

多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究

崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 薛金花, 杨波

(中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对分布式光伏发电的谐波源特性和功率波动性, 对分布式光伏接入对配电网谐波、电压波动和闪变的影响进行了分析, 并分析了背景电能质量问题对光伏并网点电能质量的影响。同时在 DIgSILENT/PowerFactory 仿真平台上搭建了国际大电网会议(CIGRE)认为适合进行分布式发电接入配电网特性研究的典型配电网结构, 并根据 IEC 61400-4-15 标准在该平台上搭建了 IEC 电压闪变仪, 对含多接入点分布式光伏发电的配电网的谐波传输和放大特性、电压波动和闪变的影响和评估进行了仿真分析。仿真结果表明, 含多接入点分布式光伏的配电网中谐波传输和放大特性非常复杂; 配电网各母线节点的电压波动和闪变值的大小与该母线节点的短路容量和功率波动密切相关。

关键词: 分布式光伏; 谐波; 电压波动与闪变; 电能质量

Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network

CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, XUE Jinhua, YANG Bo

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: For harmonic source characteristics and power volatility of distributed PV, the effects of PV connecting to grid on harmonics, voltage fluctuation and flicker of distribution network are analyzed. And the impact of background power quality of distribution network on the power quality of PV connecting points is also analyzed. Meanwhile, a typical distribution network is built on DIgSILENT / PowerFactory simulation platform, which is considered to be suitable for study of PV grid-connecting characteristics by CIGRE. According to IEC 61400-4-15 standard, the IEC voltage flicker meter is also built on the platform. And then the harmonic transmission and amplification characteristics, the impact and assessment of voltage fluctuation and flicker are simulated. The simulation results show that harmonic transmission and amplification characteristics are complex in distribution network with multiple distributed PV. Additionally, the value of voltage fluctuation and flicker at each bus node is closely related to the short-circuit capacity of the bus node and power fluctuation of distributed PV.

Key words: distributed PV; harmonics; voltage fluctuation and flicker; power quality

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)10-0091-07

0 引言

随着全球能源短缺和环境污染的日益恶化, 分布式光伏发电以其资源丰富、清洁无污染等优势得到了国家能源政策的扶持和社会的广泛关注。由于光伏发电系统通过逆变器等电力电子装置并入电网, 所产生的谐波不可避免的会进入配电网, 对配电网的谐波产生不利影响^[1-4]。目前对于单点光伏发电系统并网对电网谐波影响的研究主要包括: 光伏

发电系统不同接入位置和容量对配电网谐波电压和谐波电流的影响^[5-6]; 通过分析光伏逆变器的结构和运行特性, 研究含分布式光伏的配电网谐波的产生机理等^[7-8]。建筑光伏作为典型的多接入点分布式光伏发电系统, 其接入配电网后使传统的单电源辐射状网络变为一个遍布电源和用户的多源互连网络。由于配电网内部存在多个谐波源, 呈现出多分布参数特性, 使得含多接入点分布式光伏的配电网的谐波传输和放大特性变得复杂, 从而难以直接从单点光伏发电系统的谐波特性得到整个多接入分布式光伏发电系统的谐波特性^[9-10]。此外, 电网背景谐波

基金项目: 国家电网公司基础性前瞻性科技项目(XT71-14-004)

对含分布式光伏的配电网的谐波影响不容忽视^[11-13]。

同时,由于光伏发电系统受光照和温度的影响,输出具有随机性、波动性和间歇性特点,因此分布式光伏接入会对配电网的电压波动和闪变产生影响。目前对于多接入点分布式光伏发电系统电压闪变进行系统性研究的文献还不多见,多数是针对风力发电的电压闪变问题进行了局部分析^[14-15]。由于电压闪变的机理和 IEC 标准规定的闪变计算方法相当复杂,因此对于电压闪变多数采用现场实测的方法进行研究。目前采用 DigSILENT/Power Factory 仿真软件建立 IEC 电压闪变仪进行含分布式光伏的配电网电压闪变分析和计算的研究还未见报道。本文充分利用 DigSILENT/PowerFactory 仿真软件在系统级仿真方面的突出优势,从系统角度通过理论与仿真相结合的方法,对含多接入点分布式光伏的配电网谐波传输、谐波叠加、谐波分布、叠加背景谐波后光伏并网点的谐波特性以及电压波动和闪变进行了分析。并对含分布式光伏的配电网电压闪变进行了较精确的仿真测试和计算。

