

# 变压器信任度与安全指数的对比研究

庞尔军<sup>1,2</sup>, 唐贵基<sup>2</sup>, 于虹<sup>3</sup>, 高阔<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学云南电网公司研究生工作站, 云南 昆明 650217; 2. 华北电力大学机械工程系, 河北 保定 071003; 3. 云南电力研究院高压研究所, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 为准确掌握变压器的真实运行工况, 对变压器的状态评估方法进行对比研究, 找出不同评估方法的优缺点和共同规律。首先对变压器风险评估和信任度评估的基本原理进行分析, 找到各自算法本身的优缺点。在此基础上对云南电网的50台变压器分别进行状态评估, 得到其信任度和安全指数。最后进行对比研究, 确定了状态检修策略中与评估结果相对应的阈值。该研究为变压器的状态检修提供更全面有效的评估依据, 对电网的经济安全运行有着重要的指导意义。

**关键词:** 变压器; 信任度; 安全指数; 状态评估

## A comparative study between the transformer trust degree and the security index

PANG Er-jun<sup>1,2</sup>, TANG Gui-ji<sup>2</sup>, YU Hong<sup>3</sup>, GAO Kuo<sup>1,2</sup>

(1. Graduate Workstation of North China Electric Power University & Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650217, China;  
2. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
3. High Voltage Research Institute, Yunnan Electric Power Test & Research Group Co., LTD, Kunming 650217, China)

**Abstract:** To get accurate knowledge of the real operating conditions of the transformer, different assessment methods are compared to identify the strengths, the weaknesses and the common law. First of all, the basic principles of the risk assessment and the transformer trust assessment are analyzed to find the advantages and disadvantages of each algorithm, and then the condition assessment of Yunnan Power Grid 50 transformers is conducted on this basis and the trust degree and security index are calculated. Finally, a comparative study is conducted and the threshold for condition-based maintenance strategy corresponding to the results of the assessment is identified. It will provide a more comprehensive and effective assessment basis for the transformer condition-based maintenance, and has an important guiding significance for economic and safe operation of the power grid.

**Key words:** transformer; trust degree; security index; condition assessment

中图分类号: TM412 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0139-07

## 0 引言

电力变压器是电力系统中最重要设备, 其运行可靠性直接关系到电力系统的安全和稳定。由于不同变压器在性能、技术水平、制造工艺上存在巨大差异, 一旦出现电力变压器故障, 不仅对变压器的输变电能力有影响, 更严重甚至会造成城市和工厂大面积停电, 对电力系统和国民经济都有极大影响并造成巨大经济损失<sup>[1-6]</sup>。

以往对变压器的定期检修策略会造成设备过修或失修等问题。而状态检修可以做到当修必修, 节约了大量的人力物力财力, 提高了设备可用性, 使设备可靠性、经济性达到最佳状态。而状态检修最终依据是状态评估, 对变压器进行状态检修的前提必须对变压器状态有着准确的评估。因此, 变压器

状态评估是实现状态检修的基础。目前, 国内外对输变电设备进行状态评估的方法主要分为三类, 第一类基于故障树的状态评估, 类似于专家诊断系统(状态评价); 第二类是信任度评估; 第三类是风险评估。

本文对变压器的风险评估和变压器的信任度评估进行对比研究, 找出不同评估方法的优缺点和共同规律, 为变压器的状态检修提供更全面有效的评估依据, 对电网的经济安全运行有着重要的指导意义。

## 1 状态评估方法介绍

### 1.1 变压器的信任度评估

#### 1.1.1 数据的收集

计算变压器的信任度, 首先要收集设备的基础

信息、油气分析、负荷情况、运行环境、试验记录、故障缺陷记录等方面的数据<sup>[7-8]</sup>，所获取的信息量越大、越全面、准确，则模型计算出的评价结果也就更准确。

### 1.1.2 基于 FTA 的信任度计算

基于 FTA 的设备信任度计算步骤如下：

#### (1) 根据设备功能和结构，进行系统划分

根据对变压器各部件故障模式的深入分析，针对电力变压器的结构特点，结合以往对变压器故障信息的收集、整理，将变压器故障 T 分为器身故障 A1、绕组故障 A2、铁芯故障 A3、有载分接开关故障 A4、非电量保护故障 A5、冷却系统故障 A6、套管故障 A7、油枕 A8、无励磁分接开关故障 A9 等九大类。其中 T 为故障树的顶事件， $A_j(j=1,2,9)$ 、 $Ek(k=4.1,4.2, \dots, 6.5)$  为故障树的中间事件，而  $X_i(i=1.1,1.2, \dots, 9.7)$  则为故障树的底事件<sup>[9-11]</sup>。

