

引用格式:马壮,淡淑恒.考虑故障风险与不确定性的海上风电主变压器检修策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):214-222.

Citation: MA Zhuang, DAN Shuheng. Maintenance strategy of offshore wind power main transformer considering fault risk and uncertainty[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 214-222.

考虑故障风险与不确定性的海上风电 主变压器检修策略

马 壮, 淡淑恒

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘 要:为提高海上风电主变压器检修策略优化的科学性,在保证可靠运行的前提下,提出一种考虑故障风险与不确定性的海上风电主变压器检修策略优选方法。首先,详细分析故障风险成本模型,据此建立海上风电主变压器全生命周期成本(life cycle cost, LCC)模型,并引入盲数理论将 LCC 中不确定性参数用数学模型定量进行计算,提高成本估算精度。然后,从成本管理角度出发,分析维修方案对 LCC 的影响,进而建立以 LCC 最低为目标的海上风电主变压器检修策略优化模型,并通过改进的布谷鸟搜索算法进行求解。最后,经算例验证,所提模型和检修策略优选方法具有较强的可操作性,能为海上风电主变压器的可靠运行提供一定的参考价值。

关 键 词:海上风电主变压器;故障风险;LCC;盲数理论;改进的布谷鸟搜索算法;检修策略

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.024 **中图分类号:** TM407 **文章编号:** 1673-9140(2024)02-0214-09

Maintenance strategy of offshore wind power main transformer considering fault risk and uncertainty

MA Zhuang, DAN Shuheng

(College of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to improve the maintenance strategy of transformers in offshore wind power system, under the premise of ensuring reliable operation, an optimal selection method for the maintenance strategy of transformers in offshore wind power system is proposed, considering fault risks and uncertainties. Firstly, the fault risk cost model is analyzed in detail, based on which a life cycle cost (LCC) model for transformers in offshore wind power system is established. And the blind number theory is introduced to quantitatively calculate the uncertain parameters in LCC using mathematical models, thereby improving the accuracy of cost estimation. Then, from the perspective of cost management, the impact of maintenance plans on LCC is analyzed, and an optimization model for the maintenance strategy of transformers with the lowest LCC as the goal is established, which is solved by an improved Cuckoo algorithm. Finally, the example verifies that the proposed model and the optimal maintenance strategy method have strong operability, which can provide a certain reference value for the reliable operation of transformers in offshore wind power system.

Key words: main transformer of offshore wind power; failure risk; life cycle cost (LCC); blind number theory; improved Cuckoo algorithm; maintenance strategy

在碳中和碳达峰目标引导下,海上风电产业已成为各沿海地区风电发展所关注的重点对象^[1]。与

陆地风电场相比,海上风电场具有占地小、零排放、风资源充足等优势^[2]。随着海洋环境劣化及风电建

收稿日期:2022-10-16;修回日期:2023-04-27

基金项目:国家自然科学基金(50577040)

通信作者:淡淑恒(1969—),女,博士,教授,主要从事电气设备制造及电气设备与系统的相互影响等研究;E-mail:aa3047232201@163.com

设规模扩大,海上风电检修维护操作面临着前所未有的挑战,主要表现为设备故障率高、运行稳定性差及检修维护费用贵等问题。海上风电主变压器在风电场中作为能量转换和传输的重要设备,其检修方式对主变压器及所在区域电力系统整体运行的安全性有很大的影响^[3-4]。如果能在故障发展初期及时合理地进行运维,则可防止事故扩展^[5]。在人工智能技术高速发展的背景下,数据的处理变得更加便捷,同时可用各种智能算法对检修方案进行寻优。

目前,已有诸多学者对电力设备运维检修决策问题进行了大量的研究。文献[6]提出了一种融合数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统数据图形化和循环生成对抗网络的故障预警数据分析方法,实现了风电机组故障提前预测及准确识别;文献[7-8]基于变压器的运行状态,提出了变压器的运行风险评估理论体系;文献[9]提出了一种基于点对称变换(symmetrized dot pattern, SDP)与图像匹配的变压器机械故障状态的诊断方法,提高了多特征量条件下的诊断准确率。这些研究根据可靠性从不同侧面给出了维护检修决策方法,有效地推动了海上风电主变压器的检修策略研究。同时,变压器作为主要的一次设备,在电力企业资产中占有很大的比重,对变压器的检修策略需要综合考虑其经济性,在满足电力系统安全、健康运行的前提下,制定合理的检修策略、降低变压器全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)具有很强的工程实用价值。

实际上,关于变压器的经济运行也已有相关的研究。文献[10]提出了一种成本—收益评估方法,该方法综合考虑了重载负荷、外部供电可靠性和故障率等因素对变压器经济寿命的影响,但忽视了大、小修情况;文献[11-12]从成本管理角度出发,提出了一种以电力设备LCC的年平均值最小为目标的检修策略优化方法,但未涉及变压器的故障风险成本、例行检查成本等因素;文献[13]通过引入随机模糊理论解决了LCC模型中存在的模糊问题,但在同一指标层级的指标个数较多时,会出现超模糊现象,造成评估失败。

针对上述方法的不完善及缺乏对海洋环境的考虑,在充分考虑资金时间价值的基础上,本文提出一种考虑故障风险与不确定性的海上风电主变压器检修策略。首先,分析海上风电主变压器的故障风险,同时将负载率严重度的动态监测和故障率

