

DOI: 10.7500/AEPS20130219005

# 基于全寿命周期成本的变电站设备检修模糊规划模型

顾洁<sup>1</sup>, 杜渐<sup>2</sup>, 秦杰<sup>3</sup>, 张怡<sup>3</sup>

(1. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海市 200240;

2. 国网江苏省电力公司经济技术研究院, 江苏省南京市 210000; 3. 上海电力设计院有限公司, 上海市 200025)

**摘要:** 变电站的设备检修工作不仅是保障变电站正常运行的基础,也是降低变电站全寿命周期成本(LCC),实现效用与成本相互平衡的重要途径。文中首先基于模糊时间序列法,对电气设备在寿命周期内的可靠性参数进行模糊预测,接着引入役龄回退理论,以设备 LCC 中检修成本和故障成本最小化为目标,建立了检修策略的优化决策模型,并运用模糊规划理论实现了模型的求解。实例应用结果显示,提出的模糊规划模型可以为变电站电气设备检修策略的制定以及变电站的全寿命周期管理提供有益参考。

**关键词:** 变电站设备; 检修策略; 全寿命周期成本; 模糊时间序列; 役龄回退; 模糊规划

## 0 引言

变电站作为电力系统的重要组成部分,其寿命周期一般长达 30~50 年,因而在变电站的全寿命周期成本(LCC)中,运行成本(CO)、检修成本(CM)和故障成本(CF)往往占有很大的比例<sup>[1]</sup>。可见,做好变电站各类设备的检修工作,不仅是保障变电站正常运行的基础,也是降低变电站 LCC,实现效用与成本间相互平衡的重要途径。

变压器、开关、线路等电气设备是变电站的核心设备,传统上常采用定期检修的方式,缺乏对设备状态的量化考察,同时也忽视了检修工作本身的经济性。近年来,越来越多的研究开始强调状态检修的合理性,并尝试从 LCC 的角度评价和制定电气设备的检修策略,从而更加关注检修的长远效益。文献[2]和文献[3]针对状态检修的经济性展开讨论,建立了以监测费用、维修费用和故障损失等费用最小化为目标的优化模型;文献[4-6]则基于对电气设备 LCC 的分析和估算,引入人工智能算法,解决检修策略的综合最优化问题。

但是,这些研究中对设备状态(例如可靠性参数等)进行分析和预测的模型仍不够完善,在进行检修策略优化决策时,考虑的因素也往往不够全面。例如:文献[4]提出采用加速老化实验的方法获得数据,不具有很强的可操作性,并且没有体现出设备可靠性参数随时间变化的规律;文献[6]引入机械工程领域的等劣化理论,其在电气设备上的适用性有待

商榷,后续提出的检修策略优化模型也过于简单,仅考虑了费用因素,2 种较为传统的检修模式也未能真正体现出经济性。

电气设备的检修工作与设备的可靠性状况密切相关,因此,本文首先基于历史数据,对设备在全寿命周期内的可靠性参数进行了模糊拟合和预测。在此基础上,引入役龄回退理论,量化检修对设备可靠性的影响,进而搭建出不同检修策略下电气设备 LCC 的模糊估算模型。最后,基于 LCC 最小化的目标建立起检修策略的优化决策模型,并运用模糊规划理论实现了模型的求解。

## 1 基于模糊时间序列的设备可靠性参数预测

一般情况下,常用威布尔分布来描述电气设备的可靠性参数随时间的变化规律,其故障率  $\lambda(t)$  如图 1 所示。

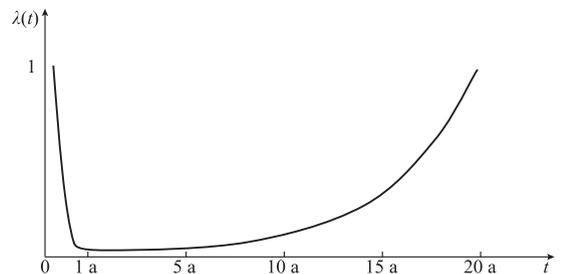


图 1 基于威布尔分布的故障率曲线  
Fig.1 Failure rate curve based on Weibull distribution

考虑到设备的可靠性受大量因素影响,呈现出一定的不确定性,如果直接按照某种分布模型进行

参数估计,并由此得到明确的故障率预测结果将带来较大的误差。本文将设备在其寿命周期内各时间点的故障率均视为模糊数,根据其若干年的可靠性统计数据,运用模糊时间序列法进行拟合和预测,提高在设备故障率预测中对不确定性因素的处理能力。

在基于时间参数的数据统计预测方法中,时间序列法是较为常用的一种,有着适用面广、简单易行等优点。一般的时间序列法具有如下形式:

$$y(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_kt^k + \epsilon \quad (1)$$

