

多谐波源同次谐波叠加计算方法

华回春¹, 郑璐¹, 王莉², 贾秀芳¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003;
2. 国网河南省电力公司检修公司, 河南省郑州市 450000)

摘要: 在相角未知条件下, 国家标准中采用系数估算的方法进行谐波叠加计算, 效果往往并不理想。在谐波叠加理论分析的基础上, 文中构造了基于核密度估计与重要抽样的蒙特卡洛方法, 用以计算多谐波源的同次谐波叠加电流。首先, 运用核密度估计法可以计算谐波电流相角的概率密度函数, 且通过重要抽样方法可对其进行抽样并得到核样本数据。再利用蒙特卡洛方法结合核样本数据对谐波叠加的交叉项进行估算, 最终确定出谐波叠加电流的计算公式。仿真分析与实际算例表明, 所提算法可获得更为精确的谐波叠加电流估计量, 并可以简单高效地应用于多谐波源系统的谐波叠加中。

关键词: 谐波叠加; 蒙特卡洛法; 核密度估计; 重要抽样

0 引言

以风力发电和太阳能光伏发电为主的新能源大规模开发利用正在世界范围内蓬勃兴起, 在此背景下, 中国制定了国家能源发展战略行动计划(2014—2020 年), 要求大幅度增加风电、太阳能等新能源消费比重, 到 2020 年非化石能源占一次能源消费比重力争达到 15%。大规模接入电网的风电机组和光伏发电机组会给电力系统带来不可忽视的谐波问题, 谐波限值分配是新能源并网的关键技术研究课题之一^[1-2]。

为了把电网中的谐波控制在允许范围内, 国家技术监督局制定并发布了中国谐波国家标准 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》^[3]。目前, 国内试行的风电和光伏发电在并网点处的谐波电压要求直接沿用上述标准^[3], 谐波注入电流限值分配也是照搬谐波国家标准的方法。谐波限值分配过程中需要考虑两个谐波源的同次谐波电流在同一条线路的叠加方法, 谐波国家标准在进行限值分配的时候采用的是谐波叠加系数方法。但从谐波国家标准执行的现状来看, 该方法仍然存在很大的争议。争议的焦点主要是谐波叠加系数是在一定的分布假设下得到的^[4-8], 而不同的谐波源可能具有不同的谐波分布特性^[9]。作为新能源的风电和光伏发电是出现

在电源侧的大宗谐波源, 本身具有其独特的谐波分布特性。此外, 风电和太阳能发电在不同并网点也可能具有不同的谐波分布规律, 因此难以获得统一的分布规律假设。在分布未知的情况下, 蒙特卡洛方法可以很好地逼近分布规律, 并已成功应用于计量不确定度的计算领域^[10]。本文将研究基于蒙特卡洛方法的谐波叠加方法, 用于解决在分布未知情况下谐波源的谐波叠加计算。首先, 讨论了理想的谐波叠加公式; 然后, 提出了基于核密度估计与重要抽样的蒙特卡洛方法, 用于计算多谐波源的谐波叠加电流; 最后, 分别用仿真算例和实测数据验证了本文所提的方法。

1 理想的谐波叠加公式

负荷谐波幅值和相角受到多种因素的影响, 会不断地发生改变, 故幅值和相角具有随机性。因此, 引进随机变量的概念, 对谐波进行描述, 并进一步分析多谐波源同次谐波叠加的特性。

谐波叠加示意图如图 1 所示, i_1 和 i_2 表示复平面上的两个独立随机变量, 其含义为幅值和相角随机变化的两个谐波源的某同次谐波分量。

根据图 1, 可以得到:

$$i_t = \sum_{k=1}^2 i_{kt} (\cos \varphi_{kt} + j \sin \varphi_{kt}) \quad (1)$$

