

灰色理论在预测 SF₆ 组合电器漏气情况中的应用

费 韬,叶金翔,许 格

(国网浙江省电力公司检修分公司,浙江 杭州 311232)

摘 要: GIS 设备在变电站的应用越来越普遍,但漏气是影响 GIS 设备正常运行的一个非常重要的因素。GIS 设备漏气时,其气室压力值下降呈非线性趋势。通过灰色理论来拟合该下降趋势,得到拟合后的趋势曲线,该趋势曲线通过残差、关联度及后验差 3 种检验方式进行检验,若检验结果满足要求,则该拟合是有效的。因此,可通过拟合后的下降曲线,来预测漏气的 GIS 设备下一步的漏气情况,为检修计划的制定提供参考。通过国内某特高压变电站 500 kV GIS 组合电器气室 SF₆ 气体泄漏的例子,来详细阐述利用灰色理论建立模型,检验该模型,并进一步利用该模型来预测该组合电器将来 SF₆ 气体泄漏的情况。

关键词: 变电站; GIS; SF₆ 漏气; 灰色理论; 检修计划; 在线监测

Abstract: The application of GIS equipment is more and more popular, but gas leakage is a very important factor influencing its safe operation. When gas leakage happens, the decrease of the pressure volume in the air chamber shows the nonlinear tendency. Through the grey theory the descending trend is fitted to obtain the trend curve which is tested by the residual error, the relational grade and the posterior error. As a result, the descending curve after the tests can predict the next step of gas leakage and provide a reference for the maintenance schedule. Taking SF₆ leakage of 500 kV GIS equipment in an UHV substation for example, the model established based on grey theory is described in detail, and then the next happening of gas leakage in GIS equipment is predicted with the proposed model after its verification.

Key words: substation; GIS; SF₆ leakage; grey theory; maintenance schedule; online monitoring

中图分类号: TM595 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)02-0051-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.02.012

0 SF₆ GIS 简介

SF₆ 气体是一种无毒、无色、无味,化学性能极稳定的物质,具有良好的电气绝缘性能及优异的灭弧性能,其耐电强度为同等压力下氮气的 2.5 倍,击穿电压是空气的 3 倍,是世界上目前最优良的绝缘介质和灭弧介质,现广泛应用在 SF₆ 断路器、SF₆ 组合电气设备 GIS、SF₆ 电流电压互感器及小容量的变压器上^[1]。GIS 是指 SF₆ 封闭式组合电器,国际上称为“气体绝缘开关设备”(gas insulated switch-gear),简称 GIS,它将一座变电站中除变压器以外的一次设备,包括断路器、隔离开关、接地开关、电压互感器、电流互感器、避雷器、母线、电缆终端、进出线套管等,经优化设计有机地组合成一个整体^[2]。

内 SF₆ 气体的压力值,上传到变电站计算机监控系统,以供远程监控及数据整合利用^[3]。

变电站 GIS 组合电器内 SF₆ 压力值,通过现场传感器,经接入层模数转换,IEC 61850 通信规约转换,再接入变电站监控系统。通过监控系统即可实时查看组合电器 SF₆ 压力值,并对数据进行记录。SF₆ 在线监测装置接入监控系统的结构如图 1 所示。

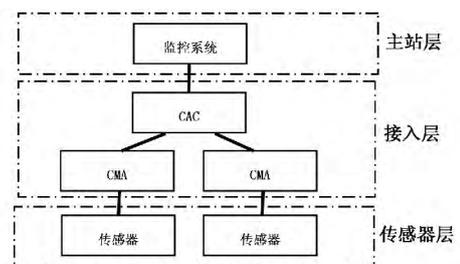


图 1 SF₆ 在线监测接入监控系统结构图

1 变电站 SF₆ 在线监测装置的应用

变电站 SF₆ 在线监测装置的作用是将 GIS 设备

2 灰色理论简介

灰色系统理论是在经典控制理论、现代控制理论

(包括大系统理论)、模糊控制理论(即白色控制理论)的基础上,针对要求高而又难于用传统方法建模的系统发展起来的新方法。灰色系统理论进行预测具有要求原始数据少、不考虑分布规律、短期预测精度高、易于检验等优点,现已在很多领域得到了应用。

