

DOI: 10.7667/PSPC180928

高加速寿命试验在就地化保护装置可靠性研究中的应用

贺春¹, 陈光华², 王鹏飞¹, 俞雨含¹, 黄建才¹, 范瑞兆³

(1. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 珠海开普检测技术有限公司, 广东 珠海 519000;
3. 谢菲尔德大学, 英国谢菲尔德西岸 S10 2TN)

摘要: 为验证就地化保护装置的可靠性, 引入高加速寿命试验(HALT), 快速发现产品缺陷、操作设计边际及结构强度极限。设计了高加速寿命试验方案和功能性测试内容, 总结了试验发现的典型故障, 并对易故障的元器件进行统计, 指出产品潜在的故障点。分析了就地化保护装置的操作极限和应力循环结果, 通过对比, 体现高加速寿命试验在提高可靠性上的作用。对就地化保护装置的平均无故障时间进行评估, 验证平均无故障时间是否符合标准要求。分析了高加速寿命试验在可靠性方面的综合效益, 为高加速寿命试验技术在继电保护行业的推广提供一定的理论基础。

关键词: 继电保护; 可靠性; 高加速寿命试验数

Application of highly accelerated life test in reliability study of outdoor installation protection device

HE Chun¹, CHEN Guanghua², WANG Pengfei¹, YUN Yuhan¹, HUANG Jiancai¹, FAN Ruizhao³

(1. Xuchang Test Technology Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. Zhuhai Ketop Testing Technology Co., Ltd, Zhuhai 519000, China; 3. The University of Sheffield, Western Bank, Sheffield, S10 2TN, UK)

Abstract: In order to verify the reliability of outdoor installation protection device, High Accelerated Life Test (HALT) is introduced to quickly detect product defects, operational design margins and structural strength limits. The steps of HALT and the contents of functional test are designed. The typical faults found in the test are summarized. The components which are easy to faults are counted and the potential faults are pointed out. The operating limit and stress cycling results of outdoor installation protection device are analyzed. The effect of HALT on improving reliability is demonstrated by comparison. The MTBF of outdoor installation protection device is evaluated to verify whether it meets the standard requirements. The comprehensive benefits of HALT in reliability are analyzed, which provides a theoretical basis for the popularization of HALT technology in relay protection industry.

Key words: relay protection; reliability; HALT

0 引言

继电保护是确保电力系统安全可靠运行的重要装置, 保护装置动作的正确性将直接影响整个系统的安全稳定运行^[1-2], 稍有不慎就会导致事故发生。只有不断提高继电保护装置的质量和可靠性, 才能保证系统无故障运行, 提高供电可靠性。

对电子产品而言, 其组成是一些电子器件, 而电子器件是存在失效率的, 这就意味着电子产品随时可能出现故障^[3]。因此, 为提高可靠性, 用户和企业努力的方向一般是降低失效率, 增加两个故障之间的间隔时间, 即提高产品的平均无故障时间^[4]。

就地化保护装置属于智能电子设备, 其可靠性

特征量应为平均无故障时间(MTBF)。然而, 在继电保护现行产品标准中, 没有给出具体的可靠性验证和评估方法。作为一种新产品, 有必要开展可靠性试验, 在投放市场前发现潜在缺陷, 提高可靠性^[5]。同时, 根据试验结果对产品的 MTBF 进行评估, 验证产品可靠性水平是否满足标准要求。

1 继电保护可靠性试验现状

1.1 继电保护的可靠性要求

电力用户一直很重视产品的可靠性, 在继电保护装置的产品标准中, 都有对于产品可靠性的要求, 例如: 设计寿命、平均无故障时间、动作成功率、产品失效率等^[6]。

以就地化保护装置为例,在国家电网公司企业标准中,明确提出装置可靠性的要求:装置平均无故障时间 MTBF 大于 80 000 h^[7-8]。

1.2 传统试验方法无法验证可靠性

型式试验是最常用的测试和判定方法,但其对装置的考核重点在于功能逻辑和性能指标。虽然型式试验也在丰富环境试验项目,但对装置的考核重在适应性和安全性,无法有效考核可靠性。

