

DOI: 10.7667/PSPC161035

含 DG 的配电网系统谐波分布特性研究

江友华¹, 常建², 唐忠¹

(1. 上海电力学院电子与信息工程学院, 上海 200090; 2. 国网浙江省电力公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 为分析含 DG 的配电网谐波分布特性, 首先基于 DG 与配电网耦合系统拓扑结构推导出谐波耦合导纳矩阵, 其表明阻抗网络参数变化会影响谐波分布。然后给出含有 DG 的配电网数学模型, 从理论上分析出配电网中谐波电压畸变率的变化规律的影响因素。最后基于 PSCAD 搭建了分布式电源与配电网联合仿真系统, 针对分布式电源(风力发电, 太阳能发电)不同出力、不同位置, 仿真分析分布式电源对配电网谐波分布的影响。仿真研究结果表明: DG 的分布位置, 不同出力直接影响配电网谐波分布。该研究结果对分布式电源的选址和定容有重要的参考价值。

关键词: 谐波分布; PSCAD; 配电网; 分布式电源

Research on harmonic distribution characteristics of distribution network with DG

JIANG Youhua¹, CHANG Jian², TANG Zhong¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shaoxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Shaoxing 312000, China)

Abstract: To analyze harmonic distribution characteristics of distribution network with DG, first, based on the topology between DG and distribution network coupling system, harmonic coupling admittance matrix is deduced, which indicates the changes of impedance network parameter can affect the harmonic distribution; second, a distribution network mathematical model with DG is given, and the factors that influence variation rule of distribution network harmonic voltage distortion rate are analyzed theoretically; finally, a joint simulation system of DG and distribution network is built based on PSCAD, and according to different output and different positions of DG (wind power, solar power), the impact of DG on distribution network harmonic distribution is analyzed. Simulation results show that the positions distribution of DG and different output will influence harmonic distribution directly, which has an important reference value for the locating and sizing of DG.

Key words: harmonic distribution; PSCAD; distribution network; DG

0 引言

分布式电源(DG)^[1]具有经济性、环保性、可靠性、电力安全性和能源利用多样性等特点, 因此被广泛地重视和应用。随着 DG 越来越多地引入配电网系统, 它会对电力系统产生众多的影响, 其中对配电网电能质量的影响逐渐成为电力行业中能源利用领域所关注的主要问题之一。而近些年来, 对 DG 与配电网耦合系统谐波分布方面研究相对较少且不全面。文献[2-3]探讨了不同出力模式下, 分布式电源对配电网的电压、规划、损耗、供电可靠性等方面带来的影响。文献[4-5]探讨了大型光伏电站并网

对配电网电压质量的影响, 但未就谐波分布做出具体分析。文献[6-7]分析了不同的 DG 接入技术对配电网谐波分布的影响。文献[8-9]分析了多并网逆变器与电网谐波交互, 但建立的模型过于简单。

本文主要围绕谐波分布展开研究。为研究 DG 对公共电网谐波谐振特性的影响, 本文首先建立含 DG 的数学模型, 在此基础上, 理论分析了影响谐波电压畸变率的因素; 通过 PSCAD 仿真软件搭建了耦合仿真系统, 从 DG 的位置、出力变化的角度考察了 DG 并网对谐波分布的影响。本文为有效降低谐波危害提供了新思路, 有助于减少谐波治理装置的容量, 进而降低谐波治理成本, 具有显著的工程实用参考价值。

1 DG 与配电网耦合系统拓扑结构

分布式电源与配电网耦合系统拓扑结构如图 1 所示。当多个 DG 与配电网并网, 此时 DG 作为一个谐波电流源与电网之间存在谐波交互^[10], 该谐波交互现象会进一步放大配电网电流中的谐波成分, 严重时甚至可能导致系统震荡而无法正常运行。DG 与配电网发生谐波交互的本质是电路网络中的电源和阻抗^[11-12]。DG 的位置、出力变化直接导致等效阻抗网络参数发生变化, 进而引起配电网中的谐波分布发生变化。

