

健康指数理论与设备状态检修应用综述

简述了状态检修的几种方法，分别介绍了CBM、RCM的发展历程，主要理论逻辑，技术手段和实践方法。重点介绍了基于设备健康指数的检修策略，即CBRM。着重叙述了健康指数的发展脉络、理论基础及模型建立。并且对于其在电力变压器上的应用作了介绍。

彭飞进¹ 高滨² 田浩² 解进军³ 朱金猛³ / 1. 广东电网有限责任公司佛山供电局
2. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室 3. 北方工业大学电气与控制工程学院



彭飞进/工程师

关键词/Keywords

健康指数 (HI) ·
状态检修 (CBM) ·
可靠性为中心的
维修 (RCM) ·
基于风险的状态检修
(CBRM) ·

0 引言

在电力企业领域，资产管理是一门集成多种理论、技术和经验，统筹技术、经济及管理的系统性综合性学科，其首要目的是平衡成本、绩效和风险。在国内外的学术研究中，电力资产管理的有效方法一直受到广泛关注，成为当前学术、企业界的一个研究热点。电网规划原则和运维检修决策一直以来是学术界和工程界关注的焦点。国内的电力公司资产评估管理起步较晚，配电资产的设备台帐、运行维护、预试、在线监测及管理数据等信息不全，历史不长，因此缺乏底层数据积累和数据挖掘。就目前来说，还很难能形成一套完备的资产评估体系，故急需一套完备的资产评估理论指导工程实践。

CBRM (Condition Based Risk Maintenance, CBRM) 评价体系，是英国EA公司为了应对设备大规模老化的来临而制定的一套较为完善的资产评

国家高技术研究发展计划 (863计划) 资助项目 (2011AA05114);
广东电网有限责任公司科技项目 (K-GD2011-535)

估体系，基于分析北美可靠性中心和英国国家可靠性中心的数据库的基础，在英国的所有电力公司，并在澳大利亚、加拿大、美国、马来西亚及新加坡等国家得到相当成功地应用和极具意义的指导。其核心是设备、网络的健康指数模型，确定表征设备健康的数字量——健康指数，并基于该模型得到设备故障率、剩余寿命及风险预测等评价。

本文综述了CBRM体系的发展脉络和组成部分，并针对其核心内容——健康指数的建模演算进行了详细的解释和综述。

1 现阶段状态检修的种类和发展

随着科技的不断进步，设备的检修策略也在发生着改变，就设备的检修策略而言一共可分为三种：事后检修，定期检修，状态检修。

事后检修也称为故障检修，是指当设备发生故障失效后进行的非计划性检修，现代电力企业检修中，这种检修方式仅仅被用于对系统影响极小、成分冗余的设备。

计划检修也称为预防性检修，是一种按照时间为基础的检修方式。适用于设备老化随时间而递增的设备。这种检修方式应在检修之前确定检修时间、检修策略及检修目的等方案。我国大部分电力设备的检修都是采取该种检修方式。

状态检修是根据设备运行状态设定检修策略的方法，通过实时监测设备状态，确定设备当前状态，并预测设备检修时间，确定检修策略。目前

状态检修的策略有很多种,包括CBM(Condition-Based Maintenance)、RCM(Reliability Centered Maintenance)、CBRM(Condition-Based Risk Maintenance)等。

图1为三种检修方式费用比较。

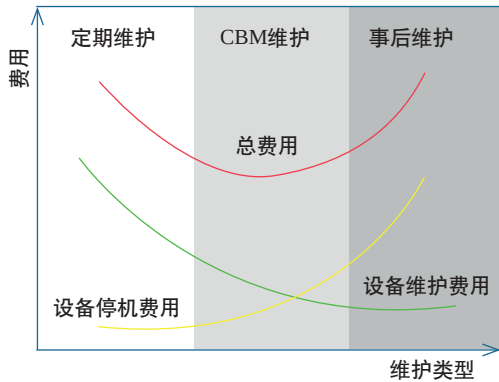


图1 三种检修方式费用比较

CBM技术是通过在设备上加装传感器,将设备运行的实时状态进行量化分析,通过人工智能等先进算法监控设备运行,预测设备有效工作周期,合理安排调度和检修策略,增加设备的运行稳定性^[5]。CBM技术从本质上来说是通过采集当前设备运行数据,预测未来设备运行状态的技术。从技术上来讲,CBM技术实际上是综合了传感器技术、人工智能技术和计算机网络技术而来的先进检修方法^[1],可以大幅减少传统定期检修所带来的过度检修和成本浪费的问题。

