

# 基于改进灰色关联分析的 GIS 质量评价

郝艳捧<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 刘远鹤<sup>1</sup>, 王宇<sup>2</sup>, 阳林<sup>1</sup>, 卢启付<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:** 提出了基于改进灰色关联分析法的气体绝缘金属封闭式开关设备(GIS)质量评价方法。该方法结合熵权法和专家打分法确定各评价指标的组合权重,克服了原始灰色关联分析计算中指标均权及专家赋权的不足。然后采用改进后的灰色关联分析法对 GIS 进行质量评价。将组合赋权法引入灰色关联分析方法中,充分利用各指标的全部信息,有效提高了评价精度,使得评价结果更加科学、合理。

**关键词:** 气体绝缘金属封闭式开关设备; 设备质量; 评价指标; 灰色关联分析; 组合赋权

**中图分类号:** TM 595

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.024

## 0 引言

气体绝缘金属封闭式开关设备(GIS)因其占地面积小、运行维护工作量小、可靠性高,在当今电力系统中得到了广泛应用。然而,随着各种 GIS 的采购数量日益增加,发生缺陷和事故的情况也越来越多<sup>[1]</sup>,质量问题频繁出现,GIS 质量也逐渐成为电网公司在招标时考核供应商的重要评分项目。如何有效地对 GIS 质量进行评价,优先考虑 GIS 质量优良的投标方,为电网物资招标采购提供评分依据变得尤为重要。避免采购到质量较差的 GIS,可提高电网运行可靠性,减少电力经济损失。

目前国内外针对电力设备常用的评价方法是层次分析法<sup>[2]</sup>及模糊综合评价法<sup>[3]</sup>。模糊综合评价法的核心包括确定指标权重向量和选择合适的隶属度函数两方面<sup>[4]</sup>,通常利用层次分析法确定模糊综合评价方法中评价指标的权重<sup>[5-6]</sup>。上述方法都依赖于专家打分评价,只是对专家提供的评价信息处理方式不同,其主观性较强。在电力设备质量评价过程中,评价指标的统计数据往往非常有限,数据波动较大,分布规律不明显。具有所需原始数据少、原理简单、易于挖掘数据规律等优点的灰色系统理论,尤其是灰色关联分析理论在处理此类问题时往往能取得令人满意的结果<sup>[7-9]</sup>。有关 GIS 的质量评价,国内外研究者主要针对其运行状态进行评估,利用在线监测系统实时得到的各状态参量数据,实现对 GIS 运行状态的准确评估,以便及时进行维护与检修<sup>[10-11]</sup>。但与针对在运设备进行质量评价相比,如何在设备投入电网运行之前就有效地保证设备质量是当前电网设备管控的关键因素之一,而要实现以它有效地降低事故率,就应对设备的来源进行分析。

本文提出将灰色关联分析方法应用于 GIS 质量评价问题。结合组合权重的思想,充分利用客观数据,采用熵权法确定评价指标的客观权重,同时结合专家打分法确定的主观权重,获得最终的指标权重,提高评价模型的精度。然后将组合权重引入灰色关联分析计算过程中,得到改进的灰色关联度。最后,根据灰色关联度的排序结果,实现对供应商 GIS 质量的评价,为电网公司选择 GIS 质量优良的供应商提供有效依据。

## 1 灰色关联分析

### 1.1 灰色关联计算

假定有  $k$  个待评价的对象,  $n$  个评价指标所构成的评价矩阵  $X = [x_{ij}]_{k \times n}$ 。首先要确定反映系统特征的参考序列  $X_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ , 以及所要分析的系统因子比较序列  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) (i = 1, 2, \dots, k)$ , 便可进行灰色关联分析计算<sup>[12]</sup>。

a. 求取各比较序列的数值相对于参考序列的数值的偏离程度  $\Delta\xi_{0i}(j)$ :

$$\Delta\xi_{0i}(j) = |x_{0j} - x_{ij}| \quad (1)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, n$ 。

b. 求取两级最大极差  $M$  和最小极差  $m$ :

$$\begin{cases} M = \max_i \max_j \Delta\xi_{0i}(j) \\ m = \min_i \min_j \Delta\xi_{0i}(j) \end{cases} \quad (2)$$

c. 关联度系数和关联度分别如式(3)、(4)所示。

$$\gamma(x_{0j}, x_{ij}) = \frac{m + \rho M}{\Delta\xi_{0i}(j) + \rho M} \quad (3)$$

