

## 基于实时监测和例行试验数据的电力变压器状态动态评估方法

孙 鹏<sup>1</sup>, 黄绪勇<sup>1</sup>, 耿苏杰<sup>2</sup>, 王秀丽<sup>2</sup>

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217; 2. 南京理工大学 经济管理学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**考虑到实时监测和例行试验数据反映变压器当前状态的差异性和互补性,提出了一种电力变压器状态动态评估方法。在构建动态评估指标体系的基础上,提出了具有时效特征的单项状态量评分函数;同时基于历史实例样本和变压器状态实时评估时间,提出了融合关联规则置信度与时变参数的单项状态量权重计算方法。针对综合状态指标劣化不均衡问题,引入变权重公式调整权重系数。外样本实例计算结果表明所提方法的正确率达92.1%。

**关键词:**电力变压器;状态评估;实时动态评估;数据时效性;关联规则;变权重

**中图分类号:**TM 407

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.029

## 0 引言

随着电网企业精益化生产的发展,有效利用信息平台的多维数据资源,对电力变压器状态进行实时动态综合评估,是实行设备预知性维护不可或缺的工作。综合信息平台的实时监测和准动态试验两大类数据中,前者反映了设备状态的当前及最近变化情况,时效性强,后者包括例行停运试验及检修缺陷记录等,蕴含着不易实时监测的设备属性信息。在反映设备当前状态上,这些数据既有时间维度差异性,又有信息互补性。利用这些数据通过数据挖掘模型算法来展开对电力变压器运行状态的动态评估,是电网企业迫切需要解决的技术问题。另一方面,由于国内大多数电网企业的综合信息平台尚处于试运行数据积累阶段,动态评估所依赖的信息尚未形成统一的技术规范,有关电力变压器状态实时动态评估的研究成果鲜见报道<sup>[1-3]</sup>。

实际电网企业通常根据电力变压器的整体安全状态来确定其管控等级,以及是否需要在线维护或停运检修,但目前大多数研究集中于电力变压器的各种故障诊断技术方法,其中应用最为广泛的是油中溶解气体分析 DGA(Dissolved Gas Analysis)<sup>[4-7]</sup>。DGA 方法只能对处于严重状态的变压器进行故障类型诊断。考虑到该方法存在的不足,很多学者运用数据挖掘技术提出了变压器故障诊断方法,如贝叶斯法<sup>[8]</sup>、人工神经网络法<sup>[9]</sup>、支持向量机法<sup>[10-11]</sup>、灰靶理论法<sup>[12]</sup>和多证据体融合法<sup>[13]</sup>等。这些方法在生产实践中对指导设备维护具有重要作用,但不涉及对变压器的整体状态进行评估。近几年来,电力变压器状态综合评估研究引起了国内外学者的关

注<sup>[14-17]</sup>。文献[14-17]提出了基于统计样本及关联规则的电力变压器状态综合评估方法,这些方法属于静态评估范畴,不涉及例行试验和在线监测数据在反映设备性能上的时效差异性,不适合直接对电力变压器状态进行实时动态评估。

本文针对例行试验和实时监测数据的不同时效性,提出了电力变压器状态实时动态评估方法。主要内容包括:提出了实时监测和例行试验指标项的不同评分值函数,其中,实时监测的评分值函数不仅考虑指标项的当前量值,也倚重最近若干采样时段的变化率;通过融合关联规则置信度和时变参数配置,提出了实时监测和例行试验指标项的变权重计算方法;依据因素空间理论,引入了综合状态指标的变权重系数计算方法,解决了综合指标劣化不均衡性问题。

## 1 动态评估指标体系的构建

电力变压器动态评估采用2层指标体系,其中,上层综合指标由反映电力变压器整体状态的功能劣化和部件故障类型组成,底层指标由与各综合指标有关联关系的试验与实时监测状态单项组成。

## 1.1 故障类型综合指标的确定

依据中国电力行业标准《油浸式变压器(电抗器)状态评价导则》,结合企业实际生产经验和已有的故障缺陷记录,同时参考了一些文献的研究成果<sup>[16-17]</sup>,本文归结提取了9种常见的电力变压器故障类型(见表1)作为综合故障状态指标。这些故障类型涵盖了电网企业综合信息平台实时监测电力变

表1 电力变压器动态评估综合指标

Table 1 Comprehensive indices for dynamic assessment of power transformer status variables

| 编号    | 综合指标   | 编号    | 综合指标  |
|-------|--------|-------|-------|
| $F_1$ | 绕组故障   | $F_6$ | 绝缘老化  |
| $F_2$ | 铁芯故障   | $F_7$ | 绝缘油劣化 |
| $F_3$ | 电流回路过热 | $F_8$ | 局部放电  |
| $F_4$ | 绝缘受潮   | $F_9$ | 油流放电  |
| $F_5$ | 电弧放电   |       |       |

收稿日期:2016-11-21;修回日期:2018-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71571101)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(71571101)

压器安全状态的功能诉求。

表1中各综合指标  $F_m (m=1, 2, \dots, 9)$  采用百分制评分值,评分值越低意味着该指标劣化越严重。综合指标评分值由与之关联的实时监测和例行试验状态量计算得出。由所有的综合指标评分值可计算出电力变压器整体安全状态的评分值,整体评分值越高则表明电力变压器的状态越好。

### 1.2 单项状态指标的确定

实时监测数据采样周期较短(常为天或周),不仅包含了电力变压器安全状态的最新信息,而且反映了该设备状态最近的变化趋势;例行试验数据采样周期较长(常为半年或更长),主要包含非工况条件下才能进行试验的状态项。两者结合可较全面地反映电力变压器的安全状态。实时评估应主要依据当前和邻近采样点的实时监测数据,同时也要考虑最近试验状态量数据。

电网企业综合信息平台常用的实时监测状态量集合  $R_1 = \{r_{1,1}, r_{1,2}, \dots, r_{1,10}\} = \{P(H_2), P(CO), P(CO_2), P(CH_4), P(C_2H_2), P(C_2H_4), P(C_2H_6), \text{总烃含量}, \text{铁芯接地电流}, \text{局部放电量}\}$  ( $P(\cdot)$  表示气体含量),采用 Apriori 算法可确定每个综合指标所关联的实时监测状态量。具体地,针对样本数据,将每个实时监测状态量的正常取值范围情况映射为0,否则为1;将综合指标故障状态设定为1,否则为0。依据布尔项集,设定最小支持度阈值,可计算出综合故障指标所对应的实时监测状态量的频繁项集见表2。

