

基于改进役龄模型和全生命周期成本的 继电保护装置服役年限确定

薛安成¹, 刘中硕¹, 刘一民², 郑少明², 杜 鵬², 李公伟¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 国家电网公司华北分部, 北京 100053)

摘要:继电保护装置是电力系统的第一道防线,其合理的定期检修和退役对电网安全稳定运行和保证经济效益至关重要。基于具有线性衰减特性的役龄模型,结合继电保护装置的缺陷率特性曲线,同时计及继电保护装置的缺陷率和年均运行成本,在保证可靠性的前提下,以全生命周期年均运行成本最低为目标,构建了继电保护装置最佳服役年限确定模型。基于现场运行数据,对该模型进行了验证,得到了继电保护装置的最佳服役年限。结果表明该模型在继电保护装置检修技术改进或检修计划变更时,对确定继电保护装置最佳服役年限具有一定参考意义。

关键词:继电保护装置;役龄模型;役龄回退因子;缺陷率;全生命周期成本

中图分类号:TM 774

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102004

0 引言

随着坚强智能电网的建设以及新能源电力的大规模接入,现代电力系统供电效率在不断提高的同时,电力系统的复杂性、运行情况的不确定性也在增加^[1-4]。继电保护装置作为电力系统的第一道防线,在当前高微机化率的情况下,其可靠性对于电力系统安全稳定运行有重要意义^[5-7]。因此,为了满足电力系统所需的可靠性,不仅要定期对继电保护装置进行定期检修,还要根据继电保护装置运行情况,及时做退役处理。在检修水平提高或者检修方案变更时,如何科学评估继电保护装置的可靠性和经济性成为重要课题。

继电保护可靠性指标作为电力系统评估体系的基本元素,是很多学者研究的重点方向之一,文献[8]分析了检修工作对可靠性参数的影响,构建了模糊役龄回退故障率预测模型;文献[9]从电气设备检修策略优化的角度,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。以上研究的对象均为电力系统一次设备,尤其关注变压器的故障率预测及运行寿命优化,但在预测继电保护装置故障率方面的可行性没有得到验证。文

献[10]分析了输电线路与继电保护装置的不同状态,归纳出继电保护装置运行中的4种风险,并利用Markov模型推导了4种风险的计算方法;文献[11]基于BP神经网络对继电保护小样本缺陷数据的分析,进行装置可靠性评估。这些研究侧重于继电保护装置的故障率与可靠性,而对继电保护装置运行寿命及其与经济性之间的关系研究得不充分。

本文基于改进的继电保护装置役龄模型,综合考虑了继电保护装置的可靠性和经济性,力求装置的年均运行成本最低,提出了继电保护装置全生命周期单位时间成本模型,计算得到继电保护装置最优服役周期。基于现场实际运行数据,验证了所提模型的可行性。

1 具有线性衰减特性的役龄模型

传统役龄模型是役龄回退因子恒定的计算模型,该模型可以表现设备役龄回退现象^[12-14]。但是役龄回退因子为常数会造成随着设备实际役龄及检修次数的增加,修复活动每次都能固定地翻新设备,等幅度改善设备状态,等时长回退服役时间,这掩盖了修复疲劳现象,并不符合实际继电保护装置的维修性^[15]。定义役龄回退因子为 η ,表示对设备进行检修后实际役龄的回退程度;定义 e 为设备的等效役龄, t 为实际役龄。设第一次检修时间为 T_1 ,役龄回退量为 τ_1 ,检修后等效役龄为 e_1 ,则有:

$$\begin{cases} e_1 = t_1 - \tau_1 \\ \tau_1 = \eta_1 T_1 \end{cases} \quad (1)$$

推广至 n 次检修,则检修后的役龄曲线可以表示为:

$$\begin{cases} e_i = t_i - \tau_i \\ \tau_i = \eta_i T_i \end{cases} \quad (2)$$

收稿日期:2020-05-31;修回日期:2020-12-03

基金项目:国家电网公司华北分部技术服务项目(华北电网继电保护设备异常原因分析及其与检验周期和项目间关系研究)(SGNC0000DKJS1900141)

