

DOI: 10.7667/PSPC180484

基于杜鹃算法的变压器全寿命周期成本优化研究

郑重¹, 周圆¹, 王琪¹, 王骏², 黄宇峰²

(1. 华北电力大学高压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206;

2. 江苏省电力公司检修分公司苏州分部, 江苏 苏州 215131)

摘要: 变压器运维方式影响其运行可靠性和检修费用, 进而影响全寿命周期成本。因此, 优化运维策略对降低全生命周期成本具有重要的意义。采用威布尔分布的故障概率模型, 提出了寿命效率指数概念并建立寿命效率指数模型来定量衡量检修延长变压器运行寿命的作用。分析了变压器从设计、购置、维修直到退役的全寿命周期成本。以全寿命周期年均成本最低为目标函数, 在运行可靠性、检修程度和寿命效率指数等约束条件下, 将杜鹃算法用于运维策略中检修时间、检修程度和运行寿命参数寻优, 并将优化结果与粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)进行比较。结果表明杜鹃算法得出的结果更好, 能进一步降低年均费用和提高寿命效率指数, 可以为变压器实际运行与维护提供一定的参考依据。

关键词: 变压器; 全寿命周期成本; 威布尔分布; 寿命效率指数; 运维策略; 杜鹃算法

Research on transformer life cycle cost based on cuckoo optimization algorithm

ZHENG Zhong¹, ZHOU Yuan¹, WANG Qi¹, WANG Jun², HUANG Yufeng²

(1. Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company Suzhou Division, Suzhou 215131, China)

Abstract: Transformer operation and maintenance methods have an influence on its operational reliability and maintenance cost, which can influence the life cycle cost further. Therefore, optimizing the operation and maintenance strategy is of great significance to reduce the life cycle cost. Based on the Weibull distribution failure probability model, the life efficiency index is proposed and established to quantitatively measure the effect of maintenance on the operating life of the transformer. The total life cycle cost of transformers from design, purchase, maintenance to decommissioning is analyzed. The average annual cost per life cycle is chosen as the objective function. Under the constraints of operational reliability, maintenance levels and life efficiency index, the cuckoo algorithm is used to optimize the maintenance time, maintenance level, and operating life parameters in the operation and maintenance strategy. Comparing to Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithm (GA), the results obtained by the cuckoo algorithm are better. Not only the annual average cost is less, but also life efficiency index is higher, which can provide certain guarantees for transformer operation and maintenance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 2016YFB0101900) and Science and Technology Project of Jiangsu Electric Power Company (No. SGJSJX00SZJS1601616).

Key words: transformer; life cycle cost; Weibull distribution; lifetime efficiency index; operation and maintenance strategy; cuckoo algorithm

0 引言

变压器的运行与维护是确保电网安全、可靠、经济运行的基础。随着电力系统规模的不断扩大,

变压器的数量急剧增加, 其全寿命周期成本已经成为电力企业的一项重要成本^[1]。适宜的运维策略可有效提高变压器运行的效能, 为电力系统带来经济效益与社会效益, 反之则可能会导致经济与安全损失, 甚至造成严重的后果。因此, 开展卓有成效的维护活动, 提高变压器的可靠性水平, 延长设备寿命, 降低全寿命周期成本, 是电力企业设备管理不断追

基金项目: 国家重点研发项目资助(2016YFB0101900); 江苏省电力公司科技项目资助(SGJSJX00SZJS1601616)

求的目标^[2]。

现有的变压器维护活动主要有预试检修和事后检修^[3]。预试检修为预防设备出现故障而开展的检修活动，可以在一定程度上降低故障发生率。事后检修为故障后为使设备恢复运行而开展的检修，具有不可控性，用于使设备恢复运行，通常包括诊断性测试、更换部件等。