对变压器进行 FMEA 分析，对所涉及的故障检测方法进行归纳、整理，将各检测方法所获得的特征参量作为故障特征参量，并对各特征参量依次编码即可得到故障特征参量集。在此基础上，根据变压器的各故障模式与故障特征参量之间的对应关系，可建立各故障模式与故障特征参量之间的对应关系。从故障原因、故障影响、检测手段等方面对各个系统中划分的部件进行故障模式及影响分析；应用故障树原理，对各类故障进行细分并依据其逻辑关系建立故障树<sup>[12-13]</sup>。

#### (2) 确定隶属度函数(概率函数)

通过构造相关隶属函数，利用特征参量的检测值计算其隶属度，并根据隶属度评定故障的发生概率，即隶属度越高，故障发生的概率就越大。

通过对各故障特征参量的特点进行分析，可将其分为两大类：一类是规定上限注意值的特征参量，另一类是规定下限注意值的特征参量。因此，根据这两类特征参量的特点，通过对常见的上升型和下降型隶属函数进行比较分析，最终构造了以下两种隶属函数。

当故障特征参量存在规定的上限注意值  $a$  时，表示特征参量检测值  $x$  越大时，发生故障的倾向性就越大。因此，构造式(1)所示的隶属函数。

$$u_a(x) = \frac{x^2}{x^2 + a^2} \quad (1)$$

当故障特征参量存在规定的下限注意值  $b$  时，表示特征参量检测值  $x$  越小时，发生故障的倾向性就越大，情形和式(1)正好相反。因此，构造式(2)所示的隶属函数。

$$u_b(x) = 0.5 - 0.5 \sin \frac{\pi}{2b}(x - b) \quad (2)$$

(3) 计算各故障模式权重系数；计算故障发生概率。

采用基于模糊矩阵的层级分析方法确定权重系数，而不直接由专家给出权重系数，合理性在于，基于模糊矩阵的层级分析方法是两两比较的方法确定重要度，对于专家来说，更易于给出比较合理的值，因此最终得到的权重系数，更具有合理性。

变压器故障树顶事件权重采用 1/9~9 标度，二级事件、底事件和特征参量的权重采用 0.1~0.9 标度<sup>[14-15]</sup>，其中标度由专家根据实际现场经验给出，小于 0.5 表示后者比前者重要，0.5 表示两者同样重要，大于 0.5 表示前者比后者重要，最终构成权重矩阵。

根据变压器的故障树模型及各事件的逻辑关系，得出该故障树的所有最小割集，即能直接导致顶事件发生的底事件为

$$\{X_{1.1}\}、\{X_{1.2}\}、\dots、\{X_{9.7}\}$$

其故障概率分别为

$$P(X_{1.1})、P(X_{1.2})、\dots、P(X_{9.7})$$

顶事件与中间事件的逻辑关系为

$$T = \sum_{i=1}^9 A_i \quad (3)$$

中间事件与底事件的逻辑关系为

$$\left\{ \begin{aligned} A_1 &= \sum_{i=1}^3 X_{1,i} \\ A_2 &= \sum_{i=1}^7 X_{2,i} \\ A_3 &= \sum_{i=1}^7 X_{3,i} \\ A_4 &= \sum_{i=1}^5 X_{4,i} \\ A_5 &= \sum_{i=1}^5 X_{5,i} \\ A_6 &= \sum_{i=1}^5 X_{6,i} \\ A_7 &= \sum_{i=1}^7 X_{7,i} \\ A_8 &= \sum_{i=1}^3 X_{8,i} \\ A_9 &= \sum_{i=1}^7 X_{9,i} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

