

多DG不确定性建模及其对配电网谐波潮流的影响

王守相¹, 刘响^{1,2}, 张颖²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010)

摘要:分布式电源(DG)出力的随机性和间歇性导致其并网谐波电流具有不确定性,进而导致含DG配电网的谐波分布具有不确定性。为处理配电网谐波潮流计算中DG作为谐波源的不确定信息,以复仿射数代替点值,建立DG并网逆变器输出阻抗复仿射模型,该模型反映了直流侧电压源的不确定性对DG并网谐波电流的影响。在所提模型的基础上,改造传统确定性谐波潮流算法,提出含多DG配电网的不确定谐波潮流计算方法分析DG不确定性对谐波潮流的影响。采用典型33节点配电网算例进行仿真,与确定性分析方法计算结果的对比验证了所提方法的有效性和应用价值。

关键词:分布式电源;配电网;复仿射;并网逆变器;谐波潮流

中图分类号:TM 464;TM 744

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.001

0 引言

随着国民经济的发展,用电负荷急剧增长,集中式发电模式越来越暴露出需远距离输送、网络损耗大等弊端,加之我国对分布式发电的政策支持,越来越多的分布式电源(DG)如微型燃气轮机、燃料电池、光伏发电和风力发电等接入配电网中。DG在缓解能源危机、提高能源综合利用效率等方面潜力巨大,但同时也为配电网带来了许多问题,例如,大多DG均需通过AC/AC或DC/AC变换器接入配电网中,功率调节系统也包含大量电力电子装置,这些电力电子设备的操作会引起电网电流、电压发生畸变,造成配电网谐波污染^[1-2],而且DG出力所具有的随机性、间歇性,导致其谐波注入电流具有不确定性,使得配电网谐波分析也更加复杂。

当前对谐波问题的研究主要分为时域仿真方法和频域分析方法^[3],前者主要是通过仿真软件分析谐波影响,后者主要是利用谐波潮流计算得到谐波分布。现有许多仿真软件可以用来进行谐波分析,文献[4-5]分别利用MATLAB和PSS/ADEPT对逆变型DG并网逆变器和配电网进行了建模和仿真,讨论了DG接入对配电网谐波特性的影响。文献[6]采用ATP-EMTP软件对含微型燃气轮机的配电系统进行谐波仿真分析,用恒流谐波电流源来模拟微型燃气轮机。

利用谐波潮流计算分析DG带给配电网的谐波影响也是一种非常有效的手段。文献[7]建立了DG的谐波计算模型,利用解耦法进行配电网谐波潮

流计算,可以处理含有多个DG的系统。但是这些文献忽略了DG与配电网的谐波交互作用和并网逆变器大多采用脉宽调制(PWM)控制方式这一情况,仅将DG建模为恒流源进行基波潮流计算和谐波潮流计算。文献[8]所提的DG逆变器输出阻抗模型,考虑了控制方式等因素,能较好地模拟并网电流,计及并网逆变器与系统的谐波交互作用。但目前的应用仅限于通过其传递函数对某一节点的谐波进行分析,还不能从整个系统的角度进行谐波潮流计算。文献[9]在DG并网逆变器输出阻抗模型传递函数的基础上推导了对应的频域模型,并将其应用到谐波潮流计算中。

以上含DG配电网的谐波潮流计算都是确定性的,并未考虑DG以及配电网中负荷变动等不确定因素对谐波潮流的影响。文献[10]指出谐波源注入电网的谐波电流直接取决于负荷状态,负荷状态的不确定将直接导致谐波源所产生的谐波电流的不确定,进而影响配电网的谐波分布情况。光伏、风电等DG并网,由于一次能源本身具有间歇性和随机性的特点,并网节点功率亦具有较大的不确定性,文献[11-13]指出光伏、风电等DG的并网谐波电流含量与其注入功率有较大关系。由此可见负荷、DG的不确定性会对系统谐波产生较大影响,传统的确定性谐波潮流算法已经难以满足其要求。