表2 综合指标所对应的实时监测状态量

Table 2 Comprehensive status indices and corresponding real-time monitoring status variables

| 综合指标  | 实时监测状态量                                  | 综合指标  | 实时监测状态量                                   |
|-------|------------------------------------------|-------|-------------------------------------------|
| $F_1$ | $\{r_{1,1}\}$                            | $F_6$ | $\{\}$                                    |
| $F_2$ | $\{r_{1,6}, r_{1,7}, r_{1,8}, r_{1,9}\}$ | $F_7$ | $\{\}$                                    |
| $F_3$ | $\{r_{1,2}, r_{1,3}, r_{1,6}, r_{1,8}\}$ | $F_8$ | $\{r_{1,1}, r_{1,4}, r_{1,8}, r_{1,10}\}$ |
| $F_4$ | $\{r_{1,1}\}$                            | $F_9$ | $\{r_{1,5}\}$                             |
| $F_5$ | $\{r_{1,1}, r_{1,5}, r_{1,10}\}$         |       |                                           |

基于电网企业的长期实际生产维护经验,并参考行业规程和导则,选择了例行试验状态量集合  $R_2 = \{r_{2,1}, r_{2,2}, \dots, r_{2,15}\} = \{\text{绝缘油介损}, \text{油中含水量}, \text{油击穿电压}, \text{绝缘电阻吸收比}, \text{极化指数}, \text{体积电阻率}, \text{油中含气量}, \text{纸板聚合度}, \text{绕组直流电阻互差}, \text{绕组短路阻抗初差值}, \text{绕组绝缘介损}, \text{绕组电容初差值}, \text{铁芯绝缘电阻}, \text{糠醛含量}, \text{中性点油流静电电流}\}$ ,例行试验状态量与综合指标的对应关系见表3。

表2和表3分别列出了  $R_1$  和  $R_2$  中的状态量与

表3 综合指标对应的例行试验状态量

Table 3 Comprehensive status indices and corresponding experimental status variables

| 综合指标  | 例行试验状态量                                                              |
|-------|----------------------------------------------------------------------|
| $F_1$ | $\{r_{2,9}, r_{2,10}, r_{2,11}, r_{2,12}\}$                          |
| $F_2$ | $\{r_{2,13}\}$                                                       |
| $F_3$ | $\{r_{2,9}\}$                                                        |
| $F_4$ | $\{r_{2,1}, r_{2,2}, r_{2,3}, r_{2,4}, r_{2,5}, r_{2,6}, r_{2,13}\}$ |
| $F_5$ | $\{r_{2,9}\}$                                                        |
| $F_6$ | $\{r_{2,1}, r_{2,6}, r_{2,7}, r_{2,8}, r_{2,11}, r_{2,14}\}$         |
| $F_7$ | $\{r_{2,1}, r_{2,2}, r_{2,3}, r_{2,6}, r_{2,7}, r_{2,13}\}$          |
| $F_8$ | $\{r_{2,2}, r_{2,7}, r_{2,9}\}$                                      |
| $F_9$ | $\{r_{2,1}, r_{2,6}, r_{2,7}, r_{2,15}\}$                            |

综合指标的对应关系,它们构成了电力变压器状态动态评估的指标体系。

### 1.3 单项状态指标量化分值计算

构造单项状态指标评分函数,既要区分例行试验和实时监测单项指标在反映电力变压器当前安全状态的时效性,又要考虑其状态量值本身的特点。另外,评分函数需要将单项状态量值归一化处理为百分制评分值。

#### 1.3.1 单项实时监测状态量化分值计算

假设单项实时监测状态量  $r_{1,i}$  在最近  $n+1$  个等间隔采样点的实时监测数据序列为向量  $(a_{i0}, a_{i1}, \dots, a_{in})^T$ , 其中  $a_{i0}$  和  $a_{in}$  分别为最近例行试验和实时评估时刻量值。根据设备安全维护的企业技术规程给出  $r_{1,i}$  的采样周期增长速率的注意值  $\sigma'_i$ 。定义

$$\sigma_{ik} = \begin{cases} \sigma'_i & (a_{ik} - a_{i(k-1)})/a_{i0} > \sigma'_i \\ 0 & a_{ik} - a_{i(k-1)} < 0 \\ (a_{ik} - a_{i(k-1)})/a_{i0} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

为  $r_{1,i}$  第  $k$  个周期的相对变化率。式(1)中,  $\sigma_{ik} = 0$  的情况可能由监测过程中各种随机扰动因素引起。本文中有:  $0 \leq \sigma_{ik} \leq \sigma'_i, k=1, 2, \dots, n$ 。

集合  $R_1$  中的单项实时监测状态量与电力变压器的安全状态负相关,即状态量值越大意味着电力变压器劣化越严重。在电力变压器运行过程中,实时监测状态量值达到注意值时,设备实际状况通常只是接近但还未进入“严重”状态管控等级。所构造的指标评分值函数应该把变量输入注意值映射到设备“异常”偏严重状态的评分值范围(参见下文的表4)。据此,可将指标评分值函数中的上限值参数  $a'_i$  设置为指标注意值的倍数。经过计算比较,定义上限值参数  $a'_i$  为企业技术规程中指标注意值的1.3倍。令  $a_0$  表示该设备投运时  $r_{1,i}$  的初始值,则  $r_{1,i}$  的评分函数  $v_i$  定义为:

$$v_i = \left[ (1 - \lambda_i) \frac{a'_i - a_{in}}{a'_i - a_0} + \lambda_i \max \left\{ \frac{\sigma'_i - \sigma_{i1}}{\sigma'_i}, \dots, \frac{\sigma'_i - \sigma_{ik}}{\sigma'_i}, \dots, \frac{\sigma'_i - \sigma_{in}}{\sigma'_i} \right\} \right] \times 100 \quad (2)$$