1 含分布式光伏的配电网谐波机理分析

分布式光伏发电系统并网时会向电网注入谐波,造成配电网的谐波污染。一方面光伏电源可等效为内阻无穷大的谐波电流源,光伏并网点的选择、光伏单点或多点接入方式、配电网结构以及各母线短路容量的差异都会影响含分布式光伏的配电网谐波传输和放大特性。另一方面配电网背景谐波可能会加剧光伏并网点的谐波水平。

分布式光伏发电系统接入配电网后,光伏发电系统的接入位置、接入方式等都会对配电网的谐波产生影响,因此建立了含分布式光伏发电系统的配电网等效电路,对谐波传输和分布特性进行理论分析。配电网等效电路如图 1 所示。

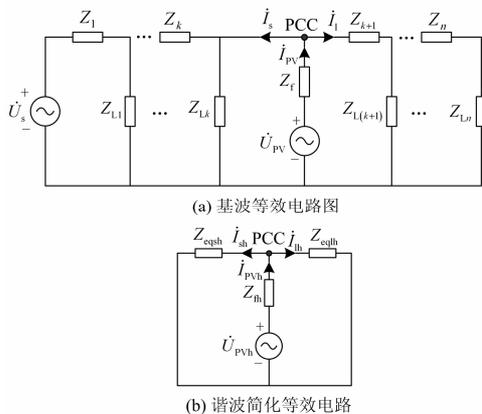


图 1 含分布式光伏的配电网等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of distribution network with PV

将分布式光伏等效为谐波电流源,则分布式光伏注入电网侧的谐波电流为

$$j = \frac{Z_{eqh}}{Z_{eqsh} + Z_{eqh}} \cdot j_{PVh} \quad (1)$$

式中: Z_{eqsh} 为电网侧等效谐波阻抗, $Z_{eqsh} = \{((Z_1 // Z_{L1}) + Z_2) // Z_{L2} + \dots + Z_k\} // Z_{Lk}$, 由于配电线路阻抗远远小于负荷阻抗, 即: $Z_k \ll Z_{Lk}$, 因此 $Z_{eqsh} \approx Z_1 + Z_2 + \dots + Z_k$ 。同理光伏接入点后的等效谐波阻抗 $Z_{eqh} \approx Z_{L(k+1)} // \dots // Z_{Ln}$ 。电网侧等效阻抗远小于接入点后的等效谐波阻抗, 并且接入点越靠近线路末端, 接入点后的等效谐波阻抗越大。

由式(1)可知, 光伏发电系统的谐波电流绝大多数通过配电主干线路流入公共电网, 负荷节点几乎没有谐波电流流过, 并且接入点越靠近配电线路末端, 接入点后的配电主干支路流过的谐波电流越小。

当分布式光伏不包含滤波电感时可等效为谐波电压源, 因此对于单电源的谐波电路光伏并网点的谐波电压是整个配电网谐波电压分布曲线的最高点, 其谐波电压为

$$\dot{U}_{PCC} = \frac{Z_{eqh} \cdot Z_{eqsh}}{Z_{eqsh} + Z_{eqh}} \cdot j_{PVh} \quad (2)$$

假设图 1(b)中配电网相邻母线节点间的线路阻抗相等, 且都为 Z_s 。各负荷的等效阻抗也相等, 都等于 Z_L 。式(2)可简化为

$$\dot{U}_{PCC} = \frac{Z_s \cdot Z_L}{(n-k)Z_s + \frac{Z_L}{k}} \cdot j_{PVh} \quad (3)$$

