

# 一种谐波数据存储及责任评估方法

吴俊, 楼伯良, 黄弘扬, 马智泉, 李培, 徐群伟, 吕文韬

(国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014)

**摘要:** 谐波责任划分是谐波治理的基础, 电网节点、容量不断增加使得谐波责任划分变得越发困难。为此, 提出将图论应用于电网谐波存储和计算并给出具体实现方法。首先, 根据现有电网中谐波监测终端不能全覆盖的情况, 建立谐波状态评估模型并利用信赖域进行模型求解。然后, 给出谐波责任划分的指标谐波贡献度计算方法。最后, 在多种线路规模下开展图数据库与关系型数据库运算速度测试, 并以浙江电网某 220 kV 变电站拓扑为例仿真验证所提谐波责任划分算法的正确性。

**关键词:** 谐波; 图数据库; 状态评估; 信赖域; 责任划分

文章编号: 1007-1881(2021)07-0006-06

DOI: 10.19585/j.zjdl.202107002

中图分类号: TM935

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## A Method of Harmonic Data Storage and Responsibility Evaluation

WU Jun, LOU Boliang, HUANG Hongyang, MA Zhiquan, LI Pei, XU Qunwei, LYU Wentao

(State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Harmonic responsibility division is the basis for harmonic governance. However, with the continuous expansion of grid nodes and capacity, harmonic responsibility becomes more and more difficult to divide. For this reason, this paper proposes to apply graph theory to grid harmonic storage and calculation and puts forward specific implementation methods. Firstly, a harmonic state estimation model is established in view of the insufficient coverage of harmonic monitoring terminals, and then the model is solved by trust region algorithm; secondly, it proposes a calculation method of the harmonic contribution of the index of the harmonic responsibility division; finally, it tests the speed of the graph database and the relational database calculation and simulates the topology of a 220 kV substation of Zhejiang power grid to verify the correctness of the harmonic responsibility division.

**Keywords:** harmonic; graph database; state assessment; trust region; responsibility division

## 0 引言

近年来, 随着新能源发电、高压直流输电等技术的发展和运用, 使得电网中大量使用电力电子器件构成的设备, 这些设备成为新的谐波源且威胁系统安全运行<sup>[1-5]</sup>。

谐波责任划分是谐波治理的基础, 然而现有的电力系统谐波监测终端覆盖面较小, 主要分布于主网母线中, 以浙江电网为例, 谐波平台接入谐波装置不超过 5 000 台, 因此难以支撑覆盖全省的谐波责任划分。另外, 用电负荷需求不断增加促使电网容量和节点相应增加, 使得当前电网

已呈现大电网特性, 导致现有基于关系型数据库设计的谐波系统已显现运算瓶颈。

图论是一种非常适合处理电力系统复杂拓扑的技术, 因此已在电力系统中得到广泛应用。文献[6]建立了交流场等效模型并基于图论求解模型, 实现了交流场最后断路器快速、准确、智能的判断, 文献[7]采用基于图论的输电线路功率组成的快分析方法完成关键输电断面快速搜索, 文献[8]引入图论中最小生长树的理论以准确确定故障区段边界实现不接地故障定位。然而鲜有文献将图论应用于谐波计算中。

近年来, 国内外学者在谐波状态评估和谐波责任划分领域开展较多研究, 文献[9]提出了谐波状态估计分层算法, 文献[10]研究了误差不确定性对谐波状态估计的影响。文献[11]利用 M 估计稳

健回归法开展多谐波源责任划分,文献[12]提出以谐波电流中快速变化分量为工具抽取出各谐波源节点与关注母线间的谐波阻抗并计算谐波责任,文献[13]基于稳健回归开展谐波发射水平的研究。然而以上研究少有利用谐波状态评估结果开展谐波责任评估。

针对以上问题,本文首次将图数据库应用于谐波数据存储和计算,进一步的为实现谐波状态评估给出网络节点导纳计算方法并采用信赖域进行模型求解。然后,构建评价谐波责任划分的指标-谐波贡献度。最后,在多种线路规模下对比图数据库与关系数据库的计算速度,并在浙江电网某220 kV变电站拓扑中开展谐波评估及谐波责任划分仿真验证。

