

基于随机模糊理论的变压器经济寿命评估

栗然, 韩彪, 卢云, 刘会兰, 赵碧凝

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 对电力变压器进行经济寿命评估, 可以有效保障电网安全运行、提高企业经济效益。以全寿命周期成本理论为指导, 将环境成本和社会责任成本纳入变压器全寿命周期成本中, 建立了更为全面的变压器全寿命周期成本模型。针对评估参数随机、模糊不确定性共存或交叉存在的特点, 引入能同时处理这两种不确定性的随机模糊理论处理评估参数, 建立了新的变压器经济寿命评估模型。此模型不但可以得到变压器经济寿命期望值, 还能够得到不同置信水平下的经济寿命区间以及相同跨度的区间中机会测度最大的经济寿命区间。实例结果表明, 将随机模糊理论应用到变压器经济寿命评估中是有效可行的, 可以为决策者提供更为详细和多元化的信息, 具有一定的参考价值。

关键词: 全寿命周期成本; 经济寿命; 随机模糊理论; 不同置信水平; 机会测度

Transformer's economic life assessment based on random and fuzzy theory

LI Ran, HAN Biao, LU Yun, LIU Hui-lan, ZHAO Bi-ning

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Evaluating economic life of power transformers can effectively guarantee the safe operation of grid and improve economic efficiency. Full life-cycle cost theory used as a guide, environmental costs and social responsibility costs taken into consideration, a more comprehensive full life-cycle cost model of the transformer is established. Since evaluation parameters have random and fuzzy uncertainty, random fuzzy theory processing evaluation parameters are introduced to handle the two kinds of uncertainty simultaneously and a new assessment of the economic life of the transformer model is established. This model not only can get economic life expectancy of the transformers, but also can get the economic life interval under different confidence levels and interval whose chance measurement is the biggest under the same economic life span. An example result shows that the random and fuzzy theory applied to the transformer economic life assessment is feasible and effective, and it can provide more detailed and diversified information for decision makers and has a certain reference value.

Key words: life cycle cost; economic life; random fuzzy theory; different confidence levels; chance measurement

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0009-08

0 引言

变压器作为电力公司最主要的一次设备, 在电力公司资产中无论是数量还是经济支出都占有相当大的比重, 其能否安全、可靠、经济地运行对电力系统的影响巨大^[1-3]。目前, 电力企业缺乏科学有效的变压器更新决策方法, 往往以在役时间长短作为变压器更换的依据, 没有考虑变压器的经济性能, 导致一部分运行良好(较差)的变压器提前(延迟)退役, 给电力企业带来巨大的经济损失。因此, 对变压器进行经济寿命评估, 具有一定的现实意义。

关于变压器全寿命周期成本(LCC)模型的研究, 文献[4-5]考虑了变压器全寿命周期内的初始投资、运行维护、故障损失以及报废成本, 但在故障

损失成本模型中没有具体给出社会责任成本的数学模型; 文献[6]在其基础上, 考虑了环境成本并建立了其数学模型, 但考虑不够全面。

关于变压器经济寿命的研究, 文献[7-8]将变压器年均成本最小值所对应的年限作为变压器的经济寿命, 仅仅考虑了其成本, 而变压器作为电力系统的重要设备, 在评估其经济寿命时也应该考虑其经济效益; 文献[9]在上述文献的基础上, 综合考虑变压器的供电收入以及各种成本支出, 通过比较检修与更换两种情况下的年均净收益值, 作出是检修还是更换的决策; 文献[10]综合考虑节能、环境与社会、容量贴费、折旧、贷款等因素所包含的经济性能指标, 将综合净效益值最大的年份定义为经济寿命年限; 文献[11]将风险理论应用于变压器更新的

经济效益评估,建立了考虑变压器更新风险收益的综合经济效益模型;以上文献均未考虑市场上新变压器的经济性能以及评估参数具有的随机模糊不确定性对评估结果的影响。

本文在上述研究成果的基础上,综合考虑现役变压器全寿命周期成本、供电收入、所选参照变压器经济性能、参数随机模糊不确定性等对现役变压器经济寿命的影响,建立了基于随机模糊理论的变压器经济寿命评估新模型。此模型可以给出多种满足不同要求的评估结果,克服了传统评估方法只能给出一个评估结果、且不能给出评估结果可信程度等相关信息的缺陷,使得评估结果更加合理可信,也更具有实用价值。

