

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.004

基于多源信息的变压器状态评价方案研究与应用

张 晗¹, 常 安¹, 王 奇¹, 周 淦², 梁 韵²

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了适应变电设备向大容量化、高电压化、结构多样化、密封化及设备状态检修的发展趋势, 笔者在区间物元可拓原理、云模型和灰色模型的组差值法的基础上, 建立基于多源信息的变压器两级和综合评价模型, 给出了变压器单因素指标的趋势预测评价和整体状态评价的具体方案。在两级评价中利用顶层油温、绕组热点温度和负载能力计算综合相对劣化度并得到自然模式和加速劣化模式的综合评价分值, 在综合评价中利用统计模型得到不良工况和可靠性对运行状态进行补充, 首次建立负载能力模型和故障预测模型, 对变压器运行状态进行修正。该评价模型克服了传统状态评价方法的缺陷和不足, 对其他变电设备的状态评价流程有较好的指导作用。最后, 基于文中评价模型对超高压公司实际运行的1号变压器开展评价分析, 结果与该变压器实际情况较为吻合。

关键词: 状态评价; 可拓学原理; 多源信息; 模糊物元

Research and Application of Transformer Condition Evaluation Model Based on Multi-source Information

ZHANG Han¹, CHANG An¹, WANG Qi¹, ZHOU Quan², LIANG Yun²

(1. M & T Center, EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to assess the substation equipment operation security condition effectively and adapt to the trends of high capacity, high voltage, structure diversification, seal and condition-based maintenance. Based on group difference method of interval matter-element extension principle, cloud model and grey model, two level comprehensive evaluation model transformer based on multi-source information is established to determine the transformer trend prediction of single factor index evaluation and the overall state evaluation of specific solutions. In the two-stage, the top oil temperature, winding hot spot temperature and load capacity calculation are utilized to evaluate comprehensive relative deterioration degree and get the natural mode and accelerate the degradation model of comprehensive evaluation score. In the comprehensive evaluation, statistical models are used to get the bad working condition and the reliability of running state to supplement, load capacity and fault prediction model is established for the first time, to modify the transformer running state. The model overcomes the defects and deficiencies of the traditional state evaluation method, improves the accuracy of the state assessment, and has good guidance for other substation equipment's condition evaluation processes. The analysis results coincide with the actual situation of the transformer.

Key words: condition evaluation; interval extension theory; multi-source information; fuzzy matter-element

收稿日期:2015-07-16; 修回日期:2015-08-21

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA050209)。

Project Supported by National High Technology Research and Development Program(863 Program)(2012AA050209).

0 引言

目前国内电力公司实行的是定期试验及检修制度已难以满足电网可靠性和安全性要求^[1]。设备状态评价是制定检修决策的基础,正确、有效评价电力设备的运行状态对电力行业发展具有重要意义。

设备状态评价根据有关规程、导则或经验对在线或离线采集到的状态参量进行分析,从而确定设备真实状态,预测其剩余寿命或潜在故障。文[2]介绍了用于多种状态信息评价的主流模型方法,通过实例验证了状态评价能够及时发现设备故障;文[3]采用故障树分析法对大型电力变压器的各种故障进行分析,并对变压器各分系统的故障原因进行了统计计算;文[4]对英国的状态维修发展进行了总结,指出状态维修有助于电力公司管理电网资产,取得显著经济效益。状态检修不仅能够及时发现设备运行异常,还可为设备的检修提供凭据,能避免不必要的设备停运。文[5]介绍了利用电压相应测量判断设备绝缘状态、老化状态和可靠性水平;文[6]利用模糊层次分析法,提出了基于集对分析法的联系度评价模型,从变压器预防性试验项目实现对变压器状态的评价。此外,基于劣化状态^[7]、BP神经网络和故障树分析法^[8]的变压器设备状态评价方法也成为了科研工作者和设备运维人员的研究重点。

中国变电设备状态评价的系统设计与开发仍处于发展阶段^[9-11]。各类新方法层出不穷、并在一些评价体系中得到利用,提高了设备的检修效率,减小了各类花费。笔者依据设备出厂数据、线监测系统数据及其他多源信息,以及部件的历史失效统计数据。利用层次分析法、概率分析法建立了变压器设备状态评价模型,并和根据环境温度、负载对行状态进行修正,获得设备的整体状态评价得分,依据分数大小确定设备的状态水平。实例分析表明,该方法能够有效提高状态评价的准确性,为运维人员制定设备运行决策提供有效指导。

1 评价模型总体流程

笔者对影响变压器运行状态的因素进行分类,研究了设备状态信息的相互关系及引发故障的机理,得到反映变压器的状态参量数据与设备状态间的关系,制定设备的状态评价指标体系。

收集设备的运行时间、设备状态以及历史故障统计方面的数据,详细分析各参量引起设备状态变化的规律。根据各参量的特征及对设备整体状态的重要度,建立了状态参量评价模型参数、判断阈值

的调整方法以及设备状态评价的差异化评价模型。评价框图见图1。

2 两级评价的指标体系

根据状态量的获取方式的难易程度、状态量特征的差异以及指标数据是否需要变压器停电为基准,选取两级评判指标体系,具体状态量见图2、3^[12-13]。

3 状态评价算法

3.1 单项状态参量趋势预测评价

趋势评价是对历史数据进行分析、对比和挖掘^[14-15]。当设备运行状态量的趋势超标或偏向阈值时能及时做出预警提示,将试验结果用趋势分析曲线展示使用户直观的观察试验数据的变化趋势。文中利用改进的灰色模型^[16]进行单项因素的趋势预测。实际计算时,为保证计算精度,在计算时至少5个数据点。