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma(x_{0j}, x_{ij}) \quad (4)$$

其中,  $\rho$  为分辨系数,一般取为 0.5。

### 1.2 改进灰色关联分析

由式(4)可知,灰色关联计算中各个指标对系统的影响都是相同的,关联度为关联度系数的算术平均

收稿日期:2016-08-08;修回日期:2017-05-12  
基金项目:广东电网公司科技项目(GDKJXM00000008)  
Project supported by the Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Corporation(GDKJXM00000008)

值。但实际上每个指标序列对系统的作用和影响力并不相同,因此必须给各评判指标赋予权重,来反映其对系统的重要性<sup>[14]</sup>。

根据信息论的定义,信息熵是一种描述系统无序程度的量值,某个指标的熵越小,反映信息的变异程度越大,所能提供的信息也越多,在综合评价中对系统整体的影响程度越大,则该指标的权重也就越大。这种通过计算各项指标的信息熵来确定指标权重的方法称为熵值法或熵权法<sup>[13]</sup>。

将评价矩阵  $X$  标准化后记为  $X'=[x'_{ij}]_{k \times n}$ ,  $x'_{ij}$  为标准化后的特征值,则各评价指标的熵值  $E_j$  为:

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^k P_{ij} \ln P_{ij}}{\ln k} \quad (5)$$

其中,  $P_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^k x'_{ij}$ , 为归一化处理后的指标数据。

则第  $j$  个指标的熵值权重  $\beta_j$  为:

$$\beta_j = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^n G_j} \quad (6)$$

其中,  $G_j = 1 - E_j$  为第  $j$  个指标的差异系数。

同时,为了全面反映评价指标的重要性,并考虑专家的经验判断力,将专家对各指标赋予的主观权重与熵值法确定的客观权重相结合,得到各指标最终的权重。为了放大指标之间的重要度,本文采用乘法合成法对指标进行组合赋权<sup>[14]</sup>,具体赋权公式为:

$$\omega_j = \frac{\alpha_j \beta_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_j} \quad (7)$$

其中,  $\omega_j$  为第  $j$  个指标的组合权重;  $\alpha_j$  为第  $j$  个指标利用专家赋权法确定的主观权重。

本文将上述组合权重与灰色关联分析评价方法相结合后的改进灰色关联综合评价方法应用于 GIS 质量评价。

## 2 基于改进灰色关联分析的 GIS 质量评价方法

### 2.1 确定评价指标

为了全面、有效地评价 GIS 质量,反映供应商竞争力,以选取合适的供应商,需要构建完善的 GIS 质量评价指标体系。文献[15]中提出从输变电设备的基本性能、试验状况、运行状况以及设备的历史记录这 4 个方面对输变电设备的质量状况进行综合评价。从电力设备全过程管理角度,出厂试验是为了检验制成的设备是否达到了设计性能要求,涵盖了主要零部件的验收和 GIS 各元件组装后整体试验内容,其重要性不言而喻。同时,根据某省电网公司《投标人供货及履约情况评分细则(试行)》及《物资供应商履约评价加减分标准》的相关规定,设备投入运行后

的质量状况也是电网公司考核供应商的重要评分项目。设备的运行质量状况主要通过设备质量问题造成的紧急(重大)缺陷、事故次数反映,这 2 个指标也是电网公司对开关类设备进行运行状况分析的重要统计数据。因此,本文选取反映设备质量问题的评价指标为出厂试验一次不通过率、运行缺陷率和事故率。

### 2.2 评价矩阵标准化

针对  $k$  个待评价的 GIS 供应商,由前文分析可列出 3 个评价指标构成的设备质量评价体系,即  $n=3$ ,以此来评价近 5 年中的 GIS 质量。为消除各指标单位不同的影响,将各指标进行标准化处理,同时需进行平移处理避免求解熵值时对数无意义<sup>[16]</sup>。

当第  $j$  个指标为正向指标,即效益型指标时,指标越大越好,则标准化公式为:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} + 1 \quad (8)$$