RCM最早起源于20世纪60年代的美国航空业。从最先提出开始就得到了业界的高度重视,到了1993年已经提出了五个版本的检修大纲,其中最后一个版本,即MSG-3,一直沿用至今。同时,美国军方也对RCM的研究高度重视,目前美军几乎所有重要的军事装备的预防性维修大纲都是应用RCM方法制定的。RCM理论严谨、系统,在指导检修中能够产生的良好经济效益,使RCM在工业界得到了迅速普及。但由于RCM理论实现过于繁琐,在之后的几年中出现了大量的“改进”RCM方法,其中很多方法存在着问题,之后在1998年,SAE小组提出了SAE RCM规范,规定了凡是称为RCM方法的一致属性和特征。

RCM分析上首先对于SAM RCM所提出的7个问题,即资产功能、功能失效、失效或故障模

式、失效现象、失效的后果、预防性的有效作业和作业的间隔期、默认行动,通过“故障模式及影响分析(FMEA)”对设备进行故障审核,列出其所有的功能及其故障模式和影响,并对故障后果进行分类评估,然后根据故障后果的严重程度,对每一故障模式做出“是采取预防性措施、还是采取预防性措施待其发生故障后再进行修复的”决策^[4]。

RCM分析方法与CBM技术的共同点在于均需要确定“修什么”、“何时修”的问题,但CBM以监测与诊断结果为导向,动态安排维修窗口,具有可选择性;RCM则依赖于具体的逻辑判断,维修窗口预先制定。在目前的理论研究和工程应用上,常常将CBM作为RCM的补充,从而提高检修精度和效益^[3]。但是,它们都是基于设备自身,而忽略了设备失效对系统可靠性的影响^[29],因而有必要将两者有机结合起来。

CBM/RCM检修方法其优点是:提高系统可靠性,降低维修预算,减少由于人为错误引起的过度检修等;但是,其也有缺点:安装成本高,对小型设备的项目往往比设备的价值更高,设备历史数据汇总与储存困难,不可预知的维修周期导致成本被划分不均,零件的数量增加需要维护和检查。

健康指数最早应用于人体健康的评价,以预期寿命为目标,综合多项与寿命相关的评价项进行综合评价,其在医学和生命科学领域得到了广泛应用,并且取得了良好的效果。由于电力系统的设备运行状态同人的生命活动状态有一定的类似性,但是比人体健康状态的评估简单得多,直到20世纪80年代,英国电力行业私有化之后,健康指数理论才开始从生命科学领域逐步迁移应用于电力系统领域。

2003年D.Hughes^[8-14]首先在电力系统中提出健康指数的概念,由于当时英国的大量电气设备进入老化期,急需制定更换方案,故提出健康指数模型,旨在估测设备剩余寿命,指导更换设备。当时的健康指数模型很不完善,大致算法与人体健康指数相同,均以剩余寿命(end of life, EOL)为目标进行评价,提出算法采用两种健康指数的规格,分别是0~10和0~100;之后几年

发展中,健康指数模型得到了一定的应用,并且逐步理论化和完善化。在2006年的WCEAM会议中,D.Hughes完善了2003年所提出的健康指数理论,并将健康指数模型推广为一种新型的检修体系,并首次使用CBRM (condition-based risk management, CBRM) 评价体系一词,并且开始引入设备故障率(POF, Probability of Failure)的概念,阐述了CBRM的七个主要步骤,包括定义设备状态、联系状态与表现、估算未来状态和表现、评价潜在的设备故障率、确定失效后果、建立风险模型、评价潜在风险等,并且阐述了短期预测结果的计算方法,包括HI、POF等;之后的算例部分,提出了大型变压器和高压架空线的建模。此时的健康指数模型已不仅仅是指导设备更换,而是更加犀利的指出要指导设备的状态维修,为之后的CBRM体系的发展指出了方向。在2007年的CIRED会议上,他又将风险评估体系与健康指数建模结合起来,注重量化风险,提出强调风险重要性分级。在2009~2011年的CIRED会议文章中,健康指数与风险评估的公式被量化表示,并且可以作为决策层进行设备资产管理决策的依据,标志着健康指数理论又登上了一个新的台阶。