随等效役龄的动态映射相结合,对传统的故障成本模型进行改进,据此建立考虑故障风险的海上风电主变压器LCC模型,并引入盲数理论将LCC中各种随机模糊双重不确定性参数用数学模型定量进行计算,提高成本估算精度。然后,从成本管理角度出发,分析维修方案对LCC的影响,建立以LCC最低为目标的海上风电主变压器检修策略优化模型。通过将逐维反向学习策略和缩放因子的动态适应引入到布谷鸟搜索(Cuckoo search, CS)算法的进化机制中,再与算法的原始搜索策略结合实现算法的改进,并用改进的CS算法对模型进行迭代求解。最后,通过一次工程实际面临的海上风电主变压器检修策略的实例,计算在不同检修策略下LCC的变化趋势,对比分析6种不同检修方案经济性的优劣。本文方法可有效避免电力变压器检修过程中不确定性和盲目性因素对检修策略的影响,具有一定的工程实用价值。

1 主变压器LCC模型及不确定性分析

1.1 盲数理论

盲数是处理同时具有多种不确定性信息的重要数学工具^[14],设 $M(I)$ 为区间型有理灰数集,若存在 $\sigma_i \in [0, 1] (i = 1, 2, \dots, k)$,且有

$$f(x) = \begin{cases} \sigma_i, & x = x_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f(x)$ 为定义在 $M(I)$ 上的灰函数,当 $i \neq j (j = 1, 2, \dots, k)$ 时, $x_i \neq x_j, \sum_{i=1}^k \sigma_i = \sigma \leq 1$,则称函数 $f(x)$ 为 k 阶盲数, σ_i 为 $f(x)$ 在 x_i 的可信度, σ 为盲数的总可信度。

假设 x_i, x_{i+1} 均为实数,且 $x_i \leq x_{i+1}$,称 $(x_i + x_{i+1})/2$ 为有理灰数 $[x_i, x_{i+1}]$ 的心,定义:

$$\Theta(x_i, x_{i+1}) = \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \quad (2)$$

盲数 $f(x)$ 的均值为

$$Ef(x) = \begin{cases} \sigma, & x = \sum_{i=1}^k \sigma_i \Theta(x_i, x_{i+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 故障风险成本

随着经济的发展,金融的实际价值在2个不同的时刻是有区别的,所以必须把金融的时间价值考虑在内,将海上风电主变压器全寿命周期内每一年的现金流量按折现率换算成现值后进行累加。

故障风险成本是指主变压器从投入运行到回收处理期间因故障造成的停电损失成本。主变压器的故障风险主要体现为故障率和负载率的升高对其可靠运行产生的影响,因此,为了更加精确评估主变压器的故障风险,有必要建立综合考虑主变压器额定容量、故障率和负载率严重度的故障风险成本模型^[15-17]。主变压器寿命周期内故障风险成本的估算模型为

$$C_{sr} = \sum_{i=1}^n C_{or,i} (1+b)^{-i} \quad (4)$$

$$C_{or,i} = Q\lambda_i S_N \sum_{t=1}^T V_{i,t} \quad (5)$$

式(4)、(5)中, $C_{or,i}$ 为第*i*年主变压器的故障风险成本,元; b 为折现率; Q 为主变压器的风险成本,元/(kV·A),由于其受故障类型、负荷种类以及停电时间等多种因素的影响,具有随机模糊双重不确定性,是一种较为典型的盲信息; λ_i 为第*i*年主变压器的故障率; S_N 为额定容量,MV·A; T 为年平均运行时间,h; $V_{i,t}$ 为第*i*年*t*时段的负载率严重度。

为实现负载率严重度的动态监测,将海上风电主变压器的负载程度用III级严重度函数进行描述。海上风电主变压器负载率严重度模型与负载率模型可表示为

$$V_{i,t} = \begin{cases} 0, & \mu_{i,t} \leq \mu_1 \\ \frac{v_2 - v_1}{\mu_2 - \mu_1}, & \mu_1 < \mu_{i,t} \leq \mu_2 \\ \frac{v_3 - v_2}{\mu_3 - \mu_2}, & \mu_2 < \mu_{i,t} \leq \mu_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{i,t} = \frac{P_{i,t}}{S_N} \quad (7)$$

式(6)、(7)中, $\mu_{i,t}$ 为第*i*年*t*时段主变压器的负载率; $P_{i,t}$ 为第*i*年*t*时段主变压器所带的负荷;参数 v_l 和 μ_l ($l=1,2,3$)分别表示主变压器的风险指数和负载率,由调度人员根据大量现场实际运行情况进行归纳总结得出,本文将参数 $v_1, v_2, v_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3$ 分别设置为0.000、0.001、0.005、0.75、0.85、1.00。

海上风电主变压器风险指数 v 和负载率 μ 的关系如图1所示。由图1和式(6)可知,海上风电主变压器的风险指数与负载率呈正相关,且I、II、III级函数的斜率分别对应于海上风电主变压器负载率严重度。