当第  $j$  个指标为负向指标,即成本型指标时,指标越小越好,则标准化公式为:

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} + 1 \quad (9)$$

其中,  $\max\{x_{ij}\}$ 、 $\min\{x_{ij}\}$  分别为第  $j$  个指标的最大值、最小值。

在本文 GIS 质量评价指标体系中,出厂试验一次不通过率、缺陷率及事故率指标越小说明 GIS 质量越优,属于成本型指标。因此,本文中各评价指标数据均按式(9)进行标准化处理。

### 2.3 确定评价指标的综合权重

利用标准化后的数据,根据式(5)、(6)计算得到各评价指标的熵值权重  $\beta_j$ ,即为指标的客观权重。依据前文的专家评分标准,设备在运行中出现 1 次事故扣除 14 分,出现 1 次缺陷质量问题扣除 2 分,出现 1 次出厂试验一次不通过扣除 2 分,确定各指标的主观权重  $\alpha_j$ 。按式(7)进行计算,得出指标的组合权重系数向量  $W=[\omega_1, \omega_2, \omega_3]$ 。

### 2.4 求解最终灰色关联度

由式(1)~(3),利用灰色关联分析方法计算得到关联度系数矩阵  $A$ ,结合组合权重系数向量  $W$ ,得到最后的灰色关联度向量  $R$ :

$$R = W \times A^T \quad (10)$$

最后,根据所求灰色关联度的大小对各供应商的 GIS 质量进行排序。由前文所述该评价体系中的评价指标为成本型指标,本文中选取的参考序列为各项评价指标数据的最小值,因此关联度越大,则表示 GIS 质量越优;反之则表示 GIS 质量越差。

## 3 算例分析

本文选取 GIS 供货量居某省电网前五的供应商

设备为评价对象,近 5 年来各供应商 GIS 的出厂试验一次不通过率、缺陷率及故障率如表 1 所示。首先,利用式(9)对评价矩阵进行标准化处理得到标准化矩阵,再根据式(5)、(6)计算得到各评价指标的客观权重向量为:

$$\beta=(0.3324,0.3592,0.3084)$$

表 1 GIS 质量评价指标原始数据

Table 1 Original data of GIS quality evaluation indices

供应商	出厂试验一次不合格率/%	缺陷率/[次·(百间隔·a) <sup>-1</sup> ]	故障率/(次·百间隔 <sup>-1</sup> )
1	3.66	0.50	2.08
2	2.67	0.32	0.58
3	3.77	0.56	2.78
4	20.00	1.53	2.75
5	5.19	0.77	3.45

结合前文所述,各评价指标的主观权重向量  $\alpha=(0.11,0.11,0.78)$ ,则由式(7)得出 3 个指标的组权重系数向量为:

$$W=(0.1155,0.1248,0.7597)$$

由于 3 个评价指标属于成本型指标,选取对应的参考序列  $X_0$  为:

$$X_0=(2.67,0.32,0.58)$$

由式(3)—(6)计算得到各供应商的 GIS 质量指标与参考序列的灰色关联度系数矩阵,如表 2 所示。最后,由组合权重系数向量与关联度系数矩阵计算得到新的关联度值向量  $R$ :

$$R=(0.8190,1,0.7732,0.4342,0.6589)$$

表 2 灰色关联系数

Table 2 Grey correlation coefficients

供应商	关联度系数向量
1	(0.8975,0.8339,0.6558)
2	(1,1,1)
3	(0.8874,0.7901,0.565)
4	(0.3333,0.4275,0.5684)
5	(0.7747,0.6675,0.499)

根据灰色关联度的大小对各供应商的 GIS 质量状况进行排序,结果为:2 号>1 号>3 号>5 号>4 号(“>”表示优于,后同)。由此可知,2 号供应商在 GIS 质量方面较优于其他 4 家供应商,其综合评分为 1;4 号供应商的 GIS 质量水平最低,其综合评分为 0.4342。因此,对各供应商进行 GIS 质量评价后,应优先考虑选择 2 号供应商。

