

基于优选带宽核密度估计的谐波概率潮流分析方法

李亚琼,周胜军,王同勋,雷林绪

(全球能源互联网研究院,北京 102209)

摘要:为解决蒙特卡罗法的计算效率问题,提出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。在对核密度函数的带宽选择进行优选设计的基础上,利用核密度估计法对小样本仿真得到的谐波潮流结果集进行概率密度估计,得到受影响电网节点的谐波含量的概率分布。利用 OpenDSS 配电网仿真工具对 IEEE 13 节点标准配电系统进行仿真实验,通过与蒙特卡罗法进行对比,验证了核密度估计方法的有效性和计算效率;与其他 2 种带宽选择方法的对比实验表明,所提带宽选择方法具备更好的带宽自适应性,且估计性能更优。

关键词:核密度估计;蒙特卡罗法;谐波概率潮流;非参数估计;OpenDSS

中图分类号:TM 711

文献标识码:A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.017

0 引言

由于非线性负荷的增多和分布式电源的发展,如何量化各类谐波源对电网的影响,成为一项重要的研究课题。由于谐波源的谐波注入量并非恒定不变,因此,确定性的谐波潮流计算往往不能反映谐波源对电网的真实影响。谐波概率潮流分析方法是解决此问题的有效手段之一,可针对谐波源发射量的不确定性,得出电网某节点谐波电压含有率或某支路谐波电流含量的概率统计值。

谐波概率潮流的主要分析方法包括解析法和蒙特卡罗法。解析法通过建立谐波源谐波注入量与对电网影响的谐波观测量之间的解析数学函数式,只需一次确定性的谐波潮流计算,得到电网谐波观测量的统计特征。如文献[1]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[2]考虑了分布式电源注入谐波随时间的变化,利用半不变量法结合 Gram-Charlier 级数展开进行时序随机谐波潮流计算。

蒙特卡罗法^[3-4]主要通过大规模的谐波注入量随机样本生成以及多次谐波潮流计算,评估谐波源对电网的影响。如文献[5-6]根据谐波源谐波输入量的概率分布,随机生成大规模样本,对每个样本进行确定性谐波潮流计算,得到输出变量如节点谐波电压含有率的概率统计值。文献[7]针对电力牵引负荷产生的随机谐波电流,采用蒙特卡罗法对其谐波电流特性进行分析,经过与实测统计值和采用中心极限定理的概率分析结果相比较,验证了仿真结果的可靠性。文献[8]通过由实测数据得出的风电场和单台机组的谐波电流概率分布特征,利用蒙特卡罗法对

风电场并网点谐波电流进行预测和评估,并进一步得到谐波电流叠加的极端情况的发生概率。文献[9]考虑了分布式电源注入谐波量的概率分布特性以及时间变化特性,结合马尔可夫链和蒙特卡罗法,建立了谐波电流概率评估模型。

此外,文献[10]在风电注入的谐波电流幅值和相角的概率分布未知的条件下,采用 $2m+1$ 点估计法,即根据注入量样本的高阶矩构造估计点,对其进行确定性谐波潮流计算,从而得到电网各支路谐波电流的统计特征。文献[11]利用谐波源恒流源复仿射模型来处理谐波源的不确定性,并建立了配电系统三相不确定谐波潮流的前推回代复仿射算法,得到以置信区间表征的电网谐波水平评估。

现有的谐波概率分析方法中,解析法的计算效率较高,但对于大规模电网系统,很难得到输入的谐波发射随机变量和输出的谐波影响随机变量之间的解析关系式,故此方法不适用于大规模电网系统。蒙特卡罗法通过大规模仿真,可无限接近真实电力系统的实际情况,但其计算量较大,对于大规模电网系统同样不适用。