定义 μ_1 为风险分界点,当负载率低于 μ_1 时,海上风电主变压器运行风险较低,表现为负载率严重

度为0;当负载率高于 μ_1 时,则表明该海上风电主变压器处于重载状态,运行故障风险较大,若主变压器发生故障,将严重影响该风电场的正常运转,造成不可估量的损失。

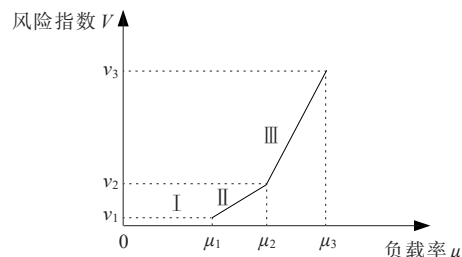


图1 风险指数与负载率关系

Figure 1 Relationship between risk index and load ratio

1.3 LCC理论

海上风电主变压器的全寿命周期是指,考虑其规划、设计、开发、生产以及设备运行、维修保养、事故损失、一直到回收处理的全部过程^[18]。本文构建的海上风电主变压器LCC如图2所示。

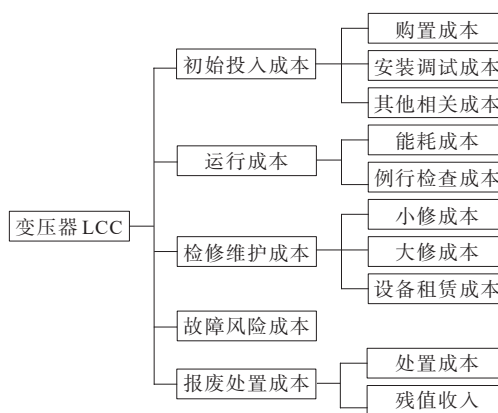


图2 变压器LCC组成框架

Figure 2 Composition of LCC on transformer

1.3.1 初始投入成本

初始投入成本为主变压器投入使用前所产生的全部成本,且属于金融时间价值中的现值,故初始投入成本的估算模型为

$$C_{in} = C_p + C_1 + C_0 \quad (8)$$

式中, C_p 为购置成本,万元; C_1 为安装调试成本,万元; C_0 为其他相关成本,万元,由于相关资料不完整使得其较难统计,具有模糊不确定性。

1.3.2 运行成本

运行成本指主变压器在全寿命周期内正常运行所发生的全部费用,主要包括能耗和例行检查成本。主变压器的能耗成本主要是由铁耗和铜耗所引起,包括空载损耗和负载损耗成本。对于无人值

守的海上升压站主变压器,每年的例行检查是一种不需要电力设备退出运行的常规监测及维护等措施。主变压器全寿命周期内运行成本的计算过程如下:

$$C_{yx} = \sum_{i=1}^L (C_{nh,i} + C_{lj,i}) (1+b)^{-i} \quad (9)$$

$$C_{nh,i} = aT(P_0 + \mu_i^2 P_k) \quad (10)$$

$$\mu_i = \frac{\sum_{j=1}^T (u_{i,j}/T)}{\quad} \quad (11)$$

式(9)~(11)中, $C_{nh,i}$ 为主变压器第*i*年的能耗成本,万元; $C_{lj,i}$ 为主变压器第*i*年的例行检查成本,万元,由于海上风电场建设、运行经验不足,具有随机模型性; L 为主变压器的设计寿命; a 为售电电价,元/(kW·h),由于受需求侧负荷水平的影响,具有模糊不确定性; μ_i 为第*i*年的平均负载率; P_0 为空载损耗,kW; P_k 为负载损耗,kW。

1.3.3 检修维护成本

检修维护成本指寿命周期内为维护主变压器保持或恢复到正常运行状态所发生的费用,包含小修、大修及设备租赁成本。其中,小修主要对设备部分元件进行检查、修复以及更换等操作,在寿命周期内每年都要对海上风电主变压器进行一次小修,单次小修费用为购置费的2.5%。大修主要是将设备完全或者大部分拆解,修理或更换其中失效的零件,在寿命周期内通常对海上风电主变压器进行1~3次大修,单次大修费用约为购置费的6%。另外,尽量在风速平缓的时段对海上风电主变压器进行检修维护,从而避免发电量的大量浪费。

海上变电站平台钢结构复杂及建设成本高,若将其拆解后把主变压器送至陆地进行检修维护,会造成人力、物力资源的大量浪费。因此,应在海上风电平台对主变压器进行现场检修,且需要租赁辅助船舶。主变压器全寿命周期内检修维护成本的估算模型为

$$C_{om} = \sum_{i=1}^L C_x (1+b)^{-i} + \sum_{i=T_d}^L (C_D + C_Z) (1+b)^{-i} \quad (12)$$

式中, C_x 为小修成本,万元; C_D 为大修成本,万元; C_Z 为设备租赁成本,万元,由于受盐雾、台风、海浪及往返行程等因素影响,具有一定的随机性和模糊性; T_d 为大修所在的年份。

1.3.4 报废处置成本

报废处置成本为主变压器退役时所产生的全

部成本,包括处置成本和残值收入。报废处置成本的估算模型为

$$C_{re} = (C_R - C_Y)(1+b)^{-L} \quad (13)$$

式中, C_R 为处置成本,万元,可达安装调试成本的32%; C_Y 为残值收入,万元,约为购置成本的5%。

2 主变压器检修策略优化生成方法

2.1 具有指数衰减的役龄模型

当前,较多学者主要使用固定的改善因子对设备的役龄进行描述,据此建立传统役龄模型对设备的运维工作展开研究。但在电力设备的实际运行过程中,随着健康状况的劣化和检修次数的递增,检修对电力设备役龄回退的效果逐渐变差,体现出一种修理疲劳现象,即相邻2次检修之间的役龄回退增量呈递减趋势。定义改善因子为 α ,表示设备检修后的实际役龄回退程度。 α 越小,表示检修对役龄的影响越小,设备的役龄回退越少; α 越大,表示检修对役龄的影响越大。定义 s_a 为设备的等效役龄, t_n 为实际役龄,可表示为

$$\begin{cases} s_a = t_n - \Delta t_i \\ \Delta t_i = \alpha_i t_i \end{cases} \quad (14)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$; $t_n, s_a \in [0, +\infty)$; t_i 为第*i*次检修时间; α_i 为第*i*次检修的改善因子; Δt_i 为第*i*次检修后的役龄回退量。