1 随机模糊理论

1.1 随机模糊变量及其机会测度

刘宝锭于2002年提出随机模糊变量的定义、期望值算子、关键值及机会分布等概念,建立起完整的随机模糊理论,为处理随机模糊变量提供了理论依据^[12]。

定义1 如果 ξ 是从可能性空间 $(\Theta, p(\Theta), \text{Pos})$ 到随机变量集合的函数,则称 ξ 是一个随机模糊变量。

定义2 设 η 是定义在概率空间 (Ω, Λ, P_r) 上的随机变量, a 是定义在可能性空间 $(\Theta, p(\Theta), \text{Pos})$ 上的模糊变量,则 $\xi = \eta + a$ 是一个随机模糊变量。

定义3 设 ξ 是定义在可能性空间 $(\Theta, p(\Theta), \text{Pos})$ 上的随机模糊变量,且 B 是 \mathbb{R} 中的Borel集,则随机模糊时间 $\xi \in B$ 的机会定义为从区间 $(0,1]$ 到 $[0,1]$ 的一个函数,即

$$\text{Ch}(\xi \in B)(\alpha) = \sup_{Cr\{A\} \geq \alpha} \inf_{\theta \in A} \text{Pr}\{\xi(\theta) \in B\}$$

其中 α 为规定的可能性水平,此机会值称为 α -机会。

1.2 随机模糊模拟算法

在处理一般的随机模糊系统时,试图设计解析的算法是不太现实的。因此,刘宝锭给出了计算随机模糊变量期望值、关键值和机会测度的模拟算法。

1) 期望值模拟算法

算法1(期望值随机模糊模拟):

(1) 置 $e=0$;

(2) 分别从 Θ 中均匀抽取满足 $\text{Pos}\{\theta_k\} \geq \varepsilon$ 的 θ_k ($k=1, 2, \dots, N$),其中 ε 是一个充分小的正数;

(3) 置 $a = \min_{1 \leq k \leq N} E[f(\xi(\theta_k))]$

$$b = \max_{1 \leq k \leq N} E[f(\xi(\theta_k))];$$

(4) 从区间 $[a, b]$ 中随机产生 r ;

(5) 如果 $r \geq 0$, 则

$$e \leftarrow e + Cr\{\theta \in \Theta \mid E[f(\xi(\theta))] \geq r\};$$

(6) 如果 $r < 0$, 则

$$e \leftarrow e - Cr\{\theta \in \Theta \mid E[f(\xi(\theta))] \leq r\};$$

(7) 重复(4)~(6)共 N 次;

(8) 则 $E[f(\xi)] = a \vee 0 + b \wedge 0 + e(b-a)/N$ 。

2) 关键值模拟算法

关键值是指在给定的置信水平 α 和 β 下,满足 $\text{Ch}\{f(\xi) \geq \bar{f}\}(\alpha) \geq \beta$ 的最大值 \bar{f} 。对于任意给定的置信水平 α 和 β ,关键值模拟算法如下:

算法2(关键值随机模糊模拟):

(1) 分别从 Θ 中均匀抽取满足 $\text{Pos}\{\theta_k\} \geq \varepsilon$ 的 θ_k ($k=1, 2, \dots, N$),其中 ε 是一个小的正数;

(2) 求出满足 $H(r) \geq \alpha$ 的最大的 r ;其中

$$H(r) = \frac{1}{2} (\max_{1 \leq k \leq N} \{v_k \mid \bar{f}(\theta_k) + \min_{1 \leq k \leq N} \{1 - v_k \mid \bar{f}(\theta_k) < r\}\})$$

(3) 返回 r 。

3) 机会测度模拟算法

根据一个随机模糊模拟过程,可以求出任意给定的置信水平 α 下,满足

$$\text{Cr}\{\theta \in \Theta \mid \text{Pr}\{f(\xi(\theta)) \leq 0\} \geq \bar{\beta}\} \geq \alpha$$

的最大的 $\bar{\beta}$ 。

算法3(机会测度随机模糊模拟):

(1) 分别从 Θ 中均匀抽取满足 $\text{Pos}\{\theta_k\} \geq \varepsilon$ 的 θ_k ($k=1, 2, \dots, N$),其中 ε 是一个充分小的正数;

(2) 求出满足 $L(r) \geq \alpha$ 的最大的 r ;其中

$$L(r) = \frac{1}{2} (\max_{1 \leq k \leq N} \{v_k \mid f(\theta_k) \geq r\} + \min_{1 \leq k \leq N} \{1 - v_k \mid f(\theta_k) < r\})$$