对于国内健康指数建模的应用,仍然处于比较基础的阶段,主要是用于单一设备的健康评价,并不能与风险评估和管理层决策完全挂钩。现在国内文章的分析内容主要是对于单一电气设备(变压器、架空线等)的健康建模权重分析,对于权重设计的计算,常见的确定方法有权数专家估测法、频数统计法分析法、主成分分析法、层次分析法及模糊逆方程法等六种方法。文献[7]和文献[28]指出CBRM在状态检修中的作用,提出了软硬件结合的思路,但是并没有确实的研究算例和应用;并不能满足日益发展的配电网健康分析的要求,对于健康指数的研究也应继续加深。

对比CBRM与CBM/RCM的评估方法可以发现,CBRM评价的算法较CBM/RCM简单,可以通过设备的健康指数直观的得到设备的使用状态,初步估算设备的故障概率。并且,可以通过公式得到量化为货币单位的风险评估结果,结果展现的更加直观。但是关于设备健康指数的建模仍需

要靠专家来确定,风险评估中的风险预测权重也需要经验丰富的技术人员进行估计,未能形成一套完整的数学理论。

2 健康指数模型的建立

2.1 CBRM体系内容

CBRM是基于对电力设备技术参数、试验数据、负载、环境、外观、故障及缺陷等信息的分析,按照预定的标准对各种信息进行量化,以设备技术参数、环境、试验数据、负载等信息计算出设备健康指数,并以外观、故障、缺陷等信息进行修正,同时运用设备、材料老化的基本规律,结合现场工程师对设备实际运行情况的了解,综合分析各种可能影响设备实际运行状态的因素,最终得出一个单一量化的数值——健康指数HI (0~10)来表征每台设备在当前和未来的健康状况;计算设备剩余使用寿命和故障发生概率及设备组故障率的变化趋势。另一方面,CBRM对设备在电网运行中可能存在的风险进行统计分类,定义风险类别及风险的平均后果、量化发生风险的可能性、利用设备风险的量化标准、风险平均后果及发生风险的可能性,结合设备重要等级,最终得到以货币形式量化的设备单一的风险值及总风险值,并计算设备未来风险值的变化趋势。

CBRM风险防范管理体系包括状态评估、风险评估和辅助决策三大部分。

状态评估通过对设备运行健康状态及设备可靠性的定量分析,计算得出设备当前及未来的健康指数、故障发生概率及剩余使用寿命,为设备资产的更换、维修、技术改造以及新设备规划、资金需求及投向等战略决策提供科学的指导依据,其主要作用在于辅助资产的可靠性管理、设备检修维护资源的合理安排及投资规划。

风险评估通过对设备故障发生概率和故障后果的定义和定量分析,针对电力企业所关心的各种风险因素分别计算得出其风险大小。风险评估的实施已经不局限于对设备可靠性、检修资源的管理,而是上升到电网风险管理的高度,为企业的资产管理和长远战略决策提供依据。

辅助决策则是在资产状态评估和风险评估

结果的基础上,结合企业的战略目标、资产管理方针以及对电网性能的要求,一方面帮助企业编制科学的设备维护与检修计划,另一方面帮助企业制定最优的技改战略、投资规划和资产管理战略。

2.2 健康指数的确定

2.2.1健康指数的含义

CBRM评价第一步是确定反映每台设备状态的单一数字量——健康指数(health index, HI)。实际上,在文献[2]中,对健康指数做出了定义:健康指数是一台设备的运行信息的综合,涉及设备的老化、负荷、环境和特殊状态等信息,结合这些信息计算出设备的剩余寿命和故障概率。健康指数与剩余寿命、故障概率之间的关系如表1所示。