## 1 基于图论的系统谐波数据存储与运算

### 1.1 基于图数据库的电网谐波数据存储

图论可为复杂的网络建模及计算提供有效支撑,且已被验证可显著提高复杂网络的计算性能。

在图论中,可以将系统网络建模为图,即  $G(V, E)$ , 其中顶点  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  表示网络对象,而边  $E = \{e_{ij}\}$  用于描述对象  $v_i$  和  $v_j$  之间的关系。

以电力系统中母线、支线及设备的连接关系为基础,可利用图论直观的表述电力系统。具体来说,可将电力系统各部分映射为顶点和边,顶点指发电机、负载、变换器等对象,而线路、变压器、隔离开关等连接部件则可视作边。图1是某个电力系统实际拓扑信息,图2则是利用图论构建的关系。

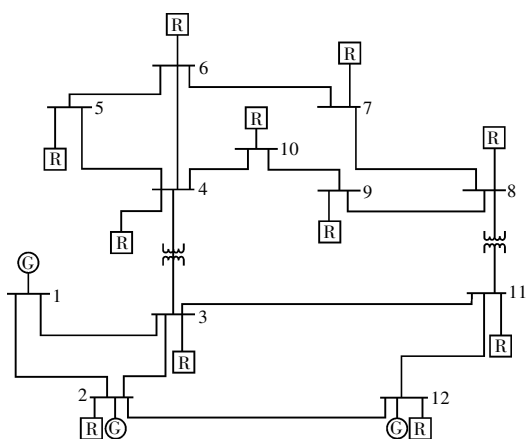


图1 某系统拓扑结构

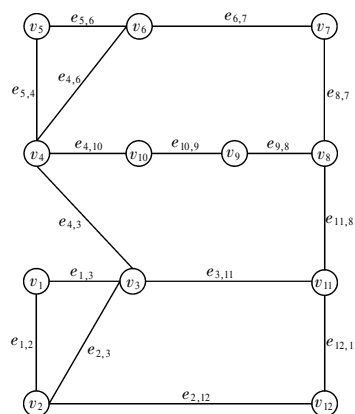


图2 图论转换后拓扑

相比于传统的关系型数据库,基于图论可更直观、简洁表示整个系统谐波信息,例如:无需分别构建母线表、分支线表等再利用中间表建立母线和分支线的关系。为实现基于图论的谐波数据存储,顶点中需要存储顶点id、顶点名称、顶点类型、谐波等数据,谐波数据则包括各次谐波电压(电流)幅值及相角、有功、无功等;边则存储所连接的起始顶点id、线路电阻、线路电抗,对地电容等。

### 1.2 基于图论的数据运算

基于图论计算设计的数据库中由于每个顶点都可以使用来自自身及其邻居的信息独立计算,因此实质上是将一个问题分解为较小的子问题,使得计算灵活且有效。

以实现  $Ax=b$  为例,其对应的矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{23} & A_{33} & \cdots & 0 & \cdots & A_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & A_{kk} & \cdots & A_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & A_{n3} & \cdots & A_{nk} & \cdots & A_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