利用组差值法来分析预测结果。其检验方法分为两大步骤:

1)残差检验。残差为

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

式(1)中: $x^{(0)}(k)$ 是实测值; $\hat{x}^{(0)}(k)$ 是预测值。

2)后验差检验。按均值和方差的数学定义计算出残差均值 $\bar{q}$ 和残差方差 S_1^2 ,同理得到实测数据均值 $\bar{x}$ 和实测数据方差 S_2^2 。

后验差检验指标后验差比值 c 和小误差概率 p ,是预测值与实测值差距的两个重要指标,其计算公式为:

$$c=\frac{S_1}{S_2};(2)$$

$$p=p\{|q^{(0)}(k)-\bar{q}|<0.674\ 5S_2\}。(3)$$

式(2)、(3)中, c 值越小差距越小, p 值越大差距越小,按照上述两个指标可从表1中查出差距等级。

3.2 变压器整体状态评价

文中采用基于区间域的可拓评价方法^[17-20],建立多指标综合的变压器运行状态综合评价的物元模型。计算流程见图4。

设对应的设备 X_i 所对应的特征参量为 $P=(P_i)(i$ 为该设备对应所有特征参量的编号),根据 P_i 所确定的该设备的单项评价不同状态等级的关联度值为 $\mu(P_i)$ 。运用层析分析法与灰色关联理想解法确定了指标的常权,并引入均衡函数调整常权得到变权。