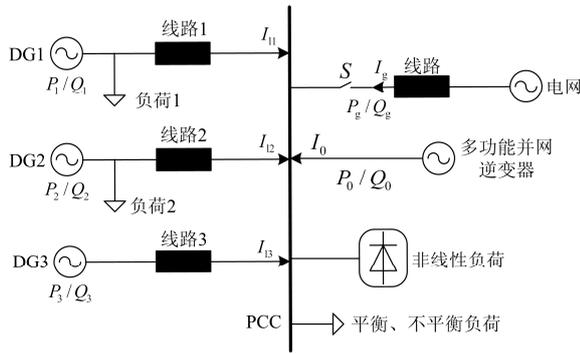


图 1 分布式电源与配电网耦合系统拓扑结构
Fig. 1 Topology structure of DG and distribution network coupling system

结合 DG 与配电网耦合系统拓扑结构, 将谐波源产生的谐波电压与谐波电流之间的相互关系考虑在内, 并将谐波源从频域转化到时域^[13], 有式(1): 谐波耦合导纳矩阵。直观地体现了谐波源电压和电流各次谐波分量之间的耦合关系。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{1,1}^+ & Y_{1,3}^+ & \cdots & Y_{1,h}^+ \\ Y_{3,1}^+ & Y_{3,3}^+ & \cdots & Y_{3,h}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k,1}^+ & Y_{k,3}^+ & \cdots & Y_{k,h}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \angle 0 \\ U_3 \angle \varphi_3 \\ \vdots \\ U_h \angle \varphi_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{1,1}^- & Y_{1,3}^- & \cdots & Y_{1,h}^- \\ Y_{3,1}^- & Y_{3,3}^- & \cdots & Y_{3,h}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k,1}^- & Y_{k,3}^- & \cdots & Y_{k,h}^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \angle 0 \\ U_3 \angle -\varphi_3 \\ \vdots \\ U_h \angle -\varphi_h \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: 角标 h 与 k 分别是谐波电压、电流的谐波次数; $Y_{k,h}^+$ 和 $Y_{k,h}^-$ 分别为与谐波电压矩阵 Y^+ 、谐波电压共轭矩阵 Y^- 相关的导纳矩阵元素, $Y_{k,h}^+$ 表明 k 次谐波电流与 h 次谐波电压的耦合关系, $Y_{k,h}^-$ 表明 k 次谐波电流与 h 次谐波电压共轭的耦合关系。可以看出, 对单个谐波源来说, 某次的谐波电流不仅受

到基波电压的影响, 同时也受到高次谐波电压的影响, 每次谐波电压都会导致谐波电流的产生^[14-15]。

Y^- 矩阵元素的幅值远小于 Y^+ , 即谐波源的输出电流由 Y^+ 矩阵起关键作用。同时, 考虑到电力系统基波电压远大于各次电压谐波, 因此可以将上式 Y^- 矩阵中除第一列以外的元素忽略。简化后的公式如下:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{1,1}^+ + Y_{1,1}^- & Y_{1,3}^+ & \cdots & Y_{1,h}^+ \\ Y_{3,1}^+ + Y_{3,1}^- & Y_{3,3}^+ & \cdots & Y_{3,h}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k,1}^+ + Y_{k,1}^- & Y_{k,3}^+ & \cdots & Y_{k,h}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \angle 0 \\ U_3 \angle \varphi_3 \\ \vdots \\ U_h \angle \varphi_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{1,1}^- & 0 & \cdots & 0 \\ Y_{3,1}^- & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k,1}^- & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \angle 0 \\ U_3 \angle -\varphi_3 \\ \vdots \\ U_h \angle -\varphi_h \end{bmatrix} = \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{1,1}^+ + Y_{1,1}^- & Y_{1,3}^+ & \cdots & Y_{1,h}^+ \\ Y_{3,1}^+ + Y_{3,1}^- & Y_{3,3}^+ & \cdots & Y_{3,h}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k,1}^+ + Y_{k,1}^- & Y_{k,3}^+ & \cdots & Y_{k,h}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \angle 0 \\ U_3 \angle \varphi_3 \\ \vdots \\ U_h \angle \varphi_h \end{bmatrix}$$

可以看出谐波电压对谐波电流影响的大小取决于 Y 矩阵元素的大小, 而 Y 矩阵元素的大小是由网络结构以及线路参数共同决定的, 和谐波电压大小并无关系^[16]。因此, 阻抗网络参数的变化会直接导致谐波导纳矩阵的变化, 从而影响配电网中谐波分布。

图 1 是含有多个谐波源的配电网, 同时也存在线性负荷, 并且部分线性负荷直接连接在配电网母线上。由于每个谐波源发出不同频率的谐波, 导致线路中同频率或不同频率谐波的叠加、抵消效果。