式中: i_{kt} 为复平面上第 k 个随机变量的即时有效值; φ_{kt} 为复平面上第 k 个随机变量相角的即时值; i_t 为两个随机向量和的即时值。

收稿日期: 2015-11-10; 修回日期: 2016-04-12。

上网日期: 2016-08-16。

中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014MS164)。

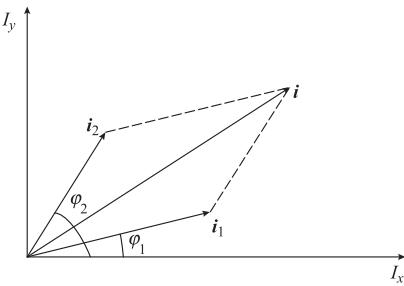


图 1 谐波叠加示意图

Fig.1 Schematic diagram of harmonic superposition

根据式(1),两个随机变量即时和的模值的平方为:

$$|\mathbf{i}_t|^2 = \left(\sum_{k=1}^2 i_{kt} \cos \varphi_{kt} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^2 i_{kt} \sin \varphi_{kt} \right)^2 = \sum_{k=1}^2 i_{kt}^2 + 2i_{1t}i_{2t} \cos(\varphi_{1t} - \varphi_{2t}) \quad (2)$$

对式(2)求数学期望,可以得到:

$$E(|\mathbf{i}_t|^2) = E\left(\sum_{k=1}^2 i_{kt}^2\right) + 2E(i_{1t}i_{2t} \cos(\varphi_{1t} - \varphi_{2t})) \quad (3)$$

即

$$I^2 = \sum_{k=1}^2 I_k^2 + 2E(i_{1t}i_{2t} \cos(\varphi_{1t} - \varphi_{2t})) \quad (4)$$

式中: I 和 I_k 均表示电流有效值。

根据概率论原理,独立随机变量积的数学期望等于各变量数学期望之积,故式(4)可以表示为:

$$I^2 = \sum_{k=1}^2 I_k^2 + 2E(i_{1t})E(i_{2t})E(\cos(\varphi_{1t} - \varphi_{2t})) = \sum_{k=1}^2 I_k^2 + 2I_1 I_2 E(\cos(\varphi_{1t} - \varphi_{2t})) = \sum_{k=1}^2 I_k^2 + 2I_1 I_2 E(\cos(\varphi_1 - \varphi_2)) \quad (5)$$

上式可以等价转化为:

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^2 I_k^2 + 2I_1 I_2 E(\cos(\varphi_1 - \varphi_2))} \quad (6)$$

式(6)即为两个同次谐波电流的叠加公式,对于两个以上的同次谐波电流叠加,首先将两个谐波电流叠加,再与第3个谐波电流相叠加,以此类推。

理想条件下,假设 φ_1 与 φ_2 均是在 $[0, 2\pi]$ 内服从均匀分布的随机变量,记 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$,推导得到 φ 的概率密度函数为:

$$f(\varphi) = \begin{cases} \frac{\varphi + 2\pi}{4\pi^2} & \varphi \in [-2\pi, 0) \\ \frac{-\varphi + 2\pi}{4\pi^2} & \varphi \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (7)$$

进而可以得到:

$$E(\cos \varphi) = E \cos(\varphi_1 - \varphi_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos \varphi f(\varphi) d\varphi = 0 \quad (8)$$

将上式结果代入式(6),并推广到 n 个随机变量谐波电流的叠加情况,可以得到理想条件下同次谐波叠加的计算公式如下:

$$I_h = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{hk}^2} \quad (9)$$

式中: I_{hk} 为谐波源 k 的第 h 次谐波电流有效值; I_h 为第 h 次总谐波电流有效值。

根据式(9)可以知道,理想的谐波叠加电流忽略了谐波分量的相角信息,这种条件下谐波叠加电流的计算结果往往不够准确。

目前,国家标准给出了在相角未知的条件下,两个谐波源的同次谐波电流在一条线路的同一相的叠加公式,即

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + K_h I_{h1} I_{h2}} \quad (10)$$

