[电气设备]

基于参数估计的SF_6电气设备故障概率模型

文/北京智芯微电子科技有限公司　张智威　宋彦斌　赵　冲　刘全春　程　平

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SF_6气体优异的绝缘特性，SF_6电气设备在电力系统中得到广泛应用。SF_6气体成份检测技术的发展，为电力系统中GIS设备安全状态检测提供了重要方法。但是，SF_6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SF_6电气设备故障概率模型，充分利用高精度的SF_6气体成分检测结果，根据开断电弧、局放和异常发热等情况下的SF_6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SF_6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。

SF_6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，成为当前高电压设备绝缘的一个发展方向。而SF_6气体成份检测技术的发展，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。因此，对于SF_6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SF_6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，SF_6气体成份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SF_6分解后单项产物的相关检测实验与分析。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偏差，对于设备故障状态评价，难以提供可靠的参考和指导。目前，SF_6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SF_6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SF_6气体成份高精度检测的先进技术，提出了一种基于贝叶斯算法的SF_6电气设备故障概率估计模型。采用SF_6气体成份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。

SF_6气体成份在线检测技术

SF_6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，SF_6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SF_6气体成份在线检测原理如下：通过对SF_6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SF_6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。通过将连续和周期震荡光谱结合，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SF_6气体成份在线检测系统如图1所示。该系统分为两个主要模块：光源模块和光电检测模块。

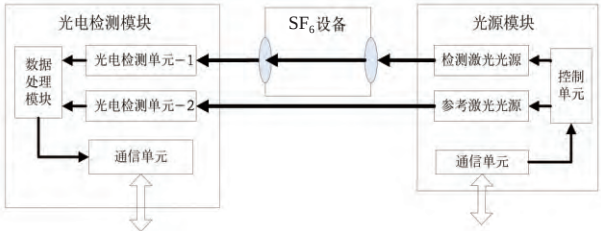

图1　SF_6气体成份在线检测系统

（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，由上位机进行精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SF_6气体成份进行在线检测，具有精度高、实时性好、成本适中等优点，具备较好的应用效果。

基于参数估计的故障概率模型

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SF_6气体分解产物的实验数据进行分析，提出了SF_6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SF_6设备故障概率模型。

SF_6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给出了SF_6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。

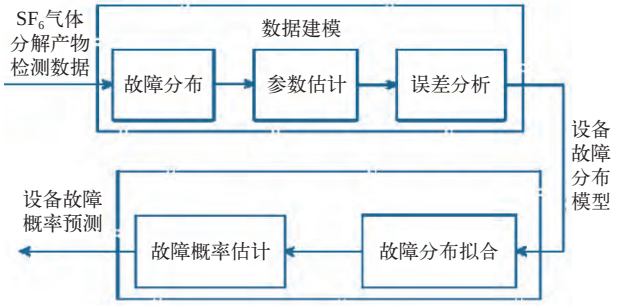

图2　SF_6设备故障概率估计建模流程

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，针对不同的类型的故障特性，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。

（1）威布尔分布函数

威布尔分布函数可用公式（1）来表示，其分布概率则为公式（2）。其中，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。

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

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

（2）正态分布函数

正态分布函数可用公式（3）来表示，其相应的分布概率则为公式（4）。

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

$$F_2(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(1-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

其中，μ为正态分布的均值，σ则为正态分布的标准偏差。

（3）对数正态分布函数

对数正态分布函数可用公式（5）来表示，分布概率则为公式（6）。μ 为对数正态分布的均值，σ 则为正态分布的标准偏差。

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

$$F_3(x)=\frac{1}{\sigma x\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \tag{6}$$

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，…，X_n），公式（7）定义样本均值与样本方差。

$$\begin{cases}\overline{X}=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}X_i\\ S_X^2=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}\left(X_i-\overline{X}\right)^2\end{cases} \tag{7}$$

再根据公式（8）计算分布函数总体的期望值$E(X)$和方差$D(X)$。

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

将样本矩和总体矩的公式联立，可由公式（9）表示。

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

将公式（2）代入公式（8）进行求解，结合公式（9）即可得到威布尔分布的参数γ和θ。同理，将公式（4）代入公式（8）求解，可得到正态分布的参数σ和μ；将公式（6）代入公式（8）进行计算，可求解得指数整体分布的参数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。

验证分析

采用基于量子级联激光吸收谱的SF_6气体成份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计算方法由公式（10）给出。

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

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

表3　不同工况的指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

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、局放和发热分别适用于对数正态分布、威布尔分布和正态分布。

结束语

SF_6气体成份检测技术的发展，为电力系统中GIS设备安全状态检测提供了重要方法。但是，SF_6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SF_6电气设备故障概率模型，充分利用高精度的SF_6气体成分检测结果，根据开断电弧、局放和异常发热等情况下的SF_6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SF_6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。EA

（收稿日期：2016.12.18）

（编辑：白文亭）