

基于 Wiener 过程气体绝缘母线触头接触失效预测^{*}

秦靖舒¹, 范淑薇², 关向雨¹, 舒乃秋¹

(1. 武汉大学 电气工程学院, 武汉 430072; 2. 国网郑州供电公司, 郑州 450000)

摘要: 气体绝缘母线(GIB)触头是过热性故障的多发部位,而接触电阻的大小是设备能否稳定运行的决定性因素。为了实现对 GIB 触头接触失效的预测,在时间尺度的非线性 Wiener 模型与逆幂率加速老化模型基础上,建立了 GIB 触头的失效预测模型。搭建了 GIB 触头电接触失效试验平台,开展了 SF₆和空气介质下 GIB 触头的载流摩擦磨损试验。通过似然函数参数估计得到不同条件下 GIB 触头接触电阻退化表达式,进而根据概率分布函数获取触点的接触失效寿命。试验结果与预测结果对比表明所建立失效预测模型的有效性。GIB 触点在空气下的寿命22.76年,在 SF₆下的寿命为 43.67 年,所建立的失效预测模型可为 GIB 触头的设计制造和状态检修提供技术支持。

关键词: GIB 触头;非线性 Wiener 退化模型;加速老化试验;寿命预测

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2019.024.002

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2019)24-0007-06

Contact failure prediction of Gas insulated bus contact on wiener process

Qin Jingshu¹, Fan Shuwei², Guan Xiangyu¹, Shu Naiqiu¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China.

2. State grid Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Gas insulated bus contacts are the frequent parts of overheating faults, and the size of contact resistance is the decisive factor for the stable operation of the equipment. In order to predict the contact failure of GIB contacts, a failure prediction model of gas insulated bus contacts is established in this paper based on the nonlinear Wiener model of time scale and the inverse power rate accelerated aging model. A test platform for electric contact failure of gas insulated bus contacts was set up, and a test of current-carrying friction and wear of gas insulated bus contacts under SF₆ and air media was carried out. The contact resistance degradation expression of gas insulated bus-bar contacts under different conditions is obtained by the likelihood function parameter estimation, and then, the contact failure life of contacts is obtained according to the probability distribution function. The comparison between the test results and the prediction results shows that the proposed failure prediction model is effective. The service life of GIB contacts under air is 22.76 years, and the service life under SF₆ is 43.67 years. The established failure prediction model can provide technical support for the design, manufacture and maintenance of GIB contacts.

Keywords: contact of GIB, nonlinear Wiener degradation model, accelerated aging test, life prediction

0 引 言

气体绝缘母线(Gas Insulated Bus, GIB)因其绝缘性能好、小型化和高可靠性等优势而作为优良的电能输送设备被广泛应用于电力系统输变电领域。随着 GIB 在电力工业中的应用愈广,随之也产生了很多故障,其中插接式触头为设备的关键部件和薄弱环节,

触头接触不良导致的过热性故障严重危害设备安全运行^[1-9]。GIB 触头工作在非空气介质下,并且其接触状态存在多元动态退化过程。现有的电接触理论尚不能解释 GIB 触头的接触失效机理^[10],因而无法采用合适的方法对运行过程中 GIB 触头的实时接触状态进行评估,导致由于触头接触退化和接触失效引起的设备故障频发且呈上升趋势。因此,对 GIB 触头接触状态及剩余寿命的把握和预测是相关设备设计制造和状态检

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607124)

修中亟待解决的理论与技术瓶颈。

GIB触头失效的本质原因是非空气介质下的载流摩擦磨损所致的接触电阻增大,最终引起过热性故障。国内外研究GIB接触失效机理的很少,伴随着关于其失效预测的研究也很少。文献[11]在计算GIB功率损耗时,将接触电阻考虑进去,得出GIB整体损耗中因接触电阻产生的焦耳热损耗所占比重较大。文献[12-13]分别对航天连接器和电磁继电器的接触失效机理进行了研究。文献[14-16]分别研究不同类型电力连接器的微动现象,发现微动磨损是导致电连接器接触失效的重要原因。文献[17]将接触电阻作为主要失效准则建立了基于Wiener退化过程的某导弹连接器剩余寿命预测模型。文献[18]基于触头接触表面氧化的失效机理,提出了闭合触头电接触寿命预测模型。文献[19]将触头表面磨损量作为失效机理,建立了高压断路器触头剩余寿命预测模型。文献[20]将接触压力和表面残余应力作为失效判据建立了负荷镀层螺栓接触器的剩余寿命预测模型。

