

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.035

变压器可靠性评价及状态评估方法综述

许修乐¹, 李金忠², 王健一², 吴超², 张晶晶³, 丁明³

(1. 华东琅琊山抽水蓄能有限责任公司, 安徽 滁州 239000; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;
3. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘要: 变压器作为电力系统的核心设备,在长期的投运过程中也伴随出现了各种各样的可靠性评价方法。其中可靠性评价分为长期分析和短期状态评估。文中重点介绍总结了常用可靠的方法,对各方法的原理和适用情况进行了描述,再对比列出各方法的优缺点,为以后进行变压器可靠性评价时在方法选择上提供指导意见。对于特高压变压器,目前没有针对的评价方法,因设备结构和运行原理大致相同,故可参考现有方法。
关键词: 变压器;可靠性;评价方法

Summary of Reliability and State Evaluation Methods for Transformer

XU Xiule¹, LI Jinzhong², WANG Jianyi², WU Chao², ZHANG Jingjing³, DING Ming³

(1. East China Langyashan Pumped Storage Co., Ltd., Anhui Chuzhou 239000, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: There are a variety of reliability evaluation methods for the key equipment of power system-transformer. Reliability evaluation is divided into long-term reliability analysis and short-term state evaluation. This paper summarizes the common reliability evaluation methods, describes their principles and applications, and compares their advantages and disadvantages in order to provide guidance for selection of appropriate reliability evaluation method of transformer. There is no special reliability evaluation method for ultra-high-voltage transformer at present, however all kinds of transformers have almost same structure and working principle, so the existing evaluation methods can be referred to.

Key words: transformer; reliability; evaluation method

0 引言

目前,国内外电网大停电事故的原因除了电网运行故障外,电力设备的自身故障也需要得到足够的重视^[1]。其实保证电网安全的首要任务就是确保电力设备的稳定运行,影响整个电网安全稳定的最主要因素之一就是电力设备故障。随着特高压工程的推进,电力系统安全稳定运行也将面临更大的挑战,而保证电网稳定的基础是电力设备安全运行,尤其是作为电力系统的核心设备的特高压变压器,其运行状态会对电力系统的安全和稳定造成直接

影响。特高压变压器一旦发生故障将给系统带来不可估量的损失。为了确保变压器的安全稳定运行,需要对其进行全面准确的可靠性评估。

变压器可靠性评估提出时间长,发展较为成熟,常用的分析方法为故障树和故障模式分析法^[2-3]、马尔可夫方法等,近年来,考虑设备老化和运行状态又提出了新的可靠性模型^[4-9]。同时变压器的实时状态评估也是变压器可靠性评估的重要环节,随着电压等级的升高,状态评估和故障诊断变得越来越重要,继而近年来涌现了很多状态评估方法,如基于关联规则的评估方法^[10]、基于贝叶斯的评估方法^[11-12]、基于支持向量机的评估方法^[13-14]、基于人工神经网络

收稿日期:2017-03-04; 修回日期:2017-04-26

基金项目:国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG024-2012);安徽省自然科学基金(1408085ME100)。

Project Supported by Major Projects of Large Power Grid Supported by the State Grid(SGCC-MPLG024-2012), Anhui Natural Science Foundation of China(1408085ME100).

络的评估方法^[15-16]等等。由于目前针对特高压变压器的方法很少,且这些方法在工程实践中取得了不错的效果。故文中介绍了目前变压器可靠性评价常用的方法,总结分析各方法的优缺点,为特高压变压器的可靠性评估在方法选择时提供参考意见。

1 变压器可靠性分析

1.1 故障模式分析法和故障树分析法

故障模式及影响分析(fault mode and effect analysis, FMEA)是对设备故障模式及影响进行全面描述的定性分析方法,从设备的设计、制造,到设备运行各阶段有效分析出可能导致严重后果的故障隐患。FMEA 通过分析归纳确定设备故障模式,找到可能发生故障的环节,在设备的故障诊断和检修时提出指导意见。

故障树分析方法(fault tree analysis, FTA)是一种将设备故障形成的原因由总体到部分按树枝状逐级细化的分析方法。分析时把可能发生的最严重的故障状态作为顶事件,把可能导致下一级中间事件发生的所有原因找出作为下一级中间事件,按照这样的方法一直分析,直到找到最原始的、其故障机理或概率分布都是已知的、无需再往下分析的底事件为止^[2-3]。

