

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.05.023

基于故障特征隶属函数的电网主设备风险评估方案研究与应用

田 雨, 张 晗

(中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663)

摘要: 目前对电网主设备风险评估方法的研究处在发展阶段,且存在不同类型评估对象的评估特征没有通用性、传统评估方法存在人为因素影响和不区分各指标重要程度等问题,笔者在南方电网公司变压器、断路器等电网主设备状态评估导则建立的故障树的基础上,结合设备现场运行数据和故障分布,提出基于隶属函数、相对劣化度、加权平均的故障概率评定方法并引入模糊层次分析法确定各底事件、中间事件的相对权重,实现对设备各部件的风险评估。最后通过某500 kV变电站3号主变的风险评估指标进行评判分析,对文中所建立的评估模型进行验证,并根据实际运行、检修情况,证明了该模型的可行性与有效性。文中提出的风险评估方案,在一定程度上克服了主观性强的缺点,使评定结果更符合客观情况,可在南方电网超高压公司推广应用。

关键词: 电网主设备; 风险评估; 故障树; 隶属函数; 模糊层次分析法

Research and Application of Risk Assessment for Power Equipment Based on Fault Feature Membership Function

TIAN Yu, ZHANG Han

(M & T Center, EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: As researches on risk assessment of power equipment is developing, it remains several issues, such as the assessment features of different types of evaluation objects are not universal, traditional assessment methods are vulnerable to human factors and can't distinguish between the importance of each indicator. Based on the fault tree of the condition assessment guidelines of transformers, circuit breakers and other main equipment, combined with field operational data and failure distribution, the article proposes failure probability assessment method derived from the membership function, the relative degree of degradation and weighted average. In this article, it also introduces fuzzy analytic hierarchy process to determine the relative weights of end events and intermediate events, to realize the risk assessment of any equipment components. Finally, it analyzes the risk assessment index of No.3 transformer in a 500 kV substation, verifies the evaluation model, and proves the feasibility and effectiveness of the model according to the actual operation and maintenance situation. The risk assessment program proposed in this article overcomes the disadvantage of subjectivity, making its evaluation results more objective. Thus it could be applied in EHV of China Southern Power Grid Company.

Key words: power main equipment; risk assessment; fault tree; membership function; fuzzy analytic hierarchy process

0 引言

在电气工程领域,有关风险评估的研究目前主

要集中在电力市场、电力系统、电网规划等方面^[1-6]。对于电气设备,尤其是电网主设备风险评估方法的研究则处在发展阶段。文[7]通过基于BP神经网络与遗传算法研究了变压器风险评估中健康指数计

算权重的优化方法,并通过计算权重的优化得到更加准确的变压器健康指数值。文[8]结合模糊层次分析法所需数据少和人工神经网络自学习、信息分布存储、并行处理等优点,提出基于模糊层次分析法——人工神经网络的大型变压器风险评估策略。文[9]采用概率统计方法对风险源的失效可能性进行等级划分,结合可拓层次分析法与工程评价法对变压器风险源的失效严重程度进行评估,然后进行等级划分,在此基础上提出利用高阶风险矩阵对变压器故障风险概率和失效严重程度进行综合评估的方法。文[10]针对不同数据得到的不同方法、不同专家的不同评估意见,将精确数学评判模糊化,提出了赋予权重的基于模糊数学的变压器风险多级模糊综合评判方法。通过 Delphi 专家评议法,确定各风险因素的重要程度系数和向量。采用加权平均模型,对多层次模糊算法进行改进。文[11]采用统计方法,根据各风险发生的概率统计失效可能性,研究了风险失效严重度的 5 个影响因素,并通过运用可拓工程法和层次分析法相结合的方法,将各风险源的失效严重度划分为了 5 个等级,建立了变压器风险矩阵。文[12]用风险评估理论,综合考虑变压器故障概率及故障后导致的资产损失、运行损失,评估变压器运行风险。变压器故障概率根据变压器实时状态信息推算得出,资产损失通过变压器资产和资产损失度反映,运行损失通过潮流越限、电压越限、失负荷等多项指标反映;针对变压器运行风险评估结果采用 ALARP 原则进行风险评级。

综上所述,尽管现阶段国内外对风险评估已有大量相关研究,但由于风险评估涉及的领域和方法极广,风险评估指标及其权值的选择与生产者和管理者的技术经验、生产技术水平、安全管理水平以及社会文化背景等因素密切相关,因此,每种评估方法都有一定专用的评估标准、危险程度分级划分,不同类型评估对象的评估特征没有通用性,且传统评估方法存在人为因素影响、不区分各指标重要程度等问题^[13-21]。且由于变压器、断路器等电网关键设备的风评估是一个复杂的过程,目前还存在评估模型精度不够、评估指标不全面、可靠性不高等问题。因此,对变压器、断路器等电网关键设备进行系统、科学的风险评估是必须和迫切的。

