

基于故障分量的系统侧谐波阻抗计算方法

龚华麟^{1,2}, 卿俊杰¹, 李官宇¹, 张择策¹, 曾雪¹, 令狐静波¹, 陈子阳¹, 李媛媛¹

(1. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 国网西藏电力科学研究院, 西藏 拉萨 850000)

摘要: 提出一种新的基于故障分量计算系统侧谐波阻抗的方法。基于谐波污染等效分析模型, 分析了用户侧发生故障时引发公共耦合点 PCC 处谐波电压电流波动的特点, 通过计算 PCC 点谐波波动伏安特性比来精确计算系统侧的谐波阻抗。仿真分析和现场数据计算结果表明, 该方法可以有效避免系统侧引发的公共耦合点谐波电压波动的干扰, 从而得到更为准确的系统侧谐波阻抗值。所做研究工作对评估用户谐波发射水平以及划分谐波污染责任有一定指导作用。

关键词: 公共耦合点; 谐波阻抗; 故障分量; 计算方法

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)05-0032-05

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.05.008

Utility Harmonic Impedance Estimation Based on Fault Component

Gong Hualing^{1,2}, Qing Junjie¹, Li Guanyu¹, Zhang Zece¹, Zeng Xue¹,
Linghu Jingbo¹, Chen Ziyang¹, Li Yuanyuan¹

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Tibet Electric Power Research Institute, Lhasa 850000, Tibet, China)

Abstract: A new calculation method for harmonic impedance of system side based on fault component is proposed. Based on the equivalent analysis model of harmonic pollution, the characteristics of harmonic voltage and current fluctuation at point of common coupling (PCC) caused by the failure of the customer side are analyzed, and the harmonic impedance of the system side is accurately calculated by calculating the volt-ampere characteristic ratio of PCC. The simulation analysis and field data calculation results show that the proposed method can effectively avoid the interference of harmonic voltage fluctuation caused by point of common coupling on the system side, so as to obtain more accurate harmonic impedance value on the system side. The research work can be used to evaluate the level of harmonic emission and to divide the responsibility of harmonic pollution.

Key words: point of common coupling; harmonic impedance; fault component; computing method

0 引言

随着社会经济的发展, 电网规模越来越大, 并朝着更智能、更坚强的方向发展, 这对电力系统的电能质量也提出了更高的要求。而电力系统中的谐波问题是影响电能质量的主要原因之一。电气化铁路是电力系统内最大的三相不平衡谐波源, 除此之外还有数量庞大的变频装置、整流装置、电弧炉等非线性负荷, 它们会使电压、电流波形产生畸变, 对系统造成谐波污染。

只有正确、科学地区分谐波污染责任, 才能为系统侧和用户侧的谐波治理提供依据。评估公共耦合

点(point of common coupling, PCC) 用户谐波发射水平是谐波污染责任划分的前提, 而获得用户谐波发射水平的关键在于准确地计算系统侧的谐波阻抗, 这也是国内外研究的热点和难点^[1-4]。

系统侧和用户侧的等效电路模型是评估 PCC 处谐波污染最常用的工具^[5-8]。计算系统侧谐波阻抗的方法主要分为干预式方法^[9-11]和非干预式方法^[12-17]。其中干预式方法会干扰电力系统, 因此误差较大, 比如通过投切电容器来实现谐波阻抗的计算; 非干预式方法则更为科学, 被大多数研究人员采用, 计算原理也更为多样。波动量法是最为常用的非干预式方法^[18], 利用 PCC 处电压和电流波动量比值的符号进行判别, 但该方法需要假设谐波电压波动的主导侧, 因此不能保证计算精度。二元线性