因此，变压器发生故障的概率，即不信任度  $F(T)$  为

$$F(T) = P(T) = \sum_{i=1.1}^{9.7} P(X_i) \quad (5)$$

考虑到不同因素对上级的不同影响, 即引入权重系数, 上述三式可以表示为

$$P(T) = \sum_{i=1}^9 \bar{P}_{Ai} W_{Ai} \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{P}_{A1} = \sum_{i=1.1}^{1.3} P_{X_i} W_{X_i} \\ \vdots \\ \bar{P}_{A4} = \left( \sum_{i=4.1.1}^{4.1.2} P_{X_i} W_{X_i} \right) \times W_{E_{4.1}} + \\ \left( \sum_{i=4.2.1}^{4.2.9} P_{X_i} W_{X_i} \right) \times W_{E_{4.2}} + \dots + \\ \left( \sum_{i=4.5.1}^{4.5.13} P_{X_i} W_{X_i} \right) \times W_{E_{4.5}} \\ \vdots \\ \bar{P}_{A9} = \sum_{i=9.1}^{9.7} P_{X_i} W_{X_i} \end{array} \right. \quad (7)$$

对于有缺陷的变压器部件, 缺陷频发次数等于 2 时, 部件信任度乘以 0.9 的调节系数, 缺陷频发次数大于 2 时, 信任度乘以 0.8 的调节系数。

另外, 当变压器非电量保护中的压力释放阀任何一个目测项目和油位计任何一个指示项目有问题时, 这两个子部件的故障率强制设为 0.1。

(4) 结合权重系数和故障概率, 计算出变压器整体的信任度和各个部件的信任度。

从而可以得到变压器的信任度  $R(T)^{[16-17]}$  为

$$R(T) = 1 - P(T) \quad (8)$$

由此计算出广州局、深圳局等一共 50 台变压器的信任度值, 如表 1 所示。

表 1 所示, 由于计算的变压器大多数运行年限都在 15 年以上, 所以计算出的变压器信任度值相对较低。

表 1 变压器信任度

Table 1 Trust degree value of the transformers

惠州 1A	0.914	江门 2B	0.861	深圳 3B	0.863	平果 1A	0.863	增城 3B	0.856
惠州 1B	0.909	江门 2C	0.861	深圳 3C	0.834	平果 1B	0.870	增城 3C	0.878
惠州 1C	0.914	茅湖 2A	0.854	深圳 4A	0.907	平果 1C	0.869	广蓄 1	0.929
惠州 2A	0.918	茅湖 2B	0.869	深圳 4B	0.906	平果 2A	0.826	广蓄 2	0.919
惠州 2B	0.913	茅湖 2C	0.823	深圳 4C	0.924	平果 2B	0.827	广蓄 3	0.934
惠州 2C	0.928	天生桥 1B	0.815	草铺 1B	0.845	平果 2C	0.828	广蓄 4	0.928
茂名 2A	0.962	天生桥 2B	0.838	草铺 1C	0.893	增城 2A	0.918	广蓄 5	0.827
茂名 2B	0.966	天生桥 3B	0.835	草铺 2A	0.887	增城 2B	0.817	广蓄 6	0.828
茂名 2C	0.966	天生桥 4B	0.925	草铺 2C	0.876	增城 2C	0.816	广蓄 7	0.823
江门 2A	0.855	深圳 3A	0.902	来宾 1C	0.822	增城 3A	0.868	广蓄 8	0.890

## 1.2 变压器的风险评估

### 1.2.1 收集数据

与变压器的信任度评估方法相比较, 收集的数据包括以下几项, 如: 基础信息、试验数据、缺陷数据、事故和障碍数据、预试不合格项等。

变压器的评估数据<sup>[18-19]</sup>可以分为两大类:

一类是直接反映变压器状态的信息, 如设备的运行年限、糠醛及油试验数据等, 这类数据直观表征了变压器的状态, 因此将其用于变压器安全指数的计算。

另一类是间接反映变压器状态的信息, 如设备的预防性试验、故障及缺陷记录、设备外观等, 这类数据间接表征了变压器状态之间的差异, 因此将其用于变压器安全指数的修正。

### 1.2.2 安全指数计算

图 1 为安全指数的计算流程图, 给出了安全指数计算过程中所涉及各个特征量。

安全指数是直接和设备老化进程相关的安全指数分量, 主要考虑设备运行年限, 平均使用寿命(为每一类设备的每一厂家和型号设定一个值), 并用所承担的工作强度以及环境两个因素进行修正。其计算公式为

$$HI_{1,T_1} = HI_{1,T_0} \cdot e^{B \cdot f_1 \cdot f_E (T_1 - T_0)} \quad (9)$$