变电站GIS组合电器在SF₆气体发生泄露时,SF₆气体的压力值相应地不断下降。但是根据在线监测装置采集到的SF₆压力值历史数据分析,以及现场的运行经验,GIS组合电器设备漏气时,SF₆压力值下降趋势是非线性的。另一方面,GIS组合电器设备SF₆气体压力值的大小受到许多因素的影响,比如电气设备负荷大小、环境温度。同时,经在线监测装置上送的压力值,又受到传感器误差、通信异常等因素影响。

因此组合电器SF₆压力值的变化是一个典型的灰色系统。通过灰色系统理论对发生漏气的SF₆组合电器漏气速度进行预测具有一定的现实意义。

3 案例分析

国内某特高压变电站在对在线监测装置采集到的组合电器SF₆压力值数据进行历史比对时,发现500kV GIS设备某气室的SF₆压力值不断下降。现场利用红外检漏仪对该气室进行检测,确定该气室存在漏气现象,并定位了漏气点。如图2为红外检漏仪检测情况,图3为该气室漏气点位置。

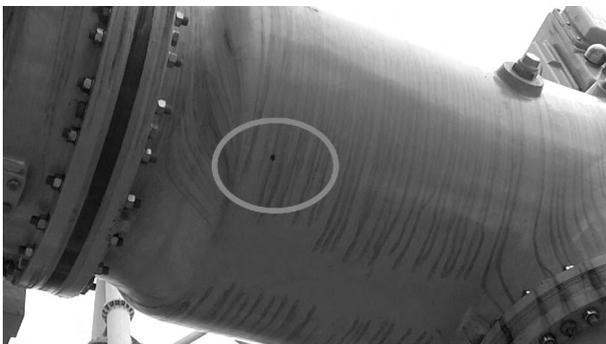


图2 通过红外检漏仪探测到漏气点

经过检测,确定该漏气点位于GIS设备罐体,如图3所示。GIS组合电器设备的正常运行要求内部SF₆气体压力值维持在一定范围内。SF₆气体的持续泄露,将导致气体压力的不断降低,进而危及到设备的可靠运行。一定时期内可以对该气室进行带电补充SF₆气体,使气体压力值升高至额定值或大于额定

值,以维持该设备继续运行;要根本解决该漏气问题,应该制定停电计划,对该设备进行整体更换。

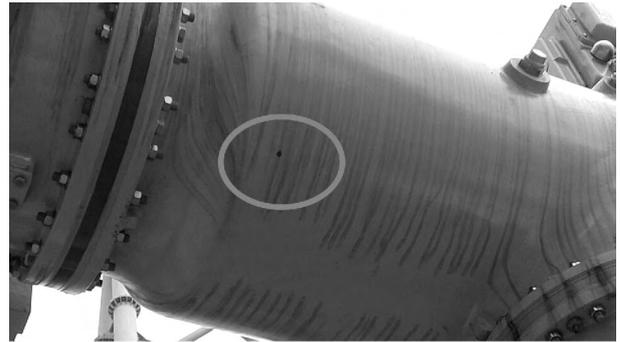


图3 现场确定漏气点位置

该设备投入运行约一年,运行过程中曾经补气2次。该气室压力值及补气情况如表1所示。

表1 漏气气室SF₆压力历史值

时间节点	气室压力值/MPa
投运初期	0.516
第6个月	0.484
第6个月补气后	0.530
第12个月	0.494
第12个月补气后	0.536

备注:该气室压力额定值为0.5MPa,告警值为0.45MPa。

从表1可知,运行到第12个月时,该气室压力降至0.494MPa,然后现场进行了补气,使压力值升至0.536MPa。

GIS组合电器设备的正常运行要求内部SF₆气体的压力值应不低于额定值。则现场补气之后,气体压力何时会降低到额定值以下,成为讨论的重点。在对降低到额定值的时间进行预测了之后,就可以此为参考依据,制定检修计划,或再次带电补气,或停电更换设备。

下面将利用在线监测装置采集存储的气室压力值历史数据,进行灰色理论建模,拟合该设备气体压力下降趋势曲线,以预测数据的走势。

4 模型的建立及验证

4.1 建立模型

令原始数据序列为 $X^{(0)}$ 。

$$X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$$

然后先构造累加数列。

$$X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$$

其中,

$$X^{(1)}(k) = X^{(0)}(k) + X^{(1)}(k-1), X^{(1)}(1) = X^{(0)}(1)$$

再做作紧邻均值生成。

$$Z^{(1)} = (Z^{(1)}(1) \ Z^{(1)}(2) \ \dots \ Z^{(1)}(n))$$

$$\text{其中 } Z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)}{2}$$

构造 B 矩阵和 Y 矩阵如下。

$$B = \begin{pmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} -x^{(0)}(2) \\ -x^{(0)}(3) \\ \dots \\ -x^{(0)}(n) \end{pmatrix}$$