式中: I_{h1} 为谐波源 1 的第 h 次谐波电流; I_{h2} 为谐波源 2 的第 h 次谐波电流;系数 K_h 按表 1 选取。

表 1 系数 K_h 的取值
Table 1 Values of coefficient K_h

h	K_h	h	K_h
3	1.62	11	0.18
5	1.28	13	0.08
7	0.72	9 或大于 13 或偶次	0

在某些电力系统中,由式(10)计算得到的谐波叠加电流与实际情况存在一定的偏差。为了更合理地计算谐波叠加电流,本文构造了基于核密度估计与重要抽样的蒙特卡洛方法,并推广应用到谐波叠加计算中,通过仿真分析与实际算例加以分析验证。

2 谐波叠加的计算方法

记 $f(\varphi) = \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$,由式(5)可以知道,同次谐波叠加电流的关键在于对 $E(f(\varphi))$ 的计算。由于 $f(\varphi)$ 服从的概率分布未知,故无法确定 $E(f(\varphi))$ 的理论推导结果,因此构造基于核密度估计与重要抽样的蒙特卡洛数值方法,对 $f(\varphi)$ 的数学期望进行数值估算。蒙特卡洛方法计算同次谐波叠加电流的步骤如下。

步骤 1: 根据给定的两组谐波源第 h 次谐波电流相角数据集合 $\{\varphi_1^1, \varphi_2^1, \dots, \varphi_n^1\}$ 与 $\{\varphi_1^2, \varphi_2^2, \dots, \varphi_n^2\}$,利用核密度估计法^[11-15] 分别计算其概率密度函数 \hat{f}_1 与 \hat{f}_2 。

步骤 2: 利用重要抽样方法^[16-19] 分别对 \hat{f}_1 与 \hat{f}_2 进行抽样,得到核样本数据 $\{\varphi_{(1)}^1, \varphi_{(2)}^1, \dots, \varphi_{(M)}^1\}$

与 $\{\varphi_{(1)}^2, \varphi_{(2)}^2, \dots, \varphi_{(M)}^2\}$ 。

步骤 3: 根据蒙特卡洛方法^[20-21], 结合谐波叠加的推导公式(式(6)), 设定蒙特卡洛方法模型计算公式为 $f(\varphi) = \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ 。将步骤 2 的核样本数据 $(\varphi_{(i)}^1, \varphi_{(i)}^2), i=1, 2, \dots, M$ 代入模型公式, 得到计算结果 $\{f_1, f_2, \dots, f_M\}$, 进一步得到 $E(f(\varphi))$ 的估算结果, 如式(11)所示。

$$E(f(\varphi)) = E(\cos(\varphi_1 - \varphi_2)) \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_i \quad (11)$$

步骤 4: 估算结果 $E(f(\varphi))$ 代入式(6), 得到同次谐波叠加电流估算公式, 如式(12)所示。

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^2 I_k^2 + 2I_1 I_2 \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_i} \quad (12)$$

步骤 1 中概率密度函数的计算方法如下。

设 $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$ 为某谐波源第 h 次谐波电流相角的数据集合, 则相角 φ 的概率密度函数为:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{L} k \left(\frac{\varphi - \varphi_i}{L} \right) \quad (13)$$

式中: $k(\cdot)$ 为核函数; L 为窗宽; n 为样本容量。

选取高斯核作为核函数:

$$k(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad -\infty < x < +\infty \quad (14)$$

窗宽的计算公式为:

$$L = cn_d^{-\frac{1}{5}} \quad (15)$$

式中: n_d 为不同样本的个数 ($n_d \leq n$); c 为常数, 通常取值为 1, 根据样本数可以不断调整。

步骤 2 中的重要抽样方法过程如下。

过程 1: 从 $\{1, 2, \dots, n\}$ 中均匀产生一个离散的随机整数 λ 。

过程 2: 若 $\lambda = i$ ($i=1, 2, \dots, n$), 则选取第 i 个分量核函数 $k_i(\cdot)$ 来产生一个样本。 $k_i(\cdot)$ 的形式如式(16)所示。

$$k_i(\cdot) = \frac{1}{L} k \left(\frac{\varphi - \varphi_i}{L} \right) \quad (16)$$