式中: k 为光伏接入点; n 为配电网末端节点。

由式(3)可知, 当分布式光伏接入配电网末端时, 光伏并网点的谐波电压最高, 因此, 分布式光伏不适宜在末端节点接入电网。

当多个分布式光伏接入配电网后, 由于每个分布式光伏的控制是相对独立的, 其产生的谐波电流的相角也各不相同, 并且谐波电流的叠加与常规电流源的电流叠加原理相同。叠加后的谐波电流为各个谐波源电流的矢量和。此外, 当光伏逆变器采用相同型号, 且逆变器控制完全同步时, 多接入点分布式光伏并网对电网谐波的影响最严重。上述分析适用于光伏发电系统输出同时含有高次谐波和低次谐波的情况, 即光伏发电系统高次谐波和低次谐波在配电网的传播、分布与叠加特点是相同的。

以上是配电网在理想情况下的谐波特性, 当配电网存在背景谐波时, 由于现有的滤波装置多数只针对高次谐波, 电网中的低次谐波会随着电压采样进入光伏的控制系統, 且光伏系统的电流控制器对

电网低次谐波几乎没有抑制作用。同时光伏逆变器的低次谐波电流同样会随采样进入控制系统, 且电流控制器对于低次谐波的抑制效果取决于控制器的控制性能。由于光伏发电系统的谐波特性受逆变器控制性能的影响, 因此本文对配电网低次背景谐波对光伏输出谐波的影响进行了研究。以配电网中常见的 5 次、7 次谐波为例, 5 次和 7 次谐波分别为负序和正序谐波, 因此二者的旋转频率都是 6 倍的基频^[16]。对含有正序和负序谐波的电网电压进行 $dq0$ 变换可得

$$\begin{bmatrix} u_{dm+} \\ u_{qm+} \\ u_{0m+} \end{bmatrix} = A_{m+} \begin{bmatrix} \cos((m-1)\omega t + \varphi_{m+}) \\ \sin((m-1)\omega t + \varphi_{m+}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} u_{Adm-} \\ u_{Aqm-} \\ u_{A0m-} \end{bmatrix} = A_{m-} \begin{bmatrix} -\cos((m+1)\omega t + \varphi_{m-}) \\ \sin((m+1)\omega t + \varphi_{m-}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知, 在同步旋转坐标下配电网中的基波电压为直流分量, 5 次和 7 次谐波都为 6 倍频的正弦量。因此, 在零序谐波附近的正序和负序谐波相互耦合、相互影响。如 5 次和 7 次、11 次和 13 次等。当光伏逆变器采用解耦控制策略时, 电网低次谐波电压随采样进入控制系统。由上述分析可知, 当配电网含有某低次谐波时, 光伏逆变器零序谐波邻近的正序和负序谐波将发生变化。如当配电网含有 5 次谐波时, 光伏逆变器输出的 5 次和 7 次谐波将受到影响。

2 含分布式光伏的配电网电压波动和闪变机理分析

2.1 电压波动的机理分析

分布式光伏引起配电网电压波动的根本原因是其功率的波动。分布式光伏引起配电网电压波动和闪变的大小要综合考虑光伏功率波动大小、并网点短路容量、系统等效阻抗比 R/X 、光伏功率因数等因素^[17-18]。分布式光伏功率波动引起配电网的电压波动用公式表示为

$$\begin{aligned} \Delta U &= (R_{eq} + jX_{eq}) \cdot \Delta I = \\ &|Z_{eq}|(\cos\varphi + j\sin\varphi) \cdot |\Delta I|(\cos\theta + j\sin\theta) = (6) \\ &\frac{U^2}{S_k} \frac{\Delta S_{PV}}{U} (\cos(\varphi + \theta) + j\sin(\varphi + \theta)) \end{aligned}$$

式中: Z_{eq} 为从光伏并网点看入的系统等效阻抗; ΔI 为光伏功率波动引起的电网侧电流的变化量; U 为

光伏并网点额定电压; S_k 为并网点短路容量; ΔS_{PV} 为光伏功率波动量; φ 为并网点看入的光伏等效阻抗角; θ 为光伏输出功率因数。

由式(6)可知, 并网点电压波动随着光伏功率波动量的增大而增大。由于光伏输出功率因数通常为 1, 且电源到并网点的配电线路一般较短, 忽略电压波动的纵轴分量, 因此电压波动大小与等效阻抗角成反比, 即电压波动大小与等效阻抗比 R/X 成正比。由此可知, 随着等效阻抗比的减小, 并网点电压波动随之减小。