回归方法基于在 PCC 处采集的电流和电压,将其进行快速傅里叶变换并提取谐波分量,根据电路理论推导回归方程求取谐波阻抗。然而,该方法仅适用于背景谐波变化不大的情况时,当背景谐波变化很大时,系统侧谐波阻抗的计算将出现较大的估计误差。文献 [19] 介绍的极大似然估计法是以系统中的背景谐波服从正态分布为前提来求解似然方程,最后计算得出系统侧谐波阻抗值,而显然在实际的电力系统中,背景谐波并不服从标准的正态分布。为了减少背景谐波的干扰,文献 [20] 基于独立随机矢量协方差等于 0 的特点,提出了随机独立矢量法,但该方法在系统侧谐波发射水平变高的情况下,误差也会随之变大。文献 [21] 介绍了基于贝叶斯理论的系统侧谐波阻抗计算,可以较为准确地计算背景谐波在非正态分布情况下的谐波阻抗,但仍需假设阻抗在估计时间段内不产生突变以及阻抗的先验分布是区间上的均匀分布。

无论是干预式或者非干预式的方法,都是在稳态下进行分析和建模,它们的区别主要在于对数据处理的假设和方法不同。下面,着眼于计算系统侧谐波阻抗的核心目标,研究故障状态下 PCC 处谐波电压波动与系统及用户侧的电气量关系,提出基于故障分量的系统侧谐波阻抗计算方法。仿真分析表明,无论背景谐波是否视为服从正态分布,采用所提方法都可以较为准确地计算系统侧的谐波阻抗值。所提出的基于故障分量的系统侧谐波阻抗计算方法是对用户侧故障状态下 PCC 处电气量分析的积极探索,是对快速准确计算具有工程意义的系统侧谐波阻抗的有益尝试,对评估用户谐波发射水平以及划分谐波污染责任有一定指导作用。

1 基本原理

1.1 谐波污染等效分析模型

谐波分析通常采用诺顿等效电路^[1-5],如图 1 所示。

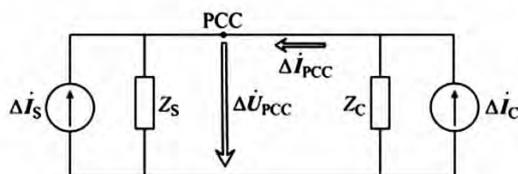


图 1 系统侧和用户侧谐波分析等效电路
根据诺顿定理可列出等效电路方程为

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}_{PCC} = \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} \Delta \dot{I}_c - \frac{Z_s}{Z_s + Z_c} \Delta \dot{I}_s \\ \Delta \dot{U}_{PCC} = \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} \Delta \dot{I}_c + \frac{Z_s Z_c}{Z_s + Z_c} \Delta \dot{I}_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 为 PCC 处测得的谐波电流波动矢量值; $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 为 PCC 处测得的谐波电压波动矢量值; $\Delta \dot{I}_c$ 和 $\Delta \dot{I}_s$ 分别为用户侧和系统侧谐波发射电流波动矢量值; Z_c 和 Z_s 分别为用户侧和系统侧谐波阻抗值。

容易看出, $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 是由用户侧谐波电流 $\Delta \dot{I}_c$ 和系统侧谐波电流 $\Delta \dot{I}_s$ 组成的矢量贡献。即 PCC 处的谐波电压、电流波动是由系统侧和用户侧两方面的电流波动共同影响的。

文献 [14] 定义了 PCC 点谐波波动伏安特性比 K_{hVA} , 它实际表征了谐波伏安特性曲线的斜率。通过 PCC 处的谐波电压、电流波动量的比值来进一步分析系统侧谐波阻抗与两侧电流波动量的关系, 如式 (2) 所示。若仅有系统侧或用户侧的波动引起 PCC 点谐波波动时, K_{hVA} 的计算变换为式 (3)。

$$K_{hVA} = \frac{\Delta \dot{U}_{PCC}}{\Delta \dot{I}_{PCC}} = \frac{\Delta \dot{I}_c + \Delta \dot{I}_s}{\Delta \dot{I}_c / Z_s - \Delta \dot{I}_s / Z_c} \quad (2)$$

$$K_{hVA} = \frac{\Delta \dot{U}_{PCC}}{\Delta \dot{I}_{PCC}} = \begin{cases} Z_s & \Delta \dot{I}_s = 0 \\ -Z_c & \Delta \dot{I}_c = 0 \end{cases} \quad (3)$$