(3) 返回 r 。

2 变压器 LCC 模型及不确定性分析

电力设备全寿命周期成本管理是从电力设备长期的经济效益出发,全面考虑电力设备的规划、设计、建设、采购、运行维护、技术改造直至报废处理的全过程,在满足安全、效益和效能的前提下追求LCC最小的一种管理理念和方法^[13-18]。依据全寿命周期管理理论全系统、全费用、全过程的三大原则,本文构造的变压器LCC数学模型如图1。

2.1 初始投资成本

变压器初始投资成本指变压器在投入运行前发生的一切费用,包括变压器及其附属设备购置费、安装调试费以及培训费、验收费、特殊调试项目费等其他相关费用^[16],该成本发生在寿命周期初期,

属于一次性投入。

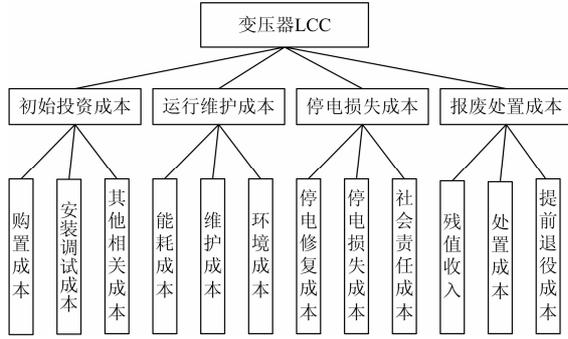


图1 电力变压器 LCC

Fig. 1 Power transformer LCC

$$c_1 = c_{11} + c_{12} + c_{13} \quad (1)$$

其中： c_{11} 为变压器及其附属设备购置成本； c_{12} 为安装调试成本； c_{13} 为其他相关成本。 c_{11} 、 c_{12} 可根据相关资料获得，这两部分成本准确性较高，不确定性仅由统计资料的误差引起，影响较小，可忽略不计。其他相关成本大约为购置成本的 2%~2.8%，具有模糊性，用三角模糊数（2% c_{11} ，2.4% c_{11} ，2.8% c_{11} ）表示。

2.2 运行维护成本

变压器运行维护成本指变压器从正式投入运行到退役期间为维护变压器正常运行所发生的费用，主要包括能耗成本、环境成本及维护成本。运行维护费用是每年都要发生的，建立的运行维护成本模型为

$$c_2(t) = c_{21}(t) + c_{22}(t) + c_{23}(t) \quad (2)$$

其中： c_{21} 为能耗成本； c_{22} 为环境成本； c_{23} 为维护成本。

2.2.1 能耗成本

变压器作为电力系统中最主要的一次设备，数量较多，损耗大约占总发电量的 3%~5%，其能耗成本包括空载损耗成本和负载损耗成本两部分，建立的数学模型为

$$c_{21}(t) = aT_{\text{hpy}}A_fP_0 + a(0.15I_f + 0.85I_f^2)P_k \quad (3)$$

其中： a 为电价，一般取 0.47~0.5，具有模糊不确定性，用三角模糊数（0.47, 0.485, 0.5）表示； T_{hpy} 为年运行小时数，取 8760； A_f 为可用率，取 1； I_f 为负载率，一般取 0.5~0.65，具有模糊不确定性，用三角模糊数（0.5, 0.075, 0.65）表示； P_0 为空载损耗； P_k 为负载损耗。

2.2.2 环境成本

当前经济社会可持续发展正遭受全球气候变暖的重大挑战，产生温室效应的气体主要有 CO_2 ， CH_4 ， NO_x 等。据统计，一台 220 kV 变压器每年的

损耗达 1 905.3 MWh，每消耗 1 kWh 电能将产生 0.875 kg CO_2 ，即该台变压器每年产生的 CO_2 达到 1 667.1 t，同时电力变压器的电磁辐射、噪声等给居民正常生活带来的影响也不容忽视。因此，有必要将环境成本纳入 LCC 中，促使企业在追求利益最大化的同时兼顾环境保护的要求。本文在文献[3]的基础上，将环境成本与燃烧煤炭产生的温室气体联系起来，并将其归咎于变压器的损耗，将超出损耗标准值的损耗作为产生环境成本的直接因素，构建的变压器环境成本模型为

$$c_{22}(t) = (E_{\text{tr}}(t) - E_{\text{tr0}})C_E + PCFY \quad (4)$$

$$E_{\text{tr0}} = P_0A_fT_{\text{hpy}} + P_kI_f^2T_{\text{hpy}} \quad (5)$$

其中： E_{tr} 为年实际损耗； E_{tr0} 为年标准损耗； C_E 为单位损耗产生的排放费用； $PCFY$ 为由于电磁干扰及噪声等对居民正常生活影响的赔偿费用。