文章将接触电阻作为失效准则,采用逆幂率模型作为加速老化模型,选择非线性Wiener模型作为GIB触头的失效预测的退化模型,建立了GIB触头的失效预测模型。然后通过GIB试验得到的接触电阻变化趋势建立似然函数,并对失效预测模型进行参数估计。最后验证了模型的准确性并计算得到GIB触头的预测寿命。

1 GIB触头摩擦磨损失效机理

GIB触头采用插接式触头,来实现GIB回路的电气连接,还可以通过接触元件间的少许滑动来消除设备的安装公差以及热应力的作用。GIB触头在负荷电流变化产生的循环热载荷作用下,触头与导体之间会发生摩擦现象,摩擦行为的发生将会伴随着发生磨损行为。磨损现象发生于滑动摩擦过程中一个接触体的材料从一个物体的接触表面的逐步损失,被称为磨损。Archard提出的磨损方程为:

$$I = \frac{KP}{H} \quad (1)$$

式中 I 为磨损率; P 为正向载荷; H 为压痕强度。 K 被称为磨损系数,是一个小于1的无量纲常数。该式表明磨损率 I 与正向载荷 P 成正比,和较软材料的硬度成反比。

在 SF_6 气体环境中,不存在因氧化而导致的膜电阻增大,因磨损而导致的磨屑堆积、镀银层破损和粗糙度的增大导致接触电阻增大、接触条件劣化,GIB触头触点的温度也会逐渐升高,随着温度的升高,接触电阻会

进一步增大,触头温度继续上升,从而形成恶性循环。经过长时间运行后,接触电阻达到失效阈值,接触温升达到失效阈值 105°C ,最终导致事故发生。

结合载流摩擦磨损过程中接触电阻的变化特点,其趋势是一个波动中上升的过程,所以在以接触电阻为失效量来对GIB触头进行失效预测时,需要考虑到接触电阻的这一变化特点,选择合适的退化模型来对GIB触头进行失效预测。

2 模型假设与分析

2.1 Wiener模型理论基础

Wiener过程是一种连续时间变化且随机变化的过程,它在随机分析、扩散过程等领域的研究中是不可或缺的。令 $X(t)$ 为GIB触头的产品退化量,则满足Wiener过程的模型可以表示为:

$$X(t) = X(0) + a \int_0^t \lambda(t; \theta) dt + \sigma B(\tau(t; \gamma)) \quad (2)$$

式中 a 、 σ 分别为Wiener退化模型的漂移系数和扩散系数。

Wiener过程漂移系数 a 是产品性能退化量与时间函数的比值,是决定性能退化量的主要参数。 $\lambda(t; \theta)$ 与 $\tau(t; \gamma)$ 为关于时间 t 的连续非减函数,其中 θ 、 γ 为时间系数。 $B(\tau(t; \gamma))$ 为非线性布朗运动,用来描述退化量在时间轴上的不确定性。

为了便于分析,假定 $X(0) = 0$, $X(t)$ 表示性能的累积退化量。若产品的初始退化量不为0,可以通过 $X(t) - X(0)$ (递增的情形)或 $X(0) - X(t)$ (递减的情形)进行转换。公式(2)可以简化为:

$$X(t) = a\Lambda(t; \theta) + \sigma B(\tau(t; \gamma)) \quad (3)$$

在产品的预测分析中,就是通过Wiener模型,建立产品退化量与时间之间的关系,实现对产品寿命的预测。

2.2 加速退化模型的建立

文章针对GIB触头的电接触失效试验,采用逆幂率模型来描述GIB触头寿命与电流应力之间的关系。逆幂率模型中,产品的退化速率和应力水平之间的函数关系可以表述为:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = AS^l \quad (4)$$

式中 $\frac{\partial M}{\partial t}$ 为产品的退化速率; A 为应力加速正常数; l 是与产品的材料激活性能有关的常数; S 是应力。逆幂率模型表明,产品退化量退化速度与施加应力之间的关系符合幂函数。这一函数关系表明当产品所被