Project supported by the Technical Service Project of North China Branch of State Grid Corporation of China (Analysis for the Causes for Abnormal Operation of Relay Protection Equipment and Its Relationship with the Maintenance Period and Items in the North China Electric Power Grid)(SGNC0000DKJS1900141)

其中, $i=1, 2, \dots, n; t, e \in [0, +\infty)$; T_i 为第 i 次检修时间; τ_i 为第 i 次检修后的役龄回退量。

定义相邻2次检修之间的役龄回退增量为 $\varepsilon_{i(i-1)}$, 则有:

$$\varepsilon_{i(i-1)} = \tau_i - \tau_{i-1} = \eta_i T_i - \eta_{i-1} T_{i-1} \quad (3)$$

特别地, 当 η 为恒定值时有:

$$\varepsilon_{i(i-1)} = \eta(T_i - T_{i-1}) = \eta T_{i(i-1)} \quad (4)$$

其中, $T_{i(i-1)}$ 为相邻2次检修的时间间隔。

显然, 当役龄回退因子 η 、检修时间间隔 T 为固定值时, ε 也是恒定的。然而, 在实际继电保护装置的运行过程中, 随着服役时间的增长和检修次数的增加, 检修对装置役龄回退的作用越来越小, 表现出修复疲劳现象。因此, 随着检修次数的增加, 每次检修导致的役龄回退增量应该是衰减的, 若盲目地增加检修次数, 则只会浪费时间和经费。

定义 ε 增加量为 U , 表示装置在每次检修后役龄回退增量的增加部分; ε 衰减量为 D , 表示装置在每次检修后役龄回退增量的衰减部分, 则 $\varepsilon_{i(i-1)}$ 见式(5)。

$$\varepsilon_{i(i-1)} = U_i + D_i \quad (5)$$

其中, $U_i = \tau_i - \tau_{i-1} = \eta T_i - \eta T_{i-1}$ 。假设 ε 按照线性函数 $at+b(a<0)$ 随时间衰减, 则定义役龄回退增量 ε 的线性衰减量为 k , 有:

$$\begin{cases} \varepsilon_{21} - \varepsilon_{32} = \eta T_{21} - \eta T_{32} + k \\ \varepsilon_{32} - \varepsilon_{43} = \eta T_{32} - \eta T_{43} + k \\ \vdots \\ \varepsilon_{(i-1)(i-2)} - \varepsilon_{i(i-1)} = \eta T_{(i-1)(i-2)} - \eta T_{i(i-1)} + k \end{cases} \quad (6)$$

其中, $i=3, 4, \dots, n$ 。特别地, 当 $\eta=0$ 时, 系统为最小修复(即本次检修不会翻新设备, 只能继续维持工作状态), 其役龄回退量 $\tau=0$, 役龄回退增量 $\varepsilon=0$ 。

按照 ε 的线性衰减特性, 当达到一定的检修次数时, 其值将变为0, 此时即对应最大有效检修次数 $n_{\max}$ 。令 $\varepsilon_{i(i-1)}=0$, 可得:

$$n_{\max} = \frac{\eta T_{i(i-1)} + k}{k} \quad (7)$$

役龄回退增量在各种情形下的值为:

$$\varepsilon_{i(i-1)} = \begin{cases} 0 & \forall \eta = 0 \\ \eta T_1 & i = 1 \\ \eta T_{i(i-1)} - (i-1)k & i = 2, 3, \dots, n_{\max} \\ 0 & i > n_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

第 i 次检修后的役龄回退量为:

$$\begin{aligned} \tau_i &= \tau_1 + \varepsilon_{21} + \varepsilon_{32} + \dots + \varepsilon_{i(i-1)} = \\ &= \eta T_1 + \eta T_{21} + \dots + \eta T_{i(i-1)} - k \frac{i(i-1)}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

