

高压断路器储能弹簧的可靠性及寿命分析

田涛¹, 张兆君¹, 朱超¹, 陈昊¹, 王阳英夫², 张建忠²

(1. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:本文介绍了机械可靠性分析中应力-强度干涉模型的基本概念, 给出了圆柱螺旋弹簧的可靠度计算模型, 结合强度退化模型, 将断路器储能弹簧的可靠度与其操作次数相关联, 考察储能弹簧的可靠度随操作次数增加而降低的现象。根据应力松弛模型, 在考虑强度退化的可靠度计算模型上结合应力松弛相关的因子, 建立考虑强度退化与应力松弛的应力-强度干涉模型, 分析了断路器储能弹簧的预期寿命, 并以某断路器储能弹簧为算例, 验证了该方法的可行性。

关键词:可靠度; 强度退化; 应力松弛; 断路器

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)05-0103-06

0 引言

在电力系统中, 高压断路器起着重要的控制和保护作用, 断路器故障会对电网的稳定性产生严重影响。对多个国家的断路器故障进行统计, 发现高压断路器使用过程中最常见的是操动机构的机械故障。在我国, 操动机构机械故障也占有较高比例^[1]。高压断路器传动机构结构复杂, 任一零件失效即引起断路器开合过程达不到规定的要求, 影响操作可靠性。按操动机构划分, 断路器可分为弹簧操动机构、气动操动机构、液压操动机构三种主要类型。其中弹簧操动机构在电力系统中得到广泛运用, 储能弹簧作为其分、合闸力的来源, 对断路器的可靠性起重要的影响作用^[2-7]。传统的应力-强度干涉模型根据均值不变的材料强度与工作应力计算结构的可靠度, 仅考虑了零件使用初期或者设计阶段的可靠性。而零件在实际使用过程中, 强度发生退化, 可靠性会随之降低。为研究高压断路器机械可靠性与使用寿命的关系, 本文提出了结合强度退化和应力松弛分析断路器压缩储能弹簧可靠性及寿命的方法, 同时以材料为 60Si₂Mn 的断路器储能弹簧作为算例, 验证该方法的可行性。

1 弹簧的可靠度计算模型

1.1 应力-强度干涉模型

在机械可靠性分析中, 应力-强度干涉模型是一种主要思想^[8-11], 它考虑了机械零件自身的不确定性, 包括零件的几何尺寸、材料特性、加工工艺等, 同时也考虑了外在因素^[12], 如载荷、环境温度

等, 应力-强度干涉模型评估了这些不确定性对机械零件可靠性的影响。在零件使用初期, 应力和强度的均值相差较大, 两者概率分布曲线不存在重叠, 零件不会失效; 但随着零件的持续使用, 强度发生变化, 两者分布曲线渐渐产生重叠, 即产生干涉, 当应力大于强度值时, 引起零件失效, 如图 1 所示。

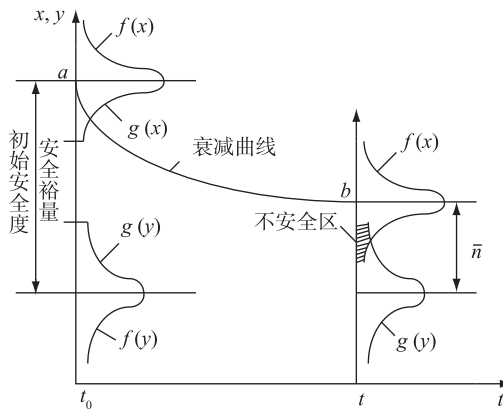


图1 应力-强度干涉模型

Fig.1 Stress-strength interference model

评估机械零件可靠性的极限状态方程为式(1)。

$$g = x - y = 0 \quad (1)$$

其中应力 y 及强度 x 都是随机变量的函数。

$$x = f_x(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$y = g_y(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (3)$$