相比于传统的确定性谐波潮流计算而言,不确定性谐波潮流计算方法表征内容更加丰富、准确,能更全面和准确地描述电力系统中随机性因素对谐波潮流分布的影响,更符合谐波潮流研究的实际需要。针对不确定性谐波潮流计算,核心是如何处理不确定性信息,目前主要有3类方法:概率谐波潮流、模糊谐波潮流和区间谐波潮流。文献[14]提出了一种谐波概率潮流分析方法,根据样本数据的高阶矩构造估计点,得到电网支路谐波电流的期望、方差等统计信息,进而求得电网各支路谐波电流的分布范

收稿日期:2017-09-08;修回日期:2018-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377115);国家电网公司科技项目(52039916000H)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377115) and the Science and Technology Project of SGCC(52039916000H)

围。文献[15]建立了 DG 的概率模型,并提出含 DG 的配电网谐波概率潮流。文献[16]利用最大熵原理进行谐波发射量的概率密度函数拟合,并结合半不变量法进行谐波概率潮流计算。文献[17]提出了小规模样本仿真与非参数概率密度估计法相结合的谐波概率潮流分析方法,得到了谐波源对电网影响的概率分析结果。文献[18]考虑了 DG 的谐波随机性,利用随机谐波潮流计算分析了 DG 的谐波影响。文献[19]提出总谐波畸变值的概率密度函数的概念,通过概率谐波潮流计算得到了各节点总谐波畸变值的概率密度函数。文献[20]通过将风速模糊化得到了双馈风机的模糊功率特性,提出了风机的谐波模糊模型,并通过模糊谐波潮流计算分析了双馈风机对配电网谐波的影响。但是这些不确定性谐波潮流计算方法需要建立在谐波源具体信息已知的条件下,而实际配电网中谐波源的概率分布函数、模糊分布函数并不容易得到。文献[21-22]考虑负荷不确定性,提出了配电系统三相不确定谐波潮流的前推回代仿射方法。

为了分析多 DG 不确定性对配电网谐波潮流的影响,本文在文献[9]所提出的 DG 并网逆变器模型的基础上,考虑 DG 不确定性因素,建立了 DG 并网逆变器输出阻抗复仿射模型,并将所建立的模型应用于谐波潮流算法中,进行了含多 DG 配电网的不确定谐波潮流计算与分析。

1 DG 并网逆变器输出阻抗复仿射模型

以图 1 所示的单相电流单环反馈控制的电压型并网逆变器为例,下文将详细地介绍输出阻抗复仿射模型的建立方法。

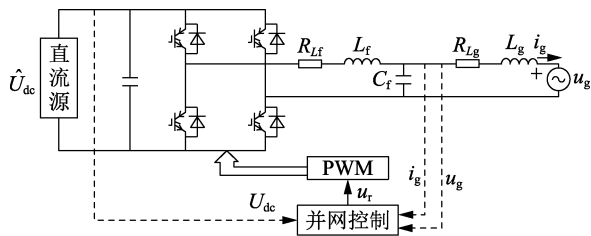


图 1 单相电流单环反馈控制的电压型并网逆变器系统图

Fig.1 Structure of voltage-type grid-connected inverter with single-phase current loop feedback control

图 1 中, u_r 为调制信号; R_{Lf} 、 L_f 与 C_f 构成 LC 滤波器, R_{Lg} 为电感电阻; R_{Lg} 与 L_g 构成系统阻抗; i_g 为并网电流; u_g 为电网电压; U_{dc} 为直流侧的电压源, 其物理意义代表 DG 能够接入电网的电能, 其大小有可能会随着 DG 的变化而产生波动, 并非定值, DG 在实际运行中受光照、风速、气温等环境因素影响, 出力具有较大的不确定性, 导致 U_{dc} 也是不确定的, 从而对并网逆变器的输出阻抗模型产生影响, 进而影响 DG 并网谐波电流和系统谐波分布。

以文献[9]并网逆变器输出阻抗模型为例, 在已有模型的基础上, 分别考虑 $90\%U_{dc}$ 和 $110\%U_{dc}$ 的情况, 其对应的阻抗波特图如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 对于该并网逆变器, 3 种情况的幅值曲线随着 U_{dc} 的降低会有所下移, 但相差不大, 几乎重合; 相角曲线差异明显。对于不同的控制方式, U_{dc} 变化的影响方向、程度或有不同, 但应该重视这种影响。