本文在蒙特卡罗法的基础上,通过小规模谐波潮流仿真与优选带宽的非参数概率密度估计相结合的方法,进行谐波概率潮流计,得到谐波源对电网影响的概率分析结果,在保证精度的前提下减少了计算量,克服了现有方法不适用于大规模电网系统的问题。

1 基于优选带宽核密度估计的谐波概率潮流计算方法

1.1 谐波概率潮流计算

本文提出将小规模样本仿真与核密度估计相结合进行谐波概率潮流计算,具体方法包括以下 4 个步骤:

收稿日期:2017-01-24;修回日期:2017-06-28
基金项目:国家电网公司科技项目(SGRI-DL-71-15-008)
Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(SGRI-DL-71-15-008)

a. 针对每个谐波源,建立其谐波注入量的概率分布模型;

b. 根据此概率分布模型,随机生成有限个谐波注入量的随机数据样本;

c. 针对由每个谐波注入量的随机数据样本构成的电网系统,进行一次确定性谐波潮流计算,从而得到与样本数量相同的谐波潮流结果集;

d. 根据步骤 c 得到的谐波潮流结果集,利用优选带宽的核密度估计法,计算得出电网中各谐波输出的概率分布函数。

其中,步骤 a 中的谐波注入量由谐波源模型确定。非线性负荷的谐波模型可表示为恒流谐波源或诺顿等效电路^[12-13];分布式电源可建模为恒定谐波电压源^[14]。此外,若将谐波源表示为恒流谐波源,其谐波电流的幅值和相角均可表征为符合某种概率分布的随机变量^[15]。

步骤 d 中基于优选带宽的核密度估计法将在 1.2 节详细叙述。此外,为反映谐波源对电网的影响,步骤 d 中的电网中各谐波输出量可包括电网某节点的谐波电压含有率或某支路的谐波电流含量。

1.2 优选带宽的核密度估计法

核密度估计(kernel density estimation)是一种非参数概率估计方法^[16],即对数据的概率分布函数形式不做先验设定,依靠数据本身特征估计其概率分布模型。文献[17]利用核密度估计对光伏的输出功率建立了概率模型,并对比了不同地区不同日照条件下的光伏输出分布特征。

在核密度估计法中,拟估计的概率密度函数的一般形式为:

$$\hat{f}(x;h)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N K(x,X_i;h) \quad (1)$$

其中, x 为待估计的自变量; $\hat{f}$ 为概率密度函数; N 为数据样本个数; X_i 为第 i 个采样值; K 为核函数; h 为核函数的带宽。核函数的选取须满足对称性、规范性和衰减性要求,因此,常用的核函数包括高斯函数、Epanechnikov 函数、三角函数、双带宽函数等。文献[16]通过实验证明,核函数的选取对估计的效果影响不大,而带宽 h 的选取对核密度估计的效果有重要影响。这一结论已得到大多数学者的认可^[4,18-19]。

本文拟使用高斯函数作为核函数,即:

$$K(x,X_i;h)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}h}e^{-(x-X_i)^2/(2h)} \quad (2)$$

对于带宽的选取,可进行多次实验寻优,或以最小化平均积分平方误差 MISE(Mean Integrated Squared Error)为目标,通过不同的最优化方法给出。本文采用循环递进的最优带宽估计方法^[20],主要由以下步骤构成。

a. 将最优带宽的估计值记为 $\hat{h}$, l 为循环次数, $l>1$, 首先,利用下式计算 $\hat{h}_{l+1}$:

$$\hat{h}_{l+1}=\left[\frac{1+1/2^{(l+1.5)}}{3}\frac{1\times3\times5\times\cdots\times(2l+1)}{N\sqrt{\pi/2}\|\hat{f}^{(l+2)}\|^2}\right]^{2/(5+2l)} \quad (3)$$

