

考虑参数冗余度的变压器状态评估方法

为适应变压器向大容量化、高电压化和状态检修方向发展的趋势，进一步提高变压器状态评估结果的准确性，本文依据相关技术标准及设备运行记录，建立了关键参数提取的向量模型并计算其相似性，构建了变压器状态评估指标体系。在此基础上建立了基于多源信息的变压器物元评估模型，采用区间可拓学原理等算法确定指标权重，并给出了实例验证。最后基于运维数据平台，设计开发了变压器状态评估专家系统，将研究成果予以实现。结果表明，本文提出的变压器状态评估指标体系更具有针对性，状态评估方法有效可行。

常安¹ 张晗¹ 王奇¹ 陈岳¹ 周源² / 1. 南方电网超高压输电公司检修试验中心
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



常安/工程师

关键词/Keywords

变压器 ·
评估指标体系 ·
状态评估 ·
物元理论 ·
专家系统 ·

0 引言

随着国民经济对电力需求的持续增长以及电网规模的不断扩大，电网系统智能化成为当前电网建设的重要内容。以设备的当前实际工作状况为依据，通过状态监测、状态评估和寿命预测来判断设备运行的状态，即状态检修模式，是电力系统发展的必然趋势。

变压器状态检修工作的核心是确定变压器的状态。国内外在变压器状态评估方面开展了大量工作。国内有专家从工程实践角度进行变压器绝缘状态的评估，总结了常见的变压器功能失效模型；也有专家综合变压器试验项目、运行工况和家族缺陷史等状态信息，以灰色聚类法综合各指标白化权函数值来评估运行状态。国外专家运用模糊数学理

论，针对预试数据提出一种电气设备健康状态评估的新算法。然而目前研究主要集中在单一或少量参数，未考虑变压器运行状态和各种试验、运行条件和设备历史信息等参数之间的综合关系；且状态评估参数不统一，未考虑评估参数的有效性和冗余度。

本文研究了评估参数的有效性问题，采用SWOT分析方法构建了分层分级的变压器状态监测与评价体系；基于区间域的层次可拓评估算法，建立了变压器运行状态评估的物元模型；设计开发了状态评估专家系统，将研究成果予以实现。

1 状态评估指标体系构建

目前反映变压器运行状态的参数并没有统一的标准，部分参数对变压器状态特性反应不灵敏，甚至造成误判。种类繁多的参数会给数据分析带来不必要的冗余和低效。因此，有必要建立基于技术监督的关注度、参数的重要性和设备状态监测理论等方面的状态评估指标体系，以解决变压器状态信息间的不确定性和模糊性问题。

1.1 指标体系建立的数学模型

Tanimoto 系数又称为广义Jaccard系数，可以度量文档数据的相似性，其测度两个模式的共有特征和共占有特征的比。

$$T(X,Y)=\frac{X \cdot Y}{\|X\|^2 + \|Y\|^2 - X \cdot Y}$$
$$= \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i} \tag{1}$$

国家高技术研究发展计划(863计划)
(2012AA050209)

式中, 向量 $T(X, Y)$ 称为Tanimoto系数, 其值介于0和1之间, 代表了 X 和 Y 之间向量方向间的某种差别。

$|d|$ 越接近1, 向量越接近; $|d|$ 越接近于0, 向量越远离。

通过Tanimoto系数可以得出变压器各参数向量与标准向量的相似度, 进而作为指标体系建立的依据。

定义的变压器状态评估关键参数提取向量如下

$$\beta_n = [A, B, C, D, \dots] \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

式中, A 、 B 、 C 、 D 等均为各关键参数提取依据, 提及的为1, 未提及的为0, 其中, A 为缺陷记录统计, B 为故障记录统计, C 为预防性试验异常报告, D 为南网调度规程, E 为反事故措施, F 为风险预控措施及特维方案, G 为运行数据多维度分析工作规范。