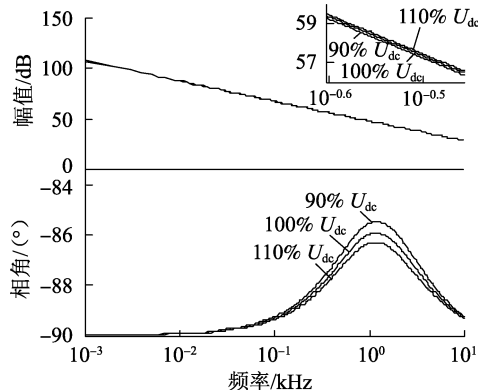


图 2 不同直流输出电压下并网逆变器输出阻抗波特图

Fig.2 Bode plot of output impedance of grid-connected inverter for different U_{dc} values

由于环境因素对并网逆变器的 U_{dc} 之外的其他参数影响很小, 所以这里只考虑 U_{dc} 的不确定性, 将其表示为仿射数的形式:

$$\hat{U}_{dc} = U_{dc0} + \tilde{U}_{dc} \varepsilon_{dc} \quad (1)$$

其中, 复仿射量 $\hat{U}_{dc}$ 用以表示并网逆变器直流输出电压的变化范围; U_{dc0} 为直流输出电压的预测值; ε_{dc} 为直流输出电压的噪声元; $\tilde{U}_{dc}$ 为噪声元系数。

针对图 1 所示的并网逆变器开关模型, 将开关状态在一个开关周期内进行平均运算, 得到如图 3 所示的单相并网逆变器平均模型。

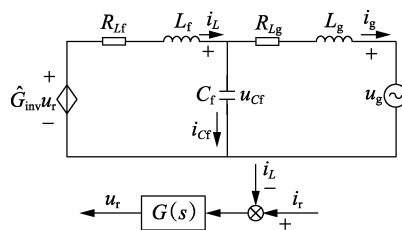


图 3 单相电流单环反馈控制电压型并网逆变器平均模型

Fig.3 Average model of voltage-type grid-connected inverter with single-phase current loop feedback control

图 3 中, i_L 为并网逆变器的输出电流; i_r 为逆变器并网电流的给定值; i_{Cf} 为滤波电容电流; u_{Cf} 为对应的滤波电容电压; $\hat{G}_{inv}$ 为用复仿射数学表示的 PWM 逆变桥线性增益的不确定性, 可通过式(2)求取。

$$\hat{G}_{inv} = \frac{\hat{U}_{dc}}{U_{cm}} \quad (2)$$

其中, U_{cm} 为载波幅值。

$G(s)$ 为电流单环反馈控制的传递函数,采用比例积分(PI)控制,如式(3)所示。

$$G(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (3)$$

其中, K_p 、 K_i 为 PI 调节器系数。

图 3 的单相并网逆变器平均模型对应的系统控制结构框图如图 4 所示,图中, $Z_{Cf} = 1/(sC_f)$, $Z_{Lf} = R_{Lf} + sL_{Lf}$, $Z_g = R_{Lg} + sL_{Lg}$ 。

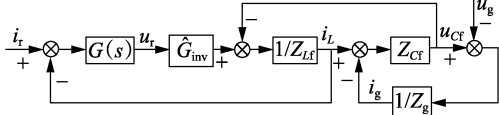


图 4 单相电流单环反馈并网逆变器系统控制结构框图

Fig.4 Block diagram of single-phase current loop feedback control for grid-connected inverter

对图 4 在运行点附近进行小信号分析,得到如图 5 所示的并网逆变器输出阻抗模型。

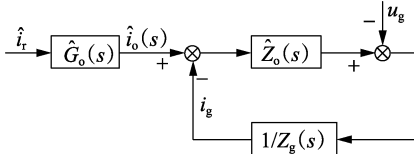


图 5 单相电流单环反馈控制并网逆变器输出阻抗复仿射模型

Fig.5 Complex affine model of output-impedance of grid-connected inverter with single-phase current loop feedback control