其中,  $\lambda_i$  用来刻画  $r_{1,i}$  的绝对变化率和最近最大变化率在计分中的相对重要性, 满足  $0 < \lambda_i < 1$ 。

式(2)中, 第1项考虑了  $r_{1,i}$  从设备投运到当前评估时间所累积的量值对电力变压器安全状态的影响, 包含了电力变压器的运行寿命状态信息; 第2项为  $r_{1,i}$  采样周期最大相对变化率, 提供了最近例行试验后的电力变压器状态最新变化信息。两者结合可较全面地反映电力变压器当前安全状态。例如, 如果油色谱中的总烃含量已接近注意值, 且出现了最近采样增长率(折合为月)超过10%的情况, 则可能意味着相应的综合状态劣化趋势很严重甚至已发生故障。

### 1.3.2 单项例行试验状态量化分值计算

单项例行试验数据尽管是若干采样周期之前获得的, 但它们对推断电力变压器当前的健康状况仍然很重要。令  $r_{2,i}$  最近例行试验值为  $b_i$ , 设备出厂交接时该项试验值为  $b_0$ 。

如果例行试验状态量值与电力变压器安全状态呈负相关, 则令  $b'_i$  为试验规程中该项指标注意值的1.3倍。这种情况下  $r_{2,i}$  的评分函数  $\bar{v}_i$  定义为:

$$\bar{v}_i = \begin{cases} \frac{b'_i - b_i}{b'_i - b_0} \times 100 & b_i \leq b'_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

如果例行试验状态量值与电力变压器安全状态正相关, 则令  $b'_i$  为试验规程中该项指标注意值的10/13。这种情况下  $r_{2,i}$  的评分函数  $\bar{v}_i$  定义为:

$$\bar{v}_i = \begin{cases} \frac{b_i - b'_i}{b_0 - b'_i} \times 100 & b_i \geq b'_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$R_2$  中,  $r_{2,1}、r_{2,2}、r_{2,7}、r_{2,9}、r_{2,10}、r_{2,11}、r_{2,12}、r_{2,14}、r_{2,15}$  中的评分值由式(3)计算得出, 其他例行试验状态量的评分值由式(4)计算得出。

### 1.4 单项状态量和综合状态量权重的确定

如何分配单项或综合状态量权重是实时状态评估的重要工作。对于单项实时监测状态量与例行试验状态量, 采用关联规则方法结合时效参数设置来计算其权重系数; 对于综合状态量, 引入变权重公式计算其权重系数。

#### 1.4.1 单项状态量权重系数计算

关联规则是数据挖掘中知识发现的重要方法之一, 它基于统计规律描述了事务数据库中项集的关联性<sup>[18]</sup>。记事务数据库为  $\Omega$ , 令  $|\Omega|$  为其包含事务子集的样本个数。若项集  $A$  和  $B$  满足  $A \subset \Omega$  和  $B \subset \Omega$ , 且  $A \cap B$  是空集, 则称形如  $A \Rightarrow B$  的公式为关联规则,  $A$  和  $B$  分别称为该关联规则的前件和后件(或前提和结论)。令  $f(A)$  和  $f(A \cup B)$  分别表示  $A$  和  $A \cup B$  在  $\Omega$  中出现的频数。

一般采用支持度和置信度刻画关联规则。支持

度定义为  $A \cup B$  在  $\Omega$  中所占的比例:

$$\sup(A \Rightarrow B) = P(A \cup B) = f(A \cup B) / |\Omega| \times 100\%$$

支持度是衡量关联规则  $A \Rightarrow B$  有效性的指标。支持度越大表示前件  $A$  和后件  $B$  之间的关联程度越高。

置信度由条件概率  $P(B|A)$  得到, 表示  $\Omega$  中包含  $A$  的同时包含  $B$  的项集所占的比例, 即:

$$\text{conf}(A \Rightarrow B) = P(B|A) = f(A \cup B) / f(A) \times 100\%$$

置信度表征了关联规则  $A \Rightarrow B$  的可信程度, 置信度越高, 意味着该关联规则的可信程度越高。

假设综合指标  $F_m$  对应的实时监测状态量集合(见表2)表示为  $\{s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mk'_m}\}$  ( $k'_m$  为  $F_m$  中实时监测状态量数量), 对应的例行试验状态量集合(见表3)表示为  $\{\bar{s}_{m1}, \bar{s}_{m2}, \dots, \bar{s}_{mk''_m}\}$  ( $k''_m$  为  $F_m$  中例行试验状态量数量)。为了利用关联规则方法来计算各单项状态量的权重, 需要定义事务数据库以及关联规则前件和后件:

$\Omega_m = \{\text{第 } m \text{ 个综合指标处于严重状态}\}$

$A_{m,i} = \{\text{第 } m \text{ 个综合指标的实时监测状态量 } s_{mi} \text{ 的 } a_{in} \text{ 与最大变化率超过注意值}\}$

$\bar{A}_{m,i} = \{\text{第 } m \text{ 个综合指标的试验项 } \bar{s}_{mi} \text{ 的 } b_i \text{ 超过注意值}\}$

$B_m = \{\text{第 } m \text{ 个综合指标的故障类型发生}\}$

针对每个综合指标, 计算每个单项状态量的关联规则置信度。实时监测状态  $s_{mi}$  与综合状态  $F_m$  的关联规则  $A_{m,i} \Rightarrow B_m$  置信度  $\rho_{mi}$  的计算公式为:

$$\rho_{mi} = \text{conf}(A_{m,i} \Rightarrow B_m) = P(B_m | A_{m,i}) = \frac{f(A_{m,i} \cup B_m)}{f(A_{m,i})} \times 100\% \quad (5)$$

试验状态量  $\bar{s}_{mi}$  与  $F_m$  的关联规则  $\bar{A}_{m,i} \Rightarrow B_m$  置信度  $\bar{\rho}_{mi}$  的计算公式为:

$$\bar{\rho}_{mi} = \text{conf}(\bar{A}_{m,i} \Rightarrow B_m) = P(B_m | \bar{A}_{m,i}) = \frac{f(\bar{A}_{m,i} \cup B_m)}{f(\bar{A}_{m,i})} \times 100\% \quad (6)$$