3.2.1 部件缺陷状态评判

统计变压器役龄和离散累计故障概率。根据某

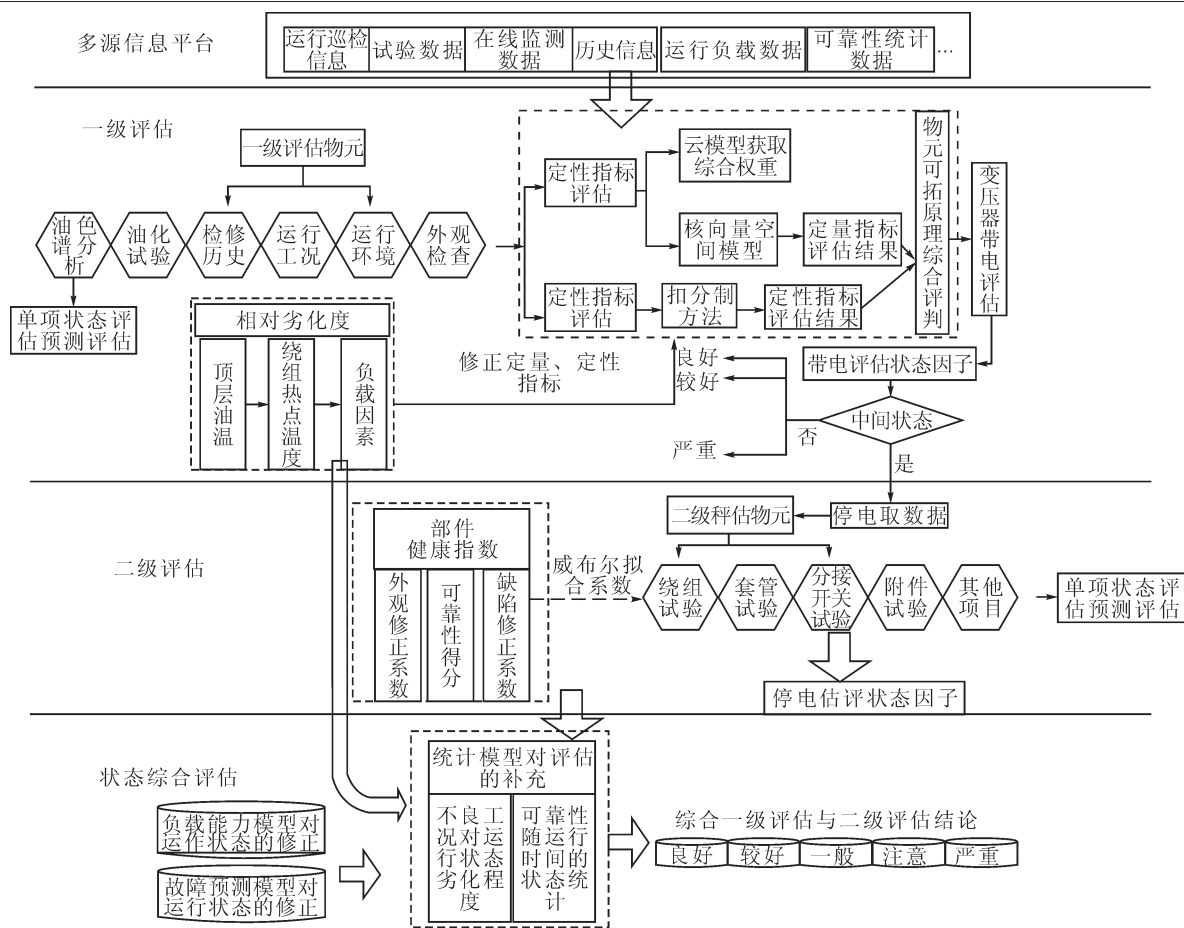


图1 状态评价总体流程图

Fig. 1 Overallflow chart of condition evaluation

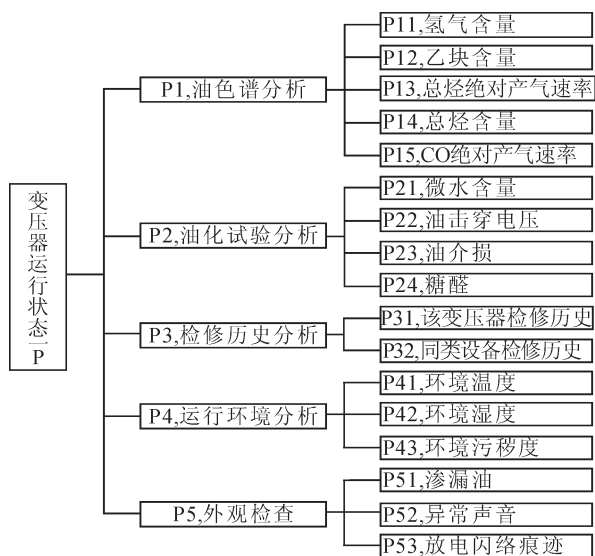


图2 变压器一级评判因素图

Fig. 2 First evaluation factors figure of the transformer

变电站 2010-11-11 至 2012-07-22 的变压器故障历史统计数据,以本体故障数据为例,拟合得到基于威布尔分布的累计故障概率曲线见图 5。并依次求解出其余套管、冷却系统、分接开关、非电量保护 5 大部件的累积故障概率分布。同时,根据可靠度和

累积故障概率的归一化的关系,可以定量得到设备的可靠度。

3.2.2 基于相对劣化度加速劣化模型

加速劣化主要是考虑变压器存在的缺陷或由于运行条件如过负载、高温等下的劣化。

3.2.2.1 环境温度、负载的量化

为确保变压器运行安全稳定和一定的使用寿命,需要制定设备的负载计划。根据变压器设备运行经验中对自然油循环(ON,ONAN 或 ONAF)冷却的变压器及强迫油循环(OF/OD,OFAF 或 ODAF)冷却的变压器任一负载温度下的最终热点温度计算公式的基础上,依据设备实时环境温度及负载电流估算出热点温度。基于负载电流的变压器绕组热点温度计算模型输入—输出见图 6,其中顶层油温和负载电流是需要通过在线或离线监测装置获取^[21]。

根据图 6 所示参数以及规程中所推荐的公式,通过间接或直接估算两种方式测得的绕组热点温度及其最高限定下反演计算出在当前环境温度下的最大负载水平。

将顶层油温、绕组热点温度和负载能力评价结

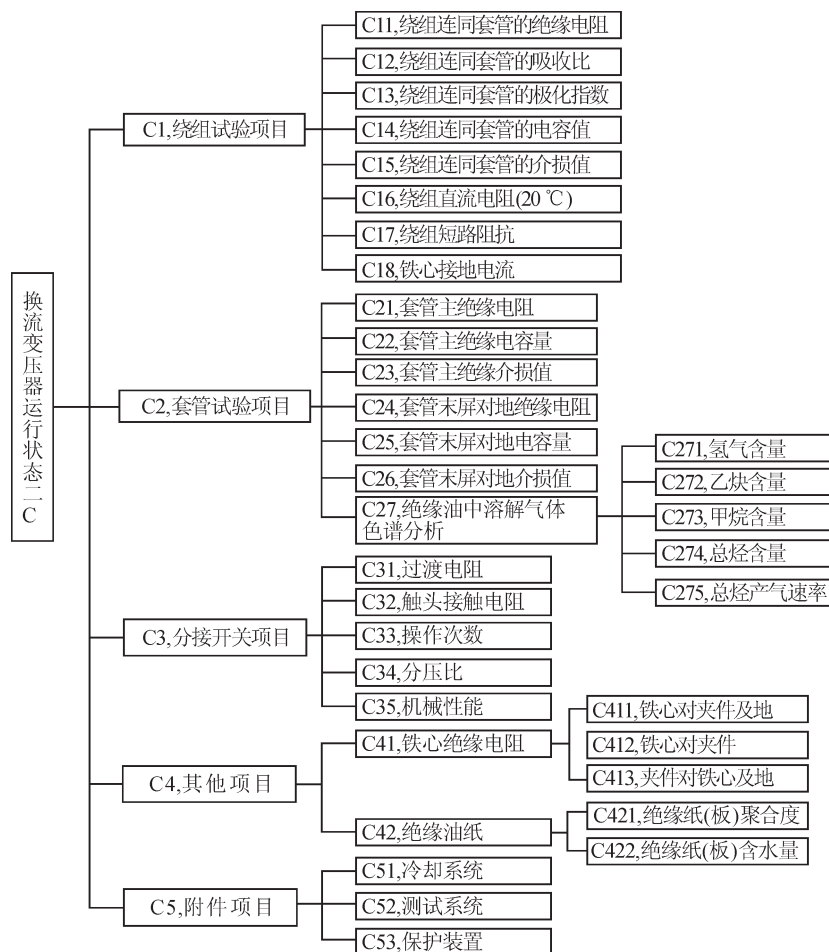


图 3 变压器二级评判因素图

Fig. 3 Second evaluation factors figure of the transformer

表 1 变压器负载电流和温度极限

Table 1 Load current and temperature extremes of the transformer

差距等级	p	c
1级(优)	$0.95 \leq p$	$c \leq 0.35$
2级(良)	$0.80 \leq p < 0.95$	$0.35 < c \leq 0.50$
3级(中)	$0.70 \leq p < 0.80$	$0.50 < c \leq 0.65$
4级(差)	$p < 0.70$	$0.65 < c$