图 5 中,输出阻抗模型中的输出阻抗复仿射值和输出电流复仿射值可分别表示为:

$$\hat{Z}_o(s) = \frac{Z_{Cf}Z_{Lf} + Z_{Cf}\hat{G}_{inv}G(s)}{Z_{Cf} + Z_{Lf} + \hat{G}_{inv}G(s)} \quad (4)$$

$$\hat{i}_o(s) = \hat{i}_r \hat{G}_o(s) = \hat{i}_r \frac{G(s)\hat{G}_{inv}}{Z_{Lf} + G(s)\hat{G}_{inv}} \quad (5)$$

其中, $\hat{i}_r$ 为参考电流的复仿射值。

2 含多 DG 配电网的不确定谐波潮流算法

基于上文介绍的 DG 并网逆变器的输出阻抗复仿射模型,通过文献[18]所提算法对含多 DG 的配电网谐波分布及 DG 并网电流质量进行分析。电网中各点的谐波电压随着新的谐波源的接入会发生变化。在实际电网中, DG 接入后,会在节点谐波电压的作用下产生注入谐波电流,进而影响各节点的谐波电压, DG 注入谐波电流又会随之改变,直至 DG 与电网相互作用平衡,达到新的谐波分布。这种电网与 DG 的相互作用能通过谐波潮流的前推计算电流与回代计算电压 2 个过程体现,具体算法流程如图 6 所示,图中 $\hat{B}_{hj-1j}$ 为节点 $j-1$ 到节点 j 的线路谐波电流, Ω_j 为节点 j 所连支路的集合, Z_{hj-1j} 为节点 $j-1$

和节点 j 之间的线路阻抗。

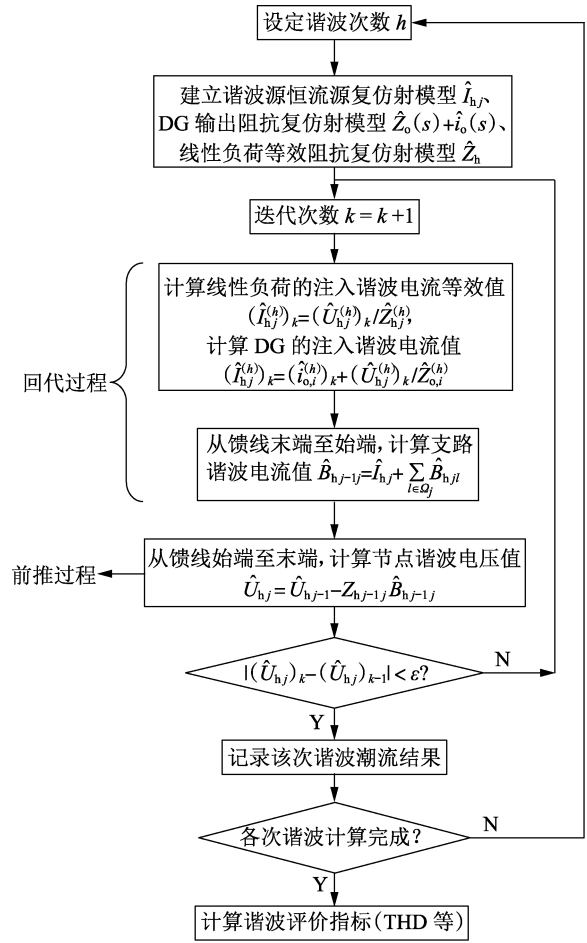


图 6 含 DG 配电网的不确定谐波潮流算法流程图

Fig.6 Flowchart of uncertain harmonic power flow algorithm for distribution system with DG