考虑到例行试验数据所获得的时间较早, 实时动态评估应更看重实时采集数据所包含的信息, 本文将2类状态量权重分别乘以系数  $\alpha_m$  和  $1 - \alpha_m$  分开计算, 这里  $0.5 \leq \alpha_m < 1$  (下文的计算实验中将确定该系数为实时评估时间的线性函数)。则利用关联规则置信度计算的  $s_{mi}$  权重系数为:

$$w_{mi} = \alpha_m \rho_{mi} / \sum_{j=1}^{k'_m} \rho_{mj} \quad (7)$$

其中,  $m = 1, 2, \dots, 9; i = 1, 2, \dots, k'_m$ 。

同理可计算  $\bar{s}_{mi}$  的权重系数为:

$$\bar{w}_{mi} = (1 - \alpha_m) \bar{\rho}_{mi} / \sum_{j=1}^{k_m''} \bar{\rho}_{mj} \quad (8)$$

其中,  $m=1,2,\dots,9; i=1,2,\dots,k_m''$ 。由于综合指标  $F_6$  和  $F_7$  只有关联的例行试验状态量,该特殊情况下,只需计算例行试验状态量的权重系数,相当于在式(7)和(8)中令  $\alpha_m = 0$ 。

#### 1.4.2 综合状态量权重系数计算

综合指标描述了电力变压器部件或功能方面的健康状况,直接决定了设备整体运行状态的评价结果。令  $x_m$  表示综合指标  $F_m$  的评分值,由实时监测和例行试验状态量对其进行计算:

$$x_m = \sum_{i=1}^{k_m'} w_{mi} v_i + \sum_{i=1}^{k_m''} \bar{w}_{mi} \bar{v}_i \quad (9)$$

其中,  $m=1,2,\dots,9$ 。

由于综合状态评分具有相对独立性,电力企业在评价电力变压器整体状态时常赋予相同权重系数  $w_m = 1/m$  来计算总分。当电力变压器各部件或功能状态相对均衡时,该方法具有合理性,但其缺点也是明显的。由于部件技术质量、地域气候环境及维护等内外部诸多因素影响,运行中的电力变压器各部件或功能劣化程度会出现不均衡现象。如果某一部件功能劣化较严重甚至出现故障时,应该加大该综合状态的权重和减少其他状态量的权重来反映变压器的整体真实运行状态。根据因素空间理论<sup>[19]</sup>,本文引入变权公式来构造变压器综合指标  $F_m$  的变权重系数如下:

$$w'_m = \frac{w_m}{x_m} \sum_{i=1}^9 \frac{w_i}{x_i} \quad (10)$$

其中,  $m=1,2,\dots,9$ 。由式(10)可以看出,当某个综合状态评分低于其他综合状态评分时,其权重系数会变大而其他综合状态的权重变小,从而使电力变压器整体评分比常权重情况更低。

## 2 电力变压器状态动态评估步骤

根据所构建的评估指标体系,运用状态项评分及权重计算方法进行电力变压器状态的实时动态评估步骤如下。

**a.** 由企业信息系统平台导出运行环境相近的同类型电力变压器历史样本数据库  $\Pi$ , 每个样本包括  $R_1$  和  $R_2$  中的单项状态量数据、电力变压器状态及其综合指标记录信息。

**b.** 从  $\Pi$  中抽取故障样本数据库  $\Omega_m$ , 通过 Apriori 算法来选择对应每个综合指标的实时监测状态量。分别计算实时监测状态量  $\rho_{mi}$  和例行试验状态量的关联规则置信度  $\bar{\rho}_{mj}$  ( $m=1,2,\dots,9; i=1,2,\dots,k_m'; j=1,2,\dots,k_m''$ )。

**c.** 使用数据库  $\Pi$ , 由实验计算设置参数  $\lambda_i$  和  $\alpha_m$  ( $i=1,2,\dots,10; m=1,2,\dots,9$ )。

**d.** 就拟评估的电力变压器,抽取其实时监测和最近试验状态量数据。由式(2)~(4)计算状态量的评分值,由式(7)、(8)分别计算权重系数  $w_{mi}$ 、 $\bar{w}_{mi}$ 。

**e.** 由式(9)计算综合指标  $F_m$  的评分值  $x_m$  ( $m=1,2,\dots,9$ )。

**f.** 设  $w_m = 1/9$ , 将步骤 **e** 中计算的综合状态评分值  $x_m$  代入式(10)计算综合状态  $F_m$  的变权重系数  $w'_m$  ( $m=1,2,\dots,9$ )。

**g.** 根据  $x_m$  和  $w'_m$ , 计算电力变压器状态的评分值

$V(x_1, \dots, x_m) = \sum_{m=1}^9 w'_m x_m$ , 然后对照表4判断电力变压器的当前状态。如果有必要,还可结合综合指标分值进一步定位故障部件和采取相应的维护措施。

表4 电力变压器运行状态与评分值的对应关系

Table 4 Relationship between scores and operational status of power transformer

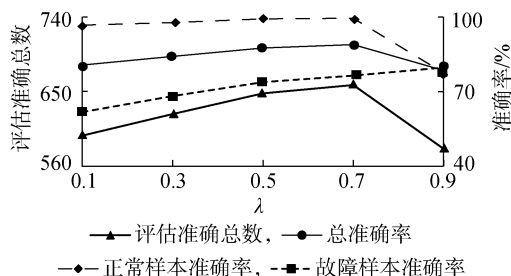
| 运行状态 | 评分值    | 运行状态 | 评分值   |
|------|--------|------|-------|
| 正常   | 81~100 | 异常   | 21~40 |
| 注意   | 61~80  | 严重   | 0~20  |
| 轻微   | 41~60  |      |       |

## 3 计算实验

本文选取了西南某省电网企业运行环境相近的 500 kV 油浸式变压器样本 980 个,处于严重状态和其他状态的样本数量各占一半,其中 740 个样本作为内样本用于确定算法参数和权重系数,240 个样本作为外样本用来检验评估方法的有效性;实时监测向量维数长度大致满足区间  $[1, 24]$  上的一致均匀分布(因采样以周为单位,例行试验周期为半年)。