为使零件可靠有效地工作, 要求强度大于应力的概率值必须足够大, 可靠概率的公式为式(4)。

$$R = P(g \geq 0) \quad (4)$$

同时要求累积失效概率尽可能小, 累积失效概率公式为式(5)。

$$R_p = 1 - R = p(g < 0) \quad (5)$$

1.2 螺旋压缩弹簧的最大剪应力

根据应力-强度干涉模型,为分析弹簧可靠性,需首先确定弹簧最大剪应力的分布类型^[13-16]。圆柱螺旋弹簧在轴向载荷 F 作用下的最大剪应力均值及标准差分别为式(6)和式(7)。

$$\bar{\tau}_s = \frac{8 \overline{KFD}}{\pi \bar{d}^3} \quad (6)$$

$$\sigma_{\tau_s} = 8 \left[\left(\overline{FD/\bar{d}^3} \right)^2 \sigma_K^2 + \left(\overline{KF/\bar{d}^3} \right)^2 \sigma_D^2 + \left(\overline{KD/\bar{d}^3} \right)^2 \sigma_F^2 + \left(3 \overline{KFD/\bar{d}^4} \right)^2 \sigma_d^2 \right]^{1/2} / \pi \quad (7)$$

其中 d 为弹簧丝直径均值; D 为弹簧中径均值; C 为弹簧的旋绕比均值, $C = D/d$; K 为弹簧的曲度系数均值, $\sigma_d, \sigma_D, \sigma_C, \sigma_K, \sigma_F$ 分别为各变量的标准差,且有:

$$K = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0.615}{C} \quad (8)$$

标准差 σ_K 可取 $\sigma_K \approx 0.045$ 。根据弹簧外径 D 、弹簧丝直径 d 、轴向载荷 F 的均值及标准差,可通过式(6)、式(7)分别获得弹簧最大剪应力的均值和标准差。

1.3 可靠度计算模型

根据应力及材料的强度分布类型,可得到弹簧设计阶段可靠度的计算模型如式(9)。

$$r = P(\tau - \tau_s > 0) \quad (9)$$

其中 τ 为弹簧的剪切强度; τ_s 为最大剪应力,根据式(6)、 τ_s 是关于弹簧外径 D 、弹簧丝直径 d 、载荷 F 的函数,如式(10)。

$$\tau_s = f(D, d, F) \quad (10)$$

2 强度退化与应力松弛

在传统的应力-强度退化模型中,只分析了零件在设计阶段的可靠度,而没有分析在使用过程中材料劣化对可靠度带来的影响。为评估断路器经历一定操作循环后储能弹簧的寿命,即在具体操作次数下的可靠度,本文提出将弹簧的强度退化与应力松弛相结合,建立反映弹簧可靠度与寿命关系的应力-强度干涉计算模型。

2.1 强度退化模型

强度的退化是由使用过程中不断积累的损伤导致的,当损伤积累到一定程度,机械零件发生失效。强度退化现象在微观上很难解释机理,但从宏观上用 $S-N$ 曲线表示材料强度退化随载荷循环次数衰减的过程^[17-19]。文献[20]提出了强度退化的疲劳累计损伤模型,强度退化过程可描述为由载荷作用次数与加载应力水平影响的函数,如式

(11)所示。

$$R(n) = f(n, S) \quad (11)$$

其中, $R(n)$ 为零件的剩余强度; n 为循环载荷的作用次数; S 为循环载荷的应力水平。

金属的疲劳过程有如下特征:

(1) $R(0) = \sigma_b$, 在强度退化初期,剩余强度等于材料的抗拉强度;

(2) $R(N) = S$, 为终了边界条件,此时材料发生疲劳破坏;

(3) $R(n)$ 是单调递减函数,疲劳开始作用时强度退化较慢,即 $\left. \frac{dR(n)}{dn} \right|_{n \rightarrow 0}$ 趋于 0,而载荷作用后期有“突然死亡”行为。

