

换流变压器状态评价方法研究

肖 屏,王渝红,张 彪

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要: 针对换流变压器结构复杂、难以对其进行精确状态评价的问题,提出了一种基于 DHGF 算法的换流变压器状态评价方法,建立了相应的评价指标集及对应的组合权重,给出了相关的白化权函数、权矩阵和评判矩阵,构建了完整的数学模型。运用 DHGF 算法对换流变压器的运行状态进行实例分析,得到了评估对象的状态等级和评分值。评价结果能较好地反映设备的实际状况,可为下一步的检修决策提供科学依据。

关键词: 换流变压器; 状态评价; DHGF 算法; 白化权函数; 状态等级

Abstract: Aiming at the problems that the condition of converter transformer is complex and difficult to be evaluated accurately, a condition evaluation method for converter transformer based on DHGF algorithm is proposed. The evaluation index sets and the corresponding weights for converter transformer are established. The whitening weight function, the weight matrix and the evaluation matrix are provided. The complete mathematical model is established too. The real condition of a converter transformer is analyzed by using DHGF method, the condition level and the exact score are obtained. The results can reflect the real condition of a converter transformer, which can provide scientific basis for the future maintenance strategy.

Key words: converter transformer; condition evaluation; DHGF algorithm; whitening weight function; condition level

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)03-0037-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.009

0 引 言

随着电网朝着大容量、特高压和跨区域方向发展,电网的规模不断地扩大,设备的数量也不断地增加^[1]。设备故障或盲目检修而引起的停运会给电力系统的安全可靠运行带来隐患,这就需要对电力设备的运行状况进行可靠评价。以设备的运行状况为基础的状态检修方式可以避免传统检修方式的某些不足。

换流变压器作为高压直流输电系统中重要电气设备,其运行可靠性与电力系统的安全稳定紧密相关。换流变压器的状态检修过程中,一个最为关键的环节就是对当前设备的运行状况进行综合评价,确定设备的状态水平,为设备进行检修决策提供依据^[2]。

目前,可用于换流变压器状态评价的方法很多,如模糊综合评价方法^[3-6]、人工智能方法^[7]、灰色关联分析法^[8-11]、熵权和多级物元分析法^[12]等。其中,文献[3-6]提出的模糊综合评价方法通过精确的数学方法能够对换流变压器进行科学、合理的量

化评价,但评价指标非全备时容易导致不相容的评价结果,且计算较复杂;文献[8-11]提出的灰色关联分析法较适用于“外延明确,内涵不明确”的小样本指标参数的设备状态评价,能够用较少的指标信息去反映设备真实的状态,是其他方法所不能比拟的;文献[12]提出的物元分析方法可有效地用于状态指标具有多样性的设备的状态评价,能够把“质”和“量”有效地结合,解决评价结果不相容问题,提高设备状态评价的精确性。

由于表征换流变压器状态的指标参数具有多层次、非全备性且存在不确定性的特点,单一采用上述的评价方法进行评价的结果不是很理想。综合前面所述方法的成功之处,提出了一种基于 DHGF 算法的状态评价方法。DHGF 算法是将改进的德尔斐法(Delphi)、层次分析法(analytic hierarchy process)、灰色聚类法(grey clustering method)、模糊综合评判法(fuzzy comprehensive judgment)集合而成的一种新的算法^[13]。它在航空航天、通信等领域得到了很好的应用,能够准确地评价设备的健康状况。

下面介绍了 DHGF 算法的基本理论,构建了换流变压器的 DHGF 数学模型,最后通过实例验证了

DHGF 评价方法可用于换流变压器的状态评价,且计算结果能够很好地反映设备的实际状态。

1 DHGF 算法理论

DHGF 算法的理论基础是美国控制论学者查德提出的模糊数学、邓聚龙教授提出的灰色理论、钱学森教授提出的从定性到定量的综合集成方法以及顾基发教授提出的物理 - 事理 - 人理 (WSR) 分析法^[14,15]。

德尔斐法是一种采用匿名方式进行对象分析的统计方法,它已经在预测领域以及各种评价指标体系的建立和具体指标的确定等得到了应用。层次分析法是应用系统理论和多目标综合评价方法而进行定性和定量分析的一种权重决策分析方法。灰色系统理论是从信息的非完备性出发研究和处理复杂系统的理论,在系统数据较少和条件不满足统计要求的情况下,更具有较强的适用性^[16]。模糊数学是一种处理和加工模糊信息的数学工具,它用数学的方法抽象描述模糊现象,揭示模糊现象的本质和规律^[17]。

