

DOI: 10.7667/PSPC151651

基于可拓分析和熵值法的 GIS 状态评估

王涛云¹, 马宏忠¹, 崔杨柳¹, 姜宁², 李凯², 许洪华²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省电力公司南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要: GIS 运行状态评估是指导 GIS 状态检修的重要手段。将可拓分析理论引入 GIS 状态评估中, 以 SF₆ 气体组分指标为主, 并结合 SF₆ 气体的纯度、湿度和气体中空气含量指标来构建关联函数。结合关联函数值与规程中规定的注意值和警示值的关系确定 GIS 状态等级关系及相应的检修策略。运用熵值法理论解决了 GIS 状态评估中各指标的权重问题。实例分析表明, 该评估方法可以准确地评估 GIS 的各个气室状态, 有利于监测预警和制定综合检修策略。

关键词: GIS; 状态评估; 可拓分析; 关联函数; 熵值法

Condition evaluation of gas insulated switchgear based on extension analysis and entropy method

WANG Taoyun¹, MA Hongzhong¹, CUI Yangliu¹, JIANG Ning², LI Kai², XU Honghua²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, HoHai University, Nanjing 211100, China;

2. Jiangsu Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: Condition evaluation of GIS is an important approach to providing decision-making for condition maintenance. Extension analysis is introduced into condition evaluation of GIS. With the basis of indexes of SF₆ gas components, combining with the purity, air humidity and air content of SF₆ indexes to construct correlation functions according to SF₆ gas components are widely used to the operation of GIS. Determine the relationship between the condition level and the corresponding maintenance strategies based on relations of correlation function values and note values and warning values specified by procedures. Entropy method is used to solve the weight problems of each index for GIS condition assessment. The results of an example analysis indicate that the method in this paper is capable of assessing the state of GIS in each chamber and it is conducive to the monitoring and early warning and developing comprehensive maintenance strategy.

Key words: gas insulated switchgear; condition evaluation; extension analysis; correlation function; entropy method

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 是电网运行的关键输变电设备, 被广泛应用于我国 110 kV 及以上电压等级电网中^[1-3], GIS 包括元件多, 结构复杂, 其性能和运行状态直接影响电网的安全运行, GIS 的状态评估与判断是亟待解决的关键问题^[4]。在对 GIS 进行诊断分析的基础上进一步进行状态评价, 制定快速、准确、合理的检修策略, 以迅速确定故障点、故障原因和类型, 对于减少停电时间, 提高维修效率和设备利用率具有至关重要的意义。

自 20 世纪 80 年代起, 俄罗斯、德国、加拿大、日本等国家对 SF₆ 气体分解技术进行了大量的实验和检测研究^[5-9]。基于 SF₆ 气体分解产物检测的设备故障诊断技术研究, 设立多个重大科研项目, 取得了较大的成果。文献[10]分析了 SF₆ 气体分解产物检测理论, 并对运行、故障和型式试验后的设备的气体分解产物进行检测和结果分析, 以确定不同状态下开关设备的 SF₆ 气体分解产物组分及其含量, 进而得到表征设备故障的 SF₆ 气体分解特征气体。文献[11]总结前期研究成果的基础上, 提出了开关设备故障现场预判的参考指标及综合诊断依据, 并现场普测开关设备的 SF₆ 气体分解产物。文献[12]对 GIS 设备分解产物进行带电检测, 并对检测结果统计分析, 得到不同类型设备中的分解产物特性。

基金项目: 江苏省电力公司 2015 年重点科技项目 (J2015054)

文献[13]将 SF₆ 气体分解产物应用到 GIS 故障诊断中。文献[14]将 SF₆ 气体中杂质含量应用到 GIS 故障诊断中。

结合现有的研究成果可知, GIS 运行设备状态监测的特征气体以 SO₂、H₂S 为主, 以 HF、CF₄、CO 和 CO₂ 为辅, 可判断设备状态从而进行监测预警。本文以 SF₆ 气体组分指标为主, 并结合 SF₆ 气体的纯度、湿度和气体中空气含量指标来对 GIS 状态进行综合评估。引入可拓分析理论来构造各指标的关联函数, 结合关联函数值与规程中规定的注意值和警示值的关系确定 GIS 状态等级关系及相应的检修策略。若 GIS 状态为异常和严重时, 应综合应用特高频、超声波和振动法进行检测分析。运用熵值法理论解决了 GIS 状态评估中各指标的权重问题。实例分析表明, 该评估方法可以准确地评估 GIS 的各个气室状态, 有利于监测预警和制定综合检修策略。