施加的应力越大,产品的性能退化速率就越大。

2.3 模型参数估计

为了对参数进行估计,采取 EM 算法,即最大期望算法(Expectation Maximization Algorithm)来进行参数的计算。EM 算法相较于其他参数估计方法具有较好的收敛性,因此在参数估计中广泛应用。EM 算法的每一次迭代包括 E 步和 M 步两个基本步骤,其基本流程如图 1 所示。

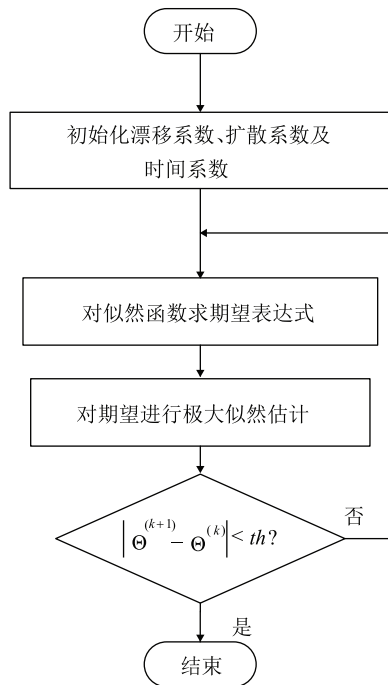


图 1 EM 算法计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of EM algorithm

在每一次迭代之后都需要检测结果是否满足设置的条件,若不满足则重新开始新一轮的迭代,若满足则停止迭代,输出结果。

EM 算法的每一次的计算过程都包括 E 和 M 步两个基本步骤,通过反复迭代直到结果满足设置的条件,使参数结果收敛,得到各模型参数。

3 GIB 触头载流磨损物理试验

3.1 试验平台

为真实模拟 GIB 触头运行时的非空气介质下的载流摩擦磨损过程,研制了 GIB 触点载流摩擦试验平台。试验平台主要包括驱动部分、微位移装置、接触电阻采集系统以及数据分析、采集系统。试验平台的结构框图如图 2 所示。

通过密封压力容器提供非空气介质的服役环境,采用音圈电机模拟接触元件之间的相对运动,采用

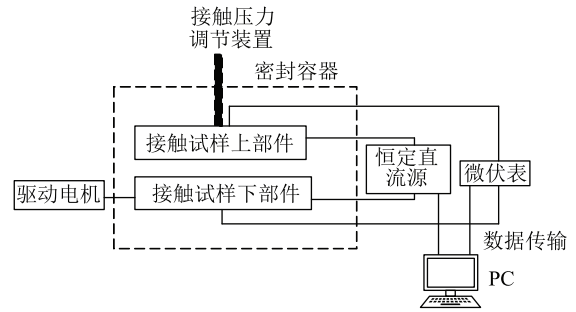


图 2 试验设备结构框图

Fig. 2 Test equipment structure block diagram

四线法(恒流源 + 微伏表)测量接触电阻的动态变化。 SF_6 和空气下 GIB 触点载流摩擦试验条件为,接触压力 37 N,位移幅值 200 μm ,频率 10 Hz,试验电流 10 A。每种气体介质下重复试验 3 次,试验过程中的接触电阻采集间隔为 5 s。

3.2 试验方案介绍

本试验研究的是 GIB 触头非空气介质下的载流摩擦磨损过程,在不同的气体条件下进行接触失效试验,获取 GIB 触头表面接触电阻的数值,为之后的对 GIB 触头的寿命预测提供数据支持。试验参数设置如表 1 所示。

表 1 GIB 触头接触失效试验参数

Tab. 1 Failure test parameters of GIB contact

气体环境	电流/A	频率/Hz	滑动幅值/ μm	气压/MPa
空气	10	10	200	0.2
SF_6	10	10	200	0.2

由于接触部件之间可能存在的差异,每种试验条件下,分别进行 3 组试验以减小每组试验下的误差,总共记录 6 组试验条件下的 GIB 触头随着滑动过程的接触电阻的变化。

