

开关电器触头电寿命诊断方法综述

狄美华, 李震彪, 吴细秀

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

Review on Diagnostic Techniques for Electrical Endurance of Switchgear Contact

DI Mei-hua, LI Zhen-biao, WU Xi-xiu

(College of Electrical and Electronical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 介绍了目前用于开关电器触头电寿命诊断的多种方法,着重分析比较了几种常用方法的原理,总结了各自的优缺点及适用范围,并展望了电器设备电寿命诊断技术的发展趋势。

关键词: 开关电器; 电寿命; 诊断方法; 电磨损

中图分类号: TM201

文献标识码: A

Abstract: In this paper several diagnostic techniques for electrical endurance of switchgear contact are presented. The principles, superiorities, shortcomings and validity of some frequently used techniques are discussed and analyzed. Comparing with these methods, a new method of assessing contact life is recommended, which is based on the techniques of signal processing and condition assessment.

Key words: switchgear; electrical endurance; diagnostic technique; erosion

1 引言

开关电器广泛应用于电力系统中,对电力系统起控制和保护的双重作用,因此可靠地分合电路既是电器产品本身最重要的性能指标,也是保证电力系统可靠运行的基础。所以对开关电器电寿命进行检测、诊断、预测具有重要的工程意义。

笔者总结了目前国内外开关设备电寿命诊断的常用方法,如基于 $N-I_b$ 寿命曲线的诊断法,模糊诊断法,基于超程时间和吸合时间的双变量预测法及基于超程时间减小速率建模寿命分析法等,并对其原理和各自优缺点进行了分析比较。

2 基于 $N-I_b$ 寿命曲线的诊断方法

该诊断方法的基础是电磨损与电寿命的关系,

收稿日期:2003-12-17; 修回日期:2004-02-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59977006)

教育部留学回国科研基金资助项目

电力设备电气绝缘国家重点实验室开放课题资助项目

即当触头磨损质量达到一定值时,触头寿命终结。

2.1 开断电流加权累计法

开断电流加权累计法是以断路器的电寿命曲线 ($N-I_b$) 为依据的,见图 1。触头电磨损由开断电流和开断次数决定^[1],开断电流越大,触头的电磨损越大,允许开断的次数就越少,电寿命曲线可用式(1)表示^[2]:

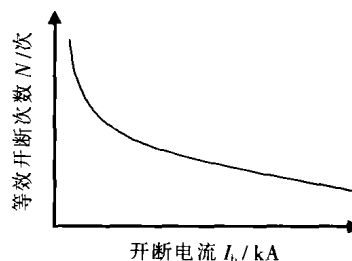


图 1 典型 $N-I_b$ 曲线

$$NI_b^\alpha = Q_g \quad (1)$$

式中: α 为开断电流的加权指数,它与触头材料有关,通常介于 1~2 之间; I_b 为断路器开断电流的有效值; N 为开断电流有效值为 I_b 时断路器的允许开断次数; Q_g 是允许电磨损总量的象征量。用 I_b^α 表征断路器运行中某一次开断电流有效值为 I_b 时的电磨损象征量,则运行中的断路器累计电磨损象征量 Q 可用式(2)计算:

$$Q = \sum_{i=1}^n I_{b,i}^\alpha \quad (2)$$

式中: n 为断路器已经开断的总次数。比较 Q 和 Q_g 就可以判断出断路器电磨损情况,进而预测剩余寿命。

该方法原理简单,只需检测开断电流的有效值。但由于触头电磨损不仅仅取决于燃弧电流,还受燃弧时间的极大影响,因此该方法在原理上误差较大。

2.2 改进的电磨损量的计算方法

针对上述方法存在的问题,文[2]在考虑了燃弧时间的影响后提出了新的累计磨损象征量 Q 的计算方法:

$$Q=K \sum_{i=1}^n \int_0^{t_{ai}} |i_{bi}|^\alpha dt \quad (3)$$

式中: K 是系数; i_{bi} 和 t_{ai} 分别为第 i 次开断时的电流和燃弧时间; n 为断路器已开断的总次数。其中:

$$K=Q_g/W'_g$$

$$W'_g = \sum_{i=1}^{N/3} \int_0^{t_{a1i}} |i_{1i}(t)|^\alpha dt + \sum_{i=1}^{N/3} \int_0^{t_{a2i}} |i_{2i}(t)|^\alpha dt + \sum_{i=1}^{N/3} \int_0^{t_{a3i}} |i_{3i}(t)|^\alpha dt \quad (4)$$