谐波源的计算是谐波网络方程与谐波源特性方程在数学上的结合^[17]。考虑谐波源基波与高次谐波的影响以及不同谐波源不同频率谐波电流的影响, 对应的谐波网络节点方程如式(3)。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^h & Y_{12}^h & \cdots & Y_{1n}^h \\ Y_{21}^h & Y_{22}^h & \cdots & Y_{2n}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1}^h & Y_{m2}^h & \cdots & Y_{mn}^h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $I_k = [I_{k,1} \ I_{k,3} \ I_{k,5} \ \cdots]^T$ ($k=1,2,\dots,m$), 表示第 k 个谐波源的基波电流与各奇次谐波电流, 为列向量; $Y_{ij}^h = [Y_{ij}^{h,1} \ Y_{ij}^{h,3} \ Y_{ij}^{h,5} \ \cdots]$ ($i=1,2,\dots,m, j=1,2,\dots,n$), 即为第 i 个谐波源的 h 次谐波电流与第 j 个谐波源的各次谐波节点电压的导纳向量, 是个常量;

$U_k = [U_{k,1} U_{k,3} U_{k,5} \dots]^T$ ($k=1,2,\dots,n$), 即为第 k 个谐波源的基波电压与各奇次谐波电压。以 I_3 即第 3 个谐波源的谐波电流为例, 假设有 5 个谐波节点电压。

$$I_3 = [I_{3,1} I_{3,3} I_{3,5} \dots]^T \quad (4)$$

$$\begin{cases} Y_{31}^h = [Y_{31}^{h,1} & Y_{31}^{h,3} & Y_{31}^{h,5} & \dots] \\ Y_{32}^h = [Y_{32}^{h,1} & Y_{32}^{h,3} & Y_{32}^{h,5} & \dots] \\ \vdots \\ Y_{35}^h = [Y_{35}^{h,1} & Y_{35}^{h,3} & Y_{35}^{h,5} & \dots] \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_1 = [U_{1,1} & U_{1,3} & U_{1,5} & \dots]^T \\ U_2 = [U_{2,1} & U_{2,3} & U_{2,5} & \dots]^T \\ \vdots \\ U_5 = [U_{5,1} & U_{5,3} & U_{5,5} & \dots]^T \end{cases} \quad (6)$$

式(4)表示第 3 个谐波源的基波电流与各奇次谐波电流; 式(5)表示每个节点各次电压对第 3 个谐波源各次电流的影响大小; 式(6)表示每个节点电压的各奇次谐波电压。

以上公式可简写为

$$I_h = Y_h U_h \quad (7)$$

式(7)就是本文提出的谐波矩阵模型, I_h 为谐波电流注入向量, U_h 为谐波节点电压向量, Y_h 称为谐波导纳矩阵, 其中矩阵元素的物理意义如上所述。

谐波导纳矩阵具有如下特点:

1) 公式中, 谐波电流的求解不仅与该节点处各次谐波节点电压有关, 还与其他节点各次谐波节点电压有关。

2) 矩阵 Y_h 具有各次谐波的电流电压特性, 理论上讲应该是满矩阵^[18-19]。

3) 矩阵 Y_h 元素不随电压参数变化而变化。

2 配电网中接入 DG 的谐波分析

2.1 含有 DG 的配电网数学模型

分布式电源接入配电网前后的模型如图 2、图 3 所示。

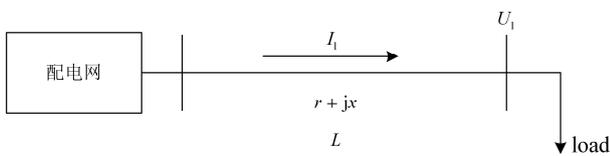


图 2 DG 接入前配电网模型图

Fig. 2 Model before DG access to distribution network

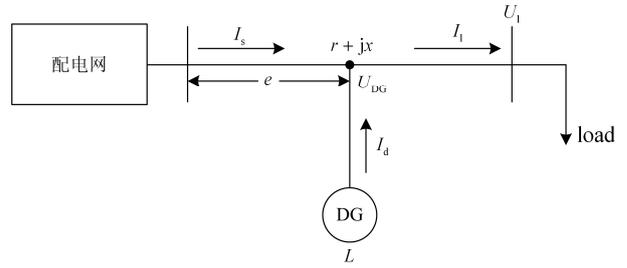


图 3 DG 接入后配电网模型

Fig. 3 Model after DG access to distribution network

其中, 对文中的符号说明如表 1 所示。

表 1 符号说明

Table 1 Symbol description

符号	说明	单位
L	从配电网端到负荷端的距离	km
e	从配电网端到 DG 的距离	km
I_1	流入负荷端的电流	A
I_s	配电网注入电流	A
I_d	DG 端注入电流	A
U_1	负荷端电压	kV
U_d	DG 端电压	kV
P_d	DG 输出的有功功率	kV
Q_d	DG 输出的无功功率	kvar
ψ_d	DG 的功率因数	
P_l	负荷消耗的有功功率	kV
Q_l	负荷消耗的无功功率	kvar
ψ_l	负荷的功率因数	
$r+jx$	输电线的单位阻抗	Ω/km

2.2 DG 接入前谐波分析

将图 2 配电网模型进行谐波分析, 其谐波分析图如图 4 所示。

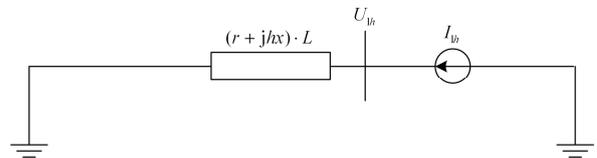


图 4 DG 接入前谐波分析图

Fig. 4 Harmonic analysis diagram before DG access

线路末端负荷为谐波电流源 I_h , $(r+jhx)$ 为 h 次谐波输电线路单位阻抗, U_h 为 h 次谐波电压幅值, 第 h 次谐波电流的幅值是以基波电流幅值 I_1 为基础的百分比 x 来表示。

其中, 基波电流幅值为

$$|I_1| = \left| \frac{P_1}{U_1 \cdot \varphi_1} \right| \quad (8)$$

第 h 次谐波电流幅值为

$$|I_{1h}| = |I_1| \cdot x = \left| \frac{P_1}{U_1 \cdot \varphi_1} \right| \cdot x \quad (9)$$

第 h 次谐波电压幅值为

$$|U_{1h}| = |(r + jhx) \cdot L| \cdot \left| \frac{P_1}{U_1 \cdot \varphi_1} \right| \cdot x = |(r + jhx) \cdot L| \cdot I_{1h} \quad (10)$$

将图 3 所示配电网模型进行谐波分析, 其谐波分析图如图 5 所示。

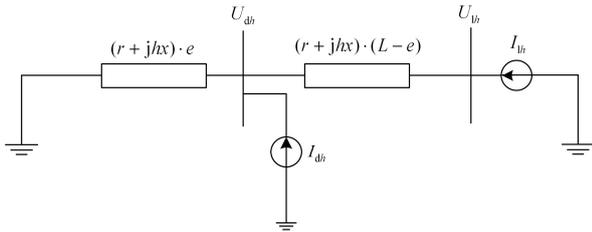


图 5 DG 接入后谐波分析图

Fig. 5 Harmonic analysis chart after DG access

DG 与配电网并网, DG 用谐波电流源来模拟, 其第 h 次谐波电流的幅值是以基波电流幅值 I_d 为基础的百分比 y 来表示。

DG 输出的基波电流幅值为

$$|I_d| = \left| \frac{P_d}{U_d \cdot \varphi_d} \right| \quad (11)$$

DG 输出的第 h 次谐波电流的幅值为

$$|I_{dh}| = |I_d| \cdot y = \left| \frac{P_d}{U_d \cdot \varphi_d} \right| \cdot y \quad (12)$$

第 h 次谐波电压为

$$U'_h = (I_{dh} + I_{1h})(r + jhx) \cdot e + I_{1h} \cdot (r + jhx)(L - e) = (r + jhx)(I_{dh}e + I_{1h}L) \quad (13)$$

所以其幅值为

$$|U'_h| = \sqrt{r^2 + (hx)^2} \cdot (|I_{dh}|e + |I_{1h}|L) \quad (14)$$

比较 DG 接入前后线路末端第 h 次谐波电压幅值的变化:

$$\Delta U_h = |U'_h| - |U_h| = \sqrt{r^2 + (hx)^2} \cdot |I_{dh}|e = \sqrt{r^2 + (hx)^2} \cdot \left| \frac{P_d}{U_d \cdot \varphi_d} \right| \cdot ye > 0 \quad (15)$$