定义关键状态参数标准向量为:

$$\beta_0 = [1, 1, 1, 1, \dots] \quad (3)$$

即代表关键参数在每项提取依据中均被提及, 可以定义在各依据中均有提及的参数为标准关键参数, 其向量为关键参数提取标准向量。

将每个参数的提取向量与标准向量进行向量相似性系数计算, 高于标准的参数形成变压器的状态评估指标体系。

1.2 指标体系构建

通过梳理现有油浸式变压器运行参数、停电预试数据、在线监测参数、人工巡视数据及带电测试数据, 结合设备台账信息、出厂试验信息等参数, 建立了全面反应变压器状态的基础参数体系, 共35项, 见表1 (限于篇幅仅节选部分)。

按照第1.1节方法所示, 将各参数在其提取依据中的涉及情况汇总, 建立各参数的提取向量。在表1中, A 为缺陷记录统计, B 为故障记录统计, C 为预防性试验异常报告, D 为南网调度规程, E 为反事故措施, F 为风险预控措施及特维方案, G 运行数据多维度分析工作规范。

其中, 参数提取标准向量为 $\beta_0 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$, 通过计算各参数提取向量和标准向量的Tanimoto系数, 可得到如下结果, 见表2。

表2 Tanimoto系数计算结果

参数序号	Tanimoto系数	参数序号	Tanimoto系数
1	0.29	19	0.43
2	0	20	0.29
3	0	21	0.29
4	0.14	22	0
5	0.29	23	0
6	0.14	24	0.14
7	0.14	25	0.29
8	0	26	0.14
9	0	27	0.14
10	0.14	28	0.29
11	0.14	29	0.29
12	0	30	0.29
13	0	31	0.29
14	0	32	0.29
15	0.14	33	0
16	0.29	34	0
17	0.14	35	0.29
18	0.29	—	—

图1 PQDIF文件一致性测试系统组成架构

参数序号	参数	提取依据							关键参数提取向量
		A	B	C	D	E	F	G	
1	短路情况		✓			✓			[0,1,0,0,1,0,0]
2	过励磁次数								[0,0,0,0,0,0,0]
3	绕组热点温度						✓		[0,0,0,0,0,1,0]
4	运行油温							✓	[0,0,0,0,0,0,1]
5	红外测温	✓					✓		[1,0,0,0,0,1,0]
6	绕组变形测试		✓			✓			[0,1,0,0,1,0,0]
7	绕组直流泄漏电流								[0,0,0,0,0,0,0]
8	绝缘电阻测试								[0,0,0,0,0,0,0]
9	总烃						✓		[0,0,0,0,0,1,0]
10	乙炔		✓				✓		[0,1,0,0,0,1,0]
...	...	...	...						
35	腐蚀性硫		✓				✓		[0,1,0,0,0,1,0]

通过专家调查法，确定将Tanimoto系数大于0.1的参数作为油浸式变压器设备本体部件的关键参数，将其汇总形成状态评估指标体系（限于篇幅仅节选部分）如下，见表3。

表3 变压器状态评估指标体系

分类	参数描述
运行工况	短路情况 中性点直流电流
巡视及检查	渗漏油 本体油位 ...
高压试验	绕组连同套管直流电阻 绕组直流电阻 ...
色谱分析	总烃 乙炔 ...
简化试验	油中糠醛含量 油介质损耗因数 ...