对于一台设备的理想老化过程, 定义其全新时的安全指数为 0.5, 即当  $T_0 = 0$  时,  $HI_{1,T_0} = 0.5$ , 因此只要式中的待定系数都确定, 则可以计算当前年份的安全指数。此外, 定义理想条件下设备的安全指数为 5.5 时, 设备到达其预期使用寿命, 故而, 老化安全指数还应局限在下列区间范围内, 即当计算结果超过区间上(下)限时, 强制安全指数等于区间上(下)限:

$$0.5 \leq HI_1 \leq 5.5 \quad (10)$$

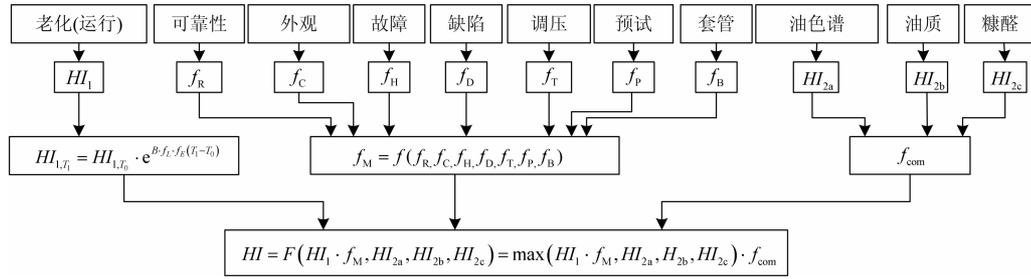


图 1 安全指数计算流程图

Fig. 1 Flowchart for security index calculation

理想状态下运行到其平均使用寿命时的安全指数为 5.5。由于本次项目中所有变压器的平均使用寿命都是 30 年，故而

$$5.5 = 0.5e^{B \cdot 30} \quad (11)$$

因此可以计算出

$$B = \frac{1}{30} \ln\left(\frac{5.5}{0.5}\right) = 0.07993 \quad (12)$$

在计算设备的实际安全指数时，由于设备的老化速度受到运行环境和负载率的影响，因此要用这两个系数对老化常数进行修正，即

$$B' = B \times f_L \times f_E \quad (13)$$

公式 (13) 中  $f_L$  和  $f_E$  分别为单台变压器的负载率系数和环境系数，此系数的设定依据变压器年负载率百分比和中国电力行业污秽等级划分来设定，系数的设定结合了云南电网的实际情况。

对于一些同样能够反映变压器老化过程和运行状态的工况信息，将其用于变压器安全指数计算中的修正系数。对于变压器来说，这些修正系数包括：

a. 外观修正系数  $f_C$ 。根据变压器的主箱体、冷却器及管道系统、调压开关、其他辅助机构/单元以及有无渗漏油现象五个项目来进行判定。

b. 故障历史修正系数  $f_H$ 。根据统计的变压器故障次数来判定。

c. 缺陷修正系数  $f_D$ 。根据缺陷记录表中的分级进行判定。

d. 变压器本体预防性试验修正系数  $f_P$ 。根据绝缘电阻、直流电阻、介损损耗等试验项目判定。

e. 套管修正系数  $f_B$ 。根据套管的可靠性系数和预防性试验系数来判定。

f. 调压开关修正系数  $f_T$ 。根据调压开关的外观、可靠性、预防性试验三部分来判定。

g. 变压器可靠性系数  $f_R$ 。根据各变压器生产厂家和型号的可靠性等级来判定。

对上面所有修正系数进行综合，得出变压器的

安全指数修正系数  $f_M$ 。

油色谱安全指数  $HI_{2a}$  是通过氢气、甲烷、乙烷、乙烯和乙炔五种气体计算的。变压器油中溶解气体是一个反映油中电运动和热运动的过程，主要是测量由变压器油中裂化产生的氢和烃类气体。对每一种气体的含量设定了划分标准，根据不同的气体含量赋予不同的分数，再根据气体种类的不同分别对每一种气体设定权重，通过加权求和的方式计算总分数，再将其除以一个除数因子并将取值范围限定为 [0,10]，由此得到油色谱安全指数。