此时设备的等效役龄为:

$$e_i = t_i - \tau_i \quad (10)$$

由此可得检修后设备的缺陷率函数 $\lambda_i(t)$ 为:

$$\lambda_i(t) = \lambda_{i-1}(t_i - \tau_i) \quad (11)$$

根据上述模型中的参数进行仿真, 假设设备检

修周期为3a, 在设备服役第3年进行了首次检修, 按照当前检修水平, 其役龄回退因子 $\eta=0.4$, ε 的线性衰减量 $k=0.2$ 。图1描述了设备的役龄回退。可以看到, 随着实际役龄(检修次数)的增加, 役龄回退增量线性衰减模型的役龄回退幅度相比传统役龄模型逐渐变小。图2和图3分别描述了役龄回退量及役龄回退增量随检修次数增加的变化趋势。可以看到, 当采用役龄回退增量线性衰减模型时, 随着设备检修次数的增加, 役龄回退量从快速增加到缓慢增加, 最后趋于不变; 役龄回退增量逐渐减小, 最后趋向于0, 此时即对应最大有效检修次数 $n_{\max}$ 。

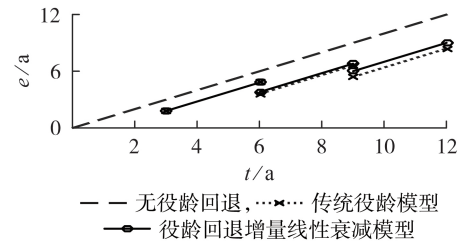


图1 设备等效役龄与实际役龄之间的关系

Fig.1 Relationship between device's equivalent age and actual age

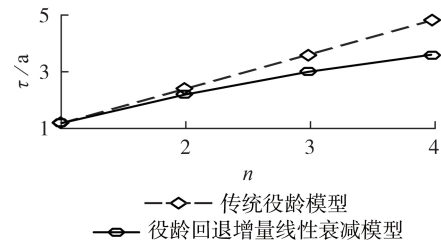


图2 役龄回退量仿真图

Fig.2 Simulative diagram of age reduction

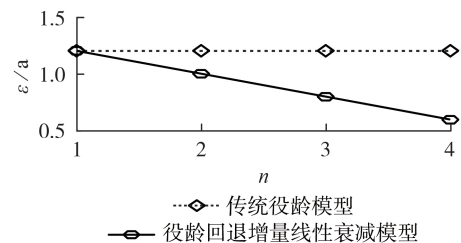


图3 役龄回退增量仿真图

Fig.3 Simulative diagram of age-reduction increment

为研究方便, 现对模型进一步做出如下假设: 在服役周期内出现故障时采用故障检修“恢复如旧”, 即只恢复装置的功能, 不改变装置的役龄; 检修的损耗时间不计入役龄时间。

2 服役周期的确定方法

2.1 继电保护装置的缺陷率函数

工程实践表明, 电力系统装置从投入运行到最终退役的整个服役周期中, 缺陷率随时间的变化函

数 $\lambda(t)$ 可以近似用典型浴盆曲线表示^[16-18],如图4所示。

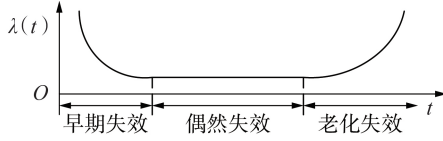


图4 典型浴盆曲线

Fig.4 Typical bathtub curve

浴盆曲线分为以下3个阶段:早期失效阶段、偶然失效阶段和老化失效阶段。早期失效阶段的失效率较高,但度过设备投入之初的磨合期后,这一阶段的失效率迅速降低;偶然失效阶段失效率较低且稳定,在曲线上表现为近似的直线;老化失效阶段由于设备材料老化、疲劳等导致失效率随时间迅速上升,这一阶段既存在偶然失效也存在老化失效。结合Weibull分布得到继电保护装置的缺陷率如式(12)所示。

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \quad (12)$$

其中, a 为尺度参数; b 为形状参数; λ_0 为偶然失效率。

继电保护装置与一般的工业产品的区别在于:一般工业产品在运行的全生命周期中,缺陷率与时间的关系呈现较完整的U形浴盆曲线,而继电保护装置在投入运行前要进行一系列的整定测试和试运行,所以实际投入电网运行的继电保护装置的缺陷率曲线一般不考虑早期失效阶段。继电保护装置的失效分为硬件失效和软件失效,目前继电保护装置的可靠性模型主要基于硬件失效,很少计及软件失效。另外,继电保护装置作为一个整体,其软件失效与硬件失效存在千丝万缕的联系,软件失效往往导致或表现为硬件失效,因此本文模型的构建仅考虑硬件失效。