1 GIS 评估指标关联函数构造

1.1 GIS 评估指标的经典域和节域

GIS 各试验数据通常情况下有两个取值区间, 一是经典域即 GIS 正常运行时基本量变要求范围; 二是节域即 GIS 状态发生改变的质变范围。GIS 的各参量在量变范围内变化, 其功能可以正常发挥; 当 GIS 的量变突变到质变的范围内时, 则 GIS 可能存在故障, 需要综合诊断, 加以确定。根据 IEC62271-2003^[15]、IEC60480-2007^[16]的规定及大量的实验室研究和现场实测, 结合现有的分解产物评价指标, 确定了 GIS 各评估指标的经典域和节域如表 1 所示。

表 1 GIS 评估指标的经典域和节域

Table 1 Classical field and segment of assessment indexes of GIS

项目	评估指标	经典域	节域
SF ₆ 气体组分指标/ (μL·L ⁻¹)	X ₁ (SO ₂)	[0,5]	[0,10]
	X ₂ (H ₂ S)	[0,2]	[0,5]
	X ₃ (CO)	[0,100]	[0,150]
	X ₄ (CF ₄)	[0,15]	[0,20]
	X ₅ (CO ₂)	[0,15]	[0,25]
	X ₆ (HF)	[0,25]	[0,30]
X ₇ (SF ₆ 气体纯度%)		[99,100]	[95,100]
X ₈ (空气含量)		[0,50]	[0,100]
微水含量/(μL·L ⁻¹) (参考运行允许值)	X ₉ (灭弧气室)	[0,300]	[0,500]
	X ₁₀ (非灭弧气室)	[0,1 000]	[0,1 300]

1.2 基于可拓分析的 GIS 评估指标关联函数构造

可拓学中的几个定义如下^[17]: 实轴上任意一点 x 与实域上任意一有限区间 $X_0=[a, b]$ 的距为 $\rho(x, X_0)$, 其计算式为

$$\rho(x, X_0) = \left| x - \frac{a+b}{2} \right| - \frac{b-a}{2} \quad (1)$$

给定区间 $X=[c, d]$, 且 $X_0 \subset X$, 则定义点 x 关于区间 X_0 和 X 组成的区间套的位值规定为

$$D(x, X_0, X) = \begin{cases} \rho(x, X) - \rho(x, X_0), \\ \rho(x, X) \neq \rho(x, X_0) \text{ 且 } x \notin X_0; \\ \rho(x, X) - \rho(x, X_0) + a - b, \text{ 其他。} \end{cases} \quad (2)$$

给定区间 $X_0=[a, b]$, $x_0 \in (a, (a+b)/2)$, 则定义点 x 与区间 X_0 关于 x_0 的左侧距为

$$\rho(x, x_0, X_0) = \begin{cases} a - x, & x \leq a; \\ \frac{b-x_0}{a-x_0}(x-a), & x \in [a, x_0]; \\ x - b, & x \geq x_0. \end{cases} \quad (3)$$

给定区间 $X_0=[a, b]$, $x_0 \in [(a+b)/2, b)$, 则定义点 x 与区间 X_0 关于 x_0 的右侧距为

$$\rho(x, x_0, X_0) = \begin{cases} a - x, & x \leq x_0; \\ \frac{a-x_0}{b-x_0}(b-x), & x \in [x_0, b]; \\ x - b, & x \geq b \end{cases} \quad (4)$$