油质安全指数  $HI_{2b}$  是通过微水、酸度和击穿电压来计算的。通过与油色谱安全指数的计算类似的方法，对三种试验结果设定划分标准，根据不同的结果赋予不同的分数，再根据试验项目的不同分别对每一种试验设定权重，通过加权求和的方式计算总分数，再将其除以一个除数因子并将取值范围限定为 [0,4]，由此得到油质安全指数。

糠醛安全指数  $HI_{2c}$  来自于对油中糠醛的测量。糠醛是油纸绝缘系统老化过程中的主要产物。随着绝缘纸的不断老化，纸中的 C-C 分子链断裂，降低了变压器绝缘的机械强度。分子链的平均长度是用纸的聚合度来表示的，纸的聚合度是测量 C-C 键的数量。一个新的变压器，纸的聚合度约在 1000 左右。当聚合度下降到 250 时，绝缘纸机械强度极低，很容易破裂。糠醛与纸聚合度两者之间存在着一个近似的关系——糠醛含量为 5 PPM 时对应纸聚合度为 250。经验公式为

$$DP = -121 \ln(FFA) + 458 \quad (14)$$

$$HI_{2c} = 2.33 \times (FFA)^{0.68} \quad (15)$$

综上所述，变压器最终安全指数的计算公式为

$$HI = F(HI_1, f_M, HI_{2a}, HI_{2b}, HI_{2c}) = \max(HI_1, f_M, HI_{2a}, HI_{2b}, HI_{2c}) \cdot f_{com} \quad (16)$$

表 2 中所示, 茅湖 2B 的安全指数为 8.000, 是由于预试实验中存在不合格项未完全修复, 则直接强制其安全指数为 8.000。表 2 中的安全指数都相对

较高, 是由于大部分变压器的运行年限均在 15 年以上, 这与实际情况基本吻合。

表 2 变压器安全指数

Table 2 Security index of the transformers

惠州 1A	4.438	江门 2B	5.657	深圳 3B	5.848	平果 1A	5.795	增城 3B	5.836
惠州 1B	4.197	江门 2C	5.568	深圳 3C	5.848	平果 1B	5.795	增城 3C	5.653
惠州 1C	4.412	茅湖 2A	5.719	深圳 4A	4.790	平果 1C	5.795	广蓄 1	4.193
惠州 2A	3.959	茅湖 2B	8.000	深圳 4B	4.790	平果 2A	6.994	广蓄 2	4.156
惠州 2B	4.839	茅湖 2C	5.719	深圳 4C	4.790	平果 2B	9.759	广蓄 3	3.789
惠州 2C	3.959	天生桥 1B	7.036	草铺 1B	5.944	平果 2C	6.994	广蓄 4	4.148
茂名 2A	3.353	天生桥 2B	5.752	草铺 1C	5.723	增城 2A	6.266	广蓄 5	6.890
茂名 2B	2.402	天生桥 3B	6.051	草铺 2A	5.780	增城 2B	7.593	广蓄 6	5.933
茂名 2C	2.364	天生桥 4B	3.219	草铺 2C	5.850	增城 2C	6.266	广蓄 7	5.933
江门 2A	6.326	深圳 3A	4.424	来宾 1C	6.259	增城 3A	5.653	广蓄 8	5.584

## 2 两种评估方法比较

从计算原理我们可以看出, 变压器的信任度评估中, 信任度的计算既可以得到变压器整体的信任度, 还可以得出各大部件发生故障的概率, 可以为检修工作提供充分的依据, 检修时可以着重检修故障概率较大的部件, 但是该方法的缺点是不能预测变压器未来的状态; 而变压器的风险评估中, 安全指数可以宏观地看出当前变压器是否需要检修, 不能得到具体哪一部件需要维修, 但是该方法可以预测变压器外来的状态, 得出变压器剩余的使用寿命<sup>[20]</sup>。

从变压器的信任度值计算原理上不难得知, 其信任度值越高, 则说明该变压器发生故障的概率越小, 可以降低对该变压器的关注, 暂时不列入检修的范围。同样从变压器安全指数的计算原理也可以看出, 其安全指数越高, 则说明需要特别关注该变压器, 当超过预设阈值时, 应将其列入待检修变压器的序列。