由于式(16)与正态分布 $N(\varphi_i, L)$ 的概率密度相同, 可以采用变换抽样法对式(16)进行抽样。详细步骤如下。

1) 产生两个独立均匀分布的随机变量^[22-23] u 和 v 。

2) 将 u 和 v 变换为标准正态分布的随机变量 s 和 t :

$$\begin{cases} s = \sqrt{-2 \ln u} \cos(2\pi v) \\ t = \sqrt{-2 \ln u} \sin(2\pi v) \end{cases} \quad (17)$$

3) 将 s 变换为满足标准正态分布 $N(\varphi_i, L)$ 的随机变量, 即

$$\varphi = Ls + \varphi_i \quad (18)$$

过程 3: 重复过程 1 和过程 2, 直到得到 M 个样本 $\{\varphi_{(1)}, \varphi_{(2)}, \dots, \varphi_{(M)}\}$ 。

3 仿真分析

采用 IEEE 14 节点标准测试系统进行仿真验证, 系统示意图如图 2 所示。测试系统由 2 台发电机组、3 台同步调相机、14 条母线、15 条输电线路、3 台变压器组成, 其中谐波源 HL1 与 HL2 接于母线 11 处。

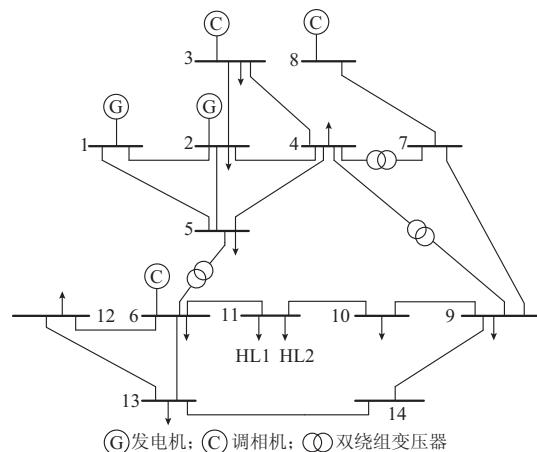


图 2 IEEE 14 节点系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of IEEE 14-bus system

本文以母线 11 为关注母线, 计算 HL1 与 HL2 在母线 11 处的 5 次谐波叠加电流。分别测量谐波源 HL1 支路与 HL2 支路的瞬时电流值。每 3 s 取一个有效值作为一个采样点, 经快速傅里叶变换(FFT)后, 得到 HL1 支路和 HL2 支路的 5 次谐波电流测量值, 测量结果见附录 A 图 A1 和图 A2。

利用本文构造算法, 得到 $E(\cos(\varphi_1 - \varphi_2))$ 的估算结果为 0.845 2, 谐波源 HL1 与 HL2 的 5 次谐波叠加系数为 $2 \times 0.845 2$, 代入式(12), 得到 5 次谐波叠加电流计算公式如下:

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^2 I_k^2 + 2 \times 0.845 2 I_1 I_2} \quad (19)$$

HL1 与 HL2 的 5 次谐波叠加电流的计算结果如图 3 所示, 可以看出基于核密度估计与重要抽样的蒙特卡洛方法计算得到的谐波叠加电流曲线与实际谐波叠加电流曲线基本吻合, 而根据国家标准计算得到的谐波叠加电流与实际谐波叠加电流存在一定偏差。国家标准法和蒙特卡洛方法计算得到的谐