给定区间 $X_0=[a, b]$, $X=[c, d]$, $x_0 \in [a, b]$, 且 $X_0 \subset X$, 则最优值 x_0 处的初等关联函数为

$$K(x) = \frac{\rho(x, x_0, X_0)}{D(x, x_0, X_0)} \quad (5)$$

此关联函数在 $x=x_0$ 时达到最大值。

以越上越优型指标 SO₂ 为例, 分析 SO₂ 评估指标的关联函数。由表 1 可知 $X_0=[0, 5]$, $X=[0, 10]$, 由式(1)可得任意一个 SO₂ 的检测值 x 与区间 X_0 和 X 的距分别为: $\rho(x, X_0) = |x - 2.5| - 2.5$, $\rho(x, X) = |x - 5| - 5$ 。由式(2)得点 x 关于区间 X_0 和 X 组成的区间套的位值为

$$D(x, X_0, X) = \begin{cases} |x - 5| - |x - 2.5| - 2.5, & x \notin X_0; \\ |x - 5| - |x - 2.5| - 7.5, & x \in X_0. \end{cases}$$

SO₂ 的值越小越好, 所以最优值 x_0 在区间 X_0 的左侧, 即 $x_0=0$, 所以由左侧距公式(3)得 $\rho_L(x, x_0, X_0) = x - 5$ 。由式(5)可得气体组分 SO₂ 的关联函数为

$$K(x) = \begin{cases} \frac{x-5}{|x-5|-|x-2.5|-2.5}, & x \notin X_0; \\ \frac{x-5}{|x-5|-|x-2.5|-7.5}, & x \in X_0. \end{cases}$$

设 x 依次为 0、2.5、5、7.5、10、15, 分别计算其关联函数值: $K(0)=1$; $K(2.5)=0.5$; $K(5)=0$; $K(7.5)=-0.5$; $K(10)=-1$; $K(15)=-1.625$ 。由计算可知 SO_2 含量小于 $5 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, 关联函数为正, 且 SO_2 含量越小关联函数值越高, GIS 的状态越好; SO_2 含量等于 $5 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, 关联函数为 0, 代表了规程中规定的注意值, 即指标从量变突变到质变的临界点; SO_2 含量大于 $5 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, 关联函数为负, 表示指标已不在正常变化范围之内, 可能存在故障, 性能劣化越严重, 关联函数值负的越多。

越大越优型指标以 SF_6 气体纯度为例, 最优值 x_0 在区间 X_0 的右侧, 所以使用右侧距公式建立关联函数。直接给出计算结果为

$$K(x) = \begin{cases} \frac{99-x}{|x-97.5|-|x-99.5|-2}, & x \notin X_0; \\ \frac{99-x}{|x-97.5|-|x-99.5|-3}, & x \in X_0. \end{cases}$$

同理, 可以获得其他指标的关联函数, 由于文章篇幅有限, 不再赘述。由关联函数值与规程中规定的注意值和警示值的关系, 定义关联函数的值与状态等级及检修策略的关系, 如表 2 所示。

表 2 关联函数值与状态等级的关系

Table 2 Corresponding relation of correlation function value and state level

关联函数值	状态等级	处理方法
(0.5,1]	正常	状态量在正常的范围内, 可正常运行
(0,0.5]	注意	状态量由量变向质变发展, 可继续运行, 缩短检测周期, 应该跟踪监测
(-1,0]	异常	可能存在故障, 应该综合诊断
≤ -1	严重	故障已存在, 综合诊断故障原因

2 基于综合权重的 GIS 的 SF_6 气体指标权重分配

2.1 评估指标常权权重的确定

指标的常权权重主要由 GIS 运行和检修的五位权威性专家根据实际经验和基于 GIS 的 SF_6 气体检测记录统计获得, 专家在 0~10 之间给出 GIS 的 SF_6 气体各指标的评价值如表 3 所示。

五位权威性较高的专家的权重值 w_e 依次为 0.72、0.68、0.65、0.62、0.78。 SF_6 气体指标的常权权重按 $w_i = \sum_{i=1}^5 w_{ei} x_i / 5$ 计算, 将其归一化后可得 $w = [0.2034, 0.1986, 0.1801, 0.1549, 0.1555, 0.1075]$ 。

表 3 SF_6 气体组分指标评价值

Table 3 Evaluation value of SF_6 indexes

专家编号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
$E_1(0.72)$	8.5	8.3	7.5	6.5	6.5	4.5
$E_2(0.68)$	8.8	8.2	7.6	6.2	6.8	4.2
$E_3(0.65)$	8.2	8.5	7.8	6.8	6.2	4.8
$E_4(0.62)$	8.6	8.3	7.2	6.6	6.6	4.6
$E_5(0.78)$	8.4	8.2	7.5	6.3	6.4	4.4