2.2 电压闪变测量

电压闪变是由电压波动引起的一种非电磁现象, 是灯光照度不稳定造成的视感反应。根据 IEC 61000-4-15 标准制造的 IEC 闪变仪是目前国际上通用的测量闪变的仪器。

采用积累概率函数 CPF 对视感度数据进行统计分析的方法比较复杂, 需要绘制 CPF 曲线得到短时电压闪变值^[19]。对此本文采用了统计排序法^[20], 将一段时间(10 min)内瞬时视感度值从小到大进行排序, 找到对应 CPF 曲线上等于 0.1%、1%、3%、10% 和 50% 时间的视感度值。该方法无需作 CPF 曲线, 算法简单实用, 结果精确。

3 仿真分析

3.1 仿真模型构建

本文以 CIGRE 认为适合进行配电网特性仿真的典型低压配电网为例^[21], 构建仿真算例, 其结构如图 2 所示。该配电网为 0.4 kV 的辐射状网络, 电网短路容量为 40 MVA, L1、L2、L3、L4、L5 为负荷节点, 负荷功率约为 100 kW。其他节点为配电网主干支路节点或配线节点。图中任意主干支路节点之间的距离相等, 且采用架空线路。各负荷支路根据负荷容量的不同采用不同型号的铜导线。

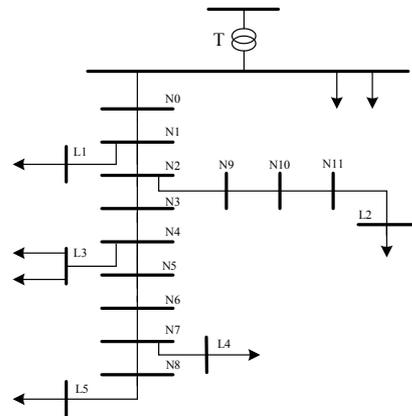


图 2 典型低压配电网结构图

Fig. 2 A typical low-voltage distribution network

3.2 谐波仿真

3.2.1 理想电网条件下谐波仿真

在图 2 中 L1~L5 任意负荷节点接入容量为 75 kW 的分布式光伏, 约为总负荷容量的 2/3, 采用 DIgSILENT/PowerFactory 仿真软件对光伏发电系统的谐波电压和谐波电流进行稳态和电磁暂态仿真。

对分布式光伏在 L3 点接入时各母线节点的谐波电流进行了仿真分析, 根据仿真结果统计了各母线节点 5 次、17 次谐波电流幅值, 如图 3 所示。

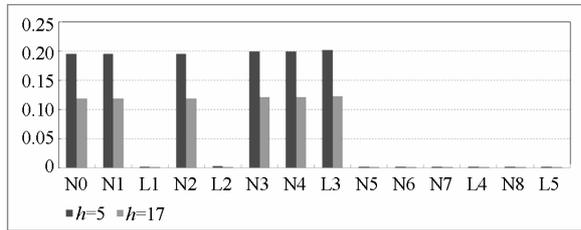


图 3 分布式光伏在 L3 节点接入时各节点的谐波电流
Fig. 3 Harmonic current of each node when PV is connecting at L3 node

由图 3 可以看出, 由于 N4 节点后的线路等效阻抗远大于电网侧等效阻抗, 因此 N5~L5 节点的谐波电流几乎为零, 谐波电流绝大多数流入公共电网; 此外, 由于负荷阻抗远大于配电网线路阻抗, 因此, 除光伏接入点外配电网内各负荷节点的谐波电流几乎为零, 谐波电流绝大多数通过配电网主干线路流入公共电网。