其中, $\|\hat{f}^{(l+2)}\|^2$ 为由 N 个数据样本的均值和方差组成的高斯密度函数的模平方。

b. 利用 $\hat{h}_{l+1}$ 计算 $\|\hat{f}^{(l+1)}\|^2$:

$$\|\hat{f}^{(l+1)}\|^2=\frac{(-1)^{l+1}}{N^2}\sum_{k=1}^N\sum_{m=1}^N K^{(2l+2)}(X_k,X_m;2\hat{h}_{l+1}) \quad (4)$$

c. 利用 $\|\hat{f}^{(l+1)}\|^2$ 计算 $\hat{h}_l$:

$$\hat{h}_l=\left[\frac{1+1/2^{(l+0.5)}}{3}\frac{1\times3\times5\times\cdots\times(2l-1)}{N\sqrt{\pi/2}\|\hat{f}^{(l+1)}\|^2}\right]^{2/(3+2l)} \quad (5)$$

d. 循环进行步骤 b、c,即利用 $\hat{h}_l$ 计算 $\hat{h}_{l-1}$,直到得到 $\hat{h}_2$ (即 $l=1$ 时的带宽),将其作为最优带宽的估计值。最后,将 $\hat{h}_2$ 代入式(1)和式(2),即得到拟估计的概率密度函数 $\hat{f}$ 。

为验证上述带宽选取方法,本文将利用其他 2 种带宽设计方法进行对比实验:一种是较常使用的嵌入法^[21];另一种是 Shimazaki^[22]提出的带宽设计法。

嵌入法^[21]建立在将未知分布假设为高斯分布的基础上,所得到的带宽形式如下:

$$\hat{h}=\left(\frac{4\sigma^5}{3N}\right)^{1/5} \quad (6)$$

其中, σ 为采样值的标准差。

此外,Shimazaki^[22]通过对 MISE 的分解,定义了以带宽 h 为自变量的目标代价函数:

$$c(h)=\frac{1}{N^2}\sum_{i,j}\psi(X_i,X_j)-\frac{2}{N^2}\sum_{i\neq j}K(X_i-X_j) \quad (7)$$

$$\psi(X_i,X_j)=\int_a^b K(X-X_i)K(X-X_j)dX \quad (8)$$

其中, $[a,b]$ 为数据样本的取值范围。通过对式(7)中的代价函数进行最小化,计算得到带宽的最优解。

2 IEEE 13 节点仿真分析

为验证本文提出的方法,利用 OPENDSS 配电网仿真工具^[23-25]和 MATLAB 软件,对 IEEE 13 节点标准配电网系统开展仿真实验,见图 1。

如图 1 所示,假设在公共连接点 680 上有非线性负荷谐波源 H_1 、 H_2 接入,均向电网注入服从正态分布的 3 次谐波电流。其中,负荷 H_1 注入的 3 次谐波电流的有效值服从均值为 29 A、方差为 15 A² 的正态分布;负荷 H_2 注入的 3 次谐波电流的有效值服从均值为 25 A、方差为 10 A² 的正态分布。为考虑两谐波源谐波注入量的相关性,将两谐波源的谐波电流有效值的相关系数设为 0.3。不考虑相角间相关性,即两谐波源的谐波电流相角均设为 0。

为对本文提出的谐波概率潮流分析方法进行仿

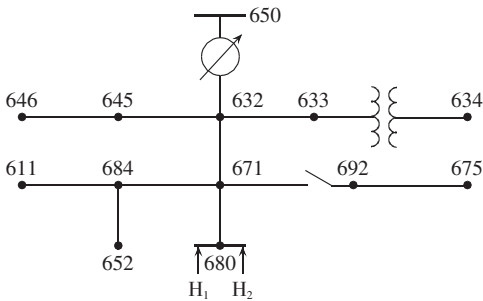


图 1 IEEE 13 节点标准配电网系统及谐波源接入点示意图

Fig.1 Schematic diagram of standard IEEE 13-bus distribution system and harmonic source access

