

基于激光吸收谱的SF₆电气设备故障概率参数模型

电气设备安全是坚强智能电网稳定运行的基础之一。得益于SF₆气体优异的绝缘特性，SF₆电气设备在电力系统中得到广泛应用。SF₆气体成分检测技术的发展，为电力系统中GIS设备安全状态检测提供了重要方法。但是，SF₆气体成分检测结果与设备故障评价模型及其参数指标还有待深入研究。提出了一种基于参数估计的SF₆电气设备故障概率模型，充分利用高准确度的SF₆气体成分检测结果，根据开断电弧、局部放电和异常发热等情况下的SF₆分解产物的统计分析结果，运用矩估计算法得到设备故障概率函数的参数，以此建立SF₆电气设备的故障概率模型，为运行设备状态评价提供了有效依据。

张智威 宋彦斌 赵 冲 刘全春/北京智芯微电子科技有限公司

0 引言

SF₆封闭式组合电器（GIS）等气体绝缘电气设备由于其体积小、环境依赖程度低、运行安全可靠、配置灵活、检修周期长和安装方便等优点，已广泛应用于高压输变电系统中，成为当前高压设备绝缘的一个发展方向。而SF₆气体成分检测技术的发展，也为电力系统中GIS设备的运行状态检测提供了重要技术手段^[1-6]。因此，对于SF₆气体分解产物检测与电气设备运行状态的研究备受关注。随着电子技术的进步和传感器技术、光谱分析技术以及信息处理技术的发展，使得SF₆电气设备的在线监测和故障评估技术逐步进入了实用化阶段。

就目前而言，SF₆气体成分检测与电气设备故障概率的相关研究已取得了一定的成果。目前已有成果主要局限于SF₆分解后单项产物的相关检测实验与分析^[7-9]。

相关实验成果所得到的分解产物参考指标与设备实际运行情况之间存在误差，对于设备故障状态评价，难以提供可靠的参考和指导。目前，SF₆分解产物与设备故障的关系模型尚未有明确的成果，由此，在实验基础上，有必要对不同工况下的SF₆气体分解产物实验结果进行建模分析，用合适的统计分布拟合数据和估算参数，以建立分解产物与设备故障关系的模型。

为了解决上述问题，本文充分利用SF₆气体成分高准确度检测的先进技术，提出了一种基于贝叶斯算法的SF₆电气设备故障概率估计模型。采用SF₆气体成分实时在线检测的统计数据结果，运用矩估计算法建立不同工况条件下的电气设备故障分布概率模型和参数估计方法。通过验证分析，获得故障分布概率模型的合理参数，并证明所提出的设备故障概率估计模型的可行性和有效性。

1 SF₆气体成分在线检测技术

SF₆气体成分的在线检测具有一定的困难。目前，现有的监测方法主要有高压放电电离法、红外线吸收法、电化学法、超声相关检测技术以及光谱相关监测技术。得益于量子级联激光吸收谱技术先进性，SF₆分解气体成分测量有更好的线性度和抗干扰能力。

基于量子级联激光吸收谱的SF₆气体成分在线检测原理如下：通过对SF₆分解产物中各种气体的吸收光谱进行分析，确定光谱的工作波段。针对各种气



张智威/工程师

关键词/Keywords

SF₆ ·
故障概率模型 ·
参数估计 ·
气体成分检测 ·

体的吸收光谱特征,采用双波长激光吸收谱差分测量法。这种测量法引入未受影响的单波长激光作为参考光束,首先将SF₆气体的光谱中心波长作为测量光束波长;然后与其他波长光谱进行对比。通过将连续和周期振荡光谱结合,根据Beer-Lambert定律,建立改进的差分吸收光谱分析方法对各种气体成分进行测量。

基于量子级联激光吸收谱的SF₆气体成分在线检测系统如图1所示。该系统分为光源模块和光电检测模块两个主要模块。

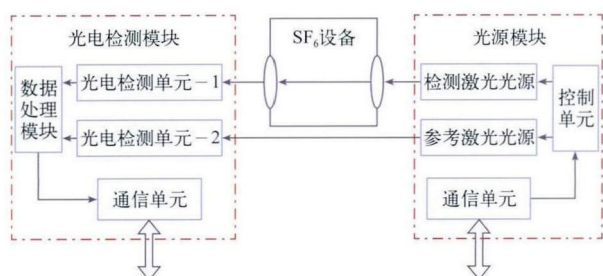


图1 SF₆气体成分在线检测系统

1) 光源模块:接收来自上位机的控制指令,分别作用于两路量子级联激光器,以产生激光光源。光源模块包括通信单元、控制单元以及基于量子级联激光器的检测激光光源、参考激光光源。控制单元通过I/O接口的高低电平控制桥式推挽电路工作于饱和状态和截止状态,产生矩形波信号以驱动检测激光光源和参考激光光源。

