

胡文堂 余绍峰 鲁宗相 高胜友 编著

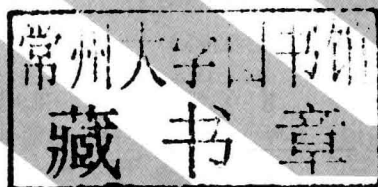
输变电设备风险评估与 检修策略优化



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

胡文堂 余绍峰 鲁宗相 高胜友 编著

输变电设备风险评估与 检修策略优化



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是介绍输变电设备风险评估及状态检修中相应的检修策略优化的学术专著,反映了该领域最新的科研成果。本书围绕输变电设施风险检修展开了深入浅出的讨论,并从基本理论到工程应用方法等不同角度进行了全面的阐述。

本书共 5 章,主要内容有基于设备风险的状态检修体系、设备状态评估与故障率计算、设备风险评估、检修策略优化及应用实例,附录介绍了油浸式变压器缺陷指数的确定方法。

本书可供从事输变电设备检修、管理的相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

输变电设备风险评估与检修策略优化/胡文堂等编著. —北京:中国电力出版社, 2011.11

ISBN 978-7-5123-2290-5

I. ①输… II. ①胡… III. ①输电—电气设备—风险分析
②变电所—电气设备—风险分析 ③输电—电气设备—检修
④变电所—电气设备—检修 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 223098 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 11 月第一版 2011 年 11 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 5 印张 120 千字

印数 0001—3000 册 定价 16.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



序

基于风险的检修（Risk Based Maintenance, RBM）是当前检修决策技术的研究热点，被认为是未来智能电网框架中高级资产管理（Advanced Asset Management, AAM）的核心功能之一。

RBM 是一种基于风险的系统化检修管理方法。与传统检修决策和管理体系相比，RBM 强调了可靠性与经济性的综合协调，通过兼顾设备状态及其故障后果影响的风险指标的计算和优化，达到经济性和安全性的平衡。同时，在设备检修决策中可充分考虑系统运行状态的影响，从而使得设备检修管理和系统运行工作紧密结合，可有效改善传统检修管理模式下载网运行与设备检修工作各自为战的现状，实现“系统”与“设备”的协调和优化。

该书首先对基于设备风险的状态检修技术原理和框架体系进行了总体论述，然后针对输变电设备风险评估及检修决策中的设备状态评估与故障率计算、设备风险评估及检修策略优化三项关键技术进行了详细的阐述，最后结合实际工程给出了一个完整的算例解决方案。全书将风险评估理论与状态检修技术体系和寿命周期管理技术等相结合，给检修人员提供了一个审视检修工作的新视角，是对现有状态检修技术体系的有益补充和提升。

该书围绕输变电设备风险检修这个专题展开了深入浅出的讨论，并从基本理论到工程应用方法等不同角度对其进行了全面的阐述。全书主题突出、系统完整，体现了前沿理论知识与实际工程问题紧密结合的特点。

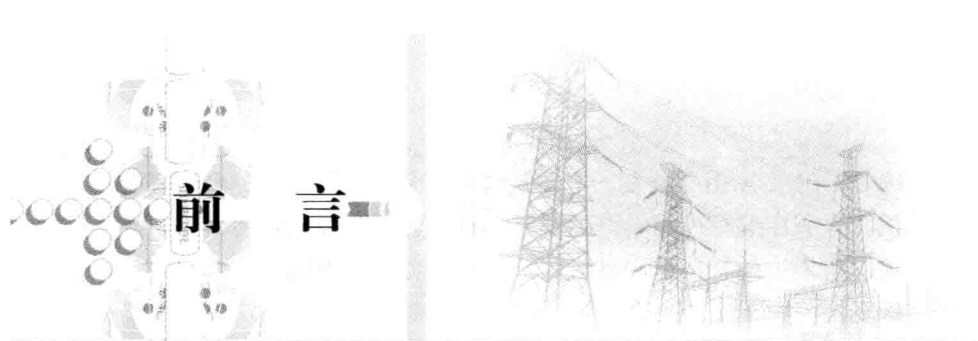
该书不仅是一本良好的风险检修基础读物，而且对了解和研究状态检修前沿课题也有所裨益，同时也为风险检修理论在输变电设备检修工程的应用提供了完整的范例。因此，该书具有较高的学术价值，并对工程实践有指导意义。