FTA 是在 FMEA 基础上发展的,FTA 在建树或分析阶段遇到的问题可以参考 FMEA 方法。FMEA 中关于故障原因、影响的分析,可用于帮助建立电力变压器的故障树,使故障树更加合理和客观。

变压器故障树见图 1,将变压器故障分为 8 个子树,每个子树又可以继续分为多个下一级子树(图 1 中未画出完整故障树),最终找到变压器故障树的底事件,对其进行系统完善的可靠性评价。

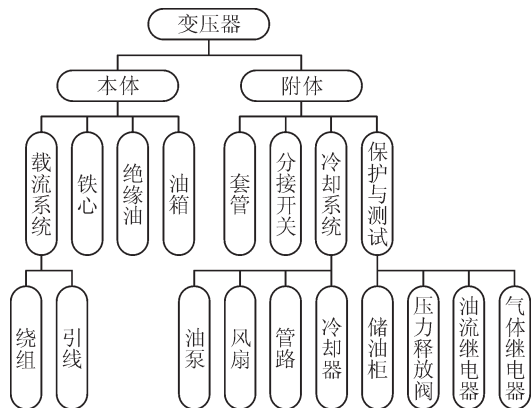


图 1 变压器故障树

Fig. 1 The fault tree of power transformers

1.2 基于马尔可夫模型的变压器可靠性评估

马尔可夫过程是一种基于概率统计的特殊随

机过程,用来分析可修复系统在投入使用后处于各种状态的概率,进而分析系统可靠性。

变压器是一个可修复系统。当其发生故障时,工作人员会确定故障的位置和形式,然后对故障部位进行修理或更换,使设备重新回到健康状态,此过程即为变压器的修复过程。变压器的老化是一个随机过程,一般在正常工作时出现故障后变为故障状态,继而在系统修复后回到初始状态。这种“状态转移”的过程是随机的。采用马尔可夫过程分析时,变压器在各个状态中不断变化,虽然每次状态的转移都服从一定的概率分布,但是在未来某个时间的状态是随机的,这种特征与变压器运行过程类似,所以变压器可以用马尔可夫过程来分析其可靠性。

变压器的运行状态分为正常状态和故障状态,故障状态又可以分为 10 种不同的故障和停运状态。建立马尔可夫模型时设变压器处于正常运行状态的概率为 p_0 ,处于各故障状态的概率为 $p_k (k=1, 2, \dots, 10)$,各故障率和修复率为 λ_k 和 $\mu_k (k=1, 2, \dots, 10)$,假设故障率和修复率都为常数,则该状态转移过程是齐次马尔可夫过程,在微小时间 Δt 中,状态概率矩阵和转移密度矩阵分别为 P 和 A ,则目标函数转为求解方程组

$$\begin{cases} P \cdot A = 0 \\ \sum_{i=0}^{10} p_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

由此计算变压器可能所处各个状态的概率,进行相应的可靠性评估^[4]。

1.3 基于热点温度的变压器老化失效模型

近年来,国内外对于变压器老化也有所研究^[5-7],鉴于变压器的可靠性最薄弱的环节是绝缘部分,故工程中可认定变压器绝缘纸的使用时间即为其本身的寿命。变压器绝缘的老化和其运行温度息息相关。变压器绝缘系统所承受的最高温度称为变压器热点温度。变压器的热点温度(hot spot temperature, HST)的计算模型见图 2。

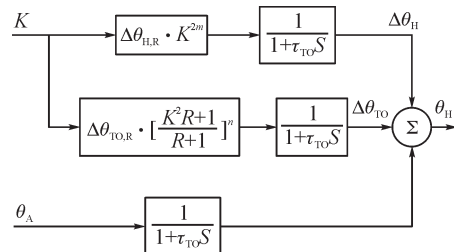


图 2 变压器热点温度模型

Fig. 2 HST model of a transformer

图 2 中: K 为变压器负载率,即当前负荷与额定

负荷的比值, p.u.; $\Delta\theta_{H,R}$ 为额定负荷时的热点温升, $^{\circ}\text{C}$; τ_{T0} 为变压器油时间常数, h; θ_H 为绕组热点温度, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta\theta_H$ 为热点温度相对顶部油温的温升, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta\theta_{T0,R}$ 为额定负荷时的顶油温升, $^{\circ}\text{C}$; R 为变压器额定负荷损耗对空载损耗之比, p.u.; $\Delta\theta_{T0}$ 为顶部油相对环境温度的温升, $^{\circ}\text{C}$; θ_A 为瞬时环境温度, $^{\circ}\text{C}$; m 和 n 为经验常数, 取决于变压器冷却方式。

