

基于全寿命周期成本的配电设备检修管理

随着电力行业的发展,电网设备的增多,对电网配电设备的检修管理成为重要的研究课题。但是目前采用的电网配电设备定期检修策略存在较多缺点。合理的检修策略可以保证配电设备的健康水平,减少设备的故障发生率,提高电网的可靠性,同时能够保证电网的安全、稳定运行。全寿命周期管理方法可以有效地考虑设备可靠性和检修策略的经济性。因此,针对配电设备进行了全寿命周期成本分析,在定期检修策略和状态检修策略下,比较配电设备的全寿命周期成本,确定了配电设备的最优检修策略。

蒲超廷 杨帆 肖彬 刘岑俐/贵州电网有限责任公司凯里供电局

0 引言

电力供电系统设备种类多,为了有效地保证供电系统正常运行,保证设备的健康水平,需要对电网的供电设备进行检修。不同设备的检修策略,不仅决定设备的检修成本,同时还影响电网设备的可靠性,以及电网能否安全、稳定运行。因此,在电力供电系统设备检修时,需要选择合理的检修策略,降低设备的检修成本和故障成本,同时保证系统的正常运行^[1]。

目前,我国电力系统的供电设备检修主要采用定期检修策略(Time Based Maintenance, TBM)。定期检修策略是目前一种成熟的设备检修方法,按照固定的时间周期和规定的规范对设备进行检修。这种定期检修策略优点是可以较早避免设备故障,提高设备的健康水平,保证系统的稳定运行,但是也存在很多缺点:①定期检修策略缺乏经济性,严格按照时间周期进行检修,以免造成不必要的浪费^[2];②定期检修策略没

有考虑设备服役条件和设备状态的差异性,使需要检修的设备未能得到及时的检修,而无须检修的设备出现了过多的检修。检修过多,不仅影响电网的正常运行,同时可能因检修不当而使设备出现隐患,增加了设备的故障发生概率,影响了电网的可靠性;而设备检修不足,则会导致供电设备故障率增加,影响电网的正常运行^[3]。

近年来,随着电力行业的快速发展,对电力设备可靠性的要求也越来越高,而供电设备的定期检修策略已经无法满足要求,需要研究新的供电设备检修策略,以提高电力设备的可靠性和检修的经济性,既保证电网的稳定运行,又不造成资源的浪费。

全寿命周期管理(Life Cycle Asset Management, LCAM)是目前生产制造领域广泛使用的设备、产品管理方法,从产品的需求、设计、规划、制造、使用、维修、更新、改造到回收等全部环节综合考虑成本因素,实现对产品的全周期管理^[4]。全寿命周期管理既考虑了设备的可靠性,又考虑了设备的效能和经济性,实现了经济效益的最大化。因此,可以利用全寿命周期管理方法对电网系统供电设备进行成本分析,结合目前已有的检修策略,制定合理的供电设备最优检修方法。

1 配电设备全寿命周期分析

1.1 全寿命周期成本介绍

全寿命周期成本(Life Cycle Cost,



蒲超廷/工程师

关键词/Keywords

全寿命周期成本·
配电设备·
故障检修·
维修成本·

LCC)是指供配电设备从购买、运行、维修、更新、改造到回收的全过程所产生费用的总和。按照全寿命周期成本的定义,供配电设备的全寿命周期成本主要包括初始成本和未来成本。初始成本主要指供配电设备的购买、安装等最开始投资成本;未来成本主要是指供配电设备在服役、运行过程中所产生的各种费用,包括运行成本、维修成本、修理成本、管理成本以及改建、大修等成本^[5]。供配电设备的全寿命周期成本组成结构如图1所示。

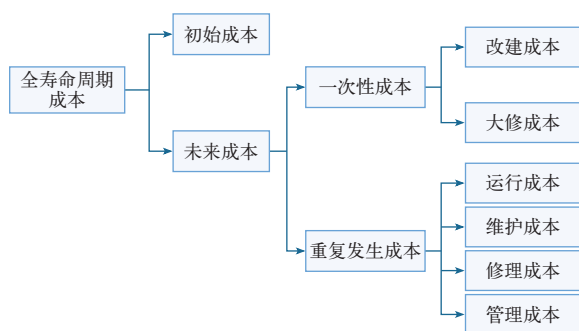


图1 全寿命周期成本分类

1.2 配电设备全寿命周期成本计算方法

对设备全寿命周期成本计算方法的研究较多,目前常用的方法有参数估算法、神经网络估算法、可靠性理论估算方法和工程估算法等。针对电力系统供配电设备的运行要求特征,电网对设备的可靠性要求很高,因此,选择可靠性理论估算方法对供配电设备的全寿命周期成本进行估算。

设备的可靠性是指在规定的条件下和规定的时间内,设备不发生故障的概率。假设设备从服役到第一次故障的时间为设备的无故障工作的时间,则设备的可靠性可表示为

$$P(t) = P(T > t) \quad (1)$$

通常将设备的4个可靠性特征量作为该设备的可靠性指标,以此来衡量该设备的可靠性,4个可靠性特征量分别为:①可靠度函数 $R(t)$;②失效概率密度函数 $f(t)$ 和累积失效概率函数 $F(t)$;③故障率函数 $\lambda(t)$;④平均寿命函数。

可靠度函数 $R(t)$ 是表征设备在某一段时间内可以正常运行的概率大小,可表示为

$$R(t) = P(T > t) \quad (2)$$

可靠度函数 $R(t)$ 可以视为设备故障分布的可靠度函数,因此设备的累积失效概率函数 $F(t)$ 可表示为

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - R(t) \quad (3)$$

则可得设备的失效概率密度函数 $f(t)$ 为

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (4)$$

故障率函数 $\lambda(t)$ 是指设备在固定时间内的平均失效率,可以表示为

$$\lambda(t, \Delta t) = \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (5)$$

不可修复设备故障率曲线和可维修设备的故障率曲线如图2和图3所示。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,得到时刻的故障率函数 $\lambda(t)$ 为

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \lambda(t, \Delta t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t) \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t) \Delta t} \quad (6) \\ &= \frac{F'(t)}{R(t)} = \frac{[1 - R(t)]'}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \end{aligned}$$

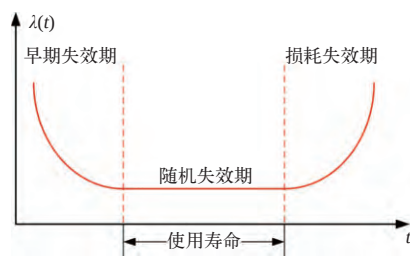


图2 不可修复设备故障率曲线

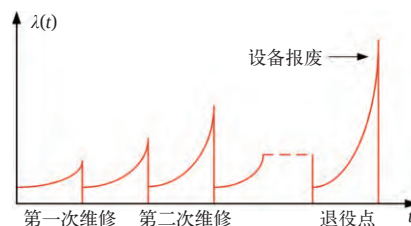


图3 可维修设备的故障率曲线

设备的平均寿命函数包括不可修复设备的平均故障前时间(Mean Time To Failure, MTTF)和可修复设备平均寿命为相邻两次故障间平均工作时间(Mean Time Between Failure, MTBF)。可维修设备的平均寿命和设备的状态转化如图4所示。

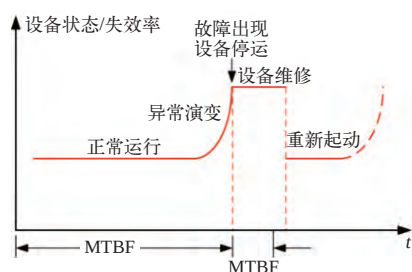


图4 可修复设备状态转化

假设设备的寿命为 T ，则设备平均寿命MTTF可表示为

$$MTTF = E(T) = \int_0^{+\infty} t f(t) dt = - \int_0^{+\infty} t dR(t) = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (7)$$

由式(7)可知，计算设备平均寿命需要获取设备故障数据的统计分布。在可靠性分析中，假定威布尔分布为设备故障数据的分布，其分布函数为

$$F(t|m, \eta, \mu) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t-\mu}{\eta}\right)^m} & t \geq \mu \\ 0 & t < \mu \end{cases} \quad (8)$$

式中， m 为形状参数； η 为尺度参数； μ 为位置参数，若 $\mu=0$ ，则威布尔分布的分布函数和概率密度函数为

$$F(t|m, \eta, \mu) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (9)$$

$$f(t|m, \eta, \mu) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (10)$$

此时，可得设备的可靠度函数 $R(t)$ 和设备平均寿命为

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (11)$$

$$MTTF = \int_0^{+\infty} R(t) dt = \int_0^{+\infty} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} dt \quad (12)$$

首先将根据供配电设备的历史故障数据拟合威布尔分布曲线，估算和确定威布尔分布的形状参数 m 和尺度参数 η ，从而可以计算出设备的故障率，确定设备的故障成本和维修成本。

2 配电设备全寿命周期成本模型

根据全寿命周期成本的估算方法，电力设备的全寿命周期成本的静态模型可表示为

$$LCC = CA + CO + CM + CF + CD - CR \quad (13)$$

式中， CA 、 CO 、 CM 、 CF 、 CD 和 CR 分别为设备的购置成本、运行成本、维修成本、故障成本、退役处理成本和设备剩余成本。

确定供配电设备的检修策略后，需要重点计算设备的维修成本、故障成本、退役处理成本和设备剩余成本。设备的维修成本可表示为

$$CM = \frac{T}{MTBF + MTTR} \sum_{j=1}^q (CM_{FTj} f_{FTj}) \quad (14)$$

式中， $\frac{T}{MTBF + MTTR}$ 为时间 T 内设备的维修次数；

q 为设备发生的故障类型数； f_{FTj} 为设备发生第 j 种类型故障的概率； CM_{FTj} 为设备发生第 j 种类型故障时的维修成本； $E(CM) = \sum_{j=1}^q (CM_{FTj} f_{FTj})$ 为每次故障后的平均维修费用。

设备故障成本是供配电设备发生故障后所造成的各种损失，包括停电损失、供配电设备的性能和寿命损失等。供配电设备的故障成本可表示为

$$CF = \frac{T}{MTBF + MTTR} C_{FM} \quad (15)$$

退役成本是指供配电设备服役期满或者报废时所需要的退役处理成本和设备剩余成本之差，退役成本可表示为

$$CDR = CD - CR \quad (16)$$

2.1 定期检修策略下的电力设备全寿命周期成本模型

在定期检修策略下，设备的维修成本模型主要包括两部分：①故障发生时的维修成本；②按计划定期检修时的成本模型。当故障发生时，设备的故障维修成本模型可表示为

$$\begin{aligned} CM_{TBM} &= \frac{T}{MTBF_1 + MTTR_1} \sum_{j=1}^q (CM_{FTj} f_{FTj}) \\ &= Z_1 TE(CM) \end{aligned} \quad (17)$$

式中， $MTBF_1$ 为策略TBM时的设备平均寿命； $MTTR_1$ 为设备的故障维修所需的时间； $Z_1 = 1/$

$(MTBF_1+MTTR_1)$ 为设备的平均故障率; $E(CM)$ 为每次故障维修的平均费用。

按计划定期检修时的成本模型主要包括3部分成本: 计划检修成本 CM_{PTBM} 、故障停机成本 CSF_{TBM} 和大修停机成本 CSF_{TBM} 。计划检修成本可表示为

$$CM_{PTBM} = Z_1 TC_{TBM} \quad (18)$$

式中, C_{TBM} 为设备大修所需要的费用。

故障停机成本 CSF_{TBM} 可表示为

$$CSF_{TBM} = \frac{T}{MTBF_1 + MTTR_1} C_{FM} Z_1 TC_{FM} \quad (19)$$

式中, C_{FM} 为设备在计划检修过程中发生设备故障时所导致的惩罚成本。大修停机成本 CSF_{TBM} 可表示为

$$CSF_{TBM} = Z_1 TC_{PRE} \quad (20)$$

式中, C_{PRE} 为大修时, 设备停机造成的损失的惩罚成本。因此, 可得设备在TBM策略下, 设备的全寿命周期成本为

$$LCC_{TBM} = CA + CO + CM_{TBM} + CS_{TBM} + CD - CR \quad (21)$$

2.2 状态检修策略下的电力设备全寿命周期成本模型

在状态检修策略 (Condition Based Maintenance, CBM) 下, 设备的维修成本主要包括设备故障时的维修成本和停机成本。维修成本可表示为

$$\begin{aligned} CM_{CBM} &= T \left[\frac{T}{MTBF_2 + MTTR_1} C_M + \frac{1-k}{MTBF_2 + MTTR_2} \cdot (C_{CBM} + C_{dg}) \right] \\ &= T [Z_2 k C_M + Z_3 (1-k) (C_{CBM} + C_{dg})] \end{aligned} \quad (22)$$

式中, k 为CBM策略下不可预测故障的发生概率; Z_2 为CBM策略下单位时间设备发生故障的数量; Z_3 为CBM策略下单位时间排除的设备的故障数量; C_{CBM} 为对设备可能发生的故障所进行的维修成本; C_{dg} 为对设备进行状态监测和故障诊断的成本。

停机成本包括故障停机成本 CSF_{CBM} 和计划停机成本 CSP_{TBM} , 故障停机成本 CSF_{CBM} 为

$$CSF_{CBM} = \frac{kT}{MTBF_2 + MTTR_2} C_{FM} = Z_2 TC_{FM} \quad (23)$$

计划停机成本 CSP_{TBM} 为

$$CSP_{TBM} = \frac{(1-k)T}{MTBF_2 + MTTR_2} C_{PFE} = Z_3 TC_{PRE} \quad (24)$$

因此, 可得设备在CBM策略下设备的全寿命周期成本为

$$LCC_{TBM} = CA + CO + CM_{CBM} + CS_{CBM} + CD - CR \quad (25)$$

3 配电设备检修管理实例分析

以某市电力公司某条220 kV输变电工程为例, 采集该输变电工程变电站主变压器的故障样本数据, 分别计算在定期检修策略和状态检修策略下该主变压器的全寿命周期成本, 分析不同的检修策略下的经济性, 验证基于全寿命周期管理模型的供配电设备检修策略的科学性和合理性。

3.1 主变压器维修成本计算

以该变电站的主变压器为研究对象, 分别以5年、10年、20年和30年的期限计算该主变压器的全寿命周期成本。假定该主变压器的故障数据服从威布尔分布, 采集到该地区的同型号的变压器的故障数据如表1所示。

表1 故障数据样本

样本编号	故障时间	样本编号	故障时间
1	19.32	6	26.95
2	20.54	7	28.32
3	21.64	8	31.66
4	23.72	9	35.59
5	24.56	10	37.65

通过威布尔分布检验可知, 这些故障样本数据服从威布尔分布, 威布尔分布参数和不同检修策略下的变压器平均寿命如表2所示。

表2 故障数据样本

检修策略	威布尔分布	参数估计				相关系数R	MTBF
TBM	是	-41.56	13.24	13.24	24.56	0.96	28.32
CBM	是	-41.56	13.24	13.24	24.56	0.96	25.67

根据获取的该地区同型号的变压器故障数据, 变压器的状态监测与评估系统可以正确地诊断变压器故障概率约为76%。通过人工检查、验证等可以诊断出变压器故障概率达98%。在计算状态

检修策略下的检修成本时,变压器故障诊断的准确率为73%,则参数 $k=27\%$ 。该主变压器在不同检修策略下的检修成本如表3所示。

表3 变压器检修成本

检修策略	故障检修成本 /(万元/年)	定期检修成本 /(万元/年)	动态检修成本/(万元)			
			5年	10年	20年	30年
TBM	0.14	1.25	6.78	13.32	25.32	35.65
CBM	0.1	—	6.78	8.18	10.76	13.43

3.2 停机和退役成本计算

变压器的停机成本主要包括变压器故障时的停机成本、大修时的停机成本、计划检修时的计划停机成本和日常故障检修时的动态停机成本。变压器的停机成本如表4所示。

表4 变压器停机成本

(单位:万元)

检修策略	故障 停机成本	大修 停机成本	计划 停机成本	动态停机成本			
				5年	10年	20年	30年
TBM	3.32	9.52	—	62.65	120.3	230.6	326.9
CBM	1.01	—	1.35	62.65	73.76	93.6	111.5

变压器的退役剩余成本一般计算为变压器初始成本的10%,即80万。则变压器的退役成本如表5所示。

表5 变压器退役成本

(单位:万元)

检修策略	处理成本	剩余成本	退役成本
TBM	6	80	-74
CBM	6	80	-74

3.3 全寿命周期成本计算

根据计算出的变压器维修成本、停机成本和退役成本,可以分别求得在定期检修策略和状态检修策略下变压器的全寿命周期成本,如表6所示。图5为在不同检修策略下变压器全寿命周期成本的比较结果。

表6 变压器全寿命周期成本

检修策略	变压器全寿命周期成本(万元)			
	5年	10年	20年	30年
TBM	866.78	1 016.5	1 289.5	1 535.2
CBM	930.78	1 008.8	1 208.6	1 369.5

由表6和图5可知,该变压器采用定期检修策略时,前期成本较低,但是后期的全寿命周期成

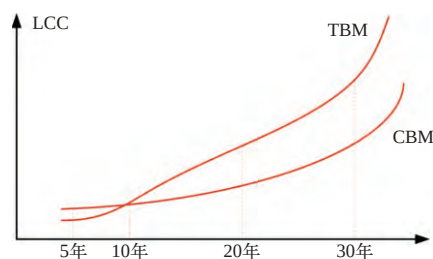


图5 不同检修策略下的变压器全寿命周期成本比较

本显著上升;而采用状态检修策略时,前期成本较高,但是后期的全寿命周期成本要远小于采用定期检修策略的成本。因此,根据该全寿命周期成本结果可以确定最优的变压器检修策略。

4 结束语

本文提出了基于全寿命周期成本的配电设备检修管理方法。为了避免目前常用的定期检修策略的缺点,利用可靠性估计算法对配电设备的全寿命周期成本进行计算,包括配电设备的故障维修成本、设备停机成本和退役成本等。根据配电设备在不同检修策略下的全寿命周期成本,可以确定配电设备的最优检修策略。同时,对某市变电站主变压器的检修策略进行研究,通过分析历史故障数据得到不同检修策略下的该变压器全寿命周期成本,验证了算法的合理性。

参考文献

- [1] 张宏,王健,文福拴,等.兼顾可靠性和经济性的电力设备最优状态维修策略[J].电力科学与工程,2006(2):8-13.
- [2] 杨红军,刘国贤,郭继芳,等.500 kV变电设备状态检修技术[J].电气应用,2008,27(6):79-82.
- [3] 马仲能,钟立华,卢锴,等.基于电力设备全寿命周期成本最优的检修策略研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(16):34-39.
- [4] 冀凯琳.基于LCC理论的电力设备检修策略研究[D].北京:华北电力大学,2011.
- [5] 郑云霞.基于费效分析的配电设备全寿命周期管理研究[D].北京:华北电力大学,2011.

(收稿日期:2015-02-10) EA