图5给出了继电保护装置役龄回退缺陷率曲线。当某一时刻对继电保护装置进行某种检修后,装置的缺陷率将明显下降。对继电保护装置进行全检、部检和故障检修时,将产生不同程度的役龄回退,对应不同的役龄回退因子 η ,从而得到对应的等效役龄 e 。进一步,可获得设备在服役期间的缺陷率函数,如式(11)所示,将其代入全生命周期成本LCC

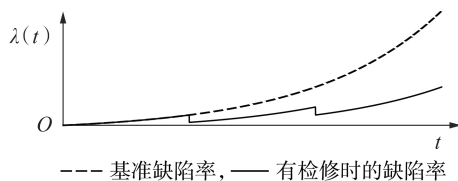


图5 继电保护装置缺陷率曲线

Fig.5 Curves of defect rate for relay protection device

(Life Cycle Cost)模型,即可得到继电保护装置的最佳服役年限。

2.2 继电保护装置全生命周期成本模型

全生命周期成本模型是一种分析决策某系统建设或设备投运维护退役各个环节的分析方法^[19-20]。其充分考虑系统全生命过程的经济性,兼顾系统运行的安全性和可靠性,为设备的运行维护提供科学经济的参考。

全生命周期成本的通用计算公式如下:

$$C_{LCC} = C_I + C_0 t + C_M + C_F + C_D + C_R \quad (13)$$

其中, C_{LCC} 为全生命周期成本; C_I 为投资成本; C_0 为运行成本; C_M 为检修维护成本; C_F 为故障成本; C_D 为退役废弃处置成本; C_R 为实施风险成本。

对于继电保护装置而言,其投资成本和运行成本可以看作常量,实施风险成本可忽略不计。继电保护装置的检修维护成本包括检修人工成本、更换插件成本以及其他成本。根据相关规程^[16],对模型中的检修方案进行如下规定:继电保护装置在投运之初进行验收检验,且为全检,而后每三年进行部检,每六年进行全检,发生缺陷时进行故障检修,退役当年不再检修。单台继电保护装置在其服役周期内的检修维护成本 C_M 可表示为:

$$C_M = \sum_{j=1}^3 C_{Mj} = \sum_{j=1}^3 n_j M_j \quad (14)$$

其中, $j=1, 2, 3$ 分别表示全检、部检和故障检修; n_j 为检修方式 j 下的检修次数; M_j 为检修方式 j 下的单次检修成本。 $j=1$ 时, $C_{M1} = M_1 n_1 = M_1 \lceil T/6 + 1 \rceil$, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整; $j=2$ 时, $C_{M2} = M_2 n_2 = M_2 \lceil T/6 \rceil$; $j=3$ 时,

$$C_{M3} = M_3 \int_0^t \lambda(\alpha) d\alpha。$$

故障成本是一种惩罚性成本,当装置发生缺陷时,若不能发挥保护电力系统的作用,就可能会对系统的正常运行造成影响。单台装置故障成本为 $C_F = C_{F1} + C_{F2}$,其中 C_{F1} 为单台装置造成的运行事故损失成本, C_{F2} 为检修时间内造成的停电损失成本。继电保护装置作为高可靠性设备,其发生拒动或误动事故的概率非常低^[6],因此可忽略 C_{F1} ,故 C_F 可表示为:

$$C_F = C_{F2} = F t_0 \int_0^t \lambda(\alpha) d\alpha \quad (15)$$

其中, F 为单位时间内停电损失成本; t_0 为每次故障造成的停电时间。

退役废弃处置成本 C_D 为继电保护装置退出服役后报废处理的成本与设备残留成本之差,可分别取售价的10%和5%。

综上所述,继电保护装置全生命周期单位时间成本模型为:

$$C_{LCC} = (C_I + C_0 + C_M + C_F + C_D) / t = \left(C_I + C_0 + \sum_{j=1}^3 n_j M_j + F t_0 \int_0^t \lambda(\alpha) d\alpha + C_D \right) / t \quad (16)$$