实验证明, 绝缘纸寿命和温度及时间的关系服从 Arrhenius 原理, 故结合变压器老化的 Weibull 模型^[6]建立变压器的 Arrhenius-Weibull 模型, 其故障率及概率分布函数为:

$$\lambda_{ia}(t|\theta_H) = \frac{\beta}{C e^{\frac{B}{\theta_H+273}}} \left(\frac{t}{C e^{\frac{B}{\theta_H+273}}} \right)^{\beta-1}; \quad (2)$$

$$F_{ia}(t|\theta_H) = 1 - e^{-\left[\frac{t}{C e^{\frac{B}{\theta_H+273}}} \right]^{\beta}}. \quad (3)$$

式(2)、(3)中, B 和 C 是经验常数。得到变压器温度等参数后即可由式(2)、(3)计算设备的故障率和故障概率^[7]。

1.4 基于状态评估的可靠性模型及其改进

变压器状态检修技术随着投运时间也在快速的发展, 现场实际中也发现变压器的故障率会受到运行状态的影响, 因此, 国家电网公司颁布的《输变电设备风险评估导则》中提出了基于设备运行状态的故障率模型 $\lambda(S)$, S 为设备的状态评价打分值。该模型的数学表达式为

$$\lambda(S) = K e^{-CS}. \quad (4)$$

式(4)中: K 为比例参数; C 为曲率参数。

通过多组状态打分和故障率的统计值的数据可以采用数学方法反演计算得到可靠性模型的参数 K 、 C 的值, 进而得到设备最终故障率模型公式。

然而变压器的役龄对变压器故障率的影响也不可忽视, 即不同役龄的变压器, 当健康状态相同时, 其故障率应该也是有差别的。因此, 在同时考虑役龄和健康状态的情况下提出了变压器故障率的改进模型 $\lambda(S, t)$ 。该模型在原方法的基础上引入设备役龄变量 t , 研究设备在不同役龄时的故障率受运行状态的影响, 其数学表达式为

$$\lambda(S, t) = K(t) e^{-C(t)S}. \quad (5)$$

由于此处可靠性模型中加入了时间变量, 所以采用等效时间的方法可以归算出役龄为 t 时的参数 $K(t)$ 和 $C(t)$, 得出最终可靠性模型计算公式^[8-9]。

2 电力变压器状态评估

变压器可靠性指的是变压器在一定的时间和

条件下完成指定功能的能力, 运行时的状态评估也是其可靠性评估的重要部分。

目前正在使用的最基本的设备状态评估方法为根据电网公司评价规程得到状态打分值^[17-18], 除此之外, 经过长期的发展, 变压器的状态评估还涌现了很多不同的方法, 虽然有些相对规程来说计算较为复杂, 但是不同的评价方法一般都有自身的优势, 在实际工程中的应用越来越广泛, 并取得了不错的成果。

2.1 基于关联规则的变压器状态评估

对变压器进行状态评估时可以采用基于关联规则的分层方法, 该方法为首先参考国家电网的评价导则确定变压器的故障征兆, 如油中含水量、油中含气量、铁心绝缘电阻等, 再确定故障类型, 如绕组故障、铁心故障等, 然后计算故障征兆劣化度并统计出现异常的次数, 进而采用关联规则得到常权重系数后计算各故障类型劣化度, 最终通过变权重系数计算得设备状态评价结果。