利用德尔斐法、层次分析法、灰色理论分析法、模糊评判法集成的 DHGF 算法用于设备状态评价的流程图如图 1 所示。

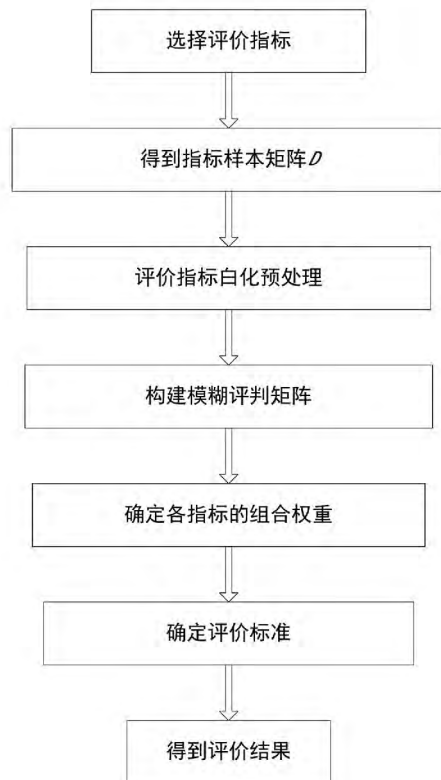


图 1 基于 DHGF 算法的评价流程图

2 换流变压器的 DHGF 数学模型

2.1 评价指标的选择

通过采用德尔斐法对换流变压器进行统计分析以及查询现行规程规定,分析专家的意见,归纳出反映换流变压器运行状况的可靠指标共有 15 个,如图 2 所示,主要分为家族缺陷 u_1 、试验项目 u_2 、检修记录 u_3 、运行工况 u_4 以及缺陷记录 u_5 等五大类。这些评价指标从设备本身、试验和运行等方面全面反映了换流变压器的绝缘寿命的老化情况、内部健康状况、电气或机械特性,并从纵向和横向分析其是否存在历史遗留问题及家族缺陷。由于反映换流变压器的状态的指标参数比较多,为了分析方便,采用塔式结构的层次指标体系,使得能够较容易地把握各指标间的关系。所建立的状态评价指标体系为一个 3 层的层次结构,包括 5 个一级评价指标,各个一级指标里面又包括若干个二级指标。

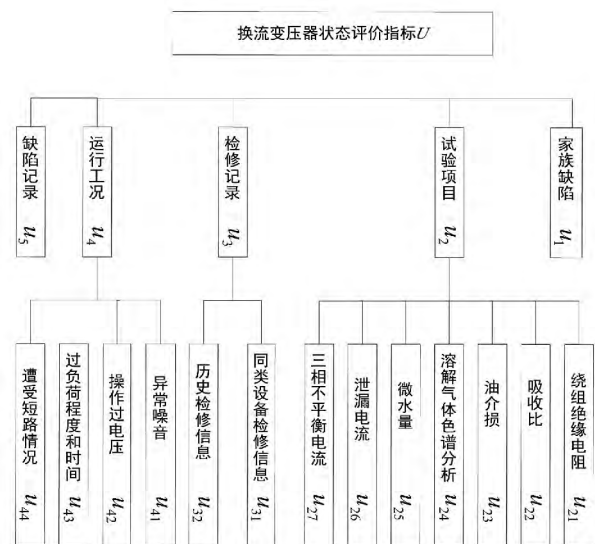


图 2 换流变压器状态评价的指标体系

结合检修过程中收集到关于换流变压器的评价指标的状态信息,邀请 m 位专家对换流变压器的 n 个评价指标进行评估,将全部专家对所评估对象的评价数据构成一个样本矩阵 D ,其中 d_{mn} 表示第 m 个专家对第 n 个评价指标给予的分值,即

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

2.2 评价指标的白化预处理

评价指标的白化预处理需要构建相应的白化权函数来定量的描述评估对象所属某个灰类的程度。依据灰色理论,确定白化权函数的同时需要确定评价灰类的等级数、灰类的灰数^[18]。根据换流变压器的劣化程度,这里设定评估灰类为4个等级,即正常、注意、异常、严重,灰类的灰数 $j=1, 2, 3, 4$ 。设备的状态评价若以10分制评价级为标准,则可以得到相应的白化权函数。