近年来，国内外学者对变压器全寿命周期成本进行了大量的研究。有研究以年均成本最低为目标函数^[4-6]或者以年均最大净收益^[7-8]为目标函数，重点研究变压器全寿命周期各项成本模型^[9-10]和更换策略^[11-12]。有研究从检修策略中检修类型(大、小修)、检修周期和检修次数等角度来优化全寿命周期成本^[13-15]。这些研究极大地推动了变压器的全寿命周期成本研究，为企业的决策制定提供了参考。但是鲜有研究全部从定量角度考虑检修时间、检修程度和服役寿命对全寿命周期成本的影响。因此，本文将定量研究检修时间、检修程度和服役寿命对全寿命周期成本的影响。首先基于威布尔分布建立变压器的故障概率模型，分别求出检修和不检修情况下的运行寿命，得出寿命效率指数(Lifetime Efficiency Index, LEI)；然后分析变压器全寿命周期的运行成本、检修成本、中断成本和广义折旧成本；接着分析可靠性、检修程度、寿命效率指数等约束条件；最后在约束条件下，采用杜鹃搜索算法搜索最佳的运维方式，并与遗传算法、粒子群算法进行比较。

1 LEI 模型

本文定义寿命效率指数的数学形式为变压器在有预试检修情况下的服役寿命与无预试检修情况下的服役寿命的比值，用来衡量检修对变压器寿命的改善作用。

1.1 变压器故障概率模型

威布尔分布是在可靠性理论中广泛应用的一种分布，经常用于表示变压器的故障概率模型^[16]。威布尔分布相关的可靠性方程为^[17]

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^{\beta}} \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中： $f(t)$ 为概率密度函数； β 为形状参数； η 为

尺度参数； $R(t)$ 为可靠度函数； $\lambda(t)$ 为故障概率函数。

本文假定变压器失效模型为威布尔分布，在没有检修情况下的故障概率函数表达式为

$$\lambda_0(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}, \quad \beta > 1 \quad (4)$$

式中，考虑随着运行年限的增加，故障概率上升，因此 $\beta > 1$ 。

1.2 预试检修对故障概率的影响

预试检修可以延缓变压器的劣化，降低设备的故障率。假设运行年限为 t 时，预试检修使故障概率降低 δ ，则检修后的故障概率可以表示为

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) - \delta \quad (5)$$

式中： $\lambda(t)$ 为检修后的故障概率； $\lambda_0(t)$ 为没有检修下的故障概率； δ 为检修程度。

预试检修可以在一定程度上降低故障概率，但是不能使设备恢复到最初投运的状态。假设一台变压器在服役期间共有 k 次检修，每次检修程度为 δ_i ，其故障率变化曲线如图1所示，经过 k 次检修后得到的故障率为

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) - \sum_{i=1}^k \delta_i \quad (6)$$

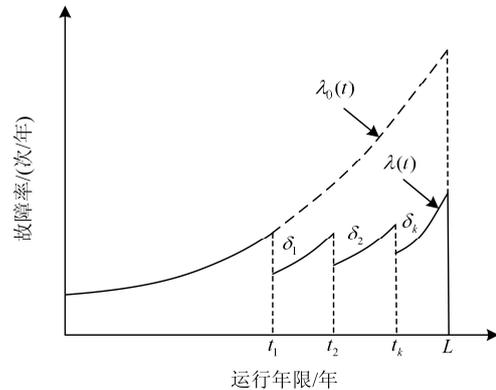


图1 检修对故障概率的影响

Fig. 1 Influence of maintenance to failure rate

1.3 LEI 模型

根据前面的定义，寿命效率指数等于有预试检修情况下的服役寿命与无预试检修下的服役寿命的比值，根据式(4)可得无预试检修情况下的服役寿命为

$$t_{\text{WithoutM}} = \eta \cdot \left(-\ln(R_{\text{required}})\right)^{1/\beta} \quad (7)$$

式中： t_{WithoutM} 为不检修的服役寿命； R_{required} 为变压器运行满足的最低可靠性要求。

由式(1)一式(3)和式(6)可得如下方程。

$$\frac{\beta}{\eta} \times \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} - R(t) = 0 \quad (8)$$

$$\lambda_0(t) - \sum_{i=1}^k \delta_i$$

解式(8)可得检修情况下的服役寿命为

$$t_{\text{WithM}} = \text{solve}\left(\frac{\beta/\eta \times (t_{\text{WithM}}/\eta)^{\beta-1} \times e^{-(t_{\text{WithM}}/\eta)^{\beta}}}{\lambda_0(t_{\text{WithM}}) - \sum_{i=1}^k \delta_i} - R_{\text{required}} = 0\right) \quad (9)$$