相邻2次检修之间的役龄回退增量为

$$\epsilon_{i(i-1)} = \Delta t_i - \Delta t_{i-1} = \alpha_i t_i - \alpha_{i-1} t_{i-1} \quad (15)$$

假设 α 为固定值,则有

$$\epsilon_{i(i-1)} = \alpha(t_i - t_{i-1}) = \alpha t_{i(i-1)} \quad (16)$$

式中, $t_{i(i-1)}$ 为相邻2次检修之间的时间间隔。

由式(16)可得,当 $\alpha, t_{i(i-1)}$ 不变时, $\epsilon_{i(i-1)}$ 也是不变的,而实际运行情况中役龄回退增量逐渐变小。为此,本文在文献[19]的基础上,提出呈指数衰减的海上风电主变压器役龄回退模型,从而解决传统役龄回退模型的不足,即

$$\alpha_i = \alpha e^{-\gamma(i-1)} \quad (17)$$

式中, γ 为衰减因子, $0 < \gamma < 1$;本文中小修时的衰减因子取0.07,大修时的衰减因子取0.10。

假设分别在 t_{d1}, t_{d2} 和 t_{d3} 时对海上风电主变压器进行大修,并将传统模型和指数定量衰减模型的役龄回退量和等效役龄进行比较,如图3、4所示。在指数定量衰减模型中,随着维修次数的增加,役龄回退量逐步减小,这更加符合工程实际情况。

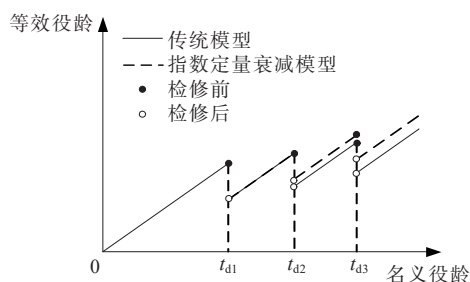


图3 维修对变压器等效役龄的影响

Figure 3 Effect of maintenance on equivalent service life of transformer

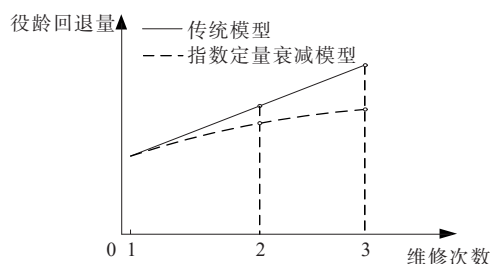


图4 维修对变压器役龄回退量的影响

Figure 4 Effect of maintenance on rollback of transformer in service

2.2 维修方案对LCC影响分析

在维护过程中,按照维修内容、工作量以及范围进行操作,设备的维护方式主要包括小修、大修以及更换等类型^[20]。本文假设主变压器在维护之后依旧符合初始的老化曲线。

1) 小修方式。

小修导致的役龄回退公式^[21]为

$$\Delta t_j = \begin{cases} \alpha_{j,x} t_j, & j=1 \\ \alpha_{j,x} \left(t_j - \sum_{n=1}^{j-1} \Delta t_n \right), & 1 < j \leq X \end{cases} \quad (18)$$

式中, j 为小修次数; Δt_j 为第 j 次小修产生的役龄回退时间; $\alpha_{j,x}$ 为第 j 次小修时的改善因子; t_j 为第 j 次小修时海上风电主变压器的实际役龄; X 为海上风电主变压器总小修次数。

2) 大修方式。

大修导致的役龄回退公式^[21]为

$$\Delta t_k = \begin{cases} \alpha_{k,d} t_{dk}, & k=1 \\ \alpha_{k,d} \left(t_{dk} - \sum_{n=1}^{k-1} \Delta t_n \right), & 1 < k \leq D \end{cases} \quad (19)$$

式中, k 为大修次数; Δt_k 为第 k 次大修产生的役龄回退时间; $\alpha_{k,d}$ 为第 k 次大修时的改善因子; t_{dk} 为第 k 次大修时海上风电主变压器的实际役龄; D 为海上风电主变压器总大修次数。

本文主要对海上风电主变压器采用小修和大

修的维修方式,并考虑不同大修次数对主变压器LCC的影响,据此确定最优维修方式的组合。以主变压器进行2次大修为例,假设主变压器每年进行1次小修, t_{d1} 、 t_{d2} 分别表示2次大修时主变压器实际运行时间。按照当前检修水平,第1次小修时的改善因子 $\alpha_{1,x}=0.5$,第1次大修时的改善因子 $\alpha_{1,d}=0.8$,同时将改善因子的衰退现象考虑在内, m 表示主变压器在第1次大修前所进行的小修次数, n 表示主变压器在2次大修间隔内所进行的小修次数, p 表示主变压器在退役前所进行的小修次数,则当主变压器运行到 t_n 时,其对应时间段内小修役龄回退量分别为 Δt_{vm} 、 Δt_{vm} 、 Δt_{vp} 。