当分布式光伏依次在 L1~L5 点接入时, 各接入点的谐波电压和谐波电流对比分析如图 4 和图 5 所示。配电网的谐波电压分布曲线如图 6 所示。

由图 4 可以看出, 当光伏接入 L1 节点时, 谐波电压幅值最小; 当光伏接入 L5 节点时, 谐波电压幅值较大。由于图 2 所示的配电网中 L1 节点是距离公共连接点最近的节点, L1 到公共连接点的等

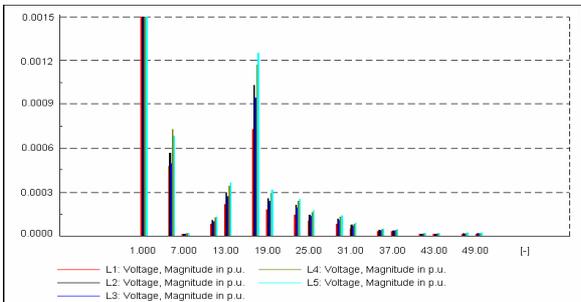


图 4 不同接入点时各接入点的谐波电压有效值
Fig. 4 Harmonic voltage RMS of each PV access point

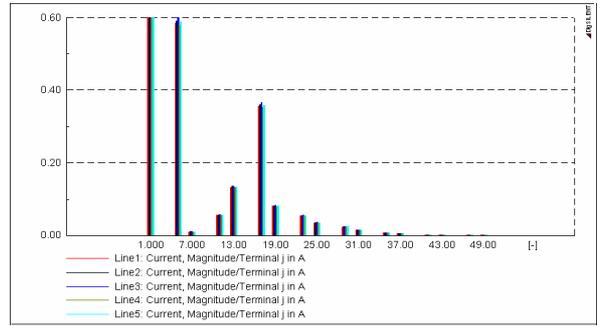


图 5 不同接入点时各接入点的谐波电流有效值
Fig. 5 Harmonic current RMS of each PV access point

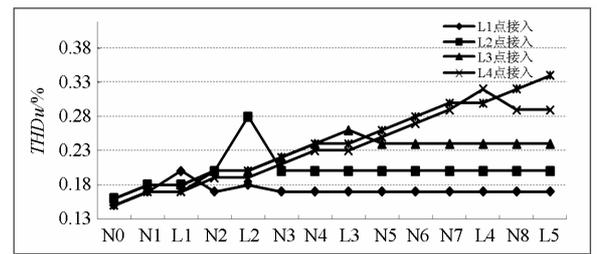


图 6 不同接入点时配电网的谐波电压分布曲线
Fig. 6 Harmonic voltage distribution curves of distributed network

效阻抗最小, 因此光伏接入产生的谐波电压也最小。仿真结果表明, 当光伏接入不同位置时, 接入点的谐波电流变化不大, 近似相等, 但谐波电压有较大差异。从图 6 可以看出, 配电网的谐波电压分布曲线在分布式光伏并网点有明显的抬升, 表明光伏并网点的谐波电压水平明显高于其他节点。对比分析图中各条曲线可知, 当分布式光伏在远离电源的 L5 节点接入时, 配电网的谐波电压水平偏高。由于 L5 节点的电气距离较远, 等效阻抗较大, 因此产生的谐波电压也较大。

对分布式光伏同时在 L3、L4 和 L5 节点接入和单独接入上述节点两种情况下的谐波电流进行了仿真分析, 根据仿真结果统计了 5 次和 17 次谐波电流有效值, 如图 7 所示。

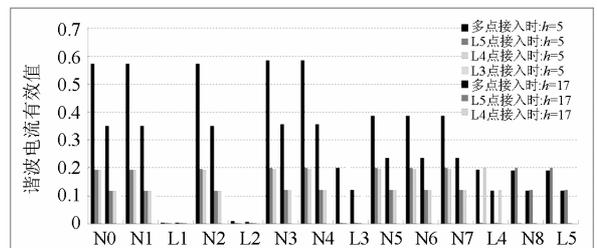


图 7 谐波电流叠加分析
Fig. 7 Analysis of harmonic current superposition

由图 7 分析可知, 当分布式光伏多点接入时, 配电网各节点的谐波电流基本等于分布式光伏单独接入时谐波电流的矢量和。

3.2.2 非理想电网条件下谐波仿真

通过 DlgSILENT/PowerFactory 仿真平台建立了交流电压源的自定义控制模块, 在交流电压源中加入指定次数和含量的谐波来模拟电网的背景谐波; 光伏发电系统采用详细的解耦控制模型。仿真中电网电压分别含不同次数的谐波电压, 谐波电压含量为 4%。非理想电网条件下分布式光伏解耦控制模型的谐波仿真结果如图 8 所示。

