

# 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究

王佳明<sup>1</sup>, 刘文颖<sup>1</sup>, 魏帆<sup>2</sup>, 杜培<sup>3</sup>, 汪隆臻<sup>4</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 北京市海淀供电公司, 北京 100086;  
3. 江苏省太仓市供电公司, 江苏 太仓 215400; 4. 安徽省马鞍山供电公司, 安徽 马鞍山 243000)

**摘要:** 针对目前电力系统中的输变电设备大多采用计划检修体制, 存在着临时性维修频繁、维修不足或维修过剩、盲目维修等严重问题, 引入输变电设备状态检修的方法, 并结合寿命周期成本管理进行了理论推导。提出利用周期成本管理和设备风险总值计算出优先检修系数进行状态检修, 在完成整个设备状态检修的风险决策的同时将输电设备的使用与维护成本最小化, 具有工程实用性。

**关键词:** 输变电设备; 状态检修; 寿命周期成本管理; 优先检修系数

## Study on policies of condition based maintenance of transmission and distribution equipments combined with life cycle cost management

WANG Jia-ming<sup>1</sup>, LIU Wen-ying<sup>1</sup>, WEI Fan<sup>2</sup>, DU Pei<sup>3</sup>, WANG Long-zhen<sup>4</sup>

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. Beijing Haidian Power Supply Company, Beijing 100086, China;  
3. Jiangsu Taicang Power Supply Company, Taicang 215400, China;  
4. Anhui Ma'anshan Power Supply Company, Ma'anshan 243000, China)

**Abstract:** The current maintenance of electrical transmission and distribution equipments is time based maintenance. It always causes frequent temporary repair, inadequate or excess maintenance, blind repair and other serious problems. According to these, the paper introduces condition-based maintenance approach, and conducts theoretical derivation combined with life cycle cost management. Using the life cycle cost and equipment risk-value to calculate the priority maintenance factor and carry out the condition-based maintenance can not only accomplish the whole risk decision but also minimize the use and maintenance cost of transmission facilities. It is of the great practicality in the field of engineering.

**Key words:** electrical transmission and distribution equipment; condition-based maintenance; life cycle cost management; priority maintenance factor

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0077-04

## 0 引言

我国电力设备检修维护执行的是以预防性试验规程为基础的**计划检修制度** (Time Based Maintenance, TBM)。在全国大区电网逐步实现互联后, 电网中输变电设备数量剧增, 以往采用的周期检修和故障检修, 普遍存在着欠修或过修问题<sup>[1]</sup>, 对电网安全稳定造成重大的威胁, 导致设备维护资源的浪费, 同时随着设备维修工作量的大幅度上升也浪费了大量的人力物力。因此, 传统的检修方式已不能满足实际生产的需求。为此, 基于设备状态的状态检修 (Condition Based Maintenance, CBM) 应运而生。它从设备实际状态出发来制定检修计划,

大大减少了以往盲目进行的例行检修工作<sup>[2]</sup>。

电力企业在保障电力系统安全稳定运行的同时, 也在追求经济盈利, 履行社会责任, 而设备资产管理则是重要手段, 其中寿命周期成本管理 (Life Cycle Cost, LCC) 为实现上述目标提供了坚实的基础。输变电设备的寿命周期成本管理包括由输变电设备选型、设计、制造、试验、营销、运行、维护、能耗、保险、检修和报废等构成的设备制造成本和未来的建造运行成本<sup>[3]</sup>。对于输变电设备检修而言, LCC的提出促使电力企业综合考虑检测费用和系统故障率后再确定最佳的检测方案, 并相应地采用合理的维修方式。降低设备的检测和维修总费用, 延长设备使用周期, 保证系统运行的可靠性。

## 1 输变电设备寿命周期成本管理

输变电设备寿命周期成本管理一般表达式是：

$$LCC=RDT\&E+PROD+Q\&S=ACPC+O\&S \quad (1)$$

式中： $RDT\&E$  表示研究与研制费用； $PROD$  表示采购投资费用； $ACPC$  表示采办费用； $Q\&S$  表示使用与维护费用<sup>[4]</sup>。

$LCC$  涵盖了三种含义：首先，输变电设备寿命周期成本管理是一种实现包括建设期、使用期和翻新与拆除期等阶段在内的总造价最小化的方法。其思想和方法不只局限于工程项目建设前期的投资决策阶段和设计阶段，还进一步在施工组织设计方案的评价、工程合同的总体策划和工程建设的其他阶段中使用，尤其是考虑项目的运营与维护阶段的成本管理。

