

基于阻抗偏差最小判据和改进自适应蝙蝠算法的系统侧谐波阻抗估计方法

程卫健¹, 林顺富¹, 许亮峰¹, 刘持涛², 李东东¹, 符 杨¹

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司青浦供电公司, 上海 201700)

摘要:针对已有的系统侧谐波阻抗估计方法对背景谐波波动敏感的问题,提出了一种新的系统侧谐波阻抗估计方法。根据阻抗偏差最小判据和改进自适应蝙蝠算法寻优得到最优系统侧谐波阻抗初值,以得到与真实值相近的背景谐波电压估计值。对背景谐波电压估计值进行K-means聚类分析,并依据聚类结果将谐波样本数据分成多簇,使得每簇数据对应的背景谐波波动减少。考虑到谐波数据均为复数相量,采用复最小二乘法分别求取各簇数据的系统侧谐波阻抗估计值,并将其均值作为最终估计值。与已有的方法相比,所提方法更能适应背景谐波波动的变化,且在用户侧谐波阻抗非远大于系统侧谐波阻抗的场景下具有更好的估计精度。多个算例分析结果验证了所提方法的有效性和适用性。

关键词:系统侧谐波阻抗;背景谐波;阻抗偏差最小判据;改进自适应蝙蝠算法;聚类算法

中图分类号:TM 711

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205004

0 引言

随着电力系统中新能源渗透率的不断提高与非线性负荷的大量增加,谐波污染问题愈发严重,电力谐波已成为公共电网亟待解决的问题之一^[1-2]。为了实现电力谐波的有效治理,有必要合理量化供用电双方的谐波责任。而系统侧谐波阻抗估计是谐波责任划分的关键步骤之一,对于谐波治理具有重要意义^[3]。

典型的谐波阻抗估计方法包括波动量法^[4-5]、协方差法^[6]、盲源分离法^[7-9]、回归分析法^[10-12]等。以上方法多基于一定的前提,例如:①系统侧谐波阻抗在分析时段内恒定;②用户侧谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗;③背景谐波波动较小。随着现代电网新能源渗透率的不断增加,以上前提逐渐难以被满足。系统运行方式的改变、设备的投切和无功补偿方式的变化都可能导致系统侧谐波阻抗发生大幅度突变。当用户侧存在新能源并网时,由于并网侧多配置滤波器和无功补偿设备,可能导致用户侧谐波阻抗不再远大于系统侧谐波阻抗。此外,新能源的谐波发射具有更强的随机性和波动性,当系统侧存在

新能源并网时,背景谐波电压将具有更大的波动性。基于以上因素,系统侧谐波阻抗估计问题面临巨大的挑战。

文献[13]和文献[14]分别采用斜率比较法和小波变换模极大值法辨识阻抗突变的时间点,从而分段求解系统侧谐波阻抗,但这2种方法均未考虑背景谐波波动的影响。文献[15]筛选出谐波电压和电流间的弱相关时刻,从而削弱背景谐波波动的影响;文献[16]构造最小背景谐波波动能量目标函数,筛选出背景谐波波动最平稳的样本点,在此基础上估计系统侧谐波阻抗。但当背景谐波电压在分析时段内始终保持较大的波动时,这2种方法难以筛选出满足要求的样本点。文献[17]根据背景谐波电压的大小对谐波数据进行分组,使得每组数据对应的背景谐波波动平缓,比数据筛选类方法具有更大的适用范围。然而文献[17]的方法对公共连接点PCC(Point of Common Coupling)处的复数谐波相量进行实虚部分解,从而在实数域上求解系统侧谐波阻抗,不可避免地引入了一定误差;且该方法在寻优过程中采用固定步长寻优策略,易陷入局部最优解。文献[11]直接在复数域上求解系统侧谐波阻抗,避免了实虚部分解所带来的误差影响,但该方法所得估计值的准确性基于背景谐波恒定的前提。

考虑到系统侧谐波阻抗估计结果对背景谐波波动敏感和实虚部分开求解影响估计精度的问题,本文结合文献[11]和文献[17]的相关思想,直接在复数域对谐波数据进行分组并求取系统侧谐波阻抗;同时,考虑到寻优过程对系统侧谐波阻抗估计值的结果影响较大,采用改进自适应蝙蝠算法进行寻优操作。蝙蝠算法可实现全局搜索到局部搜索的自动

收稿日期:2021-06-23;修回日期:2022-03-08

在线出版日期:2022-04-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977127);上海市科学技术委员会资助项目(19020500800);上海市教育委员会和上海市教育委员会“曙光计划”资助项目(20SG52)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977127), Shanghai Municipal Science and Technology Commission(19020500800) and the “Shuguang Program” of Shanghai Education Development Foundation and Shanghai Municipal Education Commission(20SG52)

转换,具备模型简单、进化效率高、鲁棒性强等优点,被广泛应用于工程实践。改进自适应蝙蝠算法克服了标准蝙蝠算法后期收敛速度慢、易陷入局部最优等缺点,进一步提高了系统侧谐波阻抗估计的准确性。多个算例分析结果验证了本文所提方法的有效性和适用性。

1 方法原理

当仅关注单一谐波源的谐波发射问题时,可将关注用户等效为用户侧,其他部分都等效为系统侧,单用户谐波分析模型可以等效为图1所示的等效电路。图中: U_{pcc} 和 I_{pcc} 分别为PCC处的谐波电压和谐波电流; Z_s 和 Z_c 分别为系统侧和用户侧的等效谐波阻抗; U_s 为背景谐波电压; I_c 为用户侧等效谐波电流。

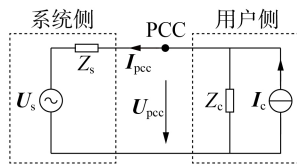


图1 谐波分析等效电路

Fig.1 Equivalent circuit for harmonic analysis

基于图1分析可得等效电路方程如式(1)所示。

$$U_{\text{pcc}} = I_{\text{pcc}} Z_s + U_s \quad (1)$$

基于式(1)构建回归方程,可通过回归分析法求解 Z_s ^[10]。由于式(1)中各变量均为复数,传统的回归分析法将式(1)按实虚部展开为2个方程,分别求解 Z_s 的实部和虚部。文献[18]指出,实虚部分开进行回归求解得到的使得各自方程误差平方和最小的最小二乘解并非原问题的整体最小二乘解。而在复数域直接进行回归计算,其回归结果误差模的平方和具有更小值。基于此,文献[11]采用复最小二乘法求解 Z_s ,其估计结果更接近真实值。复最小二乘法的计算步骤如下。

首先,将式(1)改写为式(2)所示的矩阵形式。

$$Y = AX \quad (2)$$

$$Y = U_{\text{pcc}}, A = [I_{\text{pcc}} \ 1], X = \begin{bmatrix} Z_s \\ U_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

回归系数矩阵 X 在复数域上的最小二乘解可由式(4)得到。

$$\hat{X} = \text{inv}(A^H A) A^H Y \quad (4)$$

式中: $\text{inv}(\cdot)$ 表示矩阵求逆运算;上标H表示共轭转置。

在得到回归系数的前提下,可由式(5)得到系统侧谐波阻抗估计值 $\hat{Z}_s$ 。

$$\hat{Z}_s = [1 \ 0] \hat{X} \quad (5)$$

复最小二乘法进一步提高了线性回归的估计精

度,但其准确求解的前提是分析时段内系统侧谐波阻抗和背景谐波电压值基本不变,而实际情况下背景谐波电压具有一定的波动性。当背景谐波电压波动较大时,该方法的计算结果与实际值偏差较大,难以满足实际应用需要。