2 基于物元理论和可拓集合论的状态评估方法

本文建立了状态评估指标体系，对其进行量化的基础上，采用物元理论和可拓集合论进行多维度状态评估。流程如图1所示。

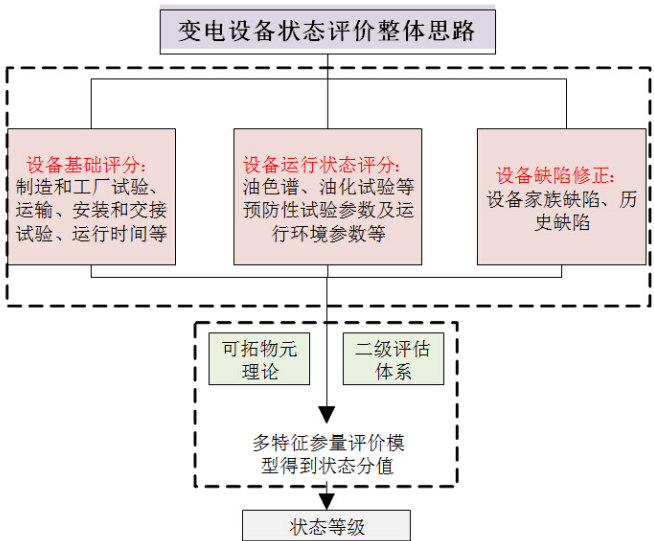


图1 变压器状态评估流程

2.1 基础评分B计算

依据南方电网公司状态评价导则技术标准，并参考表4及式（4）得到基础评分。

$$B=60+\sum_{i=1}^n B_i \tag{4}$$

式中，B为基础总评分；B_i为各项得分情况。

表4 基础评分参考

项目	依据及评分
制造和工厂试验	制造商质量信誉良好 (B ₁ ≤5分)
	关键工序无返工 (B ₂ ≤5分)
	全部工厂试验顺利，且符合相关标准要求 (B ₃ ≤5分)
	反映设备状态的试验值远没有接近注意值 (B ₄ ≤5分)
	运输、安装顺利，且完全符合制造商要求 (B ₅ ≤4分)
运输、安装和交接试验	交接试验全部合格、且不受环境因素影响的交接试验与出厂试验基本一致 (B ₆ ≤6分)
家族设备安全运行 记录运行时间	已运行同型设备的可靠性记录良好 (B ₇ ≤10分)
	B ₈ =-运行年数

2.2 运行状态评分T计算

变压器状态信息包括预防性试验数据、运行记录、检修历史、附件状态、外观检查和运行环境等数据。以指标数据的获得是否需要设备停电为基准建立分级评价指标体系，当带电评价得出设备处于中间状态（即“一般”和“注意”状态），需继续进行停电评价以得到明确结论，最后综合带电与停电二级评价的结论对设备健康状况做出整体判断。下面以带电评判模型说明具体步骤。

1) 构建评价物元。把运行状态带电评价作为总的物元，下面包括h(1≤h≤5)个评判项目，每个评判项目可以看作一个物元，共组成5个物元(p₁, p₂, ..., p₅)。

2) 确定物元经典域、节域及待评估物元

$$R_j = (N_j, C, V_j) = \begin{pmatrix} N_j & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_j & c_1 & \langle \alpha_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle \alpha_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & v_2 & \langle \alpha_{jn}, b_{jn} \rangle \end{pmatrix} \tag{5}$$

式中， N_j 代表变压器某项目物元所划分的第 j 个评价等级，本项目中 j 分别定义为：正常，注意，异常，严重四个评价等级； C_j 为该项目指标中的第 j 个评价指标； V_j 为 N_j 关于指标 C_j 所规定的量值范围，即经典域，依据南方电网公司企业标准Q/CSG114002-2011《电力设备预防性试验规程》确定。对待评物元，把检测得到的数据或分析的结果用物元 R 表示。

$$R = \begin{pmatrix} p & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{pmatrix} \tag{6}$$

式中， p 为待评物元； v_i 为 p 关于项目指标 C_i 的量值，即获取项目指标的具体数据进行量化后的值。

确定模型的节域，具体为：

$$R_p = (p, C_i, V_{pi}) = \begin{pmatrix} p & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p & c_1 & \langle \alpha_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle \alpha_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle \alpha_{pn}, b_{pn} \rangle \end{pmatrix} \tag{7}$$

式中， v_{pi} 为 p 关于项目指标 C_i 所取的量值范围，即节域 $\langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 为 v_i 的 $\pm 5\%$ 扩展区间。