式(4)中: $t_{a1i}, t_{a2i}, t_{a3i}$ 分别表示第 i 次开断时 1, 2, 3 相的燃弧时间; i_{1i}, i_{2i}, i_{3i} 分别为第 i 次开断时的 1, 2, 3 相电流。

式(3)的合理性比式(2)有了较大提高, 但是式(3)中 K 值和 Q 值的确定计算量较大, 且其只考虑了开断磨损, 未考虑触头闭合磨损。

2.3 用相对电磨损量求相对电寿命^[3-5]

假设一台全新的断路器的触头允许磨损总量为 100%, 对应其相对电寿命为 100%。额定短路开断电流下, 断路器允许开断次数为 N , 则每次额定短路电流开断时的相对电磨损量为 $1/N$ 。然后根据不同断路器的 $N-I_b$ 曲线, 求得任意大小开断电流 I_b 对应的等效开断次数 N_1 , 则对应每次开断的相对电磨损为 $1/N_1$ (定义为 Q_m), 则可计算出该断路器的相对电寿命:

$$L=L_N - \sum Q_m$$

式中: L_N 是断路器触头电寿命的额定值, 是一个小于等于 1 的百分数。

该方法与开断电流累计法实际是在同一理论下的不同的工程计算方法, 其实质是相同的。

2.4 时间积分电流法^[6]

时间积分电流法以触头开断电流对燃弧时间的累积积分作为衡量触头电寿命的依据。以 12.5 kA 的电流为例, 假设触头在电流刚刚过零时打开, 直至下次过零时电弧熄灭, 燃弧时间为半个故障电流周期^[6], 在 60 Hz 系统中, 时间积分电流应为:

$$I \cdot t = \int_0^{0.0083} 12.5\sqrt{2} \sin(337t) dt = 0.094 \text{ (kA} \cdot \text{s)}$$

时间积分电流法的基础仍然是基于电寿命反比于开断电流和燃弧时间, 其核心思想是电触头寿命取决于累计燃弧能量。按照触头磨损的允许厚度, 通过不同电流下的分断试验, 统计总结出该种开关的时间积分电流累计总值。其原理与式(3)相同。

上述 4 种方法均是基于 $N-I_b$ 寿命曲线的寿命诊断方法, 一般都适用于高压断路器, 它们共同的不足在于: ① 不同灭弧介质的断路器有不同的等效电寿命曲线。② 不同触头材料有不同的等效曲线, 不是每一个厂家都能提供这条寿命曲线, 也不是每一个产品都有这条曲线, 原因在于要获得这条曲线, 必须要在各种电流情况下对断路器进行寿命试验, 记录

其允许开断次数, 成本高。③ 现场工作条件可能与实验室条件不同, 气候和污染都会导致曲线的差异。④ 考虑了开断磨损, 未考虑闭合磨损的影响。

3 模糊综合诊断法

模糊综合诊断法将模糊理论应用于电器设备触头电寿命的在线监测综合评判, 为电器设备在线实时监测和智能化开辟一种新的途径。模糊综合评判的主要步骤^[7]:

(1) 评判对象因素集的建立: 主要包括影响真空断路器开断电寿命的各种因素, 如开断电流、开断次数、首开相在三相中的分布均匀度、燃弧时间以及触头材料等。

(2) 隶属函数的确定: 由于因素的模糊性及其等级的模糊性, 很难把某因素具体规定为某一等级, 因此, 因素等级集应视为等级论域上的模糊子集。因素等级隶属度的大小主要根据各因素对触头电寿命的作用程度来确定。

(3) 建立评判集: 建立评判结果好坏的标准。

(4) 建立模糊综合评判的数学模型: 对属于不同层次和类别的对象进行综合评判, 为了便于区分各因素在总的评价过程中的地位和作用, 较全面地吸收所有因素提供的信息, 可以进行多级评判, 得出评判结果。