真,根据两谐波源谐波电流有效值的概率分布,生成有限个随机数据样本(分别对样本数量为 200 个与 400 个的情况进行结果分析),相应进行多次确定性谐波潮流计算。在公共连接点 680 处监测谐波电压畸变,记录每次得到的此处 3 次谐波电压含有率,再应用核密度估计方法,得到公共连接点 680 处谐波电压含有率的累积概率分布函数。

为验证本文所提方法的有效性,利用大规模仿真(10000 次),即蒙特卡罗法,进行结果对比。仿真所用处理器配置为 Intel Core i5-3470 3.2 GHz。

表 1 给出了 3 种核密度估计方法得出的最优带宽值。带宽值越大,估计出的密度曲线越趋于平滑,可掩盖被估计数据本身存在的某些局部特征。相较于 400 次仿真,200 次仿真数据由于数据规模小,其本身密度曲线波动更严重且局部特征明显,比如其密度曲线在谐波电压含有率 2.5×10^{-4} 处存在凹陷,如图 2 所示(在 400 次仿真及蒙特卡罗密度曲线中不存在)。在 3 种核密度估计方法中,本文方法在对 400 次仿真数据进行估计时使用的带宽最小,而对 200 次仿真数据进行估计时使用的带宽最大,即在一定程度上更加弱化了局部特征,由此反映了本文带宽选择方法具备更好的自适应性。

表 1 不同核密度估计方法得到的最优带宽
Table 1 Optimal bandwidths obtained by different kernel density estimation methods

仿真次数	方法	最优带宽	仿真次数	方法	最优带宽
200	嵌入法	3.791×10^{-5}	400	嵌入法	3.854×10^{-5}
	Shimazaki	3.564×10^{-5}		Shimazaki	3.970×10^{-5}
	本文方法	4.108×10^{-5}		本文方法	3.438×10^{-5}

图 2、图 3 分别给出了仿真次数 200 次、400 次时,利用不同带宽选择设计的核密度估计法所得到的概率密度函数曲线,并与未做核密度估计得到的密度曲线及蒙特卡罗法(10000 次仿真)得到的直方图进行了对比。

由图 2、图 3 可见,未经核密度估计时得到的密度曲线存在明显波动,且 200 次仿真比 400 次仿真

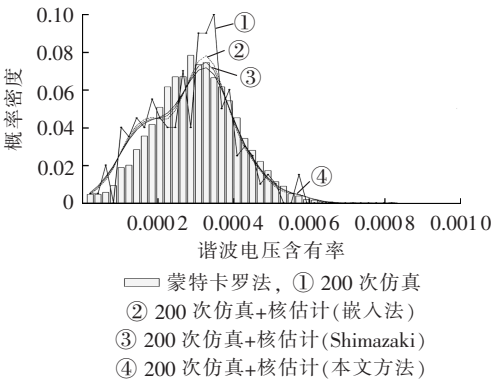


图 2 200 次仿真及运用不同核密度估计得到的概率密度曲线与蒙特卡罗法(10000 次仿真)得到的直方图的对比
Fig.2 Probabilistic density curves by different kernel density estimation methods based on 200 simulations, compared with histogram by Monte Carlo method based on 10000 simulations

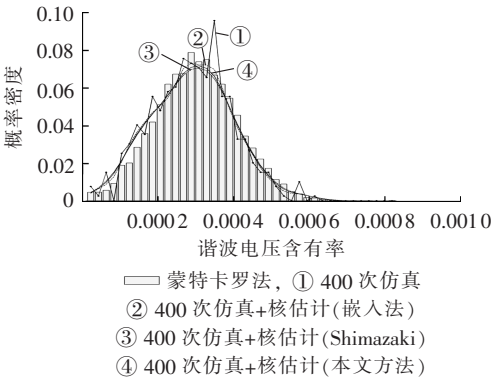


图 3 400 次仿真及运用不同核密度估计得到的概率密度曲线与蒙特卡罗法(10000 次仿真)得到的直方图的对比
Fig.3 Probabilistic density curves by different kernel density estimation methods based on 400 simulations, compared with histogram by Monte Carlo method based on 10000 simulations