对油色谱数据、油化试验和电气试验等定量数据产生误差在 $\pm 5\%$ 范围内，需将原始数据根据误差范围扩展为一个区间，如测量 H_2 含量为 35.67×10^{-6} ，考虑5%的误差影响后，扩展为区间 $[33.887, 37.454]$ 。

3) 确定各指标权重。采用层析分析法与灰色关联理想解法确定指标常权，引入了基于均衡函数的变权模式，综合考虑指标间的均衡性，对常权（采用层次分析法，依据专家打分得到常权）进行修正得到变权。

4) 计算物元各指标状态等级的关联度。通过计算该物元下面各指标关于各状态等级的关联度，然后再对之求加权和可得。令

$$K_{j(v_i)} = \begin{cases} \frac{\rho(v_i, v_{ji})}{\rho(v_i, v_{pi}) - \rho(v_i, v_{ji})} & v_i \notin v_{ji} \\ \frac{-\rho(v_i, v_{ji})}{|v_{ji}|} & v_i \in v_{ji} \end{cases} \tag{8}$$

式中， $\rho(v_i, v_{ji})$ 、 $\rho(v_i, v_{pi})$ 分别表示点 v_i 与区间 v_{ji} 和 v_{pi} 的距； $K_j(v_i)$ 表示第 i 个特征关于第 j 个状态等级的关联度，等价于模糊数学中描述模糊集合的隶属度。

各指标关于各状态等级的关联度在考虑指标重要性下的综合值，用以描述待评估系统各指标关于五个评价等级 j 的归属程度，关联度的取值范围是整个实数轴 $K_j(v_i) \geq 0$ 表示指标属于等级 j ，其值越大则此指标具有等级 j 的属性越多。

评估模型为三层物元层次模型，指标体系从上往下分别为目标层、项目层和指标层三个层次，目标层是变压器运行状态的评估结果。利用加权求和的算法，由指标层推算出目标层的评价等级。

5) 计算状态因子 f 。令

$$K_j^-(P) = \left\{ \frac{K_j(P) - \min K_j(P)}{\max K_j(P) - \min K_j(P)} \right\} \tag{9}$$

$$f = \sum_{j=1}^4 j K_j^-(P) / \sum_{j=1}^4 K_j^-(P) \tag{10}$$

从 f 判断变压器运行所处的状态，得到百分制分值 $T = 100(1 - f/5)$ 。

2.3 缺陷修正系数F计算

缺陷修正系数 F 按照式（11）计算得到：

$$F = a F_1 + b F_2 \tag{11}$$

式中， F_1 为设备家族缺陷系数； F_2 为设备历史缺陷系数； a 、 b 分别为 F_1 和 F_2 的权重，由专家经验获得。

2.4 状态最终评分G计算

变压器状态最终评分 G 计算，见下式：

$$G = (w_1 B + w_2 T) \times F \tag{12}$$

最终状态分值 G 为百分制分数， w_1 和 w_2 分别为 B 和 T 的权重。对 G 按照表5进行分级，得到“正常，注意，异常，严重”四个等级，见表5。

表5 变压器状态分级表

状态等级	正常	注意	异常	严重
G取值范围	80~100	65~80	50~65	0~50

2.5 实例分析

某500 kV换流站 1[#]联变A相，于2002年6月17

日投运，类型为油浸式单相自耦变压器，电压等级为525/230/35 kV。

对制造、工厂试验、运输、安装、交接试验、家族设备安全运行记录及运行年限进行扣分，得到基础评分 $B=83$ 。

预防性试验项目，即带电运行中的油色谱分析、油化试验分析、检修历史分析、运行环境分析和外观检查的5个项目层数据，以及停电评估中绕组试验项目、套管试验项目、分接开关项目和其他项目等5个项目指标层的各项指标均无异常，全年负荷率等数据良好，通过计算得到各个指标的物元。采用变权模式计算各带电及停电评判因素、指标的组合变权，得到最终指标权重。