根据上述特点,强度退化模型可以表示成式(12)。

$$\frac{d\sigma_R(n)}{dn} = -A B \sigma_a^{1/A} \sigma_R(n)^{1-1/A} \quad (12)$$

其中, $\sigma_R(n)$ 为第 n 个循环时的剩余强度, σ_a 为作用的循环应力, σ_b 为抗拉强度。求解强度退化的微分方程,得到材料在强度退化过程中的剩余强度如式(13)。

$$\sigma_R(n) = (\sigma_b^{1/A} - B \sigma_a^{1/A} n)^A \quad (13)$$

根据材料的 $S-N$ 曲线,当 $n = N$ 时,零件疲劳失效,即 $\sigma_R(N) = \sigma_a = S$,可以得到:

$$\sigma_b = S(1 + BN)^A \quad (14)$$

典型的强度退化曲线如图 2 所示。

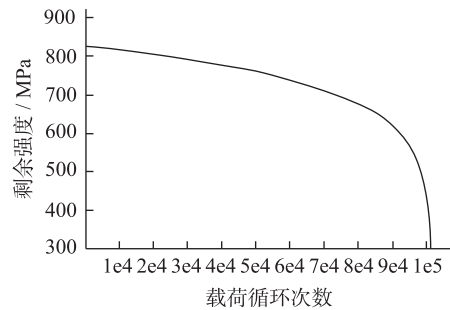


图 2 强度退化曲线

Fig.2 Strength degradation curve

在强度退化初期,零件剩余强度衰减速度较慢,随着强度退化接近极限状态,剩余强度退化加快,最终导致零件的失效。考虑到材料的强度退化现象,零件可靠度计算模型如式(15)。

$$r(n) = P(\tau(n) - \tau_s > 0) \quad (15)$$

此时,零件可靠度是关于应力循环次数 n 的函数。

2.2 弹簧的应力松弛

应力松弛是金属材料在应力或形变持续施加的情况下,微塑性变形逐渐积累,应力逐渐下降的

过程,亦可称为弹性衰退^[21]。应力松弛过程与材料类型、环境温度、应力水平等相关。对于机械弹簧等弹性元件,应力松弛是其失效的主要模式之一。储能弹簧作为分合闸力的来源,其应力松弛对断路器分合闸操作的可靠性产生重要影响。典型的应力松弛曲线如图3所示。

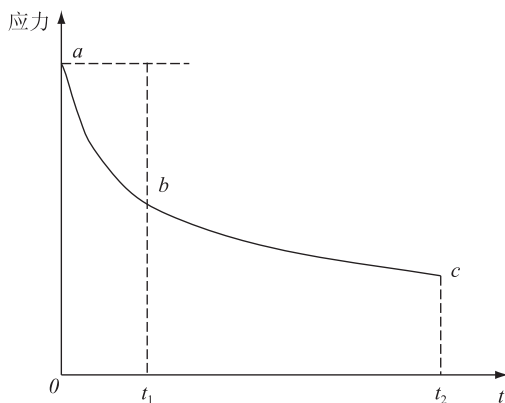


图3 典型应力松弛曲线

Fig.3 Typical stress relaxation curve

弹簧负荷损失量 ΔP 和弹簧初载荷 P_0 的比值称为负荷损失率,文献[22]研究了螺旋压缩弹簧的应力松弛现象,通过试验给出了 60Si₂Mn 弹簧负荷损失率与松弛时间的关系,弹簧应力松弛过程的负荷损失率 $\Delta P/P_0$ 与松弛时间 t_R 的关系如式(16)。

$$\Delta p/p_0 = \alpha + \beta \ln t_R \quad (16)$$

其中, p_0 为弹簧初载荷; Δp 为弹簧负荷的损失量; t_R 为松弛时间; α, β 为与温度有关的常数。

弹簧的负荷损失率是初始载荷的百分数,为了分析弹簧在使用过程中的预期寿命,可以考虑将应力松弛造成的负荷损失率作为弹簧可靠度计算模型的一个因子,以该应力松弛模型为基础,在可靠度计算模型中增加应力松弛因子,具体的应力松弛因子表达式如式(17)。

$$K(n) = 1 - \Delta P/P_0 = 1 - \alpha + \beta \ln t_R(n) \quad (17)$$

结合应力松弛因子,包含应力松弛因子的可靠度计算模型为式(18)。

$$R(n) = K(n)r(n) \quad (18)$$

在模型中,将负荷损失率的变量松弛时间 t_R 变换为关于应力循环次数 n 的函数。根据断路器的设计操作次数和使用寿命,将 t_R 表示为操作间隔时间乘上操作次数 n 的函数,统一了模型中的变量,以分析弹簧可靠度随操作次数的变化。