因此,为了准确计算 Z_s ,需要假设 PCC 处造成 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 的原因均来自用户侧,即 $\Delta \dot{I}_s = 0$,从而可通过计算 K_{hVA} 来确定 Z_s 。然而,系统正常运行状态下,该假设是不成立的。

1.2 用户侧故障状态下 PCC 电气量分析

电力系统正常运行时,PCC 处 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 的出现是系统侧和用户侧共同作用的结果,因此不可能有 $\Delta \dot{I}_s = 0$ 或 $\Delta \dot{I}_c = 0$ 。而以大量的现场工程实践为依据,发现了一种特殊工况:在用户侧发生故障时(比如用户侧单相接地短路),用户侧的谐波波动量先于系统侧的谐波波动量对 PCC 处的 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 产生影响,并且可以通过用户侧变电站内的故障录波装置提取并计算出这些数据。即可以认为在用户侧发生故障之后的短暂时间里,PCC 处的 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 仅与用户侧的谐波发射水平有关,满足了 $\Delta \dot{I}_s = 0$ 的情况。

1.3 基于故障分量的系统侧谐波阻抗计算

用户侧发生故障的一般情况如图 2 所示。

根据1.2节分析,假设10 kV出线处在 t_0 时刻发生故障, t_0-t_1 时间内PCC处的 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 仅受用户侧的 $\Delta \dot{U}_{c-f}$ 和 $\Delta \dot{I}_{c-f}$ 的影响,其中 $\Delta \dot{U}_{c-f}$ 和 $\Delta \dot{I}_{c-f}$ 分别为故障处的谐波电压波动量和谐波电流波动量。而 t_1 时刻之后PCC处的 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 将同时受用户侧和系统侧谐波波动量的影响。故障情况下,PCC处的 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{U}_{PCC}$ 受影响情况如表1所示。

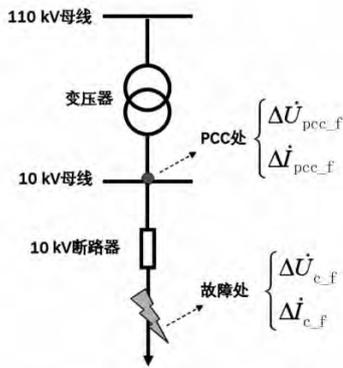


图2 用户侧发生故障的一般情况

表1 不同时间段影响PCC处谐波波动量的因素

影响因素	t_0	t_0-t_1	t_1
是否受用户侧谐波波动量影响	否	是	是
是否受系统侧谐波波动量影响	否	否	是

根据表1,可以通过用户侧变电站内的故障录波装置提取并计算出 t_0-t_1 时间段PCC处的 $\Delta \dot{I}_{PCC}$ 和 $\Delta \dot{U}_{PCC}$,从而通过式(3)计算得到 K_{hVA} 和 Z_s 。

2 仿真分析

根据图1和图2,使用PSCAD搭建10 kV系统仿真模型,用4种方法(方法1为基于快速独立分量分析的系统侧谐波阻抗计算方法;方法2为二元回归法;方法3为基于贝叶斯定理的系统谐波阻抗估计;方法4为所提方法),对该10 kV仿真系统的典型谐波(3次、5次、7次、9次、11次、13次谐波)进行测量计算,并对结果误差进行对比分析。

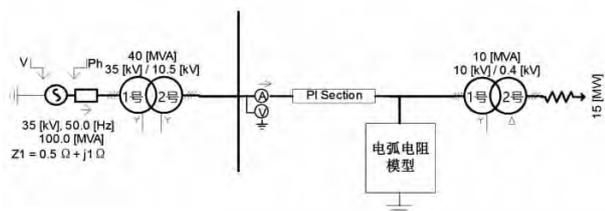


图3 10 kV系统仿真模型

仿真模型设置的系统侧阻抗为 $Z_s = 0.5 + j1$,在

负荷侧加入 $\pm 5\%$ 的随机正弦波动。针对所提方法,在PCC点处设置两相接地短路故障,搭建接地电弧模型,随着接地电弧电阻不断变化,从而向系统中注入谐波。