因此,文中在南方电网公司《35 kV~500 kV 油浸式电力变压器(高抗)状态评估导则(试行)》^[22]、《35 kV~500 kV SF₆ 断路器状态评估导则(试行)》^[23]等建立的故障树的基础上,结合设备现场运行数据的获取和故障分布的相关统计,实现了基于隶属函

数、相对劣化度、加权平均的故障概率的评定并引入模糊层次分析法确定各底事件、中间事件的相对权重,给出了各主要部件的典型故障模式和故障严重程度、发生概率和可探测性等 3 个故障风险评价指标,实现了定性定量之间的不确定性转换模型,最后通过实例对所建模型进行了验证。

1 风险评估总体思路

基于故障模式和影响分析(failure mode and effects analysis, FMEA)的故障风险分析是根据电力变压器自身的特点及其功能,分析所有可能的故障模式及影响,在此基础上对设备的每种故障模式进行评估,确定风险优先级指数并给出故障的风险等级。设备 FMEA 分析流程见图 1。

2 风险评估指标的确定

基于 FMEA 的故障风险分析的整个过程中所涉及的风险评估指标为故障严重程度(S_s)、故障发生概率(S_p)和可探测性(S_d)3 个评估指标。

2.1 故障严重程度评估指标 S_s 的确定

故障严重程度由设备损坏、人身安全、供电可靠性和社会影响 4 个要素的损失程度确定,即每一个要素损失程度的加权之和。归一化权重参考建议值见表 1,故障严重程度可表示为

$$S_s = \sum_{k=1}^4 W_{fk} F_k \quad (1)$$

式(1)中: $k=1\sim 4$,1 为设备损坏,2 为人身安全,3 为供电可靠性,4 为社会影响; W_{fk} 要素损失程度的归一化权重; F_k 为某一要素的损失程度,取值参照南方电网公司《输变电一次设备风险评估导则(2014 版试行)》; S_s 故障严重程度。

表 1 要素损失程度的归一化权重

Table 1 Normalized weights of elements loss

要素	设备损坏	人身安全	供电可靠性	社会影响
权重 W_{fk}	0.3	0.2	0.3	0.2

2.2 故障发生概率评估指标 S_p 的确定

1)故障特征量集与故障模式确定。采用 FMEA 分析思路,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得到故障特征参量集,设备涵盖变压器和断路器:①变压器设备由预防性试验数据、油色谱在线监测数据和油化试验数据得到的 19 个故障特征量集,以及器身、绕组、铁心、有载分接开关、非电量保护系统、冷却系统、套