我国的智能电网建设如火如荼，资产管理和设备运维技术是其中的关键领域。这方面的研究已有大量成果，但令人稍感遗憾的是目前尚缺乏系统性的专著和直接供工程师用于工程实际的范例。该书在一定程度上弥补了这个不足，将为有关同行和青年科技工作者提供有益的参考。

清华大学



2011年9月



前言

长期以来,我国电力工业普遍采用的检修模式为周期检修和事后检修。近年来随着电网建设的快速发展,日益庞大的输变电设备数量与逐渐减少的检修人员之间形成了显著的矛盾。为了进一步节约人力物力,提高检修工作的效率和设备可靠性,实施状态检修技术已经势在必行。

状态检修是从设备状态出发来制订检修计划的一种技术,经过多年的研究和实践,已经取得了长足的进展。在现有输变电设备的制造、运行技术下,实施状态检修,可以较为显著地延长设备停电试验周期,大大减少停电次数,节约大量的人力物力,进一步提高设备可靠性。状态检修技术一般可以分为状态评估、风险评估和辅助决策三大模块。从国内状态检修技术实施的实际情况来看,风险评估模块还较为弱化,与实际应用还存在较大距离。

状态检修中的风险评估技术,是将设备检修纳入整个电网系统运行的大视野中,从系统的角度来重新考虑检修策略的优化。本书回顾了当前国内外主流风险评估方法的优劣,结合实际,提出了设备缺陷指数确定、设备故障率计算、系统风险评估和多目标优化辅助决策等关键难点问题的解决方案。本书试图将现有风险评估理论与现有状态检修技术体系、寿命周期管理技术等相结合,给检修人员提供一个新的视角来思考检修工作,是对现有状态检修技术体系的有益补充。

全书共5章,其中第1章由胡文堂编写,第2章由余绍峰、高胜友编写,第3章由鲁宗相编写,第4、5章由余绍峰、鲁宗相

编写，附录 A 由高胜友、胡文堂编写。全书由胡文堂、余绍峰统稿。本书在编写过程中得到了浙江省电力试验研究院何文林、孙翔，清华大学吴林林、赵明欣，金华电力局汪卫国，湖州电力局顾克拉，衢州电力局金祖龙，绍兴电力局章剑光，浙江电力调度通信中心王超、叶琳，杭州师范大学成睿等同志的大力协助和诸多宝贵意见，在此一并表示感谢。