对参数 $\hat{\alpha}$ 进行最小二乘估计得

$$\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \text{ 求出 } a、b \text{ 的值。}$$

由于灰色理论 GM(1, 1) 白化方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax = b$$

则预测模型为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a}$$

求出 $\hat{x}^{(1)}$ 后,累减即可得到预测模拟序列。

$$\hat{x}^{(1)} = (\hat{x}^{(0)}(1) \ \hat{x}^{(0)}(2) \ \dots \ \hat{x}^{(0)}(n))$$

其中,

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1) \ \hat{x}^{(0)}(1) = \hat{x}^{(1)}(1)$$

于是,将历史数据导入 $X^{(0)}$,即可得到由该模型

生成的拟合序列 $\hat{X}^{(0)}$ 。

4.2 模型检验

下面通过 3 种方法来验证该模型的精度:残差检验法、关联度检验法、后验差检验法。

(1) 残差检验法

首先构建残差序列。

$$E^{(0)} = (e^{(0)}(1) \ e^{(0)}(2) \ \dots \ e^{(0)}(n))$$

$$\text{其中 } e^{(0)}(k) = |\hat{x}^{(0)}(k) - x^{(0)}(k)|$$

然后计算平均相对误差。

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{e(k)}{x^{(0)}(k)}$$

导入历史数据进行计算,运行初期至 6 个月这段时间的 $\sigma = 0.0018$ 精度为 99.82%; 6 个月至 12 个月 $\sigma = 0.0019$ 精度为 99.81%; 第 12 个月至今 $\sigma = 0.0015$ 精度为 99.85%,很明显,精度非常高,预测结果可信。

(2) 关联度检验法

首先将原始序列和预测序列都初始化,每个数都除以第一个数,得到

$$X_1 = (x_1(1) \ x_1(2) \ \dots \ x_1(n))$$

$$\text{其中 } x_1(k) = \frac{x^{(0)}(k)}{x^{(0)}(1)}$$

$$X_2 = (x_2(1) \ x_2(2) \ \dots \ x_2(n))$$

$$\text{其中 } x_2(k) = \frac{\hat{x}^{(0)}(k)}{\hat{x}^{(0)}(1)}$$

$$\text{再求出差序列 } \Delta = (\Delta(1) \ \Delta(2) \ \dots \ \Delta(n))$$

$$\text{其中 } \Delta(k) = |x_1(k) - x_2(k)|$$

$$\text{求出二级差, } M = \max(\max(\Delta)) \ m = \min(\min(\Delta))$$

然后计算关联系数序列为

$$\eta(k) = \frac{m + 0.5M}{\Delta(k) + 0.5M}$$

$$\text{则关联度为 } \gamma = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \eta(k)$$

导入历史数据进行计算,运行初期至 6 个月这段时间的 $\gamma = 0.701$,第 6 个月至第 12 个月 $\gamma = 0.719$,第 12 个月至今 $\gamma = 0.674$,依据灰色理论,要求 γ 越大越好,一般认为 $\gamma > 0.6$ 模型令人满意^[4]。因此本模型符合要求。

(3) 后验差检验法

先求出原始序列的均方差为

$$S_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2}$$

其中 \bar{x} 为原始序列的平均值。

再求出残差序列 $E^{(0)}$ 的均方差为

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [e^{(0)}(k) - \bar{e}]^2}$$

其中 \bar{e} 为残差序列的平均值。

$$\text{则后验差比值 } c = \frac{S_2}{S_1}$$

小误差概率为

$$p = P\{[e(k) - \bar{e}] < 0.6745S_1\}$$

经计算,运行初期至 6 个月这段时间的 $c = 0.078$ $p = 1$,6 个月至 12 个月 $c = 0.076$ $p = 1$,第 12 个月至今 $c = 0.278$ $p = 0.96$,根据文献^[5],后验差比值 $c < 0.35$ 且 $p > 0.95$ 的精度等级为“好”(共 4 个等级,分别为:好、合格、勉强、不合格),所以该模型满意。

综上,通过 3 种检验方法对该模型进行了检验,检验结果符合要求。所以,利用灰色理论来拟合本次漏气的 GIS 气室 SF₆ 气体压力值下降趋势,是可靠的。

(下转第 81 页)