各参数不确定性分析：变压器每年的实际损耗量受负荷、环境等因素的影响，具有一定的随机性，收集同类型变压器多年的实际损耗数据，发现其遵循一定的规律，其值基本落在某一区间之内^[6]，以年实际损耗量为横坐标，以此年实际损耗量出现的概率为纵坐标，进行曲线拟合得出它近似服从正态分布 $N \sim (u, \sigma^2)$ ；由 I_f 具有模糊性可得年标准损耗也是模糊的，用三角模糊数表示；由定义 2 可得 $E_{\text{tr}}(t) - E_{\text{tr0}}$ 具有随机模糊双重不确定性；目前，还没有一套有效的机制衡量电磁辐射及噪声给居民生活带来的不良影响，很难确定 $PCFY$ 的数学模型，具有很大的模糊不确定性，用三角模糊数表示。

2.2.3 维护成本

变压器的维护成本包括保险费、工人工资、有计划的定期检修成本、日常巡视成本、预防性试验成本等。这些费用都是不断变化的，具有很强的不确定性，其成本大小与变压器的运行年数有关，呈现一定的随机性，根据大量统计数据发现，维护成本与运行时间呈现为一种指数关系，同时，每年中的维护成本也不是确定的值，呈现出一定的模糊性，可用三角模糊数表示。基于上述分析，变压器的维护成本同时具有随机模糊双重不确定性，建立的维护成本模型为

$$c_{23}(t) = a_0 + be^{ct} \quad (6)$$

其中， $a_0 = (a_1, a_2, a_3)$ 。

2.3 停电损失成本

随着国民经济的发展，整个社会对电力供应的依赖性日益增强，由电气设备故障引起的停电不仅

会直接影响到电力企业的经济效益并对用户造成严重的经济损失,甚至会造成严重的社会影响。变压器的停电损失成本包括直接停电损失和间接停电损失(社会责任成本)两部分。其中,直接停电损失包括所停区域的供电收入损失和修复成本,间接停电损失主要是指停电对用户的正常生活、生产造成了不利的影响,使供电企业社会形象受损,而对社会形象最直接的评价就是年实际停电时间,年实际停电时间越短,其社会声誉越好。反之,亦然。基于上述基本原则,本文在文献[18]的基础上,构建了更为全面的停电损失成本模型为

$$c_3(t) = a\omega T + r(t)(RC_0 + \alpha t)(MTTR_0 + \beta t) + (T - T_0)C_d \quad (7)$$

其中: a 为电价; w 为年中断功率; T 为年实际停电时间; r 为故障率; RC_0 为初始年修复成本; α 为修复成本年增长率; $MTTR_0$ 为初始年修复时间; β 为修复时间年增长率; T_0 为年计划停电时间; C_d 为单位停电时间所需支付的费用。式(7)最后一部分的意义为当待评估变压器的年实际停电时间小于年计划停电时间时,为负值,为鼓励其继续提高社会声誉,此处记为社会收益,反之,则记为社会责任成本。

故障率近似服从浴盆分布,其形状如式(8)所示。

$$r(t) = \begin{cases} \lambda_1 m_1 t^{m_1 - 1} & 0 \leq t < t_1 \\ \lambda & t_1 \leq t < t_2 \\ \lambda_2 m_2 t^{m_2 - 1} & t_2 \leq t < t_D \end{cases} \quad (8)$$

其中: λ_1 , λ_2 , λ 是与特征寿命有关的参数; m_1 , m_2 为形状参数。

不确定性分析: 电价 a 如 2.2.1 节所示,用三角模糊数表示; 据统计, 变压器年中断功率最小值为 15 kW, 最大值为 25 kW, 具有一定的模糊不确定性, 用三角模糊数(15,20,25)表示; 修复成本、修复时间每年的增长率受变压器运行状态、工作人员的素质、故障类型等因素的影响, 也不是固定不变的, 具有一定的模糊不确定性, 同样用三角模糊数表示; 变压器每年故障的发生次数是随机的, 经过大量数据的分析, 发现它近似和浴盆曲线的分布类似, 另外, 其寿命特征参数 λ_1 , λ_2 , λ 是模糊的, 年故障率同时具有随机模糊双重不确定性; 变压器每年的实际停电时间 t 与变压器的运行状态有关, 具有一定的随机不确定性, 收集变压器历年的年实际停电时间数据, 发现其遵循一定的规律, 以年实际停电时间为横坐标, 以年实际停电时间出现的概率为纵坐标, 进行曲线拟合可得其近似服从正态分