可靠性对应装置的浴盆曲线,要求装置在生命周期内保持低失效率和高可靠度。可靠性试验在常规应力下需要更长的试验时间,在较短试验时间内需要加速/高加速的应力和较多的样本数量,这是型式试验满足不了的^[9]。

2 高加速寿命试验介绍

高加速寿命试验(简称 HALT 试验)是由美国军方所延伸出的设计质量验证与制造质量验证的试验方法,利用快速高、低温变换的振荡体系来揭示电子和机械装配件设计缺陷和不足^[10]。

HALT 所暴露的缺陷,涉及线路设计、工艺、元器件和结构等方面。为考核产品可靠性、快速暴露产品设计和制造缺陷,提高可靠性提供了强有力工具^[11]。目前,HALT 试验在电工电子、汽车电子、通信产品、家用电器和军工产品领域应用广泛。

3 就地化保护装置的 HALT 试验

3.1 试验目的

第一,通过快速高、低温变换的振荡体系来揭示设计缺陷和不足,以高应力加速产品失效,在最短时间内发现/改正缺陷,提升产品可靠性。

第二,掌握产品的工作极限和破坏极限,评估产品平均无故障时间(MTBF),弥补传统试验缺失,验证产品技术标准对可靠性的要求。

3.2 试验参数

HALT 试验箱可提供-100 °C~+200 °C 的温度区间,温变速率可达到 70 °C~100 °C/min。同时,提供六轴向随机振动(振动强度 0~75 Grms,频率范围 1 Hz~1 MHz),在低频范围内传递较高的振动能量,激发大型产品潜在缺陷^[12]。高加速寿命试验项目及应力组成示意如图 1 所示。

3.3 试验实施

在进行 HALT 试验时,需设计产品功能性测试的内容。对于就地化保护装置,从保护功能、SV 和 GOOSE、开入和开出、时间同步、运行稳定性、通信稳定性等进行考核,判定是否失效。

试验结束后,还需检查产品外壳、插件(或模块)

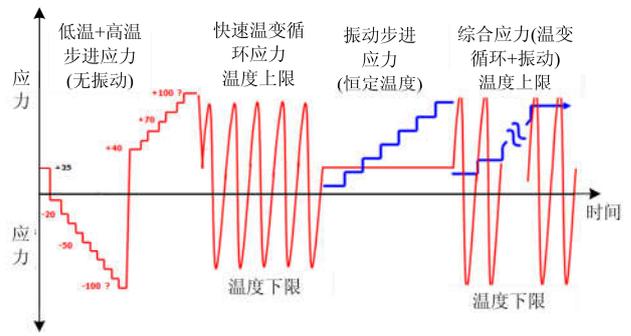


图 1 高加速寿命试验项目及应力组成示意

Fig. 1 HALT test items and stress composition

是否出现异常,元器件是否出现焊接异常。

3.3.1 温度应力试验

第一,低温和高温步进试验以递增方式施加应力,激发产品设计中的潜在缺陷,确定和提高产品的操作极限和设计裕度。

低温和高温步进应力试验条件^[13]: 1) 低温步进和高温步进的起始试验温度分别为-40 °C和 80 °C; 2) 低温和高温步进试验的步进值设定为 10 °C/min; 3) 温度变化速率≥60 °C/min; 4) 试品在各温度点驻留时间设定为 20 min,期间进行功能性测试; 5) 当产品出现失效后,停止步进试验,确定产品的操作极限。