限于作者水平，本书中如有不妥之处，敬请读者谅解指正。

编 者

2011 年 9 月



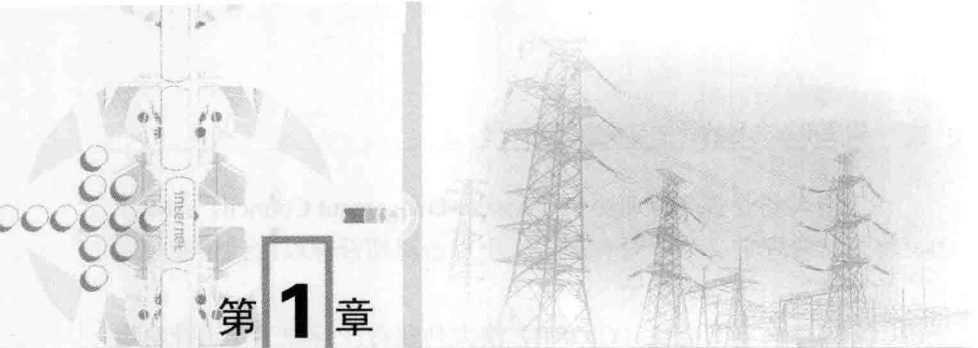
目 录

序

前言

第 1 章 基于设备风险的状态检修体系	1
1.1 技术原理	1
1.2 基于风险的状态检修体系架构	30
第 2 章 设备状态评估与故障率计算	38
2.1 设备状态评估方法	38
2.2 故障诊断	41
2.3 基于设备状态的故障率定义	48
2.4 设备故障率的统计计算方法	52
第 3 章 设备风险评估	59
3.1 设备风险评估技术构成	59
3.2 非系统类风险评估	62
3.3 系统类风险评估	65
3.4 考虑变电站主接线的输电系统的系统风险评估	75
3.5 小结	81
第 4 章 检修策略优化	83
4.1 基于风险的检修决策概述	83

4.2 输变电设备基于风险的检修决策技术	86
第 5 章 应用实例	96
5.1 状态检修辅助决策系统	96
5.2 IEEE-RTS79 系统	97
5.3 IEEE30 节点系统	107
5.4 断路器风险评估	112
 附录 A 油浸式变压器缺陷指数的确定方法	 117
 参考文献	 148



第 1 章

基于设备风险的状态检修体系

1.1 技术原理

1.1.1 电网资产管理

1.1.1.1 资产管理的基本概念

研究资产管理首先应当明确资产的概念。从历史看，对资产的定义有多种观点，目前有两种观点比较权威：《企业会计准则》规定，“资产是企业拥有或者控制的能以货币计量的经济资源，包括各种财产、债权和其他权利”；《企业会计制度》规定，“资产是指过去的交易、事项形成并由企业拥有或者控制的资源，该资源预期会给企业带来经济利益”。国际会计准则在框架中将资产定义为“资产是指作为以往事项的结果而由企业控制的可望向企业流入未来经济利益的资源”。可以看出，我国对资产的定义从理论上与国际会计准则保持了基本一致。

目前对资产管理的定义还不统一，英国资产管理协会（The Institute of Asset Management UK, IAM）在其资产管理标准 PAS 55-1 中将资产管理定义为“系统而经过协调的活动和实务；通过这些活动和实务，某一组织能够为了达成组织战略规划目标而优化地管理其资产、与资产有关的绩效、风险和资产的生命周期内的费用”。

澳大利亚资产管理协会（Asset Management Council, AMC）将资产管理定义为“对有形资产全寿命周期管理以达到企业规定的要求”。

国际大电网会议（CIGRE）澳大利亚资产管理工作组针对电力工业将资产管理定义为“资产管理是一个组织内为满足用户和股东要求而实施的一系列与资产开发、运行和维护相关的业务过程，这些要求一般包含成本、效能、安全、对环境的影响和安全生产”。

英国国家电网公司（National Grid Transmission UK）将资产管理定义为“关于优化公司有形资产全寿命期内成本、性能和风险对业务影响的学科和方法”。

可见资产是一个很广泛的概念，应当包括一个企业实施其战略规划所需的所有关键因素，具体而言，这些因素可以分为以下五类：

- （1）有形资产。自然资源、基础设施、机器、厂房、设备、建筑物、信息技术系统。
- （2）人力资产。领导力、管理、劳动力、技能、知识和经验。
- （3）金融资产。现金、投资、股票、信用评级。
- （4）信息资产。数据和信息。
- （5）无形资产。声誉、企业文化、公共形象/关系、品牌价值、许可、专利、商标、版权和文化。

由于本书主要研究有形资产的管理，因此，只有其他四种类型的资产影响了有形资产的管理的时候，才会考虑这些类型的资产。其他资产与有形资产之间存在很多交互和影响，例如：人力资产中员工的态度、知识和能力对有形资产的绩效具有根本性的影响；基础设施投资、运行、维护需要金融资源的支持；资产管理方案的制订、优化和实施需要优质系统的数据和信息支撑，这也是当前资产管理面临的重要问题之一；企业的声誉和形象可能会对基础设施投资、运行战略和有关费用产生重大影响。有形资