布; 年计划停电时间 t_0 是电力公司搜集相关资料提前给出的, 由于搜集资料的不全面, 往往只能给出一个大概的区间, 具有一定的模糊不确定性, 由定义 2 可知, $t - t_0$ 同时具有随机模糊双重不确定性。

2.4 报废处置成本

报废成本指变压器运行周期结束后, 清理销毁变压器所需支付的费用。在报废的过程中, 既需要一定的财力、物力和人力, 也会产生一部分残值收入。变压器的报废成本包括提前退役的损失成本、处置成本以及残值收入, 其数学模型为

$$c_4(t) = \frac{t_0 - t}{t_0} c_{11} + dc - \rho c_{11} \quad (9)$$

其中: t_0 为变压器的设计寿命; t 为当前待评估年限; dc 为处置成本; ρ 为残值率。

不确定性分析: 变压器在拆除的过程中, 需要人工费用、运输费用、环保费用等一系列的处置费用, 由于包括的费用较多, 很难用一个确定的量表示, 具有一定的模糊不确定性, 用三角模糊数表示; 变压器的残值率和退役时各部件所处的状态有关, 具有很强的模糊不确定性, 用三角模糊数表示。

3 变压器供电收入模型及不确定性分析

变压器作为电力系统中重要的设备, 在评估其经济性能时, 不但要考虑其成本支出, 也应该考虑其供电收入, 对变压器供电收入的评价通常根据其电力企业的贡献来衡量。供电收入源自电网企业销售电力至用户的收益。由于一台电力变压器只是整个供电链条中的一个环节, 因此分摊到某台具体电力变压器的供电收入只能是整个供电收入的一部分, 具体可根据整个供电链条上的资产比例予以确定^[9]。根据以上原则, 建立的变压器供电收入模型如为

$$I_s = 8760\delta\Delta P S_N I_f \quad (10)$$

其中: I_s 为变压器年供电收入; δ 为变压器在整个供电链中的贡献率; ΔP 为购售电差价; S_N 为额定容量; I_f 为平均负载率。

不确定性分析: δ 受变压器安装位置、所带负荷大小及类型等因素的影响, 很难精确确定它在整个供电链条中所起作用的大小, 具有模糊不确定性, 用三角模糊数表示; ΔP 随着变压器所供负荷种类的不同而不同, 同样具有很大的不确定性, 用三角模糊数表示; I_f 的分析同 2.2.1 节所述。

4 基于随机模糊理论的变压器经济寿命评估

4.1 经济寿命模型

在对电力变压器经济寿命进行评估时, 必须充

分考虑到评估参数不确定性的影响。一般, 应用概率理论处理随机不确定性因素, 应用可信性理论处理模糊不确定因素, 应用随机模糊理论处理同时具有随机模糊双重不确定的因素^[19]。基于上述理论, 建立考虑资金时间价值的电力变压器经济寿命评估模型为

$$E(T) = I_s(T) - LCC(T) = 8760\delta\Delta PS_N I_f - (c_1 + \sum_{t=1}^T ((c_2(t) + c_3(t))/(1+i)^t) + c_4(t)/(1+i)^T) / T \quad (11)$$

其中: $E(T)$ 为变压器的年均净收益; 其他参数的含义如前所述。

4.2 经济寿命评估结果

(1) 根据算法 1, 可以评估现役变压器在所选参照变压器不同时经济寿命的期望值。

(2) 对于给定置信水平 α 和 β , 结合算法 2, 可以求出满足一定机会测度的经济寿命取值区间。具体过程如下:

对于 $f(\xi_i)$, 当 $\alpha > 0.5$ 时, 可以求出满足 $\text{Cr}\{z \in Z | \Pr\{f(\xi_i(z)) \geq \bar{f}_i\} \geq \beta\} \geq \alpha$ 的最大的 \bar{f}_i , 记为 X_i , 同理, 可以得到满足

$$\text{Cr}\{z \in Z | \Pr\{f(\xi_i(z)) \leq \bar{f}_i\} \geq \beta\} \geq \alpha$$

的最小的 \bar{f}_i , 记为 Y_i 。则有

$$\begin{cases} \text{Cr}\{z \in Z | \Pr\{f(\xi_i(z)) < X_i\} < 1 - \beta\} \geq \alpha \\ \text{Cr}\{z \in Z | \Pr\{f(\xi_i(z)) > Y_i\} < 1 - \beta\} \geq \alpha \end{cases}$$

当 $X_i \leq Y_i$ 时, 有

$$\text{Cr}\{z \in Z | \Pr\{X_i \leq f(\xi_i(z)) \leq Y_i\} \geq 2\beta - 1\} \geq \alpha$$