若考虑继电保护装置的最优服役年限满足全生命周期单位时间成本最低的要求,则该最优更换周期应满足:

$$\frac{\partial C_{LCC}}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

3 算例分析

参考文献[21]中电压等级为220 kV某地区的不同服役年限的继电保护装置的缺陷率,具体如表1所示。

表1 继电保护装置平均缺陷率统计

Table 1 Average defect rate statistics of relay protection devices

序号	役龄/a	平均缺陷率/[次·(台·a) ⁻¹]	序号	役龄/a	平均缺陷率/[次·(台·a) ⁻¹]
1	0.5	0.0226	17	8.5	0.0246
2	1.0	0.0197	18	9.0	0.0269
3	1.5	0.0182	19	9.5	0.0271
4	2.0	0.0160	20	10.0	0.0248
5	2.5	0.0153	21	10.5	0.0305
6	3.0	0.0175	22	11.0	0.0340
7	3.5	0.0146	23	11.5	0.0408
8	4.0	0.0168	24	12.0	0.0438
9	4.5	0.0190	25	12.5	0.0512
10	5.0	0.0175	26	13.0	0.0487
11	5.5	0.0182	27	13.5	0.1015
12	6.0	0.0197	28	14.0	0.1189
13	6.5	0.0160	29	14.5	0.2093
14	7.0	0.0190	30	15.0	0.2312
15	7.5	0.0212	31	15.5	0.3750
16	8.0	0.0204	32	16.0	0.4211

应用MATLAB曲线拟合的方法,对表1中的装置缺陷率按服役时间进行拟合,如图6所示。可以看出,继电保护装置在投入之初即进入缺陷率恒定的偶然失效阶段;在运行约10 a后,缺陷率开始上升,且增长速度在加快。根据拟合结果得到其缺陷率函数 $\lambda(t)$ 中偶然失效率为0.0188,形状参数为10.6328,尺度参数为16.6856,即该继电保护装置的缺陷率函数为:

$$\lambda(t) = 0.0188 + \frac{10.6328}{16.6856} \left(\frac{t}{16.6856} \right)^{10.6328-1} \quad (18)$$

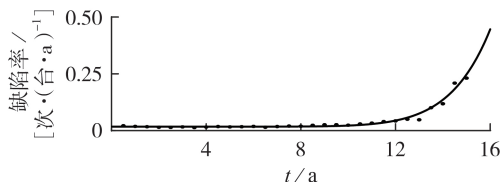


图6 缺陷率散点拟合图

Fig.6 Scatter fitting diagram of defect rate

根据某公司及电网运行资料^[16],该装置投资安装成本 $C_i=40$ 万元;运行成本 C_o 为0.4万元/a;对于检修维护成本 C_m ,单次全检、部检和故障检修成本

分别为0.43、0.32、0.25万元;对于故障成本 C_f ,参考文献[22]中成本数据,取 $F=10$ 万元/h,停电时间根据文献[6]中统计数据,考虑在危急和严重缺陷情况下进行停电检修,不计路途时间等因素,取 $t_0=12$ h;退役废弃处置成本 $C_p=0.2$ 万元。

根据电网运行资料给出的当前继电保护装置检修维护水平^[15,17],取全检役龄回退因子 $\eta_1=0.6$,部检役龄回退因子 $\eta_2=0.3$,故障检修役龄回退因子 $\eta_3=0$,设衰减因子 $k=0.2$ 。

将以上数据代入式(16)对模型进行仿真,可得全生命周期年均成本如表2所示,全生命周期年均成本变化趋势如图7所示。

表2 全生命周期年均成本

Table 2 Annual average cost of life cycle

役龄/a	年均成本/(万元·a ⁻¹)	役龄/a	年均成本/(万元·a ⁻¹)
1	56.7620	11	6.7686
2	47.4970	12	5.7543
3	37.0753	13	6.0962
4	25.8645	14	6.1554
5	19.1382	15	7.2874
6	15.0545	16	8.6929
7	11.3109	17	12.6400
8	9.0591	18	18.7752
9	8.0932	19	25.7715
10	7.3782	20	36.0202