计算各个指标层物元的关联度结合表6所得变权值，再计算得到带电及停电评价项目层物元的关联度，然后计算得到该变压器目标层状态物元。

表6 某换流站500 kV 1#联变A相项目层物元评价结果

评价物元	良好	较好	一般	注意	严重
油色谱物元	0.022	-0.889	-0.938	-0.961	-0.973
油化试验物元	-0.139	-0.167	-0.445	-0.649	-0.781
检修历史物元	0.05	-0.25	-0.625	-0.75	-0.812
运行工况物元	0.036	-0.181	-0.59	-0.727	-0.795
运行环境物元	0.05	-0.25	-0.625	-0.75	-0.812
外观检查物元	0.05	-0.25	-0.625	-0.75	-0.812
绕组试验物元	-0.353	-0.445	-0.414	-0.46	-0.537
套管试验物元	-0.054	-0.449	-0.623	-0.752	-0.819
有载开关物元	-0.083	-0.255	-0.211	-0.189	-0.242
附件试验物元	-0.167	0.05	-0.375	-0.583	-0.688
其他项目物元	-0.28	0.033	-0.138	-0.426	-0.569

综合项目层的各项目物元对5级状态等级的关联度，得到目标层带电和停电的评价结果，即 $f_1=1.453$ ； $f_2=1.836$ 。进而得到带电评价分值为95.41，停电评价分值95.27，求其均值得到运行状态总分 $T=95.34$ 。

调用系统相关统计数据记录，得到设备家族缺陷系数 $F_1=0.95$ 。统计该变压器近期发生的故障次数，得到缺陷故障修正系数 $F_2=0.7692$ 。综合 F_1 、 F_2 得到缺陷修正系数 $F=0.93192$ 。

设备状态最终评分 $G=(0.2B+0.8T) \times F=86.549$ ，即某换流站500 kV 1#联变A相处于“正常”状态，表明该变压器运行中状态良好，环境条件不影响安全使用，所有预防性试验指标均处于稳定且在规程规定的警示值、注意值的范围内，可以正常运行。

3 专家系统设计与开发

变压器状态评估专家系统的开发和运行应满足于电网公司实际生产需求，通过变压器多源异构状态信息的全景融合，构建设备管理的一体化、现代化和智能化信息平台。

专家系统的整体架构可以划分为四个层次，如图2所示。

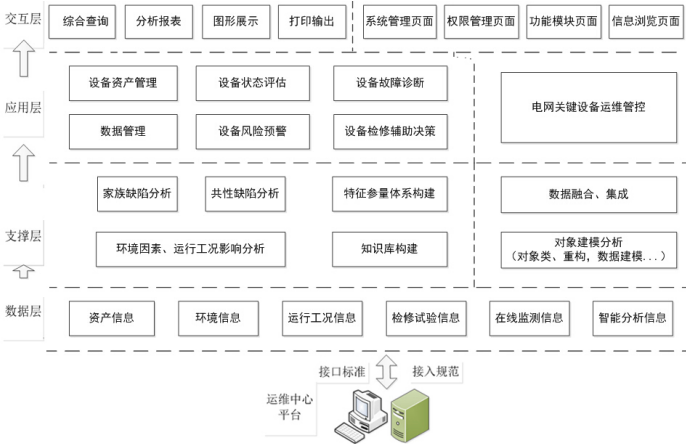


图2 变压器状态评估专家系统结构

1) 数据层：运维中心平台数据库中集成了在线监测信息、生产管理系统同步的检修、试验信息和SCADA系统交互的实时状态量信息构建的实时数据库，以及GIS系统数据、气象信息和离线数据等多源数据，根据相应的数据接入标准和接入规范，通过多源信息融合及规范化技术实现多源异构数据的标准化和全景集成。