令 $\gamma = 2\beta - 1$, 这样, 就得到了 $f(\xi_i)$ 的满足 α 机会为 γ 的取值区间。

(3) 对于给定置信水平 α , 可以求出一个确定区间的 α 机会, 进而选出机会值最大的区间作为经济寿命的取值区间。具体过程如下:

对于任意一个区间 $[x, y]$, 根据算法 3 可以得到满足

$$\text{Cr}\{z \in Z | \Pr\{x \leq f(\xi_i(z)) \leq y\} \geq \bar{\beta}\} \geq \alpha$$

的最大的 $\bar{\beta}$, 即 $f(\xi_i)$ 属于区间 $[x, y]$ 的 α 机会为 $\bar{\beta}$, 这也是经济寿命落入区间 $[x, y]$ 的 α 机会。同理, 可以求出经济寿命所有可能落入区间对应的机会测度, 并以机会值最大的区间作为经济寿命区间。

5 算例

以河北南网运行多年的某电力变压器为例(见

表 1), 结合本文所提出的经济寿命评估模型对其进行经济寿命评估。

表 1 变压器 A 基本资料

Table 1 Basic information of transformer A

变压器 A		变压器 A	
购置成本	500	修复时间初值	(8,8.5,9)
安装调试费	25	修复时间增长率	(0.05,0.07,0.09)
空载损耗	280	供电收入贡献	(0.02,0.025,0.03)
负载损耗	490	购售电价之差	(0.18,0.22,0.26)
年停电功率	(15,20,25)	修复成本初值	(0.82,0.885,0.95)
年计划停电	(9,10,11)	修复成本增长率	(0.005,0.0065,0.008)

根据以上基本数据以及经济寿命模型, 可得变压器 LCC 中的各类型成本值和年均净收益值。以第八年为例, 可得各成本年均值所占比例如图 2。

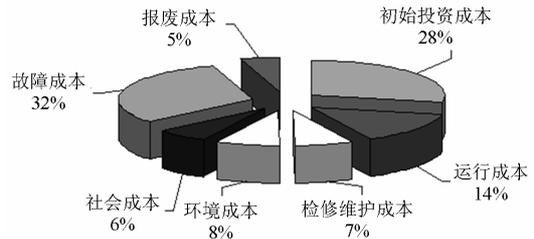


图 2 各成本年均值所占比例

Fig. 2 Proportion of the annual costs

由图 2 可知, 在变压器全寿命周期成本中, 环境成本、社会责任成本分别占 8%、6%, 与报废成本和检修维护成本所占比例相当, 对变压器的总成本有一定的影响, 进而会影响变压器的经济寿命, 因此本文计及其影响会使评估结果更加准确可靠。

由年均净收益值 E 随时间 t 的分布可知, E 随着 t 先上升后下降, 应用 Matlab 软件进行最小二乘曲线拟合得到其分布函数为 $E = at^2 + bt + c$, 通过平移得到另外两条边界曲线。由此, 得到年均净效益的随机模糊分布函数为

$$E = at^2 + bt + c \quad c = (c_1, c_2, c_3) \quad (12)$$

同理, 可得所选参照新变压器 B、C 的最大年均净效益值为 180.32、195.69 万。如图 3 所示。

传统评估方法只能给出一个评估结果, 且不能给出评估结果的准确程度等相关信息, 本模型结合随机模糊模拟技术, 从三个方面评估变压器的经济寿命。

(1) 经济寿命期望值

设参照变压器最大年均净效益值为 d , 由 $E(t)=d$ 可得, $t = (-b - \sqrt{b^2 - 4a(c-d)}) / 2a$, 其中 a 为模糊变量, 而模糊变量是特殊的随机模糊变量,

结合算法 1, 可得其经济寿命期望值。

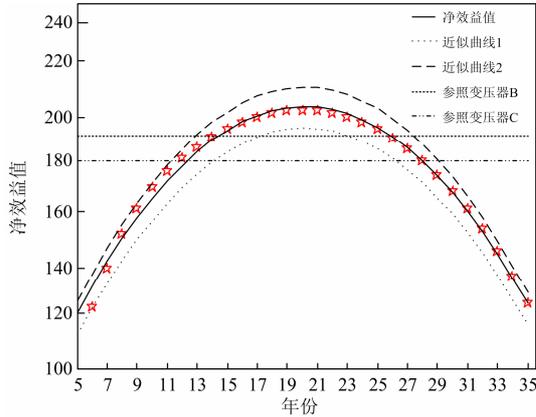


图 3 变压器净效益值变化趋势

Fig. 3 Tendency of the transformer net benefit value

评估结果: 当参照变压器为 B 时, 待评估变压器的经济寿命为 25.8 年; 当参照变压器为 C 时, 待评估变压器的经济寿命为 27.6 年。

由评估结果可得: 经济寿命随所选参照变压器的不同而不同, 参照变压器的经济性能越好, 待评估变压器的经济寿命越短, 反之亦然。当所选参照变压器经济性能较好, 其年均最大净收益值大于待评估变压器的最大年均净收益值, 待评估变压器的经济寿命为当前待评估年限。因此本文在评估现役变压器的经济寿命时, 考虑参照变压器的影响, 具有一定的合理性。