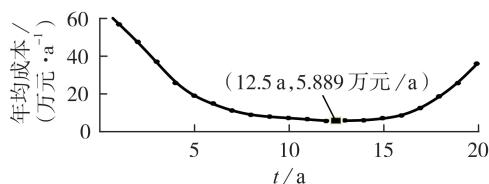


图7 全生命周期年均成本变化趋势

Fig.7 Variation tendency of annual average cost of life cycle

由图7可见,继电保护装置在投运最初五年,年均成本迅速下降,然后趋于平缓,在第12和13年间取得最小值,而后由于缺陷次数逐年增加,年均运行成本随之逐年攀升。因此可在第12年至13年间择机退役,此时的全生命周期单位时间成本最低,可得最佳服役年限为12.5 a,最低年均成本为5.889万元/a。对于运行不稳定、工作环境恶劣的装置,可根据运行情况适当缩短服役年限。本文所得的退役时间与继电保护运行管理规程推荐的更换周期基本一致^[23]。

4 结论

本文提出了一种基于役龄回退增量线性衰减和全生命周期成本的继电保护装置服役年限确定模型,当继电保护装置检修技术改进或检修计划变更

时,可以指导检修安排,得到结论如下:

(1)分析了继电保护装置的役龄模型的建模方法,对传统役龄模型进行了改进,引入了衰减因子 k 描述役龄回退增量的线性衰减特性;

(2)基于役龄回退增量线性衰减模型,综合考虑继电保护装置的可靠性和经济性,构建了继电保护装置全生命周期单位时间成本模型;

(3)基于现场运行数据进行继电保护装置可靠性分析和计算最优更换周期,验证了所提模型的有效性。

由于缺乏继电保护装置实际运行的完整全生命周期数据,对于在现场实践中如何科学合理地确定役龄回退因子值还需深入研究,该模型的可靠性也需要结合工程实际情况进一步探讨。

参考文献:

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 徐政. 电力系统广义同步稳定性的物理机理与研究途径[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):3-9.
XU Zheng. Physical mechanism and research approach of generalized synchronous stability for power systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 3-9.
- [3] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):1-6.
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.
- [4] 贾科,杨哲,朱正轩,等. 基于电流幅值比的逆变型新能源场站送出线路T接纵联保护[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):82-88.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHU Zhengxuan, et al. Pilot protection based on current amplitude ratio for teed line in inverter-interfaced renewable energy power plants [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 82-88.
- [5] 刘海峰,肖繁,赵永生,等. 智能变电站集中式站域保护系统的可靠性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):157-164.
LIU Haifeng, XIAO Fan, ZHAO Yongsheng, et al. Reliability evaluation for centralized protection system of smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 157-164.
- [6] 张烈,吕鹏飞,张瀚方,等. 2018年国家电网公司220 kV及以上交流保护装备及运行情况[J]. 电网技术,2020,44(1):217-222.
ZHANG Lie, LÜ Pengfei, ZHANG Hanfang, et al. Analysis on protection relaying and its operation conditions of SGCC in 220 kV and above voltage AC system in 2018 [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 217-222.
- [7] ZHANG Ji, KANG Qiaoping, HUANG Dawei, et al. Reliability evaluation of the new generation smart substation considering relay protection system [C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Xi'an, China: IEEE, 2016: 1164-1168.
- [8] 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):99-104,114.
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, 114.
- [9] 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.
- [10] 薛安成,罗麟,景琦,等. 基于Markov模型的高压输电线继电保护装置风险评估[J]. 电网技术,2014,38(7):1995-2000.
XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on Markov model based risk assessment of protective relaying for high voltage transmission line [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1995-2000.
- [11] 戴志辉,李芷筠,焦彦军,等. 基于BP神经网络的小样本失效数据下继电保护可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):129-134.
DAI Zhihui, LI Zhijun, JIAO Yanjun, et al. Reliability assessment based on BP neural network for relay protection system with a few failure data samples [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 129-134.
- [12] 张爽,田浩,焦龙,等. 基于役龄回退理论的电网设备健康指数建模方法[J]. 供用电,2016,33(1):8-13.
ZHANG Shuang, TIAN Hao, JIAO Long, et al. Research on the healthy condition of power distribution equipment based on age reduction theory [J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(1): 8-13.
- [13] SHAFIEE M, ZUO M J. Adapting an age-reduction model to extend the useful-life duration [C]//2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. Chengdu, China: IEEE, 2012: 1055-1059.
- [14] SUN Jian, LI Yanfei, LIU Yu, et al. A numerical model with age reduction factor for warm spare [C]//2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. Xi'an, China: IEEE, 2011: 275-280.
- [15] 梁锦强,孙炯,刘凯. 可修复系统的役龄回退机理及其新模型研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(2):454-457.
LIANG Jinqiang, SUN Jiong, LIU Kai. Research of the age reduction mechanism of repairable system and its new models [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2014, 38(2): 454-457.
- [16] 薛安成,王睿琛,王宝,等. 基于单位生命周期费用最小的继电保护装置更换策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):44-48,60.
XUE Ancheng, WANG Ruichen, WANG Bao, et al. A relay replacement strategy based on the least unit life-cycle cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 44-48, 60.
- [17] 王睿琛,薛安成,毕天姝,等. 继电保护装置时变失效率估算及其区域性差异分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):11-15,23.
WANG Ruichen, XUE Ancheng, BI Tianshu, et al. Time-varying failure rate estimation of relay protection devices and their regional differences analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 11-15, 23.
- [18] 薛安成,罗麟,景琦,等. 继电保护装置的多因素时变Markov