波叠加电流的平均相对误差分别为 5.60% 和 0.33%。

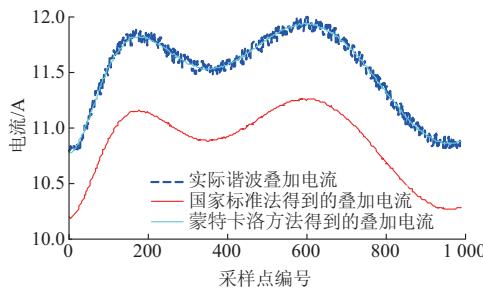


图 3 5 次谐波叠加电流计算结果

Fig.3 Calculation results for the 5th harmonic superposition current

4 实测数据验证

4.1 轧钢厂实测数据验证

实测数据来自某轧钢厂, 厂内主变压器为 220 kV/110 kV, 2 个测试点分别为钢厂进线处以及 110 kV 母线处, 其中第 2 个谐波源为等效负荷。轧钢厂测试系统主接线图如图 4 所示。利用 Fluke1760 采集测试点的电能质量数据, 3 s 记录一个点, 分别记录两组谐波源电流的幅值和相位各 220 组数据。两个谐波源 5 次谐波电流数据见附录 A 图 A3 与图 A4, 可以看出谐波源的谐波电流变化剧烈。

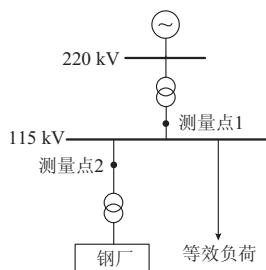


图 4 轧钢厂测试系统主接线图

Fig.4 Main wiring diagram of test system in rolling mill

5 次谐波叠加电流的计算结果如图 5 所示, 其中图 5(a) 为 5 次谐波电流叠加结果整体图, 图 5(b) 为 5 次谐波电流叠加结果局部图。从图 5(b) 中可以看出, 实际谐波叠加电流曲线与本文所构造的蒙特卡洛方法得到的曲线基本重合, 即可证明本文构造算法的有效性, 谐波叠加系数为 2×0.9987 , 得到 5 次谐波叠加电流的计算公式如式(20)所示。国家标准法和蒙特卡洛方法计算得到的谐波叠加电流的平均相对误差分别为 7.47% 和 0.013%。

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^2 I_k^2 + 2 \times 0.9987 I_1 I_2} \quad (20)$$

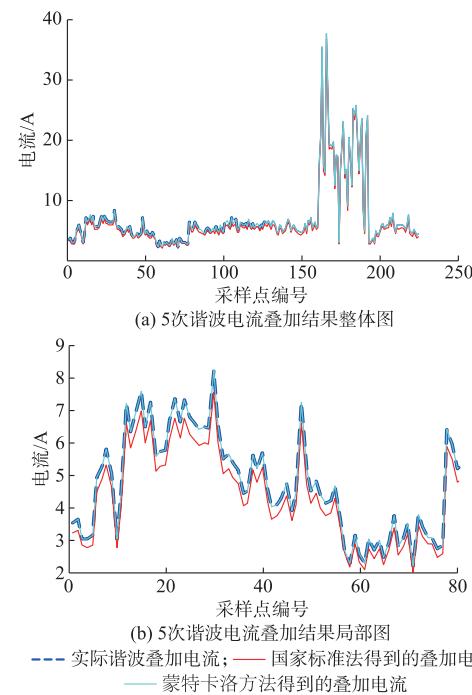


图 5 轧钢厂实测数据谐波叠加电流计算结果

Fig.5 Calculation results for harmonic superposition current of measured data in rolling mill

4.2 风力发电实测数据验证

以中国某风力资源丰富地区的实际风电网为研究对象, 系统图如图 6 所示。对于双馈风力发电机组, 运行过程中机组的变流器始终处于工作状态, 因此需要考虑双馈发电机组的谐波电流干扰问题。采集 2 台双馈风力发电机组的谐波电流数据各 300 组, 其中电流的幅值和相位见附录 A 图 A5 和图 A6, 可以看出谐波源的谐波电流变化缓慢。

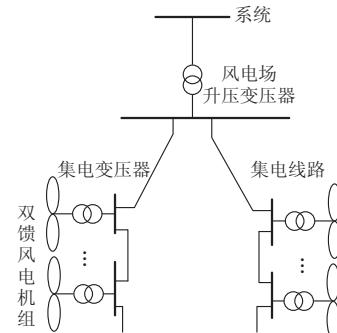


图 6 风电厂测试系统接线图

Fig.6 Wiring diagram of test system in wind power plant

5 次谐波叠加电流的计算结果如图 7 所示, 图中实际谐波叠加电流曲线与本文所构造的蒙特卡洛

方法得到的曲线基本重合,同样可证明本文构造算法的有效性,谐波叠加系数为 2×0.9794 。国家标准法和蒙特卡洛方法计算得到的谐波叠加电流的平均相对误差分别为8.70%和0.51%。