(2) 一定机会测度的经济寿命取值区间

根据 4.2 节所述, 可以求出满足任意机会测度的经济寿命区间, 结果如表 2 所示。

表 2 不同置信度下变压器的经济寿命区间

Table 2 Transformer economic life range under different confidence levels

	参照变压器 B	参照变压器 C
$\alpha = 0.6, \gamma = 0.7$	(24.7, 26.8)	(26.3, 28.4)
$\alpha = 0.6, \gamma = 0.8$	(23.4, 27.9)	(25.2, 28.6)
$\alpha = 0.9, \gamma = 0.7$	(23.1, 27.8)	(26.1, 28.9)
$\alpha = 0.9, \gamma = 0.8$	(22.3, 27.2)	(25.1, 29.1)

通过上述满足不同机会测度的评估结果可知: 当 α 不变, 随着 γ 的增大评估区间随之变大, 位于评估区间内的机会增大; 当 γ 不变, 随着 α 的增大评估区间也随之变大, 位于评估区间内的机会增大。即, 随着置信水平 α 和 γ 的增大, 评估区间变大, 更容易包含在评估区间内; 随着 α 和 γ 的减小, 评估区间变小, 包含在评估区间内的可能性也随之减小。在实际应用中, 可以根据要求选择合适的置信

水平。

(3) 机会测度最大的经济寿命区间

根据 4.2 节所述, 可以求出相同跨度的区间中机会测度最大的经济寿命区间。令 $\alpha = 0.8$, 以跨度 2 为例, 得到的结果如表 3 所示。

表 3 跨度为 2 时各区间机会测度值
Table 3 Measurement value of each interval when the span is two

区间	变压器 B	变压器 C	区间	变压器 B	变压器 C
[10,12]	0.003	0.005	[20,22]	0.113	0.18
[11,13]	0.014	0.026	[21,23]	0.14	0.20
[12,14]	0.038	0.078	[22,24]	0.15	0.21
[13,15]	0.045	0.091	[23,25]	0.24	0.32
[14,16]	0.056	0.098	[24,26]	0.32	0.36
[15,17]	0.065	0.105	[25,27]	0.58	0.38
[16,18]	0.083	0.107	[26,28]	0.52	0.42
[17,19]	0.092	0.108	[27,29]	0.49	0.22
[18,20]	0.101	0.11	[28,30]	0.31	0.11
[19,21]	0.102	0.14	[29,31]	0.23	0.09

由表 3 可得, 当选变压器 B 为参照变压器时, 区间[25,27]的机会测度最大; 当选变压器 C 为参照变压器时, 区间[26,28]的机会测度最大。

由以上三种评估结果可知, 基于随机模糊理论的变压器经济寿命估算不仅给出了期望值, 而且给出了不同置信水平的评估区间以及相同跨度的区间中机会测度最大的经济寿命区间, 而以前的确定型估算算法只能给出一个评估值, 没有具体的可信度, 实际应用中的参考价值不是很强。

6 结论

电力变压器是输配电网中最重要的设备, 其安全运行是保障电力系统可靠运行的条件之一, 是保证电能可靠输送的决定性因素, 因此对变压器进行寿命分析是必要的。综合考虑变压器全寿命周期成本、供电收入、新变压器经济性能等因素的影响, 提出变压器经济寿命新定义。鉴于有些评估参数同时具有随机模糊双重不确定性, 建立了基于随机模糊理论的变压器经济寿命评估新模型。评估结果不但能给出最佳经济寿命期望值, 而且还能给出不同置信水平下的经济寿命区间以及相同跨度的区间中机会测度最大的寿命区间, 能够为电力公司决策者提供更为详细和多元化的参考信息, 有利于做出更优的决策, 具有一定的实用价值。