表1 健康指数与设备状态、故障率之间的关系

状态	健康指数	剩余寿命 (年)	故障发生概率
很差	7~10	<5	高
差	5.5~7	5~10	中
一般	4~5.5	10~20	低
很好	0~4	>20	很低

健康指数处于0~4阶段时,表明设备在早期存在老化现象,这个现象被视为正常的,在这个阶段,设备的性能视作良好。设备故障率很低,健康指数和设备故障率在一段时间内变化不大。

健康指数处于4~5.5阶段时,设备已有明显的老化,属于正常的老化现象,设备处于良好的状态,在这个阶段下,设备故障率虽比较低,但有上升的趋势。

健康指数处于5.5~7阶段时,设备存在严重的老化,老化程度已超出正常的老化现象,设备状态属于差的阶段,设备故障率明显上升。此时,应采取及时检修维护,或替换重要电力设备,如变压器、断路器等,保证电网可靠性。

健康指数处于7~10阶段时,设备已经接近报废,必须更换设备^[23]。

健康指数不仅反映了单一设备的状态,而且还针对电网中同一类设备,分析该类设备整体的

健康指数分布情况(健康指数柱状图),直观反映设备的整体状态。

2.2.2健康指数建模

在国内的设备健康指数的计算所有文章中,不同设备类型的健康指数的计算方法具体有所不同,但是大体类似,由三级评估确定,如图2所示。

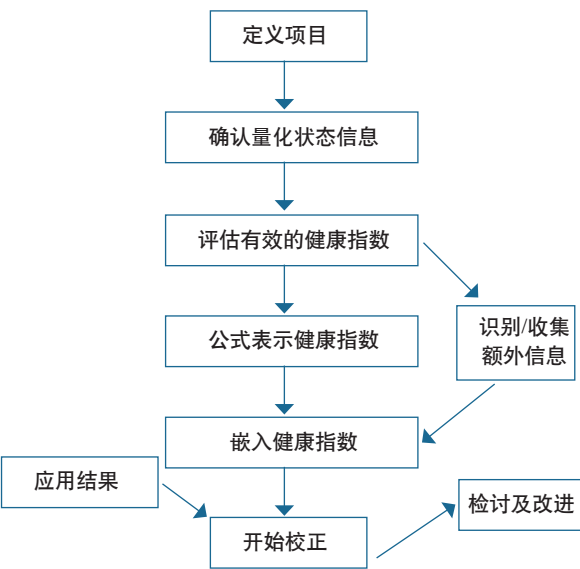


图2 健康指数评估流程

(1) 一级评估即初始老化健康指数是根据其性能和预期寿命的工程认知和经验计算得到的,需考虑的因素包括原始技术规格、生产厂家、运行经验和运行状态(负荷、环境等)。

(2) 二级评估即老化进程的状态评估,评估信息能够用于判断设备潜在的剩余使用寿命情况(如通过糠醛测试^[29]、油色谱测试等都能够判断变压器的健康情况),每一个老化进程的当前状态都可以经过专家权重等方法量化为一个系数,它使得状态信息与健康指数相对应。因此,将得到的各个子系数综合在一起计算出一个“综合状态系数”(即一级评估修正结果)。

(3) 除此之外还有一些不能直接反映设备的老化进程,但是能够用来反映设备状态的信息,作为修正健康指数的系数,即作为三级评估结果修正出现。例如包括相关的绝缘试验结果,故障/缺陷历史和特殊型号设备的可靠性(如:厂家可靠性、家族缺陷等)。

不同的设备,健康指数的具体计算方法是不一样的,反映了通过不同信息得到的不同型号设

备老化进程和设备状态。然而，于所有类别的设备健康指数的基本计算结构都是相同的。其计算公式为

$$HI_t = HI_0 \times e^{B \times (T - T_0)} \quad (1)$$

式中， HI_t 为当前年或未来某年的健康指数； HI_0 为设备初始健康指数，由设备原始信息确定，包括原始技术规格、生产厂家、运行经验等； B 为老化系数； T 为当前或未来年限， T_0 为设备投运年限；