### 3.1 参数的选取

实时监测状态量评分函数中的参数  $\lambda_i$  用于刻画指标绝对与相对变化速率不同的重要性。为便于进行实验计算,假设所有  $\lambda_i$  取相同值,记为  $\lambda$ 。为了减少计算量,使用 740 个外样本中,每个样本随机均等选取 1 个实时监测状态量数据和与之对应的综合指标状态,计算该项函数评分值。如果评分值不高于 20 分且记录的综合指标为严重状态,或评分值高于 20 分且记录的综合指标为非严重状态,则认为  $\lambda$  取值合适。 $\lambda$  取值合适的样本数量占用于计算的样本总数的比例,称为  $\lambda$  取该值的准确率。 $\lambda$  取 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 的计算结果如图 1 所示。由图可见,  $\lambda=0.7$  时,准确率最高。因此,下文评估方法中  $\lambda=0.7$ 。

图1 不同 $\lambda$ 下的准确率Fig.1 Accuracy rate under different values of  $\lambda$ 

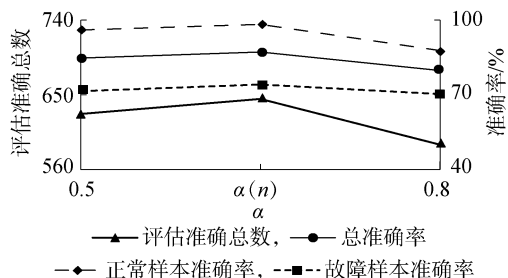
在评估电力变压器的实时状态时,式(7)、(8)中的参数 $\alpha_m$ 的不同取值反映了实时监测和例行试验数据重要性的不同。为计算简便,假设所有的 $\alpha_m$ 取值相同,记为 $\alpha$ 。选取以下情况进行计算实验对比:

a.  $\alpha = 0.5$ ,表示实时监测状态量数据和例行试验项状态量数据额重要性相同;

b.  $\alpha = 0.8$ ,表示更看重实时监测状态量数据;

c.  $\alpha(n) = 0.5 + 0.05n/4$  (其中自变量 $n$ 为评估时刻的采样点序号, $n$ 不大于24周),以线性函数 $\alpha$ 刻画试验时间越早,评估越看重实时监测状态量数据。

和 $\lambda$ 的实验计算方法相似,可通过电力变压器样本状态与总评分对应关系定义 $\alpha$ 取值的评估准确率。3种情况的计算结果如图2所示。由图2可看出,情况c可使得所计算的权重系数更好地反映电力变压器的整体状态,所以下文中令 $\alpha(n) = 0.5 + 0.05n/4$ 。

图2 不同 $\alpha$ 下的准确率Fig.2 Accuracy rate under different values of  $\alpha$ 

### 3.2 运行实例计算

以1台500 kV油浸式变压器为例说明本文方法的计算过程。该变压器2010年1月投运,2015年6月份进行了例行停运预试验维护,随后的第9周对该变压器状态进行实时动态评估。

该电力变压器的例行试验状态量、实时监测状态量数据及静态数据分别如表5和表6所示,表6中,表头第2行的1—9对应第1—9周。

从740个样本数据库 $\Pi$ 中抽取故障样本库 $\Omega_m$ ,其中共包含370个样本。基于最小支持度70%,确定与综合指标关联的底层量化指标,并计算置信度 $\rho_{mi}$ 和 $\bar{\rho}_{mj}$ 如表7所示。根据3.1节的实验计算结果选取 $\lambda = 0.7$ ;由 $n = 9$ 得, $\alpha(n) = 0.5 + 0.05n/4 = 0.6125$ 。计算待评估电力变压器的 $w_{mi}$ 和 $\bar{w}_{mi}$ 如表7所示。计算待评估电力变压器单项状态指标评分值,结果如表8所示。计算综合状态指标评分值和变权重系数,结果如表9所示。

表5 例行试验状态量数据和静态数据

Table 5 Experimental status variables and corresponding static data

| 例行试验状态量                     | 实测值                   | 初始值                   | 注意值                  |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 绝缘油介损/%                     | 0.38                  | 0.36                  | 2.0                  |
| 油中含水量/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 2.3                   | 1.2                   | 15                   |
| 油击穿电压/kV                    | 69                    | 71                    | 50                   |
| 绝缘电阻吸收比                     | 1.92                  | 2.0                   | 1.3                  |
| 极化指数                        | 2.35                  | 2.5                   | 1.5                  |
| 体积电阻率/(Ω·m)                 | 4.43×10 <sup>11</sup> | 4.46×10 <sup>11</sup> | 1.0×10 <sup>10</sup> |
| 油中含气量/%                     | 1.1                   | 1.0                   | 3.0                  |
| 纸板聚合度                       | 900                   | 1 000                 | 250                  |
| 绕组直流电阻互差/%                  | 1.89                  | 0.16                  | 2.0                  |
| 绕组短路阻抗初差/%                  | 2.6                   | 1.0                   | 3.0                  |
| 绕组绝缘介损/%                    | 0.51                  | 0.12                  | 0.6                  |
| 绕组电容量初差/%                   | 4.5                   | 1.0                   | 5.0                  |
| 铁芯绝缘电阻/MΩ                   | 1 000                 | 1 000                 | 500                  |
| 糠醛含量/(mg·L <sup>-1</sup> )  | 0.03                  | 0                     | 4.0                  |
| 中性点油流静电电流/μA                | 0.030                 | 0.023                 | 1.0                  |