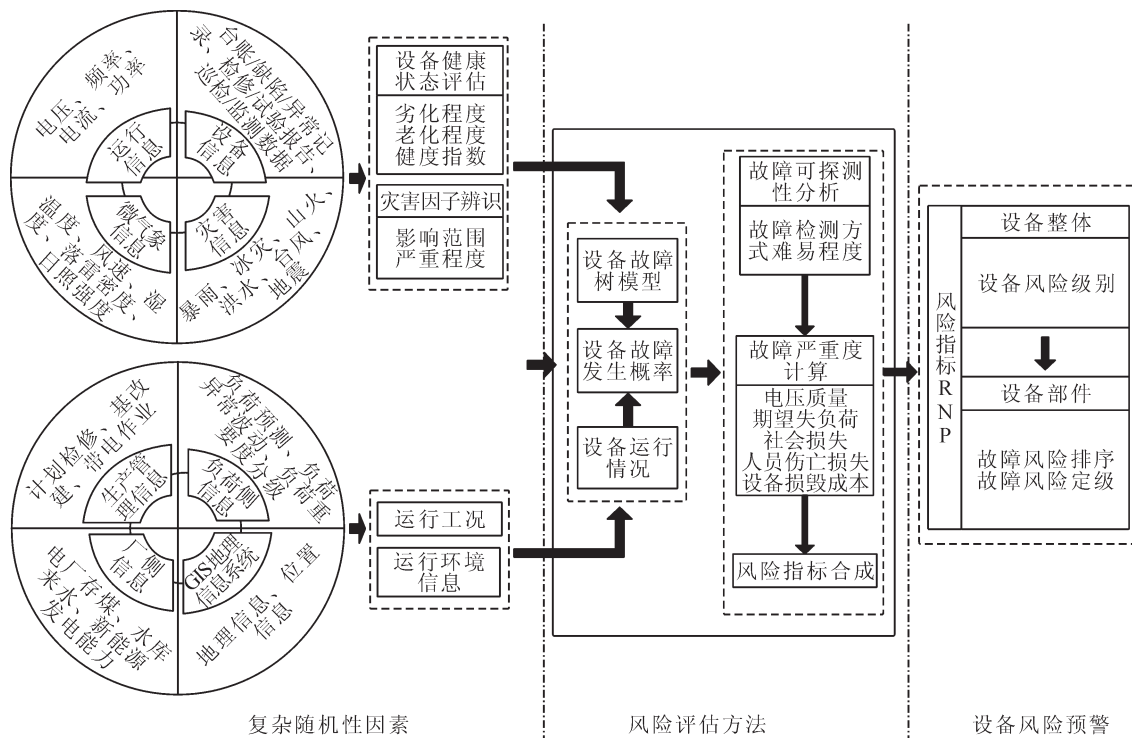


图1 电网主设备风险评估流程

Fig. 1 Risk assessment process of main equipment

管、油枕等8个主要部分的100个故障模式;②断路器设备由预防性试验数据、在线监测数据和巡视数据得到的26个故障特征量集,以及本体绝缘单元、操作机构单元、SF₆气体绝缘单元、机构内部及接触单元、基架结构单元、储能单元、合闸机构单元、分闸机构单元、二次元件单元和机械连接传动单元的25个故障模式。

以变压器为例,其特征参量见表2。在此基础上,可建立各故障模式与故障特征参量之间的对应关系,其部分对应关系见表3。

2)定量故障特征量隶属函数的确定结合指派法中所介绍的典型隶属函数,借助岭形分布,构造岭形分布中偏大型与偏小型的隶属函数。岭形分布隶属函数图见图2,图2(a)表示为

$$\mu(x)=\begin{cases} \frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{2a}(x-a) & x\leq 2a \\ 1 & x>2a \end{cases} \quad (2)$$

图2(b)表示为

$$\mu(x)=\begin{cases} \frac{1}{2}-\frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{2a}(x-a) & x\leq 2a \\ 1 & x>2a \end{cases} \quad (3)$$

单个参量不能很好作为判断故障与否的充要条件,所以构造隶属函数计算隶属度,依据“最大隶属原则”求取该项特征参量的隶属度。

3)定性故障特征量相对劣化度的确定。在参考相关运行、维修规程、导则和标准的基础上,组织专

家根据设备的实际运行经验确定劣化度值($\mu(Y_i)$)与变压器运行状态的对应关系,见表4。

组织专家对各故障模式进行评分。设 n 位专家构成专家集 S ,记为

$$S=\{S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_n\} \quad n \geq 1. \quad (4)$$

若第 t 位专家对某故障特征量 Y_i 进行了相对劣化度评估,其评估分值记为 μ_{it} 。则 n 位专家对 Y_i 的评估分值可记为

$$W=(\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{it}, \dots, \mu_{in}). \quad (5)$$

鉴于专家意见的差异,文中对专家意见进行处理,通过计算总体标准差判断专家意见是否统一,并将专家评价分值的算术平均值作为专家组的评价结果。

4)故障概率的综合评定方法。当故障模式对应多项故障特征量,先计算各故障特征量的权重,再将相应的故障概率与权重相结合。设故障模式 X_i 所对应的故障特征参量为 Y_i (i 为故障模式 X_i 对应所有故障特征量的编号),并组织专家评分确定其相对劣化度 $\mu(Y_i)$,则该故障发生的概率 S_p 为

$$S_p=\mu[\mu(Y_1), \dots, \mu(Y_n)] \times \begin{bmatrix} \omega_{Y_1} \\ \vdots \\ \omega_{Y_n} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式(6)中, $\omega_{Y_1}, \dots, \omega_{Y_n}$ 为各故障特征量的权重,文中采用改进层次分析法来确定特征量权重。