式中: $y$  为预测变量; $t$  为时间变量; $k$  为阶数,满足  $k \in \mathbf{N}$ ;  $a_i (i=0, 1, \dots, k)$  为  $k$  次项的拟合参数; $\epsilon$  为随机误差,其期望为 0。

假定模糊时间序列法有类似于一般时间序列法的形式<sup>[7]</sup>,即

$$\tilde{Y}(t) = \tilde{p}_0 + \tilde{p}_1t + \tilde{p}_2t^2 + \dots + \tilde{p}_kt^k + \tilde{\epsilon} \quad (2)$$

式中: $\tilde{Y}$  为模糊预测变量; $\tilde{p}_i (i=0, 1, \dots, k)$  为  $k$  次项的模糊拟合参数,本文将其描述为三角模糊数的形式,也可根据所分析数据的特点采用其他模糊数,如梯形模糊数等。

若有  $H$  期模糊历史数据  $\tilde{y}_i (i=1, 2, \dots, H)$ , 可通过求解线性规划问题使系统的模糊度最小,从而对参数  $(\tilde{p}_0, \tilde{p}_1, \dots, \tilde{p}_k)$  进行估计,得到:

$$\hat{Y}(t) = \hat{p}_0 + \hat{p}_1t + \hat{p}_2t^2 + \dots + \hat{p}_kt^k \quad (3)$$

式中: $\hat{p}_i$  为  $\tilde{p}_i (i=0, 1, \dots, k)$  的估计值。

对于满足威布尔分布的故障率曲线,可以通过取对数的形式转化为相应的线性关系,即

$$\ln \lambda(t) = \ln(t^{\beta-1}\alpha\beta) = (\beta-1)\ln t + \ln(\alpha\beta) \quad (4)$$

式中: $\alpha$  和  $\beta$  为威布尔分布的 2 个参数。

由式(4)可见,故障率函数  $\lambda(t)$  的对数值与时间  $t$  的对数值呈线性关系,对应模糊时间序列模型中的  $k$  值为 1。

式(3)中  $\hat{p}_i (i=0, 1, \dots, k)$  的求解方法可参考文献[8],首先将故障率历史数据模糊化,再以模糊度最小为目标,以  $\tilde{y}_i$  和  $\hat{Y}(t)$  的贴进度不小于定值为约束,进行优化求解。

求得  $\hat{p}_i (i=0, 1, \dots, k)$  后,再通过对中心值的修正得到最终的模糊拟合函数,即  $\hat{Y}(t) = (\hat{a}(t), \hat{c}(t))$ , 其中  $\hat{a}(t)$  为三角模糊数的中心值,  $\hat{c}(t)$  为偏差值。当时间  $t$  变动时,  $\hat{Y}(t)$  不是一条曲线而是一个“带”,如图 2 所示。

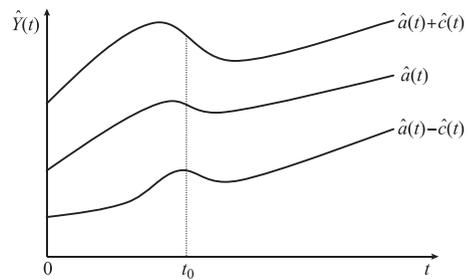


图 2 模糊拟合函数示意图

Fig.2 Schematic diagram of fuzzy fitting function

## 2 不同检修策略下的电气设备 LCC 模糊估算

### 2.1 检修的役龄回退效用

检修工作在使故障设备的功能得到恢复的同时,还会降低设备的故障率,使设备性能有所提高,其所产生的效果等同于将设备的役龄时间向前推移了一定量。参考文献[9],本文引入役龄回退因子  $\alpha_i$ , 以定量地表示每次检修对电气设备役龄的影响。若设备在第  $i$  次检修前运行了  $T_i$  的时间,则经过检修后,其故障率下降到  $\alpha_i T_i$  时的故障率。因而,检修带来的效果近似于设备的役龄时间回退到了  $(T_i - \alpha_i T_i)$  时刻的状况,如图 3 所示。

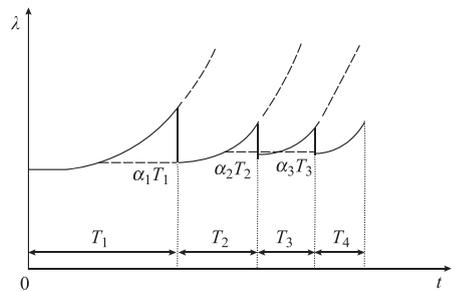


图 3 考虑役龄回退因子作用的设备故障率曲线

Fig.3 Failure rate curve of equipment considering the effect of age reduction factor