老化系数 B 是由出厂预期寿命的工程认知得到的，其具体计算公式为

$$B = \frac{mHI_t / mHI_0}{T_{exp}} \quad (2)$$

式中， HI 表示设备寿命终结时的健康指数，一般情况下对于重要电力设备而言（变压器、断路器等），取值为6~7之间；

HI_0 表示设备投入时的健康指数，根据厂家、设备型号的不同，一般在0.3~0.5之间取值； T_{exp} 表示设备预期寿命，一般情况下由出厂设计寿命和运行环境所共同决定，计算方法如下

$$T_{exp} = \Delta T \times f_{mod} \quad (3)$$

式中， ΔT 为出厂设计使用寿命； f_{mod} 为修正系数，与设备所处的环境、运行状态都有关系；

健康指数的变化率不是线性的，并且对于输配电设备而言，其老化过程包含了很多情况，设备老化过程中的产物也将加速设备的老化进程。因此，随着设备的老化，其老化速率会增大。但是由于设备的技改或维修，以延长设备使用寿命，使设备老化速率减慢，所以必须考虑要对老化系数进行修正。并且给出了修正公式，健康指数老化常数修正计算公式为

$$HI_t = HI_0 \times \exp\left(\frac{B \times (T - T_0)}{age_f}\right) \quad (4)$$

式中， HI_t 为当前年或未来某年的健康指数； HI_0 为设备初始健康指数； B 为老化常数； T 为当前或未来年限； age_f 为老化速率修正系数。

根据设备的不同老化进程评估方法也都不同，但在最终综合考虑所有因素之后，经过不同分析方法，最终健康指数，仍要根据老化进程评估结果对其进行修正，即

$$HI = HI_t \times f_{com} \quad (5)$$

式中， f_{com} 为修正系数。

在文献[21]中， f_{com} 由老化进程状态的评估中，由各个状态的修正系数决定：

(1) 如果任一状态的修正系数 >1 ，那么就取这些系数的最大值，再加上其余系数 >1 的个数乘以步长的和；

(2) 如果任一状态的修正系数 ≤ 1 ，那么就取这些系数最小值。

2.3 设备故障发生概率计算模型

CBRM体系中另一个重要的状态评价指标是设备故障发生概率，大量的工程实践及研究表明设备故障发生概率与设备健康指数之间存在以下关系：当设备健康指数升高时，设备故障概率也随之升高，且二者之间成指数关系。如图3所示

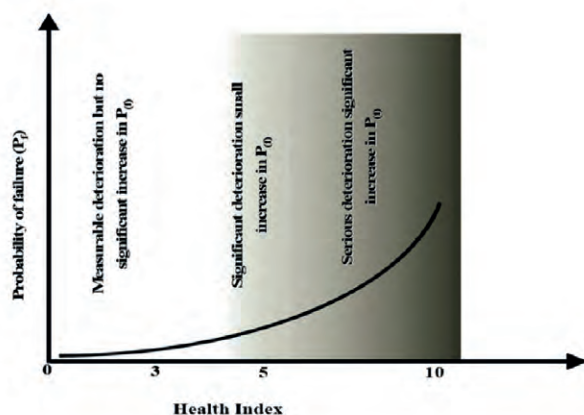


图3 健康指数和设备故障率的关系

设备故障发生概率和健康指数之间的关系的公式表达为

$$PDF = k \times e^{c \times HI} \quad (6)$$

式中： POF 为设备故障率； C 为曲率常数； K 为比例常数。

在工程应用中常常将指数函数展开成为三次多项式的形式，于是对于 POF 公式应用泰勒公式展开有

$$PDF = k \times \left(1 + c \times HI + c \times \frac{HI^2}{2!} + c \times \frac{HI^3}{3!}\right) \quad (7)$$

由于CBRM体系主要用于评价近似老化设备的健康状况，故该故障概率计算公式更适用于健康指数比较高的情况。元件投入使用的初期，一般为时间很短的调试期，故障概率也较高。进入稳定运行期以后，健康水平较好时，三次多项式模型计算的结果往往会产生很大的误差。因此故障概率与健康指数之间是一个分段函数的关系。