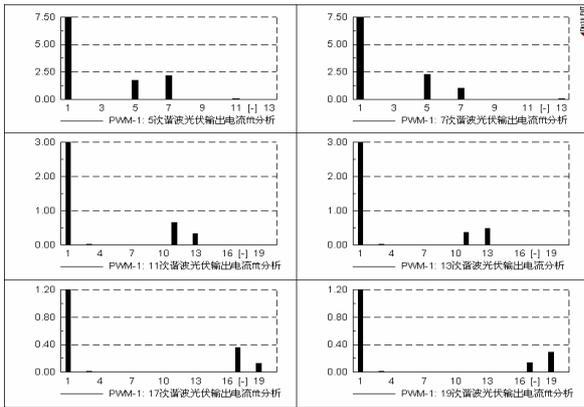


图 8 非理想电网条件下光伏输出电流 FFT 分析
Fig. 8 FFT analysis of PV output current under non-ideal conditions of grid

由图 8 可知, 当电网含有某低次谐波时, 分布式光伏系统输出低次谐波电流将增大, 且电网背景谐波次数与光伏输出增大的谐波次数密切相关。当电网含有 5 次或 7 次谐波时, 光伏输出的 5 次和 7 次谐波电流增大; 当电网含有 11 次或 13 次谐波时, 光伏输出的 11 次和 13 次谐波电流增大; 当电网含有 17 次或 19 次谐波时, 光伏输出的 17 次和 19 次谐波电流增大。由仿真结果可知, 以零序谐波为中心的序和负序谐波之间相互影响。上述仿真结果基于光伏逆变器的解耦控制策略, 解耦控制策略中含谐波的电网电压随采样进入控制系统, 使得分布式光伏系统的输出谐波电流增大, 因此在非理想电网条件下对光伏逆变器的控制性能要求更加严格, 亟需优化光伏逆变器控制系统的性能, 从而降低电网背景谐波对分布式光伏输出谐波电流的影响。

3.3 电压波动和闪变仿真

在图 2 所示的配电网中 L2 节点接入 75 kW 光伏, 在 L5 节点接入 50 kW 光伏。采用 0.1 p.u. 的方波信号来模拟光伏周期性的有功扰动, 利用 DlgSILENT/PowerFactory 仿真软件对分布式光伏