2.2 基于熵值法的评估指标变权重系数的应用

为保证 GIS 运行状态评估的准确性, 评估时多次测量纵向历史数据, 利用熵值法^[18-20]对常权权重进行适当的修正, 以满足评估指标变化的情况和具体实际问题中的动态差异, 从而更加重视变化量大的指标, 可以准确反映 GIS 的实际运行状态。

设有 n 次测量结果, m 个评价指标, 其构成数据矩阵 X_{ij} 为

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

某项指标 j 的熵值表达式为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p(x_{ij}) \ln p(x_{ij}) \quad (7)$$

式中: $k > 0$, 且 $k = 1/\ln m$; $0 \leq e_j \leq 1$; $p(x_{ij}) = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 。

由式(7)可知, 对于给定的指标 j , x_{ij} 差异性越大, 则 e_j 越小, 即该指标在综合评估中的重要度就越高, 为了方便理解, 定义一个与指标测量数据差异性成正比的差异性因素向量 $G=(g_1, g_2, \dots, g_m)$, 则 $g_j = 1 - e_j$ 。利用归一化差异因数对常权权重进行调整得到变权权重^[21]:

$$w_j^v = 0.5g_j + 0.5w_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中, w_j 是常权权重值。

3 实例分析

2009年3月, 现场检修人员对某 126 kV 的 GIS 进行日常巡视检查时, 发现某线路的隔离开关内部有轻微的异响, 并对该气室进行 SF_6 气体组分分析, 多次测量纵向历史数据, 测量结果如表 4 所示。

表 4 SF₆ 气体组分在线测量数据

Table 4 Online measurement data of SF₆ gas component

试验日期	SF ₆ 气体组分/(μL·L ⁻¹)					
	SO ₂	H ₂ S	CO	CF ₄	CO ₂	HF
2009.03.11	2	0	50	5	10	7
2009.04.11	5	1	90	16	26	18
2009.05.12	11	3	120	25	38	25

将 2009 年 5 月 12 日测得的气体组分指标代入关联函数计算得 $K_1(\text{SO}_2)=-1.2$, $K_2(\text{H}_2\text{S})=-0.333$, $K_3(\text{CO})=-0.4$, $K_4(\text{CF}_4)=-2$, $K_5(\text{CO}_2)=-2.3$, $K_6(\text{HF})=0$ 。利用熵值法, 通过测量的三组纵向历史数据对常权重进行适当的修正以反映指标具体变化情况, 由式(6)可得数据矩阵 X_{36} ; 由式(7)得到熵值 e ; 因而可计算出差异因素向量, 并将其归一化后为 G' ; 再按式(8)计算出变权重系数 w^v 。

$$X_{36} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 50 & 5 & 10 & 7 \\ 5 & 1 & 90 & 16 & 26 & 18 \\ 11 & 3 & 120 & 25 & 38 & 25 \end{bmatrix}$$

$e=[0.820\ 0, 0.865\ 0, 0.947\ 7, 0.855\ 6, 0.892\ 2, 0.900\ 8]$,
 $G'=[0.250\ 5, 0.187\ 8, 0.072\ 8, 0.200\ 9, 0.150\ 0, 0.1380]$,
 $w^v=[0.227\ 0, 0.193\ 2, 0.126\ 5, 0.177\ 9, 0.152\ 7, 0.1227]$,

气体组分状态判定值 $K_{\text{gas}} = \sum_{i=1}^5 K_i \omega_i = -1.094\ 3$ 。

截至 2009 年 5 月 12 日同时测得 SF₆ 气体纯度为 98.88%、空气含量为 150 μL·L⁻¹ 及微水含量为 600 μL·L⁻¹。由关联函数计算它们的关联函数值依次为 -0.053 6、-2 和 0.32, 结合这几项指标来综合判断 GIS 状态。由上述分析可知气体组分、SF₆ 气体纯度、空气含量和微水含量的关联函数均为负值且气体组分关联函数值已小于 -1, 所以该气室的故障已存在, 需要安排正常设备更换该故障气体; 对退出的故障气室进行超声波、特高频及振动信号多种局部放电检测方法综合诊断故障原因。检测到超高频信号的三维图谱如图 1 所示。