的密度曲线波动性更为严重。在运用 3 种核密度估计方法后,所得到的概率密度曲线的光滑度均显著提高。

图 4、图 5 分别给出了在仿真次数 200 次、400 次时未使用和使用不同带宽选择设计的核密度估计方法得到的累积概率分布曲线。未使用核密度估计时,概率分布曲线光滑度差,且出现了较大波动。在使用核密度估计方法后,概率分布曲线更为光滑且更接近蒙特卡罗法。通过图 4、图 5 中的局部放大图可见,在 200 次、400 次仿真次数下,本文方法比嵌入法和 Shimazaki 方法更贴近蒙特卡罗概率曲线,表现了更优秀的拟合效果。

表 2 给出了不同仿真次数、不同核密度估计方法得出的谐波电压含有率 95% 概率值。可以看出,较未使用核密度估计时,3 种核密度估计方法的 95% 概率值更接近蒙特卡罗法,且本文方法在 3 种核密度估计方法中最为接近。

利用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫 K-S(Kolmogorov-

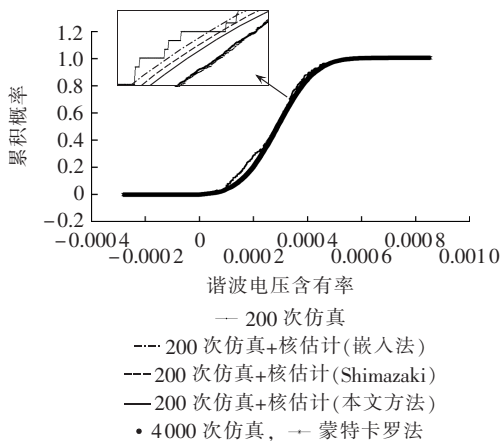


图 4 200 次仿真及运用不同核密度估计与蒙特卡罗法得到的累积概率分布的对比

Fig.4 Cumulative probability distributions by different kernel density estimation methods based on 200 simulations, compared with that by Monte Carlo method

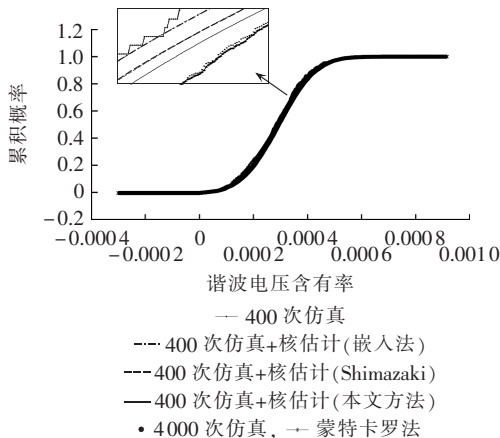


图 5 400 次仿真及运用不同核密度估计与蒙特卡罗法得到的累积概率分布的对比

Fig.5 Cumulative probability distributions by different kernel density estimation methods based on 400 simulations, compared with that by Monte Carlo method

表 2 不同仿真次数及不同核密度估计方法的 95% 概率值及 K-S 检验结果

Table 2 Values of 95% probability and K-S test results of different kernel density estimation methods based on different simulation times

仿真次数	方法	95% 概率值	K-S 检验结果
200	未使用估计	4.455	0.0380
	嵌入法	4.597	0.0180
	Shimazaki	4.635	0.0160
	本文方法	4.666	0.0150
400	未使用估计	4.505	0.0287
	嵌入法	4.567	0.0097
	Shimazaki	4.653	0.0090
	本文方法	4.621	0.0085
4000		4.713	0.0050
	蒙特卡罗法	4.702	—