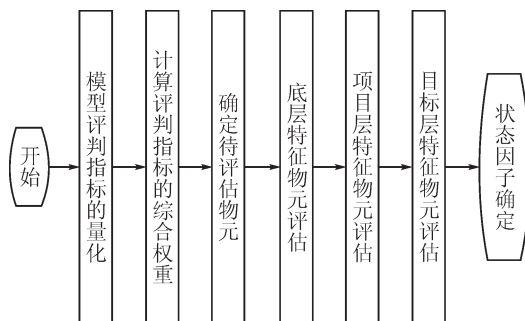


图 4 物元理论算法流程图

Fig. 4 Flow chart of matter-element theory algorithm

果代入规程阈值的隶属函数进行量化,分别得到各自的相对劣化度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。将计算得到的 3 个相对劣化度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 进行加权平均计算得到变压器综合相

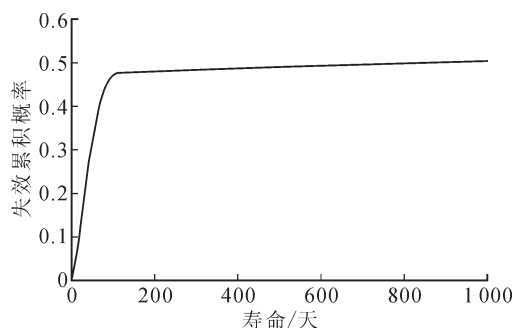


图 5 变压器本体缺陷数据拟合图

Fig. 5 Data fitting chart of body defect of the transformer

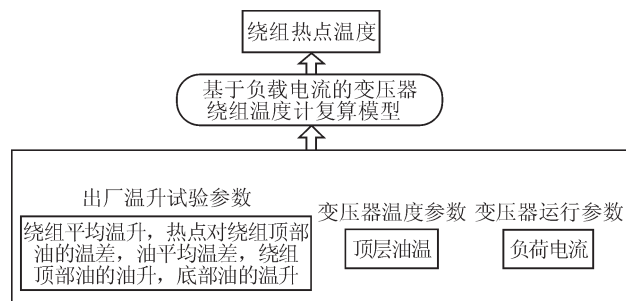


图 6 基于负载电流的绕组热点温度计算模型输入—输出框图

Fig. 6 Input-output block diagram of winding hot spot temperature calculation model based on the load current

对劣化度^[22-23] k 为

$$k = \theta \cdot R = [\theta_1, \theta_2, \theta_3] \times [r_1, r_2, r_3]。 \quad (4)$$

通过云模型计算得到如下权重矩阵向量

$$R = [0.383, 0.646, 0.153]$$

采用劣化函数为加速劣化函数对变压器之前获取的状态评价指标进行重新量化。分别有极大型和极小型两类,分别为

$$l_i = \begin{cases} 0 & x_i \geq x_{i0} \\ \left(\frac{x_{i0} - x_i}{x_{i0} - x_{i1}} \right)^{1-k} & x_{i1} < x_i < x_{i0} \text{ 极大型;} \\ 1 & x_{i0} \leq x_{i1} \end{cases} \quad (5)$$

$$l_i = \begin{cases} 1 & x_i \geq x_{i1} \\ \left(\frac{x_i - x_{i0}}{x_{i1} - x_{i0}} \right)^{1-k} & x_{i0} < x_i < x_{i1} \text{ 极小型。} \\ 0 & x_{i1} \leq x_{i0} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)、(6)中: l_i 为状态参数 i 的相对劣化度; x_i 为状态参数的实际检测值; x_{i0} 为状态参数 i 良好值; x_{i1} 为状态参数 i 的注意值。

3.2.2.2 环境温度、负载允许持续运行时间的量化

设备铭牌规定在正常周期性超容量运行条件下,可不考虑变压器寿命折损。以 24 h 为周期,各变压器的实测温升数据为基础,依据《电力变压器运行规程》(DL/T 572—1995)给出的中型及大型电力变压器的正常寿命损失下的负载条件图求得在 -25、-20、-10、0、10、20、30、40 °C 的环境温度下、不同起始负载系数下变压器允许的超铭牌容量运行的持续时间 $t(h)$,其余温度下持续时间可依据负载条件图的数据用拉格朗日插值法计算,见式(7)。

$$t' = \left(1 - \frac{t}{24} \right)^2。 \quad (7)$$

3.2.2.3 自然模式和加速劣化模式的综合

变压器加速劣化状态评价分值 f_2 的流程与自然模式的状态评价(评价分值 f_1)一致,不同点是加速劣化评价时引入威胁系数^[23]。由于变压器内部热点温度、负载方式等会对变压器的运行状态起着决定性的作用,可通过自然与加速劣化模式综合方法实现这些因素对状态评价结果的修正。

温度威胁系数 ε_1 由变压器顶层油温、绕组热点温度以及允许持续时间加权计算得到;负载威胁系数 ε_2 由负载状况和允许持续时间加权计算得到。其中:

$$\varepsilon_1 = 30\% \theta_1 + 60\% \theta_2 + 10\% t'; \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 = 90\% \theta_2 + 10\% t'。 \quad (9)$$

总威胁系数为

$$\varepsilon = \begin{cases} \text{sum}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) & \text{sum}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \leq 1 \\ 1 & \text{sum}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \geq 1 \end{cases}。 \quad (10)$$

利用式(11)计算变压器自然和加速劣化模式下

的综合状态评价分值为

$$f = (1 - \varepsilon) f_1 + \varepsilon f_2。 \quad (11)$$

4 状态评价修正算法模型建立

4.1 变压器负载能力模型对行状态的修正

考虑设备运行方式、运行限定条件、过负载倍数、过负载时间等不同的限定条件,结合不同时间尺度的负载能力模型,对设备的负载能力进行预测,今后工作将开展能对负载能力做出更为准确的评价。设计框图见图 7。