其次，输变电设备寿命周期成本管理的思想和方法可以指导企业自觉地、全面地从工程项目寿命周期出发，在工程项目投资决策、可行性分析和项目备选方案评价等项目前期工作阶段中，综合考虑项目的建造造价和运营与维护成本，从而实现更为科学合理的投资决策。

最后，输变电设备寿命周期成本管理是工程造价管理中设计阶段的一种以控制成本为目的的手段，它能以货币值的形式计算出工程项目在寿命周期内直接的、间接的、社会的、环境的所有成本，以确定设计方案的技术方法。在任何一个工程项目的过程中，不管使用什么方法，在确保设计质量的前提下，综合考虑工程项目的建造造价和运营与维护成本，实现寿命周期成本最优化的目标。

在表达式 (1) 中，我们用  $M_1$  表征采办费用即生产建设成本，它与产品或工程项目的功能大致成正比；用  $M_2$  表征使用与维护费用，在产品或工程项目使用运营过程中，因受自然环境及人为因素影响  $M_2$  与功能大致成反比。

因此，寿命周期成本便由生产建设成本  $M_1$ 、使用维护成本  $M_2$  和固定成本  $C$  三部分组成，式 (1) 可具体表述为下式：

$$LCC=\alpha G+\beta /G+C \quad (2)$$

式中： $\alpha$ 、 $\beta$  分别为生产建设成本和使用与维护费用对于产品或工程项目功能的比例系数； $C$  表示固定成本（对于某一产品或工程项目可视为固定不变）。将式 (2) 对  $G$  求导，令其等于零，得到  $LCC$  最小时的功能  $G$ ，即：

$$G=\sqrt{\beta / \alpha} \quad (3)$$

式 (3) 表明，产品或工程项目的功能是由其设计制造生产和使用维修共同实现的。由式 (3) 可得：

$$\alpha G=\beta /G \quad (4)$$

式 (4) 说明，当产品或工程项目的生产建设成本  $M_1$  和使用维护成本  $M_2$  相等时，其寿命周期成本最小，而寿命周期成本最小时的功能就是产品或工程项目的最适宜功能。同时，由式 (2) 可以看出任何一个产品或工程项目的功能值太小时，生产建设成本  $M_1$  小而使用维护成本  $M_2$  大；反之，功能值过大，生产建设成本  $M_1$  大而使用维护成本  $M_2$  小；两种情况下都使寿命周期成本加大。

式 (4) 不仅阐述了产品或工程项目寿命周期成本最小化的实现方法，而且也表明了输变电设备状态检修时引入寿命周期成本管理的基本思路。

## 2 输变电设备的状态检修

状态检修是指一种以设备监测、诊断、评估提供的状态信息为依据的预防性检修，即根据设备的运行状态和健康状况而执行检修的预知性作业。实施基于状态检修技术的新型管理模式，在技术上能对设备故障进行预测<sup>[5]</sup>。

随着电力电子技术、传感技术、信息处理技术、计算机和网络技术的快速发展，在线监测技术在广泛使用这些先进技术的基础上取得了较大突破，状态检修开始进入实用化阶段。设备状态检修是根据先进的状态监测和故障诊断技术提供的设备状态信息，判断设备的异常，预知设备的故障，在故障发生前进行检修的方式，即根据设备的健康状态来安排检修计划，实施设备检修。状态检修技术包含以可靠性为中心的检修技术和预测检修技术<sup>[6]</sup>。

输变电设备状态检修的实现应主要包括以下三个方面：(1) 设备状态信息收集；(2) 设备状态评价；(3) 检修策略制定<sup>[7]</sup>。

国外的设备状态检修发展较早，在状态检修技术研究与实践应用方面都已取得了显著的成绩，如美国、德国、日本、法国等国家，状态检修技术研究与实践应用方面都有了较成功的经验。美国电力科学研究院 (EPRI) 就对电力设备的状态检修进行研究和应用，目前已向 RCM (Reliability Centered Maintenance) 发展。加拿大魁北克水电公司也开发了一套在线状态监视系统，使维修人员不停机就能了解水机组的状态。日本发电设备检修协会也对在日本核电站开展状态检修工作进行了专题研究，并在检修中采用设备诊断和寿命评估技术<sup>[8]</sup>。