2) 光电检测模块:接收两路激光信号并转换成电信号,传递给数据采集单元;经数据采集单元进行数模转换后,通过通信单元发送给上位机,由上位机进行准确计算得到数据分析与统计结果。

运用光谱相关检测技术,基于量子级联激光吸收谱技术对SF₆气体成分进行在线检测,具有准确度高、实时性好和成本适中等优点,且具备较好的应用效果。

2 基于参数估计的故障概率模型

2.1 建模方法与流程

为能够对设备状态进行准确判断和评价,在

不同的工况下,根据SF₆气体分解产物的实验数据进行分析,提出了SF₆分解气体成分与设备运行状态之间的数学模型,包括设备状态概率分布和参数估计等方面的计算,为不同设备故障选择适用的概率分布。本文基于矩估计算法确定各分布函数中的参数,建立SF₆设备故障概率模型。

SF₆电气设备中气体分解产物与设备故障关系的建模方法和流程主要包括检测数据建模和故障概率估计两大模块。建立三种类型的故障分布,对分解产物检测数据进行统计处理后,开展概率分布的参数估计和误差分析,得到设备故障适用的分布模型;用检测数据进行故障分布拟合,提取概率分布和置信区间,进而估计设备故障概率。图2为SF₆气体分解产物与电气设备故障概率模型的建模流程,利用该方法对不同设备工况下的分解产物实验数据进行建模,预测设备发生故障的概率。

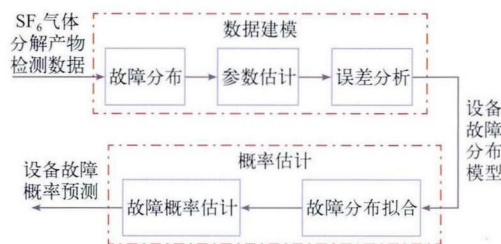


图2 SF₆设备故障概率估计建模流程

2.2 故障概率分布

根据概率分布的数学方法,结合设备可靠性的理论分析,针对不同类型的故障特性,本文采用威布尔(Weibull)分布、正态分布或对数正态分布描述开关设备故障分布函数^[10]。

(1) 威布尔分布函数

威布尔分布函数可表示为

$$F_1(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\gamma\right] \quad (1)$$

其分布概率为

$$f_1(x) = \frac{x}{\theta} \left(\frac{x}{\theta}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\theta}\right)^\gamma\right] \quad (2)$$

式中, x 为统计变量; γ 为威布尔分布的形状变量; θ 为威布尔分布的尺寸参数。

(2) 正态分布函数

正态分布函数可表示为

$$F_2(x) = \varphi\left(\frac{1-\mu}{\sigma}\right) \quad (3)$$

其相应的分布概率为

$$f_2(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(1-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

式中, μ 为正态分布的均值; σ 为正态分布的标准误差。

(3) 对数正态分布函数

对数正态分布函数可表示为

$$F_3(x) = \varphi\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right) \quad (5)$$

分布概率为

$$f_3(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (6)$$

式中, μ 为对数正态分布的均值; σ 为对数正态分布的标准误差。

2.3 基于矩估计算法的参数估计

在设备故障概率模型中, 故障概率分布函数的参数合理性直接决定了模型的准确度。

矩法思想主要是利用样本矩来推算总体矩。首先从分布总体 X 抽取简单随机样本 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 式(7)定义样本均值与样本方差, 即

$$\begin{cases} \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \\ S_X^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \end{cases} \quad (7)$$

再根据式(8)计算分布函数总体的期望值 $E(X)$ 和方差 $D(X)$, 即

$$\begin{cases} E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx \\ D(X) = E(X^2) - (E(X))^2 \end{cases} \quad (8)$$

将样本矩和总体矩的公式联立可得

$$\begin{cases} E(X) = \bar{X} \\ D(X) = S_X^2 \end{cases} \quad (9)$$

将式(2)代入式(8)进行求解, 结合式(9)即可得到威布尔分布的参数 γ 和 θ 。同理, 将

式(4)代入式(8)求解, 可得到正态分布的参数 σ 和 μ ; 将式(6)代入式(8)进行计算, 可求得对数正态分布的参数 σ 和 μ 。

利用上述三种分布函数, 即可对不同设备、不同工况条件下的 SF_6 气体成分检测数据进行拟合。

3 验证分析

采用基于量子级联激光吸收谱的 SF_6 气体成分在线检测技术获取不同工况下的 SF_6 气体分解成分。本文采用威布尔分布、正态分布和对数正态分布拟合检测数据特征参量, 进行参数估计和误差分析, 为各工况类型选择与之相匹配的 SF_6 电气故障概率分布。