考虑到背景谐波波动性对系统侧谐波阻抗估计的影响,若能将PCC谐波采样数据按照背景谐波电压的大小进行分组,使得每组数据的背景谐波电压值波动平缓,则各组数据采用复最小二乘法求得的系统侧谐波阻抗估计值将更接近真实值。由于在复数域内无法直接通过大小排序等方法对背景谐波电压值进行分组,本文通过K-means聚类算法进行聚类处理使得每簇内的 U_s 波动较小,K-means聚类算法的具体流程如附录A图A1所示。

K-means聚类算法要求提前给定聚类数目 m ,可采用手肘法、DBI法或轮廓系数法确定 m 值。文献[19]给出了一种简便的经验公式来确定 m 值,其表达式如式(6)所示。

$$m = \sqrt{\frac{n}{2}} \quad (6)$$

式中: n 为样本个数。

考虑到若聚类后簇内数据量过少,回归算法难以得到准确的估计值,设定 m 值的上限为 $n/50$,则 m 值的最终取值为:

$$m = \text{floor} \left(\min \left(\sqrt{\frac{n}{2}}, \frac{n}{50} \right) \right) \quad (7)$$

式中: $\text{floor}(\cdot)$ 表示向下取整运算。

以上分析是基于背景谐波电压 U_s 已知的前提,而实际情况下 U_s 为未知量,需要通过间接的方式进行分析。首先,可随机给定系统侧谐波阻抗初值 Z_{s0} ,根据式(1)求解其对应的背景谐波电压值 U_{s0} 。对 U_{s0} 进行K-means聚类操作,并根据聚类结果将对应的PCC谐波样本数据划分为 m 簇。对于每簇数据,分别采用复最小二乘法求得相应的系统侧谐波阻抗估计值 $\hat{Z}_{si}$ ($i=1, 2, \dots, m$),定义 $\hat{Z}_{si}$ 与 Z_{s0} 之间的偏差 V_{dev} 如式(8)所示。

$$V_{\text{dev}} = \sum_{i=1}^m \left| \frac{\hat{Z}_{si} - Z_{s0}}{Z_{s0}} \right| \times 100\% \quad (8)$$

当 V_{dev} 取得最小值时,可认为此时的阻抗初值 Z_{s0} 趋近于 Z_s 的真实值。这是因为当 Z_{s0} 趋近于 Z_s 的真实值时,根据 Z_{s0} 求得的 U_{s0} 亦趋近于真实背景谐波电压值,则根据此 U_{s0} 值进行聚类分析后求得各簇系统侧谐波阻抗估计值 $\hat{Z}_{si}$ 亦趋近于 Z_s 的真实值,所以 $\hat{Z}_{si}$ 与 Z_{s0} 之间的偏差 V_{dev} 趋于0。

为求解精确的系统侧谐波阻抗值,不断迭代更新谐波阻抗初值 Z_{s0} ,当偏差 V_{dev} 取得最小值时,可认

为此时的 Z_{s0} 值是接近 Z_s 真实值的最优系统侧谐波阻抗初值。根据最优系统侧谐波阻抗初值求解 U_s , 按 U_s 大小进行聚类分析后求得每簇的系统侧谐波阻抗估计值 $\hat{Z}_{si}$, 并以 $\hat{Z}_{si}$ 的均值作为最终的系统侧谐波阻抗估计值 $\hat{Z}_s$, 其计算公式如式(9)所示。

$$\hat{Z}_s = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{Z}_{si} \quad (9)$$

偏差 V_{dev} 与系统侧谐波阻抗初值 Z_{s0} 之间并非光滑函数关系, 如果寻优策略不合适, 则极易陷入局部最优解, 使得误差增大。因此, 本文选用改进自适应蝙蝠算法进行寻优计算以得到更精确的系统侧谐波阻抗估计结果, 图 2 给出了本文所提方法的基本流程。

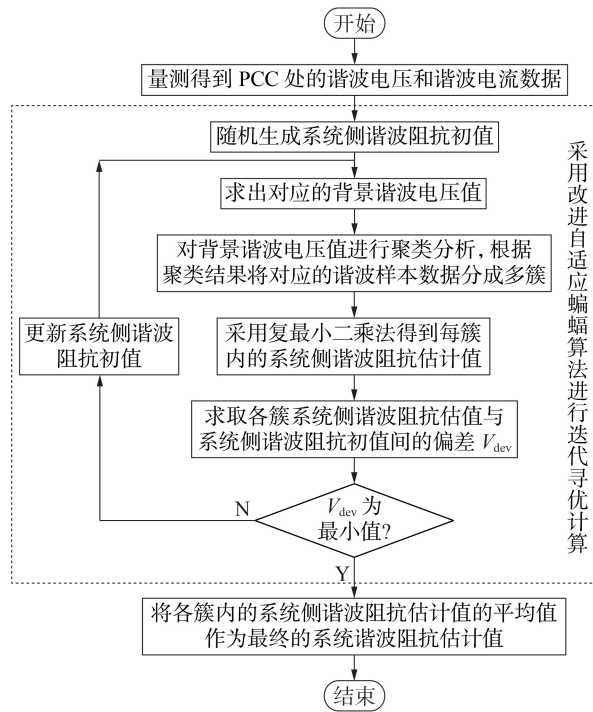


图 2 本文所提方法的流程图

Fig.2 Flowchart of proposed method

2 改进自适应蝙蝠算法

蝙蝠算法在寻优过程中可实现从全局搜索到局部搜索的自动转换, 具备模型简单、进化效率高、鲁棒性强等优点, 适用于复杂目标函数下的寻优运算。但标准蝙蝠算法存在后期收敛速度慢、易陷入局部最优等缺点, 限制了其进一步应用^[20]。

为克服标准蝙蝠算法的固有缺陷, 提高寻优结果的精确度, 本文对标准蝙蝠算法进行优化, 提出了一种改进自适应蝙蝠算法: 首先, 通过混沌映射策略提高蝙蝠初始种群的多样性, 并采用自适应步长控制机制提高算法的求解精度^[21-22]; 为了避免算法在寻优过程中过早陷入局部收敛, 引入自适应变异机制以及时跳出局部最优解^[23]。改进自适应蝙蝠算法

的具体运算过程如附录 B 所示。

本文以系统侧谐波阻抗初值 Z_{s0} 为变量, 以偏差 V_{dev} 为适应度值, 采用改进自适应蝙蝠算法进行迭代寻优, 得到使 V_{dev} 最小的 Z_{s0} 值, 从而进一步得到系统侧谐波阻抗的精确估计值。在寻优过程中, 设定蝙蝠个体维度为 2, 分别代表 Z_{s0} 的实部和虚部。设置蝙蝠种群规模 $N_{bat}=40$, 最大迭代次数 $t_{max}=100$ 。算法终止条件为最优解的凝滞步数达到 10 或迭代次数 $t=t_{max}$ 。