2.3 故障可探测性评估指标 S_d 的确定

故障模式的可探测性是在现有运行和维护策

表 2 变压器故障特征参量集

Table 2 Fault characteristic parameter set of the transformer

编码	特征参量	编码	特征参量
Y ₁	油色谱分析(本体、套管、OLTC)	Y ₁₉	触头接触电阻
Y ₂	油老化实验(本体)	Y ₂₀	操作试验(无励磁分接开关)
Y ₃	吸收比(本体)	Y ₂₁	切换特性试验
Y ₄	油中微水含量(本体、套管、OLTC)	Y ₂₂	接触电阻试验
Y ₅	直流电阻(绕组、OLTC、无励磁分接开关)	Y ₂₃	过渡电阻试验
Y ₆	tanδ(绕组、套管、OLTC 的绝缘油、变压器本体的绝缘油)	Y ₂₄	圆图试验
Y ₇	局部放电(套管、本体、OLTC)	Y ₂₅	噪声测试
Y ₈	套管电容量	Y ₂₆	油泵检查
Y ₉	二次回路绝缘电阻	Y ₂₇	检查温度计
Y ₁₀	铁心外引接地电流	Y ₂₈	检测油位计
Y ₁₁	绝缘电阻(绕组、铁心、套管、OLTC、无励磁分接开关、穿心螺栓、铁轭夹件、绑扎钢带、线圈压环及屏蔽)	Y ₂₉	气样分析(本体和 OLTC 的气体继电器)
Y ₁₂	耐压试验	Y ₃₀	温度(套管、油、绕组、散热器)
Y ₁₃	空载试验	Y ₃₁	密封检查
Y ₁₄	绕组泄漏电流	Y ₃₂	运行巡视
Y ₁₅	绕组短路阻抗	Y ₃₃	运行检测
Y ₁₆	变比试验	Y ₃₄	保护监控
Y ₁₇	变形试验(绕组、铁心)	Y ₃₅	目测
Y ₁₈	瓦斯继电器检查	—	—

注:表中 OLTC 为有载调压开关的缩写。

表 3 变压器故障模式与故障特征参量的对应关系

Table 3 Correspondence of failure modes and fault characteristic parameter of the transformer

部件	代码	故障模式	特征参量	部件	代码	故障模式	特征参量
器身	M1.1	渗漏油	Y ₃₅	瓦斯继电器	M5.1.1	渗漏油	Y ₃₁ 、Y ₃₅
	M1.2	放电	Y ₁		M5.1.2	二次绝缘异常	Y ₉ 、Y ₃₁ 、Y ₃₅
	M1.3	变形	Y ₃₅		M5.1.3	机械部件异常	Y ₁₈
绕组	M2.1	绝缘下降	Y ₁ 、Y ₂ 、Y ₃ 、Y ₄ 、 Y ₆ 、Y ₁₁ 、Y ₁₄		M5.1.4	轻瓦斯发信	Y ₁ 、Y ₁₈ 、Y ₂₉
	M2.2	直流电阻异常	Y ₁ 、Y ₅ 、Y ₁₆ 、Y ₃₀		M5.1.5	重瓦斯动作	Y ₁ 、Y ₂ 、Y ₃ 、Y ₄ 、 Y ₉ 、Y ₂₉
	M2.3	放电故障	Y ₁ 、Y ₇		M5.1.6	安装异常	Y ₃₅
	M2.4	短路故障	Y ₁₂	压力释放阀	M5.2.1	渗漏油	Y ₃₁ 、Y ₃₅
	M2.5	绕组变形	Y ₁₅ 、Y ₁₇		M5.2.2	二次绝缘异常	Y ₉ 、Y ₃₁ 、Y ₃₅
	M2.6	油道阻塞	Y ₃₀		M5.2.3	动作喷油故障	Y ₁ 、Y ₂₉ 、Y ₃₅
	M2.7	过负荷	Y ₃₀ 、Y ₃₄		M5.2.4	二次发信误动	Y ₉
铁心	M3.1	多点接地	Y ₁ 、Y ₁₀ 、Y ₁₁		M5.2.5	压力释放拒动	Y ₃₅
	M3.2	绝缘下降	Y ₁ 、Y ₁₀ 、Y ₁₁ 、Y ₁₃ 、 Y ₂₉	温度计	M5.3.1	二次绝缘异常	Y ₉ 、Y ₃₁ 、Y ₃₅
	M3.3	铁心变形	Y ₁₃ 、Y ₁₇ 、Y ₂₅		M5.3.2	温度指示不准	Y ₂₇
	M3.4	接地不良	Y ₁ 、Y ₁₁		M5.3.3	发信动作异常	Y ₂₇
	M3.5	过励磁	Y ₃₃	油位计	M5.4.1	二次绝缘异常	Y ₉ 、Y ₃₁ 、Y ₃₅
	M3.6	油道堵塞	Y ₃₀		M5.4.2	油位指示高	Y ₃₃
	M3.7	漏磁发热	Y ₁		M5.4.3	油位指示低	Y ₃₃