将表 1 的信任度值和表 2 安全指数的数据作图比较, 如图 2 所示。

图 2 中所示, 信任度值与安全指数的趋势大致相反, 但是都反应出了当前变压器的状态, 可以为状态检修提供一定的依据。图 2 中第 14 台变压器为茅湖 2B, 由于存在预防性试验不合格项未完全修复, 其安全指数强制设为 8.000; 第 35 台变压器为平果 2B, 由于油实验特征量严重超标, 对其信任度影响不大, 但是安全指数相对很高; 第 37 台变压器为增城 2A, 由于其缺陷次数(总烃超标)高达 38 次, 而计算信任度值时, 对于有缺陷的变压器部件, 缺陷频发次数等于 2 时, 部件信任度乘以 0.9

的调节系数, 缺陷频发次数大于 2 时, 信任度乘以 0.8 的调节系数, 所以信任度计算为缺陷次数的计算不够敏感, 导致其信任度值较高。

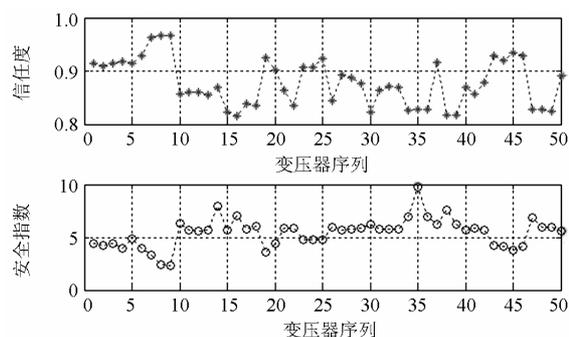


图 2 信任度与安全指数比较

Fig. 2 Comparison between the trust degree values and the security index

根据不同方法的物理意义, 变压器信任度值设置 0.95 和 0.90 两个阈值, 安全指数预置设置  $HI=3.5$  和  $HI=5.5$  两个阈值, 以此作为检索检修对象的判断。即

信任度值大于 0.95——可以降低关注程度的设备——安全指数 0~3.5。

信任度值 0.90~0.95——加强关注但不列入检修计划的设备——安全指数 3.5~5.5。

信任度值 0~0.90——需要列入检修计划的设备——安全指数大于 5.5。

根据以上阈值的划定, 用 1 表示可以降低关注程度的设备, 用 0.7 加强关注但不列入检修计划的设备, 用 0.4 表示需要列入检修计划的设备, 将表 1、表 2 的数据作图 3。

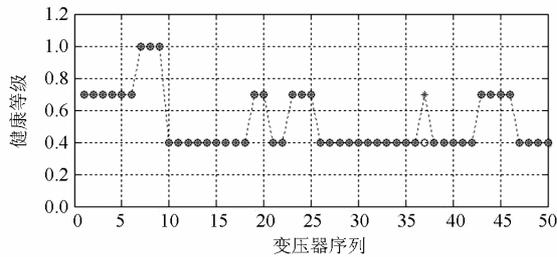


图3 变压器健康等级

Fig. 3 Condition of the transformer sub-health

图3所示,除了第37台增城2A由于缺陷次数过高造成信任度值较高,两种评估方法的其他数据都可以得出变压器当前的安全状态,确定其是否纳入检修序列,为状态检修提供一定的依据。

### 3 结论

状态评估是变压器状态检修的重要依据,因此对不同的评估方法进行对比研究是非常有必要的。本文对变压器的风险评估和变压器的信任度评估进行对比研究,找出不同评估方法的优缺点和共同规律,为变压器的状态检修提供更全面有效的评估依据,对电网的经济安全运行有着重要的指导意义。通过对比得出以下结论:

(1) 变压器的信任度评估中,信任度的计算既可以得到变压器整体的信任度,还可以得出各大部件发生故障的概率,但是缺点是不能预测变压器未来的状态;而变压器的风险评估中,安全指数可以宏观地看出当前变压器是否需要检修,不能得到具体哪一部件需要维修,但是可以预测变压器外来的状态,得出变压器剩余的使用寿命。

(2) 变压器的风险评估和信任度评估得出的评估参数虽然趋势相反,但都表征了相同的变压器状态,符合一般规律。

(3) 变压器的信任度评估中,由于算法本身的缺陷,对缺陷次数计算不够合理,会导致计算出的信任度值不够准确。当油实验数据严重超标时,变压器的风险评估中的安全指数也不够准确。

(4) 由于两种状态评估有各自的优缺点,我们需要综合利用两种评估方法,使得评估结果更加真实有效,这对电网的安全经济运行有着重要的指导意义。

### 参考文献

[1] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-9.  
LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, ZHENG Han-bo, et al.

Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-9.

[2] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.  
ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.

[3] 蔡红梅, 陈剑勇, 苏浩益. 基于灰云模型的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 151-155.  
CAI Hong-mei, CHEN Jian-yong, SU Hao-yi. Fault diagnosis of power transformer based on grey cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 151-155.

[4] 周婧婧. 基于故障树分析的电力变压器可靠性评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.  
ZHOU Jing-jing. Power transformer reliability evaluation method based on fault tree analysis study[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.

[5] 周宁, 马建伟, 胡博, 等. 基于故障树分析的电力变压器可靠性跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 72-77.  
ZHOU Ning, MA Jian-wei, HU Bo, et al. Reliability tracing technique for power transformers using the fault tree analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 72-77.

[6] Ward B H. A survey of new techniques in insulation monitoring of power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001, 17(3): 16-23.

[7] 尹金良, 朱永利, 俞国勤, 等. 基于高斯过程分类器的变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 158-164.  
YIN Jin-liang, ZHU Yong-li, YU Guo-qin, et al. Fault diagnosis of transformers based on Gaussian process classifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 158-164.

[8] 龚瑞昆, 马亮, 赵延军, 等. 基于量子神经网络信息融合的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 79-84.  
GONG Rui-kun, MA Liang, ZHAO Yan-jun, et al. Fault diagnosis for power transformer based on quantum neural

- network information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 79-84.
- [9] Chitra T. Life based maintenance policy for minimum cost [C] // Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003(1): 470-474.
- [10] 杨国旺, 王均华, 杨淑英. 故障树分析法在大型电力变压器故障研究中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(S2): 367-371.  
YANG Guo-wang, WANG Jun-hua, YANG Shu-ying. Application of fault tree analysis to large-scale power transformer faults study[J]. Power System Technology, 2006, 30(S2): 367-371.
- [11] Grall A, Dieulle L, Berenguer C, et al. Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system[J]. IEEE Trans on Reliability, 2002, 51(2): 141-150.
- [12] TU Yan-ming, YAN Ping, GUO Zong-jun. Predictive maintenance strategy based upon management information system[C] // Electrical Insulating Materials, 19-22 Nov. 2001(1): 225-228.
- [13] Xu J, Luh P B, White F B, et al. Power portfolio optimization in deregulated electricity markets with risk management[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1653-1662.
- [14] Hughes D. Condition based risk management: a tool for asset management[J]. Energy World (Monthly), 2005(334): 22-23.
- [15] 周津慧. 重大设备状态监测与寿命预测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.  
ZHOU Jin-hui. The research of the major equipment condition monitoring and life prediction method[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2006.
- [16] 顾瑛. 可靠性工程数学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 82-97.  
GU Ying. Reliability engineering mathematics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 82-97.
- [17] WANG You-yuan, ZHOU Jing-jing, CHEN Wei-gen. Assessment method for the reliability of power transformer based on fault-tree analysis[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 514-519.
- [18] 中国南方电网有限责任公司企业标准. Q/CSG 10010-2004 输变电设备状态评价标准[S].  
China Southern Power Grid Co., Ltd. Enterprise standard. Q / CSG 10010-2004 Power Transmission Equipment status evaluation standard [S].
- [19] 云南电网企业标准. Q/YNDW-2009 110kV~500kV 油浸式电力变压器(电抗器)状态评价细则[S].  
Yunnan Power Grid Enterprise standard. Q/YNDW-2009 110kV~500kV oil-immersed power transformer (reactor) state evaluation rules[S].
- [20] 丁坚勇, 邓瑞鹏, 李江. 发电设备的状态检修策略及可靠性管理研究[J]. 电网技术, 2002, 26(3): 72-75.  
DING Jian-yong, DENG Rui-peng, LI Jiang. Research on overhaul strategy of generating equipment and its reliability management[J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 72-75.

收稿日期: 2013-05-16; 修回日期: 2013-06-27

作者简介:

庞尔军(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事状态评估和机械振动测试方面工作。E-mail: pangerjun@163.com