3.3 试验结果与分析

本课题是选择接触电阻作为退化量来对 GIB 触头进行失效预测, SF_6 气体中实际的接触电阻变化趋势如图 3 所示。

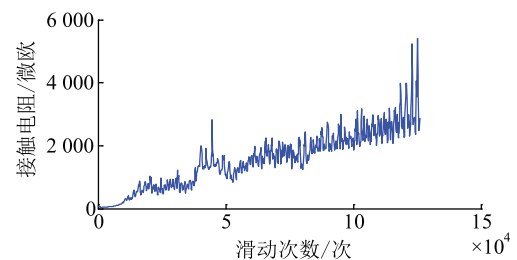


图 3 SF_6 中 GIB 触头接触电阻变化趋势

Fig. 3 Variation trend of GIB contact resistance in SF_6

4 GIB触头失效预测建模

本节基于在SF₆和空气下的失效退化试验接触电阻数据,建立了非线性Wiener过程寿命预测模型,对SF₆和空气下GIB触头的寿命进行预测,分析不同条件对GIB触头的寿命的影响。

4.1 建模步骤

在考虑不同气体环境对GIB触头的寿命的影响作用下,采用Wiener退化模型来描述GIB触头接触电阻退化量和滑动次数的关系,本文在一定电流下采用常应力来进行加速失效试验。

将Wiener模型与加速退化模型结合起来描述GIB触头的退化过程。获取接触电阻的数据后,建立似然函数并对退化模型进行参数估计,计算得到GIB触头的使用寿命。其计算步骤如图4所示。

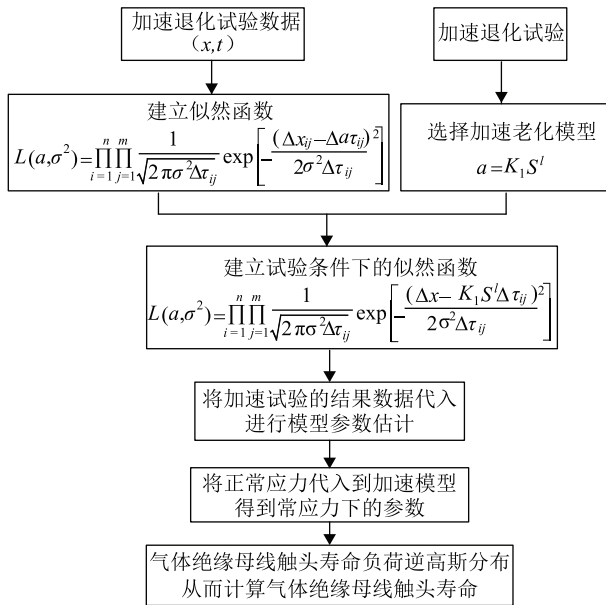


图4 GIB触头寿命预测流程

Fig. 4 Life prediction process of GIB contact

4.2 SF₆条件下的接触失效预测

X_{ij} 为第 j 个样片在加速老化应力下的第 i 次的性能累积退化测量值, τ_{ij} 为第 j 个样片在加速老化应力下的第 i 次的时间, $\Delta x_{ij} = X_{ij} - X_{(i-1)j}$ 为性能退化量的增量, $\Delta\tau_{ij} = \tau_{ij} - \tau_{(i-1)j}$ 为加速条件下时间变化的增量,根据Wiener模型性质可得,即:

$$\Delta x_{ij} \sim N(a\Delta\tau_{ij}, \sigma^2\Delta\tau_{ij}) \quad (5)$$

结合加速老化模型逆幂率模型 $a = K_1 S^l$ 得到GIB触头的似然函数为:

$$L(a, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2\Delta\tau_{ij}}} \exp\left[-\frac{(\Delta x_{ij} - K_1 S^l \Delta\tau_{ij})^2}{2\sigma^2\Delta\tau_{ij}}\right] \quad (6)$$

式中 $m=3; n=15$ 。

其中每一个数据点代表GIB触头加速试验进行150 s,而触头在加速试验中每秒滑动10次。

考虑到试验过程中有可能出现的随机误差,对三组数据进行处理后得到图5的接触电阻的曲线。从三组数据的趋势可以看出,随滑动时间增加,接触电阻呈缓慢上升的趋势。三组数据存在一定程度上的差异,根据分析,可能的原因有三点:

(1)音圈电机本身误差导致每次试验的幅值有一定差异,会影响磨损的程度和磨屑的多少,最终造成接触电阻的差异;

(2)因每次试验零点的差异以及压力传感器本身的误差导致每次试验的接触压力存在一定差异,最后导致触头磨损情况不同而使接触电阻变化趋势不同;