由于 DG 的注入谐波电流直接取决于并网点谐波电压的大小,因此根据每次迭代获得的谐波电压计算该次迭代中 DG 的注入谐波电流,如此往复,直至收敛。节点 i 处的 DG 在第 h 次谐波的第 k 次迭代中的注入电流复仿射值可表示为:

$$(\hat{I}_{hi}^{(h)})_k = (\hat{i}_{o,i}^{(h)})_k + \frac{(\hat{U}_{hi}^{(h)})_k}{\hat{Z}_{o,i}^{(h)}} \quad (6)$$

其中, $\hat{i}_{o,i}^{(h)}$ 为并网逆变器诺顿模型中的受控电流源复仿射值,它取决于逆变器采用的控制策略,一般与并网电压波形有关; $\hat{Z}_{o,i}^{(h)}$ 为并网逆变器输出阻抗在第 h 次谐波的阻抗复仿射值; $(\hat{U}_{hi}^{(h)})_k$ 为节点 i 在第 h 次谐波的第 k 次迭代中的谐波电压复仿射值。

3 算例分析

以典型 33 节点配电系统为例对算法进行分析,算例中除 DG 以外的谐波源设定为六脉波变频器 VFD(Variable Frequency Drive),并且按照六脉波变频器典型频谱进行恒流源建模。DG 采用电流单环反馈控制并网逆变器并网,并假设参考电流 i_r 中不

包含系统电压的谐波,额定情况下其输出阻抗波特图为图2中 $100\%U_{dc}$ 的情况。在此基础之上考虑除DG以外谐波源节点功率 $\pm 20\%$ 的不确定性,并网逆变器 U_{dc} 分别假设 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 以及 $\pm 10\%$ 的不确定性。谐波源和DG在算例中的接入位置如图7所示。

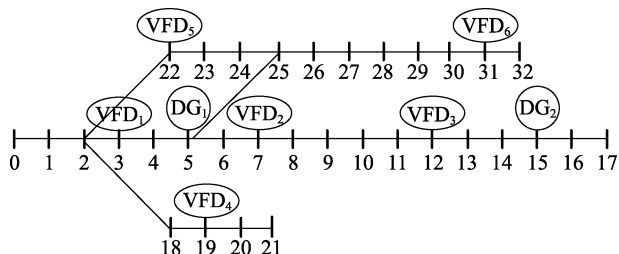


图7 33节点配电网示意图

Fig.7 Schematic diagram of 33-bus distribution network

为了说明本文所提出的DG并网逆变器复仿射模型能有效计及DG不确定因素对配电网谐波分布的影响,将DG并网逆变器按照文献[9]确定性的方法以及本文所提出的复仿射方法分别进行建模,并进行谐波潮流计算分析。图8对比了复仿射输出阻抗模型在 U_{dc} 的 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 以及 $\pm 10\%$ 不确定性条件下和确定性输出阻抗模型计算结果各节点电压畸变

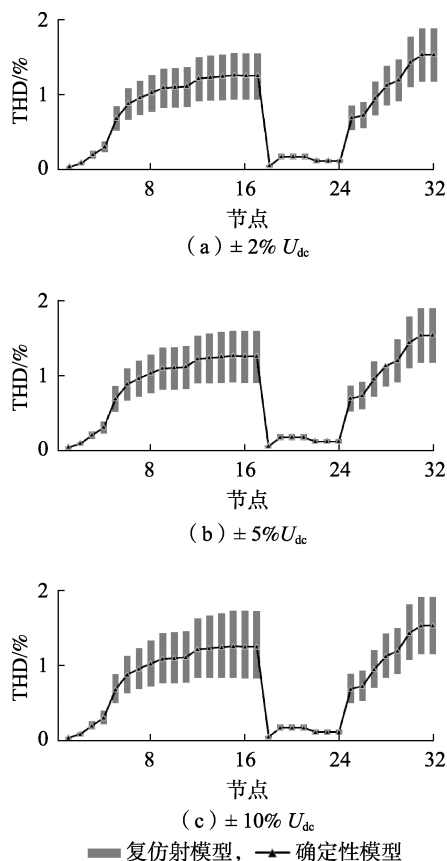


图8 复仿射模型与确定性模型各节点电压THD对比图

Fig.8 Comparison of THD of bus voltages between complex affine model and certain model