产是联系其他资产的纽带和基础，应当将这五方面的资产当做一个整体来研究。由于研究方法的需要，选择其中最基础和核心的有形资产为主体开展研究。

有形资产与其他类型资产之间的关系如图 1-1 所示。

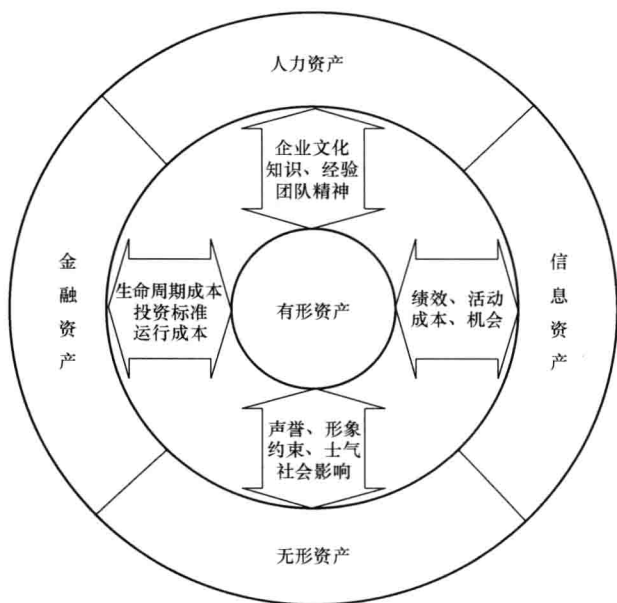


图 1-1 有形资产与其他类型资产之间的关系

综合上述对资产管理的定义，并结合电网企业资产的特点，本书对电网资产管理作如下定义：以企业资产为研究对象、以风险为管理工具，以实现企业战略为管理目标，统筹考虑资产规划、设计、采购、建设、运行、检修、技改、报废的全过程，考虑电网安全的约束，追求资产绩效和组织收益最优的管理方法。

1.1.1.2 资产管理的组织架构及优点

在一个组织中开展资产管理需要涉及三种角色：资产的所有

者、管理者和实际操作人员。他们在资产管理的流程中的角色不同，承担的责任也不同。资产管理者将资产的所有者和资产运作分隔开，资产所有者只负责对一个资产计划设定金融、技术和风险方面的准则。而资产的操作人员则负责将既定的规划付诸实践，实施相应的决定，同时根据实际的成本和绩效获取收益。资产管理的组织架构如图 1-2 所示，由图可看出各个角色负责的内容和职责。

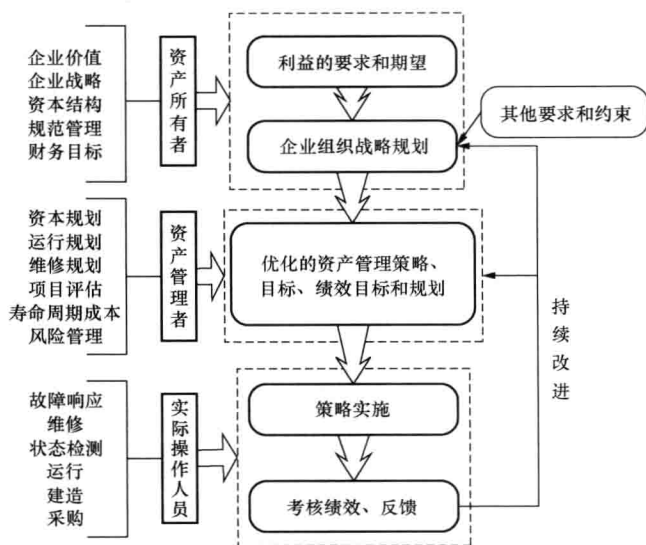


图 1-2 资产管理的组织架构

这种分离的结构使得资产管理的每个环节都有一个目标：资产所有者对应企业战略；管理者对应于企业的规划和预算；实际操作人员则将目标定位于操作的绩效。资产所有者根据成本、绩效和风险来制定企业战略和公司目标；管理者在企业的长期规划中制订实现上述目标的最佳方案；而实际操作人员则通过一个最有效率的方式实现上述计划，并将资产和绩效数据反馈到资产管理系统中来。