3 算例分析

3.1 诺顿等效模型算例分析

参考文献[17]建立诺顿等效仿真模型以验证本文所提方法的有效性, 具体仿真参数设置如下。

1) 用户侧等效谐波电流源: I_c 的幅值 $I_c=100$ A; I_c 的相角 $\angle I_c=-60^\circ$; 在 I_c 上叠加 $\pm 15\%$ I_c 的随机扰动和 $\pm 20\%$ I_c 的正弦波动, 在 $\angle I_c$ 上叠加 $\pm 40\%$ $\angle I_c$ 的随机扰动。

2) 系统侧等效谐波电流源: 系统侧等效谐波电流 I_s 的幅值 $I_s=kI_c$, 其中 k 的取值为 0.1、0.3、0.5、0.8、1, 且 k 值越大, 背景谐波波动越大; I_s 的相角 $\angle I_s=60^\circ$; 在 I_s 上叠加 $\pm 15\%$ I_s 的随机扰动, 在 $\angle I_s$ 上叠加 $\pm 40\%$ $\angle I_s$ 的随机扰动。

3) 谐波阻抗: $Z_s=5+j10 \Omega$; $Z_c=pZ_s$, 其中 p 的取值为 1、1.5、3、5、7、9; Z_s 与 Z_c 的实、虚部均添加 $\pm 10\%$ 的随机扰动。

按照以上设置仿真得到 3000 个数据点, 分别采用 4 种方法估算系统侧谐波阻抗: 方法 1 为复最小二乘法^[11]; 方法 2 为主导波动量法^[5]; 方法 3 为文献[17]所提方法; 方法 4 为本文方法, 且由式(7)计算得到 $m=38$ 。利用式(10)计算各方法的系统侧谐波阻抗相对估计误差 E_{rel} (下文简称相对估计误差) 以评价各方法的估计精度。

$$E_{rel} = \left| \frac{\hat{Z}_s - Z_s}{Z_s} \right| \times 100\% \quad (10)$$

附录 C 图 C1 给出了不同阻抗初值 Z_{s0} 条件下, 偏差 V_{dev} 的计算结果。图中, k, p 取值分别为 0.5 和 3。由图可见, 当系统侧谐波阻抗初值 Z_{s0} 与 Z_s 的真实值相近时, 偏差 V_{dev} 接近最低值。可以 V_{dev} 最小为寻优目标, 得到接近 Z_s 真实值的最优系统侧谐波阻抗初值, 从而进一步计算更精确的系统侧谐波阻抗估计值。

为了评估背景谐波的波动大小对 4 种方法的估计效果的影响, 固定 p 值以给出不同 k 值下 4 种方法的相对估计误差。固定 $p=7$ 的情况下, $Z_c=35+j70 \Omega$, 此时用户侧谐波阻抗远大于系统侧谐波阻抗, 4 种方法的相对估计误差如图 3 所示。固定 $p=1.5$ 的情

况下, $Z_c=7.5+j15 \Omega$, 两侧谐波阻抗相近, 此时4种方法的相对估计误差如附录C图C2所示。由图3和图C2可以看出, 在这2种场景下, 随着 k 的增大, 4种方法的相对估计误差都增大, 但误差的大小和增长率有所不同: 方法1、2对 k 值非常敏感, 其相对估计误差随着 k 值的增大而急剧增大; 与方法1、2相比, 方法3、4具有更小的相对估计误差且误差增长更平缓; 方法4的相对估计误差始终低于其他3种方法, 且对于背景谐波波动的变化具有更强的鲁棒性, 具有更好的系统侧谐波阻抗估计效果。

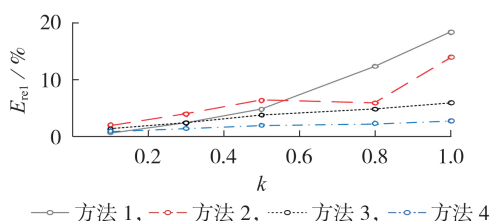


图3 $p=7$ 时4种方法的相对估计误差对比

Fig.3 Comparison of relative estimation errors among four methods when p is 7

为了进一步验证各方法对两侧谐波阻抗比 p 的敏感程度, 分别固定 k 值为0.3和1, 分析背景谐波波动较小和较大时, 各方法在不同 p 值下的有效性。 $k=0.3$ 和 $k=1$ 时, 4种方法的相对估计误差分别如图4和附录C图C3所示。由图4和图C3可以看出: 随着 p 值的减小, 4种方法的相对估计误差都增大; 方法1、2对 p 值敏感, 其估计结果随 p 值的变化波动较大。方法3、4对 p 值的变化具有更强的鲁棒性, 在 p 值较小的情况下仍能保持较低的相对估计误差, 且方法4的估计结果始终更接近真实值。

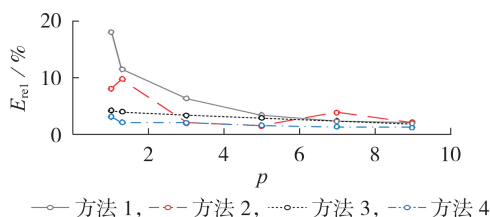


图4 $k=0.3$ 时4种方法的相对估计误差对比

Fig.4 Comparison of relative estimation errors among four methods when k is 0.3

为了更直观地展现所提方法的优越性, 以 p 为 X 轴, 以 k 为 Y 轴, 以 E_{rel} 为 Z 轴, 绘制三维对比图如附录C图C4所示。由图可见: 在不同场景下, 方法4的相对估计误差小于其他3种方法的相对估计误差; 方法4对 k 、 p 的变化具有更强的鲁棒性, 在背景谐波波动较大和用户侧谐波阻抗非远大于系统侧谐波阻抗的情况下可得到更精确的系统侧谐波阻抗估计结果。

3.2 三馈线模型算例分析

本节建立典型三馈线模型以分析4种方法在多谐波源场景下进行系统侧谐波阻抗估计的有效性, 仿真电路模型如附录D图D1所示。图中: Z_{ci} 和 I_i ($i=1, 2, 3$) 分别为用户侧馈线 i 的等效谐波阻抗和等效谐波电流源; I_{ci} 为馈线 i 所在支路的量测电流相量。仿真电路模型的具体参数设置如附录D表D1所示。仿真中在系统侧、用户侧各谐波源的幅值和相角中均添加 $\pm 40\%$ 的随机波动, 仿真共采样3000个数据点。

分别采用4种方法估计PCC和各馈线的等效系统侧谐波阻抗值, 结果如表1所示。由表中的数据可以看出, 在多谐波源场景下, 方法4的估计值更接近理论值, 说明本文方法的估计结果比其他3种方法更准确。

表1 4种方法的系统侧谐波阻抗估计结果

Table 1 Estimation results of system-side harmonic impedance with four methods

方法	等效系统侧谐波阻抗 / Ω			
	系统侧	馈线1	馈线2	馈线3
1	$3.001+j4.002$	$2.550+j3.386$	$1.914+j2.199$	$2.223+j3.140$
2	$3.038+j4.017$	$2.350+j3.366$	$4.005+j0.589$	$2.791+j2.850$
3	$3.006+j4.012$	$2.515+j3.631$	$3.049+j3.580$	$2.753+j3.437$
4	$3.001+j4.000$	$2.641+j3.551$	$2.506+j3.691$	$2.613+j3.549$
理论值	$3.000+j4.000$	$2.717+j3.625$	$2.638+j3.564$	$2.649+j3.598$