第二,快速温度变化循环试验是在产品低温和高温操作极限内进行高速温度循环,激发产品失效,考核产品可靠性水平。

快速温度变化循环试验条件: 1) 设定低温应力值=低温操作极限+5 °C,设定高温应力值=高温操作极限-5 °C; 2) 以≥60 °C/min 的温度变化速率进行高低温循环试验; 3) 试品在各温度极值点的驻留时间设定为 10 min,期间进行功能性测试; 4) 试验执行 5 个循环。

3.3.2 振动应力试验

振动步进应力试验为六轴向随机振动,振动强度自 5 Grms 开始,步进式递增。通过步进应力激发产品失效,确定和提高产品操作极限和设计裕度。

振动步进应力试验条件: 1) 试验初始振动量级为 5 Grms; 2) 振动步进值设定为 5 Grms; 3) 试验在每个振动量级的驻留时间应设定为 20 min,期间进行功能性测试; 4) 当产品出现失效后,停止步进试验,确定产品的操作极限。

3.3.3 温度和振动综合应力试验

该项目将快速温变及随机振动两种应力同时进行,使加速老化的效果更加显著,激发产品失效,考核产品可靠性水平。

综合应力试验条件: 1) 设定低温应力值=低温操作极限+5℃, 设定高温应力值=高温操作极限-5℃, 温变速率 ≥ 60 ℃/min; 2) 试验中的初始振动量级是振动操作极限的 1/5, 此后每个循环中振动量级递增, 递增量级为初始振动量级; 3) 试品在每个温度极值点驻留时间为 10 min, 期间进行功能性测试; 4) 温度和振动组合试验执行 5 个循环。

4 HALT 试验结果

4.1 试验发现的典型故障

对就地化保护装置开展 HALT 试验, 发现了一些典型故障(失效)模式, 结果如表 1 所示。

表 1 典型故障统计

Table 1 Typical faults statistics

故障类型	比例	失效分析
电源异常	70%	元器件异常, 管脚断裂、脱落。
结构件异常	20%	航插松动、脱落; 紧固螺丝脱落。
保护功能异常	20%	保护误动、拒动。
SV 输出异常	60%	丢帧、重复、品质异常; 波形畸变; 输出值变零漂、变直流、时有时无。
GOOSE 开入异常	10%	跳闸拒动, 出口继电器不闭合。
以太网通信异常	38%	SV/GOOSE/MMS 输出通信中断。
时间同步异常	35%	PPS 输出精度超标、无输出; 同步标志异常, 同步状态异常。
误差异常	55%	电源输出电压精度超标; 装置 SV 输出准确度超标。

注: 以上现象与二次设备在变电站现场出现的事故现象吻合。

4.2 易故障的元器件统计

试验对元器件直接损坏而失效的情况进行了统计, 如表 2 所示。

表 2 元器件易损度统计

Table 2 Components failure rate statistics

元器件类型	比例	失效分析
电源插头	8%	脱落, 无法上电。
开关芯片	8%	与主板之间连接存在虚焊, 上电失灵。
热敏电阻	20%	管脚断裂、脱落, 涌流变大, 上电失灵。
电感	32%	管脚断裂, 上电起火, 影响滤波性能。
电容	54%	管脚断裂、脱落, 降低抗干扰能力。
CT/PT	48%	开裂、A/D 回路开路, 导致 SV 输出失真。
FPGA	53%	功能异常, 导致 SV 波形畸变。
晶振	30%	功能异常, 导致时间同步异常。