率。为了展示效果,复仿射模型计算结果通过仿射-区间数学转换,以区间数值形式绘制。

由图8可以看出,复仿射模型算得的结果能够完全包括确定性模型计算结果,这说明本文所提出的DG并网逆变器复仿射模型应用于谐波潮流计算是可行的,完备性也得以证明。利用确定性模型得到的配电网电压谐波畸变率在每个节点都是一个确定的数值,这只能体现DG在某一特定工作状态下配电网的谐波畸变情况。而复仿射模型所得结果是以区间的形式表现系统谐波分布的不确定性特征,比确定性模型更能合理地体现分布式电源作为不确定性谐波源对系统谐波水平的影响。由图8也可以看出,在 U_{dc} 分别为 $\pm 2\%$ 、 $\pm 5\%$ 以及 $\pm 10\%$ 的不确定性情况下,谐波潮流计算结果区间宽度有所变化,即能够将这种不确定信息体现出来。由于篇幅限制,下文主要针对 U_{dc} 的 $\pm 5\%$ 不确定性进行分析。

所提出的DG并网逆变器复仿射模型可以更好地反映并网逆变器的输出阻抗特性。图9绘制了复仿射建模下DG在并网节点5和节点15处的各次注入谐波电流,可以直观看出不同并网点电压不确定对DG注入配电网谐波电流不确定性的影响。

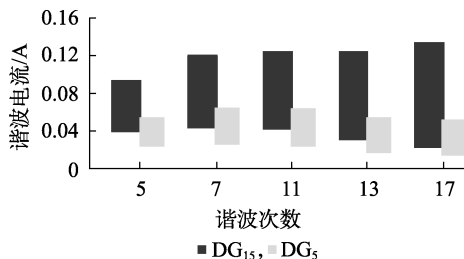


图9 复仿射建模方法下节点5与节点15并网谐波电流

Fig.9 Harmonic currents at Bus 5 and 15 with complex affine model

当多个DG接入同一个配电网时,除了DG与电网间的谐波交互作用以外,DG与DG之间也会通过电网产生相互影响,从而导致DG并网电流的谐波含量发生变化。为了分析对比DG接入位置和个数对谐波的影响,设计了DG接入位置的如下3种情形进行谐波潮流计算和分析。

- 情形1:单个DG接入节点9。
- 情形2:2个DG分别接入节点5和节点9。
- 情形3:3个DG分别接入节点5、节点9和节点16。

3种情形下对应的部分节点电压THD如图10所示。可见前2种情形中各节点电压THD相差不多,但情形3明显高于前2种情形。

为了说明多个DG间的相互影响,图11绘制了节点9处DG的各次注入谐波电流。

从图11中可以看出,节点9处DG的并网谐波电流大小、分量都发生了变化,随着配电网所接DG

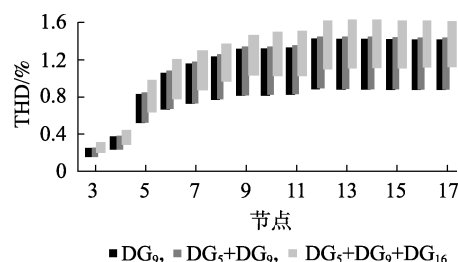


图 10 多个 DG 接入电网的各节点电压 THD 对比图

Fig.10 Comparison of voltage THD among different buses with multiple DGs integration

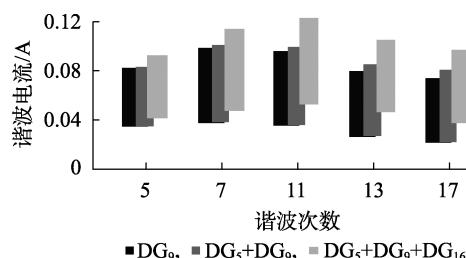


图 11 多个 DG 接入时节点 9 各次谐波电流

Fig.11 Harmonic currents at bus 9 with multiple DGs integration

数目的增加,节点 9 处 DG 的各次谐波电流大小有所增大,同时,各次谐波分量也发生了较大的变化。主要原因有两方面:第一,DG 的增多导致系统谐波水平提高;第二,DG 的增多对系统各次谐波分量有影响。再经电网与 DG 之间的交互作用,就能导致图 11 所示的情况。基于 DG 输出阻抗复仿射模型的谐波潮流算法能将多个 DG 联系起来,从而能够方便地分析它们之间的交互影响。