3 弹簧可靠度及预期寿命分析算例

已知 252 kV 六氟化硫断路器的分闸弹簧材料为 60Si₂Mn,轴向载荷 $F = 22\,000\text{ N}$,弹簧外径 $D =$

123 mm,弹簧丝直径 $d = 23\text{ mm}$ 。弹簧总圈数 $n_1 = 9$,有效圈数 $n = 7$ 。弹簧外径 D 、弹簧丝直径 d 、载荷 F 均服从正态分布。弹簧外径 D 的标准差根据标注的公差按“3 σ ”标准取值,弹簧丝直径的变差系数取为 0.001,载荷 F 的标准差根据设计公差确定。随机变量均值和方差如表 1 所示。

表 1 随机变量的分布

Table 1 Distribution of random variables			
变量类型	均值	标准差	变差系数
F	22 000 N	400 N	0.018
D	123 mm	0.483 mm	3.93e-3
d	23 mm	0.023 mm	0.001

各随机变量之间相互独立,根据螺旋压缩弹簧的计算模型,其最大剪应力服从均值 729.17 MPa,方差 28.95 MPa 的正态分布。根据材料 60Si₂Mn 的疲劳试验数据,可以获得其强度退化模型的参数 $A, B, 60\text{Si}_2\text{Mn}$ 的疲劳试验数据如表 2 所示。

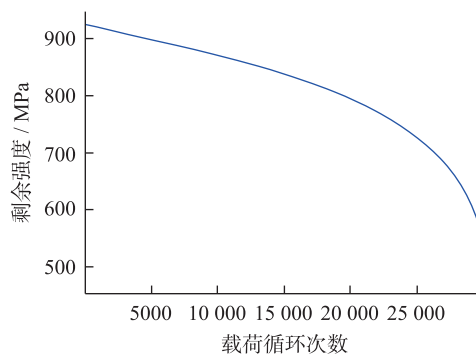
表 2 疲劳试验数据

Table 2 Fatigue experimental data		
应力幅值/MPa	1476	446
寿命/次	1e3	1e7

根据疲劳试验数据,60Si₂Mn 弹簧强度退化模型中的参数 $A = 0.1396, B = 0.001\,128$,强度退化模型可表示为式(19)。

$$\sigma_R(n) = (\sigma_b^{7.166} - 0.001\,13n\sigma_a^{7.166})^{0.1396} \quad (19)$$

剪切应力的强度退化曲线如图 4 所示。结合剪切应力强度退化曲线,得到 60Si₂Mn 螺旋压缩弹簧在应力松弛情况下的应力-强度干涉可靠度计算模型,其在操作过程中可靠度随操作次数衰减的曲线如图 5 所示。

图 4 60Si₂Mn 的强度退化曲线Fig.4 Strength degradation curve of 60Si₂Mn

随着断路器操作次数增加,可靠度的衰减速度逐渐加快,在不同操作次数下的可靠度如表 3 所示。

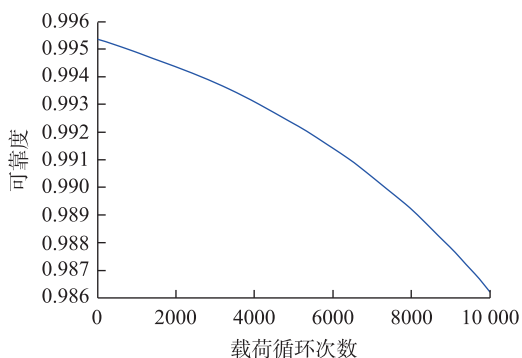


图5 强度退化下的可靠度曲线

Fig.5 Reliability curve with strength degradation

表3 强度退化下的可靠度

寿命/次	1000	2000	3000	4000
可靠度	0.994 89	0.994 37	0.993 77	0.993 09
寿命/次	5000	6000	7000	8000
可靠度	0.992 32	0.991 42	0.990 40	0.989 20