Smirnov)^[26-28]对不同仿真次数及不同核密度估计方法进行对比。对由蒙特卡罗法得到的 10000 个数据样本进行排序,再按等取值区间的方式分成 M 组。将第 m 组样本数占样本总数的比例,即实际频率记作

F_m ,将通过核密度估计得到的此区间的理论频率值记为 $\hat{F}_m$,则 K-S 检验统计量 D 的计算公式如下:

$$D = \max_{m=1,2,\dots,M} |F_m - \hat{F}_m| \tag{9}$$

统计量 D 的取值越小,表明拟合优度越高。

表 2 给出了不同核密度估计方法的 K-S 拟合优度检验结果。利用核密度估计比未利用时的拟合优度有明显提高。同时,在 3 种核密度估计方法中,本文方法相较其他 2 种方法的检验统计量取值最小,表明拟合优度最高。

此外,核密度估计法比蒙特卡罗法的计算效率更高。例如,对 400 次仿真数据,利用本文方法进行估计,K-S 检验值由 0.0287 降至 0.0085(占原值 29.6%),比 400 次仿真多耗时 0.06 s;而采用 4000 次仿真的方法,K-S 检验结果降至 17.4%,却多耗时 46.9 s,表 2 不同仿真次数及不同核密度估计方法的计算时间见表 3。

表 3 不同仿真次数及不同核密度估计方法的计算时间

Table 3 Computation times of different kernel density estimation methods based on different simulation times

仿真次数	方法	时间/s
200	未使用估计	3.79
	嵌入法	3.81
	Shimazaki	3.82
	本文方法	3.82
400	未使用估计	5.12
	嵌入法	5.16
	Shimazaki	5.20
	本文方法	5.18
4000		52.02
	蒙特卡罗法	128.01

综上,通过对最优带宽值的对比,本文选取的带宽随数据规模呈现了更明显的变化,在数据规模小时趋向于光滑掉局部特征,在数据规模大时趋向于保留局部特征,表明本文方法相较其他 2 种带宽选择方法更具自适应性;通过对概率密度和累积概率分布曲线的比较得出,核密度估计的加入使概率曲线更光滑且更接近蒙特卡罗法,其中,本文方法在 3 种带宽选择方法中最接近蒙特卡罗法;通过对 95% 概率值和 K-S 拟合优度检验结果的对比可见,采用核密度估计后得到的概率值更准确,拟合效果更优,其中,本文方法在 3 种带宽选择方法中,拟合优度检验结果最好;最后,通过计算时间的对比,表明核密度估计方法在明显提高估计精确度的基础上,未明显增加计算量,相比大规模仿真,节省了大量计算时间。