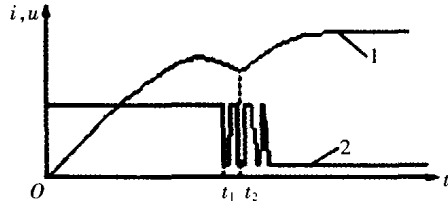
这是一种新颖的、综合的诊断方法, 与单项指标诊断方法相比, 该方法更准确、更科学和更完善。它的优越性在于使被评判对象的各种相关联或不相关联的单参数性能指标归一化后成为可比和可量化的量, 同时又可以从实时数据采集中实现在线的评判^[7]。其不足在于因素集中影响因素很多, 如何选取合适的因素集, 没有一个标准; 而且评判集的粗细划分也要视具体情况而定; 在多级评判模型中, 各级划分因素权重集合的选取都是凭经验得出的, 准确度不能得到保证。

4 利用超程时间和吸合时间建模法

4.1 基于超程时间和吸合时间双变量寿命预测法

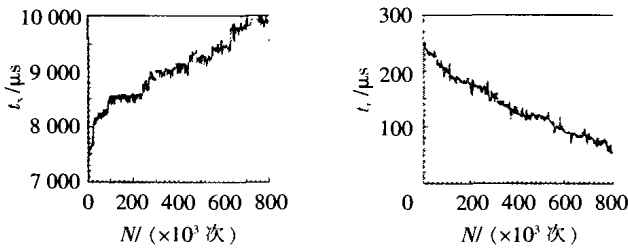
该方法目前已首先用于继电器的寿命预测^[8]。电磁继电器的超程是指继电器从动触点与静触点接触瞬间起到衔铁闭合为止, 触点移动(或可能移动)的距离; 超程时间就是指继电器触点在超程阶段移动所需的时间; 吸合时间是指继电器线圈加电到动触头第一次碰撞静触点所需的时间^[9]。超程时间和吸合时间均可以通过继电器线圈电流和触点电压动态测试波形直观地表示出来, 见图 2。其中 $t_c=t_2-t_1$ 为超程时间; $t_x=t_1$ 为吸合时间。

文[10]提供了 4JRXM-3 继电器动作 800 000 次所获得的超程时间和吸合时间数据, 见图 3。随着动



1——继电器线圈电流动态波形 2——触点电压动态波形
t₁——吸合时间 t₂——衔铁运动到完全闭合所需的时间

图2 继电器动态测试波形



(a)吸合时间与动作次数的关系 (b)超程时间与动作次数的关系

图3 继电器动作800 000次所获得的数据

作次数的增加,超程时间 t_0 逐渐缩短,吸合时间逐渐延长,且数据均具有一定的分散性。针对上述数据的特征,文[10]提出了用时间序列方法建立继电器双变量寿命预测数学模型。

继电器的寿命预测是非平稳时间序列预测问题,其数学模型包括趋势项时间序列预测数学模型和平稳项时间序列预测数学模型两部分,见式(5):

$$X_t = Y_t + Z_t \quad (5)$$

式中: Y_t 为 X_t 中的趋势项时间序列分量; Z_t 为 X_t 中的平稳项时间序列分量。该模型经过系统辨识,然后根据预测向量超程时间和吸合时间的限定范围预测寿命。双变量寿命预测结果见表1。

表1 双变量寿命预测结果

主变量	预测结果/万次	试验结果/万次	相对误差/%
超程时间	63.5	77.4	17.9
吸合时间	61.2	77.4	20.9

表1表明,分别以超程时间和吸合时间为主变量进行继电器双变量寿命预测的方法是有效的,但前者的相对误差略小。

超程时间和吸合时间双变量预测法打破了传统的继电器寿命试验方法,具有如下优点:试验是非破坏性的,试验后的产品可能仍是成品,试验周期短。但是该方法也是在统计规律的基础上得出的,不同的继电器,不同的工作环境都可能引起预测模型的变化,而且由于没有考虑燃弧时间、燃弧能量、触点温升、释放时间等因素对继电器寿命的影响,预测的相对误差较大。