表6 实时监测状态数据及静态数据

Table 6 Real-time monitoring status variables and corresponding static data

| 实时监测状态量                          | 初始值   | 注意值   | 实测值   |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                  |       |       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| $P(H_2)/(\mu L \cdot L^{-1})$    | 6.0   | 150   | 39    | 43    | 52    | 47    | 46    | 55    | 53    | 47    | 56    |
| $P(CO)/(\mu L \cdot L^{-1})$     | 21.5  | 350   | 100   | 101   | 103   | 107   | 88    | 95    | 172   | 75    | 192   |
| $P(CO_2)/(\mu L \cdot L^{-1})$   | 267.5 | 2 500 | 960   | 1 021 | 1 033 | 989   | 857   | 937   | 1 094 | 1 336 | 1 938 |
| $P(C_2H_2)/(\mu L \cdot L^{-1})$ | 0     | 1.0   | 0.51  | 0.55  | 0.78  | 0.63  | 0.70  | 0.72  | 0.77  | 0.82  | 1.03  |
| $P(CH_4)/(\mu L \cdot L^{-1})$   | 0.99  | 120   | 66    | 71    | 76.4  | 82.5  | 89    | 97    | 105   | 113   | 122   |
| $P(C_2H_4)/(\mu L \cdot L^{-1})$ | 0.29  | 50    | 29    | 31    | 32.4  | 35    | 37.7  | 40.6  | 43.8  | 47.2  | 51    |
| $P(C_2H_6)/(\mu L \cdot L^{-1})$ | 0.55  | 65    | 36    | 38.9  | 41.8  | 45.1  | 48.6  | 52.5  | 56.7  | 61.2  | 66    |
| 总烃含量/(μL·L <sup>-1</sup> )       | 2.5   | 150   | 131.7 | 141.7 | 151.4 | 163.4 | 176.2 | 191.0 | 206.5 | 222.4 | 240.0 |
| 铁芯接地电流/mA                        | 10    | 100   | 15    | 21    | 21    | 17    | 16    | 17    | 20    | 21    | 18    |
| 局部放电量/pC                         | 26.5  | 500   | 88    | 119   | 98    | 91    | 172   | 222   | 271   | 263   | 365   |

表 7 关联规则置信度和状态量权重系数  
Table 7 Confidence coefficients of association rules  
and weight coefficients of status variables

| 综合指标  | 量化指标       | 置信度     | 权重系数    |
|-------|------------|---------|---------|
| $F_1$ | $r_{1,1}$  | 0.260 1 | 0.125 9 |
|       | $r_{2,9}$  | 0.421 0 | 0.130 1 |
|       | $r_{2,10}$ | 0.961 9 | 0.300 3 |
|       | $r_{2,11}$ | 0.457 0 | 0.141 3 |
|       | $r_{2,12}$ | 0.978 4 | 0.302 4 |
| $F_2$ | $r_{1,6}$  | 0.402 3 | 0.144 4 |
|       | $r_{1,7}$  | 0.698 5 | 0.257 0 |
|       | $r_{1,8}$  | 0.421 3 | 0.155 0 |
|       | $r_{1,9}$  | 0.960 8 | 0.353 5 |
|       | $r_{2,13}$ | 0.377 0 | 0.090 1 |
| $F_3$ | $r_{1,2}$  | 0.877 7 | 0.336 8 |
|       | $r_{1,3}$  | 0.901 6 | 0.350 1 |
|       | $r_{1,6}$  | 0.379 4 | 0.145 6 |
|       | $r_{1,8}$  | 0.213 4 | 0.081 8 |
|       | $r_{2,9}$  | 0.353 0 | 0.085 7 |
| $F_4$ | $r_{1,1}$  | 0.252 5 | 0.096 2 |
|       | $r_{2,1}$  | 0.234 7 | 0.081 4 |
|       | $r_{2,2}$  | 0.367 5 | 0.096 2 |
|       | $r_{2,3}$  | 0.506 6 | 0.132 6 |
|       | $r_{2,4}$  | 0.933 7 | 0.249 5 |
|       | $r_{2,5}$  | 0.919 2 | 0.240 7 |
|       | $r_{2,6}$  | 0.193 3 | 0.050 6 |
|       | $r_{2,13}$ | 0.277 9 | 0.072 8 |
|       |            |         |         |
| $F_5$ | $r_{1,1}$  | 0.263 8 | 0.164 7 |
|       | $r_{1,5}$  | 0.527 1 | 0.328 9 |
|       | $r_{1,10}$ | 0.496 2 | 0.318 4 |
|       | $r_{2,9}$  | 0.355 6 | 0.188 0 |
| $F_6$ | $r_{2,1}$  | 0.269 1 | 0.081 7 |
|       | $r_{2,6}$  | 0.292 0 | 0.088 6 |
|       | $r_{2,7}$  | 0.287 1 | 0.087 1 |
|       | $r_{2,8}$  | 0.958 1 | 0.297 7 |
|       | $r_{2,11}$ | 0.508 6 | 0.154 4 |
|       | $r_{2,14}$ | 0.933 3 | 0.290 5 |
| $F_7$ | $r_{2,1}$  | 0.244 7 | 0.133 3 |
|       | $r_{2,2}$  | 0.279 0 | 0.169 4 |
|       | $r_{2,3}$  | 0.449 3 | 0.255 2 |
|       | $r_{2,6}$  | 0.241 6 | 0.137 3 |
|       | $r_{2,7}$  | 0.222 9 | 0.126 3 |
|       | $r_{2,13}$ | 0.313 4 | 0.190 5 |
| $F_8$ | $r_{1,1}$  | 0.216 8 | 0.080 8 |
|       | $r_{1,4}$  | 0.869 2 | 0.324 0 |
|       | $r_{1,8}$  | 0.645 3 | 0.240 5 |
|       | $r_{1,10}$ | 0.450 4 | 0.166 8 |
|       | $r_{2,2}$  | 0.313 3 | 0.073 9 |
|       | $r_{2,7}$  | 0.219 0 | 0.051 6 |
| $F_9$ | $r_{2,9}$  | 0.264 7 | 0.062 4 |
|       | $r_{1,5}$  | 0.415 2 | 0.234 5 |
|       | $r_{2,1}$  | 0.228 3 | 0.075 7 |
|       | $r_{2,6}$  | 0.262 6 | 0.087 5 |
|       | $r_{2,7}$  | 0.233 0 | 0.077 6 |
|       | $r_{2,15}$ | 0.969 6 | 0.524 7 |