4.2 故障预测模型对运行状态的修正

研究不同的概率分布函数下的特征参量,据此建立设备故障树和故障率的关系模型,准确地实现变压器的故障判断和预测,利用预测值对当前变压器的运行状态分数进行修正。目前该故障预测模型仅为初步设计阶段。方案见图 8。

5 评价实例

利用上述的状态评价模型对某变电站 1 号变压器进行状态评价,以说明文中状态评价方案的有效性。

5.1 变压器整体基础评分

参考南方电网公司《110 kV~500 kV 油浸式电力变压器(电抗器)状态评价导则》^[24],对该变压器的巡检及例行试验、诊断性试验、在线监测、带电检测、家族缺陷诊断、不良工况诊断等状态信息,包括其现象强度、量值大小以及发展趋势进行评价,得出本体、套管、冷却系统、分接开关、非电量保护装置等部件的扣分量,并按要求进行累加得到具体设备的综合扣分值。经过评价,该变压器的基础评分 88 分。

5.2 计算待评价物元的关联度

根据 1 号变压器的多源信息数据的组合变权及项目层评价计算方法,得到自然模式下评价项目层物元关联度,见表 2。

计算目标层的评价结果,并计算基于自然模式下的状态因子 $f_1 = 2.854$ 。

5.3 短路等工况状态结果的补充

轴向力的计算采用有限元分析方法,并将所有短路形式下、最严重短路情况的计算结果总结于表 3(不对称系数为 1.9)。

由计算值可知,变压器完全能够承受短路时的电流和电动力。短路后绕组温度范围在国家标准的合理要求的范围内。

高低压绕组频谱响应图谱见图 9、10。作为辅助手段分析变压器的绕组变形情况,通过计算曲线间

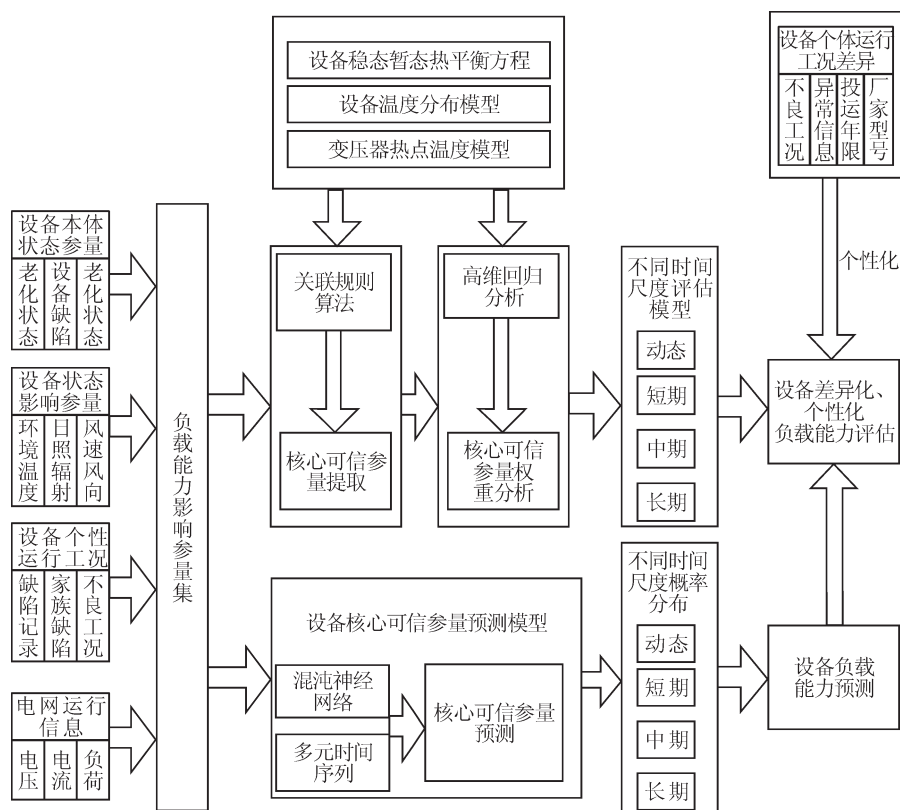


图 7 变压器负载能力动态评价模型框图

Fig. 7 Dynamic evaluation model diagram of load capacity of the transformer

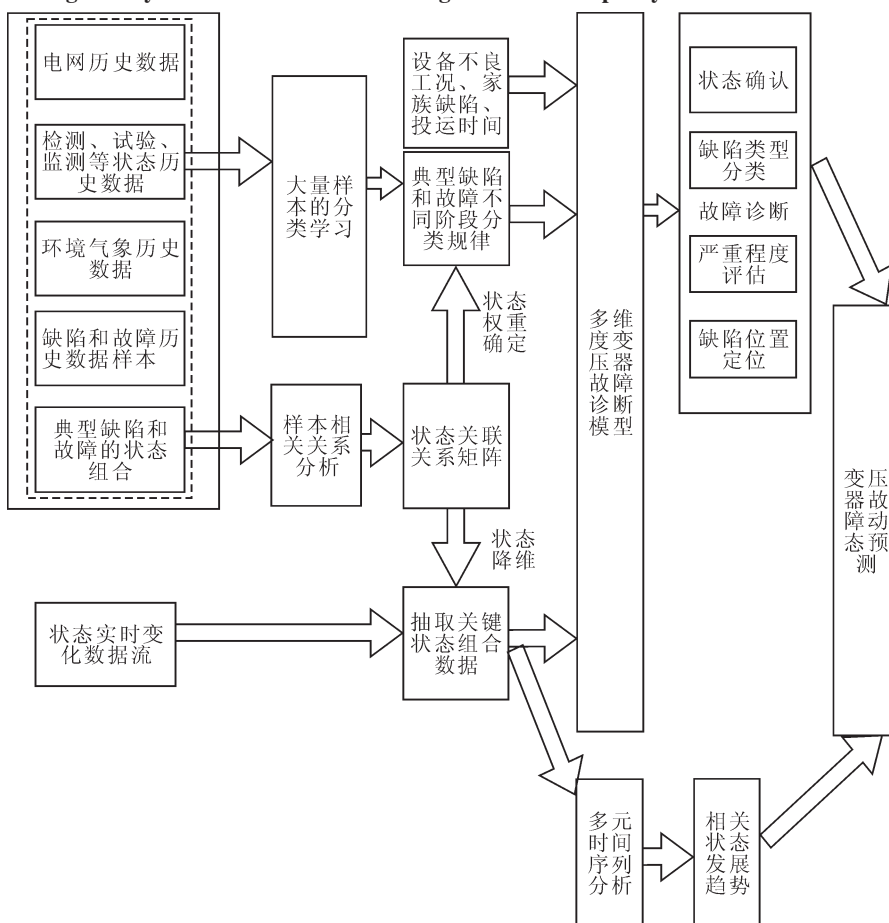


图 8 变压器故障诊断和预测技术模型框图

Fig. 8 Model diagram of fault diagnosis and prediction of the transformer

表 2 1号变压器自然模式下项目层物元的评价结果

Table 2 Evaluation results of project layer matter-element under natural mode of No.1 transformer

评价物元	良好	较好	一般	注意	严重
油色谱物元	-0.830	-0.796	-0.728	-0.466	0.059
油化试验物元	-0.305	-0.090	-0.197	-0.310	-0.580
检修历史物元	-0.315	-0.006	-0.077	-0.361	-0.521
运行环境物元	-0.324	-0.004	-0.047	-0.350	-0.512
外观检查物元	-0.044	-0.145	-0.513	-0.675	-0.757
绕组试验物元	-0.739	-0.757	-0.656	-0.563	-0.132