发电功率波动时对配电网电压波动和闪变的影响进行了仿真分析, 仿真步长为 0.1 μs, 仿真结果如图 9 所示。

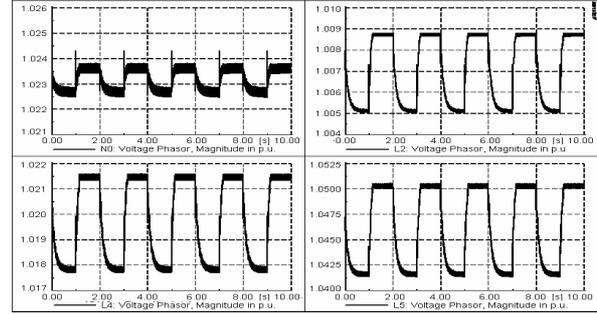


图 9 各测量母线的电压波动曲线
Fig. 9 Voltage fluctuation curves of the measured buses

图 9 为光伏并网点 L2 和 L5 节点、N0 节点以及 L4 节点的电压波动曲线。对仿真结果进行计算分析得到各母线节点的电压波动曲线, 如图 10 所示。由图 10 可知, 电压波动最严重的母线是 L2, 其电压波动 $d=0.769\%$ 。由于 L2 节点光伏注入功率相对较大, 其引起电压波动也较大。L5 节点的电压波动也相对较大, 其电压波动 $d=0.673\%$ 。由于 L5 节点与平衡节点的电气距离较大短路容量较小, 因此, 虽然注入功率较小, 但其电压波动较大。N0 节点的电压波动最小, 其电压波动 $d=0.097\%$ 。由于 N0 母线与平衡节点的电气距离较小, 其短路容量较大, 因此 N0 节点的电压波动最小。由上述分析可知, 光伏并网点(即功率波动点)的电压波动较严重, 且越靠近功率波动点电压波动越严重。

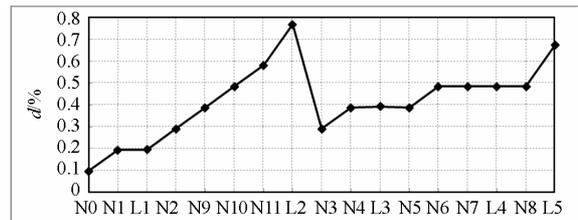


图 10 配电网各母线节点的电压波动对比图
Fig. 10 Voltage fluctuation comparison chart of each bus node in distribution network

本文首次在 DlgSILENT/PowerFactory 仿真平台上建立了 IEC 闪变仪, 并通过幅值为 0.25% 的 8.8 Hz 正弦波电压扰动对建立的 IEC 闪变仪模型进行了仿真验证, 仿真结果表明本文所建立的 IEC 闪变仪模型能够精确地计算电压闪变视感度。通过 IEC 闪变仪模型对前述方波扰动时各测量母线节点的电压闪变进行了仿真分析和计算。仿真结果如图 11 所示。

根据图 11 仿真结果计算得到各测量母线的电压闪变值 P_{st} , 如表 1 所示。

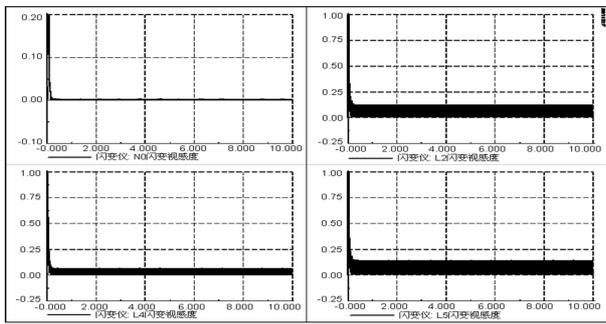


图 11 各测量母线的电压闪变视感度曲线
Fig. 11 Voltage measurement flicker sensation curves of the measured buses

表 1 各测量母线电压闪变值 P_{st}

Table 1 Voltage flicker values of the measured buses

测量母线	N0 节点	L2 节点	L4 节点	L5 节点
P_{st}	0.075	0.216	0.164	0.233

由上述分析可知，分布式发电引起的电压闪变较小，均在国标范围内，并且电压闪变的大小要综合考虑光伏注入功率和短路容量两个因素。

4 结论

多接入点分布式光伏发电系统接入配电网后，传统的单电源辐射状网络变为一个遍布电源和用户的多源互联网络，其电能质量特性变得复杂。针对上述问题，本文通过理论与仿真相结合的方法对多接入点分布式光伏与配电网电能质量的交互影响进行了研究。仿真结果表明，分布式光伏注入的谐波电流绝大多数通过配电网主干支路流入公共电网，除光伏并网点外，负荷节点几乎无谐波电流流过。光伏并网点的谐波电压畸变率相较于其他节点有明显的抬升，且越靠近配电网末端并网节点以及整个配电网的谐波畸变率水平越高。分布式光伏并网产生的电压闪变较小，且电压波动和闪变的严重程度与光伏功率大小和电网短路容量密切相关。

参考文献

[1] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于PSCAD/EMTDC的三相光伏并网系统仿真研究[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.

[2] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24):

123-126, 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): 123-126, 131.