由上述计算结果可知,不同权重求取方法下的指标权重不同,这可能会对灰色关联度的计算结果造成影响,从而影响最终的评价结果,如表 3 所示。

由于各电压等级 GIS 在结构、性能等方面都有所差异,因此有必要针对不同电压等级下的 GIS 质量进行评价。本文以 220 kV GIS 为例,选取前文所述 GIS 中相应电压等级下 GIS 近 5 年的质量问题统计

表 3 不同指标权重值求取方法下的灰色关联度值(I)  
Table 3 Grey correlation degrees for different index weight determination methods(I)

供应商	灰色关联度		
	组合权重法	专家打分法	熵值法
1	0.8190	0.8213	0.7911
2	1	1	1
3	0.7732	0.7760	0.7416
4	0.4342	0.4326	0.4468
5	0.6589	0.6608	0.6426

数据为原始数据(如表 4 所示)对其进行质量评价。

表 4 220 kV GIS 质量评价指标原始数据

Table 4 Original data of 220 kV GIS quality evaluation indices

供应商	出厂试验一次不通过率/%	缺陷率/[次·(百间隔·a) <sup>-1</sup> ]	故障率/(次·百间隔 <sup>-1</sup> )
1	6.12	1.49	0
2	0	0.58	0.29
3	6.90	0.68	1.44
4	45.45	1.84	0.61
5	13.04	2.00	1.50

同理可得,评价指标的客观权重向量为:

$$\beta=(0.2324,0.4429,0.3247)$$

评价指标的组权重系数向量为:

$$W=(0.0780,0.1487,0.7732)$$

此时,选取对应的参考序列  $X_0$  为:

$$X_0=(0,0.58,0)$$

最终得到新的关联度值向量  $R$  为:

$$R=(0.9218,0.7962,0.6332,0.5132,0.4824)$$

根据关联度值的大小,各供应商的 220 kV GIS 质量排序为:1 号>2 号>3 号>4 号>5 号。因此,在对 220 kV GIS 供应商进行设备质量评价后,应优先考虑选取 1 号供应商。同理,不同指标权重求取方法下 220 kV GIS 质量的灰色关联度计算结果见表 5。

表 5 不同指标权重值求取方法下的灰色关联度值(II)  
Table 5 Grey correlation degrees for different index weight determination methods(II)

供应商	灰色关联度		
	组合权重法	专家打分法	熵值法
1	0.9218	0.9310	0.7670
2	0.7962	0.7944	0.9144
3	0.6332	0.6149	0.4925
4	0.5132	0.4945	0.6020
5	0.4824	0.4832	0.5513

由上述算例结果可知,在不考虑某一电压等级 GIS 质量状况的条件下,不同权重求取方法对供应商 GIS 质量的评价结果几乎没有影响,各供应商产品质量水平的排序结果均为 2 号>1 号>3 号>5 号>4 号,如表 3 所示;在考虑某一电压等级下的 GIS 质量状况时,不同权重求取方法对供应商的 GIS 质量评价结果影响较为显著,利用组合权重法和专家打分法所得到的供应商产品质量排序为 1 号>2 号>3 号>4 号>5 号,

利用熵值法所得到的排序结果为2号>1号>4号>5号>3号,如表5所示。

综上所述,针对不同评价对象,利用不同指标权重求取方法所得评价结果存在一定的差异。由算例计算结果可知,220 kV GIS的出厂试验一次不通过率、缺陷率指标的权重分别为0.078、0.1487,而2.3节中所述专家打分法则认为这2个指标对评价对象的影响是一致的,即出现一次出厂试验不通过或运行缺陷均扣2分,主观随意性较强,忽略了指标权重之间可能存在的差异性。因此,本文提出的方法能有效避免某种权重决定整体权重的情况,更好地反映评价指标在评估中的地位,具有一定的优越性;其评价结果与专家打分法的结果基本一致,这也表明了本文方法的有效性。