### 2.2 不同检修策略下的电气设备 LCC 估算模型

检修策略的不同显然会造成电气设备 LCC 中 CM 的不同。同时,定期检修和状态检修的役龄回退作用有所差异,具体检修时机的不同也会使得设备在寿命周期内的故障率分布发生相应的变化,从而对 CF 产生影响。因此,在研究设备的检修策略时,其 LCC 估算模型主要考虑 CM 和 CF 两部分。

定期检修策略下,CM 和 CF(以下公式中均表示为  $C_{CM}$  和  $C_{CF}$ )之和  $C$  可表示为:

$$C = C_{CM} + C_{CF} = \sum_{i=1}^{j_1} \left[ C_{CM,1} \left( \frac{1+r}{1+R} \right)^{k_1 i} \right] + \sum_{i=1}^{j_2} \left[ C_{CM,2} \left( \frac{1+r}{1+R} \right)^{k_2 i} \right] + \sum_{i=1}^n \left[ C_{CF,i} \left( \frac{1+r}{1+R} \right)^i \right] \quad (5)$$

式中:  $r$  为通货膨胀率;  $R$  为年利率;  $j_1$  为运行年限中大修的总次数;  $k_1$  为大修的间隔年数;  $C_{CM,1}$  为每次大修的成本;  $j_2$  为运行年限中小修的总次数;  $k_2$  为小修的间隔年数;  $C_{CM,2}$  为每次小修的成本;  $C_{CF,i}$  为每年的 CF;  $n$  为设备的设计运行年限。

状态检修策略下, CM 和 CF 之和  $C$  可表示为:

$$C = C_{CM} + C_{CF} = \sum_{i=1}^{j_3} \left[ C_{CM,3} \left( \frac{1+r}{1+R} \right)^{k_i} \right] + \sum_{i=1}^n \left[ C_{CF,i} \left( \frac{1+r}{1+R} \right)^i \right] \quad (6)$$

式中:  $j_3$  为运行年限中状态检修的总次数;  $k_i$  为每次状态检修前设备已运行的年份;  $C_{CM,3}$  为每次状态检修的成本。

#### 1) CM 的估算方法

参考文献[10], 先按照设备的额定容量定额计算出每次检修的标准成本  $C_{CM,std}$ , 再设定大修占标准成本的模糊比例系数  $\beta_1$  为(0.95, 0.01), 小修占比系数  $\beta_2$  为(0.05, 0.01), 状态检修占比系数  $\beta_3$  为(0.5, 0.1), 从而计算出每次大修成本、小修成本和状态检修成本的模糊估算结果  $\tilde{C}_{CM,1}$ ,  $\tilde{C}_{CM,2}$ ,  $\tilde{C}_{CM,3}$ 。

#### 2) CF 的估算方法

以变压器为例, 设变电站有 2 台主变同时运行, 并考虑电网运行的  $N-1$  原则, 将变压器每年的 CF 表示如下:

$$C_{CF} = C_{CF,1} + C_{CF,2} = aWTU + C_{CF,r} T_{total} = aS_N \eta \lambda_r T_{MTTR} \left( \frac{\lambda_r T_{MTTR} + \lambda_m T_{MTm}}{8.760} \right) + C_{CF,r} \lambda_r T_{MTTR} \quad (7)$$

式中:  $C_{CF,1}$  为中断供电损失成本;  $C_{CF,2}$  为修复成本;  $a$  为一年内变电站相关用户平均中断供电电量的价值;  $W$  为因变压器故障而中断供电的平均功率;  $T_{total}$  为当年因变压器故障而中断供电的总时间;  $U$  为另一台变压器的不可用率;  $C_{CF,r}$  为变压器单位时间的修复成本;  $S_N$  为变压器额定容量;  $\eta$  为变压器负载率;  $\lambda_r$  为变压器故障率;  $T_{MTTR}$  为变压器的平均故障修复时间;  $\lambda_m$  为变压器检修率;  $T_{MTm}$  为变压器的平均检修持续时间。

估算时,  $a$  取为 12.5 元/(kW·h)。负载率  $\eta$  取为三角模糊数, 2 台主变时取为(0.5, 0.1)。 $T_{MTTR}$  和  $T_{MTm}$  则可参考中国电监会电力可靠性管

理中心的数据来取值。设  $T_{MTTR}$  的误差范围为  $\pm 25\% \times 32 \text{ h} = \pm 8 \text{ h}$ , 设  $\pm 2 \text{ h}$  的可信度最大, 采用梯形模糊数, 则  $T_{MTTR} = [24, 30, 34, 40] \text{ h}$ 。设  $T_{MTm}$  误差范围为  $\pm 25\% \times 72 \text{ h} = \pm 18 \text{ h}$ , 设  $\pm 4.5 \text{ h}$  的可信度最大, 采用梯形模糊数, 则  $T_{MTm} = [54, 67.5, 76.5, 80] \text{ h}$ 。

这样, 在确定检修计划后, 根据式(7)并依据模糊数的运算规则, 便可得到电气设备每年的  $\tilde{C}_{CF}$ , 进而根据式(5)或式(6), 累加得到全寿命周期的  $\tilde{C}_{CM}$  和  $\tilde{C}_{CF}$  之和  $\tilde{C}$ 。

## 3 基于 LCC 的电气设备检修模糊规划模型

### 3.1 模型的基本思路

以 CM 和 CF 之和最小化为目标, 分定期检修和状态检修 2 种情况进行基于 LCC 的电气设备维修策略优化, 以确定定期检修下的大修和小修的最优周期, 以及状态检修下的最佳故障率上限。

定期检修策略下, 由于受到人力物力调配和工程习惯的影响, 大修和小修周期的设定受到一定的约束, 例如大修周期要大于小修周期并且要有一定的间隔, 大修周期一般不小于 10 年, 小修周期一般不小于 5 年等。状态检修策略下, 故障率上限的设定受到的约束则较少, 只需大于一定的数值, 以使得状态检修不至于过密。

基于以上考虑, 并设电气设备预定的服役年限为  $N$  年 ( $N \geq 20$ ), 建立以下优化决策模型。

#### 1) 定期检修策略

$$\min C = f(\mathbf{T}) \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{s.t. } 10 \text{ 年} \leq T_1 \leq T_{st} \\ 5 \text{ 年} \leq T_2 \leq 10 \text{ 年} \\ T_1 - T_2 \geq 5 \text{ 年} \end{array} \right. \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{T} = (T_1, T_2)$ , 为 2 维的决策向量, 其中  $T_1$  为大修周期,  $T_2$  为小修周期;  $T_{st}$  为  $T_1$  的约束上限, 当服役年限  $N > 25$  时,  $T_{st} = 25$ , 当  $N \leq 25$  时,  $T_{st} = N - 1$ 。

#### 2) 状态检修策略

$$\min C = f(\lambda_{zt}) \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \lambda_l \leq \lambda_{zt} \leq \lambda_u \quad (11)$$

式中:  $\lambda_{zt}$  为故障率上限, 当设备的故障率达到此上限时(故障率为三角模糊数时, 以中值为准), 即需进行状态检修;  $\lambda_l$  和  $\lambda_u$  为  $\lambda_{zt}$  取值的上下界, 可根据故障率模糊预测的情况, 设定为最小值和最大值之间的 2 个值, 保证状态检修不至于过密, 也不至于一次不检修即可。

需要注意的是, 式(8)和式(10)中的  $C$  均为精

确值,需要首先按照 2.2 节的方法求得  $\tilde{C}_{CM}$  和  $\tilde{C}_{CF}$  之和  $\tilde{C}$ ,再过去模糊化得到。可以用重心法实现去模糊化<sup>[11]</sup>,设  $\tilde{C}$  的隶属度函数为  $\mu_C(x)$ ,则精确数  $C$  的表达式为:

$$C = \frac{\int \mu_C(x)x}{\int \mu_C(x)} \quad (12)$$

### 3.2 基于模糊规划的模式求解

参照模糊规划问题的求解思路<sup>[7,12-13]</sup>,首先将优化模型中的约束条件模糊化,得到紧约束和松约束 2 套约束,并分别求解出对应的最优解  $C_b$  和  $C_s$ 。由于紧约束的可行域小于松约束的可行域,一般情况下有  $C_b \geq C_s$ 。当  $C_b > C_s$  时,取  $M = 2C_b - C_s, m = C_s$ ;当  $C_b = C_s$  时,取  $M = 1.2C_b, m = C_s$ 。

约束条件模糊化之后的模型变为:

$$\min \tilde{C} = f(T) \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{s.t. } [10, 5] \leq T_1 \leq [T_{st}, N - T_{st}] \\ [5, 5] \leq T_2 \leq [10, 5] \\ T_1 - T_2 \geq [5, 5] \end{array} \right. \quad (14)$$

即相应的紧约束为原来的约束表达式(式(9)),模糊化后的松约束为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{s.t. } 5 \leq T_1 \leq N \\ 0 \leq T_2 \leq 15 \\ T_1 - T_2 > 0 \end{array} \right. \quad (15)$$

令第 1 个约束函数为:

$$g_1(T) = T \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = T_1 \quad (16)$$

第 2 个约束函数为:

$$g_2(T) = T \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_2 \quad (17)$$

第 3 个约束函数为:

$$g_3(T) = T \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = T_1 - T_2 \quad (18)$$

这样,模糊目标函数和模糊约束条件的隶属度函数可描述如下。

对于目标函数  $f(T)$ ,其隶属度函数为:

$$\tilde{\mu}_0(T) = \begin{cases} 1 & f(T) \leq m \\ \frac{M - f(T)}{M - m} & m < f(T) \leq M \\ 0 & f(T) > M \end{cases} \quad (19)$$

目标函数  $f(T)$ 的隶属度函数  $\tilde{\mu}_0(T)$ 的图像见附录 A 图 A1。

对于第 1 个约束函数  $g_1(T)$ ,其隶属度函数为:

$$\tilde{\mu}_1(T) = \begin{cases} 0 & g_1(T) \leq 5 \\ \frac{g_1(T) - 5}{5} & 5 < g_1(T) \leq 10 \\ 1 & 10 < g_1(T) \leq T_{st} \\ \frac{N - g_1(T)}{N - T_{st}} & T_{st} < g_1(T) \leq N \\ 0 & g_1(T) > N \end{cases} \quad (20)$$

第 1 个约束函数  $g_1(T)$ 的隶属度函数  $\tilde{\mu}_1(T)$ 的图像见附录 A 图 A2。

对于第 2 个约束函数  $g_2(T)$ ,其隶属度函数为:

$$\tilde{\mu}_2(T) = \begin{cases} 0 & g_2(T) \leq 0 \\ \frac{g_2(T)}{5} & 0 < g_2(T) \leq 5 \\ 1 & 5 < g_2(T) \leq 10 \\ \frac{15 - g_2(T)}{5} & 10 < g_2(T) \leq 15 \\ 0 & g_2(T) > 15 \end{cases} \quad (21)$$

第 2 个约束函数  $g_2(T)$ 的隶属度函数  $\tilde{\mu}_2(T)$ 的图像见附录 A 图 A3。

对于第 3 个约束函数  $g_3(T)$ ,其隶属度函数为:

$$\tilde{\mu}_3(T) = \begin{cases} 0 & g_3(T) \leq 0 \\ \frac{g_3(T)}{5} & 0 < g_3(T) \leq 5 \\ 1 & g_3(T) > 5 \end{cases} \quad (22)$$

第 3 个约束函数  $g_3(T)$ 的隶属度函数  $\tilde{\mu}_3(T)$ 的图像见附录 A 图 A4。

在确定了目标函数和约束条件的隶属度函数后,再根据其各自在维修策略决策中的重要程度设定权重,得到最终的模糊判别  $\tilde{D}$ 。由于本模型主要是基于 LCC 最小的原则,故目标函数应选取较大的权重,第 1 个约束函数和第 2 个约束函数主要来源于大修周期和小修周期的工程惯例,主观性较大,故其权重应较小;而第 3 个约束主要是考虑到维修中人力物力的调配,属于较为严格的约束条件,故其权重应大于前 2 个约束。基于以上考虑,将目标函数的权重设为 0.6,3 个约束函数的权重分别设为 0.1,0.1,0.2,即

$$\tilde{D}(T) = 0.6\tilde{\mu}_0(T) + 0.1\tilde{\mu}_1(T) + 0.1\tilde{\mu}_2(T) + 0.2\tilde{\mu}_3(T) \quad (23)$$

最后,根据最大隶属度原则求出最优解  $T^* = (T_1^*, T_2^*)$ ,使得

$$\tilde{D}(T^*) = \max_{T \in S} \{ \tilde{D}(T) \} \quad (24)$$

式中: $S$  为由松约束式(式(15))所确定的可行域。

## 4 算例分析

以中国南方某地区的变电站甲为例,应用本文

提出的优化模型对其主变的维修策略进行计算分析。变电站甲的主变为 SFPSZ9-120000/220 型变压器,变电站初期投用 2 台主变,220 kV 侧 2 回进线,主接线为线变组接线;110 kV 侧 12 回出线,主接线为单母线两分段接线;35 kV 侧 30 回出线,主接线为单母线四分段接线。

#### 4.1 可靠性参数预测

参考文献[14]中表 1 的 SFPSZ9-120000/220 型变压器的故障率历史数据,对于相同运行年限的变压器,将其故障率取为平均值,并且去除  $t = 12.5, 13, 14$  a 这 3 个明显的畸变点后,得到如图 4 所示的故障率随运行年限变化的曲线。

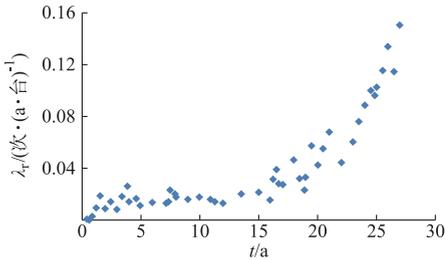


图 4 故障率历史数据  
Fig.4 Historical data of failure rate

将故障率历史数据分为  $[0, 4)$ 、 $[4, 12)$  和  $[12, N]$  这 3 段,分别为线性上升期、平稳期和威布尔分布上升期。第 3 段故障率数据取对数后再进行模糊拟合和预测,其他 2 段直接进行拟合,最终得到全寿命周期内的故障率模糊拟合与预测曲线如图 5 所示。

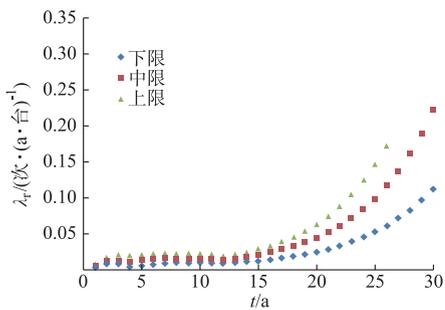


图 5 故障率模糊拟合和预测曲线  
Fig.5 Fuzzy fitting and forecasting curve of failure rate

#### 4.2 检修策略优化决策

考虑到国内变压器的使用年限现状,以 30 年作为主变 LCC 的考察周期,分别进行定期检修策略和状态检修策略的优化决策。

定期检修策略下,设定大修的役龄回退因子  $\alpha_1 = 0.5$ ,小修的役龄回退因子  $\alpha_2 = 0.2$ ,求得检修周期的最优解为:大修周期 22 年,小修周期 11 年,

即全寿命周期内只在第 11 年进行一次小修,在第 22 年进行一次大修。这里需要注意的是,设定定期检修的大修周期和小修周期后,若某一年既要进行大修,又要进行小修,则只进行大修。

全寿命周期内故障率的役龄回退情况如图 6 所示。

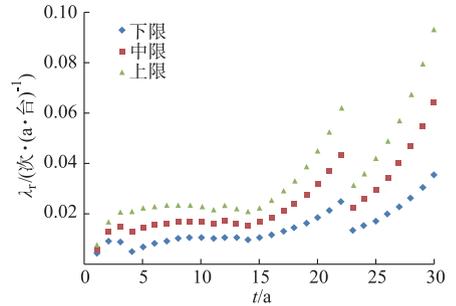


图 6 定期检修策略故障率役龄回退曲线  
Fig.6 Failure rate curve on the effect of age reduction with preventive maintenance strategy

状态检修策略下,设定役龄回退因子  $\alpha_3 = 0.4$ ,求得检修策略的最优解为:故障率上限  $\lambda_{st}$  为 0.05,全寿命周期内只在第 21 年进行一次状态检修。

全寿命周期内故障率的役龄回退情况如图 7 所示。

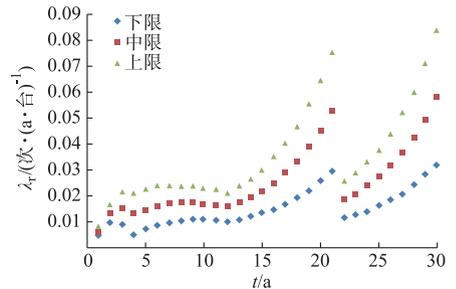


图 7 状态检修策略故障率役龄回退曲线  
Fig.7 Failure rate curve on the effect of age reduction with condition-based maintenance strategy

表 1 和表 2 分别给出了在定期检修和状态检修策略下,主变服役年限分别取为 20,25,30,35,40 年时,最优检修策略的具体情况。

表 1 中第一行列出了当服役年限为 20 年时,常用的 15 年一大修,8 年一小修策略的成本情况,与第 2 行优化后的策略相比较,显现出优化策略在节约成本上的成效,从而验证了本文维修策略优化模型的有效性。

从表中还可以看出,合理地选择设备的服役年限也对其 LCC 的优化管理起到重要的影响。服役年限为 25 年时,设备 LCC 的等年值最小,当服役年限超过 30 年之后,随着运行年限的增长,设备 LCC

的等年值也在迅速变大。这说明设备的使用寿命不宜过长,否则虽然可以制定相对较优的检修策略,但由于设备后期的可靠性水平下降过快,导致 CM 和

CF 激增,反复地检修反而不利于成本的控制。因此,应适当设定设备的服役年限,并通过采购新设备的方式降低变电站整体的 LCC。

表 1 定期检修最优策略汇总  
Table 1 Summary of the best regular maintenance strategies

服役年限/a	大修周期	小修周期	大修年份	小修年份	$\tilde{C}_{CM}/\text{万元}$	$C_{CM}/\text{万元}$	$\tilde{C}_{CF}/\text{万元}$	$C_{CF}/\text{万元}$	C/万元	C 的等年值/万元
20	15	8	15	8,16	[71.783,73.972,76.160]	73.972	[31.245,64.541,71.800,122.101]	73.629	147.601	7.380
20	18	12	18	12	[65.107,66.510,67.913]	66.510	[30.921,62.697,69.327,116.825]	71.065	137.575	6.879
25	20	10	20	10	[62.879,64.286,65.693]	64.286	[41.764,85.577,94.449,160.925]	97.306	161.592	6.464
30	22	11	22	11	[60.564,61.933,63.301]	61.933	[58.612,124.394,137.325,241.973]	143.388	205.321	6.844
35	26	13	26	13	[56.190,57.484,58.779]	57.484	[88.166,200.840,222.384,418.866]	238.693	296.178	8.462
40	24	12	24	12,36	[60.206,62.005,63.803]	62.005	[131.441,330.792,369.185,758.926]	411.622	473.627	11.841

表 2 状态检修最优策略汇总  
Table 2 Summary of the best condition-based maintenance strategies

服役年限/a	故障率上限 $\lambda_{st}$	检修年份	$\tilde{C}_{CM}/\text{万元}$	$C_{CM}/\text{万元}$	$\tilde{C}_{CF}/\text{万元}$	$C_{CF}/\text{万元}$	C/万元	C 的等年值/万元
20	0.02	15	[28.013,35.016,42.019]	35.016	[29.188,57.869,63.535,105.653]	65.026	100.043	5.002
25	0.03	18	[26.442,33.053,39.664]	33.053	[40.153,80.903,88.780,149.863]	140.497	124.445	4.978
30	0.05	21	[24.960,31.200,37.440]	31.200	[58.212,122.397,134.504,236.017]	140.497	171.697	5.723
35	0.06	22,31	[45.078,56.347,67.617]	56.347	[77.448,168.973,186.590,337.003]	196.787	253.134	7.232
40	0.085	24,34,38	[60.999,76.249,91.499]	76.249	[110.415,256.120,284.338,540.767]	306.002	382.250	9.556

另外,对比表 1 和表 2 可以看出,状态检修策略的成本均小于定期检修策略的成本。可见状态检修能更合理地对电气设备进行维护,从而达到减少 LCC 的目的。

## 5 结语

本文从电气设备检修策略优化的角度探讨了变电站 LCC 管理的重要性和可行性,采用模糊时间序列的方法实现了全寿命周期内电气设备可靠性参数的模糊预测,并应用模糊规划理论,建立了基于 LCC 的电气设备维修策略优化决策模型。算例分析的结果显示,模型能合理地制定出全寿命周期内的检修计划,并设定最为合理的设备退役年限,实现设备 LCC 最小的目标,达到效用与成本间的相互平衡。

附录见本刊网络版 (<http://aeaps.sgepri.sgcc.com.cn/aeaps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

[1] 张俊.基于全寿命周期成本(LCC)的变电站建设的决策分析[D].重庆:重庆大学,2007.  
[2] CHITRA T. Life based maintenance policy for minimum cost [C]// Annual Reliability and Maintainability Symposium, January 27-30, 2003, Tampa, FL, USA; 470-474.  
[3] GRALL A, DIEULLE L, BERENQUER C, et al. Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating

system[J]. IEEE Trans on Reliability, 2002, 51(2): 141-150.  
[4] 周军义,黄国强,张文星,等.基于 LCC 评价的电力设备维护策略研究[J].陕西电力,2009,37(9):15-18.  
ZHOU Junyi, HUANG Guoqi, ZHANG Wenxing, et al. Life cycle cost assessment based maintenance rules for power apparatus[J]. Shanxi Electric Power, 2009, 37(9): 15-18.  
[5] MARTIN H, MARTIN M. Substation maintenance strategy adaptation for life-cycle cost reduction using genetic algorithm [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(1): 197-204.  
[6] 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.  
MA Zhongneng, ZHONG Lihua, LU Kai, et al. Study on the maintenance strategy of power equipment based on the optimal life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 34-39.  
[7] 韩立岩,汪培庄.应用模糊数学[M].北京:首都经济贸易大学出版社,1998.  
[8] 顾洁,陈章潮,郑家志.电力系统负荷预报的模糊理论方法[J].上海交通大学学报,1999,33(12):1537-1539.  
GU Jie, CHEN Zhangchao, ZHENG Jiazhi. Fuzzy set method of electrical load forecasting [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1999, 33(12): 1537-1539.  
[9] 潘乐真,张焰,俞国勤,等.状态检修决策中的电气设备故障率推算[J].电力自动化设备,2010,30(2):91-94.  
PAN Lezhen, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 91-94.  
[10] 国家电网公司.国家电网公司电网检修运维和运营管理成本标准[S].2009.

- [11] 王峻峰, 周家启, 谢开贵. 中压配电网可靠性的模糊评估[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(2): 45-49.  
WANG Junfeng, ZHOU Jiaqi, XIE Kaigui. Fuzzy reliability evaluation algorithm for medium voltage distribution networks [J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(2): 45-49.
- [12] 翁国云, 贾永乐, 于坤山. 模糊规划在配电站无功电压控制中的应用[J]. 北京机械工业学院学报, 2001, 16(4): 39-42.  
WENG Guoyun, JIA Yongle, YU Kunshan. A fuzzy programming approach to the reactive power voltage control in a distribution substation [J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2001, 16(4): 39-42.
- [13] 李锦绣. 模糊非线性规划问题的改进算法[J]. 渤海大学学报, 2008, 29(4): 358-360.  
LI Jinxiu. An improved algorithm of fuzzy nonlinear programming problem [J]. Journal of Bohai University, 2008, 29(4): 358-360.
- [14] 孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆. 基于 Marquardt 法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 85-90.  
SUN Peng, CHEN Shaohui, ZHANG Caiqing. Assessment of failure rate for substation equipment life cycle based on Marquardt parameter estimation method [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 85-90.

顾洁(1971—), 女, 通信作者, 副教授, 主要研究方向: 电力系统规划及电力市场。E-mail: gujie@sju.edu.cn

杜渐(1987—), 男, 工程师, 主要研究方向: 电力系统规划及电力工程设计。E-mail: princedu1987@163.com

秦杰(1968—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 电力技术经济。E-mail: qinj@sepd.com.cn

(编辑 蔡静雯)

## A Fuzzy Programming Model Based on Life Cycle Cost for Equipment Maintenance in Substations

GU Jie<sup>1</sup>, DU Jian<sup>2</sup>, QIN Jie<sup>3</sup>, ZHANG Yi<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China;

3. Shanghai Electric Power Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200025, China)

**Abstract:** Equipment maintenance in substations is the basis of normal operation as well as an important channel through which to reduce the life-cycle cost (LCC) and realize balance between the utility and the cost. Firstly, on the basis of fuzzy time series, a fuzzy prediction is made of the reliability parameters of electrical equipment in the whole life cycle. Secondly, the age reduction theory is introduced. And with minimum equipment maintenance cost and failure cost of LCC as the objective, an optimization decision model for maintenance strategy is developed. Finally, the fuzzy programming theory is used to solve the model. The application example shows that the fuzzy programming model proposed can provide valuable reference for the formulation of equipment maintenance strategy and life-cycle management in substations.

**Key words:** equipment in substations; maintenance strategy; life-cycle cost (LCC); fuzzy time series; age reduction; fuzzy programming

## 电力行业 7 年减碳 35.6 亿吨 降低颗粒物排放仍有空间

2013 年 12 月 17 日在京发布的《中国电力减排研究 2013》报告披露, 2006 年到 2012 年间, 中国电力行业通过发展非化石能源, 降低供电煤耗和降低线损率等措施减排二氧化碳成效显著。以 2005 年为基准年, 累计减排二氧化碳 35.6 亿 t。中国电力行业污染物排放控制水平持续提升, 单位火电发电量烟尘排放量降至 0.39 g/(kW·h), 火电二氧化硫排放绩效降至 2.26 g/(kW·h)。

报告显示, 截至 2012 年底, 中国发电装机总量和发电量分别达到 1.144 TW 和 4 980 TW·h; 清洁能源装机容量约占中国总装机容量的 28.5%, 发电量约占总发电量的 21.5%, 增速高于火电。

燃煤电厂排放的细颗粒物是国内灰霾的成因之一。实测表明, 燃煤电厂除尘脱硫后排放的烟气中的颗粒物几乎全为 PM10, 且其中 PM2.5 所占比重较大。对燃煤电厂所排放的一次细颗粒物估算的结果表明, 2012 年电力行业全年一次细颗粒物排放总量约为 80 万 t。另外, 燃煤电厂排放的二氧化硫、氮氧化物等经反应形成气溶胶, 是二次细颗粒物的重要来源。经过多年积累, 电力行业已经有效控制了烟尘和二氧化硫排放总量, 正大规模开展烟气脱硝, 未来电力行业污染控制将从单一控制向协同控制转变。

《中国电力减排研究》今年已经是连续第 7 年发布。该系列报告重点关注中国电力行业发展及节能减排现状, 并提出供政府决策、企业选择的最优方案, 达到节约资源、保护环境、降低费用的综合效果。

【摘自人民网】