

# 基于 weibull + + 的变压器寿命评估分析

阮峰<sup>1</sup>, 王小明<sup>2</sup>, 甄威<sup>3</sup>

(1. 国家电网公司直流建设分公司 四川 成都 610041; 2. 四川省电力公司通信自动化中心 四川 成都 610041;  
3. 四川电力科学研究院 四川 成都 610072)

**摘要:**通过对变压器绝缘寿命的重要性影响因素的历史监测数据的统计分析,模拟了负载系数及环境温度的变化过程,建立了变压器寿命评估模型。通过对一台实际运行的变压器在考虑/不考虑负荷增长及环境温度增加的情况下进行基于 weibull + + 的绝缘寿命评估,分析了负荷及环境温度对变压器寿命的影响。最后的评估结果验证了模型的有效性。

**关键词:**电力变压器; 绝缘寿命评估; 负载模拟; 环境温度模拟

**Abstract:** The change processes of the load factors and ambient temperatures are modeled by the statistical analysis of the history monitoring data that is important to the transformer insulation life. And the evaluation model is established based on weibull + +. Through the insulation life assessment of an in-service transformer with/without the load growth and ambient temperature rise, the influence of load and ambient temperature on the insulation life is discussed. Finally, the validity of the proposed model is verified by the evaluation results.

**Key words:** power transformer; insulation life assessment; load simulation; ambient temperature simulation

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)06-0036-04

## 0 引言

变压器作为电力系统重要设备之一,长期的使用必然会加速变压器的绝缘老化过程。根据国外的统计表明,变压器的寿命导致的变压器故障,在所有引起故障起因中占第二位。因此,需要对投运年限较长的变压器采取相应措施延长其寿命,从而提高其经济效益。国外已有学者对变压器寿命评估进行了研究,提出了相应的寿命评估方法:解析法、破坏性检测法、非破坏性检测法以及神经网络、可靠性技术、突变理论等。中国的电力设备寿命管理工作目前还处于初级阶段,仅限于某些技术专业内的活动<sup>[1]</sup>。为了有效地延长变压器的使用寿命,最大限度地减少其维护费用,必须对其进行寿命评估。因此,如何科学地评估变压器剩余寿命,保证超期服役的电力设备安全运行已成为电力部门越来越重视的问题。

对于油浸式变压器,影响其绝缘寿命的主要因素是:①变压器所带负载;②环境温度;③水分含量;④油中氧含量。近年来,全球变暖,变压器环境温度随之提高,同时,随着社会经济的发展,用户的用电量增加,特别是到了冬、夏两季,负荷增加明显,有时甚至

超过变压器的额定负载。因此,在估算变压器寿命时需要考虑负载增加及环境温度升高对变压器寿命的影响。文献[2]通过对未来的负荷及环境温度进行预测,对变压器绝缘寿命进行了估计,但是未考虑负荷增长及环境温度升高等因素。文献[3]考虑了环境温度的增加对变压器寿命的影响,但忽略了负荷的增加。在 IEEE Std C57.91-1995(油浸式电力变压器负载导则)<sup>[4]</sup>的基础上,分别在①考虑负载增加和环境温度的升高、②不考虑负载增加及环境温度的升高的情况下对同一台变压器基于 weibull + + 软件进行了寿命评估,并对估算结果进行了比较。同时,还单独分析了环境温度的升高对变压器寿命的影响。

## 2 变压器寿命评估方法

文献[4]给出了求取变压器损失寿命的计算公式为

$$F_{AA} = \exp \left[ \frac{1500}{383} - \frac{1500}{\Theta H + 273} \right] \quad (1)$$

$$\text{Loss of life} = \sum_{n=1}^N F_{AA_n} \Delta t_n \quad (2)$$

$F_{AA}$ : 表示老化加速因数;

$\theta_H$ : 表示变压器热点温度;  
 $F_{AAn}$ : 表示在 n 内的老化加速因数;  
 $\Delta tn$ : 表示以时间间隔分别进行估算;  
 $N$ : 表示总的的时间间隔数;  
 $n$ : 表示第 n 个时间间隔 ( $n = 1, 2, 3, \dots$ );  
 其中, 热点温度的计算公式为

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \quad (3)$$

$\theta_A$ : 表示当前环境温度;  
 $\Delta\theta_{TO}$ : 表示相对于环境温度的顶层油温温升;  
 $\Delta\theta_H$ : 表示相对于顶层油温的绕组热点温升;  
 $\Delta\theta_{TO}$ 、 $\Delta\theta_H$  的详细计算参考文献 [4]。