综上,可推导出经小修和2次大修后海上风电主变压器等效役龄表达式为

$$s_a = \begin{cases} x_1, & t_n \leq t_{d1} \\ x_2, & t_{d1} < t_n \leq t_{d2} \\ x_3, & t_n > t_{d2} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} x_1 = t_n - \Delta t_{vm} \\ x_2 = t_n - \alpha_{1,d} t_{d1} - \Delta t_{vm} \\ x_3 = t_n + (\alpha_{1,d} \alpha_{2,d} - \alpha_{1,d}) t_{d1} - \alpha_{2,d} t_{d2} - \Delta t_{vp} \end{cases} \quad (21)$$

为了充分考虑海上风电主变压器的可靠性,选取故障率作为相应指标^[22],主变压器的故障率 λ 可表示为

$$\lambda(s_a) = 0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05s_a} - 1) \quad (22)$$

将式(20)、(22)代入式(5),则年故障风险成本可表示为

$$C_{or,i} = Q \lambda_i S_N \sum_{t=1}^T V_{i,t} = \begin{cases} \left(\frac{0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05x_1} - 1)}{e^{0.05x_1} - 1} \right) Q S_N \sum_{t=1}^T V_{i,t}, & t_n \leq t_{d1} \\ \left(\frac{0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05x_2} - 1)}{e^{0.05x_2} - 1} \right) Q S_N \sum_{t=1}^T V_{i,t}, & t_{d1} < t_n \leq t_{d2} \\ \left(\frac{0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05x_3} - 1)}{e^{0.05x_3} - 1} \right) Q S_N \sum_{t=1}^T V_{i,t}, & t_n > t_{d2} \end{cases} \quad (23)$$

故2次大修情况下的海上风电主变压器检修决策LCC模型为

$$\begin{cases} \min C_{LCC} = C_{in} + C_{yx} + C_{sr} + C_{om} + C_{re} \\ \text{s.t. } \lambda(s_a) < \lambda_0 \end{cases} \quad (24)$$

式中, λ_0 为故障率阈值,通常取为0.01。

2.3 LCC模型求解

2.3.1 原始的布谷鸟搜索算法

CS算法是在2009年提出的一种全局搜索算

法,其模拟了自然界中布谷鸟将蛋寄生到宿主鸟巢穴中这一现象,并将巢穴的位置映射为优化问题中的解,以巢穴位置的优劣作为算法的贴合度值。然而,原始的CS算法存在收敛速度慢和维间干扰等问题,故有必要对CS算法进行改进并应用于高维度优化问题的求解。

针对CS算法的不足,引入逐维反向学习策略和缩放因子的动态适应,再与原始的搜索策略融合实现算法的改进,并应用于高维度优化问题的求解。通过对CS算法进行改进,增强了其种群的多样性,使收敛性能和全局寻优能力得到提高。

2.3.2 改进的CS算法

本文将逐维反向学习策略和缩放因子的动态适应引入到CS算法的进化机制中,再与算法的原始搜索策略结合,提出基于逐维反向学习的动态适应CS算法,改进后的CS算法流程如图5所示。

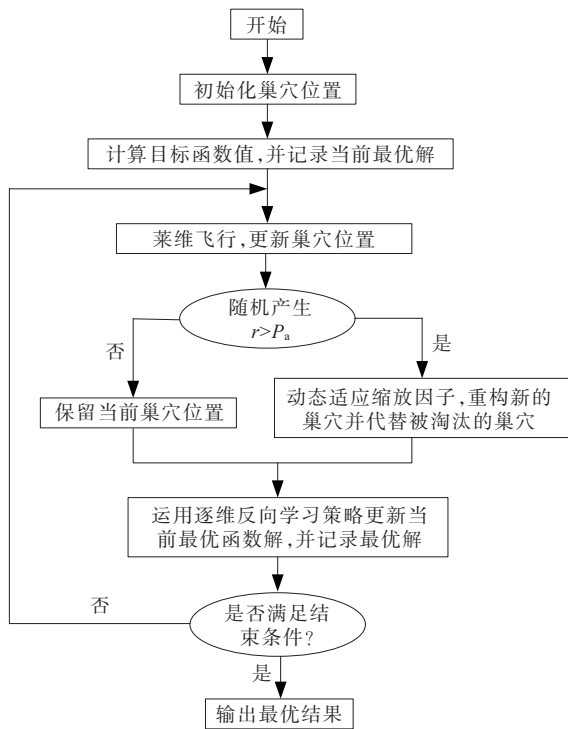


图5 改进的CS算法流程

Figure 5 Flowchart of improved cuckoo search algorithm

本文通过如下方法对CS算法进行改进。

1) 缩放因子的动态适应。

在CS算法寻优的迭代过程中,缩放因子 r 始终是(0,1)上均匀分布的随机数,巢穴更新后用 r 与蛋被发现概率 P_a 作比较,若 $r \geq P_a$,则丢弃较差的巢穴位置,并重新构造新的巢穴位置;反之,保留当前位置。由应用实际结果表明,在搜索前期 r 应尽量偏大,可以避免陷入局部最优;在搜索后期, r 应尽