电力系统输变电设备朝高电压、大容量的方向

发展, 社会对电力系统的安全可靠性指标的要求不断提升。因此, 从计划检修向状态检修模式的转变, 是电力系统发展的必然趋势<sup>[9]</sup>。

### 3 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修

对于输变电设备而言, 在状态检修工作流程中, 首先是对设备的状态进行评估和诊断, 得到设备发生某一类型故障及其可能性后, 再进行设备风险评估, 最后结合不同维护方案, 完成整个设备状态检修的风险决策。完整的设备状态检修决策流程如图 1 所示。在输变电设备的状态检修过程中结合寿命周期成本管理的思想和方法可以将输电设备的使用与维护成本最小化<sup>[10]</sup>。

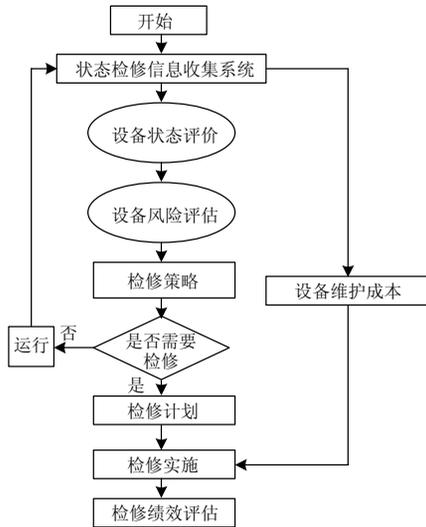


图 1 设备状态检修决策流程图

Fig.1 Policy flowchart of condition based maintenance of equipments

在输变电设备状态检修过程中, 最重要的环节是对设备进行风险评估计算, 目前对于设备风险的计算主要有定性和定量两种方式, 实际应用中往往两者同时结合进行。设备风险可以从设备损失、人身环境损失、电力系统损失和社会损失等 4 个独立的方面来进行计算。因此, 设备总风险值可表示为:

$$F(t) = P(t) \sum_{i=1}^4 k_i(t) S_i(t) L_i(t) \quad (5)$$

其中:  $F(t)$  为单一设备故障引起的设备总风险;  $P(t)$  为设备缺陷引起设备故障发生的可能性;  $k_i$  为 4 个因素在某种权重关系下的系数;  $S_i(t)$  为设备故障引起的不同后果;  $L_i(t)$  为设备故障引起 4 个因素风险的可能性,  $t$  为某一时刻。式 (5) 中的求和符号是广义上的求和, 不是简单的相加。

对于单个的输变电设备, 计算出它的设备总风险值后, 就可以确定该设备是否进行状态检修了, 假定第  $j$  次状态检修费用系数为  $w_j$ , 则该设备总的维护费用  $H$  为:

$$H = \sum_{j=1}^n w_j \quad (j=1, 2, 3 \dots) \quad (6)$$

式中,  $j$  为该设备在退出运行前的检修次数。

此时可将使用维护成本  $M_2$  分解成设备使用折旧费  $Z$  和上面所用的维护费用  $H$ , 可得到:

$$M_2 = \beta G = Z + H \quad (7)$$

结合式 (4) 和式 (7) 则可得到该设备状态检修的次数  $j$  以及何时退出运行, 即总的使用维护费用大于生产建设成本时, 做到对单个设备的状态检修进行寿命周期成本管理。

对于关联的  $n$  个输变电设备, 计算出他们的总风险值后, 假设对其中的第  $i$  个设备的第  $j$  次状态检修的维护费用为  $R_{ij}$ , 则计算优先检修系数  $B$ :

$$B = \frac{R_{ij}}{F_{ij}(t)} \quad (i, j=1, 2, 3, \dots) \quad (8)$$

其中,  $F_{ij}(t)$  为第  $i$  个设备第  $j$  次的总风险值。

对于  $n$  个设备来说,  $B$  值最小的设备, 则优先进行状态检修。而传统的风险决策往往利用风险矩阵, 不规避风险需要付出的成本, 直接利用风险程度的高低来进行检修排序, 在经济上极为不合理。这也是输变电状态检修与寿命周期成本管理相结合的优势所在。

### 4 结论

本文针对目前电力系统中的输变电设备大多采用计划检修体制, 存在着临时性维修频繁、维修不足或维修过剩、盲目维修等严重问题, 引入了状态检修的方式, 并结合寿命周期成本管理进行了理论推导。提出了优先检修系数的概念, 对怎样合理安排电力设备的检修, 节省检修费用、降低检修成本提供借鉴和参考。

### 参考文献

[1] 张成林, 王克英. 变电设备状态检修现状与展望[J]. 供用电, 2006, 23(6): 1-3, 18.  
ZHANG Cheng-lin, WANG Ke-ying. Substation equipment condition-based maintenance status and prospects[J]. Supply and Use of Electric Power, 2006, 23(6): 1-3, 18.  
[2] 许婧, 王晶, 等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 48-52.