映射到图论数据库中开展计算时,其效果如图3所示。

## 2 谐波状态评估模型

### 2.1 网络节点导纳

#### 2.1.1 线路阻抗

线路导纳为阻抗  $Z_l$ (如式(1)所示)和对地导

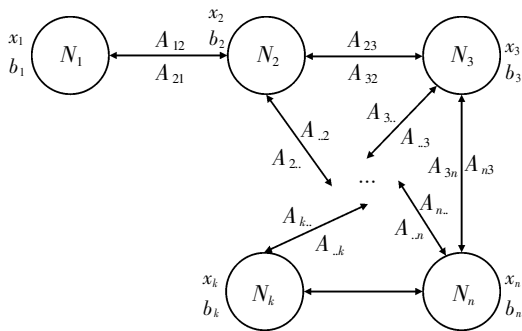


图3 基于图论的计算

纳B的一半,基波与各次谐波模型独立计算。

$$Z_l=R+jX \quad (1)$$

基波与谐波的线路模型差异如图4和图5所示,各次谐波模型计算时,线路电抗X值需要乘以该次谐波阶数,对地导纳同样如此。

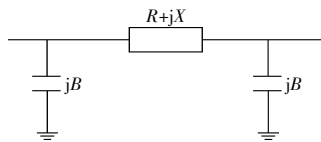


图4 线路基波阻抗

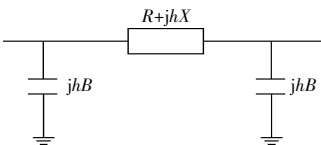


图5 线路谐波阻抗

根据 $Y_l=1/Z_l$ 可以计算线路基波导纳,谐波模型中线路导纳同样以该公式进行计算。

### 2.1.2 节点自阻抗

谐波模型中需要将基波潮流中的线性PQ负荷(即该节点的谐波电流幅值表现为0)数据转化为该PQ节点的谐波阻抗模型,转化后如图6所示,各次谐波模型计算时,电抗X值需要乘以该次谐波阶数。同样通过 $Y=1/Z$ 计算该节点的谐波自阻抗。

### 2.1.3 网络节点导纳矩阵

以图7所示的简单3节点系统为例,假设某次谐波的相应支路导纳与节点自导纳分别如表1,2所示,节点导纳矩阵Y是一个 $n \times n$ 阶矩阵,其对角线元素 $Y_{ii}$ 等于与该节点相连的所有线路导纳、线路对地导纳一半、以及该节点的自导纳

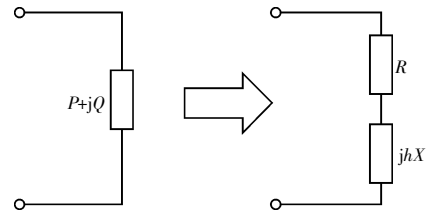


图6 PQ负荷的谐波阻抗转化示意

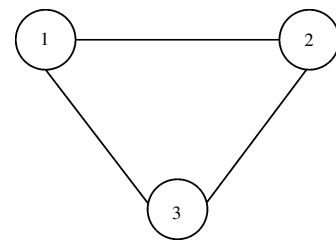


图7 3节点系统

表1 3节点系统的线路参数

线路首末段	线路导纳	对地电导的一半
1-2	Y12	B12
1-3	Y13	B13
2-3	Y23	B23

表2 3节点系统节点参数

节点	节点自导纳
2	Y20
3	Y30

之和,非对角线元素 $Y_{ij}$ 等于连接节点 $i, j$ 间的支路导纳的负值。

### 2.2 节点谐波状态评估模型

以图7所示的3节点系统某次谐波为例,假设节点1,2为已有谐波测量节点,3为未测量节点。将网络节点导纳矩阵Y、网络中测量谐波节点电压向量、有功、无功代入式(2)、式(3)计算:

$$\Delta P_i = P_i - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j - B_{ij} e_j) \quad (2)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j - B_{ij} e_j) \quad (3)$$

式中:  $V_i = e_i + jf_i$ , 即 $e_i$ 表示电压幅值乘以电压相角的 $\cos()$ 函数值, $f_i$ 则是电压幅值乘以电压相角的 $\sin()$ 函数值; $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ , 分别是导纳和阻抗。

而状态估计模型如式(4)所示,令 $f(x)$ 的值在求解域中最小的 $x$ 即为待求值。

$$f(x) = \sum_{i=1}^m DP_i^2 + \sum_{i=1}^m DQ_i^2 \quad , \quad (4)$$

式中:  $DP_i$ ,  $DQ_i$  分别代表已测节点  $i$  的谐波有功、无功平衡。

### 2.2.1 模型求解

本文使用信赖域求解式(4), 信赖域算法的基本思想在当前迭代点  $x_k$  给定一个信赖域半径  $h_k$  ( $h_k > 0$ ), 在  $x_k$  为中心  $h_k$  为半径内以一个二次模型逼近目标函数  $f(x)$ , 并以二次模型在  $x_k$  的信赖域内的极小值点作为下一个迭代点<sup>[14]</sup>。