由式(15)可以看出, DG 并网之后, 配电网的谐波电压畸变率增加了, 且与 DG 并网位置 e 、DG 的出力 P_d 有关系。显然, P_d 、 e 增加, ΔU_h 也增加。所以, DG 在何处并网, 出力多少, 都直接影响配电网上的谐波分布。

3 谐波分布的仿真研究

基于 PSCAD 软件搭建仿真系统, 该仿真系统有 11 个负荷($P_0+jQ_0, P_1+Q_1, \dots, P_{10}+jQ_{10}$), 10 个节点(Bus0, Bus1, \dots , Bus9), 系统电压为 110 kV, 短路容量为 370 MW, 经 110/10.5 kV 变压器降压, 变压器容量为 40 MVA, 配电网 PSCAD 仿真模型如图 6 所示。

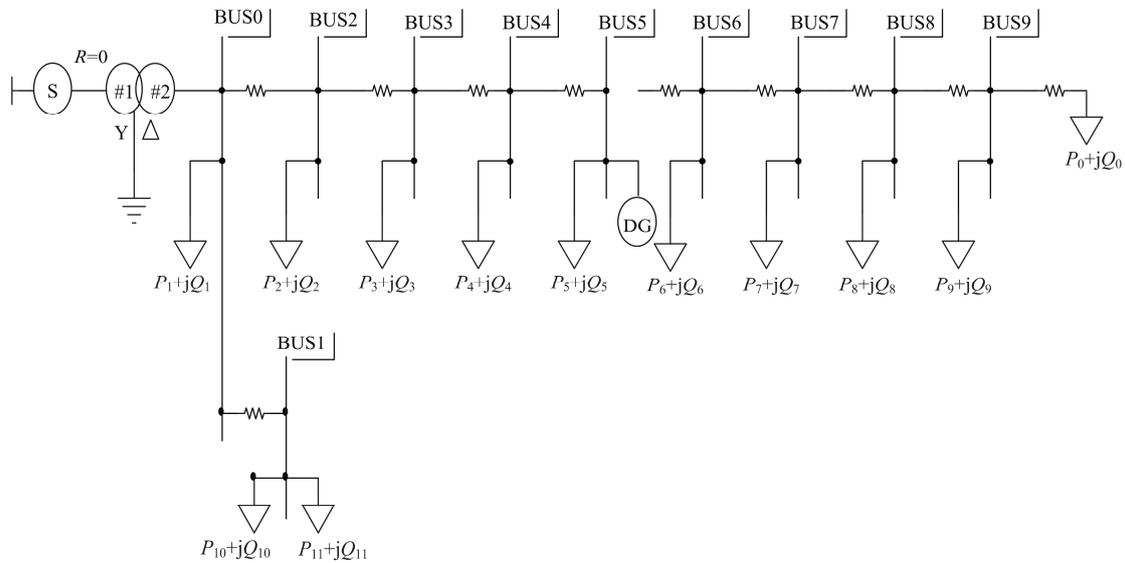


图 6 配电网系统模型

Fig. 6 Distribution network system model

各负荷参数如表 2 所示。

表 2 各负荷参数

Table 2 Each load parameters

负荷号	0	1	2	3	4	5
P/MW	2.115	1.152	0.574	0.091	0.224	0.045
Q/MW	0.834	0.071	0.281	0.044	0.112	0.022
负荷号	6	7	8	9	10	Σ
P/MW	0.143	0.073	0.180	0.180	0.224	5.000
Q/MW	0.072	0.041	0.087	0.087	0.108	1.757

3.1 DG 并网位置对谐波分布影响研究

将容量为 5.0 MVA 的 DG 与配电网并网，分别与 Bus3, Bus5, Bus7 相连，其谐波电压分析结果如表 3 所示。

表 3 谐波电压分析结果

Table 3 Harmonic voltage analysis

节点	Bus3($\Delta THD_V/\%$)	Bus5($\Delta THD_V/\%$)	Bus7($\Delta THD_V/\%$)
0	0.4380	0.4198	0.3987
1	0.4938	0.4732	0.4276
2	0.4980	0.4816	0.4310
3	0.5231	0.4889	0.4516
4	0.5106	0.4913	0.4580
5	0.4964	0.5352	0.4842
6	0.4922	0.5348	0.5032
7	0.4916	0.5296	0.5378
8	0.4908	0.5284	0.5342
9	0.4903	0.5276	0.5301

