谐波含量的 DG 容量配置结果与不考虑监测点的结果相近, 配电线路对 DG 的消纳能力受到母线交换功率极限和系统负荷水平的影响。前者由于需要考虑对监测点谐波含量的影响, 其消纳能力为 3.543 MW, 略小于后者的 3.548 MW。

2) 考虑对监测点谐波水平影响的配置结果中, 各个节点接入的 DG 容量相对比较平均; 不考虑对监测点谐波水平影响的方案中, DG 容量主要集中在线路终端, 线路中端的容量较少。

3) 通过对比两个方案的谐波畸变率指标, 可以看出两个方案的优劣。考虑对监测点谐波水平影响的配置结果相较于不考虑对监测点谐波水平影响的配置结果, 监测节点 3 减少了 0.16% 的谐波畸变率, 相对降低了 53%, 主要因为前者配置方式下 DG 容量分散, 各个节点接入的容量较小; 监测节点 22 减少了 0.35% 的谐波畸变率, 相对降低 64%; PCC

点减少了 0.15% 的谐波畸变率, 相对降低 50%。前者在降低了 DG 对监测点谐波干扰的同时, 降低了对公用电网的谐波污染。

上述结果验证了考虑 DG 接入对谐波监测点谐波水平影响的 DG 配置方法在降低 DG 谐波污染方面的有效性。该方法在配置配电网 DG 容量的过程中, 不仅能获得较大的 DG 接入量, 同时还能在一定程度上降低系统谐波污染, 并降低 DG 运行中对谐波监测点的干扰。

## 4 结论

1) 配电网不同位置的分布式光伏消纳能力、光伏设备产生的谐波水平对谐波监测点的配置均有较大的影响。根据单节点分布式光伏消纳能力确定的可监测范围及监测敏感因子大小选择的监测点位置能保证系统的监测范围, 同时能最大程度降低监测点数目, 提高经济性。

2) 分布式光伏接入位置的分布对其消纳能力有一定程度的影响。同时, 分布式光伏的接入位置及容量也会影响到系统的谐波水平, 干扰监测点的正常运作。在实际配置过程中, 还需要考虑接入的分布式光伏对现有监测设备以及公用电网的影响, 避免谐波过大对系统中设备的损害。

3) 考虑对谐波监测点谐波水平影响的分布式光伏容量配置方法可以有效减少系统中各个分布式光伏对谐波监测点、公共连接点谐波畸变率的影响, 配置结果也能保证较高水平的分布式光伏消纳能力。