信赖域的数学模型如式(5)所示, 是目标函数在极值点的一个近似二次函数:

$$\begin{cases} \min m_k(s) = f(x) + g_k^T s + \frac{1}{2} s^T D_k s \\ \text{s.t. } |s| \leq h_k \end{cases} \quad , \quad (5)$$

式中:  $g_k$  为目标函数  $f(x)$  在当前迭代点  $x_k$  的梯度;  $D_k$  为  $f(x)$  在  $x_k$  处 Hesse 阵  $\nabla^2 f(x_k)$ ;  $h_k$  为第  $k$  次迭代的信赖域半径。

目标函数  $f(x)$  在第  $k$  步的实际下降量  $Ar_k$  与信赖域模型的预测下降量  $Pr_k$  分别见式(6)、式(7), 评价函数  $r_k$  为:

$$Ar_k = f(x_k) - f(x_k + s_k) \quad , \quad (6)$$

$$Pr_k = f(x_k) - m^k(s_k) \quad , \quad (7)$$

$$r_k = Ar_k / Pr_k \quad , \quad (8)$$

式中:  $s_k = x_{k+1} - x_k$  为某次迭代的步长。

$r_k$  一方面衡量信赖域模型与目标函数的逼近程度, 当  $r_k > 0$  时, 说明与优化目标一致, 函数值呈下降趋势变化, 试探步长可以接受, 当  $r_k < 0$  时, 则说明与求解目标相反, 该步试探步长需舍弃。另一方面  $r_k$  可用于确定下次迭代的信赖域半径, 一般地, 若  $r_k$  接近于 1, 接近程度良好, 可增大信赖域半径; 若  $r_k$  接近于 0, 则缩小信赖域半径; 若  $r_k$  位于 (0, 1) 之间, 不接近区间边界, 可保持信赖域半径不变。

### 2.3 谐波责任评估

2.2 节中实现了各节点谐波状态评估, 其本质上是求取了系统整体叠加到该节点的谐波。然而开展谐波责任划分需量化系统中其他节点对该节点的谐波影响情况。因此, 本文以谐波状态评估值为基础, 通过谐波潮流量化评估其他节点对某个节点的谐波贡献情况。

首先, 计算出的某次网络节点电压向量  $V_i$  与

网络该次节点导纳矩阵  $Y$  作为输入。

网络的谐波潮流计算公式可以写为:

$$\dot{I} = Y \dot{V} \quad , \quad (9)$$

$$U_m = \sum_{j=1}^N Z_{mj} I_j = \sum_{j=1}^N U_{mj} \quad , \quad (10)$$

式中:  $Z_{mj}$  为节点  $m$  与  $j$  ( $m, j=1, 2, \dots, N$ ) 之间的谐波互阻抗 ( $m \neq j$ ) 或自阻抗 ( $m=j$ ); 节点阻抗矩阵  $Z$  是节点导纳矩阵的逆。以关注节点  $m$  的谐波电压相量为参考, 网络中其他谐波源  $j$  对该节点的谐波贡献度指标定义为:

$$\begin{aligned} HC_{mj} &= \frac{|\dot{V}_{mj}|}{|\dot{V}_m|} \cos(\varphi_{mj} - \varphi_m) \times 100\% \\ &= \frac{\dot{V}_{mj} \dot{V}_m}{|\dot{V}_m|^2} \cos(\varphi_{mj} - \varphi_m) \times 100\% \quad . \quad (11) \end{aligned}$$

## 3 验证

### 3.1 图数据库验证

为验证图论在处理电网模型高效性, 本文构建了在 6 000 条线路、12 000 线路、24 000 条路、36 000 条线路的工况下, 分别在关系型数据库 oracle 及图数据平台 TigerGraph 的运算, 其运算情况如图 8 所示。