由图 1 可以看出: 局部放电信号在工频周期内分布规律, 在工频信号的正、负半周均有放电, 主要集中在第一、第三象限, 放电相位特征明显, 放电量较大且稳定, 放电重复率低。呈现出悬浮电位放电的典型图谱。

AIA 超声波局部放电测试仪采用连续和相位测量模式, 分别如图 2、图 3 所示。

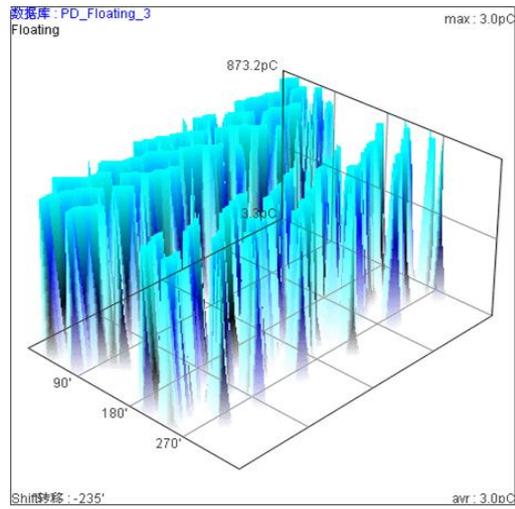


图 1 局部放电 UHF 信号的三维图谱
Fig. 1 3-D plot of UHF PD signal

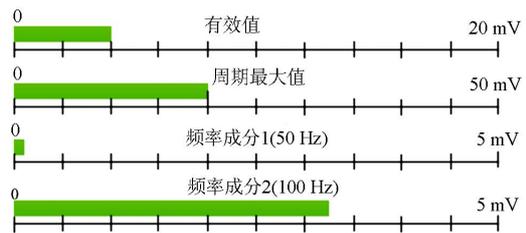


图 2 连续测量模式图

Fig. 2 Figure of continuous measurement mode

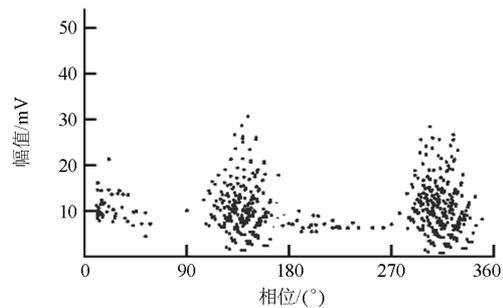


图 3 相位测量模式图

Fig. 3 Figure of phase measurement mode

由图 2 可以看出: 信号的有效值和峰值分别 4 mV 和 20 mV, 100 Hz 的相关性明显强于 50 Hz。由图 3 可以看出: 可知一个周期内信号有两簇较集中的聚集点。由此可以判断该气室有电位悬浮故障。

解体检查发现, CT 的 B 相的屏蔽筒和筒壁的紧固螺栓松动, 且靠近 B 相有大量的 SF₆ 分解粉末, 如图 4 所示。



图 4 气室解体图

Fig. 4 Figure of disintegration for air chamber

4 结论

(1) GIS 在线状态评估以 SF_6 气体组分指标为主, 并结合 SF_6 气体的纯度、湿度和气体中空气含量指标来对 GIS 状态进行判断和监测预警。根据评估结果, 综合应用特高频、超声波和振动法进行检测分析。

(2) 引入可拓分析方法, 构造各指标的关联函数, 使 GIS 在正常运行的量变范围内关联函数值为正, 且关联函数值越大状态越优; 指标从量变突变到质变的临界点时关联函数为 0; GIS 在不正常的运行范围内关联函数为负值, 且关联函数值负的越多, GIS 性能劣化越严重。