3 结论

针对谐波源谐波发射量的随机性对电网造成的

不确定性影响,本文提出了将小规模样本仿真与优选带宽的核密度估计相结合的谐波随机潮流分析方法。为验证方法的有效性,在IEEE 13节点标准馈线网络上进行了不同规模的仿真分析,计算得出在谐波源谐波注入电流有效值服从某种概率分布时,受影响的公共连接点处谐波电压含有率的概率分布特征,并将本文的带宽设计与另外2种方法进行了实验对比。通过对带宽选取、概率曲线、95%概率值、K-S拟合优度检验的对比,表明在小规模样本仿真基础上采用核密度估计的方法,能够提高概率分布曲线的光滑度和准确度,且本文所用的带宽选取方法相较于其他2种方法更具自适应性,且所得到的概率曲线更接近蒙特卡罗法,拟合优度检验更优。此外,利用核密度估计方法,在提高估计性能的同时,并未显著增加计算量,相较于蒙特卡罗法节省了大量的计算时间,从而更适用于大规模电力系统分析。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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 harmonics power flow with considering the randomness of harmonics generated by distributed generators[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2013.
- [3] 陈激,李凯红,温吉华. 相对论高次谐波的蒙特卡罗模拟[J]. 强激光与粒子束,2000,12(1):87-90.
CHEN Ji,LI Kaihong,WEN Jihua. Monte Carlo simulation of relativistic high harmonics[J]. High Power Laser and Particle Beams,2000,12(1):87-90.
- [4] NASRFARD-JAHROMI F,MOHAMMADI M. Probabilistic harmonic load flow using an improved kernel density estimator[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2016,78:292-298.
- [5] YU H,CHUNG C Y,WONG K P,et al. Probabilistic load flow valuation with hybrid Latin hypercube sampling and Cholesky decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(2):661-667.
- [6] MORALES J M,BARINGO L,CONEJO A J,et al. Probabilistic power flow with correlated wind sources[J]. IET Proceedings on Generation,Transmission and Distribution,2010,4(5):641-651.
- [7] 李晓军. 基于蒙特卡罗方法的牵引负荷谐波电流分析[D]. 保定:华北电力大学,2009.
LI Xiaojun. Harmonic analysis of loads in electrified railways based on Monte Carlo method[D]. Baoding:North China Electric Power University,2009.
- [8] 王嘉毅. 风电场谐波数据分析及其谐波模型研究[D]. 上海:上海电机学院,2016.
WANG Jiayi. Research on harmonic data analysis and harmonic model in wind farm[D]. Shanghai:Shanghai Dianji University,2016.
- [9] 张喆. 含分布式电源的配电系统电能质量概率评估[D]. 北京:华北电力大学,2013.
ZHANG Zhe. Power quality probabilistic evaluation on distribution system with considering distributed generators[D]. Beijing:North China Electric Power University,2013.
- [10] 余光正,林涛,徐迟龄,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.
- [11] 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):41-46,110.
WANG Shouxiang,ZHANG Ying,HAN Liang. Complex affine calculation method for three-phase uncertain harmonic currents in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(7):41-46,110.
- [12] HAO C C,TANG Y J,SHI J. Study on the harmonic impact of large scale electric vehicles to grid[J]. Applied Mechanics & Materials,2013,443:273-278.
- [13] 刘晓璇,李建文,李永刚,等. 基于诺顿等效电路的多谐波源责任划分研究[J]. 电测与仪表,2015,52(17):79-83.
LIU Xiaoxuan,LI Jianwen,LI Yonggang,et al. Quantifying harmonic responsibilities of multiple harmonic sources based on Norton equivalent model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2015,52(17):79-83.
- [14] 邢晓敏,钱智妮,庞健. 分布式电源不同接入点对配电网谐波特性的影响[J]. 东北电力大学学报,2016,36(2):14-18.
XING Xiaomin,QIAN Zhini,PANG Jian. Influence on harmonic characteristics of distributed network with distributed generations[J]. Journal of Northeast Dianli University,2016,36(2):14-18.
- [15] 贾秀芳,张韶光,华回春,等. 部分线性核估计方法在谐波责任分摊问题中的应用[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):63-68.
JIA Xiufang,ZHANG Shaoguang,HUA Huichun,et al. Application of partial linear kernel estimation method in harmonic responsibility allocation[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(3):63-68.
- [16] EPANECHNIKOV V A. Nonparametric estimation of a multidimensional probability density[J]. Theory of Probability and Application,1969,14:153-158.
- [17] 颜伟,任洲洋,赵霞,等. 光伏电源输出功率的非参数核密度估计模型[J]. 电力系统自动化,2013,37(10):35-40.
YAN Wei,REN Zhouyang,ZHAO Xia,et al. Probabilistic photovoltaic power modeling based on nonparametric kernel density estimation[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(10):35-40.
- [18] SHIRAHATA S,CHU I S. Integrated squared error of kernel-type estimator of distribution function[J]. Ann Inst Stat Math 1992,44:579-91.
- [19] 郭照庄,霍东升,孙月芳. 密度核估计中窗宽选择的一种新方法[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2008,26(3):401-403.
GUO Zhaozhuang,HUO Dongsheng,SUN Yuefang. A new bandwidth selection for kernel density estimation[J]. Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition),2008,26(3):401-403.