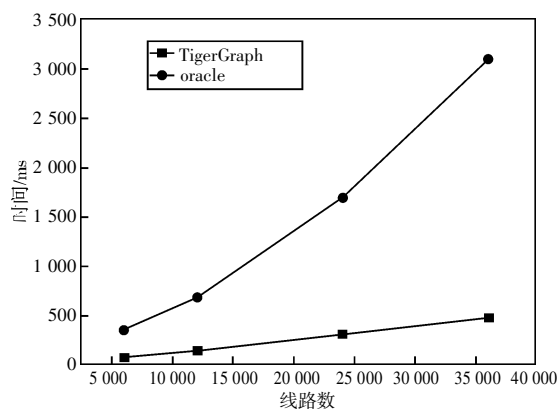


图 8 不同数据库运算效率对比

从图 8 可以看出: 随着线路规模的增大, 基于图平台的运算效率显著优于关系型数据库。在 6 000 条规模时 oracle 下的运算时间是 TigerGraph 的 4.11, 而在 36 000 条时则达到 6.42 倍。

### 3.2 谐波责任验证

本文以某 220 kV 变电站拓扑为对象, 共计 26 个测点, 如图 9 所示, 包含 10 个未测点及 16

表3 节点1谐波贡献度

节点j	节点谐波电流注入/A	相对于节点1的阻抗/ $\Omega$	$u_{ij}/V$	贡献度/%
5	0.04081-0.09263i	0.11081+0.0016i	0.00467-0.0102i	16.518 770 14
7	0.03667-0.09417i	0.11504+0.0057i	0.00475-0.01063i	17.148 185 13
20	0.03565-0.09468i	0.11414+0.00612i	0.00465-0.01059i	17.039 927 55
21	0.03085-0.09695i	0.10953-0.0075i	0.00265-0.01085i	16.303 987 02
22	0.04182-0.09231i	0.1074-0.00803i	0.00375-0.01025i	16.084 348 21
23	0.03844-0.0935i	0.11347+0.00416i	0.00475-0.01045i	16.904 781 96

表4 节点5谐波贡献度评估

节点j	节点谐波电流注入/A	相对于节点1的阻抗/ $\Omega$	$u_{ij}/V$	贡献度/%
5	0.04081-0.09263i	0.10779+0.08378i	0.01216-0.00657i	18.634 955 85
7	0.03667-0.09417i	0.10521+0.00306i	0.00415-0.0098i	16.695 190 25
20	0.03565-0.09468i	0.10432+0.003i	0.004-0.00977i	16.546 103 90
21	0.03085-0.09695i	0.10031-0.00717i	0.0024-0.00995i	15.516 158 47
22	0.04182-0.09231i	0.0983-0.00802i	0.00337-0.00941i	15.551 780 08
23	0.03844-0.0935i	0.10533+0.01695i	0.00563-0.0092i	17.055 811 46

个测试点。文献[15]已对基于信赖域进行谐波状态给出了算例说明,本文不再赘述。应用图论处理后,其拓扑如图10所示。

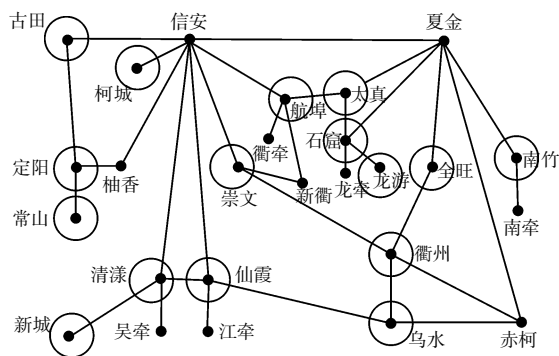


图9 某220 kV变电站拓扑

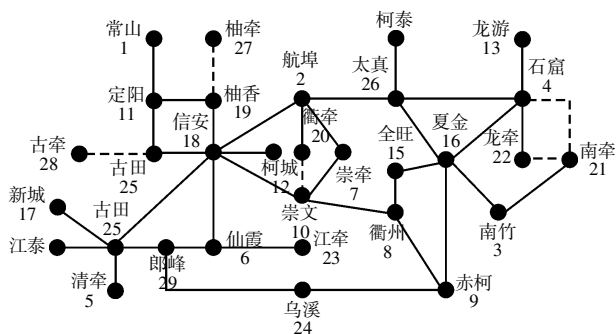


图10 基于图论表示的某220 kV变电站拓扑

以非谐波源节点1(常山)为关注节点,谐波源节点5,7,20,21,22,23对其谐波贡献度如表3所示,其中节点7和20谐波贡献度最大,但节点5,21及22则相近。