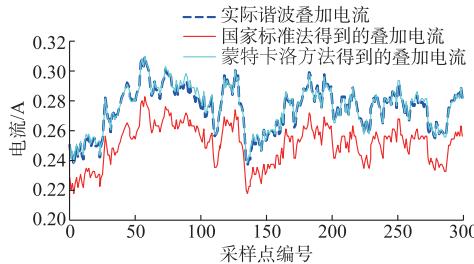


图7 风力发电实测数据谐波叠加电流计算结果
Fig.7 Calculation results for harmonic superposition current of measured data in wind power plant

5 结论

1)本文对同次谐波电流叠加公式进行了推导,提出了基于核密度估计与重要抽样的蒙特卡洛方法,用以解决在相角分布未知情况下的谐波电流叠加计算问题。

2)采用核密度估计方法计算相角的概率密度函数,再对概率密度函数进行重要抽样获得相角的核样本数据,这种处理方式得到的核样本数据相对于原始数据更具有统计规律特性,即核样本数据往往来源于原始样本中出现频率较高的数据,这使核样本数据可以有效地包含相角分布的特征信息,进而结合蒙特卡洛方法可以实现对同次谐波叠加电流的精确计算。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

- [1] 杨洪耕,张瑾,张一中.电力用户谐波限值的评估方法[J].四川大学学报(工程科学版),2000,32(5):82-85.
YANG Hongeng, ZHANG Jing, ZHANG Yizhong. Assessment approach of harmonic emission limits from customers in supply network[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, 32(5): 82-85.
- [2] 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.DOI:10.7500/AEPS20131214002.
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. DOI: 10.7500/AEPS20131214002.
- [3] 电能质量 公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S].1993.
- [4] 分布式电源接入电网技术规定:Q/GDW 480—2010[S].2010.
- [5] 张晶.多谐波源系统谐波叠加方法的研究[J].电网技术,1995,19(3):23-27.
ZHANG Jing. Studies of harmonics superposition method in multi-harmonic sources system[J]. Power System Technology, 1995, 19(3): 23-27.
- [6] XIAO Y, YANG X. Harmonic summation and assessment based on probability distribution[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(2): 1030-1032.
- [7] EMANUEL A E, ORR J A, CYGANSKI D. A survey of harmonic voltages and currents at the customer's bus[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(3): 1632-1638.
- [8] BAGHZOUA Y, BURCH R F, CAPASSO A. Time-varying harmonic: Part II harmonic summation and propagation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1): 279-285.
- [9] 解绍锋,李群湛.电气化铁道牵引负荷谐波发射限值[J].西南交通大学学报,2007,42(3):367-372.
XIE Shaofeng, LI Qunzhan. Emission limits to harmonics of electrified railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(3): 367-372.
- [10] 用蒙特卡洛法评定测量不确定度:JJF 1059.2—2012[S].2012.
- [11] 赵渊,沈智健,周念成,等.基于序贯仿真和非参数核密度估计的大电网可靠性评估[J].电力系统自动化,2008,32(6):14-19.
ZHAO Yuan, SHEN Zhijian, ZHOU Niancheng, et al. Reliability assessment of bulk power systems utilizing sequential simulation and nonparametric kernel density estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 14-19.
- [12] 赵渊,张夏菲,周家启.电网可靠性评估的非参数多变量核密度估计负载模型研究[J].中国电机工程学报,2009,29(31):27-33.
ZHAO Yuan, ZHANG Xiafei, ZHOU Jiaqi. Nonparametric multivariate kernel density estimate load model of reliability evaluation of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 27-33.
- [13] AU S K, BECK J L. A new adaptive importance sampling scheme for reliability calculations[J]. Structural Safety, 1999, 21(2): 135-158.
- [14] 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.
- [15] SPECKMAN P. Kernel smoothing in partial linear models[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1988, 50(3): 413-436.
- [16] 宋晓通,谭震宇.改进的重要抽样法在电力系统可靠性评估中的应用[J].电网技术,2005,29(13):56-59.
SONG Xiaotong, TAN Zhenyu. Application of improved importance sampling method in power system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 56-59.
- [17] 王晓滨,郭瑞鹏,曹一家,等.电力系统可靠性评估的自适应分