### 1.1 负载模型

根据文献 [4], 要评估变压器绝缘寿命, 需要知道其负载系数  $K$ 。

$$K = \text{负载电流} / \text{额定电流}$$

这里以监测到的某台变压器所带负荷曲线为基础, 对这台变压器实际所带负载进行预测。图 1 为 3 月某天变压器负载系数与时间的关系图, 图 2 为变压器最初开始使用那年负载系数与时间的关系图。由于变压器材料的热特性决定了, 在一段时间内, 变压器负荷波动产生的损耗与这段时间中某一定值产生的损耗一致<sup>[4]</sup>, 因此, 为了便于计算, 这里以阶梯形代替连续变化的曲线图。图 2 同理。

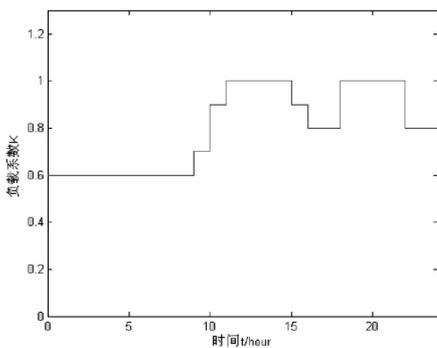


图 1 3 月某天变压器负载系数与时间的关系图

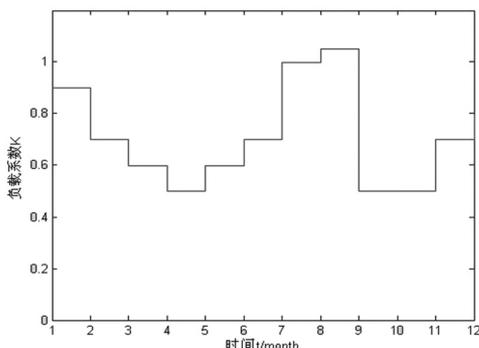


图 2 某年变压器负载系数与时间的关系图

以图 1 中的数据为基数, 对变压器负载进行估算。以 1 月为例, 具体计算方式如下。

由图 2 可得, 1 月负载系数  $K$  为 0.9, 3 月负载系数  $K$  为 0.6。1 月负载为 3 月负载的 1.5 倍。则一月每天的负载系数在 3 月的基础上乘以 1.5。同理, 可求得其余月份每天的负载系数。由于这样估算出的负载会存在一定的误差, 因此, 在负载系数曲线上加上一个较小的随机变化量修正, 设这个随机变化量服从正态分布。

### 1.2 环境温度模型

根据四川某市一年的历史温度, 可以得到一年内每天环境温度的最大值  $T_{max}$ 、最小值  $T_{min}$  及平均值  $T_{avg}$ ,  $T_{avg}$  可以反应出季节的变化。每一天的温度围绕着日平均温度以正弦函数形式变化<sup>[2]</sup>。为了能够更好的反应一天的温度曲线, 在这个基础上, 需要在曲线上加一较小的随机变化量, 并且保证得到的温度模拟值介于  $T_{max}$  及  $T_{min}$  之间。具体的模拟方式如下。

- 1) 在  $[0, 2\pi)$  之间产生 24 个等距的数  $x_i$ , 计算出  $\sin x_i$  的值;
- 2) 产生 24 个随机变量  $Y_i$ , 使  $Y_i$  服从正态分布  $N(0, 0.25)$ ;
- 3) 计算  $Z_i = \sin x_i + Y_i$ ;
- 4) 计算  $D_i = (T_{max} - T_{min}) / 2 * Z_i$ ;
- 5) 计算每天每时刻温度  $T_i = T_{avg} + D_i$ ;
- 6) 重复以上步骤, 根据取得的每日的温度最大值  $T_{max}$ 、最小值  $T_{min}$  及平均值  $T_{avg}$  计算出一年 365 天的温度。

### 1.3 水分模拟

在 IEEE C 57.91 - 1995 中, 假设了变压器密封良好, 没有考虑水分对绝缘老化的影响, 但在实际运行时, 变压器干燥不良或在运行中吸潮、进水或产水, 都会导致水分的增加。绝缘纸中含水量为 2% 的老化速度是初始含水量 0.3% 的 6 ~ 16 倍, 而含水量增到 4% 时, 其老化速度是初始含水量 0.3% 的 12 ~ 45 倍<sup>[5]</sup>。