以谐波源节点为例,如以节点5(吴牵)为关注节点,谐波源节点5,7,20,21,22,23对其谐波贡献度如表4所示,从该表数据来看,对于节点5来说,节点23贡献度较大,而节点7和20次之,节点21和22稍小。

### 4 结语

针对现代电网大容量、跨区域、高耦合、电力电子化的特性下,谐波责任划分所需的状态评估和计算较为困难的问题,本文将图论应用于大电网谐波数据的存储和计算,利用信赖阈求解谐波状态模型,并构建谐波贡献度作为谐波责任划分的指标,最后比对不同线路规模下图数据库和关系数据库运算速度,并在某220 kV变电站拓扑中仿真验证所提谐波责任划分算法的正确性。

### 参考文献:

[1] 庄双勇,赵伟,何学农,等.超谐波引发的电能质量问题及相关研究[J].电测与仪表,2019,56(1):41-52.  
[2] 张逸,林焱,吴丹岳.电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J].电力系统保护与控制,2015,43(2):138-147.

- [3] 汪颖,孙建风,肖先勇,等.改进加权平均电流反馈的LCL型逆变器控制方法[J/OL].高电压技术:1-11[2020-12-29].<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200957>.
- [4] 马智泉,查蕾,胡淳,等.浙江省谐波污染源调查统计及分析[J].浙江电力,2020,39(11):88-96.
- [5] 康鹏,郭伟,黄伟钢,等.区域电网电能质量问题及治理关键技术综述[J].电测与仪表,2020,57(24):1-12.
- [6] 于海,曾丽丽,杨亚璞,等.基于图论的特高压直流工程最后断路器自适应判断策略[J].电力系统自动化,2016,40(5):121-126.
- [7] 程临燕,张保会,郝治国,等.基于线路功率组成的关键输电断面快速搜索[J].中国电机工程学报,2010,30(10):50-56.
- [8] 张利,赵波,王丽婕,等.基于图论的不接地系统在线故障定位方法[J].电网技术,2019,43(8):3025-3031.
- [9] 吴笃贵,徐政.基于相量量测的电力系统谐波状态估计(I)——理论、模型与求解算法[J].电工技术学报,2004,19(2):64-68.
- [10] 牛胜锁,张达,梁志瑞,等.基于抗差总体最小二乘法的电力系统谐波状态估计[J].电力系统保护与控制,2014,42(11):106-111.
- [11] 孙媛媛,尹志明.基于M估计稳健回归的多谐波源责任区分[J].中国电机工程学报,2012,32(31):166-173.
- [12] 惠锦,杨洪耕,叶茂清.多谐波源条件下的谐波污染责任划分研究[J].中国电机工程学报,2011,31(13):48-54.
- [13] 车权,杨洪耕.基于稳健回归的谐波发射水平估计方法[J].中国电机工程学报,2004,24(4):43-46.
- [14] CONN A R, GOULD N I M, TOINT P L. Trust-region methods[M]. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.
- [15] 肖先勇,胡誉蓉,王杨,等.基于非同步电能质量监测系统的谐波状态估计[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4121-4132.
- [16] 李彪,菅永,曹雪源,等.基于主从控制的微电网电压质量改善策略[J].电力工程技术,2020,39(6):117-123.
- [17] 顾阳,刘成健,辛瑶,等.基于电能质量精细化控制的供电服务成效提升研究与应用[J].电器与能效管理技术,2020(8):94-99.
- [18] 申杰兵,闫浩伟,张树宏.光伏电站谐波超标的分析与治理[J].山西电力,2019(2):10-15.
- [19] 王宇飞,徐琳.地铁牵引供电系统接入对电网电能质量影响分析[J].四川电力技术,2019,42(1):33-36.
- [20] 郭敏,陈卫东,金庆忍.谐波有功功率责任指标定义与计算方法研究[J].电力工程技术,2019,38(1):84-89.

收稿日期:2021-01-27; 修回日期:2021-03-15

作者简介:吴俊(1980),男,高级工程师,主要研究方向为继电保护及自动化研究。

(本文编辑:童凯)