可见通过资产管理可以将整个企业资产流程中各个相关角色

的目标与企业的整体发展规划统一起来,实现资产长远收益的最大化。具体而言实施资产管理可以获得以下几方面的收益:

- (1) 平衡企业运行的成本、绩效和风险。
- (2) 确保企业的投资、维护决策与公司既定目标保持一致。
- (3) 制订长期的资产计划。
- (4) 规范业务流程,明确岗位职责与任务。
- (5) 提高企业的物资管理水平。

1.1.1.3 资产管理系统流程

由于资产管理在企业管理中越发受到重视,欧洲的一些结构和组织逐渐意识到资产管理规范化和指标化的重要意义,因此开展了大量的工作。其中最重要的就是通过英国资产管理协会和英国国家标准机构(BSI)为有形资产的联合、优化和可持续管理制定并发布的第一版《公共可用的规范》(Publicly Available Specification),即 PAS 55。它由来自 10 个国家、15 个区域的 50 多个公共和私人组织参与编制,2004 年首次发布,2008 年更新后再次发布。其中 PAS 55-1 列出了资产管理需要开展的工作;PAS 55-2 以实施指南为主要内容,提供了详细的实施指南以及对如何满足第一部分的要求进行了说明,它涉及资产管理最佳实践的 28 个方面,包括从全寿命策略到日常维修(成本/风险/性能)管理。

PAS 55 将一个完整的资产管理系统分为以下五个要素(见图 1-3):

- (1) 方针与战略。
- (2) 资产管理信息、风险评估和规划。
- (3) 运行和实施。
- (4) 检查和纠正措施。
- (5) 管理评审。

以上五部分内容构成了一个完整的闭环系统,可以确保系统的持续适宜性、充分性和有效性。实际上上述过程构成了完整的

PDCA (plan、do、check、action, 简称 PDCA) 过程, 即“计划、实施、检查、评价”四个阶段周而复始的循环过程。

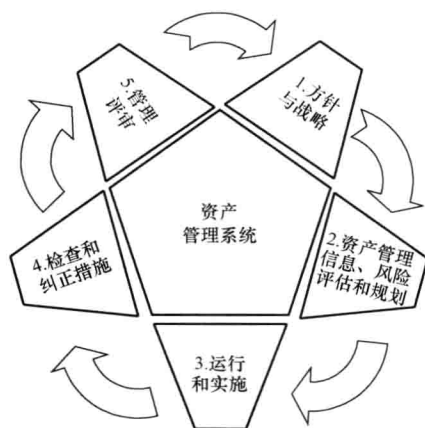


图 1-3 资产管理流程

方针与战略是整个资产评估系统的核心思想, 确定了资产管理系统的远景目标和整体轮廓。具体的系统以资产信息为支撑, 以风险为主要衡量手段, 以规划实现管理战略, 构成了整个资产管理系统的理论体系。具体的运行和实施环节则涉及整个系统人员的调派、职责的明确、任务的实施, 是系统战略目标的实现层。一个完善的系统, 在进行评估管理后进行系统的后评估是非常重要的。因此检查和纠错环节就是对系统的前三个环节进行检验和校核, 对资产管理的绩效进行评估, 以便对当前系统进行修正。组织的最高管理层应按规定的时间间隔对资产管理系统(过程)进行评审, 以确保系统的正确性和持续改进。