在PCC处提取10 000个仿真数据,每100个数据为一个数据段,进行递推归算。

2.1 基于PSCAD建模的电弧电阻模型

所采用的电弧电阻模型能够准确、有效地反应10 kV系统短路接地时电弧电阻的特性^[22],电弧电压畸变明显,且与实际变电站的故障录波波形相符合,如图4所示。

电弧电导的非线性数学表达式为

$$\begin{cases} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_s} (G_s - g) \\ \tau_s = \frac{\beta \times I_s^{1.4}}{l} \\ G_s = \frac{|i_h|}{V_{s0} \times I_s^{-0.4} \times l} \end{cases} \quad (4)$$

式中: g 为电弧电导; τ_s 为时间常数; G_s 为稳态电导; β 为常量系数; I_s 为10 kV系统接地故障稳态电流; i_h 为电弧电流; V_{s0} 为弧隙每厘米压降的常量系数; l 为电弧长度。根据现场实际取 $\beta = 7.53 \times 10^{-6}$, $V_{s0} = 75 \text{ V/cm}$, $l = 5 \text{ cm}$ 。

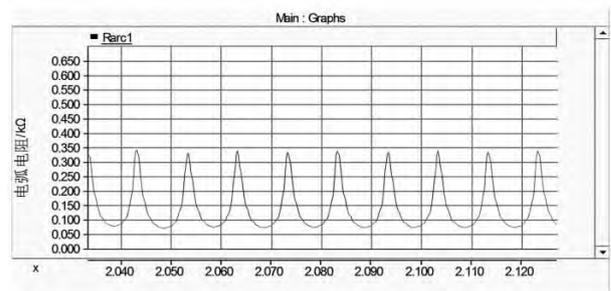


图4 接地电弧电阻仿真结果

2.2 系统谐波阻抗测量

2.2.1 正态背景谐波

负荷侧加入 $\pm 5\%$ 的随机正弦扰动,并且设置为正态随机扰动,提取10 000个仿真数据,分别利用方法1、2、3、4进行数据处理分析;设置10 kV两相短路接地故障,提取故障2个周波后10 000个仿真数据以及短路前两个周波的10 000个仿真数据,利用故障分量进行数据处理分析及谐波阻抗计算。仿真结果如表2和表3所示。

由表2、表3可以看出,仿真系统在正态扰动

下,方法4的计算结果较其他方法误差最小。4种方法对3次、5次、7次、9次、11次、13次谐波的测量值如图5和图6所示。

表2 系统阻抗幅值误差

序号	谐波次数	相对误差/%			
		方法1	方法2	方法3	方法4
1	3	1.20	3.21	4.50	0.70
2	5	1.50	4.23	4.62	1.30
3	7	1.89	3.21	6.72	1.50
4	9	3.14	4.20	11.71	1.32
5	11	4.55	6.21	10.35	0.82
6	13	3.21	4.73	9.34	1.02

表3 系统阻抗相角误差

序号	谐波次数	相对误差/%			
		方法1	方法2	方法3	方法4
1	3	2.35	4.23	6.32	2.34
2	5	1.78	5.98	11.20	1.32
3	7	1.34	5.11	8.47	1.26
4	9	2.93	2.98	3.00	2.87
5	11	2.31	3.22	4.02	1.12
6	13	1.12	2.34	6.32	1.02