套管试验物元	-0.514	-0.686	-0.661	-0.590	-0.375
有载开关物元	-0.164	-0.006	-0.062	-0.260	-0.363
附件试验物元	-0.137	-0.022	-0.378	-0.585	-0.689
其他项目物元	-0.507	-0.495	-0.486	0.448	0.006

表 3 1号变压器线圈的最严重幅向短路力

Table 3 The most serious longitudinal short-circuit force of No.1 transformer's coil

最大短路轴向力	绕组的最大幅向 平均压/拉应力/(N·mm ⁻²)			
	W _a	W _b	W _c	W _d
	-90/0	-13/85	-68/38	0/92
作用在线圈垫块/kN	2 489	901	9 350	4 437
作用在铁轭/kN	2 843	557	4 393	3 252

的相关系数,对两条波形曲线之间的相似程度进行量化(见表 4),其中,高压绕组的 A、B、C 三相的频响曲线基本耦合,可判断该变压器的高压绕组的绕组变形试验结果合格,而低压绕组有较明显的变形。

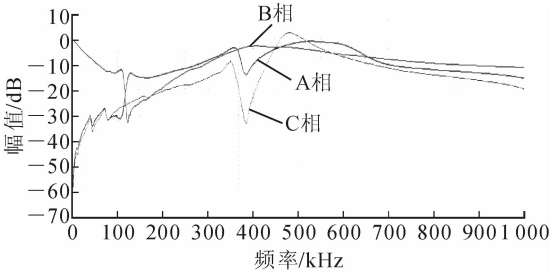


图 9 高压绕组三相频响响应图

Fig. 9 Spectral response patterns of three-phase high-voltage winding

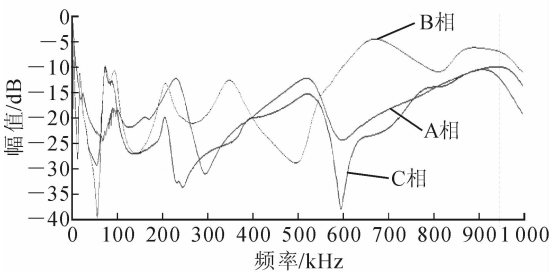


图 10 低压绕组三相频响响应图

Fig. 10 Spectral response patterns of three-phase low-voltage winding

表 4 1号变压器绕组变形测试相关系数R值

Table 4 Correlation coefficient R of winding deformation test of No.1 transformer

变压器绕组	相关系数 R	
低压绕组	R_{LF}	a-b:0.20
		b-c:1.43
		c-a:0.20
	R_{MF}	a-b:0.31
		b-c:0.20
		c-a:0.20
	R_{HF}	a-b:1.09
		b-c:0.20
		c-a:0.20

利用短路时的电动力计算值及低压绕组的相关系数值 R_{LF} 代入 GB 1094.5—2008 的相关公式得到不良工况系数为 0.198。

5.4 环境温度、负载对状态结果的修正

1 号变压器从 2012 年 1 月至 2012 年 12 月的负载率见表 5。

表 5 1号变压器月负载率

Table 5 Monthly load factor of No.1 transformer

月份	1	2	3	4	5	6
负载率/%	41.65	27.79	32.45	22.13	21.01	36.66
月份	7	8	9	10	11	12
负载率/%	33.86	29.07	47.06	73.21	97.69	95.41