第1灰类“正常”,灰类 $j=1$,灰数 $\oplus \in [0, 9, +\infty]$,其相应的白化权函数为

$$f_1(d_{li}) = \begin{cases} \frac{d_{li}}{9} & d_{li} \in [0, 9] \\ 1 & d_{li} \in [9, \infty] \\ 0 & d_{li} \in [-\infty, 0] \end{cases} \quad (2)$$

第2灰类“注意”,灰类 $j=2$,灰数 $\oplus \in [0, 7, 10]$,其相应的白化权函数为

$$f_2(d_{li}) = \begin{cases} \frac{d_{li}}{7} & d_{li} \in [0, 7] \\ \frac{10-d_{li}}{3} & d_{li} \in [7, 10] \\ 0 & d_{li} \notin [0, 10] \end{cases} \quad (3)$$

第3灰类“异常”,灰类 $j=3$,灰数 $\oplus \in [0, 5, 10]$,其相应的白化权函数为

$$f_3(d_{li}) = \begin{cases} \frac{d_{li}}{5} & d_{li} \in [0, 5] \\ \frac{10-d_{li}}{5} & d_{li} \in [5, 10] \\ 0 & d_{li} \notin [0, 10] \end{cases} \quad (4)$$

第4灰类“严重”,灰类 $j=4$,灰数 $\oplus \in [0, 2, 10]$,其相应的白化权函数为

$$f_4(d_{li}) = \begin{cases} 1 & d_{li} \in [0, 2] \\ \frac{10-d_{li}}{8} & d_{li} \in [2, 10] \\ 0 & d_{li} \notin [0, 10] \end{cases} \quad (5)$$

2.3 构造模糊评价权矩阵

采用灰色统计法由确定的各评价指标的标准白化权函数,求出 d_{li} 属于 j 类评价标准的权 $f_j(d_{li})$,据此可以求出灰色统计数 N_{ij} 和总灰色统计数 N_i ^[19]。

$$\begin{cases} N_{ij} = \sum_{l=1}^m f_j(d_{li}) \\ N_i = \sum_{j=1}^4 N_{ij} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

由式(6)确定出第 i 个评价指标属于第 j 种评

价灰类的灰色权值。

$$r_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (7)$$

由此可以构造模糊评价权矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ & & \vdots & \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.4 评价指标的组合权重

各评价指标在反映设备运行状况的程度不一样,所以需要对这些指标赋以相应的权重。这里采用文献[20]提出的层次分析法来确定各指标的组合权重。其具体操作为:邀请多位长期从事设备检修工作的专家,采用表1所示的9级标度法对已确定的评价指标的重要性进行判断,构造两两比较判断矩阵 X ,即

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ & & \vdots & \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

表1 9级标度法

指标比较	1~9 标度
i 与 j 同等重要	1
i 比 j 较为重要	3
i 比 j 更为重要	5
i 比 j 非常重要	7
i 比 j 极端重要	9
介于上述相邻两级之间 重要程度的比较	2, 4, 6, 8
j 与 i 比较	上述各数的倒数

由式(9)中判断矩阵 X 计算出被比较指标的相对权重 w_i 得

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_{ij}}}{\sum_{k=1}^n \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_{kj}} \right)} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

经一致性检验后可确定的各评价指标权重 W ,即

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \text{ 且 } \sum_{i=1}^n w_i = 1, 0 < w_i < 1 \quad (11)$$

当一致性检验不通过时,则需要重新构造判断矩阵 X ,适当地对判断矩阵的元素进行调整使其具

有满意的一致性;再确定各评价指标权重 W 。

2.5 确定评价标准

基于 WSR 思想,参考相关项目对于电力设备状态评价分级状况,结合行业标准,可确定换流变压器状态评价标准集合 V 为

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{正常状态, 注意状态, 异常状态, 严重状态}\}$

设备的4种状态等级在进行量化计算时,每种状态具有相应范围,规定正常状态的范围为 [8, 10], 注意状态的范围为 [6, 8], 异常状态的范围 [4, 6], 严重状态的范围 [0, 4]。

2.6 评价结果计算

由评价指标模糊评价权矩阵 R 、权重矩阵 W 以及评价等级矩阵 V ,可求出设备综合评价结果 Z 。

$$Z = (W \cdot R) \cdot V^T = (w_1, w_2, \dots, w_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,模糊综合评判矩阵 $B = W \cdot R = (b_1, b_2, b_3, b_4)$;且矩阵 B 的元素之间满足: $\sum_{k=1}^4 b_k = 1$ 。