注: 近年来, 以上元器件异常导致变电站事故的现象时有发生。

4.3 操作极限及应力循环结果

利用 HALT 试验确定操作极限, 考核产品在推

荐应力循环数量下是否出现失效, 结果如表 3 所示。

表 3 操作极限及应力循环结果

Table 3 Operating limit and stress cycle result

类型	试验结果	最大值	最小值	期望值	合格率
继电 保护 整机	第一批测试(27种)				
	低温操作极限	-100℃	-45℃	-65℃	48.1%
	高温操作极限	150℃	90℃	110℃	92.6%
	振动操作极限	75 Grms	5 Grms	50 Grms	66.7%
	快速温变循环	5个	1个	5个	88.0%
	综合应力循环	5个	1个	5个	48.1%
	全项合格率	6/27			22.2%
	第二批测试(26种)				
	低温操作极限	-100℃	-70℃	-65℃	100%
	高温操作极限	140℃	100℃	110℃	96.1%
	振动操作极限	75 Grms	20 Grms	50 Grms	96.1%
	快速温变循环	5个	4个	5个	96.1%
	综合应力循环	5个	2个	5个	73.1%
	全项合格率	19/26			73.1%
电源 模块	第一批测试(11种)				
	低温操作极限	-90℃	-45℃	-65℃	72.7%
	高温操作极限	150℃	75℃	110℃	63.6%
	振动操作极限	75 Grms	35 Grms	50 Grms	54.5%
	快速温变循环	5个	1个	5个	72.7%
	综合应力循环	5个	1个	5个	45.5%
	全项合格率	0/11			0.0%
	第二批测试(12种)				
	低温操作极限	-100℃	-35℃	-65℃	91.7%
	高温操作极限	150℃	115℃	110℃	100%
	振动操作极限	75 Grms	35 Grms	50 Grms	75.0%
	快速温变循环	5个	2个	5个	83.3%
	综合应力循环	5个	2个	5个	41.7%
	全项合格率	5/12			41.7%

注: 低温和高温操作极限期望值为表 5 中等级 6 的要求; 振动操作极限期望值为所有样本操作极限 70%置信下限; 快速温变和综合应力循环期望值取 GB/T29309-2012 的最低要求: 5 个循环。

与第一批测试相比, 第二批测试时产品操作极限超过期望值、应力循环满足期望值的比例、全项目通过率等都有明显提升。这证明, 测试可在短时间内有效发现缺陷, 厂家进行针对性加固, 产品设计裕度和可靠性明显提升。

4.4 MTBF 评估结果

根据 HALT 试验结果对产品的平均无故障时间(MTBF)进行评估, 结果如表 4 所示。

表 4 MTBF 评估结果

Table 4 MTBF evaluation results

样品类型	电源模块		继电保护整机	
	第 1 批	第 2 批	第 1 批	第 2 批
样品种类	11	12	27	26
最小 MTBF 值	21 771.9	6 434.1 h	5 970.3 h	19 435.1 h
最大 MTBF 值	97 404.1 h	101 896.1 h	134 239.6 h	136 782.1 h
MTBF 合格率	9.1%	50.0%	25.9%	73.1%

注：表格中 h 代表小时，MTBF 要求大于 80 000 h。

从 MTBF 评估值看，不同厂家产品可靠性水平差异大。但是，经过 2 个批次的试验，厂家对产品进行了有效整改，MTBF 值的合格率提升明显。

4.5 试验发现的异常现象实例

第一，电源模块上的电源插头脱落，导致电源模块无法上电，如图 2 所示。



图 2 产品失效-电源插头脱落

Fig. 2 Product failure-power plug fall off

第二，装置输出 SV 波形异常，交流值突变为直流值，数据传变失真。如图 3 所示，施加值为交流 1.000 A，输出值为直流 0.202 A。

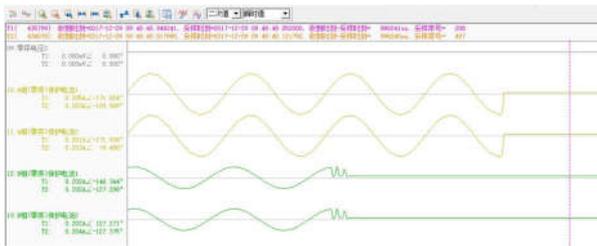


图 3 产品失效-SV 输出波形异常

Fig. 3 Product failure-SV output waveform anomaly

4.6 HALT 试验总结

HALT 试验的结果表明，通过 HALT 试验可以有效模拟目前电力系统智能二次设备的主要缺陷。就地化保护装置供货商多，存在多种类别的故障隐患。通过 HALT 试验激发这些故障模式，掌握不同故障模式随时间的分布情况，有利于针对产品进行可靠性评估和促进可靠性增长^[14-15]。