略下,故障在发生前能够被检测出来的概率。其主要指标有故障的可检测程度、故障分辨率、检测方

法的简便性、检测所花时间的长短和检测所需费用、故障在发生前能够被检测出来的概率等见表 5。

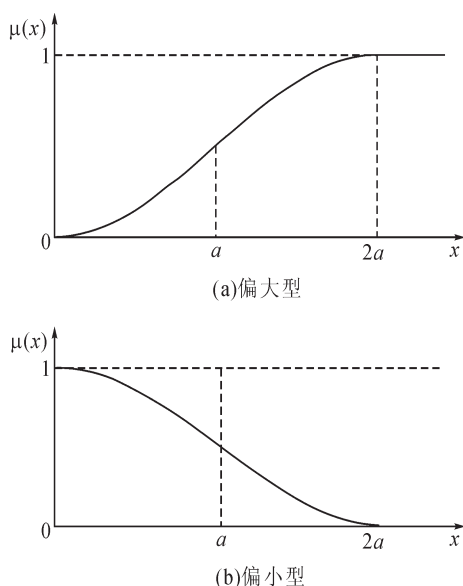


图2 岭形分布隶属函数图

Fig. 2 Ridge-shaped distribution membership function diagram

表4 相对劣化度的语义定义

Table 4 Semantics of the relative degree of degradation

$\mu(Y_i)$ 的取值范围	状态语义描述
0.0~0.2	状态良好,发生故障的可能性很小
0.2~0.4	轻度劣化,设备正常运行,有一定的发生故障的可能性
0.4~0.7	中等劣化,设备偏离正常状态,有轻微故障现象出现
0.7~1.0	设备状态已由劣化状态转到故障状态,有严重故障现象出现

表5 故障可探测性程度分类

Table 5 Classification of the degree of fault detectability

等级名称	可探测性程度	评分(S_d)
返厂	现场不能进行判断	5
吊罩	必须通过吊罩才能判断	4
综合判断	必须通过多种检测结果进行综合分析后才能判断	3
检测	必须通过专门仪器检测后才能判断	2
直观	通过肉眼观察、声响判断、表面温度等直观方法即可判断	1

2.4 设备风险优先级指数的确定

FMEA 风险评估采用故障的严重程度(S_s)、故障发生概率(S_p)和可探测性(S_d)3个评估指标的乘积作为设备故障的风险优先级指数(risk priority number, RPN),见式(7), RPN 越高表示故障模式危害性越大。

$$RPN=S_s \times S_p \times S_d \quad (7)$$

根据 RPN 对变电设备的所有故障模式进行排序确定风险等级并进行相应的评估,然后根据评估结果制定处理措施。

3 某 500 kV 变电站 3 号主变实例分析

3.1 主变基本情况

某 500 kV 变电站 3 号主变 A 相,于 2002 年 6 月 17 日投运,类型为油浸式自耦变压器,电压等级为 500 kV,其基本参数见表 6。

表6 某500 kV变电站3号主变参数表

Table 6 Parameters table of a main transformer in a 500 kV substation

设备名称	某 500 kV 变电站 3 号主变
出厂年月	2002-02-14
投运日期	2002-06-17
电压等级/kV	525/230/35
容量/MVA	250/250/60
油重/t	35
相数	单相
中性点接地方式	直接接地
调压方式	无载
类型	油浸式自耦变压器
冷却方式	ONAN/ONAF/OFAF
油比重	25号矿物油
结线组别	YNad11

3.2 主变部件风险评估过程

1)故障发生概率评价指标 S_p 。根据现有的 3 号主变的相关试验、巡视等数据计算特征参量的风险概率,见表 7。

根据表 7 的计算结果和故障模式与风险特征参量的对应关系计算换流变压器故障模式的风险概率评估指标见表 8。特征参量若没有试验数据,风险概率视为 0。

3 号主变的风险概率结果,由表 8 可得风险概率最大的 5 个部件依次是:概率第 1 的故障位置为器身 $S_{pM1.2}=0.988$;概率第 2 的故障位置为铁心 $S_{pM3.7}=0.988$;概率第 3 的故障位置为绕组 $S_{pM2.3}=0.977$;概率第 4 的故障位置为铁心 $S_{pM3.3}=0.879$;概率第 5 的故障位置为铁心 $S_{pM3.2}=0.734$ 。

2)3 号主变故障严重程度评价指标 S_s 。参照表 1 及《南方电网公司输变电一次设备风险评估导则(2014 版 试行)附表》中的缺陷异常情况统计表计算 3 号主变的风险评估要素损失程度,计算如下:

$$S_s = \sum_{k=1}^4 W_{Fk} F_k = 0.2 \times 3.75 + 0.3 \times 0 + 0.2 \times 5.499 + 0.3 \times 2.001 = 2.450 \quad 1; \text{器身故障的总损失程度为 } S_s = \sum_{k=1}^4 W_{Fk} F_k = 0.2 \times 0.375 + 0.3 \times 0 + 0.2 \times$$