式中, t_{WithM} 为检修下的服役寿命。

由式(7)和式(9)得寿命效率指数为

$$LEI = \frac{t_{\text{WithM}}}{t_{\text{WithoutM}}} \quad (10)$$

2 变压器全寿命周期成本

全寿命周期成本是从变压器的长期经济效益出发, 全面考虑变压器的设计、规划、建设以及安装、运行、维修直至报废的全过程中所发生的成本, 主要包括运行成本、检修成本、中断成本和广义折旧成本^[3]。

2.1 全寿命周期成本模型

运行成本包括运维管理人员对于设备的日常巡视、多种方式检查和常规的日常工作维护操作等费用。随着变压器运行年限的增加, 其状态逐渐劣化, 年运行成本会逐年增长, 因此运行成本可以表示为^[1]

$$C_o = C_{\text{base}_o} \times \sum_{t=1}^L (1 + (t-1) \times \alpha) \quad (11)$$

式中: C_o 表示整个服役期间的所有运行费用; C_{base_o} 为每年的基础运行费用; t 为运行年限; L 为服役寿命; α 为运行费用增加系数, 随着运行年限的增加, 根据电力公司相关部门统计经验, 取 0.05。

检修成本等于设备预试检修与事后检修费用之和, 其中预试检修费用包括固定检修费用和可变检修费用。由实际运维经验可知, 固定检修费用随着检修时间的增加而增加, 可变检修费用随着检修程度的增加而增加。则检修成本可以表示为^[18]

$$C_M = C_{\text{PM}} + C_{\text{CM}} \quad (12)$$

$$C_{\text{PM}} = C_{\text{base_fixed}} \cdot (1 + t/160) + C_{\text{base_variable}} \cdot \delta_i \quad (13)$$

式中: C_M 表示总检修费用; C_{PM} 和 C_{CM} 分别表示预试检修费用和事后检修费用; $C_{\text{base_fixed}}$ 和 $C_{\text{base_variable}}$ 分别表示预试检修的固定检修费用和可变检修费用。

事后检修费用与变压器故障期望相关, 没有预

试检修下整个服役期间发生故障的期望为

$$n_0 = \int_0^L \lambda_0(t) dt = \left(\frac{L}{\eta}\right)^{\beta} \quad (14)$$

式中: n_0 为无预试检修情况下发生故障的期望; L 表示运行寿命。

则有预试检修下整个服役期间发生故障的期望为

$$n = n_0 - \sum_{i=1}^k \delta_i (L - t_i) = \left(\frac{L}{\eta}\right)^{\beta} - \sum_{i=1}^k \delta_i (L - t_i) \quad (15)$$

可得事后检修的费用为

$$C_{\text{CM}} = C_{\text{base_cm}} \times n \quad (16)$$

式中: $C_{\text{base_cm}}$ 表示单次事后检修费用; n 表示有预试检修情况下发生故障的期望; k 为预试检修次数。

中断成本由预试检修和事后检修导致的停电中断成本组成。变压器停运会影响供电可靠性, 造成企业和用户的损失。预试检修造成的停电为有计划的停电中断, 其中断成本主要为企业设备停运损失^[18]; 事后检修为随机发生且不可控, 其中断成本为企业和用户的损失之和^[9]。因此, 中断成本可以表示为

$$C_B = k \Delta P S_e \nu t_{\text{pm}} + n S_e \nu \Delta P_{t_{\text{cm}}} \quad (17)$$

式中: C_B 为整个服役期间的中断成本之和; ΔP 为购电差价; S_e 为变压器容量; ν 为变压器平均负荷率; t_{pm} 为每次预试检修小时数; $\Delta P_{t_{\text{cm}}}$ 表示事后检修时间为 t_{cm} 时单位负荷(kW)的缺电损失费用^[9]。

广义折旧成本指电力变压器从投运、报废至新电力变压器投运之前所有一次性投入在寿命周期内的费用^[3]。包括设备前期设计规划和购置组成的初始投资成本、旧设备折旧价值、新旧设备交接的旧设备处置、新设备安装等交接成本, 这部分的费用可以表达为^[3]

$$C_D = (C_i - C_{\text{dp}} + C_c) \cdot \frac{T_{\text{design}} - L}{T_{\text{design}}} \quad (18)$$