通过均值法计算出该 1 号变全年负载率为 46.50%,所在变电站的污秽等级为 II 级,年平均温度低于 20 ℃。利用初级的负载能力动态评价模型结合实时环境温度及负载电流,计算得到比例劣化值 $k=0.55$,计算加速劣化评价项目层物元关联度,见表 6。

表 6 1号变压器加速劣化模式下项目层物元的评价结果

Table 6 Evaluation results of project layer matter-element under accelerated deterioration mode of

No.1 transformer

评价物元	良好	较好	一般	注意	严重
油色谱物元	-0.855	-0.858	-0.827	-0.691	0.012
油化试验物元	-0.511	-0.356	-0.137	-0.006	-0.373
检修历史物元	-0.390	-0.148	0.037	-0.201	-0.416
运行环境物元	-0.385	-0.160	0.062	-0.187	-0.400
外观检查物元	-0.221	0.047	-0.261	-0.507	-0.631
绕组试验物元	-0.848	-0.855	-0.805	-0.646	-0.063
套管试验物元	-0.703	-0.726	-0.682	-0.578	-0.178
有载开关物元	-0.310	-0.323	-0.147	-0.082	-0.281
附件试验物元	-0.285	0.030	-0.127	-0.418	-0.563
其他项目物元	-0.521	-0.515	-0.504	-0.485	0.004

计算基于加速劣化模式下的状态因子 $f_2=3.923$, 由总威胁系数 $\varepsilon=0.72$ 代入式(10)得到 $f=3.623$, 再将不良工况系数对 f 进行修正得到该变压器运行状态评分 $T=23.13$ 。

5.5 设备缺陷评分对状态结果影响

根据该变电站 2010-11-11 至 2012-07-22 1 号变压器故障统计数据, 估算基于威布尔分布的变压器各部件的尺度参数 a 和形状参数 b , 见表 7。

表 7 1号变压器部件的取值

Table 7 Value of No.1 transformer's components

部件	a	b
本体	2 212.191 0	1.015 10
套管	2 803.879 1	1.234 70
冷却系统	2 861.209 7	0.954 50
分接开关	2 795.640 0	1.381 60
非电量保护	2 895.986 0	1.091 00

根据该变电站提供的 1 006 条变电故障记录, 整理出 5 年来该 1 号变压器故障事件并查阅变压器缺陷等级系数表, 得到缺陷修正 F_a 为 0.95, 可靠性得分修正 F_b 为 0.333。

部件状态修正系数通过评价近年来变压器 5 大部件的外观状况。该 1 号变压器曾在 2007-08-19 1 号主变 35 kV 侧 311 开关机构箱三级阀至 311 开关 C 相控排油阀的常高压油管连接头出现严重漏油, 本体和分接开关外观没有发现漏油等现象。外观修正系数 $F_c=0.833 3$ 。最终得到缺陷评分 $F=0.95$ 。

5.6 评判结果分析

最终得到 1 号变压器整体状态评分 G 为: 40.461, 整体处于“注意”状态, 并接近“严重”状态。实际状况显示: 该 1 号变压器 B 相绕组连同套管直流电阻、铁心及夹件绝缘电阻、绕组连同套管的介损及电容量试验结果不满足《电力设备预防性试验规程(Q/CSG 10007—2011)》要求。高、中、低压绕组连同套管直流电阻较 2011 年测试值变化率分别达到 -50.5%、3.9%、37.9%; 高中、低压绕组连同套管的介损较 2011 年测试值变化率分别为 282.5%、220.8%, 电容量变化率分别为 4.23%、23.34%; 铁心及夹件绝缘电阻为“0”, 绝缘电阻测试仪 2 500、1 000、500 V 均无法建压; 建议进行排油检查、返厂大修处理。由评价结果可知, 该模型计算结果与变压器实际情况较为吻合。

6 结语

变压器健康状态评价是实现变电站状态检修中最重要的支持性技术性措施。随着以微电子技术、计

算机技术、通信技术等为基础的在线监测技术发展完善, 通过变压器健康状态评价系统与其他相关技术、管理措施和信息系统的有效融合及相互配合, 从而实现传统的定期检修向状态检修的完全过渡。文中基于多源数据建立了变压器状态评价模型, 综合利用多源信息, 采用相对劣化度模型, 对变压器状态进行了综合评价, 克服传统状态评价方法的缺陷和不足, 提高了状态评价的准确性。基于该状态评价方案, 对超高压公司实际运行的某台变压器开展了评价分析, 分析结果与变压器实际情况吻合, 为今后运维人员进行电力设备评价提供了有效参考。

参考文献:

- [1] 陈荣柱. 电力系统检修策略浅谈[J]. 高电压技术, 2005, 31(7): 84-85.
CHEN Rongzhu. Discussion on exam and repairing policy in electric power system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(7): 84-85.
- [2] 张宝贵. 输变电设备状态评估技术的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 208-210.
ZHANG Baogui. Application of condition assessment of the power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 208-210.
- [3] 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(s): 367-371.
YANG Guowang, WANG Junhua, YANG Shuying. Application of fault analysis to large-scale power transformer faults study[J]. Power System Technology, 2006, 30(s): 367-371.
- [4] 刘少宇. 英国供电企业采用依据局部放电监测技术的输变电设备状态评估管理体系[J]. 中国电力, 2006, 39(5): 86-89.
LIU Shaoyu. Condition-based assessments with partial discharge monitoring applied by U.K. electricity supply industry[J]. Electric Power, 2006, 39(5): 86-89.
- [5] 张涛, 蔡金锭, 张孔林. 电压响应方法在电力变压器状态评估中的应用(英文)[J]. 高电压技术, 2008, 34(12): 2674-2680.
ZHANG Tao, CAI Jinding, ZHANG Konglin. Application of voltage response method to condition assessment of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12): 2674-2680.
- [6] 杨映滋, 罗日成, 黄知明, 等. 模糊集对分析在大型变压器状态评价中的应用[J]. 电气技术, 2013(1): 29-33.
YANG Yingzi, LUO Richeng, HUANG Zhiming, et al. Fuzzy set pair analysis in transformer condition evaluation[J]. Electrical Engineering, 2013(1): 29-33.
- [7] 李伟涛. 电力变压器劣化状态综合评价方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.