[3] 杨德州, 王利平, 张军, 等. 大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析——(一)光伏电站专题[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 104-110.
YANG Dezhou, WANG Liping, ZHANG Jun, et al. Modelling of the large-scale distributed power supply and the analysis of corresponding grid-connected characteristics —— (1) photovoltaic plant thematic[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 104-110.

[4] 吕志盛, 闫立伟, 罗艾青, 等. 新能源发电并网对电网电能质量的影响研究[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 251-255.
Lǚ Zhisheng, YAN Liwei, LUO Aiqing, et al. Impact of new energy grid-integration on grid power quality[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 251-255.

[5] 江南, 龚建荣, 甘德强. 考虑谐波影响的分布式电源准入功率计算[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.

[6] 张俊芳, 姚强, 杭银丽. 分布式电源对配电网谐波分布影响的研究[J]. 电气应用, 2011, 30(18): 61-65.
ZHANG Junfang, YAO Qiang, HANG Yinli. Impact of distributed power on harmonic distribution in distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2011, 30(18): 61-65.

[7] 陈瑶, 童亦斌, 金新民. 基于PWM整流器的SVPWM谐波分析新算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 76-80.
CHEN Yao, TONG Yibin, JIN Xinmin. A novel algorithm of SVPWM harmonic analysis based on PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 76-80.

[8] ENSLIN J H R. HESKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004: 1586-1593.

[9] WAKILEH G J. 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2003: 55-64.

[10] 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.
- [11] WANG Fei, DURATE J L, HENDIX M A X. Analysis of harmonic interactions between DG inverters and polluted grids[C] // IEEE International Energy Conference, 2010: 194-199.
- [12] 王学华, 阮新波, 刘尚伟. 抑制电网背景谐波影响的并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 7-14.
- WANG Xuehua, RUAN Xinbo, LIU Shangwei. Control strategy for grid-connected inverter to suppress current distortion effected by background harmonics in grid voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 7-14.
- [13] 年珩, 全宇. 谐波电网电压下PWM整流器增强运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 51-58.
- NIAN Heng, QUAN Yu. Enhanced control technique of PWM converter under harmonically distorted voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 51-58.
- [14] 吴义纯, 丁明. 风电引起的电压波动与闪变的仿真研究[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 125-130.
- WU Yichun, DING Ming. Simulation study on voltage fluctuations and flicker caused by wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 125-130.
- [15] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠, 等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 62-66.
- SUN Tao, WANG Weisheng, DAI Huizhu, et al. Voltage fluctuation and flicker caused by wind power generation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 62-66.
- [16] 童立青, 钱照明, 彭方正. 同步旋转坐标谐波检测法的数学建模及数字实现[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 111-117.
- TONG Liqing, QIAN Zhaoming, PENG Fangzheng. Synchronous reference frame harmonic detection modeling and digital realization[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 111-117.
- [17] 裴玮, 盛鸱, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 152-157.
- PEI Wei, SHENG Kun, KONG Li, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 152-157.
- [18] 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.
- [19] 赵海翔, 陈默子, 戴慧珠. 风电并网引起的闪变测试系统仿真[J]. 太阳能学报, 2005, 26(1): 32-37.
- ZHAO Haixiang, CHEN Mozi, DAI Huizhu. Simulation of the flickermeter suitable for measuring the flicker produced by integrated wind power[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2005, 26(1): 32-37.
- [20] 王良清. 电压波动与闪变检测方法的仿真研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- WANG Liangqing. The research on simulation of detection method for voltage fluctuation and flicker[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005.
- [21] PAPATHANASSIOU S, HATZIARGYRIOU N, STRUNZ K. A benchmark low voltage microgrid network[C] // Proceedings of the CIGRE Symposium: Power Systems with Dispersed Generation, Athens, Greece, 2005.

收稿日期: 2014-03-19; 修回日期: 2014-12-01

作者简介:

崔红芬(1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为分布式发电与微电网新技术、电能质量分析与控制; E-mail: cuihongfen114@163.com

汪春(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为分布式发电与微电网新技术;

叶季蕾(1983-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为分布式储能技术。

(编辑 姜新丽)