式中: C_D 为广义折旧成本; C_i 为初始投资成本, 包括购置费用和其他相关费用; C_{dp} 为旧设备折旧价值, 通常取设备购置费的 5%; C_c 为新旧设备交接成本; T_{design} 为新设备设计寿命。

综上所述, 变压器全寿命周期内的年均成本为

$$C_{\text{annual}} = (C_o + C_M + C_B + C_D) / L \quad (19)$$

式中各系数的取值在后文实例分析中会给出。

2.2 目标函数及约束条件

本文优化的目标是使年均成本最低, 因此目标

函数为

$$\min \{(C_o + C_M + C_B + C_D)/L\} \quad (20)$$

变压器实际运行需满足一定的可靠性和经济性，且实际预试检修程度需满足一定的客观规律。因此目标函数约束条件有可靠性约束、寿命效率指数约束和预试检修程度约束。

变压器进行预试检修后，其可靠性要满足以下条件。

$$R_{\text{equipment}} \geq R_{\text{required}} \quad (21)$$

式中： $R_{\text{equipment}}$ 为变压器的运行可靠性； R_{required} 为变压器安全运行所要求的最低可靠性，通常取 0.9。

在预试检修下设备的运行年限应该明显比没有预试检修下设备的运行年限长，因此还需满足如下条件。

$$LEI = \frac{t_{\text{WithM}}}{t_{\text{WithoutM}}} \geq LEI_{\text{required}} \quad (22)$$

式中： LEI 为寿命效率指数； LEI_{required} 为所要求的寿命效率指数。

通常情况下，随着运行役龄的增加，检修效果逐渐下降，文献[18]分析了预试检修程度随役龄变化的限制条件^[18]。

$$0 < \delta_i < (\lambda_{\text{real}}(t) - \lambda_{\text{base}}(t)) \left[1 - \left(\frac{t}{T_{\text{design}}} \right)^3 \right] \quad (23)$$

式中： $\lambda_{\text{real}}(t)$ 和 $\lambda_{\text{base}}(t)$ 分别为实际故障率曲线和理论故障率曲线，其参数详见文献[18]。

同时，预试检修也不能让设备的故障率恢复到前一次检修之前的故障率以下，还应满足如下条件。

$$0 < \delta_i < \lambda_0(t_i) - \lambda_0(t_{i-1}) \quad (24)$$

式中： $\lambda_0(t_i)$ 和 $\lambda_0(t_{i-1})$ 分别表示没有预试检修下第 i 年和第 $i-1$ 年的故障率。

3 基于杜鹃算法的全寿命周期成本优化

3.1 杜鹃算法概述

杜鹃优化算法(Cuckoo Optimization Algorithm, COA)，又叫布谷鸟算法，是由剑桥大学的 Xin-she Yang 和 Suash Deb 于 2009 年开发的元启发式算法。该算法由杜鹃种群自身所具有的寄生繁衍策略发展而来^[19]。COA 的搜索路径与普通算法的路径不同，该算法使用随机性较强的 Levy 飞行搜索方式，具有全局搜索特性，因此更能接近全局最优解。

杜鹃优化算法使用鸟巢表示解。最简单的情况为每巢只有一个蛋，杜鹃的蛋代表了一种新的解。其目标是使用新的和未知更好的解取代不那么好的

解。为了模拟杜鹃鸟寻巢的行为，COA 设置了 3 个规则，具体如下^[20]。

(1) 杜鹃每次只下一个蛋，代表解决问题的一种方案，并随机将蛋放入一个鸟巢中进行孵化。

(2) 在这些鸟巢中，其中一部分鸟巢放着优质蛋，即好的解决问题方案，这些鸟巢将被保留到下一代。

(3) 鸟巢的总体数量是一定的，设定一个鸟巢的主人发现蛋是外来蛋的概率为 P_a ($P_a \in [0,1]$)。

3.2 杜鹃算法优化变压器全寿命周期成本的步骤

(1) 获得变压器可靠性数据、全寿命周期中各类成本计算，确定 COA 算法迭代次数等参数。

(2) 给每个鸟巢赋初值，每一个鸟巢包括的参数有检修次数 k 、检修时间 t_i 、检修程度 δ_i 和服役寿命 L ，并计算每组鸟巢参数计算求得的年均成本，找到目前最好的鸟巢位置 $x_b^{(0)}$ 以及最低年均成本。