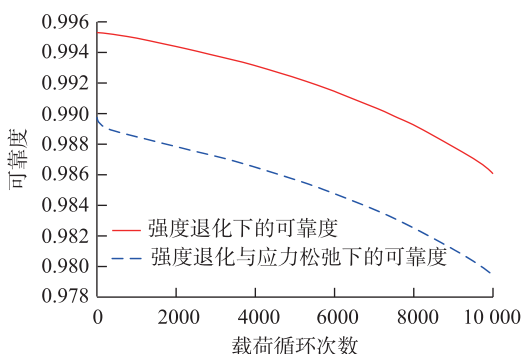


图6 强度退化与应力松弛下的可靠度

Fig.6 Reliability curve with strength degradation and stress relaxation

图6为同时考虑应力松弛因子的弹簧可靠度曲线,对应图6的曲线,具体操作次数下的可靠度如表4。

表4 强度退化与应力松弛下的可靠度

寿命/次	1000	2000	3000	4000
可靠度	0.988 48	0.987 85	0.987 20	0.986 48
寿命/次	5000	6000	7000	8000
可靠度	0.985 67	0.984 76	0.983 72	0.982 51

在结合应力松弛因子后,该弹簧的可靠度相较于只考虑强度退化的情况有所减小。根据分析计算,高压断路器弹簧在材料强度退化下可靠度呈现逐渐加快的下降趋势,最终下降至破坏的临界状态。当同时考虑应力松弛现象,弹簧可靠度在初期发生快速的下降过程,这是由应力松弛初期负荷损失率增加较快引起的。

4 结论

本文根据弹簧零件的可靠度计算模型,结合其材料强度退化和应力松弛,以252 kV六氟化硫断路器分闸弹簧为例,分析其可靠度随寿命的变化,主要结论如下:

(1) 所分析弹簧在初期具有较高的可靠度,达到0.995以上,其可靠度与弹簧尺寸、材料、外加载荷等都存在密切关系。

(2) 由于材料的强度退化,断路器弹簧在使用后期可靠度衰减速度加快,在30年10 000次操作的极限使用情况下,可靠度下降明显。为提高可靠度,可改用其他材料或采用表面处理工艺增加强度。

(3) 弹性材料的应力松弛引起可靠度的明显下降,实际工作表现为分合闸力不足引起的断路器分合闸失败。可通过强压处理减小应力松弛,提高可靠度。

(4) 根据弹簧的强度退化和应力松弛模型分析其可靠度,可得到较贴近实际的寿命与可靠度关系,是一种分析断路器弹簧寿命及可靠度的有效方法,为分析断路器失效提供参考。

参考文献:

- [1] JANSSEN A L J, BRUNKE J H, HEISING C R, et al. CIGRE studies on the reliability of single pressure SF₆ gas high voltage circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 274-28.
- [2] 张应中,徐可新,阎崇毅,等. 高压断路器弹簧操动机构的优化与仿真[J]. 高压电器, 2014, 5(4): 66-71. ZHANG Yingzhong, XU Kexin, YAN Chongyi, et al. Optimization and simulation of the spring actuator for circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 5(4): 66-71.
- [3] 舒服华. 高压断路器弹簧操动机构合闸弹簧可靠性分析 [J]. 高压电器, 2007, 43(5): 368-373. SHU Fuhua. Closing switch spring reliability analysis & improvement of high voltage circuit breaker operating mechanisms [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 368-373.
- [4] 杨景刚,刘媛,高山,等. 高压断路器机械故障诊断技术 [J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 1-6, 10. YANG Jinggang, LIU Yuan, GAO Shan, et al. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 1-6, 10.
- [5] 周仙娥,史芳颖,康子雄,等. 断路器用液压操动机构储能碟簧的可靠性研 [J]. 高压电器, 2015, 5(1): 87-104. ZHOU Xiane, SHI Fangying, KANG Zixiong, et al. Reliability research of storage disc spring of hydraulic operating mechanism for circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 5(1): 87-104.
- [6] 田涛,陈昊,张建忠. 基于智能理论的高压断路器机械故障诊断 [J]. 江苏电机工程, 2014, 33(6): 12-15. TIAN Tao, CHEN Hao, ZHANG Jianzhong. Mechanical fault di-