由于实验条件受限, 实验结果与实际应用仍存在差距, 需分析实验数据与统计分布的误差, 计算实验数据与分布的相关性, 选择可信的概率分布以及相关参数。应用统计学的假设检验, 计算统计分布的相关性 χ^2 描述分布与检测结果的符合程度, χ^2 计算方法如下

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[X_i - E(X)]^2}{D(X)} \quad (10)$$

表1~表3给出了开断电弧、局部放电和异常发热这三类工况条件下, 威布尔分布、正态分布和对数正态分布的概率模型参数。

表1 不同工况的威布尔分布模型参数

工况类型	参数		χ^2
	γ	θ	
开断电弧	2.28	2.80	2.55
局部放电	4.39	13.99	1.23
异常发热	5.02	15.32	0.90

表2 不同工况的正态分布模型参数

工况类型	参数		χ^2
	σ	μ	
开断电弧	2.40	1.28	3.02
局部放电	12.69	3.27	1.64
异常发热	14.06	2.97	0.96

通过表1~表3的对比, 分析 χ^2 值与1的关系: $\chi^2 < 1$ 表明模型过度拟合数据; $\chi^2 > 1$ 意味模型不能完全拟合数据或低估了方差; $\chi^2 = 1$ 表明实验数据

表3 不同工况的对数正态分布模型参数

工况类型	参数		χ^2
	σ	μ	
开断电弧	0.85	0.43	1.54
局部放电	14.72	19.68	3.24
异常发热	2.63	0.24	0.92

完全符合该分布模型。可见，应选择 χ^2 值最接近1的概率分布作为设备工况的概率模型。因此，根据 χ^2 值与1的接近程度，表明开断电弧、局部放电和发热分别适用于对数正态分布、威布尔分布和正态分布。

4 结束语

SF₆气体成分检测技术的发展，为电力系统中GIS设备安全状态检测提供了重要方法。但是，SF₆气体成分检测结果与设备故障评价模型及其参数指标还有待深入研究。本文提出了一种基于参数估计的SF₆电气设备故障概率模型，充分利用高准确度的SF₆气体成分检测结果，根据开断电弧、局部放电和异常发热等情况下的SF₆分解产物的统计分析结果，运用矩估计算法得到设备故障概率函数的参数，以此建立SF₆电气设备的故障概率模型，为运行设备状态评价提供了有效依据。

参考文献

[1] Chu F Y. SF₆ decomposition in gas insulated equipment [J]. IEEE Transactions on Electric Insulation, 1986, 21 (5) : 693-725.

[2] Tominaga S, Kuwahara H, Hirooka K, et al . SF₆ gas analysis technique and its application for evaluation of internal conditions in SF₆ gas equipment [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100 (9) : 4196-4206.

[3] 李建基. SF₆在高压断路器和GIS不同放电下的分解物 [J]. 华通技术, 1992 (3) : 58-64, 46.

[4] 汪金星, 杨韧, 郑小川. SF₆开关设备带电测试新技术在陕西电网的应用 [J]. 陕西电力, 2008, 36 (11) : 15-17.

[5] 刘永, 印华, 姚强, 等. 气体分析技术在 GIS 故障定位和故障类型判断中的应用 [J]. 高压电器, 2009, 45 (3) : 132-134.

[6] 颜湘莲, 王承玉, 杨韧, 等. 应用SF₆气体分解产物的高压开关设备故障诊断研究 [J]. 电网技术, 2011, 35 (12) : 120-123.

[7] 刘有为, 吴立远, 弓艳朋. GIS 设备气体分解物及其影响因素研究 [J]. 电网技术, 2009, 33 (5) : 58-61.

[8] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等. SF₆放电分解气体组分分析的现状和发展 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (4) : 664-747.

[9] 袁亮. 高压电器中SF₆气体分解物的检测与研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2009.

[10] 冷雪, 刘莉, 刘晓明, 等. 高压SF₆断路器不同开断条件下混沌特性分析 [J]. 电气工程学报, 2015, 10 (11) : 27-32.

(收稿日期: 2016-02-10) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告