因此在计算老化加速因子时考虑一个系数  $C_n$ 。假设当变压器纸中含水量超过 2% 即进行干燥, 干燥后纸中残留的含水量为 0.3%。考虑由各种因素引起的温度变化中, 纸内水分实际上在高、低温含水量平衡值之间规律性波动<sup>[6]</sup>。变压器纸中的含水量模拟如图 3 所示。

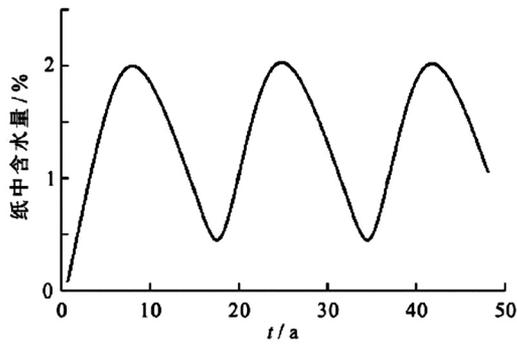


图3 变压器纸中含水量模拟

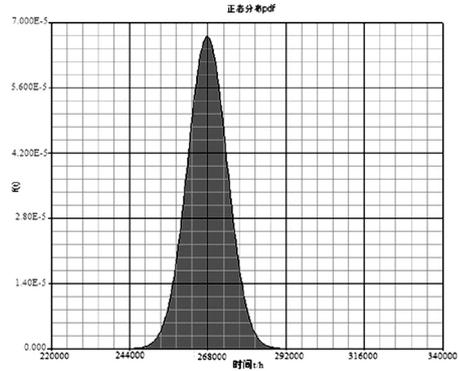


图5 基于 weibull++ 软件变压器运行寿命分布图

## 2 基于 weibull++ 的变压器寿命评估

对国内一台 120 000 kVA 的变压器寿命进行评估。具体参数如下。

散热方式: ONAF;

额定电流: 943 A;

空载损耗: 58.5 kW;

负载损耗: 294 kW;

相对环境的最大温升: 热点温度: 53.9 °C, 绕组: 65 °C;

油时间常数: 6.8 小时。

### 2.1 忽略负载及环境温度的增长

采用前面提到的负载系数和环境温度计算模型, 对变压器的寿命损失进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。

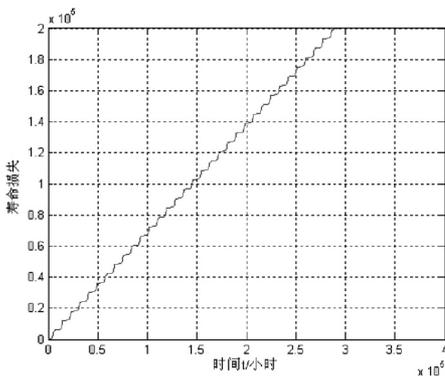


图4 变压器绝缘寿命损失

由图 4 可知, 当变压器达到其绝缘寿命的终点 180 000 h 时, 其使用时间大约为 270 000 h。重复模拟 50 次, 得到变压器的实际运行寿命在 252 000 ~ 288 000 h 之间变化, 利用 weibull++ 软件统计绝缘寿命的分布得到其满足正态分布, 均值为 267 856 h, 标准方差为 5 964.2 h。如图 5 所示。

### 2.2 考虑负载及环境温度的增长

考虑到当地负载增长和环境温度的增长情况, 假设负载系数平均每年增加 0.001, 环境温度平均每年增加 0.1 °C。再次对变压器的寿命损失进行仿真, 其仿真结果如图 6 所示。

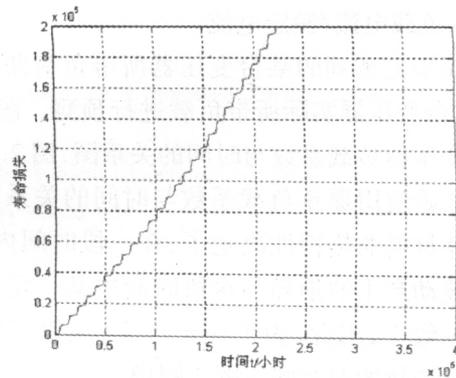


图6 变压器绝缘寿命损失

由图 6 可知, 当变压器达到其绝缘寿命的终点 180 000 h 时, 其使用时间大约为 210 000 h。重复模拟 50 次, 得到变压器的实际运行寿命在 191 000 ~ 229 000 h 之间变化, 利用 weibull++ 软件统计得到此时变压器寿命分布图如图 7 所示, 变压器实际寿命均值为 209 658 h, 标准方差为 6 523.4 h。