2.1.1 权重计算

常权重系数法已被广泛应用, 一般采用关联规则确定故障类型和故障征兆的关联关系, 计算的故障征兆和故障类型的支持度和置信度, 进而计算常权重系数

$$w_i = \frac{C_i}{\sum_{k=1}^m C_k}. \quad (6)$$

式(6)中: w_i 为某故障类型中第 i 个故障征兆的常权重系数; C_i 为故障征兆置信度; m 为故障征兆总数。

考虑到当变压器的某一故障类型的数据严重偏离正常值时, 设备的某一方面性能已经严重下降, 若根据正常的常权重系数来计算时可能还是正常水平, 不能正确反映变压器的状态, 所以考虑采用变权重系数的方法。变权重式为

$$w'_i = \frac{w_i}{y_i} \left/ \sum_{j=1}^m \frac{w'_j}{y_j} \right. \quad (7)$$

2.1.2 变压器诊断

对故障征兆劣化度进行加权求和即可得到故障类型的评分值。由变权重系数和各故障类型加权求和即可得到变压器整体的状态评价。把变压器的运行状态分为 4 个等级: 正常状态、注意状态、异常状态、严重状态, 计算得到变压器的状态评价结果之后确定变压器的运行状态。若出现故障则通过判断故障类型的状态评分确定变压器的故障原因, 安排合理的检修^[12]。

2.2 基于贝叶斯网络的变压器状态评估

贝叶斯网络(又称概率因果网络、信任网络、知

识图等)是一种有向无环图(directed acyclic graph, DGA)。它通过有向图的形式来表示随机变量间的因果关系,且通过条件概率将这种关系量化。贝叶斯网络中的节点表示有某种独立性假设的随机变量,有向边则确定了随机变量间的独立性假设^[13-14]。

基于贝叶斯网络的变压器状态评估方法的思路为建立变压器各部件的分层模型,在评价时同样先确定变压器的故障征兆和故障类型,由于故障征兆和故障类型不是一一对应,所以在贝叶斯方法中需要通过条件概率和先验概率计算各故障类型可能发生的概率,从而对设备的健康状况有一个精确的评价。

其中先验概率表示各故障类型的统计概率,条件概率为在原因(故障)发生的前提下,导致结果(征兆)发生的概率,二者通过历史统计数据得到。

通过计算各故障类型的发生概率,可以对设备进行有目的有顺序的检修。

2.3 基于支持向量机的变压器故障诊断

支持向量机(SVM)是一种新兴模式识别方法,它是在小样本学习条件下,通过选择适当的模型(最优分类面)以保持置信范围的固定,从而使经验风险最小化。在解决小样本,非线性和高阶问题时具有特殊的优势。

支持向量机同样也适合应用在变压器的故障诊断中,其诊断方法为:首先经过分析长期统计数据,以典型油中气体作为支持向量机输入参数,然后在采用油中气体分析对变压器进行故障诊断的基础上,利用典型故障气体的相对含量在高维空间的分布特性进行变压器故障类型诊断。为了进一步提升故障诊断的准确率,该模型在相关性强的特征气体之间还会考虑采用K-近邻搜索聚类在最优分类面附近对分类结果进行精确逼近,能够明显提高分层决策模型可靠性^[15-16]。

支持向量机在理论研究和算法实现上都取得了突破性的进展,继神经网络之后成为国内外研究的又一热点。在变压器的状态评估中取得了不错的成果。

2.4 基于人工神经网络的变压器状态评估

人工神经网络(ANN)在电力系统中有广泛的研究和应用^[17-18]。一种基于神经网络的变压器状态评估方法见图3。

数据采集单元把变压器的运行参数,如油温、局放等以及其他参数如环境温度、负荷等通过各类传感器采集到系统中,准备交由预处理单元进行处理;预处理单元接受数据后会对数据进行预分析和

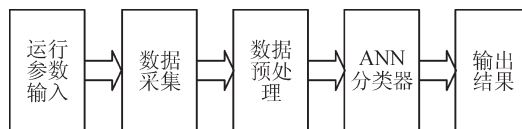


图3 基于神经网络的变压器评估

Fig. 3 Transformer evaluation based on neural network

处理,如提取振动信号的谐波分量的幅值和相位等,处理后再将数据转换为合适的格式供神经网络进行下一步处理;ANN分类器把预处理结果作为一种输入模式,通过神经网络的非线性映射,对输入模式进行分类。最终的分类直接和变压器的各种运行状态对应,同时分类结果可以显示或转移给其他相关系统,以供操作和维护人员参考。