为了更清晰地体现各方法的系统侧谐波阻抗估计性能, 采用图5所示的柱状图来展示4种方法在系统侧和各馈线处的相对估计误差。由图可见, 方法4在系统侧和各馈线的相对估计误差始终是4种方法中最小的, 说明本文方法在多谐波源场景下依然具有较高的准确性。

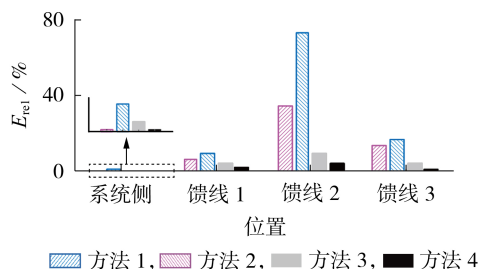


图5 各方法的相对估计误差柱状图

Fig.5 Histogram of relative estimation error with each method

3.3 典型中/低压电网基准测试系统算例分析

谐波分析、谐波责任划分等方向的研究需要一个一致的测试系统以验证各类方法的有效性。鉴于这一需求, IEEE-PES提供了一个为工业负荷供电的典型中/低压电网基准测试系统以进行谐波建模和算例分析, 该基准测试系统的基本模型见附录E图

E1。图中,负荷1和负荷2建模为三相晶闸管整流器,分别为PCC处用户侧和系统侧的主要谐波源。本节基于该基准测试系统进行算例分析以进一步验证本文方法在系统侧谐波阻抗估计中的有效性,对该系统的具体参数设置详见文献[24]。在PCC处进行谐波数据收集,其11、13次谐波电压和电流幅值的变化趋势分别如附录E图E2、E3所示,共采样5000个数据点。

分别采用4种方法进行系统侧谐波阻抗估计,表2给出了各方法的估计结果和相对估计误差。由表可见:方法1、2受到背景谐波波动的影响,其估计结果与理论值偏离较远,估计性能较差;方法3、4通过寻优计算得到最优阻抗初值,从而得到背景谐波电压值,并进一步分段估计以在背景谐波波动较大的场景下得到更接近理论值的系统侧谐波阻抗估计值;且与方法3相比,方法4直接在复数域进行系统侧谐波阻抗估计值计算,并利用改进自适应蝙蝠算法提高寻优性能,从而进一步提高了系统侧谐波阻抗估计精度;另外,方法4在估计该基准测试系统PCC处的11次和13次系统侧谐波阻抗值时,具有比其他3种方法更高的估计精度。综上所述,该算例分析结果进一步验证了本文所提方法的有效性和适用性。

表2 基准测试系统PCC处系统侧谐波阻抗估计结果

Table 2 Estimation results of system-side harmonic impedance at PCC of benchmark test system

方法	11次谐波系统侧谐波阻抗		13次谐波系统侧谐波阻抗	
	估计值/ Ω	$E_{rel}/\%$	估计值/ Ω	$E_{rel}/\%$
1	50.01+j21.61	19.47	66.02-j12.21	49.62
2	49.05+j16.89	13.97	56.03+j7.39	64.84
3	56.59+j6.87	9.29	60.52-j15.56	36.62
4	52.41+j12.18	4.89	45.99-j28.66	14.66
理论值	55.16+j11.91	—	43.75-j21.85	—

3.4 实例分析

本节采用现场实测数据进行分析计算以验证本文所提方法的有效性。数据源自给某工业电弧炉供电的35 kV母线(即PCC),采样频率为12 800 Hz。基于获得的实测录波数据,每秒采用快速傅里叶分解计算得到各次谐波数据。附录F图F1展现了其11次谐波电压以及电流的幅值变化趋势,共采样3000个数据点。

分别采用4种方法对PCC对应的系统侧谐波阻抗值进行滑窗迭代计算,滑动窗口大小为300个数据点,计算结果如附录F图F2所示。由图可见,4种方法计算得到的系统侧谐波阻抗估计值较为接近,具有较高的一致性。考虑到实际电网中的系统侧谐波阻抗在短时间内波动不大,可通过系统侧谐波阻抗估计结果的稳定性评价各方法的性能^[16]。从图

F2可以看出,方法4得到的系统侧谐波阻抗估计值曲线更为平稳。4种方法的系统侧谐波阻抗估计值的方差如表3所示。由表可见,方法4的系统侧谐波阻抗估计结果具有最小的方差,由此可知,相比于其他3种方法,本文所提方法的估计结果更为平稳。综上所述,实例分析结果证明了本文所提方法在实际工程应用中的适用性和有效性。

表3 4种方法的系统侧谐波阻抗估计值方差对比

Table 3 Comparison of variance of system-side harmonic estimation value among four methods

方法	估计值方差	方法	估计值方差
1	0.735	3	0.858
2	1.224	4	0.550

4 结论

针对现有系统侧谐波阻抗估计方法对背景谐波波动敏感的问题,提出一种系统侧谐波阻抗估计新方法。该方法基于阻抗偏差最小判据,采用改进自适应蝙蝠算法迭代寻优得到最优阻抗初值,从而得到接近真实值的背景谐波电压值。通过对求得的背景谐波电压值进行聚类分析,将样本数据按照聚类结果分为多簇,从而减少每一簇数据的背景谐波波动水平。在此基础上,利用复最小二乘法求得更精确的系统侧谐波阻抗估值。算例分析结果表明,本文所提方法对背景谐波波动和两侧谐波阻抗比的变化具有更高的鲁棒性,所得系统侧谐波阻抗估计值与理论值更接近。

本文所提方法能有效估计系统谐波阻抗值的前提是系统谐波阻抗在分析时段内基本不变。当系统谐波阻抗值时变或发生大幅度突变场景下,如何进行准确的估计系统谐波阻抗,尚需进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] SAFARGHOLI F, MALEKIAN K, SCHUFFT W. On the dominant harmonic source identification: part I: review of methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1268-1277.
- [2] 丁同,陈红坤,吴斌,等. 多谐波源定位及谐波责任量化区分方法综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 19-30.
DING Tong, CHEN Hongkun, WU Bin, et al. Overview on location and harmonic responsibility quantitative determination methods of multiple harmonic sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 19-30.
- [3] 刘子腾,徐永海,陶顺. 新能源并网下谐波责任定量评估方法研究现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 203-213.
LIU Ziteng, XU Yonghai, TAO Shun. Research status and prospect of harmonic responsibility quantitative evaluation method under grid-connection of new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 203-213.
- [4] YANG H, PIROTTE P, ROBERT A. Harmonic emission levels