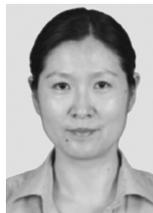
## 4 结论

本文将熵权法和灰色关联分析相结合应用于GIS质量评价体系中,并提出选取设备的出厂试验一次不通过率、缺陷率和故障率作为评价指标,同时利用组合权重的思想,将专家打分法与熵权法相结合,求解各评价指标的综合权重值,避免了原始灰色关联度的权重采用平权的缺陷,全面反映了指标的重要性,从而使得评价结果更加科学有效,可为电网公司设备入网评价提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] 陈曦. 广东电网GIS设备应用与状态检修分析研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.  
CHEN Xi. Studies on GIS equipment application and condition-based maintenance in Guangdong Power Grid[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2010.
- [2] 赵云飞,陈金富. 层次分析法及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备,2004,24(9):85-87.  
ZHAO Yunfei,CHEN Jinfu. Analytic hierarchy process and its application in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(9):85-87.
- [3] 杨丽徒,于发威,包毅. 基于物元理论的变压器绝缘状态分级评估[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):55-59.  
YANG Lixi,YU Fawei,BAO Yi. Classification evaluation of transformer insulation condition based on matter-element theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):55-59.
- [4] ABU-SIADA A,HMOOD S. A new fuzzy logic approach to identify power transformer criticality using dissolved gas-in-oil analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2015,67:401-408.
- [5] 孙和义,浦昭邦,赵学增. 基于模糊神经网络高压电气设备绝缘状况评价方法研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(1):5-8.  
SUN Heyi,PU Zhaobang,ZHAO Xuezheng. Insulation status estimation for high voltage electric equipment based on fuzzy neural network[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(1):5-8.
- [6] ZHAO Xiang,CHEN Gang,YUE Qiangbin. Equipment support quality management effectiveness evaluation based on FCE method[J]. Procedia Engineering,2011,15:4377-4381.
- [7] 罗毅,周创立,刘向杰. 多层次灰色关联分析法在火电机组运行评价中的应用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(17):97-103.
- LUO Yi,ZHOU Chuangli,LIU Xiangjie. Application of the multi-level grey relational analysis method in operation assessment of thermal power units[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(17):97-103.
- [8] 宋斌,于萍,罗运柏,等. GRA方法在变压器故障诊断中的应用研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(4):64-67.  
SONG Bin,YU Ping,LUO Yunbai,et al. Application study on fault diagnosis of transformer by gray relational analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(4):64-67.
- [9] 黄新波,罗兵,王勇,等. 用灰关联法分析气象因素对MOA在线监测的影响[J]. 高电压技术,2010,36(6):1468-1474.  
HUANG Xinbo,LUO Bing,WANG Yong,et al. Influence of climatic factors on on-line monitoring of MOA using grey relational analysis[J]. High Voltage Engineering,2010,36(6):1468-1474.
- [10] 颜湘莲,宋果,王承玉,等. 基于SF<sub>6</sub>气体分解产物检测的气体绝缘开关设备状态监测[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):83-88.  
YAN Xianglian,SONG Gao,WANG Chengyu,et al. Gas-insulated switchgear state monitoring based on SF<sub>6</sub> decomposition products detection[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):83-88.
- [11] PHARMATRISANTI A,SMIT J J. Integrated assessment model of GIS operating under tropical conditions[C]//2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Bali, Indonesia:IEEE,2012:505-508.
- [12] 李玉洁,方瑞明. 基于改进加权灰关联分析法的风电机组可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(14):63-69.  
LI Yujie,FANG Ruiming. Reliability assessment for wind turbine based on weighted degree of improved grey incidence[J]. Power System Protection and Control,2015,43(14):63-69.
- [13] 罗毅,李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策[J]. 电网技术,2013,37(1):77-81.  
LUO Yi,LI Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology,2013,37(1):77-81.
- [14] 刘俊华,罗隆福,张志文,等. 电力变压器灰色关联故障诊断模型的组合权重法[J]. 高压电器,2012,48(1):90-94.  
LIU Junhua,LUO Longfu,ZHANG Zhiwen,et al. Fault diagnosis model of power transformer based on grey relation with combined weights[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(1):90-94.
- [15] 许广如. 电力设备质量评价的建模与实现[D]. 广州:华南理工大学,2014.  
XU Guangru. Modeling and implementation of quality evaluation of electrical equipment[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2014.
- [16] FAGBOTE E O,OLANIPEKUN E O,UYI H S. Water quality index of the ground water of bitumen deposit impacted farm settlements using entropy weighted method[J]. International Journal of Environmental Science and Technology,2014,11(1):127-138.