表 8 单项状态量评分值  
Table 8 Scores of status variables

| 评分函数           | 评分函数值 | 评分函数           | 评分函数值 |
|----------------|-------|----------------|-------|
| $\bar{v}_1$    | 98.8  | $\bar{v}_{14}$ | 99.3  |
| $\bar{v}_2$    | 92.0  | $\bar{v}_{15}$ | 99.6  |
| $\bar{v}_3$    | 90.5  | $v_1$          | 65.3  |
| $\bar{v}_4$    | 88.6  | $v_2$          | 48.1  |
| $\bar{v}_5$    | 85.0  | $v_3$          | 25.2  |
| $\bar{v}_6$    | 99.3  | $v_4$          | 4.8   |
| $\bar{v}_7$    | 95.0  | $v_5$          | 3.0   |
| $\bar{v}_8$    | 86.7  | $v_6$          | 5.7   |
| $\bar{v}_9$    | 6.0   | $v_7$          | 5.7   |
| $\bar{v}_{10}$ | 20.0  | $v_8$          | 6.2   |
| $v_{11}$       | 18.8  | $v_9$          | 91.1  |
| $\bar{v}_{12}$ | 12.5  | $v_{10}$       | 28.5  |
| $\bar{v}_{13}$ | 100   |                |       |

表 9 综合指标评分值和变权重系数  
Table 9 Scores of comprehensive status indices and  
varying weights

| 综合指标  | 评分值  | 变权重系数   | 综合指标  | 评分值  | 变权重系数   |
|-------|------|---------|-------|------|---------|
| $F_1$ | 21.4 | 0.195 5 | $F_6$ | 82.7 | 0.056 7 |
| $F_2$ | 44.5 | 0.103 5 | $F_7$ | 95.3 | 0.038 8 |
| $F_3$ | 26.9 | 0.148 4 | $F_8$ | 19.3 | 0.181 1 |
| $F_4$ | 88.1 | 0.041 6 | $F_9$ | 76.8 | 0.049 3 |
| $F_5$ | 23.3 | 0.185 1 |       |      |         |

$x_9$ ) = 36.41。比照表 4 可知,变压器当前处于“异常”运行状态。由表 9 可知,综合指标电流回路过热  $F_3$ 、电弧放电  $F_5$  和局部放电  $F_8$  的评分值都非常低,推断待评估电力变压器可能发生了过热和高能放电。绕组故障  $F_1$  的评分值为 21.4,在所有部件综合指标中评分值最低,推断待评估电力变压器的故障部位很有可能是绕组。对该电力变压器进行停运吊芯检查后发现,其绕组引流线焊接不良导致了部分截面有烧蚀痕迹,经重新焊接后该电力变压器恢复正常运行。

3.3 动态评价结果分析

为验证本文评估方法有效性,使用了 240 个外样本进行计算实验,若所计算的评分值对应着电力变压器状态所规定的分值区间,则该方法评估正确。传统方法对例行试验状态量或实时监测状态量均只采用类似式(3)、(4)的方法进行评分,且不考虑时效性权重(相当于设  $\alpha_m = 0.5$ )。将传统评分模式结合综合指标变权重计算的方法称为“传统方法”。如果考虑了数据时效性但仍采用综合指标常权重计算,称之为“常权重方法”。本文方法、传统方法和常权重方法的计算结果如表 10 所示。

从表 10 可以得出以下结论。

a. 本方法评估总正确率高达 92.1%,说明其能够较准确评估电力变压器实时运行状态。

b. 与传统方法相比,时效评分函数与时变参数权重配置方法对提高评估正确率收到良好效果;与常权重方法相比,因实时评估仍然需要合理处理综合

最后可计算出变压器状态总评分值  $V(x_1, \dots,$

表10 本文方法和其他方法的计算结果比较

Table 10 Comparison of computational results among proposed method and other methods

| 样本    | 样本个数 | 正确评估数 |      |       | 正确率/% |      |       |
|-------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|
|       |      | 本文方法  | 传统方法 | 常权重方法 | 本文方法  | 传统方法 | 常权重方法 |
| 正常样本  | 120  | 115   | 113  | 115   | 95.8  | 94.2 | 95.8  |
| 单故障样本 | 84   | 75    | 63   | 59    | 89.3  | 75.0 | 70.2  |
| 多故障样本 | 36   | 31    | 25   | 21    | 86.1  | 69.4 | 58.3  |
| 总计    | 240  | 221   | 201  | 195   | 92.1  | 83.8 | 81.3  |

指标劣化程度不均衡问题,引入变权重公式也很重要。

c. 本方法的优点更体现在对变压器故障状态的实时评估上。原因是当故障发生时,数据信息时效差异性更明显且综合指标均衡性变差,使得本方法特点更加凸显,从而取得较好的评估结果。

#### 4 结论

本文构建了电力变压器状态实时动态评估指标体系。在此基础上,区分对待试验和实时监测状态数据构造了具有不同结构与数据维度的评分函数,旨在充分挖掘数据信息时效特征来反映电力变压器实时状态。融合关联规则置信度和时变参数设计的单项状态量权重计算,可有效利用同类型电力变压器样本数据的统计规律,避免了以往权重分配上过分依赖专家主观经验的问题。通过引入变权重计算公式,解决了综合指标劣化程度不同所导致的电力变压器状态评估失真问题。所提出的方法具有良好的客观性和科学性。计算实验表明,所提评估方法具有较高的正确率,适于用来实时动态评估电力变压器运行状态。

#### 参考文献:

- [1] 谢善益,杨强,梁成辉,等. 输变电设备远程诊断信息平台中的统一状态监测模型研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(11):86-91.  
XIE Shanyi, YANG Qiang, LIANG Chenghui, et al. Research of unified condition monitoring information model in data platform of power transmission equipment remote monitoring and diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 86-91.
- [2] 孙才新. 输变电设备状态在线监测预诊断技术现状和前景[J]. 中国电力,2005,38(2):1-7.  
SUN Caixin. Present situation and development of condition on-line monitoring and diagnosis technology for power transmission and transformation equipment[J]. Electric Power, 2005, 38(2): 1-7.
- [3] 赵婉芳,王慧芳,邱剑,等. 基于油色谱监测数据的变压器动态可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(22):38-42.  
ZHAO Wanfang, WANG Huifang, QIU Jian, et al. Analysis of dynamic reliability of transformer based on monitoring data of oil chromatography[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38

(22):38-42.