(3)因加工工艺问题导致的接触式样表面镀银层厚度的不同使得每一对试样的接触条件不完全相同,这也会使它们的整个试验过程都存在一点差异。

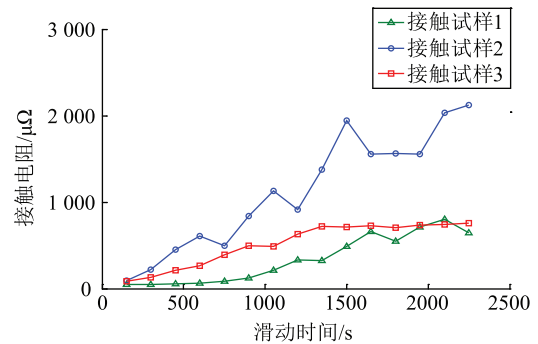


图5 SF₆下GIB触头接触电阻

Fig. 5 GIB contact resistance in SF₆

将 Δx_i , $\Delta\tau_i$ 及 S 代入到公式(6)可得各个参数的值,文献[21]指出扩散系数 σ 与应力无关。由于随机变量在不同应力下服从统一参数族分布,每个应力水平下产品的失效机理不变,通过计算可得求取触头寿命的参数值 $a = 11.17$, $\sigma^2 = 0.04$, $\gamma = 0.62$,接触样片退化量达到失效阈值时,对应的时间服从逆高斯分布,接触样片退化量均值与时间满足逆幂律关系。根据已知参数可以算出接触样片的滑动时间为:

$$\left(\left(\frac{2155.6}{11.1717}\right)^{\frac{1}{0.62}}\right) = 4781.6 \text{ s}$$

而GIB触头在实验条件下每秒滑动10次,所以使

使用寿命为 47 816 次,而实际运行中 GIB 触头每天可发生 3 次来回滑动,所以该 GIB 触头的寿命为 43.67 年,能够满足需要。

将模型参数带入到失效概率密度函数,得到失效概率密度函数曲线分别如图 6 所示。

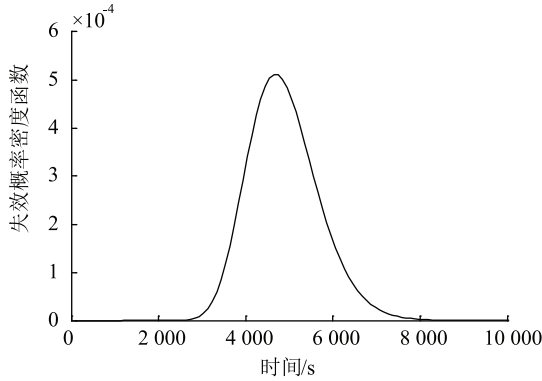


图 6 SF₆ 下 GIB 触头失效概率密度曲线

Fig. 6 GIB contact failure probability density curve in SF₆

由图 6 所示的 GIB 触头的概率密度曲线和可知,气体绝缘母线触头在 26 260 次滑动内运行可靠,几乎没有发生故障。随着滑动次数的增加,GIB 触头接触样片失效概率增加,可靠度下降。接触试样样片在 47 816 失效概率最大,单位时间失效概率最高,与上述计算的寿命基本吻合。

为了验证模型的有效性和准确性,将本组试验代入到寿命预测模型,根据 Wiener 模型的接触电阻累积退化量变大时,得到仿真数据与实测数据如图 7 所示。由图 7 可以看出,该预测模型能够反映接触电阻随运动次数增加而增大的趋势,且与三组样片的数据之间误差较小,可以验证模型的有效性与准确性。