- of industrial loads statistical assessment[C]//Proceedings of CIGRE 1996. Paris, France: International Council on Large Electric Systems, 1996:36-306.
- [5] 龚华麟,肖先勇,刘亚梅,等. 基于主导波分量筛选原理的用户谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 22-27.
- GONG Hualin, XIAO Xianyong, LIU Yamei, et al. A method for assessing customer harmonic emission level based on the dominant fluctuation filtering principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 22-27.
- [6] 惠锦,杨洪耕,林顺富,等. 基于独立随机矢量协方差特性的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 27-31.
- HUI Jin, YANG Honggeng, LIN Shunfu, et al. Assessment method of harmonic emission level based on covariance characteristic of random vectors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 27-31.
- [7] 林顺富,颜昕昱,钟良亮,等. 基于子带分量分解与独立分量分析的系统谐波阻抗估计方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 179-190.
- LIN Shunfu, YAN Xinyu, ZHONG Liangliang, et al. System harmonic impedance estimation method based on sub-band component decomposition and independent component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 179-190.
- [8] 郑仙,肖先勇,王杨. 基于谐波阻抗矩阵约束的系统侧谐波阻抗估计方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 170-176.
- ZHENG Xian, XIAO Xianyong, WANG Yang. Utility harmonic impedance estimation method based on harmonic impedance matrix constrain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 170-176.
- [9] 刘子腾,徐永海,陶顺. 基于SHIBSS方法和数据优选的系统侧谐波阻抗估算方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 193-199.
- LIU Ziteng, XU Yonghai, TAO Shun. Estimation method of harmonic impedance on system side based on SHIBSS method and data optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 193-199.
- [10] 张巍,杨洪耕. 基于二元线性回归的谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 50-53.
- ZHANG Wei, YANG Honggeng. A method for assessing harmonic emission level based on binary linear regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 50-53.
- [11] 贾秀芳,华回春,曹东升,等. 基于复线性最小二乘法的谐波责任定量划分[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 149-155.
- JIA Xiufang, HUA Huichun, CAO Dongsheng, et al. Determining harmonic contributions based on complex least squares method[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 149-155.
- [12] 林顺富,颜昕昱,戴烨敏,等. 基于子空间动态系数回归的系统谐波阻抗估计方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 146-153.
- LIN Shunfu, YAN Xinyu, DAI Yemin, et al. Estimation method of system harmonic impedance based on sub-space dynamic coefficient regression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 146-153.
- [13] 马智远,许中,黄裕春,等. 背景谐波阻抗变化情况下的谐波责任划分[J]. 电测与仪表, 2016, 53(23): 78-83, 89.
- MA Zhiyuan, XU Zhong, HUANG Yuchun, et al. Harmonic contributions determination on condition of changing background harmonic impedance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(23): 78-83, 89.
- [14] 陈静,符玲,臧天磊,等. 考虑系统谐波阻抗改变的谐波责任定量划分方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 215-222.
- CHEN Jing, FU Ling, ZANG Tianlei, et al. Harmonic contribution determination considering system harmonic impedance change[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 215-222.
- [15] SHU Qin, WU Yayue, XU Fangwei, et al. Estimate utility harmonic impedance via the correlation of harmonic measurements in different time intervals[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 2060-2067.
- [16] 赵永扬,徐方维,舒勤,等. 基于背景谐波最小波动能量的系统侧谐波阻抗估计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 142-148, 200.
- ZHAO Yongyang, XU Fangwei, SHU Qin, et al. Harmonic impedance estimation on system side based on minimum fluctuation energy of background harmonic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 142-148, 200.
- [17] 徐方维,王川,郭凯,等. 基于无相位实测数据的系统侧谐波阻抗估计方法改进[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3149-3158.
- XU Fangwei, WANG Chuan, GUO Kai, et al. An improved utility harmonic impedance estimation method based on measurement data without phase angle[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3149-3158.
- [18] 谷湘潜,康红文,曹鸿兴. 复数域内的最小二乘法[J]. 自然科学进展, 2006, 16(1): 49-54.
- [19] BENMAHDI M B, LEHSAINI M. Performance evaluation of main approaches for determining optimal number of clusters in wireless sensor networks[J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2020, 33(3): 184-195.
- [20] CAI Xingjuan, GAO Xiaozhi, XUE Yu. Improved bat algorithm with optimal forage strategy and random disturbance strategy[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2016, 8(4): 205-214.
- [21] SONG Ying, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. New chaotic PSO-based neural network predictive control for nonlinear process[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2007, 18(2): 595-601.
- [22] 吕石磊,黄永霖,陈海强,等. 基于自适应步长的改进蝙蝠算法[J]. 控制与决策, 2018, 33(3): 557-564.
- LÜ Shilei, HUANG Yonglin, CHEN Haiqiang, et al. Improved bat algorithm using self-adaptive step[J]. Control and Decision, 2018, 33(3): 557-564.
- [23] 许峻宁,陈璟华,荣泽成,等. 基于改进蝙蝠算法的配电网故障区段定位[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(5): 62-67.
- XU Junning, CHEN Jinghua, RONG Zecheng, et al. Fault section location of distribution network based on improved bat algorithm[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2020, 37(5): 62-67.
- [24] PAPIĆ I, MATVOZ D, ŠPELKO A, et al. A benchmark test system to evaluate methods of harmonic contribution determination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 23-31.

作者简介:



程卫健

程卫健(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为电能质量及谐波责任划分(E-mail: cwj8615@163.com);

林顺富(1983—),男,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量及智能电网用户端技术(E-mail: shunfu.lin@163.com)。

(编辑 任思思)

System-side harmonic impedance estimation method based on minimum impedance deviation criterion and improved adaptive bat algorithm

CHENG Weijian¹, LIN Shunfu¹, XU Liangfeng¹, LIU Chitao², LI Dongdong¹, FU Yang¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Qingpu Power Supply Company of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 201700, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing system-side harmonic impedance estimation methods are sensitive to the background harmonic fluctuation, a novel system-side harmonic impedance estimation method is proposed. Based on the minimum impedance deviation criterion and the improved adaptive bat algorithm, the optimal initial value of the system-side harmonic impedance is obtained, so as to get the estimation value of background harmonic voltage which is close to the real value. *K*-means cluster analysis is carried out on the estimation value of background harmonic voltage, and based on the clustering results the harmonic sample data is divided into multiple clusters, so that the background harmonic fluctuation corresponding to each cluster data is reduced. Considering that the harmonic data are all complex phasors, the complex least square method is used to obtain the estimation value of system-side harmonic impedance in each cluster, and the mean value of them is taken as the final estimation value. Compared with the existing methods, the proposed method can better adapt to the change of background harmonic fluctuation, and has better estimation accuracy when the user-side harmonic impedance is not much greater than the system-side harmonic impedance. Several examples verify the effectiveness and applicability of the proposed method.

Key words: system-side harmonic impedance; background harmonic; minimum impedance deviation criterion; improved adaptive bat algorithm; clustering algorithms

(上接第 175 页 continued from page 175)

Unit commitment considering safety constraints of frequency and inter-areal tie-line power in two-area interconnected power system

SHEN Jiakai¹, LIU Yang², LI Weidong¹, GU Taiyu³, BA Yu¹, WANG Haixia¹

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Northeast Branch of State Grid Corporation of China, Shenyang 110180, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: With the transformation of the power generation structure and the power grid form, the spatial-temporal characteristics of frequency in interconnected power systems have become prominent, the areal frequency differences and ITP (Inter-area Tie-line Power) oscillation have increased, where the unit commitment with frequency safety constraint based on the unified frequency assumption is no longer applicable. For considering the spatial-temporal characteristics in the safety constrained unit commitment of two-area interconnected power system, the closed-form solutions of areal frequency and ITP are derived. Then, a series of analytic safety indicators such as the nadir value, maximum rate value, quasi-steady-state value of areal frequency, and the peak value, quasi-steady-state value of ITP are deduced based on the two-terms division of closed-form solutions. Moreover, based on the obtained indicators, the unit commitment model with safety constraints about areal frequency and ITP is established. And based on the scheduling modes and indicator characteristics, the two-level two-stage iterative solution algorithm giving consideration to areal capacity guarantee and interval capacity coordination is proposed. Results show that the proposed indicators can accurately describe the safety characteristics of two-area interconnected power system, and the proposed model and algorithm can effectively guarantee the operation safety of the unit commitment scheme in two-area interconnected power system.