- 模型及其检修策略分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 124-129.
- XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on the maintenance strategies of protective relay based on time-varying Markov model including multi-factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 124-129.
- [19] LEE S H, LEE A K, KIM J O. Determining economic life cycle for power transformer based on life cycle cost analysis [C]//2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2012: 604-607.
- [20] YUSNI A, NUGRAHA H, SINISUKA N I. Life cycle management on the operation of 400 MW power generation[C]//2018 International Conference on Information and Communications Technology. Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2018: 838-843.
- [21] 徐志超, 李晓明, 杨玲君. 基于全寿命周期成本的继电保护装置退出时间评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 151-155.
- XU Zhichao, LI Xiaoming, YANG Lingjun. Evaluation for exit time of relay protection devices based on life cycle cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 151-155.
- [22] 丁茂生, 王钢, 贺文. 基于可靠性经济分析的继电保护最优检修间隔时间[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 44-48.
- DING Maosheng, WANG Gang, HE Wen. The optimum routine maintenance interval of protection based on reliability economic analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 44-48.
- [23] 国家能源局. 继电保护和电网安全自动装置检验规程: DL/T 995—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.

作者简介:



薛安成

薛安成(1979—),男,江苏常熟人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为模型和数据驱动的新能源电力系统稳定分析、数据安全和二次设备评估(**E-mail**: acxue@ncepu.edu.cn);

刘中硕(1996—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统二次设备可靠性(**E-mail**: lzs20122015@163.com)。

(编辑 李玮)

Determination of service life for relay protection device based on improved age-reduction model and life cycle cost

XUE Ancheng¹, LIU Zhongshuo¹, LIU Yimin², ZHENG Shaoming², DU Juan², LI Gongwei¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

Abstract: Relay protection device is the first line of defense for electric power system, its reasonable regular maintenance and decommission are essential for the safe and stable operation of power grid and the guarantee of economic benefits. Based on the age-reduction model with linear attenuation characteristics, combined with the defect rate characteristic curve of relay protection device, meanwhile taking the defect rate of relay protection device and annual average operating cost into account, pursuing the lowest life cycle annual average operating cost on the premise of ensuring reliability, a model of optimum service life determination for relay protection device is constructed. Based on the field operation data, the model is verified, and the optimum service life of relay protection device is obtained. Results show that the model has certain reference significance for determining optimum service life of relay protection device when improving the maintenance technology or adjusting the maintenance plan.

Key words: relay protection device; age-reduction model; age-reduction factor; defect rate; life cycle cost