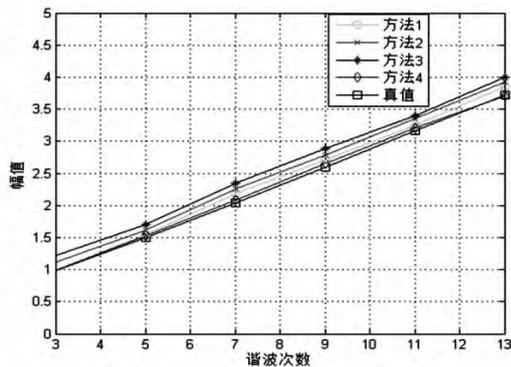


图5 正态谐波背景下不同方法计算的阻抗幅值

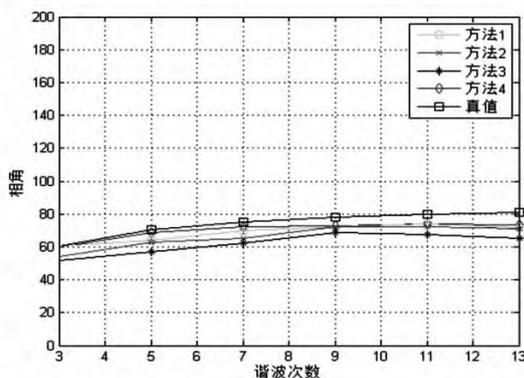


图6 正态谐波背景下不同方法计算的阻抗相位

2.2.2 非正态背景谐波

将负荷侧扰动设置为非正弦扰动,与2.2.1节做相同的建模和计算,结果见表4、表5、图7、图8。

表4 系统阻抗幅值误差

序号	谐波次数	相对误差/%			
		方法1	方法2	方法3	方法4
1	3	1.31	4.21	5.00	0.73
2	5	2.00	4.51	4.89	1.36
3	7	2.33	3.40	6.75	1.49
4	9	3.17	4.20	11.71	1.41
5	11	5.01	6.23	11.35	1.02
6	13	3.29	4.75	10.02	1.11

表5 系统阻抗相角误差

序号	谐波次数	相对误差/%			
		方法1	方法2	方法3	方法4
1	3	2.22	4.55	6.47	2.50
2	5	2.36	6.03	12.23	1.42
3	7	1.54	5.56	9.40	1.30
4	9	3.13	3.20	3.20	2.91
5	11	2.47	3.55	4.12	1.21
6	13	1.32	2.89	6.44	1.12

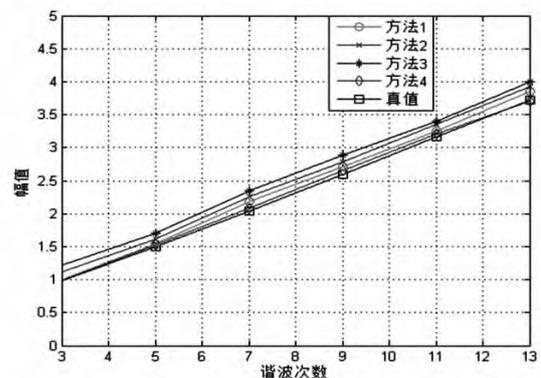


图7 非正态谐波背景下不同方法计算的阻抗幅值

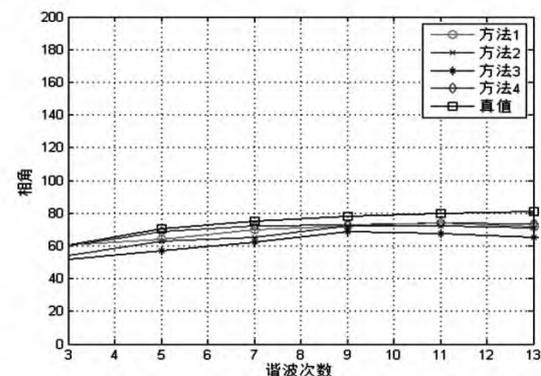


图8 非正态谐波背景下不同方法计算的阻抗相位

由表4和表5的仿真结果可以发现,在非正态随机扰动之下,所提的方法4对典型谐波的测量计算仍然保持着较高的准确率。并且,对比表2至表5,可以发现方法4在正态扰动和非正态扰动下计算结果十分接近,表明该方法可以有效地抑制背景谐波的干扰,从而使得计算效果更加准确稳定。

3 结 语

系统侧谐波阻抗的计算是评估用户谐波发射水平以及研究谐波在系统中各类特性的基础。区别于对谐波污染等效分析模型中数据处理的算法研究,根据大量实际工程经验,以及在用户侧变电站故障录波装置中获取的波形与数据,提出了系统侧谐波阻抗计算的新思路,即聚焦于用户侧发生故障时的前期阶段,PCC处的谐波波动量只与用户侧谐波波动量有关的特点。在该情况下,可以认为系统侧谐波波动量不影响PCC处的谐波波动伏安特性比。因此,可据此快速计算系统侧谐波阻抗。