采用此数据采集和处理方法后若发现变压器运行状态异常,则提出报警;当变压器状态劣化到一定程度时,可结合保护跳闸。神经网络的模式分类能力较强,对变压器进行状态监测和评估时可以尝试使用此方法,也可以考虑推广用于其他电力设备。

3 变压器各评价方法总结对比

对变压器的评价可以分为整体的设备分析评价和短期的状态评估,评价时应该先对设备的整体情况,例如设备老化、部件损坏等进行整体的评价,再对设备运行时的运行数据分析计算后进行状态评估,就能既对设备有整体的评价,也能掌握设备的实时健康状况,或是对发生的故障进行及时的故障诊断。

设备长期可靠性分析的主要方法为故障树及故障模式分析法、马尔可夫方法、设备老化分析和基于状态评估的可靠性模型及其改进。

故障树及故障模式分析方法可对设备从整体到各部件的已经发生或是可能发生的故障模式、故障原因有一个整体的分析,采用此类方法分析结果明晰,且能够全面地收集专家知识,是在需要设备的整体分析和长期规划时的常用方法。

设备老化分析模型着重分析设备的老化对故障率的影响,在对投入有一定时间的设备进行评价时,老化问题需要重点考虑,采用此模型计算设备的故障率更为接近实际,在工程上也更具有参考意义。

马尔可夫方法对于可修复系统的故障概率计算起步较早,除了算法简单,可操作性强以外,经过长期的研究其算法较为成熟,可信度较高,是计算变压器故障率的不错选择。

结合变压器状态评估结果计算故障率时充分考虑变压器当前健康状态对其运行可靠性的影响,对处在特殊运行条件或运行状态下的变压器的评价时,其结果更为科学准确。

变压器的实时状态评估和故障诊断除了传统的专家系统^[19]和国网规程打分外,近年来,基于国网规程的变压器分层状态评估方法和一些人工智能方法也逐渐被提出使用^[20-21]。

国网规程打分是工程中一直使用的方法,结果有一定的可参考性。基于关联规则和贝叶斯网络等变压器分层评价方法是在国网规程基础上的改进方法,此类方法在实现上具有相对较高的难度,但利用数学方法和软件的支持,其计算速度和精度也有一定的提升。

新兴的人工智能方法如文中介绍的人工神经网络、支持向量机以及云理论^[22]、灰靶理论^[23]等应用时间较短,虽然各自也有其优点,但由于工程上的实践较少,故结果应以参考为主。

各变压器可靠性评价方法总结见表1,虽然不同的方法适用条件不同,但是只要灵活运用各方法就能对变压器进行准确的判断,避免造成不必要的损失。

4 结语

随着电力行业的发展,变压器的可靠性评价方法在趋于多元化的同时也同时变得更加准确可靠,在得到足够的现场和历史数据的情况下,可以快速准确地确定变压器的运行状态和故障类型,为现场指挥调度提供指导。但是值得注意的是没有哪种单一的方法能对设备进行完全的评价,每种方法都有其各自的优缺点,需要总结各种方法的数据结果,来对变压器进行整体评价。

随着特高压项目的推进,特高压变压器的可靠性问题亟待解决且存在一定的困难,但由于结构和运行原理差别不大,特高压变压器的评价方法可以参考现有方法。由于特高压变压器的投运时间较短,变压器老化和长期累积故障几乎不会发生,且因为很多数据无法获得,评价时可以以运行状态评估为重点,实时监测变压器的健康状态,防止出现重大故障。

参考文献:

[1] 孙才新. 输变电设备状态在线监测与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 condi-

表 1 变压器可靠性评价方法总结
Table 1 Summary of transformer evaluation method

评价方法	优点	缺点
可靠性评价	故障模式分析和故障树	全面具体,在设计、制造、运行各阶段全面,在计算具体有效消除故障隐患。指标时存在不足。
	绝缘老化计算	对变压器的绝缘老化失效计算详细具体。只考虑绝缘老化,实际情况中不够全面。
	马尔可夫方法	算法简单,结果量化,可操作性强。有局限性,需要为可修复条件。
	基于状态评估结果	通过状态评估结果计算故障率,计算简单。可靠性指标计算结果精度较低。
状态评估	基于关联规则	系统具体,条理清楚,可根据实际情况调整状态量的选择,结果较为准确。由数据的详细程度决定精度,对数据量的要求较高。
	基于贝叶斯网络	可以得到具体的各部件的故障概率,结果直观,便于帮助规划检修策略。计算时需要大量长期统计值,短期投运设备容易数据不足。
	基于支持向量机	诊断结果正确率高,训练时间短,不存在局部最小。大规模训练样本难以实施,解决多分类问题时存在困难。
	基于神经网络	具有很强的模式分类能力,容错性好,具有很高的稳健性。对数据的要求很高,当数据不充分时无法工作。