1.1.2 全生命周期成本管理

1.1.2.1 寿命周期成本管理的基本概念

寿命周期成本 (life cycle cost, LCC) 在不同的行业定义各不相同。美国预算局所给的定义是: LCC 是大型系统在预定有效期期

内发生的直接、间接、重复性的、一次性的及其他有关的费用，它是设计、开发、制造、使用、维护、保障等过程中发生的费用和预算中所列入的必然发生的费用的总和。而美国国防部所给的定义是：系统的 LCC 是政府（军方）为了设置和获得系统以及系统一生所消耗的总费用，包括开发、设置、使用、后勤保障和报废等费用。对于电力行业而言，寿命周期成本是指在保证系统可靠性的前提下，设备在整个寿命周期内所花费的总费用，包括购置费用（acquisition cost, AC）和维护费用（sustaining cost, SC），具体可用下式表示

$$LCC = AC + SC \quad (1-1)$$

式中 LCC ——设备寿命周期成本；

AC ——设备购置费用，包括设备的开发、设计、制造、运输、安装调试等非重复性投资费用和部件升级、人员培训、环保等重复性投资费用；

SC ——设备维护费用，包括能源消耗、维修、操作、技术资料管理和报废费用等。

寿命周期成本如图 1-4 所示。

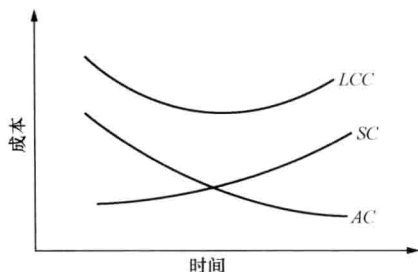


图 1-4 寿命周期成本

从图 1-4 可以看出，设备的寿命周期成本中，维护费用所占

的比例是逐年上升的,而且在很多情况下,购买设备的费用低于整个寿命周期的维护费用,通常设备的残值又很低,因此在考虑设备投资的时候,应该考虑设备的整个寿命周期的费用,而不应当只考虑它的初始价格。设备寿命周期各个阶段费用的对比如图 1-5 所示,可以看出系统的寿命周期成本主要集中在运行和维修阶段,占全系统费用的 45%。

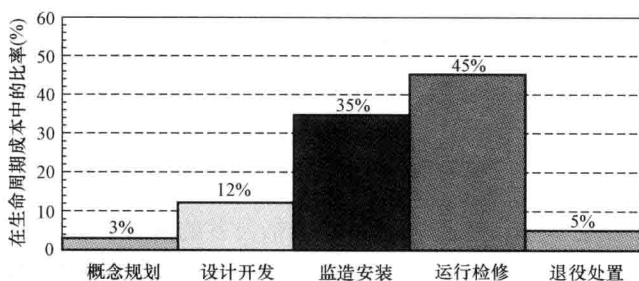


图 1-5 设备寿命周期各个阶段费用对比

图 1-6 所示为帕累托曲线 (pareto curve), 表示在一个武器系统的全寿命周期中各个阶段对 LCC 的影响情况。由图 1-6 可以看到, 在系统方案设计论证确定的时候, LCC 的 70% 大体上已被决定; 在研制定型结束时, LCC 的 85% 已被决定; 到全面研制工作结束时, 该武器系统 LCC 的 95% 已被决定了; 而使用、维护阶段的活动对 LCC 的影响仅仅占 1%。这就是说, 一个武器系统的全寿命周期成本实际上主要由其投产前的各个阶段确定, 全寿命周期中的早期阶段对后期阶段有着很大的决定和制约作用。因此, 全寿命周期模式相对传统模式而言, 商品生产过程的投入高, 商品使用过程中的投入极低。对比图 1-5 和图 1-6 发现, 在典型产品的寿命周期成本中, 方案论证阶段和研制阶段的费用虽然只占很小部分, 但该阶段的决策决定了 90%~95% 的寿命周