- LI Weitao. Study on deterioration state of the power transformer comprehensive evaluation method [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [8] 回 敬. 电力变压器状态评价方法的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
- HUI Jing. Research on the evaluation method for power transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [9] 李燕青, 律方成, 刘国平, 等. 我国电气设备状态维修的发展与实现[J]. 中国电力, 2003, 36(2): 16-19.
- LI Yanqing, LYU Fangcheng, LIU Guoping, et al. Development and implementation of condition based maintenance for electrical equipments in China[J]. Electric Power, 2003, 36(2): 16-19.
- [10] 张 宏, 王 健, 文福拴, 等. 兼顾可靠性和经济性的电力设备最优状态维修策略[J]. 电力科学与工程, 2006(2): 8-13.
- ZHANG Hong, WANG Jian, WEN Fushuan, et al. Optimal scheduling of condition-based maintenance for electric equipment considering reliability and economy[J]. Electric Power Science and Engineering, 2006(2): 8-13.
- [11] 钟家喜, 朱月香, 吴 忠, 等. 高压开关设备状态检修策略浅议[J]. 高电压技术, 2004, 30(12): 61-62.
- ZHONG Jiaxi, ZHU Yuexiang, WU Zhong, et al. Brief discussion on scheme of state maintenance for high voltage switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(12): 61-62.
- [12] 廖瑞金, 黄飞龙, 杨丽君, 等. 变压器状态评估指标权重计算的未确知有理数法[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2219-2224.
- LIAO Ruijin, HUANG Feilong, YANG Lijun, et al. Calculation method of power transformer condition assessment index weight using unascertained theory[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2219-2224.
- [13] 廖瑞金, 黄飞龙, 杨丽君, 等. 多信息量融合的电力变压器状态评估模型[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1455-1460.
- LIAO Ruijin, HUANG Feilong, YANG Lijun, et al. Condition assessment of power transformer using information fusion[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1455-1460.
- [14] 孙海斌, 周淑雄, 谢敬东, 等. 模糊综合评价在负荷最优组合预测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(4): 8-11.
- SUN Haibin, ZHOU Shuxiong, XIE Jingdong, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation for optimizing combined load forecasting[J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13(4): 8-11.
- [15] YAO A W, CHI S C, CHEN J H. An improved grey-based approach for electricity demand forecasting[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(3): 217-224.
- [16] 谢春丽, 夏 虹, 刘永阔, 等. GM(1,1)灰色模型在核电设备趋势预测中的应用[J]. 核科学与工程, 2007, 27(2): 138-142.
- XIE Chunli, XIA Hong, LIU Yongkuo, et al. Application of GM (1,1) gray model in trend prediction of the nuclear power plants[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(2): 138-142.
- [17] 汪 菁, 苏 炜. 考虑专家水平的土木工程质量综合评估模型[J]. 数学的实践与认识, 2005, 35(1): 18-22.
- WANG Jing, SU Wei. The synthetical appraisal model considering experts' professional level for civil engineering quality[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2005, 35(1): 18-22.
- [18] ZHOU Jingjing, WANG Youyuan, CHEN Weigen, et al. Study on power transformer reliability based on posbist reliability theory and fault tree analysis method[J]. Proceedings of 14th Asian Conference on Electrical Discharge, 2008(1): 285-288.
- [19] 杜 林, 袁 蕾, 熊 浩, 等. 电力变压器运行状态可拓层次评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 897-903.
- DU Lin, YUAN Lei, XIONG Hao, et al. Extension hierarchy assessment for operating condition of power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 897-903.
- [20] 廖瑞金, 张懿议, 黄飞龙, 等. 基于可拓分析法的电力变压器本体绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 521-526.
- LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, HUANG Feilong, et al. Power transformer condition assessment strategy using matter element analysis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 521-526.
- [21] 熊 浩, 陈伟根, 杜 林, 等. 基于 T-S 模型的电力变压器顶层油温预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 15-19.
- XIONG Hao, CHEN Weigen, DU Lin, et al. Study on prediction of top-oil temperature for power transformer based on T-S model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 15-19.
- [22] 卢绪祥, 李录平, 张晓玲, 等. 基于相对劣化度模型的大型汽轮机状态综合评价[J]. 动力工程, 2006, 26(4): 507-510.
- LU Xuxiang, LI Luping, ZHANG Xiaoling, et al. Comprehensive state evaluation of large steam turbines based on relative inferiority degree models[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(4): 507-510.
- [23] 骆思佳. 电力变压器运行状态分级评估模型的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- LUO Sijia. Study on grading assessment model for power transformer operation condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [24] Q/CSG 11001—2010 110 kV~500 kV 油浸式电力变压器(电抗器)状态评价导则(试行)[S]. 2010.
- 张 晗(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事变电状态监测技术、设备运行分析方面工作。