Key words: interconnected power system; frequency safety; inter-areal tie-line power safety; analytic safety quantitative indicators; unit commitment

附录 A

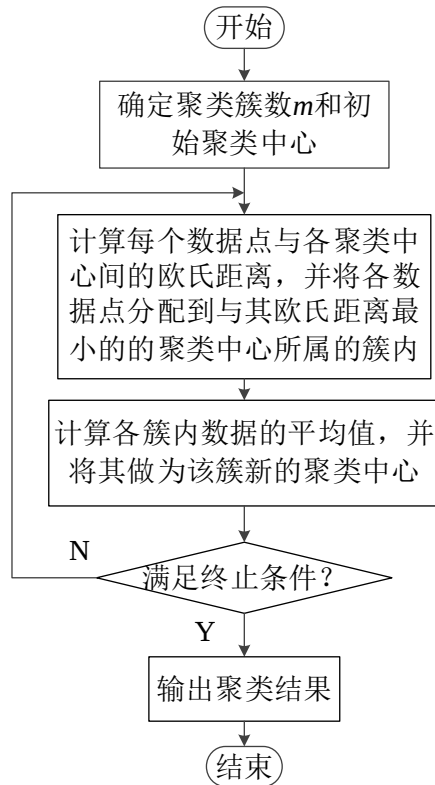


图 A1 K-means 聚类算法流程图

Fig.A1 Flowchart of K-means clustering algorithm

附录 B

改进自适应蝙蝠算法的具体流程主要包括混沌映射策略生成初始解、自适应步长控制机制及自适应变异操作三部分，各部分具体计算过程如下所示，图 B1 给出了所提算法的具体流程。

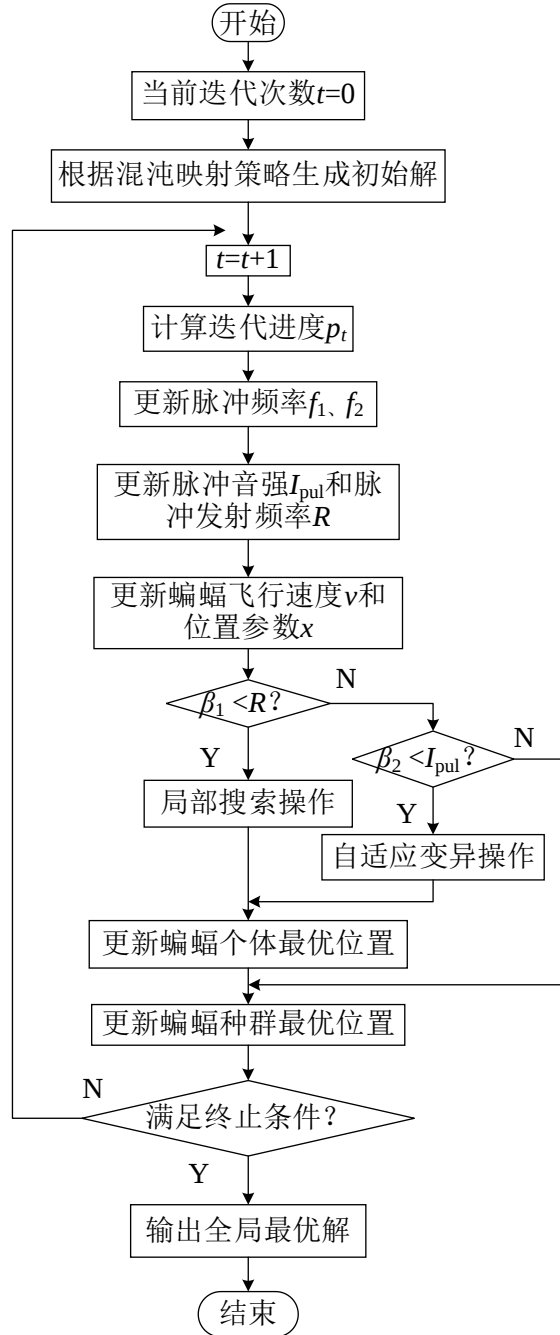


图 B1 改进自适应蝙蝠算法流程图

Fig.B1 Flowchart of improved adaptive bat algorithm

1) 混沌映射策略生成初始解。

初始解的分布情况会对算法的收敛速度和寻优精度产生极大的影响。如果蝙蝠初始种群能均匀分布在整个解空间，则算法具有更强的全局搜索能力。在标准蝙蝠算法中，初始解由随机函数产生，不具备覆盖整个解空间的能力。初始种群的多样性不足，导致标准蝙蝠算法的寻优性能有限。

文献[21]提出可采用混沌映射策略生成初始解以提高初始种群的多样性。混沌映射策略除了可使初始解具有类随机性,更可使初始解遍历整个解空间且具有非重复性。算法加入混沌映射后使得初始种群相对更加多样,可使算法以相对更快的速度进行搜索。

混沌序列可通过 Tent 映射生成,其函数表达式如式(B1)所示。

$$z_{i+1} = \begin{cases} \frac{z_i}{0.7} & 0 < z_i < 0.7 \\ \frac{1-z_i}{0.3} & 0.7 \leq z_i < 1 \end{cases} \quad (B1)$$

随机生成(0,1)内的初值 z_0 ,由式(B1)得到混沌序列,其中 $z_i \in (0,1)$ 。初始解 x_i^0 可根据式(B2)生成,该初始解可均匀遍历整个解空间 $[x_{\min}, x_{\max}]$,其中 $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为解空间的下限值和上限值。

$$x_i^0 = x_{\min} + z_i(x_{\max} - x_{\min}) \quad (B2)$$

2) 自适应步长控制机制。

针对标准蝙蝠算法存在后期收敛速度慢、求解精度较低等问题,文献[22]提出一种自适应步长控制机制。该机制可根据当前的迭代进度自适应调节蝙蝠的移动步长,从而使得算法的寻优精度得到提高。

(1) 迭代进度。

算法的迭代进度 p_t (t 为当前迭代次数)可由式(B3)计算得到。

$$p_t = t/t_{\max} \quad (B3)$$

式中: $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

(2) 脉冲频率的更新。

脉冲频率 f_1 与 f_2 的更新公式如式(B4)所示:

$$f_1 = f_{\min} + \alpha(1 - e^{-|F_{\text{avg}} - F_{\text{best}}|}) + \gamma(1 - p_t), \quad f_2 = C_s - f_1 \quad (B4)$$

式中: $f_{\min}$ 为脉冲频率的最小值,设定为 0.5; F_{avg} 和 F_{best} 分别为当前蝙蝠种群所有个体适应度的平均值和最优值; α 和 γ 分别为当前蝙蝠种群适应度值和迭代进度 p_t 对 f_1 的影响系数,设定 α 和 γ 分别取为 1、1.5; C_s 为常数,设定为 3。