- agnosis of high voltage circuit breaker based on intelligent theory [J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2014, 33(6): 12-15.
- [7] 吴贵义, 马燕峰, 李军, 等. 基于全寿命周期成本的高压断路器综合寿命评估[J]. *华北电力大学学报*, 2014, 41(1): 72-77.
WU Guiyi, MA Yanfeng, LI Jun, et al. Comprehensive life assessment of high voltage circuit breaker based on life cycle cost [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2014, 41(1): 72-77.
- [8] 芮延年, 傅戈雁. 现代可靠性设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
RUI Yannian, FU Geyan. *Modern reliability design* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [9] 陈昊, 朱超, 李义峰, 等. 输电线路工频电场的计算与测量研究[J]. *电气工程学报*, 2016, 11(5): 40-45.
CHEN Hao, ZHU Chao, LI Yifeng, et al. Research on calculation and measurement of power frequency electric field for transmission line [J]. *Journal of electrical engineering*, 2016, 11(5): 40-45.
- [10] 李建军, 王强锋. 基于区间非概率理论的强度退化结构可靠性研究[J]. *航空兵器*, 2014, 2: 54-57, 64.
LI Jianjun, WANG Qiangfeng. Research of reliability of strength degradation structure based on interval non-probabilistic theory. *Areo Weaponry*, 2014(2): 54-57, 64.
- [11] 周志刚, 徐芳. 考虑强度退化和失效相关性的风电齿轮传动系统动态可靠性分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(11): 80-87.
ZHOU Zhigang, XU Fang. Dynamic reliability analysis of gear transmission system of wind turbine considering strength degradation and dependent failure [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(11): 80-87.
- [12] 谢里阳. 机械可靠性理论、方法及模型中若干问题评述[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(14): 27-35.
XIE Liyang. Issues and commentary on mechanical reliability theories, methods and models [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(14): 27-35.
- [13] 王红, 汤劲松, 刘万选, 等. 车辆变刚度弹簧组模糊可靠性分析方法研究[J]. *铁道学报*, 2015, 37(8): 24-27, 37.
WANG Hong, TANG Jinsong, LIU Wanxuan, et al. Research on fuzzy reliability analysis method of vehicle variable stiffness spring assembly [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(8): 24-27, 37.
- [14] 王景振, 王红, 商跃进, 等. 基于 MATLAB 的圆柱螺旋弹簧可靠性优化设计[J]. *机械研究与应用*, 2014, 27(1): 71-72.
WANG Jingzhen, WANG Hong, SHANG Yuejin, et al. Reliability optimum design of the cylinder spiral spring based on Matlab [J]. *Mechanical Research & Application*, 2014, 27(1): 71-72.
- [15] 曾祥璞. 圆柱螺旋弹簧的可靠性优化设计[J]. *机械制造与研究*, 2005, 34(5): 12-15.
ZENG Xiangpu. The reliability optimum design of cylindrical-helix spring [J]. *Jiangsu Machine Building & Automation*, 2005, 34(5): 12-15.
- [16] 龚小平, 刘毅静, 崔利杰. 圆柱螺旋弹簧可靠性优化设计[J]. *空军工程大学学报*, 2010, 11(2): 77-80.
GONG Xiaoping, LIU Yijing, CUI Lijie. Reliability optimization design of cylindrical helical spring [J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2010, 11(2): 77-80.
- [17] 安宗文, 高建雄, 刘波. 基于 P-S-N 曲线的强度退化随机模型[J]. *计算力学学报*, 2015, 32(1): 118-122.
AN Zongwen, GAO Jianxiong, LIU Bo. Stochastic model of strength degradation based on P-S-N curve. *Chinese Journal of Computation Mechanics*, 2015, 32(1): 118-122.
- [18] 李莉, 谢里阳, 何雪泓, 等. 疲劳加载下金属材料的强度退化规律[J]. *机械强度*, 2010, 32(6): 967-971.
LI Li, XIE Liyang, HE Xuehong, et al. Strength degradation law of metallic material under fatigue loading [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2010, 32(6): 967-971.
- [19] 安宗文, 刘小刚, 高建雄. 基于裂纹扩展理论的结构强度退化模型[J]. *兰州理工大学学报*, 2014, 40(6): 45-49.
AN Zongwen, LIU Xiaogang, GAO Jianxiong. Structural strength degradation model based on crack growth theory [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2014, 40(6): 45-49.
- [20] 张禄, 纪威, 周炜, 等. 基于强度退化的疲劳累积损伤模型[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(z1): 47-52.
ZHANG Lu, JI Wei, ZHOU Wei, et al. Fatigue cumulative damage models based on strength degradation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(z1): 47-52.
- [21] 张保山, 王永平, 李志勇, 等. 60Si₂Mn 螺旋弹簧的压缩应力松弛行为与贮存寿命预测[J]. *实验力学*, 2011, 26(6): 699-706.
ZHANG Baoshan, WANG Yongping, LI Zhiyong, et al. Compressive stress relaxation behavior and storage life prediction of 60Si₂Mn helical spring [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(6): 699-706.
- [22] 魏芳荣. 螺旋压缩弹簧应力松弛的动态研究及服役寿命预测[D]. 天津: 天津大学硕士论文, 2007.
WEI Fangrong. Stress relaxation dynamic properties and service life evaluation of helical compress spring [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