5 HALT 试验的综合效益

5.1 快速发现缺陷，消除故障机会

HALT 试验对暴露电子产品的潜在缺陷，改进产品的强度、减少故障机会和提高可靠性非常有效(如图 4 和图 5 所示)。

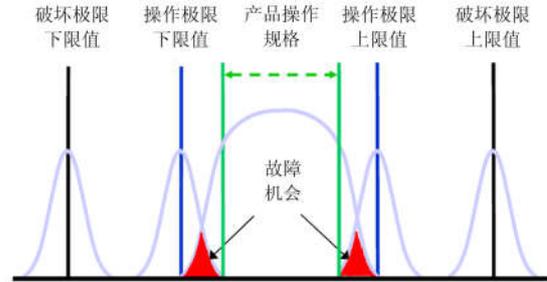


图 4 进行 HALT 之前的故障机会

Fig. 4 Failure opportunities before HALT

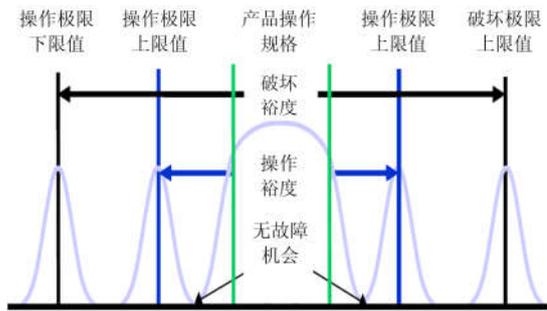


图 5 进行 HALT 之后的故障机会

Fig. 5 Failure opportunities after HALT

HALT 之所以起作用，是因为它遵循了应力与循环次数(S-N)之间关系(如图 6 所示)。如果产品对应的循环次数是 N_0 、场应力是 S_0 ，它就会失效。在 HALT 试验中，通过增大应力来减少故障发生时的循环次数^[16]。

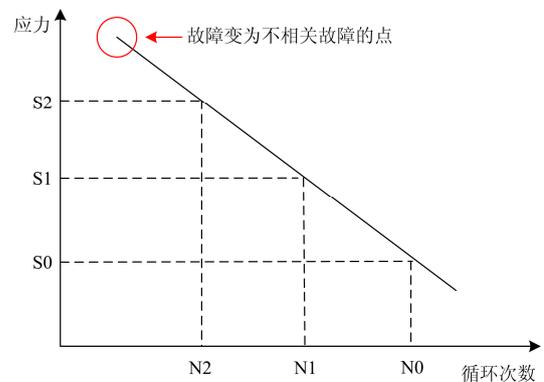


图 6 应力与循环次数(S-N)关系曲线图

Fig. 6 Graph of S-N relation

5.2 评估继电保护产品的 MTBF

假设规定的时间为 t , 产品的寿命为 T , 在一批产品中的寿命有的 $T \geq t$, 也有 $T < t$, 从概率论角度可以将可靠度表示为 $T \geq t$ 的概率^[17], 即

$$R(t) = P(T \geq t), 0 < R(t) < 1 \quad (1)$$

式中: t 为规定的时间; T 表示产品的寿命。

不可靠度与可靠度呈互补关系, 即 $R(t) + F(t) = 1$, 所以

$$F(t) = 1 - R(t) = P(T < t) \quad (2)$$

MTBF 和可靠度函数之间存在如下关系:

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3)$$

电子元器件的寿命分布服从指数分布, 如式(4)。

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

式中: λ 为失效率; t 代表时间, 单位是年。因此

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (5)$$

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \quad (6)$$

$$\frac{e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty}}{-\lambda} = \frac{e^{-\lambda t} - e^0}{-\lambda} = \frac{0 - 1}{-\lambda} = \frac{1}{\lambda}$$