(3) 脉冲音强 I_{pul} 和脉冲发射频率 R 的更新。

将脉冲音强 I_{pul} 和脉冲发射频率 R 的变化与 f_1 、 f_2 的更新相结合,可使 I_{pul} 、 R 根据算法寻优进度自适应调整,其更新公式如式(B5)所示。

$$I_{\text{pul}} = f_1/f_{\max}, \quad R = f_2/f_{\max} \quad (B5)$$

式中: $f_{\max}$ 为脉冲频率的最大值,设定为 2.5。

(4) 速度与位置的更新。

蝙蝠个体的飞行速度 v_i^t 与所在位置 x_i^t 可根据式(B6)进行更新。

$$v_i^t = \omega v_i^{t-1} + f_1 r_1 (X_{\text{best}} - x_i^{t-1}) + f_2 r_2 (x_{\text{best}} - x_i^{t-1}), \quad x_i^t = x_i^{t-1} + \mu v_i^t \quad (B6)$$

式中: ω 为惯性权重因子,其值在 $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ 区间内随迭代进度 p_t 线性递减,设定 $\omega_{\min}$ 与 $\omega_{\max}$ 分别为 0.4、0.9; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 区间内的随机数; x_{best} 和 X_{best} 分别为蝙蝠个体 i 和蝙蝠种群的当前最优解;系数 μ 用于控制蝙蝠个体的迭代步长,设定为 0.7。

(5) 局部搜索操作。

首先生成 $[0,1]$ 区间内的随机数 β_1 ,当 $\beta_1 < R$ 进行局部搜索,其更新策略如下所示。

$$\lambda = (x_{\max} - x_{\min}) / N_{\text{bat}} \quad (B7)$$

$$\psi(p_t) = \begin{cases} 18p_t^2 - 14p_t + 3 & 0 < p_t \leq 0.4 \\ 28p_t^2 - 23p_t + 5 & 0.4 < p_t \leq 1 \end{cases} \quad (B8)$$

$$x_i^t = \begin{cases} X_{\text{best}} + I_{\text{pul}} \lambda \psi(p_t) r_3 & 0 < p_t \leq 0.4 \\ X_{\text{best}} + I_{\text{pul}} \lambda 0.1^{\psi(p_t)} r_3 & 0.4 < p_t \leq 1 \end{cases} \quad (B9)$$

式中：\$N_{bat}\$ 为蝙蝠种群数；\$r_3\$ 为\$[-1,1]\$区间内的随机数；参数\$\lambda\$可使得局部搜索步长随求解域的范围自适应调整；函数\$\psi(p_i)\$的引入使得局部搜索步长在算法前期具有较大值以扩展搜索区域，而在算法后期具有较小值以提高搜索精度。

3) 自适应变异操作。

自适应变异操作可使算法跳出局部最优解，避免提前收敛，从而进一步提高全局寻优能力。

首先生成\$[0,1]\$区间内的随机数\$\beta_2\$，若同时满足\$\beta_1 \geq R\$且\$\beta_2 < I_{pul}\$，则进行自适应变异操作。文献[23]通过引入柯西分布进行自适应变异操作，可使算法能够根据适应度值的变化对需要进行变异的蝙蝠个体进行自适应调整，以充分发挥蝙蝠种群的多样性。变异操作形成的新个体由式(B10)–(B12)产生。

$$x_i^t = x_a^{t-1} + \sigma(x_b^{t-1} - x_c^{t-1}) \quad (B10)$$

$$\eta = \sigma_{\min} + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \frac{t-1}{t_{\max}} \quad (B11)$$

$$\sigma = \eta + \frac{\tau}{\pi} \left[\frac{\theta_2}{(t - \theta_1)^2 + \theta_2^2} \right] \quad (B12)$$

式中：\$x_a^{t-1}\$、\$x_b^{t-1}\$、\$x_c^{t-1}\$为从上一代蝙蝠种群中随机选取的3个不同的个体且\$a \neq b \neq c \neq i\$；\$\sigma\$为变异因子，\$\sigma_{\min}\$与\$\sigma_{\max}\$分别为其最小值和最大值，设定\$\sigma_{\min}\$为0.01，\$\sigma_{\max}\$为0.3；参数\$\tau\$、\$\theta_1\$和\$\theta_2\$分别为柯西分布函数的调节因子、位置参数和尺度参数，其取值分别为1.5、0和1。

附录 C

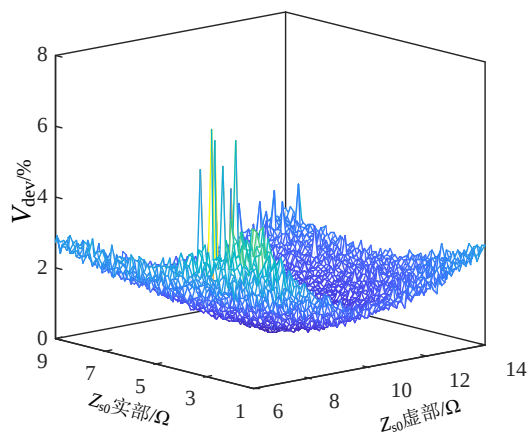


图 C1 V_{dev} 随 Z_{s0} 的变化情况
Fig.C1 Variation of V_{dev} with Z_{s0}

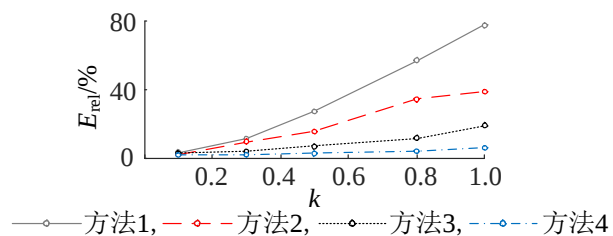


图 C2 $p=1.5$ 时 4 种方法的相对估计误差对比
Fig.C2 Comparison of relative estimation errors among four methods when p is 1.5

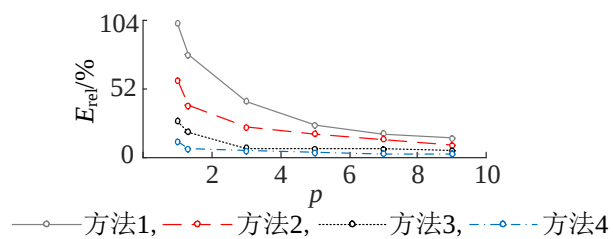


图 C3 $k=1$ 时 4 种方法的相对估计误差对比
Fig.C3 Comparison of relative estimation errors among four methods when k is 1

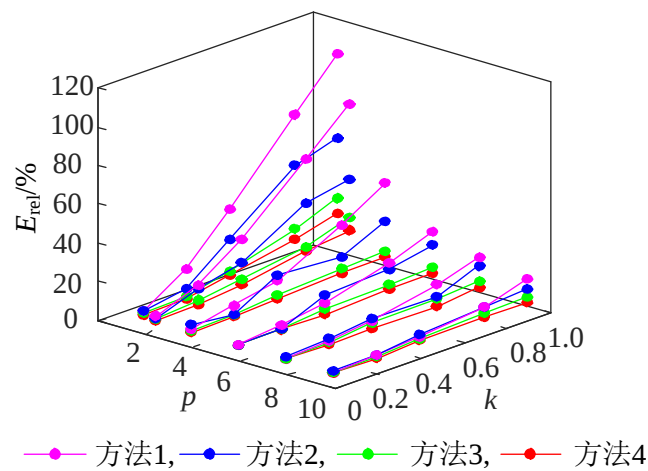


图 C4 各方法的相对估计误差三维对比图

Fig.C4 Three dimensional comparison diagram of relative estimation error of each method