## 作者简介:



郝艳捧

郝艳捧(1974—),女,河北石家庄人,教授,博士,主要研究方向为关键电力设备绝缘状态诊断、大气压力介质阻挡放电、电力系统过电压及其防护等(E-mail:yphao@scut.edu.cn);

张磊(1992—),男,湖南益阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力设备全寿命周期管理(E-mail:zl2402@126.com);

刘远鹤(1993—),男,广东河源人,硕士研究生,主要研究

方向为电力设备全寿命周期管理(E-mail:yuanhelio@sina.com);

王宇(1984—),男,河北保定人,工程师,硕士,研究方向为电网设备器材检验及质量管理技术(E-mail:wangyuxzc@163.com);

阳林(1984—),男,湖南郴州人,讲师,博士,通信作

者,研究方向为输变电设备外绝缘及在线监测技术(E-mail:eplyang@scut.edu.cn);

卢启付(1974—),男,山西大同人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为高压电气设备试验与绝缘诊断技术(E-mail:qf\_lu@163.com)。

## GIS quality evaluation based on improved grey relational analysis

HAO Yanpeng<sup>1</sup>,ZHANG Lei<sup>1</sup>,LIU Yuanhe<sup>1</sup>,WANG Yu<sup>2</sup>,YANG Lin<sup>1</sup>,LU Qifu<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** A method based on the improved grey relational analysis is proposed for evaluating the quality of GIS (Gas Insulated Switchgear) equipment, which combines the entropy weight method with the expert scoring method, instead of the average index weight and the expert-assigned index weight adopted in the original grey relational analysis, to determine the combination weight of each evaluation index, and then applies the improved grey relational analysis to evaluate the quality of GIS equipment. By introducing the combination weighting method into the grey relational analysis, all the information of each index is fully used to effectively improve the accuracy of evaluation and make the evaluation result more scientific and reasonable.

**Key words:** GIS; equipment quality; evaluation indexes; grey relational analysis; combination weighting

(上接第160页 continued from page 160)

电力自动化设备, 2014, 34(12): 26-30.

LIU Xingjie, XIE Chunyu. Wind power fluctuation interval estimation based on beta distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 26-30.

[18] 吕晓禄, 梁军, 负志皓, 等. 风电场出力的纵向时刻概率分布特性[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 40-45.

LÜ Xiaolu, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Longitudinal instant probability distribution of wind farm output power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 40-45.

[19] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 多馈入直流输电系统谐波交互影响分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 105-110.

YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Harmonic interaction analysis for multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 105-110.

[20] 王灿, 罗隆福, 陈跃辉, 等. 一种改进型感应滤波高压直流输电系统及其谐波传递特性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 127-132.

WANG Can, LUO Longfu, CHEN Yuehui, et al. Harmonic interaction analysis for multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 127-132.

### 作者简介:



王智琦

王智琦(1991—),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制(E-mail:pqlab123@163.com);

杨洪耕(1949—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电能质量分析与控制;

肖楚鹏(1984—),男,湖北随州人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统节能降耗、能效测评;

冷月(1992—),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制。

## Harmonic source tracing based on interval constraints

WANG Zhiqi<sup>1</sup>, YANG Honggeng<sup>1</sup>, XIAO Chupeng<sup>2</sup>, LENG Yue<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. NARI(Wuhan) Equipment & Engineering Efficiency Evaluation Center, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A method based on the interval constraints is proposed to trace the main harmonic source of PCC (Point of Common Coupling). The system-side and customer-side harmonic voltage contributions of PCC are used as the criteria to compare the harmonic source effect between two sides. The variation of harmonic voltage contribution along with the angle between harmonic voltage and current is analyzed for both sides, the measured angle is divided into several intervals, the strict inequality constraints are derived for each interval, and the interval constraints for identifying the system-side or customer-side as the main harmonic source are obtained respectively. The confidence interval is adopted to remove the abnormal measurement data for improving the reliability of harmonic source tracing. Harmonic source tracing is carried out based on the measured data of different scenarios and results verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** harmonic source tracing; harmonic contribution; reactive-power direction; interval constraint; confidence interval