未来如果加入 DG 投资成本、网损需求和 DG 用户意向需求等因素, 可以根据供电部门需要, 获得其他 DG 容量的最佳配置。

## 参考文献

- [1] 田鹏, 宣文华, 牛益国. 基于陷波控制的 LCL 型光伏并网逆变器谐波谐振抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 82-88.  
TIAN Peng, XUAN Wenhua, NIU Yiguo. Suppression of harmonic resonance for photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter based on notch filter control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 82-88.
- [2] 杨立滨, 张海宁, 李春来, 等. 基于虚拟导纳的大型光伏电站谐波抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 120-126.  
YANG Libin, ZHANG Haining, LI Chunlai, et al. Harmonic suppression strategy of large-scale photovoltaic plants based on virtual admittance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 120-126.
- [3] 张战彬, 翟红霞, 徐华博, 等. 光伏电站多逆变器并网系统输出谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 142-146.  
ZHANG Zhanbin, ZHAI Hongxia, XU Huabo, et al. Study on output harmonic of multi-inverter grid-connected in photovoltaic plant[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 142-146.
- [4] DING Guangqian, WEI Ran, ZHOU Ke, et al. Communication-less harmonic compensation in a multi-bus microgrid through autonomous control of distributed generation grid-interfacing converters[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy 2015, 3(4): 597-609.
- [5] 王岭, 陈红坤, 王志成, 等. 一种基于实测数据的谐波源定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 33-39.  
WANG Ling, CHEN Hongkun, WANG Zhicheng, et al. A harmonic sources localization method based on measured data[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 33-39.
- [6] 马历, 刘开培, 雷肖. 配电网谐波源定位的支持向量机估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 111-116.  
MA Li, LIU Kaipei, LEI Xiao. Support vector machine estimating algorithm of harmonic source localization in power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 111-116.
- [7] 马历, 刘开培, 雷肖. 基于 LS-SVM 的谐波源定位及谐波源注入电流分解方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 61-65.  
MA Li, LIU Kaipei, LEI Xiao. Method of localization based on LS-SVM and injected currents decomposability for harmonic sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 61-65.
- [8] 孙媛媛, 尹志明. 基于 M 估计稳健回归的多谐波源责任区分[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 166-173.  
SUN Yuanyuan, YIN Zhiming. Quantifying harmonic responsibilities of multiple harmonic sources based on M-estimation robust regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 166-173.
- [9] 钟清, 高新华, 余南华, 等. 谐波约束下的主动配电网分布式电源准入容量与接入方式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 108-113.  
ZHONG Qing, GAO Xinhua, YU Nanhua, et al. Accommodating capacity and mode of distributed generation under harmonic constraint in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 108-113.

- [10] 江南, 龚建荣, 甘德强. 考虑谐波影响的分布式电源注入功率计算[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 19-23. JIANG Nan, GONG Jianrong, GAN Deqiang. Computing the maximum penetrating level of distributed generators in distribution network by taking into account of harmonic constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 19-23.
- [11] 孙媛媛, 王小宇, 尹志明. 多谐波源系统的非迭代式谐波潮流分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 83-90. SUN Yuanyuan, WANG Xiaoyu, YIN Zhiming. Non-iterative harmonic power flow analysis for power systems with multiple harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 83-90.
- [12] 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. 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.
- [13] HUI J, YANG H, LIN S, et al. Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1778-1786.
- [14] 电能质量公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994. Quality of electric energy supply harmonics in public supply network: GB/T 14549 — 1993[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [15] 周超, 田立军. 基于粒子群优化算法的电压暂降监测点优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 181-187. ZHOU Chao, TIAN Lijun. An optimum allocation method of voltage sag monitoring nodes based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 181-187.
- [16] 周超, 田立军, 侯燕文, 等. 基于监测点优化配置的电压暂降故障点定位估计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 102-107. ZHOU Chao, TIAN Lijun, HOU Yanwen, et al. Fault location estimation based on optimal voltage sag monitoring program[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 102-107.
- [17] CHANG G W, CHEN C I, TENG Y F. Radial basis function based neural network for harmonic detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2171-2179.
- [18] 栾伟杰, 蒋献伟, 张节潭, 等. 考虑主动管理的分布式光伏发电消纳能力研究[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 137-143. LUAN Weijie, JIANG Xianwei, ZHANG Jietan, et al. Consumptive ability analysis for distributed photovoltaic generation considering active management[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(1): 137-143.
- [19] ACHARJEE P, GOSWAMI S K. A decoupled power flow algorithm using particle swarm optimization technique[J]. Energy Conversion & Management, 2009, 50(9): 2351-2360.
- [20] SHARAF A M, EL-GAMMAL A A A. Particle Swarm Optimization PSO: A New Search Tool in Power System and Electro Technology[J]. Computational Intelligence in Power Engineering, 2010(302): 235-294.

收稿日期: 2017-04-22; 修回日期: 2017-08-17

作者简介:

任明珠(1984—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护、新能源发电; E-mail: renming1268@163.com

管晟超(1990—), 男, 硕士, 主要研究方向为电能质量监测、分析与治理等;

谭佳(1983—), 男, 学士, 主要研究方向为调度自动化及安全监督管理等。

(编辑 周金梅)