4.2 基于超程时间缩短速率建模的寿命分析法

文[11]中指出继电器触点由于磨损、老化、腐蚀等原因,其超程时间 $T_c(t)$ 将随时间发生变化,当超程时间 $T_c(t)$ 缩短到允许的极限值 T_{cmin} 后,继电器就发生失效。假定超程时间按线性规律随时间变化,则

寿命 T 可表示为:

$$T = \frac{T_{c0} - T_{cmin}}{v}$$

式中: T_{c0} 为初始超程时间; T_{cmin} 为超程时间极限值; v 为超程时间缩短速率。在文[11]中提到超程时间缩短速率是随机变量且服从正态分布,当 $\frac{\sigma_v}{v_p} \ll 1$ 时,

继电器产品的平均寿命为:

$$T_p \approx \frac{T_{c0} - T_{cmin}}{v_p}$$

其中: v_p 为超程时间缩短速率平均值; σ_v 为超程时间缩短速率的标准差。

该方法为电磁继电器可靠性设计提供了指导性建议,但是由于超程时间缩短速率是随机变量, v_p 是大量试验的统计结果,不同的继电器产品 v_p 不同,所得的寿命结果只是估计值,不能实时反映继电器运行时的寿命状态。

5 其他方法

(1)接触电阻法

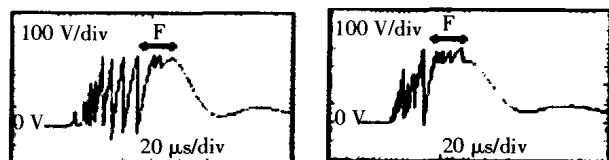
众所周知,接触电阻包括收缩电阻和薄膜电阻两部分,电寿命试验过程中,因为存在一定的接触压力,一般情况下各种膜会破碎,所以接触电阻主要表现为收缩电阻。文[12]指出,收缩电阻的大小与触头的可靠性及电寿命的指标有直接关系,收缩电阻越小,电器触头电寿命指标越高。但是两者之间的具体关系还有待进一步研究。

(2)信号特征提取法

采集感兴趣的信号波形或图像,用多分辨分析法和小波变换等数学手段对信号进行预处理,提取信号特征,然后利用人工神经网络、专家系统、模式识别(包括指纹识别)等技术进行分类,进而对设备的状态作出评估^[13-16],目前该方法还在探讨阶段,详细论述尚未见报道。文[15]指出:电弧对电磁继电器触头的反复烧蚀使得触头表面粗糙度发生变化,而触头表面状态与触头簇射电弧波形有密切的内在关系,图4是文[15]检测到的触头间簇射噪声信号。通过提取簇射信号中电流导通时间、导通次数等参数判断触头表面侵蚀状态和已通断操作次数^[15],进而预测电器触头材料剩余寿命。

此外,还有一些诊断方法,如累计电弧能量法

$$\left(\int i^2(t) dt, \int u(t) i(t) dt \right)^{[17]}$$



(a)触头操作次数 10^3 (b)触头操作次数 10^4

图4 触头间簇射波形

6 结语

笔者总结了用于诊断开关电器触头电寿命的各种方法。基于 $N-I_0$ 寿命曲线的诊断方法是比较常用的较为简单的方法,但是曲线的获取成本很高,而且曲线的准确度存在较大差异。模糊综合诊断法是一种多指标预测法,比单指标预测法准确度高,但是因为影响因素过多而很难选取合适的因素集来进行判断。基于超程时间和吸合时间的双变量寿命预测法以及基于超程时间缩短速率建模的寿命分析法,目前主要研究对象是继电器,该方法试验周期短而且试验是非破坏性的,但该方法仍是基于大量实验的统计总结,成本较高,通用性有待提高。

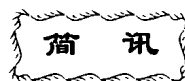
基于通断过程暂态电流信号特征提取的方法进行电寿命诊断,目前仍处于初期探讨阶段,系统详细的报道尚未见到。若能通过提取电路通断过程的信号特征进而判断触头剩余寿命,无疑是一种简单实用的新途径。

参考文献:

- [1] Cai Zhiyuan, Ma Shaohua, Li Wei, et al. Monitor of Electrical Endurance of Vacuum Circuit Breaker's Contacts [A]. XXth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum [C], Tours, France, IEEE, 2002.
- [2] 关永刚, 黄瑜珑, 钱家骊. 真空断路器电磨损监测技术的改进[J]. 高压电器, 2001, 37(4): 1-4.
- [3] 郭贤珊, 王章启. 高压断路器触头电寿命预测研究 [J]. 高电压技术, 1999, 25(3): 43-44.
- [4] 孙福杰, 王章启. 高压断路器触头电寿命诊断技术 [J]. 电网技术, 1999, 23(3): 59-61.
- [5] Ma Shaohua, Xu Jianyuan, Wang Jimie. A Method for Intellectualized Detection and Fault Diagnosis of Vacuum Circuit Breakers[A]. IEEE 19th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum [C], Xi'an, China, IEEE, 2000.
- [6] Paul N Stoving, John F Baranowski. Interruption Life of Vacuum Circuit Breakers [A]. IEEE 19th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum [C], Xi'an, China, IEEE, 2000.
- [7] 林 莘, 张冠生, 洪 翠. 基于模糊理论的真空中断器开断电寿命综合评判的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 15-18.
- [8] 翟国富, 王淑娟, 许 峰, 等. 电器可靠性寿命试验新方法的探讨[J]. 低压电器, 1996(6): 28-30.
- [9] 翟国富, 赵新民, 刘茂恺, 等. 采用超程时间建模的航空继电器寿命预测方法的研究[J]. 航空学报, 1998, 19(5): 617-620.
- [10] 翟国富, 王淑娟, 许 峰, 等. 基于超程时间和吸合时间建模的继电器双变量寿命预测方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 76-80.
- [11] 翟国富, 许 峰, 刘茂恺. 基于超程时间减小速率建模的电磁继电器可靠性寿命分析方法的研究 [J]. 电子器件, 2002, 25(3): 301-304.
- [12] 杨冬莲. 对电寿命试验方法的探讨 [J]. 低压电器, 1995(3): 22-24.
- [13] Kang Pengju, David Birtwhistle, Kame Khouzam. Transient Signal Analysis and Classification Monitoring of Power Switching Equipment Using Wavelet Transform and Artificial Neural Networks[A]. 1998 Second International Conference on Knowledge-based Intelligent Electronic Systems [C], Adelaide, Australia, IEEE, 1998.
- [14] I Manea, C Chiciu, F Balasiu, et al. Complex Method to Diagnose the Technical State of the Medium and High Voltage Circuit Breaker after Short-circuit Events [A]. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution [C], Amsterdam, Netherlands, IEE, 2001.
- [15] Miyajima Kiyotomi, Nitta Shuichi. A Proposal on Contact Surface Model of Electromagnetic Relays—Based on the Change in Showering Arc Waveforms with the Number of Contact Operations [J]. IEICE Trans. Electron, 1998, E81-C(3): 399-407.
- [16] M Kezunovic, C Nail, Z Ren, et al. Automated Circuit Breaker Monitoring and Analysis [A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting [C], Chicago, USA, IEEE, 2002.
- [17] D Birtwhistle, I D Gray. A New Technique for Condition Monitoring of MV Metalclad Switchgear[A]. Fifth International Conference on Trends in Distribution Switchgear: 400 V~145 kV for Utilities and Private Networks [C], London, UK, IEE, 1998.

作者简介:狄美华(1979-),女,硕士研究生,主要研究方向为电器设备状态检测技术。

中国电机工程学会高电压专业委员会 2004 年学术会议论文征文通知



根据中国电机工程学会高电压专委会工作条例精神及 2004 年工作计划,高压专委会拟定于 2004 年 10 月召开“高压专委会 2004 年学术会议”。该次会议是高压专委会 4 年一次的学术年会;也是高压界科技工作者的一次聚会;更是科技工作者展示才华、培养和发现优秀科技人才的平台。

征文内容涉及高压测试技术及设备、过电压及绝缘配合、高压绝缘、高压电器以及高电压新技术等,要求论文能反映出近年来高电压技术在科研、设计、生产运行、制造、教学等方面的科研成果。论文截止 2004 年 8 月 31 日。征文具体事宜请与秘书处联系。

地址:武汉市武昌洪山区珞喻路 143 号,武汉高压研究所内,高电压专业委员会秘书处

联系人:蔡爱姣 电话:027-87445893 邮编:430074