量偏小,可以增强算法在最优解附近的局部搜索能力^[23]。因此,引入 r 的动态适应策略的位置更新公式为

$$\begin{cases} x_i^{(t+1)} = x_i^t + r(x_j^t - x_k^t) \\ r = 1/t_c \end{cases} \quad (25)$$

式中, t_c 为当前迭代次数; $x_i^{(t+1)}$ 为更新后的巢穴位置; x_i^t 为当前巢穴位置; x_j^t 和 x_k^t 为 t 代中的2个随机解。

2) 逐维反向学习策略。

反向学习策略于2005年提出,它是启发式优化算法领域中的一种新技术,其基本原理:在当前解的基础上,根据上下界约束去计算反向学习的解,即巢穴的每一维坐标可同时搜索2个相互对称的区域,并对其进行评估^[24]。

在逐维反向学习策略中,定义种群规模为 N ,维度为 D ,迭代过程选择更新位置时的位置矩阵为 $\rho_{N \times Di}^{nest}$ 。每个维度的上限为 $D_{N \times Di}^{up}$,下限为 $D_{N \times Di}^{low}$,则解中每维的位置矩阵为

$$\rho_{N \times Di}^{nest} = D_{N \times Di}^{up} + D_{N \times Di}^{low} - \rho_{N \times Di}^{nest} \quad (26)$$

3 算例分析

本文以某海上风电场一台220 kV主变的最优大修时间进行计算分析,具体的主变压器基本数据如表1所示^[25]。同时,根据统计数据,主变压器在一年中有5%的时间处于空载状态,30%的时间处于20%满载条件下,35%的时间处于40%满载条件下,20%的时间处于60%满载条件下,10%的时间处于80%满载条件下。

表1 150 MV·A主变压器参数

Table 1 Parameters of 150 MV·A main transformer

额定容量/ (MV·A)	购置成本/ 万元	安装调试 成本/万元	折现率
150	736	132.4	0.08
年平均运行 时间/h	设计寿命/ a	空载损耗/ kW	负载损耗/ kW
8 760	30	68	405

3.1 LCC模型参数确定

邀请业内工程师对LCC模型中的多重不确定性参数进行定性评估。以其他相关成本为例,描述各不确定性参数盲数表达式的计算方法。由于其他相关成本属于受影响较大的支出,因此,需要多位专家通过经验及专业术语进行定性预估,可用三

阶盲数来表示。具体结果如下：

1) 专家A估计该变压器的其他相关成本为(30~40)万元,估计有60%的信心；

2) 专家B估计该变压器的其他相关成本为(40~50)万元,估计有80%的信心；

3) 专家C估计该变压器的其他相关成本为(50~60)万元,估计有70%的信心。

首先,综合考虑3位专家在该领域的学术威望和职称等,在各不确定性参数评估过程中,得出3位专家所占权重分别为0.35、0.45、0.20;然后,考虑各专家的评估信心度,即专家A、B、C的综合可信度可分别表示为

$$\delta_A = \frac{60\% \times 0.35}{70\% + 80\% + 60\%} \Big/ \left(\frac{60\% \times 0.35}{70\% + 80\% + 60\%} + \frac{80\% \times 0.45}{70\% + 80\% + 60\%} + \frac{70\% \times 0.20}{70\% + 80\% + 60\%} \right) = 0.296$$

$$\delta_B = \frac{80\% \times 0.45}{70\% + 80\% + 60\%} \Big/ \left(\frac{60\% \times 0.35}{70\% + 80\% + 60\%} + \frac{80\% \times 0.45}{70\% + 80\% + 60\%} + \frac{70\% \times 0.20}{70\% + 80\% + 60\%} \right) = 0.507$$

$$\delta_C = \frac{70\% \times 0.20}{70\% + 80\% + 60\%} \Big/ \left(\frac{60\% \times 0.35}{70\% + 80\% + 60\%} + \frac{80\% \times 0.45}{70\% + 80\% + 60\%} + \frac{70\% \times 0.20}{70\% + 80\% + 60\%} \right) = 0.197$$

由此即可得到其他相关成本的盲数表达式为

$$C_o = \begin{cases} 0.296, [30, 40] \\ 0.507, [40, 50] \\ 0.197, [50, 60] \end{cases}$$

将C_o代入式(3),可得盲数的均值为

$$C_o = \begin{cases} 1, x = 44.01 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

由以上计算结果可知,C_o为(30~40)、(40~50)、(50~60)万元的可信度分别为0.296、0.507、0.197。C_o的盲数均值为44.01万元。同理,可以得到其他不确定参数的可能值区间以及其相对应的综合可信度,具体的参数调研范围及阶数如表2所示。

表2 参数统计及调研范围

Table 2 Parameter statistics and survey scope

需要确定的不确定性参数	范围/阶数
风险成本(元/(kV·A))	[150,300]/三阶
其他相关成本(万元)	[30,60]/三阶
单位电量售电电价(元/(kW·h))	[0.45,0.60]/三阶
例行检查成本(万元)	[5,20]/三阶
设备租赁成本(万元)	[60,90]/三阶

3.2 LCC计算

将表1、2的经济数据代入变压器检修决策模型中,则可得到变压器满足一定约束条件下的LCC。根据电网统计数据,得到该海上风电场负荷规划期内最大负载率为80%,且一年中主变压器存在10%的时间负载率超过风险分界点,运行风险较大。