当健康指数在某个阈值 HI_{lim} 以内,故障概率是一个常数;当健康指数上升到 HI_{lim} 以上则满足故障概率与健康指数的三次关系式。具体的 HI_{lim} 的取值由各个项目需要确定。

根据每一设备组的实际性能,可以对设备组健康指数柱状图和设备当前故障率进行匹配,从而确定常数 k , k 值由下式确定

$$k \times \sum_{i=1}^{10} (1 + HI_i \times c + \frac{(HI_i \times C)^2}{2!} + \frac{(HI_i \times C)^3}{3!}) = R_o \times \sum N_i \quad (8)$$

式中: N_i 为设备组健康指数1到10每一区间上的设备数目; R_o 为设备年平均故障率。

3 关于健康指数的应用

目前,国内仍未形成一套完整的关于健康指数模型的理论。对于健康指数理论的内在和外延也没有足够的探讨。国内的研究仅限于单一设备(主要是变压器)的健康指数的建模。

在2002年,宋斌等在分析变压器过热故障时引入了灰关联分析法与总烃安伏曲线相结合,进行定量分析^[30]。以变压器油中气体色谱分析数据总烃构成参考序列,以变压器电源电压、电流的平均值构成被比序列,将数据规范化处理并进行灰关联度计算,比较关联度。

之后在2005年的文章中,作者又将灰理论关联法和信息熵理论结合起来,首先通过统计方法,选择典型油中气体作为参考序列,并经反复调整,挖掘出油中气体所含故障信息,然后利用灰关联熵方法进行变压器故障类型诊断。

熊浩等人在文献[17]中,引入了灰色层次评估法,建立变压器设备健康评估的突变状态和渐变状态模型,给出了变压器状态评估的层次指标体系的数学量化。采用关联层次分析估计出电力变压器的运行状态,对于权重的确定,采取了灰色关联分析法确定常权权重,并经过修正得到其变权权重,提高其准确性。之后,华北电力大学的田丰^[19]提出动态灰靶理论对于变压器状态进行分析,将影响变压器老化进程的几个重要试验参数作为灰靶理论待评估模式的状态量,计算变压器当下模式与标准模式的靶心度,通过值域映射,得到其当前的健康评估指数,并且对于变压器健康指数的建模中评估权重的确定做了一定的应用^[26],文献[18]中,郑蕊蕊、赵继印等人在变压器

绝缘状态评估中引入加权灰靶理论,对油中溶解气体进行分析,构建了状态评估算法,阐明了实现步骤。运用灰贡献度分析理论提出一个新的变压器绝缘状态评估中各指标的权重问题的解决方法。文献[24]提出了基于模糊多准则决策的电力变压器风险评估方法,并成功应用于电力变压器故障模式的风险评估。

文献[20]中,详细讨论了关于电力变压器的状态评估方法建模,采用油气分析数据对变压器的运行工况进行评估,给出了油色谱试验,油质试验,糠醛试验各权重的计算过程。刘伟在其论文^[16]中采用模糊评估的方法,对于变压器状态评价的模糊性问题进行了评估,梁博渊,刘伟等人^[15]以油色谱试验,油质试验,糠醛试验的结果作为二级评估标准,给出了关于变压器三级建模的完整算例。

杨金东^[21]采用模糊综合评判和层次分析的方法,将架空线分为五大部分,计算了架空线健康指数模型,并且给出了其模型在普马线的算例。

4 结束语

在国内的研究中,注重于单体设备的研究分析,在一些复杂的评定中,对于设备仍采取简化处理。对于评估设备的种类,也局限于变压器等构造较为简单的设备。在之后的研究中,应建立复杂电力元件的健康指数模型,完善软硬件设备,为电网资产评估提供有力指导。

参考文献

- [1] 王伟,杜赞. 基于CBM系统的输变电设备状态检修在基层中的研究[J]. 湖州师范学院学报,2011,S1:239-241.
- [2] 杨立飞,江虹. 基于CBM的RCM在核电站的应用[J]. 中国设备工程,2012,02:27-29.
- [3] 李晓明. 基于RCM的核电站维修优化研究与应用[D]. 华中科技大学,2005.
- [4] 吕一农. 以可靠性为中心的维修(RCM)在电力系统中的应用研究[D]. 浙江大学,2005.
- [5] 徐皓冬,于海斌,郭前进. 基于状态的设备维护—CBM技术研究[J]. 工程机械,2005,06:9-13+106.
- [6] condition based management of electrical appliances