作者简介:



田涛

田涛(1972—),男,江苏南京人,高级技师,从事特高压变电站专业设备管理工作;

张兆君(1977—),男,江苏南京人,技师,从事特高压变电站专业设备管理工作;

朱超(1987—),男,江苏南京人,博士,工程师,从事变电站综合自动化工作;

陈昊(1980—)男,江苏南京人,博士,教授级高级工程师,从事变电检修相关工作;

王阳英夫(1992—),男,江苏常熟人,硕士研究生,从事高压断路器可靠性分析工作;

张建忠(1970—),男,江苏张家港人,博士,研究员,博士生导师,从事智能电器和电力电子技术相关研究工作(E-mail: jiz@seu.edu.cn)。

Reliability and Life Analysis of Energy-storing Spring for High Voltage Circuit Breaker

TIAN Tao¹, ZHANG Zhaojun¹, ZHU Chao¹, CHEN Hao¹, WANG Yangyingfu², ZHANG Jianzhong²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China;

2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The conception of stress-strength interference model for mechanical reliability analysis is introduced and the reliability model of cylindrical helical spring is given in this paper. Combining the strength degradation model, the phenomenon of spring reliability decreasing with the operation times is investigated, where the reliability of the spring is correlated with the operation times of the high voltage circuit breaker. According to the stress relaxation model and combination of stress relaxation factor which considering the reliability model with strength degradation, the stress-strength interference model considering stress relaxation and strength degradation is built. After that the life of breaker's energy-storing spring is predicted. Finally, the feasibility of this method is verified by the calculation example of a specific energy-storing spring.

Key words: reliability; strength degradation; stress relaxation; circuit-breaker

(编辑 陈娜)

(上接第 97 页)

The Impact of Distributed Energy on Harmonic Characteristics in Active Distribution Network

ZHU Qingrong, HUANG Wenjie, XU Xiuhua, ZHANG Tao

(School of Power Engineering Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: In this paper, the influence of distributed energy on the harmonic of active distribution network is studied. Firstly, the distributed energy in active distribution network is classified according to the type of harmonic source, which includes current type and voltage type harmonic source. Then harmonic current's generation, propagation and superposition rules are analysed by simulation method, as the harmonic source's power, the load at connected point and connected point change. The generation and propagation of harmonic voltage in ADN are studied, considering the power and connected point of the harmonic source' change. As the simulation results, the conclusions are drawn to guide the connected points' selection of the units in ADN.

Key words: active distribution network; current mode harmonic source; voltage mode harmonic source; harmonic transformation; harmonic superposition component

(编辑 刘晓燕)

(上接第 102 页)

A Review of Insulation Design and Partial Discharge Detection of DC Gas Insulated Line

ZHAO Ke, WANG Jingjun, LIU Tong, HE Pan

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Gas insulated line (GIL) occupies an increasing proportion in the transmission system. The promotion of DC GIL can improve the existing DC transmission mode, and has a very strong economic benefits. Compared with AC GIL, the major technical difficulties and differences of DC GIL are insulation issues. Studies on DC GIL insulation issues are helpful to its operation, maintenance, and life prediction. Domestic and foreign researches on DC GIL are widely introduced from two aspects; the overall insulation design and internal partial discharge detection. It can provide a better cognition and reference for further study on DC GIL insulation problems.

Key words: gas insulated line; direct current; insulation design; partial discharge

(编辑 钱悦)