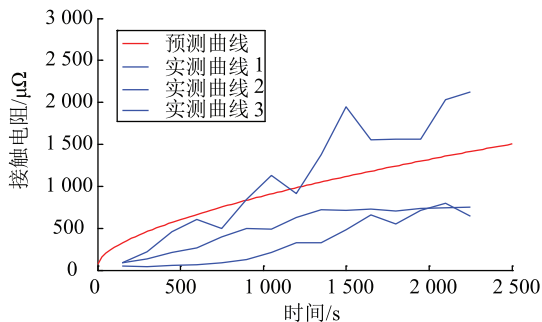


图 7 SF₆ 下 GIB 触头的仿真与实测数据曲线

Fig. 7 Simulation and measured data curves of GIB contacts in SF₆

4.3 空气条件下的接触失效预测

GIB 触头在空气中的接触电阻变化如图 8 所示,

根据公式(6)进行参数估计时,其中 $m=3, n=15$, 其中每一个数据点代表 GIB 触头加速试验进行 150 s,而触头在加速试验中每秒滑动 10 次。

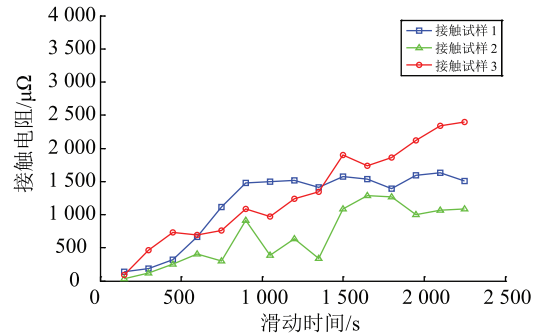


图 8 空气下 GIB 触头接触电阻

Fig. 8 GIB contact resistance in air

将 $\Delta x_i, \Delta \tau_i$ 代入到式(6)中,得出空气中各个参数的值。得出 $a=7.762, \sigma^2=0.012, \gamma=0.717$ 。

根据已知参数可以计算出接触样片的滑动时间为 2 492.1 s。

$$\left(\left(\frac{2\ 155.6}{7.762} \right)^{\frac{1}{0.717}} \right) = 2\ 492.1\ \text{s}$$

GIB 在空气中的使用寿命为 24 921 次,而实际运行中 GIB 触头每天可发生 3 次来回滑动,所以该 GIB 触头还可以工作 22.76 年。

将模型参数带入到失效概率密度函数,得到失效概率密度函数曲线分别如图 9 所示。

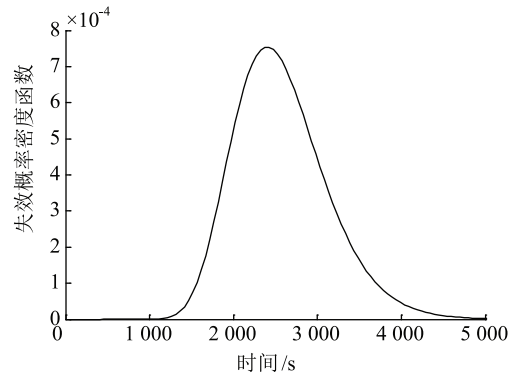


图 9 空气下 GIB 触头失效概率密度曲线

Fig. 9 GIB contact failure probability density curve in air

由图 10 所示的 GIB 触头的概率密度曲线可知,GIB 触头每秒滑动 10 次,在 11 620 次滑动内运行可靠,几乎不会发生故障。随着滑动次数的增加,GIB 触头接触样片失效概率增加,可靠度下降。接触试样样片在 24 921 次失效概率最大,单位时间失效概率最高,

与上述计算的寿命基本吻合。

同样,为了验证模型的有效性和准确性,将仿真数据与实测数据进行比较,如图11。由图分析可得,刚开始摩擦时,预测数据与实测数据之间的误差较大,随着摩擦次数的增加,误差变小。可以验证模型的有效性与准确性。

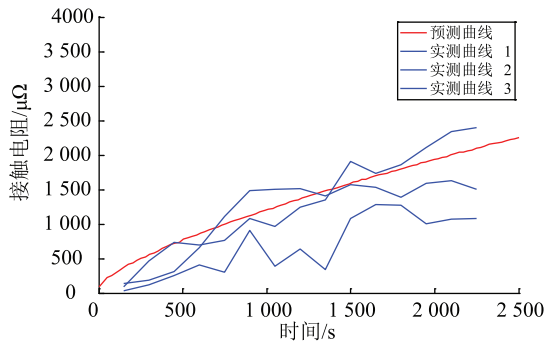


图10 空气下GIB触头的仿真与实测数据曲线

Fig. 10 Simulation and measured data curves of GIB contacts in air

从预测曲线与实测曲线的对比,可以看出开始阶段,预测曲线的数值大于真实曲线的数值,随着滑动时间的增加,预测结果与实测数据之间的误差逐渐减小。

5 结束语

以GIB触头为研究对象,模拟GIB触头的非空气介质下的载流摩擦磨损现象,基于非线性Wiener模型与加速老化模型,建立了GIB触头的失效预测模型,最后计算得到不同条件下GIB触头使用寿命,从而为产品的设计制造和状态运维提供理论依据。所取得的结论如下:

(1)根据GIB触头接触电阻的退化量特点和应力条件,选择非线性Wiener退化模型和逆幂率加速老化模型作为研究方法,建立了GIB触点失效预测模型;

(2)开展了SF₆和空气介质下GIB触点的接触失效物理模拟试验,试验数据和预测数据进行对比,验证了此退化模型的有效性;

(3)说明空气和SF₆条件下的寿命差异。

参考文献

- [1] Runde M, Lillevik O, Larsen V, et al. Condition assessment of contacts in gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 609-617.
- [2] Mukaiyama Y, Takagi I, Izumi K, et al. Contact-failure phenomena and their development in gas-insulated switchgear[J]. Electrical Engineering in Japan, 1993, 113(2): 53-64.
- [3] Ohshita Y, Hashimoto A, Kurosawa Y. A diagnostic technique to detect

abnormal conditions of contacts measuring vibrations in metal tank of gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4): 2090-2094.

- [4] Ho S L, Li Y, Edward W C, et al. Analyses of three-dimensional eddy current field and thermal problems in an isolated phase bus[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1515-1518.
- [5] 孙国霞, 关向雨, 舒乃秋, 等. 基于光纤光栅的GIS导体温度巡检方法与装置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 316-321.
Sun Guoxia, Guan Xiangyu, Shu Naiqiu, et al. GIS conductor temperature inspection method and device based on fiber bragg grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 316-321.
- [6] 李玲, 吴晓文, 李洪涛, 等. 气体绝缘母线热计算及其影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 264-270.
Li Ling, Wu Xiaowen, Li Hongtao, et al. Thermal field calculation and influencing parameters analysis of gas insulated busbars[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 264-270.
- [7] 孙国霞, 舒乃秋, 吴晓文, 等. 基于多物理场耦合的气体绝缘母线触头接触温升有限元计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(S2): 408-413.
Sun Guoxia, Shu Naiqiu, Wu Xiaowen, et al. Finite element analysis of contact temperature rise in gas insulated busbars based on coupled multi-physics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 408-413.
- [8] 孙国霞, 关向雨, 金向朝, 等. 基于多场耦合计算的气体绝缘开关设备母线接头过热性故障分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3445-3451.
Sun Guoxia, Guan Xiangyu, Jin Chaoxiang, et al. Temperature rise calculation and overheating fault analysis of gas insulated switchgear bus connector based on coupled field theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3445-3451.
- [9] 舒乃秋, 关向雨, 康兵, 等. 基于场路耦合有限元的三相共箱气体绝缘母线暂态电力分析[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1456-1462.
Shu Naiqiu, Guan Xiangyu, Kang Bing, et al. Dynamics electromagnetic force analysis of three phase enclosure type GIB based on field-circuit coupling theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1456-1462.
- [10] Holm R. Electrical contact[M]. New York, USA: Springer, 1979: 35-6.
- [11] 谢海峰, 潘纪良, 陈湘波, 等. 气体绝缘母线三维涡流场有限元分析研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 12-16.
Xie Haifeng, Pan Jiliang, Chen Xiangbo, et al. Finite element analysis of three-dimensional eddy current field of gas insulated bus[J]. Shanxi electric power, 2016, 44(8): 12-16.
- [12] 钱萍. 航天电连接器综合应力加速寿命试验与统计分析的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2010.
- [13] 王淑娟, 余琼, 翟国富. 电磁继电器接触失效机理判别方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 38-44.
Wang Shujuan, Yu Qiong, Di Guofu. Contact failure mechanism identification method of electromagnetic relay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 38-44.