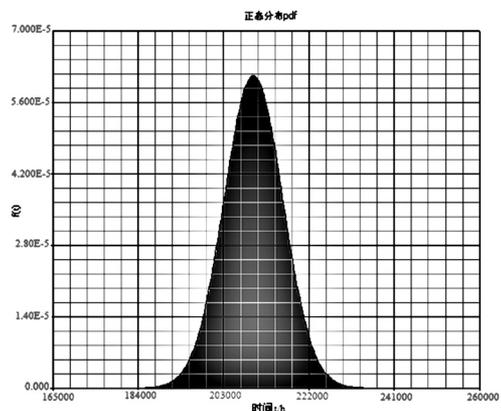


图7 基于 weibull++ 软件考虑负载及环境温度增加时变压器寿命分布图

因此,可以看出,由于负载及环境温度的增长,变压器寿命缩短了大约60 000 h。

### 2.3 只考虑环境温度的增长

如果只考虑环境温度的增长,即

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \quad (3)$$

其中  $\Delta\theta_A$  为环境温度的增加。

设  $\theta = [(\text{考虑温升后的变压器寿命损失} - \text{未考虑温升的变压器寿命损失}) / \text{未考虑温升的变压器寿命损失}] \times 100\%$

那么  $\theta$  与环境温度增加的关系图如图8所示。

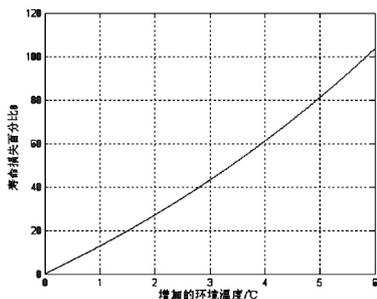


图8 环境温度对变压器寿命的影响

由图8可以看出,环境温度增加得越多,变压器的寿命损失越多,并且它们之间的关系成指数倍增长。当温升到达5.8 °C时,变压器的寿命损失加倍。

## 3 结论

在监测到得历史数据的基础上,建立了变压器所

(上接第16页)

组,从而抑制广安和南充地区其他机组相对四川主网其他机组发生相继失步。

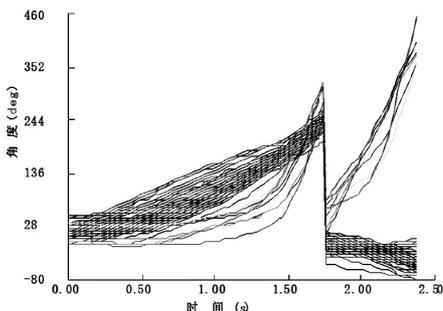


图6 川渝断面被解列后四川电网机组的功角摇摆曲线

## 3 结论

对当前中国电网中常用的集中失步解列装置及

带负载模型及环境温度模型,对一台实际的变压器进行了寿命评估,讨论了考虑/不考虑负荷增长及环境温度增长情况下对变压器绝缘寿命的影响,建立了基于weibull++变压器绝缘寿命预测评估模型。最后,还单独分析了环境温度的增长对变压器绝缘寿命的影响。

### 参考文献

- [1] 吕继恺,曹建波. 发电机与变压器的寿命评估[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(03): 51-52.
- [2] Kshira T. Muthanna, Abhinanda Sarkar, Kaushik Das, and Kurt Waldner. Transformer Insulation Life Assessment [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 150-156.
- [3] Jonathan W. Stahlhut, Member, IEEE, Gerald T. Heydt, Fellow, IEEE, and Nancy J. Selover. A Preliminary Assessment of the Impact of Ambient Temperature Rise on Distribution Transformer Loss of Life [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2000-2007.
- [4] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers [S]. IEEE Std. C57.91-1995.
- [5] 董立文,李军,何宝龙,等. 水分对油浸式变压器寿命的影响[J]. 变压器, 2008, 45(7): 17-18.
- [6] 杜林,袁蕾,熊浩,等. 应用蒙特卡罗模拟法的电力变压器热特性绝缘寿命评估[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 856-861.

(收稿日期:2010-03-19)

其原理进行了综述和说明。同时,基于此,对川渝断面失步解列装置配置的可能性及其效果进行了计算和分析。对指导电网运行具有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 周孝信,等译. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 张保会,汪成根,郝治国. 电力系统失步解列存在的问题及需要开展的研究[J]. 电力自动化设备, 2010, (10): 1-6.
- [3] 王达,薛禹胜,刘玉田,等. 故障解列与失步解列的协调优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 1-6.

(收稿日期:2011-07-07)