3 实例与分析

以某 500 kV 换流站的换流变压器为例进行相关的分析。查阅历次检修记录发现换流变压器有过一次不严重的缺陷记录,未发现家族缺陷。在某次

预防性试验中,测得绕组的绝缘电阻与上次实验值相差不大且均大于 10 000 MΩ;吸收比为 1.35;气体的油色谱分析中氢气的含量 150.8 μL/L 稍微大于正常范围但有恢复到正常范围的趋势,乙炔的含量 3.5 μL/L,总烃的含量 128.3 μL/L,其他的气体含量均在正常的范围内;油介损 tanδ 为 0.153,微水量为 12.385 mg/L,泄漏电流以及三相不平衡电流的实验值均在正常的范围内;巡视过程中未发现变压器异常发声、操作过电压;短路冲击电流在允许短路电流的 50% ~ 70% 之间,未出现严重的短路现象;换流变压器出现过短时间不严重的过负荷。

1) 确立评价指标的权重

所提出的反映换流变压器运行状况的评价指标共有 15 个,为尽量全面考虑所有的评价指标,避免在计算过程中出现“大数吃小数”现象。因此,对换流变压器进行分析计算时采用二级综合评价模型即状态评价采用分块、分级进行评价。采用文献 [20] 中的层次分析法计算得到的换流变压器状态评价指标 u_2, u_3, u_4 包括的二级指标的权重集 w_2, w_3, w_4 为

$$w_2 = (0.06, 0.09, 0.04, 0.5, 0.13, 0.14, 0.04)$$

$$w_3 = (0.45, 0.55)$$

$$w_4 = (0.04, 0.29, 0.33, 0.34)$$

综合评价指标体系 U 包括的一级指标的权重集 W 为

$$W = (0.1, 0.35, 0.25, 0.2, 0.1)$$

2) 邀请 5 位经验丰富且从事状态检修的专家对收集到的反映换流变压器健康状况的 15 个指标进行客观评价,得到一个 5×15 的样本矩阵 D 。

$$D = \begin{bmatrix} 9.5 & 9.0 & 7.2 & 8.4 & 7.5 & 8.0 & 9.0 & 8.3 & 9.0 & 9.1 & 8.0 & 8.0 & 6.8 & 9.0 & 8.0 \\ 9.8 & 8.5 & 8.0 & 9.1 & 8.0 & 7.8 & 9.5 & 8.5 & 9.0 & 8.4 & 8.5 & 8.2 & 7.1 & 9.0 & 8.0 \\ 8.3 & 9.1 & 9.1 & 7.8 & 6.8 & 8.0 & 8.0 & 8.0 & 8.0 & 9.3 & 8.0 & 8.4 & 7.3 & 8.9 & 8.5 \\ 9.0 & 8.6 & 9.0 & 7.5 & 7.0 & 9.3 & 7.5 & 6.8 & 9.0 & 9.0 & 8.2 & 7.8 & 6.3 & 9.0 & 8.0 \\ 8.5 & 9.0 & 8.5 & 8.6 & 8.6 & 8.0 & 8.6 & 7.2 & 8.0 & 8.6 & 8.0 & 7.0 & 7.0 & 8.5 & 9.0 \end{bmatrix}^T$$

3) 通过 Matlab 编程,结合上面的样本矩阵按式 (1) ~ 式 (8) 计算得到指标 $u_2 \sim u_4$ 包括的二级指标的模糊评价权矩阵。

u_2 包括的二级指标的模糊评价权矩阵 $R_{2\Omega}$ 为

$$R_{2\Omega} = \begin{bmatrix} 0.562 & 0.222 & 0.133 & 0.083 \\ 0.462 & 0.273 & 0.163 & 0.102 \\ 0.448 & 0.280 & 0.168 & 0.104 \\ 0.349 & 0.326 & 0.200 & 0.125 \\ 0.436 & 0.285 & 0.171 & 0.107 \\ 0.490 & 0.258 & 0.155 & 0.097 \\ 0.372 & 0.314 & 0.193 & 0.121 \end{bmatrix}$$

u_3 包括的二级指标的模糊评价权矩阵 $R_{3\Omega}$ 为

$$R_{3\Omega} = \begin{bmatrix} 0.510 & 0.247 & 0.150 & 0.093 \\ 0.570 & 0.218 & 0.131 & 0.081 \end{bmatrix}$$

u_4 包括的二级指标的模糊评价权矩阵 $R_{4\Omega}$ 为

$$R_{4\Omega} = \begin{bmatrix} 0.425 & 0.291 & 0.175 & 0.109 \\ 0.386 & 0.311 & 0.187 & 0.116 \\ 0.282 & 0.348 & 0.288 & 0.142 \\ 0.572 & 0.217 & 0.130 & 0.081 \end{bmatrix}$$