(3) 保留上一代最优鸟巢位置 $x_b^{(0)}$ ，并利用 Levy 飞行更新其他鸟巢的位置，得到一组新的鸟巢位置，并计算它们的年均成本。

(4) 根据年均成本，新鸟巢的位置与上一代鸟巢的位置进行比较，较好的鸟巢位置取代较差的鸟巢位置，得到一组新的鸟巢位置。

(5) 更新被发现是外来蛋的鸟巢，计算新鸟巢对应的年均成本，并且与已有的鸟巢进行比较，用较好的鸟巢位置代替较差的位置，得到一组最新的较优的鸟巢位置。

(6) 找出步骤(5)中最优的鸟巢位置，判断最低年均成本是否满足要求，如果满足要求，则停止搜索，输出最优参数和对应的年均成本，否则返回步骤(3)。

4 实例分析

本文以某 220 kV 电力变压器为例说明 COA 算法的寻优效果，通过与电力公司沟通和从有关文献^[9,18]和企业标准^[21]搜集到与经济寿命相关的资料。其中表 1 为厂家提供的理论故障概率分布函数参数，表 2 为变压器的全寿命周期成本参数^[9,18,21]，表 3 为约束条件参数。将表 1—表 3 的经济数据代入第 2 节全生命周期模型中，可得变压器的全生命周期年均成本。

表 1 故障概率分布参数

Table 1 Failure rate distribution parameters		
威布尔分布参数	形状系数 β	尺度系数 η
参数值	2	55.5

表 2 全寿命周期成本参数

Table 2 Lifetime cycle cost parameters

参数	数值	参数	数值
变压器容量 S_0 /MVA	240	初始投资成本 C_i /(万元/台)	500
购电电差价 ΔP / (元/kWh)	0.2	旧设备折旧价 C_{dp} /(万元/台)	20
平均负载率 ν / %	50	新旧设备交接成本 C_c /(万元/台)	12.8
基础运行费用 C_{base_o} /(万元/a)	5	平均设计寿命 T_{design} /a	50
平均预试检修的固定检修费 C_{base_fixed} / (万元/次)	20	平均预试检修时间 t_{pm} /(h/次)	120
平均预试检修的可变检修 $C_{base_variable}$ / (万元/次)	30	平均事后检修时间 t_{cm} /(h/次)	8
平均事后检修费用 C_{base_cm} /(万元/次)	200	事后单位功率检修费用 ΔP_{cm} / (元/kW)	424.11

表 3 目标函数约束条件

Table 3 Constraints for object function

约束条件	参数值
$R_{required}$	≥ 0.9
$LEI_{required}$	$\geq 200\%$

分别采用杜鹃算法、遗传算法和粒子群算法在约束条件下对变压器全寿命周期年均成本进行寻优, 各个算法的寻优过程如图 2 和图 3 所示, 寻优

得到 3 次检修对应的检修时间 t_i 、检修程度 δ_i 和 LEI 的结果如表 4 所示。

由图 2 和图 3 可知, 随着迭代次数的增加, 杜鹃算法收敛速度好于粒子群算法和遗传算法, 迭代 100 次时得到的年均成本最低。由表 4 可知, 杜鹃算法最终得到的结果更优, 同时满足年均成本更低和 LEI 值更高, 得到的结果更接近全局最优解。通过比较三者参数寻优结果可以发现, 当检修时间较晚、检修程度较高或者检修时间较早、检修程度较低的情况下, 得到的年均成本较低, 相应的经济运行年限越长。这是由于在满足限制条件下, 检修时间较晚, 变压器劣化严重, 需要较高的检修程度将变压器恢复至较好状态, 而检修时间较早, 变压器的劣化较少, 对应需要的检修程度较低, 此两种情况下对应的检修成本和中断成本更低。