将 t 代入一年时间 8 760 h, 可知

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-8760 * \lambda} \quad (7)$$

因为 $\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda}$, 可知

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-8760 / \text{MTBF}} \quad (8)$$

所以:

$$\text{MTBF} = -8760 / \ln(1 - F(t)) \quad (9)$$

利用 HALT 试验评估产品的 MTBF 就是基于以上原理, 通过试验激发故障, 计算产品的不可靠度 $F(t)$ 和失效率, 然后推导出 MTBF。

MTBF 评估所需参数包括: 产品设计 MTBF、低温/高温/振动操作极限、快速温变和综合应力循环结果、产品规格等级 (如表 5 所示)、样本数量和现场工作周期等。

5.3 提高继电保护产品的设计能力

对就地化保护装置开展 HALT 试验, 可提前暴露产品在可靠性设计上潜在的缺陷和不足^[18]。借助 HALT 试验结果, 记录并分析故障模式, 在现场应用之前找出产品设计的薄弱点^[19], 辅助研发人员分析故障模式发生的规律和严重程度, 引导设计人员有效提高软硬件设计能力。

表 5 HALT 试验产品规格等级

Table 5 HALT test product specification level

产品规格	等级	产品类型	HALT 温度范围
0~+40℃	1	消费级	-30~+80℃
0~+50℃	2	高端消费级	-30~+100℃
-10~+50℃	3	高性能级	-40~+110℃
-20~+50℃	4	关键应用级	-50~+110℃
-25~+65℃	5	户外带防护	-50~+110℃
-40~+85℃	6	户外无防护	-65~+110℃

注: 试验时, 快速温变和综合应力循环数量设定为 5, 表格中的值表示在设定循环内装置无故障运行的循环数量; 就地化保护装置对使用环境的要求为 -40℃~+85℃, HALT 试验产品规格等级为 6; 现场工作周期是指产品在现场一天之内(24 h)开机运行时间占总时间的比率。

6 结语

HALT 试验在国内外电子业界已经得到了广泛应用, 它能在极短时间内发现产品失效和薄弱环节, 指导制造企业对产品故障模式加以分析, 通过改善设计和工艺等有效提高产品的可靠性。同时, 借助 HALT 试验可对产品的平均无故障时间进行评估, 验证产品技术标准, 这相对于传统环境试验和老化试验, 优势明显。

借助 HALT 试验, 加强就地化保护装置的可靠性测试, 有利于完善继电保护领域的可靠性标准体系和评价体系, 完善产品选型和检验机制。在此基础上, 通过 HALT 和 HASS(高加速应力筛选试验)相结合, 既可以在产品研发阶段提高可靠性, 还可以辅助工厂和现场检查, 确保产品质量一致性。

参考文献

- [1] 刘洋, 马进, 张籍, 等. 考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 147-154.
LIU Yang, MA Jin, ZHANG Ji, et al. Reliability evaluation of a new generation smart substation considering relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 147-154.
- [2] 周小波, 唐治国. 基于 MapReduce 架构的就地化分布式母线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 128-135.
ZHOU Xiaobo, TANG Zhiguo. Research on outdoor installation distributed busbar protection based on MapReduce architecture[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 128-135.
- [3] 张旭泽, 郑永康, 康小宁, 等. 智能变电站继电保护系统所面临的若干问题[J]. 电力系统保护与控制, 2018,