参考文献

[1] 尹金良, 朱永利, 俞国勤, 等. 基于高斯过程分类器的

- 变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 158-164.
- YIN Jin-liang, ZHU Yong-li, YU Guo-qin, et al. Transformer fault diagnosis based on Gaussian process classifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 158-164.
- [2] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-10.
- LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, ZHENG Han-bo, et al. Power transformer oil-paper insulation aging research[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-10.
- [3] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
- ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. Power transformer insulation condition assessment method based on cloud theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [4] 罗晓初, 李乐, 魏志连, 等. 全寿命周期成本理论在配电变压器改造投资决策中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 207-211.
- LUO Xiao-chu, LI Le, WEI Zhi-lian, et al. The application of the whole life cycle cost theory in power distribution transformer reformation investment decision[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 207-211.
- [5] 尹来宾, 苗春菊, 崔新奇, 等. 基于全生命周期费用的配电装置改造的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 61-65.
- YIN Lai-bin, MIAO Chun-ju, CUI Xin-qi, et al. Distribution equipment modification research based on the total life cycle cost[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 61-65.
- [6] 江修波, 吴文宣, 陈祥伟. 区间分析法在电力变压器全寿命周期成本模型中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 50-53.
- JIANG Xiu-bo, WU Wen-xuan, CHEN Xiang-wei. Interval analysis applied in the power transformer life cycle cost model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 50-53.
- [7] 孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆. 基于全寿命周期成本模型的变电站设备最佳寿命周期评估[J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 96-100.
- SUN Peng, CHEN Shao-hui, ZHANG Cai-qing. Substation equipment life cycle assessment based on the whole life cycle cost[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 96-100.
- [8] 李卫国, 俞乾, 罗日成. 基于风险分析的大型电力变压器经济寿命预测算法研究[J]. 计算技术与自动化, 2012, 31(1): 74-77.
- LI Wei-guo, YU Qian, LUO Ri-cheng. Large power transformer economic life prediction algorithms based on risk analysis[J]. Computing Technology and Automation, 2012, 31(1): 74-77.
- [9] 刘有为, 马麟, 吴立远, 等. 电力变压器经济寿命模型及应用实例[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 235-240.
- LIU You-wei, MA Lin, WU Li-yuan, et al. Power transformer economic life model and application example[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 235-240.
- [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.
- LU Ji-lai, WANG Cheng-fu, ZHANG Bo, et al. Power transformer in service economic life assessment[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2010, 22(3): 86-90.
- [11] 张勇军, 徐涛, 张良栋. 计及风险收益的变压器更新综合经济效益模型[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 74-78.
- ZHANG Yong-jun, XU Tao, ZHANG Liang-dong. Comprehensive economic benefit model of transformer update considering risk and return[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 29(10): 74-78.
- [12] 刘宝锭, 彭锦. 不确定理论教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- LIU Bao-ding, PENG Jin. A course in uncertainty theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [13] 蔡亦竹, 柳璐, 程浩忠. 全寿命周期成本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 Yi-zhu, LIU Lu, CHENG Hao-zhong. Life cycle cost technology applied in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 149-154.
- [14] 柳璐, 王和杰, 程浩忠, 等. 基于全寿命周期成本的电力系统经济性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 45-50.
- LIU Lu, WANG He-jie, CHENG Hao-zhong, et al. Power system economic evaluation method based on the full

- life-cycle cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 45-50.
- [15] 崔新奇, 尹来宾, 范春菊, 等. 变电站改造中变压器全生命周期费用模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 69-73.
- CUI Xin-qi, YIN Lai-bin, FAN Chun-ju, et al. Study of LCC for power transformer in modification of transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 69-73.
- [16] Amoiralis E I, Tsili M A, Georgilakis P S, et al. Energy efficient transformer selection implementing life cycle costs and environmental externalities[C] // Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, October 9-11, 2007, Barcelona, Spain: 1-6.
- [17] 曹杨. 基于 LCC 理论的电力设备采购评估方法及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- CAO Yang. Power equipment procurement evaluation method and its application research based on the theory of LCC[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [18] 何志俭. 变压器全寿命周期成本优化的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
- HE Zhi-jian. Full life cycle cost optimization research of the transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [19] 雷秀仁, 任震, 陈碧云, 等. 电力系统可靠性评估的不确定性数学模型探讨[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 1-4.
- LEI Xiu-ren, REN Zhen, CHEN Bi-yun, et al. Power system reliability evaluation study of the uncertainty of the mathematical modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 25(11): 1-4.

收稿日期: 2013-04-17; 修回日期: 2013-06-03

作者简介:

栗然(1965-), 女, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制;

韩彪(1986-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为变压器经济寿命评估; E-mail: 920646599@qq.com

卢云(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。