6 防范措施

运维人员应强化对“转子一点接地保护”工作原理、装置内部结构、关键测试数据标准和同类电厂转子一点接地保护动作原因及控制措施的学习。将转子接地保护装置输出特性的标准列入检修规程及检修文件包。将转子一点接地保护装置列入公司隐患进行管理,并落实相应的控制措施。下一阶段,应该利用机组大修机会进行技术更新或改造,将原来配置 UNS3020a 型发电机接地保护装置改用南瑞继电保护 RCS-985RE 型保护装置。

7 结语

转子一点接地保护受转子绕组对地电容的影响大,当转子绕组对地电容较大时,保护灵敏度较低^[8-10],由此引起保护信号误发和机组非停事件不时出现,直接影响到机组和电网安全稳定运行,在出现一点接地故障后,应根据具体情况分析接地类型、接地原因,根据具体情况确定查找方法并制定针对性的防范措施。

参考文献

[1] 李锋, 刘海霞. 转子一点接地故障原因分析及处理措

(上接第53页)

4.3 根据模型预测气室压力值下降趋势

最后一次补气之后,将在线监测装置采集并存储的 SF₆ 历史压力值数据导入模型,得到拟合序列 $\hat{X}^{(0)}$ 。

观察拟合序列发现,补气后的 231 天压力降至额定值 0.5 MPa。因此若在保证该气室始终不低于额定值运行,则应考虑不迟于此时间进行处理。可以进行再次补气,但因漏气点并未消除,所以补气后还应继续跟踪该设备漏气情况;或者考虑纳入停电计划^[6],对该设备进行更换处理。

5 灰色理论模型的推广应用

变电站在正常运行情况下,通过人工或在线监测装置采集到大量非线性、较易受环境影响的数据,对这些数据的分析平常只能靠人工检查,费时费力,且数据量大的情况下,难以发现隐藏的问题且难以准确判断变化趋势。根据所建上述模型在分析 SF₆ 气室压力、断路器液压、避雷器泄露电流、变电设备局部放电在线监测、潮流等变电站重要数据方面,都

施[J]. 华电技术, 2013, 35(8): 41-45.

[2] 陈国栋. 一起发电机转子一点接地故障的查找及处理[J]. 电力安全技术, 2012, 14(6): 52-54.

[3] 罗真, 李书兴. 发电机励磁回路两点接地保护的研究[J]. 继电器, 2007, 5(3): 81-84.

[4] 竺士章. 发电机励磁系统试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[5] 马铁军, 马骋, 胡贤优, 等. UNS3020 型发电机转子接地保护误动作原因分析[J]. 华电技术, 2008, 30(6): 49-51.

[6] 刘建平. ABB 发电机转子接地保护装置国产化改造的研究与应用[J]. 浙江电力, 2012(1): 49-51.

[7] 陈俊, 王光, 严伟, 等. 关于发电机转子接地保护几个问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 90-92.

[8] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 267-277.

[9] 毕大强, 徐振宇. 发电机励磁回路接地保护新原理的研究[J]. 继电器, 2000, 28(7): 37-40, 54.

[10] 刘小波, 刘万斌, 包明磊, 等. 转子一点接地保护双重化配置研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 162-167.

作者简介:

逯静(1983), 工程师, 从事发输电二次设计工作;
蒲鹏飞(1978), 高级工程师, 从事电力技术及管理工作。
(收稿日期: 2014-12-22)

能提供一个较为合理的预测,为制定变电站设备检修计划和运维工作提供更好的支撑作用。

参考文献

[1] 孟勇. GIS 设备 SF₆ 漏气处理技术[J]. 应用技术, 2009, 5(b): 120, 121.

[2] 李祺. SF₆ 全封闭组合电器的漏气分析与处理[J]. 湖北电力, 2003, 27(4): 53-62.

[3] 刘可龙. SF₆ 气体在线监测技术的现状及发展趋势[J]. 通信电源技术, 2013, 30(6): 83-88.

[4] 徐国祥. 统计预测和决策[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2008: 112-113.

[5] 宁宣熙, 刘思峰. 管理预测与决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 113-145.

[6] 李鸣青. 气体绝缘金属封闭开关设备的漏气处理[J]. 供用电, 2010, 27(6): 72-73.

作者简介:

费韬(1985), 从事超高压及特高压变电站运维工作;
叶金翔(1985), 从事超高压及特高压变电站运维工作;
许格(1990), 从事超高压及特高压变电站运维工作。
(收稿日期: 2014-12-03)