- 层重要抽样法[J].电力系统自动化,2011,35(3):33-38.
 WANG Xiaobin, GUO Ruipeng, CAO Yijia, et al. A self-adapting stratified and importance sampling method for power system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 33-38.
- [18] 王晓滨,郭瑞鹏,曹一家,等.用于系统可靠性评估的各阶故障独立重要抽样算法[J].中国电机工程学报,2011,31(16): 24-31.
 WANG Xiaobin, GUO Ruipeng, CAO Yijia, et al. Algorithm evaluating power systems reliability with separate importance sampling to each state subspace of different contingencies order [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 24-31.
- [19] 谢绍宇,王秀丽,王锡凡,等.自适应重要抽样技术在发输电系统可靠性评估中的应用[J].电力系统自动化,2010,34(5): 13-17.
 XIE Shaoyu, WANG Xiuli, WANG Xifan, et al. Application of adaptive importance sampling technique in reliability evaluation of composite generation and transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 13-17.
- [20] 李庚银,高亚静,周明.可用输电能力评估的序贯蒙特卡罗仿真法[J].中国电机工程学报,2008,28(25):74-79.
 LI Gengyin, GAO Yajing, ZHOU Ming. Sequential Monte Carlo simulation approach for assessment of available transfer capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 74-79.
- [21] 杨允,张士杰,肖云汉.蒙特卡罗法在分布式供能系统不确定性评价中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(2):16-23.
 YANG Yun, ZHANG Shijie, XIAO Yunhan. Application of Monte Carlo method in uncertainty evaluation for cogeneration systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(2): 16-23.
- [22] 杨振海,程维虎.非均匀随机数产生[J].数理统计与管理,2006, 25(26):750-756.
 YANG Zhenhai, CHENG Weihu. The common method of generating random number for the non-uniform distribution [J]. Application of Statistics and Management, 2006, 25(26): 750-756.
- [23] 杨振海,张国志.随机数生成[J].数理统计与管理,2006, 25(22):244-252.
 YANG Zhenhai, ZHANG Guozhi. Generating random variables[J]. Application of Statistics and Management, 2006, 25(22): 244-252.

华回春(1980—),男,通信作者,博士,主要研究方向:电能质量分析与评估。E-mail: huahuichun@126.com

郑璐(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向:电能质量分析与评估。E-mail: 649317090@qq.com

王莉(1976—),女,高级工程师,主要研究方向:电能质量分析与评估。

(编辑 蔡静雯)

Calculation Method for Same-order Harmonic Superposition of Multiple Harmonic Sources

HUA Huichun¹, ZHENG Lu¹, WANG Li², JIA Xiufang¹

1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China;

2. Maintenance Company of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In the case of unknown phase angle, the harmonic superposition calculation using the coefficient estimation method in the national standard is usually not ideal. According to the theory analysis of harmonic superposition, this paper develops a Monte Carlo method based on kernel estimate and important sampling to calculate the same-order harmonic current superposition of multiple harmonic sources. Firstly, the probability density function of harmonic current phase angle is calculated using the kernel density estimation and sampled by using the important sampling method to obtain the kernel sample data. Then, the Monte Carlo method and the kernel sample data are used to estimate the cross terms of harmonic superposition. Finally, the formula for harmonic current superposition is determined. Simulation analysis and actual examples show that the proposed algorithm can yield more accurate estimator of the superposition of harmonic current and be efficiently applied to the harmonic superposition of multiple harmonic source systems.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2014MS164).

Key words: harmonic superposition; Monte Carlo method; kernel density estimation; important sampling