- [20] BOTEV Z I, KROESE D P. Kernel density estimation via diffusion [J]. Annals of Statistics, 2010, 38(5): 2916-2957.
- [21] SILVERMAN B W. Density estimation for statistics and data analysis [M]. London, UK: Chapman and Hall, 1986: 34-60.
- [22] HIDEAKI S, SHIGERU S. Kernel bandwidth optimization in spike rate estimation [J]. Journal of Computer Neuroscience, 2010, 29: 171-182.
- [23] EPRI. Introduction to the OpenDSS [EB/OL]. [2017-06-28]. <http://electricdss.svn.sourceforge.net/>. 2012.
- [24] 李鹏, 孙充勃, 王成山, 等. 基于 OpenDSS 的智能配电网仿真与模拟平台及其应用 [J]. 中国电力, 2013, 46(11): 12-16.
LI Peng, SUN Chongbo, WANG Chengshan, et al. Simulation platform of intelligent distribution system based on OpenDSS [J]. Electric Power, 2013, 46(11): 12-16.
- [25] 钱佳琦, 江岳文. 计及配电网节点边际容量成本的多类型分布式电源规划 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 94-99.
QIAN Jiaqi, JIANG Yuewen. Multi-type distributed generator planning considering locational marginal capacity cost of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 94-99.
- [26] 元民勇, 董金新. 基于卡方拟合优度检验的序列等概率性测试组 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(5): 1757-1760.
QI Minyong, DONG Jinxin. Test suite for sequence equal probability based on chi-square goodness of fit test [J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(5): 1757-1760.

- [27] 徐怡悦, 吴在军, 王洋, 等. 基于正交级数的光伏电源输出功率概率模型 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 61-65, 79.
XU Yiyue, WU Zaijun, WANG Yang, et al. Probabilistic modeling based on orthogonal series for PV power output [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 61-65, 79.
- [28] 杨振海, 程维虎, 张军舰. 拟合优度检验 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 30-42.

作者简介:



李亚琼

李亚琼(1984—), 女, 山东聊城人, 工程师, 博士, 研究方向为电能质量与电力数据分析 (**E-mail**: liyaqiong@geiri.sgcc.com.cn);

周胜军(1969—), 男, 湖南长沙人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统分析、电能质量及其治理技术等 (**E-mail**: zhshj@geiri.sgcc.com.cn);

王同勋(1977—), 男, 山东菏泽人, 教授级高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统分析、电能质量及其治理技术等 (**E-mail**: txwang@geiri.sgcc.com.cn);

雷林绪(1965—), 男, 陕西宝鸡人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等 (**E-mail**: leilinxu@geiri.sgcc.com.cn)。

Harmonic probabilistic power-flow analysis based on kernel density estimation with optimized bandwidth design

LI Yaqiong, ZHOU Shengjun, WANG Tongxun, LEI Linxu

(Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: A method of harmonic probabilistic power-flow analysis combining the small-scale sample simulation with the non-parametric probability density estimation is proposed to solve the computational efficiency problem of Monte Carlo method. The kernel density estimation method with the optimally designed bandwidth selection of kernel density function is adopted to estimate the probabilistic density of the harmonic power-flow set achieved by the small-scale sample simulation for obtaining the harmonic probability distribution of affected nodes. Simulation is performed based on OpenDSS for Standard IEEE 13-bus distribution system and the results are compared with those by the Monte Carlo method to verify the effectiveness and efficiency of the proposed method. The comparative experiment shows that, the proposed bandwidth selection method has better bandwidth adaptability and estimation performance than other two bandwidth selection methods.

Key words: kernel density estimation; Monte Carlo methods; harmonic probabilistic power-flow; non-parametric estimation; OpenDSS