在海上风电主变压器可靠运行的前提下,分别采用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)、CS和本文所提算法对所建模型进行求解,3种算法的LCC优化结果如图6所示。

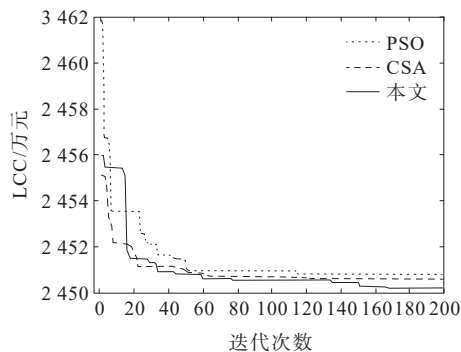


图6 PSO、CS和本文所提算法寻优
Figure 6 Comparison results of PSO, CSA and the proposed algorithm

由图6可知,随着迭代次数的增加,3种智能搜索算法得到的LCC都在逐渐降低,经过200次迭代后,与PSO和CSA相比,本文所提算法收敛速度更快、后期搜索活力更强,得到的LCC具有更好的经济性。此时变压器的大修时间分别为t_{d1}=17.9947、t_{d2}=23.9997a及对应的LCC为3450.20万元。因此,变压器应在投运后的第17年11月和第23年11月进行2次大修,此时LCC最低,经济性最优。

同理,可分别建立变压器经过1、3次大修情况下的LCC模型,同时利用本文所提算法对上述模型进行寻优求解,将求得的3种检修方案进行汇总,并与该变压器进行等时间间隔的1、2、3次大修3种检修方案比较分析,6种检修方案对比结果如表3所示。

表3 检修方案对比

Table 3 Comparison of maintenance schemes

检修方案	大修时间/a	C_{LCC} /万元
1次大修	20.999 8	3 454.96
2次大修	17.994 7、23.999 7	3 450.20
3次大修	15.998 7、21.974 0、26.951 7	3 443.54
等时间 间距	1次大修	15
	2次大修	10、20
	3次大修	7.5、15.0、22.5

由表3可得,3次大修对应的LCC最低,即3次大修的检修维护方案比1、2次大修和等时间间距的大修方式经济效益更明显,可为海上风电主变压器的实际运行提供一定的参考依据。

4 结语

本文提出了一种考虑故障风险与不确定性的海上风电主变压器检修策略优选方法,以主变压器全寿命周期内的总成本最小为目标,在可接受故障水平的约束下建立了检修策略优化决策模型,当主变压器检修活动变化或检修技术提升时,能为海上风电主变压器在实际运行中提供一定的参考。

1) 分析了海上风电主变压器的故障风险,引入负载率严重度描述负载率对运行风险的影响,同时将故障率随等效役龄的动态映射考虑在内,从而实现了对传统故障风险成本模型的改进,有利于精确衡量设备的故障风险成本。

2) 鉴于海上风电主变压器处于海洋环境中,致使其LCC模型中有些评估参数同时具有随机模糊双重不确定性,引入盲数理论,实现了LCC的优化管理。

3) 算例结果表明,本文提出的海上风电主变压器检修策略方法既能保障主变压器运行的可靠性,又能降低其运行周期内的总成本,提高了主变压器检修策略优化的科学性,具有一定的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 葛维春,张诗钜,崔岱,等.海上风电送出与就地消纳技术差异综述[J].电测与仪表,2022,59(5):23-32.
GE Weichun,ZHANG Shitan,CUI Dai,et al.Summary of differences between offshore wind power transmission and local consumption technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(5):23-32.
- [2] 时帅,吴慧娟,黄冬梅,等.考虑复杂海洋气候条件影响

的海上风电场储能容量配置研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(10):172-179.

SHI Shuai,WU Huixian,HUANG Dongmei,et al.Energy storage capacity configuration of an offshore wind farm considering the influence of complex ocean climate conditions[J].Power System Protection and Control,2022,50(10):172-179.

- [3] MADHIARASAN M. Accurate prediction of different forecast horizons wind speed using a recursive radial basis function neural network[J].Protection and Control of Modern Power Systems,2020,5(1):166-173.

- [4] ECARLO F, ARLEO M A. Imperfect maintenance models, from theory to practice[J]. System Reliability, 2017(18):335-354.

- [5] 袁野,王慧芳,应高亮,等.基于最小累积风险度的电网等风险检修决策[J].电力自动化设备,2017,37(11):151-155.

YUAN Ye,WANG Huifang,YING Gaoliang,et al.Equal risk maintenance decision for power grid based on minimum cumulative risk[J].Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):151-155.

- [6] 符杨,周全,贾锋,等.基于SCADA数据图形化的海上风电机组故障预测[J].中国电机工程学报,2022,42(20):7465-7475.

FU Yang,ZHOU Quan,JIA Feng,et al.Fault prediction of offshore wind turbines based on graphical processing of SCADA data[J].Proceedings of the CSEE,2022,42(20):7465-7475.

- [7] 张寒,刘卫东,潘志敏,等.基于自适应概率神经网络的变压器健康状态评估[J].高压电器,2022,58(2):103-110.
ZHANG Han,LIU Weidong,PAN Zhimin,et al.Health state assessment of transformer based on adaptive probabilistic neural network[J].High Voltage Apparatus, 2022,58(2):103-110.

- [8] 禹洪波,袁婉玲,汪敏,等.基于非对称贴近度证据云物元模型的电力变压器综合状态评估方法[J].电网技术, 2021,45(9):3706-3713.

YU Hongbo,YUAN Wanling,WANG Min,et al. Comprehensive condition assessment of power transformer based on asymmetric nearness degree evidence cloud matter-element model[J]. Power System Technology,2021,45(9):3706-3713.

- [9] 杜厚贤,刘昊,雷龙武,等.基于振动信号多特征值的电力变压器故障检测研究[J].电工技术学报,2023,38(1):83-94.

DU Houxian,LIU Hao,LEI Longwu,et al. Power transformer fault detection based on multi-eigenvalues of vibration signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(1):83-94.

- [10] 张恒,王建学,曹晓宇.采用全寿命周期成本与风险分析的农村配电变压器更换投资策略[J].西安交通大学学

- 报,2015,49(8):133-140.
- ZHANG Heng, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu. Replacement and investment strategy for distribution transformer in rural area based on life-cycle cost theory and risk assessment[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2015,49(8):133-140.
- [11] 梁钢,樊冰,郑伟东.基于生命周期风险图的设备检修策略优化[J].科学技术与工程,2021,21(24):10310-10316.
- LIANG Gang,FAN Bing,ZHENG Weidong.Optimization of equipment maintenance strategy based on life cycle risk graph[J].Science Technology and Engineering,2021, 21(24):10310-10316.
- [12] 郑业爽,李世春,鲁玲.基于多策略ISOA优化SVM的变压器故障诊断研究[J].智慧电力,2023,51(2):38-44.
- ZHENG Yeshuang, LI Shichun, LU Ling. Transformer fault diagnosis based on multi-strategy ISOA optimized SVM[J].Smart Power,2023,51(2):38-44.
- [13] 卞建鹏,杨苏,高世闯,等.基于全寿命周期成本的电力变压器检修决策[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(5):77-83.
- BIAN Jianpeng, YANG Su, GAO Shichuang, et al. Maintenance decision for power transformer based on life cycle cost[J].Proceedings of the CSU-EPSCA,2019,31(5):77-83.
- [14] 胡碧伟,邓祥力,贾声昊.基于ANFIS的变压器寿命预测和状态评估[J].电测与仪表,2022,59(1):61-68.
- HU Biwei, DENG Xiangli, JIA Shenghao. Transformer life estimation and state assessment based on ANFIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 61-68.
- [15] 易弢,廖俊龙,陈彬,等.配电网电缆故障成本风险评估模型法研究[J].计算机仿真,2016,33(12):128-131+142.
- Yi Tao, Liao Junlong, Chen Bin, et al. Research on cost risk Assessment Model for Distribution Network Cable Fault[J]. Computer Simulation, 2016, 33(12): 128-131+142.
- [16] 何宇斌,郭嘉,沈俭荣,等.基于风险节点电价的互联系统分散协同调度方法[J].电网技术,2017,41(8):2462-2468.
- HE Yubin, GUO Jia, SHEN Jianrong, et al. Decentralized synergetic dispatch of interconnected power systems with risk-based locational marginal price[J]. Power System Technology,2017,41(8):2462-2468.
- [17] 陈磊,姜飞,涂春鸣.考虑负荷最大概率分布与故障风险的配电变压器优选方法[J].电网技术,2021,45(3):1109-1116.
- CHEN Lei,JIANG Fei,TU Chunming.Optimal selection method of distribution transformer considering maximum probability distribution characteristics and fault risk[J].Power System technology,2021,45(3):1109-1116.
- [18] 贺兰菲,熊川羽,马莉,等.考虑寿命差异化现象的变压器寿命预测方法研究[J].供用电,2022,39(9):93-100.
- HE Lanfei,XIONG Chuanyu,MA Li, et al.Research on transformer lifetime prediction method considering difference of lifetime distribution[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 93-100.
- [19] 陈林聪.风电机组齿轮箱预防性维修与机会维修决策研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- CHEN Lincong.Research on the decision of preventive maintenance and opportunity maintenance of gear box of wind turbine[D]. Beijing: North China Electric Power University,2016.
- [20] 陈则钧,龚雯.机电设备故障诊断与维修技术[M].北京:高等教育出版社,2008:145-155.
- CHEN Zejun, GONG Wen. Fault diagnosis and maintenance technology of mechanical and electrical equipment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 145-155.
- [21] 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.
- [22] Q/GDW 168—2008.输变电设备状态检修试验规程[S]. Q/GDW 168—2008. Test code for condition-based maintenance of power transmission and transformation equipment[S].
- [23] 黄闽茗,何庆,文熙.基于逐维反向学习的动态适应布谷鸟算法[J].计算机应用研究,2020,37(4):1015-1019.
- HUANG Minming, HE Qing, WEN Xi. Dynamically adaptive cuckoo search algorithm based on dimension by opposition-based learning[J].Application Research of Computers,2020,37(4):1015-1019.
- [24] WEI W H, ZHOU J LCHEN F. Constrained differential evolution using generalized opposition-based learning[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications,2016,20(11):4413-4437.
- [25] 陈敏,余双翔,刘小松,等.基于LCC的海上风电场主变压器冗余配置经济性对比与分析[J].电力系统自动化, 2015,39(14):168-174.
- CHEN Min, SHE Shuangxiang, LIU Xiaosong, et al. Economical assessment on redundancy configuration of main transformers for offshore wind farm based on life cycle cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(14):168-174.