通过仿真分析以及和其他计算系统侧谐波阻抗方法的对比,可以看出所提方法的计算结果最接近真值,受到用户侧谐波发射水平的影响也最小。此外,所提的基于故障分量的系统侧谐波阻抗计算方法十分简便,可以通过用户侧变电站的故障录波装置获取数据与波形,是工程研究人员非常易于掌握的计算方法。所做研究工作对更科学地评估用户谐波发射水平以及划分谐波污染责任有一定指导作用。

参考文献

[1] 蒋文林,郭玉恒,薛东江,等. 基于小波的畸变波形同步分层谐波阻抗估计[J]. 电力系统自动化设备, 2005,25(2): 33-36.

[2] 王诗超,沈沉,程建洲. 考虑电流波动特性的系统侧谐波阻抗估计方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(3): 65-70.

[3] Pfajfar T, Blazic B, Papic I. Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008,23(1): 425-433.

[4] Omran W A, El-Goharey H S K, Kazerani M, et al. Identification and Measurement of Harmonic Pollution for Radial and Nonradial Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009,24(3): 1642-1650.

[5] Johnsen O, Peguiron N, Schnegg P, et al. A New System of Measurement of the Network Impedance [J]. Measurement, 1991,9(2): 50-55.

[6] Girgis A A, McManis R B. Frequency Domain Techniques for Modeling Distribution or Transmission Networks Using Capacitor Switching Induced transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989,4(3): 1882-1890.

[7] 刘秀玲,王洪瑞. 电网谐波阻抗的测量及其修正[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(2): 55-59.

[8] De Oliveira A, De Oliveira J, Resende J, et al. Pratical

Approaches for AC System Harmonic Impedance Measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991,6(4): 1721-1726.

[9] Nagpal M, Xu W, Sawada J. Harmonic Impedance Measurement Using three-phase Transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998,13(1): 272-277.

[10] Sumner M, Palethorpe B, Thomas D, et al. A Technique for Power Supply Harmonic Impedance Estimation Using a Controlled Voltage Disturbance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002,17(2): 207-215.

[11] 吕洋,徐政. 投切电容器时的电网谐波阻抗测量方法[J]. 高电压技术,2009,35(7): 1780-1784.

[12] 张安安,杨洪耕. 基于畸变波形同步分层估计谐波阻抗的探讨[J]. 电力系统自动化,2003,27(9): 41-44.

[13] 张安安,马文营,杨洪耕. 复小波在谐波阻抗估计中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版),2003,35(2): 104-107.

[14] 龚华麟,肖先勇,刘亚梅,等. 基于主导波动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.

[15] 华回春,贾秀芳,曹东升,等. 电能质量数据交换格式下的谐波责任估计[J]. 电网技术,2013,37(11): 3110-3117.

[16] 龚华麟,肖先勇. 非线性度法在配电网谐波源探测中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(8): 30-34.

[17] 龚华麟,肖先勇. 基于负荷时域等值模型非线性度的谐波源定位[J]. 四川电力技术,2009,32(1): 9-12.

[18] 惠锦,杨洪耕,叶茂清. 基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10): 73-80.

[19] 华回春,贾秀芳,曹东升,等. 系统谐波阻抗估计的极大似然估计方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10): 1692-1699.

[20] Hui J, Yang H G, Lin S F, et al. Assessing Utility Harmonic Impedance Based on the Covariance Characteristic of Random Vectors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010,25(3): 1778-1786.

[21] 赵熙,杨洪耕. 基于贝叶斯定理的系统谐波阻抗估计[J]. 中国电机工程学报,2016,36(11): 2935-2943.

[22] 李淑蓉,薛永端,徐丙垠,等. 小电流接地故障电弧建模及过电压分析[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(1): 47-53.

作者简介:

龚华麟(1985),男,注册电气工程师,主要从事继电保护研究与检修工作;

卿俊杰(1989),男,主要从事继电保护研究与检修工作;

李官宇(1986),男,主要从事继电保护研究与检修工作。

(收稿日期:2020-04-17)