为了研究故障概率分布函数参数对结果的影响, 假定不同生产批次的变压器故障概率分布函数形状参数不变, 尺度参数发生变化, 改变尺度参数, 年均成本和 LEI 变化情况如表 5 所示。

由表 5 可知, 随着尺度参数的增加, 需要的预试检修次数减少, 寿命效率指数先增后降, 全寿命年均成本降低。这是因为随着尺度参数的增加, 故障概率随着运行年限增长速度下降, 需要的检修次数和由于故障带来的检修费用和中断费用减小, 因此年均费用减少, LEI 在开始由于故障概率的下降而上升, 后面由于检修次数的下降而下降。

表 4 全寿命周期年均成本优化结果

Table 4 Annual life cycle cost optimization results

算法	时间 t/a	检修程度 δ	时间 t/a	检修程度 δ	时间 t/a	检修程度 δ	LEI	运行年限 L/a	年均成本/元
COA	13.989 9	0.004 1	23.948 0	0.006 4	33.967 3	0.006 5	2.45	43.999 9	704 635
PSO	12.151 1	0.003 0	18.832 2	0.004 3	27.778 4	0.005 8	2.27	38.989 2	713 940
GA	13.081 3	0.003 5	19.284 5	0.004 0	30.457 9	0.003 5	2.16	38.142 2	761 690

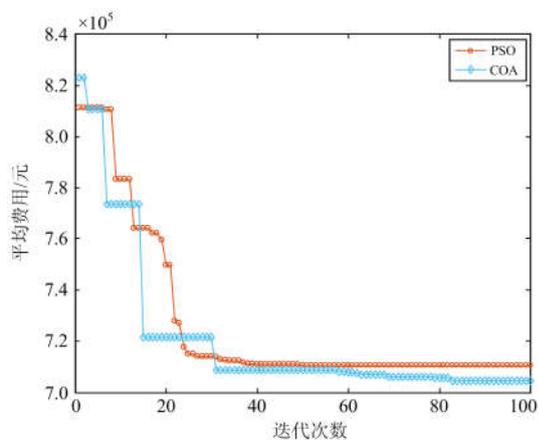


图 2 COA 和 PSO 算法寻优图

Fig. 2 Optimizing figure of COA and PSO

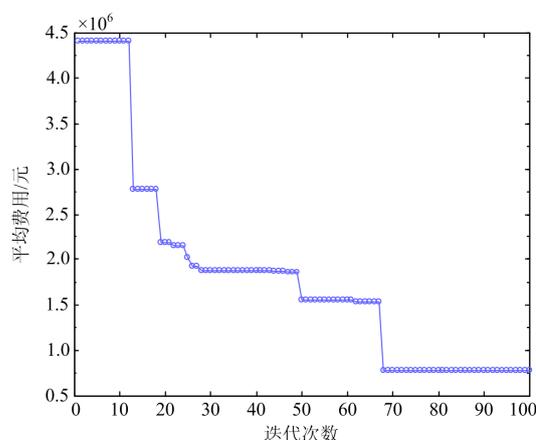


图 3 GA 算法寻优图

Fig. 3 Optimizing figure of GA

表 5 尺度参数对年均成本和 LEI 的影响

η	45.5	50.5	55.5	60.5	65.5
k	3	3	3	2	2
LEI	2.15	2.18	2.45	2.24	2.30
C_{annual}	954 347	813 878	698 390	551 414	471 319

5 结论

本文提出了寿命效率指数来定量衡量检修对变压器服役寿命的影响,建立了变压器全寿命周期年均成本模型。将杜鹃搜索算法用于优化运维策略的检修时间、检修程度和服役寿命参数,并与遗传算法和粒子群算法进行比较,实例表明,杜鹃算法较遗传算法和粒子群得到的年均成本更低,寿命效率指数更高。本文得出的结果将有助于电力部门优化运维策略,实现提高变压器服役寿命的同时减小成本。

考虑到变压器在实际运行过程中,故障概率曲线不会按照假定的曲线变化,会受到运行工况、外界环境等因素的影响。因此,下一步将综合以上因素建立在役变压器的故障概率预测模型,并将故障概率预测模型融合到变压器全生命周期成本优化中,这些工作将作为后续研究的重点。