表 7 相关特征参量的风险概率
Table 7 Risk probability of related
characteristic parameter

项目	特征参量	子特征参量的风险概率	风险概率
Y ₁	总烃	0.975	0.988
	H ₂	0.950	
	C ₂ H ₂	0.999	
Y ₂	γ _a	0.907	0.911
	γ _r	0.913	
Y ₃	吸收比	0.619	0.619
Y ₄	油中微水含量	0.192	0.192
Y ₅	直流电阻	0.965	0.965
Y ₆	绝缘油介损	0.958	0.958
Y ₇	局部放电	0.031	0.031
Y ₈	电容量	0.027	0.037
	介损	0.045	
Y ₉	二次回路绝缘电阻	0.107	0.107
Y ₁₀	铁心外引接地电流	0.136	0.136
Y ₁₃	空载试验	0.965	0.965
Y ₁₇	变形试验	0.988	0.988
Y ₁₈	瓦斯继电器检查	0.345	0.345
Y ₃₅	外观检查	0.616	0.616

表 8 相关故障模式的故障概率
Table 8 Probability of failure related failure mode

单元	故障模式	对应特征量	对应特征量权重	故障风险发生概率
A ₁	M1.2	Y ₁	1.000	0.988
A ₂	M2.1	Y ₁ 、Y ₂ 、Y ₃ 、Y ₄ 、Y ₆	0.315, 0.101, 0.258, 0.078, 0.124	0.697
	M2.2	Y ₁ 、Y ₅	0.375, 0.319	0.678
	M2.3	Y ₁ 、Y ₇	0.500, 0.500	0.977
	M3.1	Y ₁ 、Y ₁₀	0.391, 0.308	0.428
	M3.2	Y ₁ 、Y ₁₀	0.391, 0.308	0.734
A ₃	M3.3	Y ₁₃ 、Y ₁₇	0.451, 0.449	0.879
	M3.4	Y ₁	0.391	0.386
	M3.7	Y ₁	1.000	0.988
	M6.1.2	Y ₃₅	0.500	0.308
A ₆	M6.2.3	Y ₃₅	0.500	0.308
	M6.2.4	Y ₃₅	0.237	0.146
	M7.1	Y ₅	0.667	0.644
A ₇	M7.2	Y ₁ 、Y ₅ 、Y ₆	0.299, 0.225, 0.237	0.740
	M7.3	Y ₅	0.512	0.494

3.75+0.3×2.472=1.566 6; 铁心故障的总损失程度为

$$S_s = \sum_{k=1}^4 W_{Fk} F_k = 0.2 \times 0 + 0.3 \times 0 + 0.2 \times 6 + 0.3 \times 0 = 1.2。$$

3)故障可探测性评价指标 S_{do} 参照表 4 及《110 kV~500 kV 油浸式电力变压器 (电抗器) 状态评价导则 (试行)》中故障树附表得到 3 号主变各部件故障可探测性评价指标,绕组为 2,器身为 2,铁心为 3。

3.3 主变风险评估结果分析

1)风险值 RPN 大小部件分别是:绕组 $M2.3=4.787$; 铁心 $M3.7=3.557$; 铁心 $M3.3=3.164$; 器身 $M1.2=3.096$; 铁心 $M3.2=2.642$ 。

2)绕组 M2.3(放电故障)和铁心 M3.7(漏磁发热)、M3.3(铁心变形)故障模式的风险评估指标较大,说明最有可能存在的故障模式是绕组放电故障、铁心发热及变形故障。设备整体运行异常,风险较大。

3)该 500 kV 变电站 3 号主变的实际情况:从该变压器故障后的试验检查情况分析,串联绕组的直流电阻从 196 mΩ 降低到 46.6 mΩ, 低压线圈对高中线圈、地的电容量增大 23.64%。内部进箱检查发现:整个油箱内部污染严重;高压串联绕组的上部纠结区域线饼有烧损,220 kV 引线出头处绝缘件有破损及移位,上箱盖变形;高压线圈上端小角环受损移位,压圈下部铁轭垫块有移位受损,高压外侧围屏爆开,围屏绑带拉断。该变压器日常运行中负荷较低,采用新疆克拉玛依 25 号油,可以排除腐蚀性硫造成匝间绝缘降低,并导致变压器内部故障的可能性,与文中风险评估结果相符。

4 结论

文中研究了电网关键设备风险评估方法,在设备 FMEA 分析的基础上,确定了风险评估的 3 个指标及评估标准,通过风险优先级指数实现了对设备故障的风险评估。主要得到如下结论:

1)通过对现有设备特征参量作进一步的分析和比较,筛选出能够有效反映设备可靠性和风险的特征参量,寻找新的特征参量,最终建立一个有效、简洁、获取容易的特征参量集进行功能分析。

2)确定设备所有可能的故障模式,确定每一种故障模式可能产生的后果并给出故障严重程度,确定每一故障模式的潜在原因并给出故障发生概率,根据设备现行的维修及维护策略,给出每一故障模式的可探测性,最后利用定量值得到该故障模式的 RPN ,确定设备可能发生风险较大的故障模式。

3)设备部件故障率的计算是在设备各部在设备的 FMEA 分析基础上,通过对变压器故障模式及特征参量进行归纳、整理,针对各特征参量的具体特点,提出基于模糊隶属函数和相对劣化度的设备故障发生概率评定方法,并通过加权综合评定方法实

现不同评定方法的有机结合,在一定程度上克服了仅靠专家经验评定方法主观性太强的缺点,使评定结果更符合客观情况。

4)通过某 500 kV 变电站 3 号主变的风险评估指标进行评判分析,对文中所建立的评估模型进行验证,并根据实际运行、检修情况,证明了该模型的可行性与有效性。

参考文献:

- [1] 谭建华. 电网规划风险评估工程综合应用研究[J]. 建材与装饰, 2015(47):202-203.
TAN Jianhua. Comprehensive application of risk evaluation project for power grid planning[J]. Construction Materials & Decoration, 2015(47):202-203.
- [2] 刘开俊, 高 艺, 宋福龙. 多适应性电网规划风险评估框架设计及应用展望[J]. 电力建设, 2014, 35(12):1-5.
LIU Kaijun, GAO Yi, SONG Fulong. Risk assessment framework design on flexibility power grid planning and its application prospect[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12):1-5.
- [3] 李 隽, 高 艺, 宋福龙. 电网规划风险评估工程综合应用研究[J]. 电力建设, 2014, 35(12):14-18.
LI Juan, GAO Yi, SONG Fulong. Comprehensive application of risk evaluation project for power grid planning[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12):14-18.
- [4] 任泊晓. 绥化地区电力市场运行安全与风险管理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
REN Boxiao. Research on operation safety and risk management in Suihua power market[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [5] 赵会茹, 李娜娜. 基于 AHP—灰色三角白化权函数的城市电网规划风险综合评价[J]. 陕西电力, 2013, 41(10):14-18.
ZHAO Huiru, LI Nana. Comprehensive evaluation of urban power network planning risk based on AHP-gray triangle whiten function[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(10):14-18.
- [6] 王金凤. CVaR 在电力市场风险管理中的应用研究[D]. 上海: 上海大学, 2012.
WANG Jinfeng. Research on application of CVaR in risk management[D]. Shanghai: Shanghai University, 2012.
- [7] 肖 丹, 孙 鹏, 邱革飞. BP 神经网络与遗传算法的变压器风险评估[J]. 云南电力技术, 2012, 40(5):20-24.
XIAO Dan, SUN Peng, QIU Gefei. Risk assessment of BP neural network and genetic algorithm for transformer[J]. Yunnan Electric Power, 2012, 40(5):20-24.
- [8] 吴 莹. 大型变压器定量风险评估方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
WU Ying. Study on the method of the quantitative risk assessment within large transformer[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012.
- [9] 白 娜. 电力变压器运行故障风险评估系统的开发与应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2011.
BAI Na. The development and application of the power transformer fault risk assessment system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2011.
- [10] 张光欣, 应黎明. 电力变压器模糊数学风险评估模型研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(4):25-29.
ZHANG Guangxin, YING Liming. Research of risk assessment model of power transformers based on fuzzy mathematics[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(4):25-29.
- [11] 商 雷. 电力变压器故障风险评估和维修策略的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
SHANG Lei. Study of power transformer failure risk evaluation and maintenance strategy[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [12] 张忠会, 王 卉, 何乐彰, 等. 基于风险评估的电力变压器检修策略研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(4):159-162.
ZHANG Zhonghui, WANG Hui, HE Lezhang, et al. Research on maintenance strategy of power transformer based on risk assessment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(4):159-162.
- [13] 张 桦, 魏本刚, 李可军, 等. 基于变压器马尔可夫状态评估模型和熵权模糊评价方法的风险评估技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5):134-140.
ZHANG Hua, WEI Bengang, LI Kejun, et al. Research on risk assessment technology based on Markov state evaluation model for power transformer and entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5):134-140.
- [14] 卞建鹏, 孙晓云, 杨 苏, 等. 基于云模型的电力变压器风险评估及检修策略制定[J]. 高电压技术, 2015, 41(10):3342-3347.
BIAN Jianpeng, SUN Xiaoyun, YANG Su, et al. Risk assessment and working-out of maintenance strategy for power transformer based on cloud model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10):3342-3347.
- [15] 王 浩. 变压器风险评估系统研究与实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
WANG Hao. Research and implementation of risk assessment system of transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [16] 庞尔军, 唐贵基, 于 虹, 等. 变压器信任度与安全指数的对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2):139-145.
PANG Erjun, TANG Guiji, YU Hong, et al. A comparative study between the transformer trust degree and the security index[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2):139-145.