XU Jing, WANG Jing, et al. Power equipment maintenance technology research[J]. Power System Technology, 2000, 24(8) : 48-52.

[3] 郭基伟, 谢敬东, 唐国庆. 电力设备管理中的寿命周期费用分析[J]. 高电压技术, 2003, 34(29): 13-15.

GUO Ji-wei, XIE Jing-dong, TANG Guo-qing. Analysis on electric power equipment management life cycle cost[J]. High Voltage Technology, 2003, 34(29): 13-15.

[4] 徐敏, 刘井萍, 左重华, 等. 变电设备状态检修中试验数据的处理方法探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 91-93, 98.

XU Min, LIU Jing-ping, ZUO Chong-hua, et al. Researches on test data processing method in electric equipments maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22) : 91-93, 98.

[5] Thurston M G. An open standard for web-based condition based maintenance system[C]. //IEEE Systems Readiness Technology Conference, 2001.

[6] 吴宏斌, 盛继光. 继电保护设备可靠性评估的数学模型及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9) : 65-68.

WU Hong-bin, SHENG Ji-guang. Mathematical model and its application of relaying protection device reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 65-68.

[7] Guunic P. On-line monitoring and diagnosis : EDF practices and orientations[C]. //Cigre Symposium on Diagnostic and maintenance Techniques. Berlin, Germany:

1993.

[8] 宋人杰, 王晓东. 输变电设备状态检修评估分析系统的研究[J]. 继电器, 2008, 36(9): 54-57, 63.

SONG Ren-jie, WANG Xiao-dong. Research on assessment and analysis system of condition-based maintenance for power transmission and transformation equipment[J]. Relay, 2008, 36(9) : 54-57, 63.

[9] 方晴, 罗军川, 华永东. 输变电设备状态维修策略[J]. 四川电力技术, 2008, 30(2): 1-5.

FANG Qing, LUO Jun-chuan, HUA Yong-dong. Condition based maintenance strategy for power transmission and transformation equipment[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2008, 30(2):1-5.

[10] 余绍峰, 胡文堂, 陈金法. 输变电设备风险评估与维修决策[J]. 浙江电力, 2009(3): 1-4, 64.

YU Shao-feng, HU Wen-tang, CHEN Jin-fa. Power transmission equipment risk assessment and maintenance decision[J]. Zhejiang Electric Power, 2009(3) : 1-4, 64

收稿日期: 2010-03-05; 修回日期: 2010-04-21

作者简介:

王佳明 (1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制及电力系统智能调度技术; E-mail: wangjiaming138@163.com

刘文颖 (1955-), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析、运行与控制及电力系统智能调度研究工作;

魏帆 (1984-), 男, 助理工程师, 从事配电运行管理工作。

(上接第 76 页 continued from page 76)

LIN Shun-jiang. Study on dynamic load characteristic modeling and its influence to voltage stability[D]. Changsha: Hunan University, 2008.

[14] 马世英, 印永华, 汤涌, 等. 短期和中长期电压稳定仿真及评价[J]. 电网技术, 2006, 30 (19) : 14-20.

MA Shi-ying, YIN Yong-hua, TANG Yong, et al. Simulation and evaluation for short term and mid/long term voltage stability[J]. Power System Technology, 2006, 30 (19) : 14-20.

[15] 林舜江, 刘明波. 暂态电压稳定仿真及其增强措施初探[C]. //中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会, 2008: 414-418.

LIN Shun-jiang, LIU Ming-bo. Preliminary exploration of transient voltage stability simulation and the enhancements[C]. //China Universities Power System

and Automation 24th Session of the Annual Conference, 2008: 414-418.

[16] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004

ZHOU Shuang-xi, SONG Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power system voltage stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2010-03-12; 修回日期: 2010-07-15

作者简介:

李海琛 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制; E-mail: lhc020@163.com

刘明波 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制;

林舜江 (1980-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制。