- [4] 宋斌,刘志雄,李恩文,等. DGA 中三比值缺码研究初探[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):60-65.  
SONG Bin, LIU Zhixiong, LI Enwen, et al. Preliminary study of undefined three-ratio code in DGA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 60-65.
- [5] 宋志杰,王健. AI 优化模糊核聚类算法的变压器 DGA 分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(4):39-43.  
SONG Zhijie, WANG Jian. Transformer DGA analysis based fuzzy kernel clustering algorithm optimized by artificial immune[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(4): 39-43.
- [6] 杨廷方,刘沛,李景禄,等. FCM 结合 IEC 三比值法诊断变压器故障[J]. 高电压技术,2007,33(8):66-70.  
YANG Tingfang, LIU Pei, LI Jinglu, et al. New fault diagnosis method of power transformer by combination of FCM and IEC three-ratio method[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 66-70.
- [7] KHMAIS B, SEIFEDDINE S. Power transformer fault diagnosis based on dissolved gas analysis by support vector machine[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 83(1):73-79.
- [8] 石少伟,王可,陈力,等. 基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别和预警[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):60-66.  
SHI Shaowei, WANG Ke, CHEN Li, et al. Power transformer status evaluation and warning based on fuzzy comprehensive evaluation and Bayes discrimination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 60-66.
- [9] 程声烽,程小华,杨露. 基于改进粒子群算法的小波神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(19):37-42.  
CHENG Shengfeng, CHENG Xiaohua, YANG Lu. Application of wavelet network with improved particle swarm optimization algorithm in power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 37-42.
- [10] 薛浩然,张珂珩,李斌,等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(8):8-13.  
XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of power transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.
- [11] FEI Shengwei, ZHANG Xiaobin. Fault diagnosis of power transformer based on support vector machine with genetic algorithm[J]. Expert Systems with Application, 2009, 36(8):11352-11357.
- [12] 李建坡,赵继印,郑蕊蕊,等. 基于灰靶理论的电力变压器状态评估方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2008,38(1):201-205.  
LI Jianpo, ZHAO Jiyin, ZHENG Ruirui, et al. A grey target theory based on method for state assessment of power transformer[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2008, 38(1): 201-205.
- [13] 李刚,于长海,范辉,等. 基于多级决策融合模型的电力变压器故障深度诊断方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):138-144.  
LI Gang, YU Changhai, FAN Hui, et al. Deep fault diagnosis of power transformer based on multilevel decision fusion model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 138-144.
- [14] LEE L, XIE L J, DENG Z, et al. Condition assessment of power transformers using a synthetic analysis method based on association rule and variable weight coefficients[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6):2052-2060.
- [15] LEE L, CHENG Yong, XIE Longjun, et al. An integrated method of set pair analysis and association rule for fault diagnosis of power

transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2368-2378.

- [16] 李黎,张登,谢龙君,等. 采用关联规则综合分析和变权重系数的电力变压器状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 152-159.

LI Li, ZHANG Deng, XIE Longjun, et al. A condition assessment method of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 152-159.

- [17] 谢龙君,李黎,程勇,等. 融合集对分析和关联规则的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 277-286.

XIE Longjun, LI Li, CHENG Yong, et al. A fault diagnosis method of power transformers by integrated set pair analysis and association rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 277-286.

- [18] WITTEN I H, FRANK E, HALL M A. 数据挖掘[M]. 李川,张永辉,译. 北京:机械工业出版社, 2014.

- [19] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58-64.

LIU Wenqi. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. Systems Engineering: Theory and Practice, 1997, 17(4): 58-64.

#### 作者简介:



孙 鹏

孙 鹏(1972—),男,云南昆明人,高级工程师,博士,主要从事电力设备故障诊断及技术管理工作,技术方向为输变电设备状态评估、运维及检修(E-mail: ynspl@163.com);

黄绪勇(1974—),男,云南昆明人,高级工程师,博士,主要从事电力设备状态监测及评估、电力大数据应用分析等研究(E-mail: 15504024@qq.com);

耿苏杰(1990—),女,江苏邳州人,博士研究生,主要从事输变电设备数据挖掘算法研究(E-mail: gengsj0110@126.com);

王秀利(1966—),男,河北邱县人,教授,博士研究生导师,主要从事生产调度与数据挖掘方法等方面的研究(E-mail: wangdu0816@163.com)。

## Dynamic assessment of power transformer status based on real-time monitoring and experimental data

SUN Peng<sup>1</sup>, HUANG Xuyong<sup>1</sup>, GENG Sujie<sup>2</sup>, WANG Xiuli<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Company Limited, Kunming 650217, China;

2. School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Considering the difference and complementarity between reflecting the current status of power transformers through on-line monitoring and preventive test data, a dynamic assessment method of power transformer status is proposed. Based on a dynamic index evaluation system, the timeliness-based score function is presented for each status variable. Meanwhile, based on the history samples and dynamic assessment time, the weights of the score functions are calculated by the combination of confidence of association rules and time-varying parameters. The weight varying formulas are introduced to balance the uneven degradation levels of comprehensive status indices. Results of experimental data show that the correct rate of the proposed method is 92.1%.

**Key words:** power transformers; status assessment; dynamic status assessment; data timeliness; association rule; varying weight

(上接第 209 页 continued from page 209)

龚 鸿(1992—),男,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电(E-mail: xinyuescuedu@163.com);

王 媛(1994—),女,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电(E-mail: yuanwang\_de@163.com)。

## Novel snubber circuit for load commutation switch of hybrid HVDC breaker

LIU Chengzhuo, WANG Yuhong, GONG Hong, WANG Yuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A novel snubber circuit for LCS (Load Commutation Switch) is proposed based on the principle of the hybrid HVDC (High Voltage Direct Current) breaker. Through the simple control of two IGBTs, the snubber circuit can protect the snubber capacitor from being discharged through UFD (Ultra Fast Disconnecter) when breaker opening, and ensure that the snubber circuit has an effective absorption of overvoltage for the hybrid HVDC breaker's several actions in a short period of time, which improves the quickness and reliability of the hybrid HVDC breaker.

**Key words:** hybrid HVDC breaker; load commutation switch; snubber circuit; flexible HVDC power transmission; Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT)