

DOI: 10.7667/PSPC160086

基于状态联动的在役设备最佳运行寿命评估模型

陈杏, 宋依群, 杨镜非

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 以设备实际运行状态为依据, 以科学预测在役设备最佳使用年限、维护系统的供电可靠性和提高企业经济效益为目的, 构建了基于状态联动的在役设备最佳运行寿命评估模型。基于在役设备的状态评价结果建立状态联动的故障概率预测模型, 改进可靠性参数的预测, 综合考虑了健康状态和运行环境等因素, 反映了在役设备的个体差异性。兼顾可靠性和经济性的要求, 结合模糊役龄回退机制, 以设备年均全寿命周期成本最小为目标, 构建电力设备最佳运行寿命评估模型。以变压器为例, 从在运时间和当前健康指数两个维度对在役设备的最佳运行寿命进行了比较分析。算例结果表明, 构建的最佳运行寿命评估模型可以合理设定设备的最佳运行寿命, 能为在役设备的检修和退役安排提供理论参考。

关键词: 在役设备; 状态联动故障率预测; 不确定性; 状态检修; 最佳使用寿命

Optimal service life evaluation model for in-service equipment based on state linkage

CHEN Xing, SONG Yiqun, YANG Jingfei

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the actual state of power equipment, this paper establishes an optimal service life evaluation model for in-service equipment based on state linkage, in order to make a scientific optimal service life prediction for equipment in service, maintain power supply reliability and improve economic efficiency for power supply enterprises. Considering individual differences and taking health index and environment factor into account, a state linked failure rate prediction model is established to improve the prediction of reliability factors. Using the fuzzy age reduction model, taking the reliability and the economy into account, an optimal service life evaluation model for in-service equipment is proposed, taking the minimum annual life cycle cost as a goal. Taking the transformer as an example, this paper makes a comparative analysis on the optimal service life from two dimensions, in-service time and current health index. The numerical results show that the proposed optimal service life evaluation model can reasonably set the optimum service life, which can provide theoretical reference for the maintenance work and retirement arrangement of power equipment.

Key words: in-service equipment; state linked failure rate prediction; uncertainty; condition-based maintenance; optimal service life

0 引言

电力设备等固定资产是维持和提高供电企业生产能力的重要物质保障, 根据在役设备的运行状态确定对应检修维护计划和经济可靠的运行寿命对确保设备健康水平、维护电网安全稳定运行以及保障国民经济具有重要作用^[1-4]。近年来, 随着电网建设投资力度不断加大, 供电企业固定资产的存量得到极大增加, 科学评估在役设备的使用寿命, 合理安

排设备的维修和退役工作是提高电力设备利用率, 保障电力系统安全运行, 提高企业经济效益的重要措施^[5-6]。

全寿命周期成本(Life Circle Cost, LCC)的管理理念与方法正逐渐应用于工程和设备的精益化管理之中^[7], 随着设备的老化, 盲目延长使用年限不但不可靠, 也不一定经济, 如何在协调经济性和可靠性关系的基础上确定设备的运维检修计划, 安排在役设备在合适的时机退役, 是推进资产全寿命管理的重要环节之一, 因此对电力设备的最佳运行寿命进行研究十分必要。

不少文献对此进行了研究。文献[8]提出了役龄回退因子用于描述检修活动对设备的修复效果,文献[9]将其应用到电力设备检修后故障率推算中。然而即使相同类型相同运行年限的设备进行检修时,受到检修技术等因素的影响,每次检修的效果未必相同。文献[10]通过选择不同参照变压器和不同时间点进行横向比较,给出在役变压器在不同时间点更换为参照变压器的净效益,净效益最大对应的最佳经济寿命以及效益值超过设定期望值对应的寿命区间。文献[11]基于随机模糊理论建立了变压器的经济寿命评估模型,考虑社会成本和环境成本建立变压器的全寿命周期成本模型,在选定参照变压器的基础上讨论了变压器的经济寿命,该模型未对检修策略对全寿命周期成本产生的影响进行分析。文献[12]对某个运行时刻的检修策略进行讨论,比较了变压器不修、大修、小修和更换四种方式对全寿命周期费用的影响,侧重从单一时刻的视角进行讨论。文献[13]研究了两种定期检修模式下的最优检修策略,模型未考虑到设备可靠性方面的要求。虽然上述文献在设备经济寿命和检修的问题上进行了研究,但综合考虑设备个体差异性因素、可靠性参数优化,从整个生命周期优化的视角进行最佳运行寿命评估的文献并不多见。

本文从在役设备的实际运行状态出发,构建电力设备状态联动故障率预测模型,量化设备健康状况和运行环境对设备可靠性参数的差异化影响。然后考虑设备检修疲劳现象和检修活动对设备修复效用的不确定性,基于模糊役龄回退模型,构建了考虑状态联动的在役设备最佳运行寿命评估模型。最后,通过算例,从在运时间和当前健康指数两个维度对在役设备的最佳运行寿命进行了比较分析。

1 电力设备故障概率模糊拟合

设备的故障率表征设备运行的可靠性水平,在设备运行的整个寿命周期内故障率随时间的变化关系可用指数函数等非负分布参数形式表示,如式(1)。图1为故障率典型浴盆曲线。

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{m_1}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m_1-1} & 0 \leq t < t_1 \\ \lambda_0 & t_1 \leq t < t_2 \\ ne^{m_2 t} & t \geq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_1 为形状参数; η 为尺度参数; λ_0 , m_2 和 n 为常数。

设备的故障率受其运行环境、制造工艺等多种

随机因素的影响,采用模糊拟合函数 $\hat{Y}(t)$ 表示带状的设备故障率^[14]。

$$\hat{Y}(t) = (\hat{\lambda}(t), \hat{c}_1(t), \hat{c}_2(t)) \quad (2)$$

式中: $\hat{\lambda}(t)$ 为故障率三角模糊数的中心值; $\hat{c}_1(t)$ 为右偏差值; $\hat{c}_2(t)$ 为左偏差值。

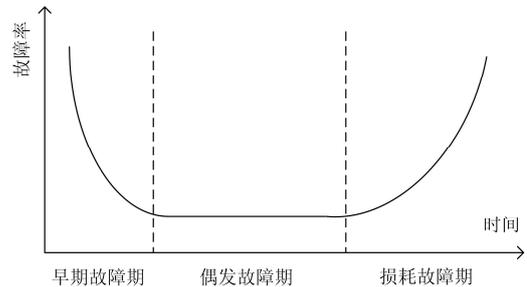


图1 故障率浴盆曲线

Fig. 1 Bathtub curve of failure rate

2 电力设备状态联动故障率预测模型

2.1 状态联动故障率预测模型

根据历史统计数据经函数拟合得到的故障率曲线反映了设备故障率随时间变化的平均水平,将其定义为基准故障率曲线 $\lambda_0(t)$ 。而对于在役电力设备,设备的健康水平存在个体差异,同时实际运行环境也不尽相同,这些内在因素与外在因素均可对其可靠性水平造成一定影响,因此对实际设备的可靠性参数进行评估时,可以综合考虑多种因素的影响,对基准故障率曲线进行修正。根据与时间的相关性,对故障率的主要影响因子进行分类,可分为时变影响因子和非时变影响因子。

时变影响因子包括设备的机械、绝缘、外观等,通过健康指数 $HI(t)$ 进行评估。机械、绝缘、外观等健康状态因素随役龄而变化,设备健康状态评价的结果可以反映设备的老化速度,因此通过健康指数 $HI(t)$ 可以合理反映时变故障率因子对设备故障率的影响程度。

非时变影响因子包括设备的温度、湿度、污秽等级、生产厂家、负载率等。设备的温度、湿度、污秽等级等环境数据不随役龄变化,其生产厂家也是非时变的。对某一具体设备,其负荷水平小于额定容量,且可假定其负载率在当前较长时间内都保持不变,则负载率也可视为非时变的环境因子。上述不随役龄变化的故障率影响因子对可靠性参数的影响通过环境系数 K_e 进行评估。

在此根据生物化学与分子生物学中的米氏动力学理论,借鉴米氏方程(Michaelis-Menten equation),

建立状态联动的故障率预测模型为

$$\hat{\lambda}(t) = \begin{cases} \lambda_0(t) \times \frac{\lambda(t_0)}{\lambda_0(t_0)} & 0 \leq t < t_0 \\ \lambda_0(t) \times \frac{HI(t)}{K_e + HI(t)} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\lambda_0(t)$ 为经历史数据统计得到的基准故障率曲线; $HI(t)$ 为设备健康指数; K_e 为环境系数; t_0 为设备已投运年数。

2.2 健康指数函数

基准故障率曲线可用指数函数表示为

$$\lambda = \alpha e^{\beta \times t} \quad (4)$$

式中, α 和 β 为常数。

设备的故障率与健康指数之间存在指数关系^[8]为

$$\lambda = K \cdot e^{C \times HI} \quad (5)$$

式中: K 为比例系数; C 为曲率系数; HI 为设备健康指数, 取值范围 0~100。

各地区供电局收集设备的状态信息, 按照相关设备状态评价标准和管理规定要求开展设备状态评价工作, 可以得到设备的健康指数。统计两年以上设备健康指数 HI 与故障率 λ 的数值, 即可通过反演推算求得系数 K 和 C ^[8]。对于已投运 t_0 年的某一在役设备, 根据状态评价得到健康指数 $HI(t_0)$, 代入式(5)可以计算设备当前故障率 $\hat{\lambda}(t_0)$ 。

由式(4)与式(5)可知, 健康指数与时间近似呈线性关系。假设设备投运第一年健康指数 $HI(1)=0$, 根据 $HI(1)$ 与 $HI(t_0)$ 可求得线性方程参数, 若健康指数超过评分标准上限则取为该限值, 则健康指数与时间的关系可表示为

$$HI(t) = \begin{cases} k_1 t + k_2 & HI < 100 \\ 100 & HI > 100 \end{cases} \quad (6)$$

2.3 环境系数 K_e 推算

负载率、温度、湿度、环境污染程度等外在因素综合影响设备的可靠性参数。负载率影响设备的损耗和效率, 以变压器为例, 负荷大小关系其绕组电流大小, 从而影响变压器绝缘和绕组的温升, 以及绕组受到的电磁应力。不同地区的气温、湿度、污秽等级等因素对电力设备的运行也有较大影响。高湿度影响金属的耐腐蚀性能, 粉尘含量等对绝缘套管有很大影响。生产厂家影响设备的家族性缺陷水平。环境因素对设备故障率影响的程度通过系数 K_e 进行测算, K_e 根据故障率预测方程(3)由投运时间 t_0 下的相关参数反推获得。

3 基于模糊役龄回退机制的电力设备运行寿命评估模型

3.1 模糊役龄回退方法

役龄回退因子可以定量描述检修工作改善设备性能降低故障发生概率的修复效果。但随着运行时间延长, 检修次数增加, 设备表现出一种长期的修理疲劳现象, 即历次维修后的役龄回退效果随着修理次数的增加而减少。因此引入线性衰减的役龄回退因子 α_k , 则第 k 次检修后电力设备的等效服役时间 t'_k 可以表示如式(7)。

$$\begin{cases} t'_k = t_k - \alpha_k t_k \\ \alpha_k = \alpha_0 - \Delta\alpha \times (k-1) \end{cases} \quad (7)$$

式中: α_0 为初始役龄回退因子; $\Delta\alpha$ 为役龄回退衰减系数。

受到检修技术等因素的影响, 每次检修的效果具有不确定性, 检修对设备故障率的提升作用不确定, 结合设备故障率的模糊拟合提出基于役龄回退衰减机制的模糊役龄回退故障率预测模型, 以此来描述检修工作对设备性能的修复效果。

图2给出了模糊役龄回退故障率预测的工作原理, 根据故障率曲线可以得到对应检修后设备等效的服役年龄 $t_{eq,k}$ 为^[15]

$$t_{eq,k} = \lambda^{-1}(E[\hat{\lambda}(t'_k)]) \quad (8)$$

从而第 k 次检修后电力设备的故障率曲线三角模糊数的中心值和偏差值变化为

$$\begin{cases} \hat{\lambda}(t_k) = \hat{\lambda}(t_{eq,k}) \\ \hat{c}_1(t_k) = \hat{c}_1(t_{eq,k}) \\ \hat{c}_2(t_k) = \hat{c}_2(t_{eq,k}) \end{cases} \quad (9)$$

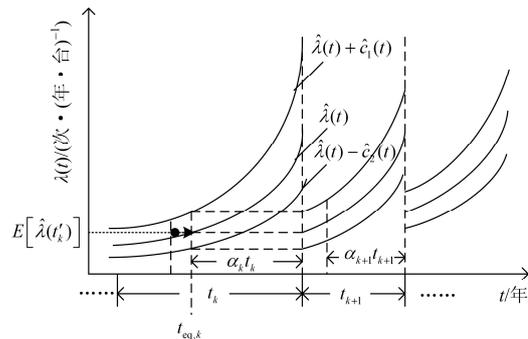


图2 模糊役龄回退故障率预测曲线

Fig. 2 Failure rate prediction curve based on fuzzy age reduction

基于状态联动的故障率预测模型能反映设备当前实际可靠性水平, 但若第一次检修距投运时间较短, 根据役龄回退模型不能很好地反映首次修复效

果。因此在此规定第一次检修后的故障率通过基准故障率曲线对应的等效役龄回退获得。另外规定若健康水平太差，可在当前优先进行一次检修。

3.2 电力设备全寿命周期成本估算

3.2.1 运行成本估算

设备的年度日常运行成本可通过各供电局日常巡检费用的统计数据拟合得到。随着设备运行时间的增加，设备状态劣化，年运行成本呈现逐年增长的趋势。

根据差异化运维工作的要求，设备的日常运维、专业运维工作与设备管控级别联动，停电维护工作与设备停电计划联动，动态运维工作与电网运行方式、设备运行状态、气象及保供电等外部不确定因素相关，因此年度运行成本 \hat{C}_O 可采用模糊拟合函数表示如式(10)。

$$\hat{C}_{Or} = (\hat{C}_{O1} + \beta(t-1)) \times \sigma^t \quad (10)$$

式中： \hat{C}_{Or} 为第 t 年的年度运行成本； \hat{C}_{O1} 为第一年运行成本； β 为运行成本增长系数； σ 为常数。

3.2.2 检修成本估算

单次检修的成本为供货方设备材料费用、供货方服务费、业主方设备材料工具费、业主方人工费及其他费用的总和。根据各供电局的统计数据，以三角模糊数^[16]表示单次检修成本的模糊估算值：

$$\hat{C}_M = [C_{ML}, C_M, C_{MR}]。$$

3.2.3 故障成本估算

变电设备单次故障成本由故障检修费和故障损失费构成。

$$C_{F0} = \sum_k C_{FM,k} + P_{loss} \times T \times p \quad (11)$$

式中： $C_{FM,k}$ 为单次故障检修中的 k 项费用； P_{loss} 为停电损失负荷； T 为单次停电时长； p 为购售电电价差。根据统计数据得到单次故障成本的模糊估计值 $\hat{C}_{F0} = [C_{FL}, C_{F0}, C_{FR}]。$

3.3 电力设备最佳运行寿命评估模型

合理的检修维护工作，可以改变设备可靠性参数的变化，从而影响寿命周期内的检修成本与故障损失成本的大小。同时，随着设备劣化趋势的增加，盲目延长设备运行寿命并不经济可靠。

将设备初始投运年份定为基准年，以设备检修时机和运行寿命为决策变量，以年均全寿命周期成本 \hat{C}_{ave} 最小为目标，构建电力设备最佳运行寿命评估模型如下。

$$\begin{aligned} \min \quad & f(T_a, \lambda_{T_a}) = \hat{C}_{ave} = \\ & \frac{1}{T_a} (C_1 + C_D + \hat{C}_O + \hat{C}_M + \hat{C}_F) = \\ & \frac{1}{T_a} \left[C_1 + C_1 \times \eta \times \left(\frac{1}{1+r_d} \right)^{T_a} + \sum_{t=1}^{T_a} \hat{C}_{Or} \left(\frac{1}{1+r_d} \right)^t + \right. \\ & \left. \sum_{k=1}^N \hat{C}_{Mk} \left(\frac{1}{1+r_d} \right)^{t_k} + CF' + \sum_{t=t_0}^{T_a} \hat{C}_{F0} \hat{\lambda}(t) \left(\frac{1}{1+r_d} \right)^t \right] \\ \text{s.t.} \quad & \lambda_{T_a, \min} \leq \lambda_{T_a} \leq \lambda_{T_a, \max} \\ & T_{\min} \leq T_a \leq T_{\max} \end{aligned} \quad (12)$$

式中：当故障率达到 λ_{T_a} 时即进行状态检修； $\lambda_{T_a, \min}$ 为寿命 T_a 时的故障率下限； $\lambda_{T_a, \max}$ 为寿命 T_a 时的故障率上限； $\lambda_{T_a, \min}, \lambda_{T_a, \max}$ 的取值使设备得到若干检修机会且检修不过于密集即可。 T_{\min} 为运行寿命下限； T_{\max} 为运行寿命上限； C_1 为设备投资成本； η 为设备折旧率； \hat{C}_{Mk} 为第 k 次检修的费用； t_k 为第 k 次检修时设备已服役年限； N 为设备寿命周期内总的检修次数； CF' 为 t_0 年前设备的故障损失成本； T_a 为设备使用寿命； r_d 为考虑通货膨胀率、利率、汇率等因素后的折现率。

基于模糊役龄回退的在役设备最佳运行寿命评估流程如图3所示。

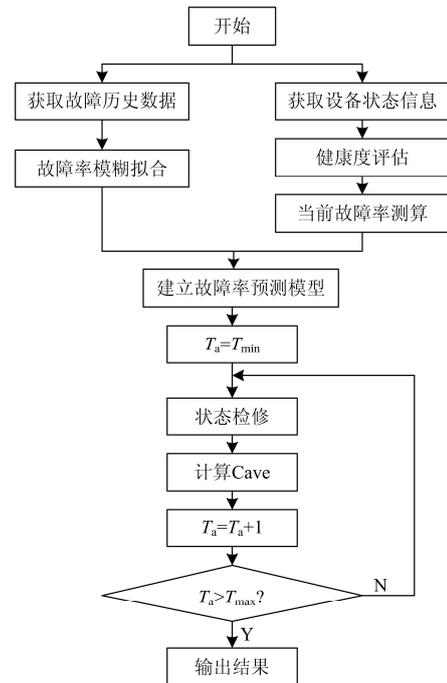


图3 最佳运行寿命评估流程图

Fig. 3 Flowchart of optimal service life

4 算例分析

4.1 变压器最佳运行寿命评估

以某一运行 10 年的 110 kV、50 MVA 三相油浸式变压器为例进行分析。

参考文献[17]统计的变压器故障率历史数据,根据数据分布特征采用指数函数用最小二乘法进行拟合,得到变压器基准故障率函数 $\lambda_0(t) = 0.002789e^{0.1444t}$ 。

4.1.1 故障概率预测

根据变压器状态评价导则对变压器的本体、套管、有载分接开关、冷却系统、非电量保护系统及在线监测装置等部件进行评价,得到该变压器的整体评价结果为: $HI=24$ 。

根据第 3 节所述方法可以求解得到故障率预测模型的相关参数,表 1 列出了相关参数的计算结果。故障率预测曲线如图 4 所示。

表 1 在役变压器故障率预测模型参数计算结果
Table 1 Parameters of failure rate prediction model of in-service transformer

t_0	$\lambda_0(t_0)$	HI	$\hat{\lambda}(t_0)$	k_1	k_2	k_c
10	0.011 82	24	0.033 06	2.667	-2.667	-15.42

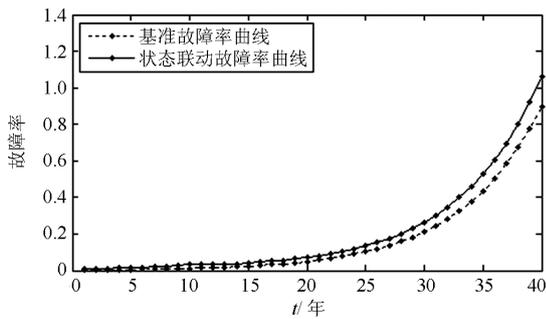


图 4 在役变压器故障率预测曲线

Fig. 4 Failure rate prediction curve of in-service transformer

4.1.2 运行优化

该变压器单次状态检修成本为 [8.1,9,9.9] 万元, 单次故障成本为 [144,160,176] 万元, 假定变压器的投资成本与退役处置成本之和 $CI + CD = 270$ 万元, 年运行成本 $CO_t = ([3.6, 4, 4.4] + 0.3t) \times 1.025^t$ (万元/年), t 为运行年份。

设定状态检修初始役龄回退因子 $\alpha_0 = 0.4$, 役龄回退衰减系数 $\Delta\alpha = 0.01$, $T_{\min} = 10$, $T_{\max} = 50$ 。

结合模糊役龄回退方法, 根据式(12)计算得到, 当 $T_a=36$ 年, 且在第 17 年和第 32 年分别进行检修

时, 该变压器年均寿命周期成本最小, 为 19.7174 万元。即结合检修策略优化, 这台变压器最佳运行寿命为 36 年。

4.2 在运时间-健康指数影响分析

沿用 4.1 节变压器基准故障率函数, 针对运行时间小于 40 年, 当前健康指数小于 60 的情况, 分别用基于状态联动的最佳运行寿命评估模型进行测算, 得到的结果如图 5 所示。

t_0 轴对应变压器当前投运时间, $HI(t_0)$ 轴对应当前状态评估对应的健康指数, 纵轴表示在已投运 t_0 年、健康指数为 $HI(t_0)$ 的情况下得到的最佳运行寿命。从图 5 可以看出, 对于同一 t_0 , 随着 $HI(t_0)$ 的增加, 最佳运行寿命总体呈递增趋势, 即在初始投运年限相同的情况下, 一般健康状态越好, 最佳运行寿命越长。

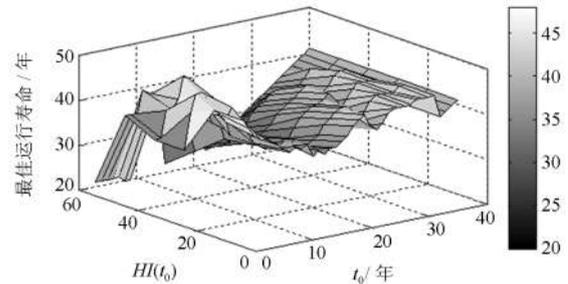


图 5 最佳运行寿命预测结果

Fig. 5 Prediction of optimal service life

4.3 灵敏度分析

定义最佳运行寿命 T_{opt} 对在役设备当前健康指数的灵敏度为

$$\mu_{ij} = \frac{\partial T_{opt}}{\partial HI} \Big|_{t_0} = \frac{T_{opt,j}(HI_j, t_0) - T_{opt,i}(HI_i, t_0)}{HI_j(t_0) - HI_i(t_0)}$$

该灵敏度参数体现了初始健康度对最佳运行寿命的影响程度。考察健康指数变化曲线:

$$\begin{cases} HI_1(t_0) = 1.35t_0 + 10 \\ HI_2(t_0) = 1.35t_0 \\ HI_3(t_0) = 1.35t_0 - 10 \end{cases}$$

取灵敏度 $\mu = \frac{1}{2}(\mu_{12} - \mu_{23})$, 计算结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, 对于已投运 21~29 年的变压器, 最佳运行寿命对当前健康状态的灵敏度较大, 说明若结合检修策略的优化提高设备健康状态, 将能够有效提高设备的最佳运行寿命。

表 2 灵敏度计算结果

Table 2 Sensitivity calculation results

t_0	μ	t_0	μ	t_0	μ
3	-0.35	17	0.2	31	0.25
4	-0.2	18	0.15	32	0.25
5	-0.2	19	0.15	33	0.25
6	-0.15	20	0.15	34	0.25
7	-0.05	21	0.3	35	0.25
8	-0.25	22	0.35	36	0.25
9	-0.3	23	0.3	37	0
10	-0.1	24	0.3	38	0
11	0.05	25	0.3	39	0
12	0.1	26	0.3	40	0
13	0	27	0.3	41	0
14	0.05	28	0.25	42	0
15	0.1	29	0.55	43	0
16	0.2	30	0.2	44	0

对 $HI_i(t_0)$ ($i=1, 2, 3$), 最佳运行寿命变化曲线如图 6 所示。

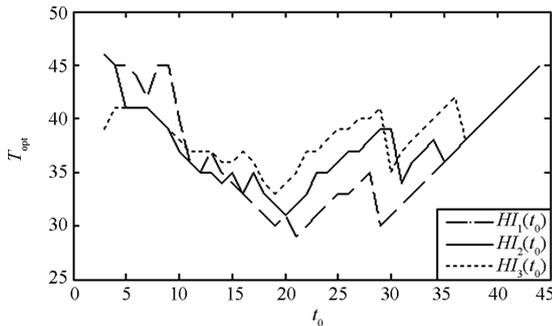


图 6 在役变压器最佳运行寿命曲线

Fig. 6 Optimal service life curves of in-service transformer

从图 6 可以看出, 对于刚投运不久的在役变压器, 由于其健康状况较好, 因此结合检修策略优化, 对应的最佳运行寿命较长。

对于已投运多年的设备($t_0 > 38$), 随着状态的劣化, 更倾向于将其及早退役, 即最佳运行时间 $T_{opt} = t_0$ 。由于假设其已运行至 t_0 ($t_0 > 38$) 年, 因此从曲线上看, T_{opt} 要高于曲线中段。

5 结论

本文考虑设备实际状态因素, 结合可靠性与经济性的要求, 探讨了设备最佳运行寿命的评估。首先基于在役设备的状态评价结果构建与设备状态联动的故障概率预测模型, 对设备可靠性参数的变化进行预测。其次结合检修工作, 以年均全寿命周期成本最小构建基于状态联动的在役设备最佳运行寿

命评估模型。算例结果表明:

1) 本文构建的模型可以合理设定设备的最佳运行寿命, 为在役设备的检修和退役安排提供参考;

2) 对电网公司不同运行阶段的在役设备, 从检修维护工作侧重点的角度提供一定建议, 有利于电网公司充分利用设备的使用价值。

参考文献

- [1] 蔡亦竹, 柳璐, 程浩忠, 等. 全寿命周期成本(LCC)技术在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 149-154.
CAI Yizhu, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Application review of life cycle (LCC) technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 149-154.
- [2] 张静怡, 刘艳, 霍明雷. 基于模糊熵权 Vague 集的配电网检修决策优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 37-45.
ZHANG Jingyi, LIU Yan, HUO Minglei. The maintenance decision optimization for distribution networks based on the fuzzy entropy weight of vague set[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 37-45.
- [3] 刘欢, 刘志刚. 基于改进粒子群算法的牵引变电所维修优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 87-94.
LIU Huan, LIU Zhigang. An improved particle swarm algorithm study on optimization model of maintenance schedules for railway traction substations[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 87-94.
- [4] 黄江倩, 赵航, 程伟华, 等. 基于风险管理方法的配电网检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 94-100.
HUANG Jiangqian, ZHAO Fang, CHENG Weihua, et al. Optimization of distribution network maintenance plan based on risk management method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 94-100.
- [5] 李本新, 韩学山. 发输电检修与机组组合联合决策的 Benders 分解方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 224-231.
LI Benxin, HAN Xueshan. Benders decomposition algorithm to coordination of generation and transmission maintenance scheduling with unit commitment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 224-231.
- [6] 李志刚, 刘伯颖, 李玲玲, 等. 基于小波包变换及 RBF 神经网络的继电器寿命预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 233-240.
LI Zhigang, LIU Boying, LI Lingling, et al. Life

- prediction of relay based on wavelet packet transform and RBF neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 233-240.
- [7] 徐岩, 迟成. 基于 LCC 管理的变电站主接线的风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 74-80.
XU Yan, CHI Cheng. Risk assessment of substation main connection based on LCC management[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 74-80.
- [8] 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.
- [9] 韩帮军, 范秀敏, 马登哲. 有限时间区间预防性维修策略的优化[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(5): 679-682.
HAN Bangjun, FAN Xiumin, MA Dengzhe. Optimal policy research of preventive maintenance in finite time horizon[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003, 37(5): 679-682.
- [10] 于继来, 王成福, 张博, 等. 在役电力变压器经济寿命评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(3): 86-90.
YU Jilai, WANG Chengfu, ZHANG Bo, et al. Economic life evaluation of power transformer in service[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(3): 86-90.
- [11] 栗然, 韩彪, 卢云, 等. 基于随机模糊理论的变压器经济寿命评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 9-16.
LI Ran, HAN Biao, LU Yun, et al. Transformer's economic life assessment based on random and fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 9-16.
- [12] 张懿议. 基于运行状态和寿命评估的电力变压器全寿命周期检修决策研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
ZHANG Yiyi. Decision making for power transformers considering condition assessment and insulation life assessment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [13] 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.
- [14] 顾洁, 杜渐, 秦杰, 等. 基于全寿命周期成本的变电站设备检修模糊规划模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 44-50.
GU Jie, DU Jian, QIN Jie, et al. A fuzzy programming model based on life cycle cost for equipment maintenance in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 44-50.
- [15] 李铭钧, 陈杏, 甘团杰, 等. 基于模糊役龄回退的电力设备弹性检修决策优化模型[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 99-104.
LI Mingjun, CHEN Xing, GAN Tuanjie, et al. Optimization model for flexible maintenance decision-making for power equipments based on fuzzy age reduction[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 99-104.
- [16] 刘宝锭, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 144-155.
- [17] 孙超. 基于风险量化分析的电力变压器多层次检修策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
SUN Chao. Study on multi-level maintenance strategy of power transformers based on quantitative risk assessment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

收稿日期: 2016-01-15; 修回日期: 2016-04-06

作者简介:

陈杏(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: chenxing0050@163.com

宋依群(1970-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场、电力系统分析、智能电网; E-mail: yqsong@sytu.edu.cn

杨镜非(1974-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统故障诊断、智能电网、电网智能调度、分布式状态估计。
E-mail: carayang@sytu.edu.cn

(编辑 魏小丽)