4) 由 $R_i = w_i \cdot R_{i\Omega}$ 得到一级指标 $u_1 \sim u_5$ 的模糊评价权矩阵分别为

$$R_1 = (0.601, 0.202, 0.121, 0.076)$$

$$R_2 = (0.4079, 0.2978, 0.1811, 0.1132)$$

$$R_3 = (0.5430, 0.2311, 0.1395, 0.0864)$$

$$R_4 = (0.4165, 0.2904, 0.2005, 0.1124)$$

$$R_5 = (0.452, 0.278, 0.166, 0.104)$$

最终得到的综合模糊评价权矩阵 R 为

$$R = (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5)^T = \begin{bmatrix} 0.6010 & 0.2020 & 0.1210 & 0.0760 \\ 0.4079 & 0.2978 & 0.1811 & 0.1132 \\ 0.5430 & 0.2311 & 0.1395 & 0.0864 \\ 0.4165 & 0.2904 & 0.2005 & 0.1124 \\ 0.4520 & 0.2780 & 0.1660 & 0.1040 \end{bmatrix}$$

5) 计算换流变压器的模糊评判矩阵 B 和状态评价结果 Z 。

由 $B = W \cdot R$ 得模糊评判矩阵 B 为

$$B = (b_1, b_2, b_3, b_4) = (0.4671, 0.2681, 0.1671, 0.1017)$$

在定量计算时采用 10 分制进行评价,按灰水平将评价等级 V 的 4 种状态分别量化赋值为 9, 7, 5, 2。则换流变压器状态评价的结果 Z 为

$$Z = (W \cdot R) \cdot V^T = B \cdot V^T = 7.1195$$

从换流变压器状态评价的结果可以看出, Z 值的大小在换流变压器注意状态规定的范围 [6, 8] 内。故可以初步确定此换流变压器的状态为注意状态。另外,从实际收集到的关于换流变压器的状态数据信息也不难发现,其自身有过不严重的缺陷记录;绕组的绝缘电阻和油色谱分析中部分气体的含量等均出现过超过正常状态的范围;而且换流变压器在运行过程中出现过短时的过负荷。各状态量数据信息虽然没有严重地超过标准限值,但有劣化的趋势,其整体可靠性在下降,换流变压器在继续运行过程中需要加强监视,应密切注意其状态的变化趋势。

因此,可以确定此换流变压器的状态应属于注意状态。另外,该评价结果与国家电网公司试行的换流变压器评价导则分析得到的结果是基本符合的。

4 结 论

1) 所提出的 DHGF 算法综合了 Delphi 法、层次分析法、灰色理论分析法、模糊综合评价法成功之处,实现了定性与定量的综合集成,较好地解决了由于指标信息的非完备性和不确定性而无法进行精确评价的问题。采用该方法构建了换流变压器的 DHGF 数学模型,主要包括评价指标的选择、评价指标的白化预处理、构造模糊评价权矩阵、确定评价指标的组合权重和评价标准以及评价结果计算等。该算法思路清晰,方法简单。

2) 实例分析表明,所建立的 DHGF 算法模型可以用于换流变压器的状态评价且能够准确地反映设备的实际状态,可为下一步的检修决策提供参考依据;当然,所建立的换流变压器 DHGF 算法模型还需要更多的实例去验证。

参考文献

- [1] 张怀宇,朱松林,张扬,等.输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J].电网技术,2009,33(13):70-73.
- [2] 李景禄,李青山,等.电力系统状态检修技术[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [3] 满若岩,付忠广.基于模糊综合评判的火电厂状态评估[J].中国电机工程学报,2009,29(5):5-10.
- [4] 吴姜,蔡泽祥,胡春潮,等.基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价[J].电力系统保护与控制,2012,40(5):48-52.
- [5] 刘卫华,廖瑞金,杨丽君.基于点密度加权核模糊聚类的变压器故障诊断方法[J].电力自动化设备,2012,32(6):66-69.
- [6] 廖瑞金,王谦,骆思佳,等.基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J].电力系统自动化,2008,32(3):70-75.
- [7] 乐淤,成永红,陈小林,等.基于人工智能的大电机主绝缘老化状态评估软件[J].电力系统自动化,2005,29(14):78-82.
- [8] 雷刚,顾伟,袁晓东.灰色理论在电能质量综合评估中的应用[J].电力自动化设备,2009,29(11):62-65.