4 结论

本文考虑了 DG 出力随机性和间歇性导致其谐波特性具有的不确定性,基于复仿射数学提出了 DG 并网逆变器输出阻抗复仿射模型,通过详细的建模方法分析了环境不确定性对 DG 并网谐波电流的影响,进而结合不确定谐波潮流计算,分析了多 DG 不确定性对配电网谐波分布的影响,相比于确定性模型更能合理体现 DG 并网谐波电流特性和配电网谐波分布。通过典型 33 节点配电网算例将所提方法计算结果与确定性分析方法的计算结果进行对比,验证了所提方法在分析多 DG 不确定性对配电网谐波分布影响方面的可行性和应用价值。

基于所提 DG 并网逆变器输出阻抗复仿射模型的不确定性谐波潮流算法,能够同时考虑电网结构、电网背景谐波、DG 接入位置等多方面因素,充分考虑实际电网与 DG 的相互影响,有效地计算 DG 并网谐波电流、各节点谐波电压含量以及电网的谐波分布等信息,比基于 DG 谐波恒流源模型的确定性谐波潮流算法更符合实际,从而为含 DG 配电网的谐波治理、DG 准入功率的计算、含 DG 的电网规划等

多方面提供更合理的参考。

参考文献:

- [1] 裴玮,盛鹏,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.
- [2] 康龙云,郭红霞,吴捷,等. 分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J]. 电网技术,2010,34(11):43-47.
KANG Longyun, GUO Hongxia, WU Jie, et al. Characteristics of distributed generation system and related research issues caused by connecting it to power system [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 43-47.
- [3] 胡铭,陈珩. 电能质量及其分析方法综述[J]. 电网技术,2000,24(2):36-38.
HU Ming, CHEN Heng. Survey of power quality and its analysis methods [J]. Power System Technology, 2000, 24(2): 36-38.
- [4] 谢秉鑫,王宗,范士林. 分布式电源对于配电网谐波特性的影响[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(2):116-119,130.
XIE Bingxin, WANG Zong, FAN Shilin. Influence on harmonic characteristics of distributed network with distributed generations [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 116-119, 130.
- [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] KIRAWANICH P, O'CONNELL R M. Potential harmonic impact of microturbines on a commercial power distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 16(2): 1118-1123.
- [7] LADJAVARDI M, MASOUM M A S, ISLAM S. Impact of a SG non-linear model on the harmonic distribution of a distribution generation system [C] // Power Engineering Conference. Sydney, NSW, Australia; IEEE, 2008: 226-231.
- [8] WANG F, DUARTE J L, HENDRIX A M, et al. Modeling and analysis of grid harmonic distortion impact of aggregated DG inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 786-797.
- [9] ZAHNG Ying, WANG Shouxiang. Harmonic power flow analysis for distribution system with distributed generations [C] // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Shenzhen, China; [s.n.], 2014: 1565-1569.
- [10] BAGHZOUZ Y, BURCH R F, CAPASSO A, et al. Time-varying harmonics: part II-harmonic summation and propagation [J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(10): 64-64.
- [11] SCHOSTAN S, DETTMANN K D, DO THANH T, et al. Harmonic propagation in a doubly fed induction generator of a wind energy converter [C] // Compatibility and Power Electronics, 2009. CPE'09. Badajoz, Spain; IEEE, 2009: 101-108.
- [12] CHICCO G, SCHLABBACH J, SPERTINO A F. Characterisation and assessment of the harmonic emission of grid-connected photovoltaic systems [C] // IEEE Russia Power Tech. St. Petersburg, Russia; IEEE, 2005: 1-7.
- [13] BATRINU F, CHICCO G, SCHLABBACH J, et al. Impacts of grid-connected photovoltaic plant operation on the harmonic distortion [C] // IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, 2006. ME-