仿真分析结果如图 7 所示。

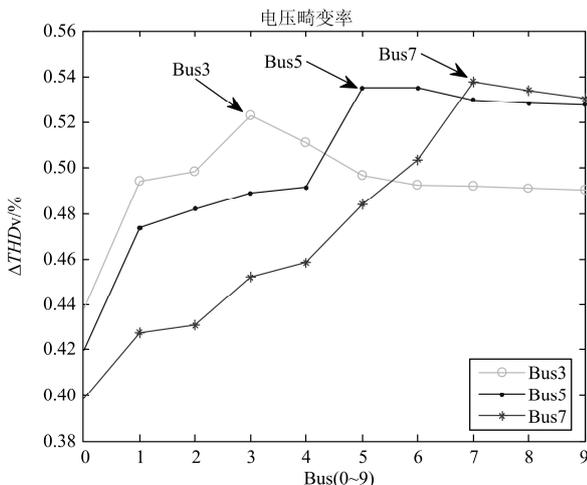


图 7 DG 并网位置对谐波分布的影响

Fig. 7 Harmonic distribution of DG integration place

从图 7 可以发现，DG 并网位置前后配电网的谐波分布趋势是不一样的。当 DG 与 Bus3 母线、Bus5 母线、Bus7 母线并联时，并网节点的 ΔTHD_V 都达到最大值，且并网之前 ΔTHD_V 在不断增大，并网之后 ΔTHD_V 在不断减小。当并联点越靠近等效主电网时，并联点之前的各支路 ΔTHD_V 大于并联点远离主电网时并网之前的 ΔTHD_V ；并联点之后的变化趋势恰好相反。换句话说，并联点越靠近主电网，并联点之前的电压畸变率越大；并联点越远离主电网，并联点之后的电压畸变率越大。

这一点在实际应用中有重要的价值。若要降低配电网前部分线路电压的畸变水平，应将 DG 分布在靠近输电线末端；若要降低配电网后部分线路电压的畸变水平，应将 DG 分布在靠近输电线首端，越靠近等效主电网越好。

3.2 DG 出力不同对谐波分布的影响研究

改变 DG 的出力，研究不同出力对配电网谐波分布的影响，如表 4 所示。

表 4 DG 出力百分比

Table 4 DG output percentage

DG 容量/MW	0.5	1.0	2.5	5.0	7.0
(P_{DG}/P_{load})/%	10%	20%	50%	100%	140%

将不同容量的 DG 与 Bus5 并联，谐波电压分析结果如表 5 所示。

表 5 谐波电压分析结果

Table 5 Harmonic voltage analysis

节点	10%	20%	50%	100%	140%
0	0.0949	0.1915	0.3702	0.6371	0.6371
1	0.1072	0.2173	0.4122	0.6938	0.6938
2	0.2103	0.2516	0.4514	0.7203	0.7203
3	0.2809	0.3207	0.4916	0.7901	0.7901
4	0.3515	0.3968	0.5475	0.8202	0.8202
5	0.7074	0.9001	1.4702	2.6101	2.6101
6	0.7043	0.8904	1.4671	2.5671	2.5671
7	0.7002	0.8845	1.4620	2.5219	2.5219
8	0.6831	0.8801	1.4487	2.4869	2.4869
9	0.6524	0.8769	1.4453	2.4626	2.4626

仿真分析结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出，随着并网容量不断增大，整个配电网节点电压谐波畸变率 $THD_V(\%)$ 也不断增大。所以过度增大 DG 出力，可能会导致配电网电压谐波畸变率超出国家标准，给电网带来危害。

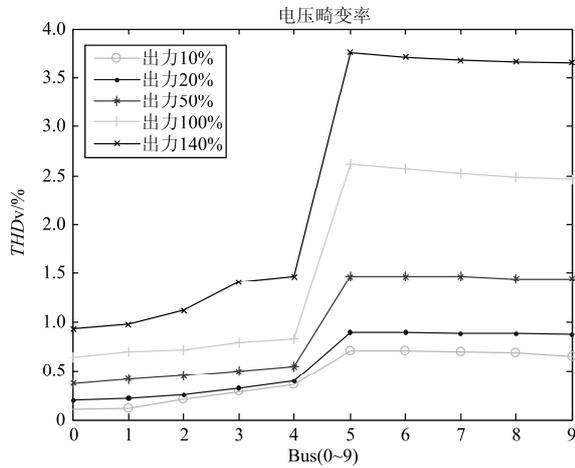


图8 不同出力对谐波分布的影响分析图

Fig. 8 Harmonic distribution analysis chart with different output

4 结论

本文通过理论推导且建立了 DG 与配电网耦合系统模型, 仿真分析了 DG 位置、出力变化对谐波分布的影响。主要结论如下:

(1) 若降低接近母线侧的电压谐波畸变率, 应将 DG 分布在靠近输电线末端; 若降低远离母线侧的电压谐波畸变率, 应将 DG 分布在靠近输电线首端。

(2) 增大 DG 的出力将会直接导致电压谐波畸变率增大。

综上, 为了平衡配电网中谐波电压畸变水平, 在配置 DG 时, 应综合考虑 DG 的位置、出力。以上结论对 DG 的选址和定容有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 吴昊, 许跃进, 殷德聪, 等. 含分布式电源配电网规划的研究现状及发展趋势[J]. 电工电气, 2013(7): 1-8.
WU Hao, XU Yuejin, YIN Decong, et al. Status and trends including distributed power distribution network planning[J]. Electrical Equipment, 2013(7): 1-8.
- [2] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.
LI Bin, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88.
- [3] 黄大为, 潘波. 考虑 DG 接入位置和容量的配电网保护综合改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 64-70.
HUANG Dawei, PAN Bo. Improved methods of distribution network protection scheme considering connection locations and capacity of DG[J]. Power

- System Protection and Control, 2016, 44(17): 64-70.
- [4] 谢宁, 罗安, 陈燕东, 等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 10-17.
XIE Ning, LUO An, CHEN Yandong, et al. Dynamic modeling and characteristic analysis on harmonics of photovoltaic power stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 10-17.
- [5] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223.
YANG Ming, ZHOU Lin, ZHANG Dongxia, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic power plants for the effect of grid impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223.
- [6] ESPOSITO G, ZANINNELLI D, LAZAROIU G C, et al. Impact of embedded generation on the voltage quality of distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 20(8): 132-137.
- [7] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 71-73.
MENG Jianhui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. Control strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 71-73.
- [8] 康成功, 李献伟, 张国军. 分布式电源参与的配电网电能质量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 99-105.
KANG Chengong, LI Xianwei, ZHANG Guojun. Research on power quality control strategy incorporating distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 99-105.
- [9] 白峪豪. 基于智能配电网关键技术城市配电网规划[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 80-82.
BAI Yuhao. Urban power distribution network planning based on smart distribution network critical technologies[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 80-82.
- [10] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71.
XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71.
- [11] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-

- connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [12] CESPEDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [13] 庞丽忠. 谐波源识别与谐波责任分摊的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
PANG Lizhong. Harmonic source identification and apportionment of responsibilities[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [14] 傅志生, 白晓清, 李佩杰, 等. 一种快速求解大规模安全约束最优潮流的多核并行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 29-37.
FU Zhisheng, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. A high-speed multi-core parallel method for solving large-scale security constrained OPF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 29-37.
- [15] 李中雷, 宋蕙慧, 曲延滨. 基于母线 Agent 的微电网孤岛协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 371-373.
LI Zhonglei, SONG Huihui, QU Yanbin. A coordinate control strategy of island microgrid based on bus Agent[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 371-373.
- [16] 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.
- [17] 王正宇, 金尧, 蒋传文. 考虑光伏储能和可控负荷的配电网检修计划优化[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 75-77.
WANG Zhengyu, JIN Yao, JIANG Chuanwen. Maintenance schedule optimization in distribution network with consideration of photovoltaic system with energy storage and controllable load[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 75-77.
- [18] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0020-2
- [19] 苏海滨, 高孟泽, 常海松. 基于粒子群算法的微电网有功无功下垂控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 366-367.
SU Haibin, GAO Mengze, CHANG Haisong. Microgrid droop control of active and reactive power based on PSO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 366-367.

收稿日期: 2016-07-08; 修回日期: 2016-10-14

作者简介:

江友华(1974—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为谐波、电能质量及电力系统自动化; E-mail: jyhua0306@sina.com

常建(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量及电力系统自动化; E-mail: 1353371903@qq.com

唐忠(1964—), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力信息技术、基于电力电子技术的节能技术、电力安全技术等。E-mail: tangzhong64@163.com

(编辑 魏小丽)