参考文献

- [1] 陈杏, 宋依群, 杨镜非. 基于状态联动的在役设备最佳运行寿命评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 67-73.
CHEN Xing, SONG Yiqun, YANG Jingfei. Optimal service life evaluation model for in-service equipment based on state linkage[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 67-73.
- [2] 熊小伏, 匡仲琴, 朱继忠, 等. 基于两级变压模式的配电电压选择方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 12-19.
XIONG Xiaofu, KUANG Zhongqin, ZHU Jizhong, et al. Distribution voltage selection method based on two-stage transformation mode[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 12-19.
- [3] 孟繁津. 基于健康状态的电力变压器可靠性和经济性寿命评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [4] 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-EPSCA, 2010, 22(3): 86-90.
- [5] 杨丽徙, 蔡红飞, 陈新献. 电力变压器剩余技术寿命的综合评估[J]. 变压器, 2013, 50(4): 43-46.
YANG Lixi, CAI Hongfei, CHEN Xinxian. Comprehensive assessment of remain life time of power transformer[J]. Transformer, 2013, 50(4): 43-46.
- [6] 黄俊辉, 汪惟源, 王海潜, 等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 37-43.
HUANG Junhui, WANG Weiyuan, WANG Haiqian, et al. Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 37-43.
- [7] 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.
- [8] STRAZZA C, BORGHI A D, COSTAMAGNA P, et al. Life cycle assessment and life cycle costing of a SOFC system for distributed power generation[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 100: 64-77.
- [9] 王慧芳, 赵婉芳, 杜振东, 等. 基于寿命数据的电力变压器经济寿命预测[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 810-816.
WANG Huifang, ZHAO Wanfang, DU Zhendong, et al. Economic life prediction of power transformers based on the lifetime data[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 810-816.
- [10] 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(LCC)模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 69-73.
CUI Xinqi, YIN Laibin, FAN Chunju, et al. Study of LCC for power transformer in modification of transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 69-73.
- [11] 梁刚, 李盛伟, 郭铁军, 等. 基于全寿命周期等年值成本的变压器更换辅助决策方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(6): 130-134.
LIANG Gang, LI Shengwei, GUO Tiejun, et al. Assistant decision-making method for transformer-replacement based on equivalent annual cost in life cycle[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2017, 29(6): 130-134.
- [12] 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 Xiaochu, LI Le, WEI Zhilian, et al. Applications of life cycle cost theory in decision-making of investment for distribution transformers renovation[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 207-211.
- [13] 马仲能, 钟立华, 卢镡, 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] HINOW M, MEVISSSEN M. Substation maintenance strategy adaptation for life-cycle cost reduction using genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 26(1): 197-204.
- [16] 张翔, 宋子彤, 杨致慧, 等. 一种基于负载率和设备检测信息的油浸式变压器故障率模型[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1159-1165.
- ZHANG Xiang, SONG Zitong, YANG Zhihui, et al. A failure model for oil-immersed transformer based on load factor and equipment inspection information[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1159-1165.
- [17] 孙有朝, 张永进, 李龙彪. 可靠性原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [18] 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 Youwei, MA Lin, WU Liyuan, et al. Economic life model of power transformer and its application[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 235-240.
- [19] 陈明, 张靠社. 基于改进布谷鸟算法的风光储联合供电系统储能容量优化配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 141-146.
- CHEN Ming, ZHANG Kaoshe. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in wind-PV-storage power generation system based on improved cuckoo search algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(8): 141-146.
- [20] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.
- XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.
- [21] 国家电网公司. 国家电网公司电网检修运维和运营成本标准[S]. 2009.

收稿日期: 2018-04-26; 修回日期: 2018-06-20

作者简介:

郑 重(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、设备资产管理; E-mail: zhong.zheng@ncepu.edu.cn

周 圆(1993—), 男, 硕士, 研究方向为电气设备状态评价与资产管理; E-mail: zy199304070570@163.com

王 琪(1994—), 女, 硕士, 研究方向为电气设备在线监测与状态评价. E-mail: qiawangmail@sina.cn

(编辑 许 威)