- [7] Barnfather P, Hughes D, Wells R. Condition-based risk management of physical assets within the electrical power sector[C]//Asset Management Conference 2012, IET & IAM. IET, 2012: 1-5.
- [8] quantifying asset risk to optimize investment, a realistic prospect
- [9] Hughes D, Pschierer-Barnfather P, Pears T. Condition based risk management (CBRM): bringing excellence in asset management into the boardroom[C]//Electricity Distribution-Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on. IET, 2009: 1-4.
- [10] Hughes D, Pears T, Tian Y. Linking engineering knowledge and practical experience to investment planning by means of condition based risk management[C]//Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on. IEEE, 2008: 539-542.
- [11] Hughes D, Dennis G, Walker J, et al. Condition based risk management (CBRM)—enabling asset condition information to be central to corporate decision making[M]//Engineering Asset Management. Springer London, 2006: 1212-1217.
- [12] Hughes D, Pears T. Condition based risk management (CBRM), a process to link engineering knowledge and practical experience to investment planning—an update[J]. CIRED2007 Session, 2007, 5.
- [13] Hughes D, Barnfather P. Building risk based investment programmes[J]. 21st CIRED, 2011.
- [14] Hughes D. The use of "Health Indices" to determine end of life and estimate remnant life for distribution assets[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Electricity Distribution (CIRED). 2003: 5.15.
- [15] 梁博渊,刘伟,杨欣桐. 变压器健康状况评估与剩余寿命预测[J]. 电网与清洁能源,2010,11:37-43.
- [16] 刘伟. 电力变压器健康状态评估与剩余寿命分析[D].华北电力大学(河北),2009.
- [17] 熊浩,孙才新,张昀,谭志红,代姚. 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,2007,07:55-60.
- [18] 郑蕊蕊,赵继印,吴宝春,李建坡. 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,2008,08:60-66.
- [19] 田丰,盛四清,李燕青,宋艳争,崔健. 灰靶理论在CBRM状态评估中的应用[J]. 电力科学与工程,2011,05:1-4.
- [20] 覃煜,陆国俊,卓灿辉,方育阳. 基于油气分析的电力变压器状态评估方法[J]. 南方电网技术,2012,04:79-83.
- [21] 杨金东. 架空输电线路的健康状态和风险评估研究[D].昆明理工大学,2013.
- [22] 张金萍,刘国贤,袁泉,杨希成,郑明涛. 变电设备健康状态评估系统的设计与实现[J]. 现代电力,2004,04:45-49.
- [23] 肖丹. 电力变压器风险评估方法与应用[D].昆明理工大学,2013.
- [24] 王有元,周婧婧,陈伟根,杜林,宋伟光. 基于模糊决策的电力变压器风险评估方法[J]. 仪器仪表学报,2009,08:1662-1667.
- [25] 吴立增. 变压器状态评估方法的研究[D].华北电力大学(河北),2005.
- [26] 田丰. 基于改进灰靶理论的变压器状态评估[D]. 华北电力大学,2011.
- [27] 李海峰. 基于状态检修的电力系统安全风险评估[D].华北电力大学,2012.
- [28] 田洪,方育阳. 基于状态检修的电力系统风险管理[A]. 中国电力企业联合会科技开发服务中心.2009年全国输变电设备状态检修技术交流研讨会论文集[C].中国电力企业联合会科技开发服务中心,2009:7.
- [29] 张大波. 基于状态监测与系统风险评估的电力设备维修及更新策略研究[D].重庆大学,2012.
- [30] 宋斌,于萍,廖冬梅,罗运柏,文习山. 灰关联分析用于变压器热性故障诊断[J].高电压技术,2002,03:11-13.

(收稿日期: 2015-5-25) EA

作者简介

彭飞进,男,广东电网有限责任公司佛山供电局,工程师,从事电力设备检修方面的工作。