(下转第38页)

- 影响[J]. 中国电力, 2014, 47(6): 31-37.
- Wu Yongcong, Chen Yuandong, Luo Hanwu, et al. Study on the impact of trees on the lightning performance of 10kV distribution lines[J]. Electric Power, 2014, 47(6): 31-37.
- [10]何金良, 曾嵘. 配电线路雷电防护[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [11]IEEE Std. 1410-2010. IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines[S].
- [12]袁忠君, 李光军, 郑坤力, 等. 基于场路结合的雷感应电压计算方法研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(2): 1-4, 14.
- Yuan Zhongjun, Li Guangjun, Zheng Kunli, et al. Calculation method of lightning induced over-voltage based on field-circuit[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(2): 1-4, 14.
- [13]Cooray V. Some considerations on the "Cooray-Rubinstein" formulation used in deriving the horizontal electric field of lightning return strokes over finitely conducting ground[J]. Electromagnetic Compatibility IEEE Transactions on, 2007, 44(4): 560-566.
- [14]Cooray V. Calculating lightning-induced overvoltages in power lines. A comparison of two coupling models[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1994, 36(3): 179-182.
- [15]Hoidalen H K. Analytical formulation of lightning-induced voltages on multiconductor overhead lines above lossy ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1): 92-100.
- [16]陆小花. 架空配电线路感应雷过电压计算与防护的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- Lu Xiaohua. Research of calculation and prevention of lightning induced overvoltages on overhead distribution lines[D]. Nanjing: HoHai University, 2007.
- [17]刘健, 杨仲江, 华荣强. 10 kV 配电线路采用避雷器防护研究[J]. 高压电器, 2017, 53(9): 181-185.
- [18]Janiszewski J M, Bassi W, Matsuo N M. A simple transformer model for analysis of transferred lightning surges from MV to LV lines[C]//International Conference on Electricity Distribution.
- [19]江剑峰, 朱彬若. 智能电能表抗电快速瞬变脉冲群干扰的研究[J]. 华东电力, 2013, 41(10): 2074-2078.
- [20]GB50064-2014, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范[S].
- [21]何金良. 时频电磁暂态分析理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

作者简介:



马俊(1988—),女,工程师,从事电能计量技术研究。
Email:majun4321@yeah.net

王莉(1970—),女,高级工程师,从事测试计量技术研究。
张红(1970—),女,高级工程师,从事电能计量技术研究。
姜荣华(1968—),女,高级工程师,从事电测仪表技术研究。
赵斌(1970—),男,高级工程师,从事电测仪表技术研究。
范巧成(1968—),男,高级工程师,从事电测仪表技术研究。

收稿日期:2019-02-22;修回日期:2019-07-02
(杜景飞 编发)

(上接第12页)

- [14]Lam Y Z, McBride J W, Maul C. Displacement measurements at a connector contact interface employing a novel thick film sensor[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2008, 31(3): 566-573.
- [15]Ren W B, Du Y W, Cui L. Research on fretting regimes of gold-plated copper alloy electrical contact material under different vibration amplitude and frequency combinations[J]. Wear, 2014, (321): 70-78.
- [16]Mashimo K, Okuno Y, Kawata S. Fretting analysis of tin-coated terminals under rotational motion[C]. PROCEEDINGS OF 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), New Orleans, LA, 2014: 1-7.
- [17]王浩伟, 徐廷学, 周伟. 综合退化数据与寿命数据的某型电连接器寿命预测方法[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(5): 702-706.
- [18]Braunovic M, Izmailov V V, Novoselova M V. A model for life time evaluation of closed electrical contacts[C]. Proc OF51thIEEE Holm Conference On Electrical Contacts, Chicago, United states. 2005, 217-223.
- [19]孙福杰, 王章启, 秦红三. 高压断路器触头电寿命诊断技术[J]. 电网技术, 1999, (3): 60-62.
- [20]Chen Z K, Witter G. J. Electrical load and residual stresses for silver tin indium oxide composite rivet contacts[C]. 2012 IEEE 58th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), 2012: 1-7.
- [21]王浩伟, 徐廷学, 王波. 基于 Wiener 模型的某型导弹电连接器寿命预测[J]. 战术导弹技术, 2014, (1): 42-48.

作者简介:



秦靖舒(1993—),男,硕士研究生,从事电力系统状态监测和 GIS 研究。Email:380425613@qq.com

范淑薇(1993—),女,硕士研究生,从事电力系统二次设备检测及摩擦磨损研究。
关向雨(1986—),男,博士研究生,讲师,从事 GIS 在线状态监测与微动摩擦研究。
舒乃秋(1954—),男,博士研究生,教授,主要从事电气设备监测及故障诊断技术的研究。

收稿日期:2018-08-01;修回日期:2018-11-01
(焦阳 编发)