2) 支撑层:通过外部接口,基于多源数据集融合技术以及对象建模技术实现数据的标准化与规范化后,对变压器全景信息数据进行发掘。基于运行状态参量的历史数据,分析设备的家族缺陷信息、共性缺陷信息,并研究分析复杂自然环境及多变运行工况下对设备运行状态的影响。在此基础上,构建变压器特征参量体系和设备知识库,为高级智能算法的应用提供支撑。

3) 应用层:基于变压器的特征参量体系和电网关键设备知识库构建,研究状态评估等智能算法,实现专家系统的状态评估、具有自学习的人工干预等高级功能,实现设备的运维管控。

4) 交互层:提供良好的交互界面,提供系统管理、权限管理、功能模块管理和信息浏览等基本功能模块,并提供综合查询、图形展示、分析报告以及打印输出等多种交互功能。

4 结束语

1) 构建了变压器状态评估指标体系,采用SWOT分析方法建立了评估参数提取的向量模型,降低了评估参数的冗余度,提高了评估指标的有效性。

2) 采用基于区间域的层次可拓评估算法,建立了设备运行状态评估的物元模型。通过对某换流站变压器的运行状态评估指标进行评判,对模型进行了实例分析。

3) 基于运维中心平台数据库,通过多源信息融合及规范化技术实现多源异构数据的标准化和全景集成,设计开发变压器多层次多维度智能专家系统,将研究成果予以实现。

参考文献

- [1] 操敦奎.变压器油中气体分析诊断与故障检查[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [2] 黄建华,全零三.变电站高压电气设备状态检修的现状及其发展[J].电力系统自动化,2001,(8): 56-61.
- [3] Sokolov V, Berler Z, Rashkes V. Effective methods of assessment of insulation system condition in power transformers: A view based on practical experience [C].Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference,1999,(1):

659-667.

- [4] 袁志坚,孙才新,袁张渝,等.变压器健康状态评估的灰色聚类决策方法[J].重庆大学学报,2005,28(3): 22-25.
- [5] 张金萍,刘国贤,袁泉,等.变电设备健康状态评估系统的设计与实现[J].现代电力,2004,21(4): 45-49.
- [6] 刘娜,梁国栋,王刘芳,李伟,高文胜,谈克雄.电力变压器故障模式的分析及危害评估[J].高电压技术,2003,29(2):3-5,8.
- [7] 辜超,刘民.远程变压器状态检修专家系统软件的开发[J].高电压技术,2002,28(5): 43-45.
- [8] 袁志坚,孙才新,李剑,等.基于模糊多属性群决策的变压器状态维修策略研究[J].电力系统自动化,2004,28(11):66-70.
- [9] Paoletti G, Baier M. Failure contributors of MV electrical equipment and condition assessment program development [C]. Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1 2001, 7(1): 37-47.
- [10] 黄华,傅晨钊.大型电力变压器状态分析综述[J].华东电力,2004,32(3):24-26.
- [11] 潘翀.电力变压器绝缘故障诊断技术及热状态参量预测模型研究[D].重庆大学博士学位论文,2009.
- [12] 姚玉斌,刘仲免,陈勇.基于CIM的电力变压器模型分析[J].电力系统自动化,2005,29(18):57-61.
- [13] 孙宏斌,吴文传,张伯明,等.IEC 61970标准的扩展在调度控制中心集成化中的应用[J].电网技术,2005,29(16): 21-25.
- [14] Xiaofeng Wang, Noel N Schulz, Scott Neumann. CIM extensions to electrical distribution and XML for the IEEE radial test feeders [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1021-1027.
- [15] Xuzhu Dong, Yilii Liu, Frank A LoPinto, et al. Information model for power equipment diagnosis and maintenance [C]. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 27-31 January 2002 , (2): 701-706.

作者简介

常安(1984-),男,硕士,工程师,主要研究输变电设备状态监测。

(收稿日期:2015-11-20) **EA**

(编辑:朱历)