- LECON 2006. Malaga, Spain; IEEE, 2006; 861-864.
- [14] 余光正, 林涛, 徐遐龄, 等. 基于 $2m+1$ 点估计法的考虑风力发电接入时电力系统谐波概率潮流算法[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3260-3265.
- YU Guangzheng, LIN Tao, XU Xialing, et al. An algorithm based on $2m+1$ point estimate method for harmonic probabilistic load flow calculation of power systems incorporating wind power[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3260-3265.
- [15] 周星伯. 含分布式电源的配电网谐波概率潮流[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- ZHOU Xingbo. Harmonic probabilistic power flow of distribution network with distributed generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [16] 黄德华. 谐波潮流及概率谐波潮流研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- HUANG Dehua. Research on harmonic power load flow and probability harmonic power load flow[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [17] 李亚琼, 周胜军, 王同勋, 等. 基于优选宽带核密度估计的谐波概率潮流分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 131-136.
- LI Yaqiong, ZHOU Shengjun, WANG Tongxun, et al. Harmonic probabilistic power-flow analysis based on kernel density estimation with optimized bandwidth design[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 131-136.
- [18] 盛美卫. 考虑分布式电源谐波随机性的随机谐波潮流计算[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- SHENG Meiwei. Research on stochastic harmonic power flow with considering the randomness of harmonics generated by distributed generators[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [19] 张春杰, 贾清泉. 含双馈异步电机的概率谐波潮流计算[J]. 电力电子技术, 2011, 45(11): 108-111.
- ZHANG Chunjie, JIA Qingquan. Probabilistic harmonic load flow calculation containing doubly fed induction generator[J]. Power Electronics, 2011, 45(11): 108-111.
- [20] 吴杰, 颜秉超, 梁婷婷. 含双馈风机的配电网模糊谐波潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 72-76.
- WU Jie, YAN Bingchao, LIANG Tingting. Calculation of fuzzy harmonic load flow for distribution network with doubly fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 72-76.
- [21] 王守相, 张颖, 韩亮. 配电系统三相不确定谐波潮流的复仿射计算方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 41-46.
- WANG Shouxiang, ZHANG Ying, HAN Liang. A complex affine calculating method for three-phase uncertain harmonic power flow in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 41-46.
- [22] 张颖. 含 DG 配电网的不确定性谐波潮流计[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- ZHANG Ying. Uncertain harmonic power flow calculation for distribution system with DGs[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.

作者简介:



王守相

王守相(1973—),男,山东高密人,教授,博士,通信作者,研究方向为智能配电、分布式发电与微网(E-mail: sxwang@tju.edu.cn);

刘响(1992—),女,河北石家庄人,硕士,研究方向为配电系统谐波分析(E-mail: liuxiang337@tju.edu.cn);

张颖(1989—),女,辽宁大连人,硕士,研究方向为智能配电(E-mail: christinezhang-zh@126.com)。

Uncertainty modeling of multiple DGs and their influence on harmonic power flow in distribution network

WANG Shouxiang¹, LIU Xiang^{1,2}, ZHANG Ying²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: The variability and intermittency of DG (Distributed Generation) outputs result in the uncertainty of grid-connected harmonic current, and thus lead to the uncertainty of harmonic distribution in distribution network with DGs. To deal with the uncertainties of DGs as harmonic sources in harmonic power flow calculation, the complex affine is adopted to replace the point value, and a complex affine output-impedance model of grid-connected inverter of DGs is built, which reflects the influence of the uncertainty of DC-bus voltage source on the harmonic current of grid-connected DGs. Based on the proposed model, the traditional deterministic harmonic power flow method is improved, and an uncertain harmonic power flow calculation method for distribution network with multiple DGs is proposed to analyze the influence of the uncertainties of DGs on harmonic current. A typical 33-bus distribution network is used for simulation, and the comparison with the calculative results of deterministic analysis method verifies the effectiveness and practical value of the proposed method.

Key words: distributed power generation; distribution network; complex affine; grid-connected inverter; harmonic power flow