附录 D

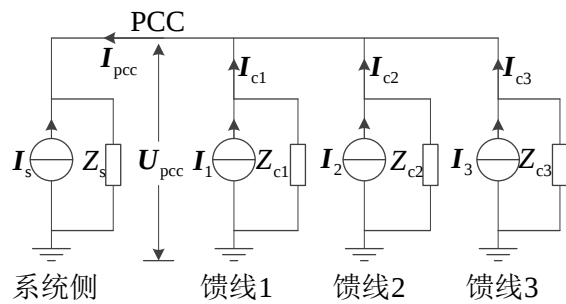


图 D1 典型三馈线模型

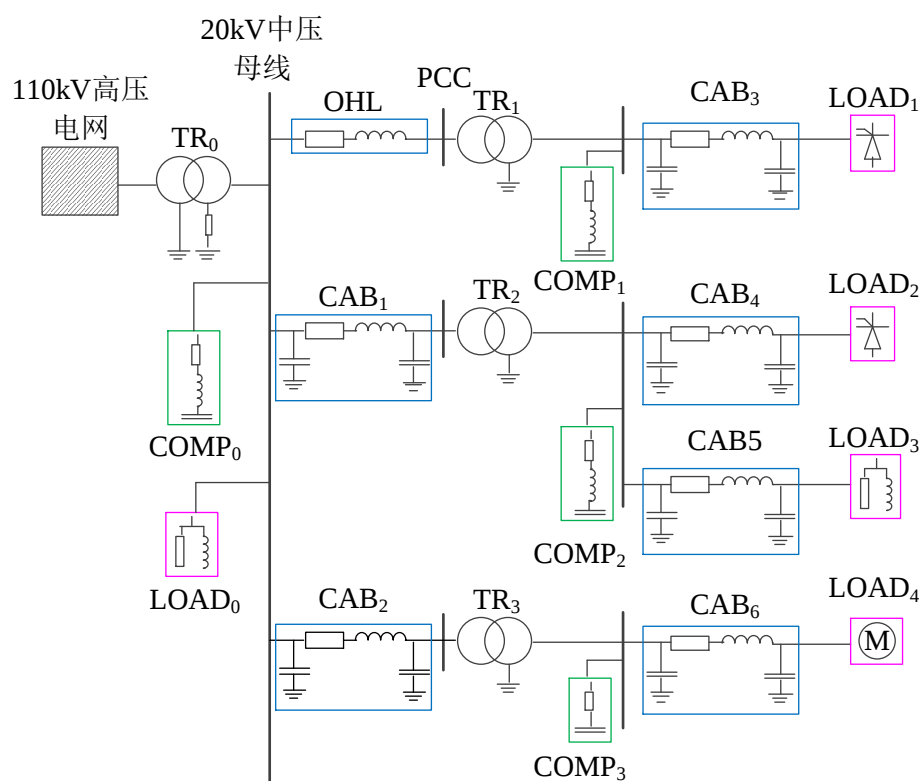
Fig.D1 Typical three feeder model

表 D1 典型三馈线模型参数设置

Table D1 Parameter setting of typical three feeder model

线路	谐波阻抗/ Ω	谐波电流源/A
系统侧	$3+j4$	$10\angle 15^\circ$
馈线 1	$35+j60$	$50\angle 60^\circ$
馈线 2	$60+j86$	$30\angle 30^\circ$
馈线 3	$55+j70$	$40\angle 40^\circ$

附录 E



TR—变压器，OHL—架空线，CAB—电缆
COMP—功率因数校正装置，LOAD—负荷

图 E1 基准测试系统模型图

Fig.E1 Model diagram of benchmark test system

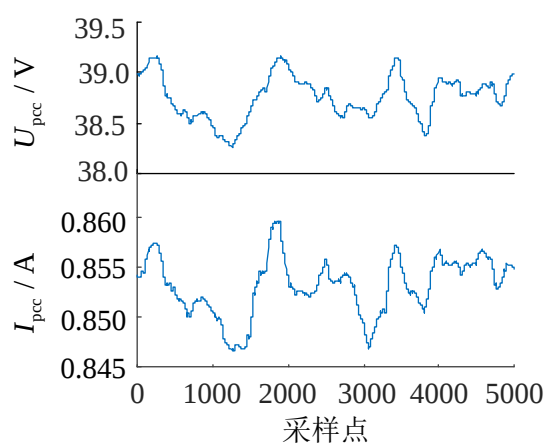


图 E2 基准测试系统 PCC 处 11 次谐波波形图

Fig.E2 11th harmonic waveform diagram at PCC of benchmark test system

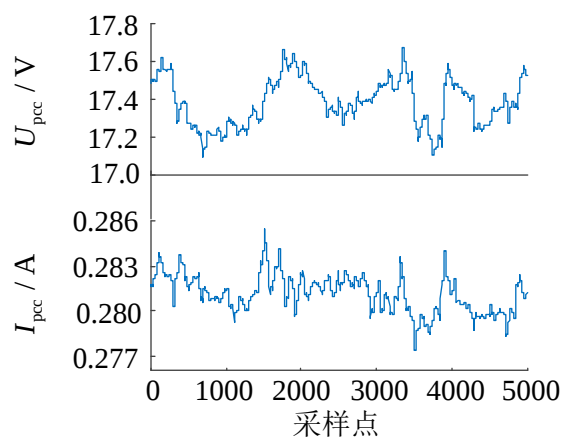


图 E3 基准测试系统 PCC 处 13 次谐波波形图

Fig.E3 13th harmonic waveform diagram at PCC of benchmark test system

附录 F

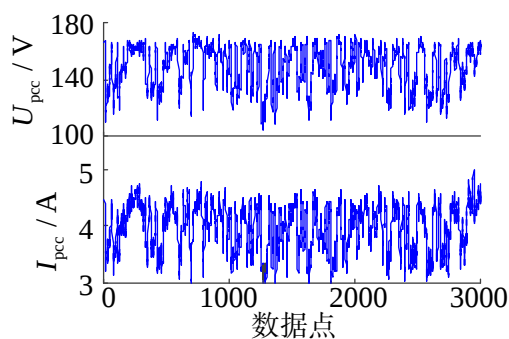


图 F1 PCC 处 11 次谐波电压、电流的幅值变化趋势

Fig.F1 Variation trend of 11th harmonic voltage and current amplitude at PCC

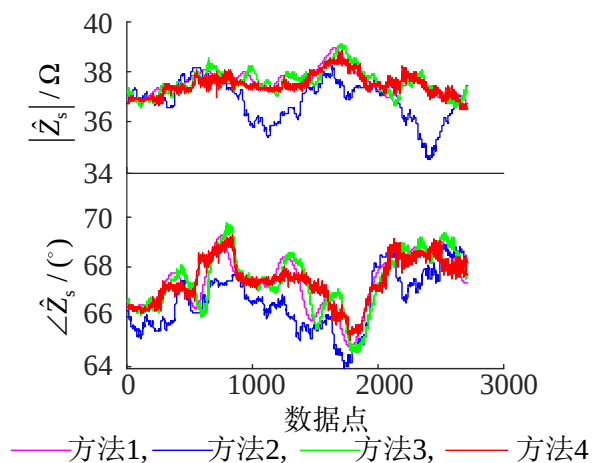


图 F2 系统侧谐波阻抗估计结果

Fig.F2 Estimation results of system-side harmonic impedance