tion on-line monitoring and diagnosis technology for power transmission and transformation equipment[J]. Electric Power, 2005, 38(2): 1-7.
[2] CHEN S K, HO T K, MAO B H. Reliability evaluations of railway power supplies by fault-tree analysis[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(2): 161-172.
[3] 谷凯凯, 郭江. 紧致融合模糊集和故障树的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1507-1513.
GU Kaikai, GUO Jiang. Transformer fault diagnosis method based on compact fusion of fuzzy set and fault tree[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1507-1513.
[4] 廖瑞金, 肖中男, 巩晶, 等. 应用马尔科夫模型评估电力变压器可靠性[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 322-328.
LIAO Ruijin, XIAO Zhongnan, GONG Jing, et al. Markov model for reliability assessment of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 322-328.
[5] LIU W, QUE H, WANG G, et al. Assessment of electric power equipments aging trend based on robust locally weighted regression algorithm[C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). [S.l.]: IEEE, 2010: 1-4.
[6] TSUBOI T, TAKAMI J, OKABE S, et al. Aging effect on

- insulation reliability evaluation with weibull distribution for oil-immersed transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6):1869-1876.
- [7] 何剑,程林,孙元章,等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7):39-45. HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Condition dependent short-term reliability models of transmission equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7):39-45.
- [8] 王慧芳,杨荷娟,何奔腾,等. 输变电设备状态故障率模型改进分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16):27-31. WANG Huifang, YANG Hejuan, HE Benteng, et al. The improvement of state failure rate model for power transmission equipment[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(16):27-31.
- [9] WANG Xuelei, LI Qingmin, LI Chengrong, et al. Reliability assessment of the fault diagnosis methodologies for transformers and a new diagnostic scheme based on fault info integration[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6):2292-2298.
- [10] 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, 32(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, 32(24):152-159.
- [11] RIDWAN M I, TALIB M A, GHAZALI Y Z Y. Application of Weibull-Bayesian for the reliability analysis of distribution transformers[C]//2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). [S.l.]: IEEE, 2014:297-302.
- [12] 白翠粉,高文胜,金雷,等. 基于3层贝叶斯网络的变压器综合故障诊断[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):330-335. BAI Cuifen, GAO Wensheng, JIN Lei, et al. Integrated diagnosis of transformer faults based on three-layer Bayesian network[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):330-335.
- [13] NIU Wu, XU Liangfa, WU Jilin. Fault diagnosis and system development of power transformer based on support vector machine[J]. IEEE Computer Science and Information Technology, 2009, 2(10):578-581.
- [14] 董明,孟源源,徐长响,等. 基于支持向量机及油中溶解气体分析的大型电力变压器故障诊断模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7):88-92. DONG Ming, MENG Yuanyuan, XU Changxiang, et al. Fault diagnosis model for power transformer based on support vector machine and dissolved gas analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7):88-92.
- [15] 陈维荣,宋永华,孙锦鑫. 基于神经网络的电力变压器状态监测[J]. 变压器, 2002, 39(1):53-57. CHEN Weirong, SONG Yonghua, SUN Jinxin. Power transformer monitoring based on artificial neural network[J]. Transformer, 2002, 39(1):53-57.
- [16] 阮玲,谢齐家,高胜友,等. 人工神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(3):822-828. RUAN Ling, XIE Qijia, GAO Shengyou, et al. Application of artificial neural network and information fusion technology in power transformer condition assessment [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3):822-828.
- [17] Q/GDW 1905—2013 输变电设备状态检修辅助决策系统技术导则[S]. 2013. Q/GDW 1905—2013 Guide rule for electric equipment condition based maintenance aid-decision system[S]. 2013.
- [18] Q/GDW 1906—2013 输变电一次设备缺陷分类标准[S]. 2013. Q/GDW 1906—2013 Defects classification standard of primary transmission and transformation equipment[S]. 2013.
- [19] VOROS C, NEMETH B, SZABO S, et al. Diagnostic evaluation of power transformers by an expert system[C]//Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S.l.]: IEEE, 2012:306-310.
- [20] HUANG Y C, SUN H C. Dissolved gas analysis of mineral oil for power transformer fault diagnosis using fuzzy logic [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2013, 20(3):974-981.
- [21] ZHOU Y, MA L, YANG J, et al. Entropy weight health index method of power transformer condition assessment[C]//2011 9th International Conference on IEEE Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). [S.l.]: IEEE, 2011:426-431.
- [22] 周淦,孙超,廖瑞金,等. 基于云理论的变压器多重故障诊断及短期预测方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(5):1453-1460. ZHOU Quan, SUN Chao, LIAO Ruijin, et al. Multiple fault diagnosis and short-term forecast of transformer based on cloud theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5):1453-1460.
- [23] 郑蕊蕊,赵继印,吴宝春,等. 基于加权灰靶理论的电力变压器绝缘状态分级评估方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8):60-66. ZHENG Ruirui, ZHAO Jiyin, WU Baochun, et al. Method for insulative condition classification evaluation of power transformer based on weight coefficient grey target theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8):60-66.
- 许修乐(1992—),男,硕士,研究方向为高压输变电设备可靠性评价。