(3) 运用熵值法理论对 GIS 各指标常权权重值进行适当的修正, 以满足评估指标变化的情况和具体实际问题中的动态差异。

(4) 通过实例分析表明, 基于可拓分析和熵值法的 GIS 状态评估可以准确地评估 GIS 的各个气室状态, 有利于监测预警和制定综合检修策略。

参考文献

- [1] 余高旺. 新一代智能变电站中多功能测控装置的研制与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 127-132.
YU Gaowang. Research and application of multifunctional measurement & control device of new generation smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 127-132.
- [2] 崔杨柳, 马宏忠, 王涛云, 等. 基于故障树理论的 GIS 故障分析[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 125-129.
CUI Yangliu, MA Hongzhong, WANG Taoyun, et al. Fault analysis of Gis based on fault tree theory[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 125-129.
- [3] 周星, 许家瑋, 张崧. 智能变电站 SF_6 气体微水监测系统
- [4] 邓永辉. 高压开关设备典型故障案例汇编(2006-2010年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 1-47.
- [5] PIEMONTESE M, NIEMEYER L. Sorption of SF_6 and SF_6 decomposition products by activated alumina and molecular sieve 13X[C] // IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec: IEEE, 1996: 828-838.
- [6] SUEHIRO J, ZHOU G, HARA M. Detection of partial discharge in SF_6 gas using a carbon nanotube-based gas sensor[J]. Sensors and Actuators, 2005, 105(2): 164-169.
- [7] BEYER C, JENETT H, KLOCKOW D. Influence of reactive SF_x gases on electrode surfaces after electrical discharges under SF_6 atmosphere[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 234-240.
- [8] CHU F Y. SF_6 decomposition in gas insulated equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1986, 21(5): 693-725.
- [9] TOMINAGA S, KUWAHARA H, HIROOKA K, et al. SF_6 gas analysis technique and its application for evaluation of internal conditions in SF_6 gas equipment[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(9): 4196-4206.
- [10] 颜湘莲, 王承玉, 季严松, 等. 开关设备中 SF_6 气体分解产物检测的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 32-34.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, JI Yansong, et al. Switching equipment in the decomposition products of SF_6 gas sensing applications[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 32-34.
- [11] 颜湘莲, 王承玉, 杨韧, 等. 应用 SF_6 气体分解产物的高压开关设备故障诊断[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 120-123.
YAN Xianglian, WANG Chengyu, YANG Ren, et al. Fault diagnosis of high voltage switchgears by decomposition products of SF_6 [J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 120-123.
- [12] 颜湘莲, 宋杲, 王承玉, 等. 基于 SF_6 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 SF6 decomposition products detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 83-88.
- [13] 季严松, 王承玉, 杨韧, 等. SF6 气体分解产物检测技术及其在 GIS 设备故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 100-103.
- JI Yansong, WANG Chengyu, YANG Ren, et al. Measuring technique of SF6 decomposition products and its application to fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 100-103.
- [14] 姚强, 王勇, 刘永. SF6 气体中杂质含量分析在 GIS 故障分析判断中的应用[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 53-54.
- YAO Qiang, WANG Yong, LIU Yong. The application of impurity analysis of SF6 for fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 53-54.
- [15] IEC62271-2003: 2003 额定电压 52 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备[S]. 2003.
- IEC62271-2003: 2003 rated voltage to 52 kV and gas insulated metal-enclosed switchgear[S]. 2003.
- [16] IEC. IEC60480-2007 guidelines for the checking and treatment of sulfur hexafluoride SF6 taken from electrical equipment and specification for its reuse[S]. [S.1.]: IEC, 2007.
- [17] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [18] 区伟健, 房鑫炎. 基于熵值法和主成分分析法的黑启动模式评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 22-27.
- OU Weijian, FANG Xinyan. Assessment of black-start modes based on entropy value method and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 22-27.
- [19] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-7.
- WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7.
- [20] 夏非, 范莉, 苏浩益, 等. 基于云物元分析理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 6-10.
- XIA Fei, FAN Li, SU Haoyi, et al. A synthetic power quality evaluation model based on cloud matter element analysis theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 6-10.
- [21] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 一种考虑排序稳定分析的电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 70-76.
- LIU Junhua, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. A new method for power quality comprehensive evaluation considering the analysis of sequence stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 70-76.

收稿日期: 2015-09-16

作者简介:

王涛云(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断; E-mail: 15751871750@163.com

马宏忠(1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断; E-mail: hhumhz@163.com

崔杨柳(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断。E-mail: cuiylhhu@163.com

(编辑 魏小丽)