- [17] 缪芸, 缪翼军, 陈红坤, 等. 基于模糊层次分析法与支持向量机的变压器风险评估[J]. 现代电力, 2014, 31(6): 64-69.
MIAO Yun, MIAO Yijun, CHEN Hongkun, et al. Risk assessment of transformer based on fuzzy analytic hierarchy process method and support vector machine[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(6): 64-69.
- [18] 郭丽娟, 鲁宗相, 邓雨荣. 基于风险的输变电设备状态检修实用化技术研究[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 81-86.
GUO Lijuan, LU Zongxiang, DENG Yurong. Risk based maintenance technology of transmission and transformation facilities[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 81-86.
- [19] 陈立, 郭丽娟, 邓雨荣. 基于状态和风险评估的老旧变压器安全经济性管理分析[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 81-85.
CHEN Li, GUO Lijuan, DENG Yurong. Safety and economics analysis of the aged transformer based on the condition evaluation and risk assessment[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 81-85.
- [20] 俞乾, 李卫国, 罗日成. 基于模糊神经网络的大型电力变压器风险评估方法研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(5): 59-64.
YU Qian, LI Weiguo, LUO Richeng. A risk assessment method of power transformer based on fuzzy analytic hierarchy process and neural network[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(5): 59-64.
- [21] 杜平, 刘浩, 张华. 基于状态检修的电力变压器风险评估指标和方法[J]. 电气技术, 2012(10): 17-19.
DU Ping, LIU Hao, ZHANG Hua. Research on the impact of DG on the distribution network current protection[J]. Electrical Engineering, 2012(10): 17-19.
- [22] 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.
Q/CSG 11001—2010 110 kV to 500 kV oil-immersed power transformers (reactors) status assessment guidelines (trial) [S]. 2010.
- [23] Q/CSG 11099—2010 110 kV~500 kV SF₆ 断路器状态评价导则(试行)[S]. 2010.
Q/CSG 11099—2010 110 kV to 500 kV SF₆ circuit breaker status assessment guidelines (trial) [S]. 2010.

田雨(1980—), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统运行、设备运行分析方面工作。

张晗(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事输变电状态监测技术、设备运行分析方面工作。

(上接第 145 页)

- [13] 孙敏, 王燕, 卢明, 等. 介质中气泡电场的计算分析[J]. 高电压技术, 1999, 25(1): 68-70.
SUN Min, WANG Yan, LU Ming, et al. Computation of electric field in dielectric voids[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1): 68-70.
- [14] DI LORENZO DEL CASALE M, ROMANO P, SCHIFANI R. A life model for epoxy resins subjected to PD activity at different temperatures[C]//2000 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2000: 564-567.
- [15] NIEMEYER L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 510-528.
- [16] 田玉春, 蒋兴良, 舒立春, 等. 高海拔地区 10 kV 合成绝缘子覆冰闪络特性和电压校正[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 11-15.
TIAN Yuchun, JIANG Xingliang, SHU Lichun, et al. High altitude of 10 kV composite insulator icing flashover performance and voltage correction[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 11-15.
- [17] 刘刚, 阮班义, 陈志娟, 等. 10 kV XLPE 电缆接头连接管含空气隙缺陷的电场分析[J]. 绝缘材料, 2011, 44(5): 62-66.
LIU Gang, RUAN Banyi, CHEN Zhijuan, et al. Analysis on the electric field of 10 kV XLPE cable joint connecting pipe with air gap defects[J]. Insulating Materials, 2011, 44(5): 62-66.
- [18] 江汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 17-21.
JIANG Xun, WANG Zhongyi. Calculation and analysis for the electric field of composite high voltage bushing[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 17-21.

操李节(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事高压绝缘方面研究。

汪霄飞(1963—), 男, 高级工程师, 长期从事高电压设备技术管理、测试工作。

徐勇(1955—), 男, 研究生导师, 主要从事计算机测试系统、电气设备故障诊断及电力系统过电压方面的研究。