- 32(12):66-68.
- [20] 蒋 虹,焦景慧,林志和,等.超高压线路工频电场超限值对策的研究[J]. 高电压技术,2006,32(8):56-58.
JIANG Hong,JIAO Jinghui,LIN Zhihe,et al.Research on the countermeasure for the over limitation of the power frequency electric field caused by extra-high voltage transmission line[J]. High Voltage Engineering,2006,32(8):56-58.
- [21] 路 遥,邬 雄,张小武.交流特高压输电线路下电场强度改善措施研究[J]. 电网与水力发电进展,2008,24(2):9-14.
LU Yao,WU Xiong,ZHANG Xiaowu.Measurements of improving electric field under UHV AC transmission line [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering,2008,24(2):9-14.
- [22] 李永明,何 健,徐禄文,等.超高压输电线路下工频电场抑制方法的研究[J]. 高压电器,2009,45(4):47-51.
LI Yongming,HE Jian,XU Luwen,et al.Research on suppression of power frequency electric field due to EHV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(4):47-51.
- [23] 周建飞,周年光,孔淑琴,等.接地金属网对高压输电线路下方工频电场强度及感应电压改善的研究[J]. 电网技术,2011,35(7):199-202.
ZHOU Jianfei,ZHOU Nianguang,KONG Shuqin,et al. Research on reducing both power frequency electric field intensity and induced voltage under HV transmission lines by metal ground mesh[J]. Power System Technology,2011,35(7):199-202.
- [24] 环境保护部. GB 8702—2014 电磁环境控制限值[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
Ministry of Environmental Protection.GB 8702—2014 Controlling limits of electromagnetic environment[S]. Beijing:China Planning Press,2014.
- [25] TAO Li,LU Jianhong,HU Botao,et al.Synthesis and characterization of new polymeric ionic liquid poly(imidazolium chloride -4,6 -dinitrobenzene -1,3 -diyl) [J]. Materials Research Innovations,2015,19(1):65-68.
- 吕建红(1981—),男,工学博士,高级工程师,主要研究方向为电网电磁环境、输变电设施噪声及大气环境与外绝缘。
- 陶 莉(1971—),女,工学博士,高级工程师,主要研究方向为电网环境保护。

(上接第 216 页)

李金忠(1974—),男,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术及变压器相关技术。

王健一(1984—),女,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术及变压器相关技术。

吴 超(1986—),男,工程师,研究方向为高电压与绝缘

技术及变压器相关技术。

张晶晶(1963—),女,副教授,主要研究方向为电力系统规划及可靠性、电力系统继电保护。

丁 明(1956—),男,教授,博导,研究方向为电力系统规划及可靠性、新能源及其利用、柔性输电系统的仿真控制。