(下转第84页)

变化(高压缸效率下降,中压缸效率上升);

2) 通过对系统阀门进行维修或更换,降低了系统的泄漏量,汽轮机蒸汽流量得到了有效降低;

3) 汽轮机修正后的热耗分别下降了 426.5 kJ/kWh、252.0 kh/kWh 和 174.1 kJ/kWh;

4) 汽轮机节能改造后,较大幅度地降低了机组的热耗,取得了较为显著的节能效果;

5) 对机组经济性的影响(仅计算发电煤耗一项)发电煤耗按下式进行计算。

$$b_{fd} = HR / (\eta_{gl} \times \eta_{gd} \times 29.307)$$

式中 b_{fd} 为发电煤耗 g/kWh; HR 为汽机热耗率 kJ/kWh; η_{gl} 为锅炉效率设计值(BMCR 工况)%,ALS-TOM 提供的锅炉效率设计值为 91.9%; η_{gd} 为管道热耗率取 99%。

在 300 MW 负荷情况下发电煤耗的变化为

$$\begin{aligned} \Delta b_{fd} &= \Delta HR / (\eta_{gl} \times \eta_{gd} \times 29.307) \\ &= 174.1 / 0.919 \times 0.99 \times 29.307 \\ &= 6.53 \text{ (g/kWh)} \end{aligned}$$

以 31 号机年运行小时数 5 000 h 计算,年发电量 150 GWh,累计年节约煤量约为 9 796 t,以公司入

炉年均标煤单价 815 元/t 计算,年节约费用近 800 万元,如果机组平均负荷降低,热耗率还将进一步降低,考虑到影响机组发电煤耗的诸多因素如机组负荷率、厂用电率、环境温度、机组老化、排污等,节约费用只能是一个大概数字,但实际节约的费用仍相当可观。

由此可见,大修后的汽轮机在各项参数上都有了较高幅度的增长,但在提高缸效率方面仍具有很大的空间。汽轮机通流部分的改造是提高机组效率的有力措施。通过减少轴封、隔板汽封漏汽以及减少漏汽对下一级汽流流场的扰动来提高效率 and 整机效率。总体来看,整机改造后机组效率可提高,热耗率下降,出力增加,效果显著。

参考文献

[1] 吴季兰. 汽轮机设备及系统[M]. 北京: 中国电力出版社 2001.

[2] 景朝辉. 热工理论及应用[M]. 北京: 中国电力出版社 2006.

(收稿日期: 2015-02-12)

(上接第 41 页)

[9] 罗毅,周窗立,刘向杰. 多层次灰色关联分析法在火电机组运行评价中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 97-103.

[10] 熊浩,孙才新,张昀,等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 55-59.

[11] 戴婷,宋斌,彭正洪. 基于灰色层次分析法的变电站通信网路状态评价[J]. 武汉大学学报: 工版, 2011, 44(4): 526-529.

[12] 冯利法,杨新宇,朱誉,等. 基于熵权和多级物元分析的汽轮机 DEH 调节系统状态综合评价[J]. 热能动力工程, 2009, 24(5): 583-587.

[13] 张建,李铁骊. 基于 DHGF 法的船舶操纵性综合评价[J]. 中国舰船研究, 2010, 5(6): 56-59.

[14] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志, 1990, 13(1): 3-10.

[15] 顾基发,唐锡晋,朱正祥. 物理-事理-人理系统方法论综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(6): 51-60.

[16] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社 2002.

[17] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用(第二版)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社 2004.

[18] Victor R L. A Novel Cryptosystem Based on Grey System Theory and Genetic Algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 170(2): 1290-1302.

[19] 陈士涛,杨建军,张志峰,等. 基于 DHGF 算法和三角模糊数的装备研制风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 54-58.

[20] 宾光富,李学军, DHILLON Balbir-S. 基于模糊层次分析法的设备状态系统量化评价新方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 744-749.

作者简介:

肖屏(1981), 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断, 高压直流输电;

王渝红(1971), 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、电力系统稳定与控制、高压直流输电。

(收稿日期: 2015-04-28)