- 46(6): 90-96.
ZHANG Xuze, ZHENG Yongkang, KANG Xiaoning, et al. Several problems of intelligent substation relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 90-96.
- [4] 蔺杰, 黄东. 继电保护装置高加速寿命试验的研究[J]. 电工电气, 2013(6): 40-44.
LIN Jie, HUANG Dong. Study on highly accelerated life test for relay protection device[J]. Electrotechnics Electric, 2013(6): 40-44.
- [5] 易永辉. 继电保护装置寿命分析及寿命影响机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 79-83.
YI Yonghui. Research of relay protection device's life and relative effect mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 79-83.
- [6] 裘愉涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 1-5.
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 1-5.
- [7] 叶峻, 吴庆彤. 电力系统继电保护及自动化装置可靠性试验评估研究[J]. 通信电源技术, 2015(2): 44-46.
YE Jun, WU Qingtong. Research on reliability test and assessment for relay protection and automation device of power system[J]. Telecom Power Technology, 2015(2): 44-46.
- [8] 王宏, 陈晓. 可靠性强化试验及其在雷达研制生产中的应用[J]. 现代雷达, 2008, 30(4): 30-32, 36.
WANG Hong, CHEN Xiao. Reliability enhancement testing and its application in design and production phases of radar[J]. Modern Radar, 2008, 30(4): 30-32, 36.
- [9] 宁歆. 继电保护系统可靠性研究[J]. 电气技术, 2008(10): 49-52.
NING Xin. Reliability research of relay production system[J]. Electrical Engineering, 2008(10): 49-52.
- [10] 胥岱遐, 韩天行, 梁志成. 电力系统继电保护及自动化装置可靠性试验与评估[J]. 中国电力, 2008, 41(3): 17-21.
XU Daixia, HAN Tianxing, LIANG Zhicheng. Reliability test and assessment for protective relays and automation equipment of power systems[J]. Electric Power, 2008, 41(3): 17-21.
- [11] 霍布斯·葛瑞格·K. 高加速寿命试验与高加速应力筛选(加速可靠性工程)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012.
HOBBS G K. HALT and HASS accelerated reliability engineering[M]. Beijing: Aeronautical Industry Press, 2012.
- [12] 邓林, 王世涛. HALT 与 HASS 技术原理概述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2004(5): 26-29.
DENG Lin, WANG Shitao. HALT and HASS technical principles outlined[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2004(5): 26-29.
- [13] 电工电子产品加速应力试验规程—高加速寿命试验导则: GB/T 29309—2012[S].
Accelerated stress testing procedures for electric and electronic products—guidance for highly accelerated life test: GB/T 29309—2012[S].
- [14] 鲍进. 高加速寿命试验在智能电能表可靠性研究中的应用[J]. 电测与仪表, 2014, 51(19): 15-20.
BAO Jin. The application of highly accelerated life test in smart electricity meter reliability study[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(19): 15-20.
- [15] 电工电子产品加速应力试验规程—高加速寿命试验导则: GB/T 29309—2012[S].
Accelerated stress testing procedures for electric and electronic products—guidance for highly accelerated life test: GB/T 29309—2012[S].
- [16] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [17] 张增照. 以可靠性为中心的质量设计、分析和控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [18] 乔大雁. 微机继电保护硬件可靠性评估和筛选试验的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- [19] 罗雯, 魏建中, 阳辉. 电子元器件可靠性试验工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

收稿日期: 2018-07-23; 修回日期: 2018-09-19

作者简介:

贺春(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网、电力系统自动化、通信规约及规约测试、可靠性, IEC SMB SG3 战略专家组成员, IEC TC57 标委会委员; E-mail: hechun@ketop.cn

陈光华(1987—), 男, 硕士, 主要研究方向为智能变电站自动化设备及系统、智能配电网自动化设备及系统, 通信网络、时间同步及可靠性测试技术; E-mail: chenguanghua@ketop.cn

王朋飞(1988—), 男, 硕士, 主要研究方向为智能变电站自动化设备及系统、通信网络、时间同步及可靠性测试技术; E-mail: wangpengfei@ketop.cn

范瑞兆(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化、电力电子工程。E-mail: 425044659@qq.com

(编辑 魏小丽)