

低压断路器和漏电保护电器的可靠性研究

陆俭国

(河北工业大学电机与电器国家重点学科, 天津 300130)

[摘要] 阐述了低压断路器和漏电保护电器等低压保护类电器可靠性研究的重要性、科学意义及其社会效益, 介绍了国际上权威学术机构 IEEE 在该方面所做工作的概况, 指出了开展该方面研究工作的难度与创新意义; 重点分析讨论了低压断路器和漏电保护电器的故障模式, 在此基础上, 在国内外首次提出了其可靠性指标与可靠性验证试验方案, 为我国电器行业开展低压保护类电器的可靠性工作提出了理论依据与具体方法。

[关键词] 故障模式; 可靠性指标; 可靠性验证试验方案

[中图分类号] TM561 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)06-0036-05

1 引言

低压电器属于基础元件, 广泛应用于各种控制系统和电力系统配电电路。虽然低压电器元件价格不高, 例如一个最便宜的继电器价格仅几元, 一个最贵的低压断路器也仅为几万元, 但是, 由于它量大面广, 其年销售额要超过发电机、锅炉、汽轮机、变压器等大型电工设备。据中国电器工业协会的统计, 2003年度低压电器的销售额达216亿元, 在32类电工类产品中位居第4。在控制系统中一般都要用很多低压电器, 其中任何一个电器元件发生故障都可能导致整个系统发生故障, 所造成的经济损失远远大于该低压电器元件本身的价格。所以, 控制系统中所用的电器元件的可靠性十分重要。航空航天器所用的继电器等电器元件的可靠性尤为重要, 若可靠性不高, 导致航空航天器发生故障所造成的后果就更为严重。例如, 某型号火箭发射时, 就是因为点火系统的一个电接触点间有金属碎屑造成触点短路而导致发射失败; 又如某航天器发射前曾发生控制系统故障, 经检查分析, 缘于某个继电器里有片大小仅为 $0.14\text{ mm} \times 0.12\text{ mm} \times$

0.02 mm 的金属屑卡在衔铁与铁心之间, 使该继电器的1个触点不能可靠接通电路所致。更换继电器后才保证了发射成功。

低压断路器和漏电保护电器是典型的低压保护类电器, 其可靠性的重要程度远高于继电器等控制类电器。因为低压断路器一般用于工矿企业、航天发射设备或船舶电源的总开关, 当电路发生短路等故障时, 若断路器不能及时将短路电流切断, 不仅会损坏设备, 而且可能导致电源及线路损坏, 造成电力配电系统或各种设备电源停电, 经济损失远大于控制系统故障所造成的损失。漏电保护电器除了上述断路器的功能外, 还具有漏电保护功能, 若可靠性不高, 会导致人身触电死亡或发生漏电火灾。因此, 低压电器的可靠性研究不仅具有重要的科学意义, 而且能产生重大的社会效益。

低压断路器和漏电保护电器属于不频繁操作的电器, 短路或漏电故障也不是经常发生的, 所以故障数据很少, 其数据处理的难度大。对于继电器等控制类电器, 美国军标 MIL-R-39016“有可靠性指标的电磁继电器总规范”及国际电工委员会(IEC)的标准 IEC255“电气继电器”, 对可靠性

[收稿日期] 2004-12-30; 修回日期 2005-03-11

[基金项目] 天津市自然科学基金资助项目(013605111); 河北省自然科学基金重点资助项目(500026)

[作者简介] 陆俭国(1936-), 男, 江苏苏州市人, 河北工业大学教授, 博士生导师

指标及试验方法做了规定，可资借鉴；而对于低压断路器及漏电保护电器，IEEE工业应用学会可靠性委员会虽曾于1985年对低压断路器的可靠性做了调查，但仅提出了调查报告，对可靠性指标及试验方法尚未提出可供借鉴的研究成果或标准^[1~3]。因此，其可靠性研究不仅难度大，而且是一项具有重要创新意义的工作。河北工业大学电器学科结合河北省自然科学基金重点项目“漏电保护器的失效机理及其可靠性研究”及天津市自然科学基金重点项目“塑壳断路器失效机理与可靠性研究”，对此进行了研究，取得了重要的研究成果，并在此基础上制定了行业标准“家用和类似用途的过电流保护断路器的可靠性试验方法”与“家用和类似用途的剩余电流动作断路器的可靠性试验方法”。

2 低压断路器和漏电保护电器的故障模式

IEEE电力系统可靠性委员会低压断路器可靠性工作组曾对低压断路器可靠性进行过调查。调查结果表明，脱扣器和脱扣校准故障率是其他故障模式（机械故障，电触头故障）的2倍或更高。而IEEE工业应用学会可靠性委员会1985年对工业用和商业用断路器的可靠性进行的调查表明，使用时间少于15年的断路器：**a.** 室外安装的断路器，其故障率比室内的高1.54倍；**b.** 具有电子脱扣器的断路器，其故障分别为“拒闭合”占44%、“误打开”占56%；**c.** 具有机电脱扣器的断路器，“拒闭合”占93%^[4]。

结合我国低压断路器制造厂反馈的信息，断路器的主要故障模式可归纳为：**a.** 脱扣器的脱扣校准不准确，包括电路发生短路时，脱扣器应脱扣而未脱扣（拒动故障）与电路未发生短路时，脱扣器不应脱扣而误脱扣（误动故障）；**b.** 操作故障，包括进行合闸操作时不能接通电路与分闸操作时不能断开电路。

对于漏电保护电器，其故障模式除了上述两种外，还有在高温（55℃）环境下，电路发生漏电时拒动，或未发生漏电时误动^[5,6]。

由断路器的工作特点及故障模式可知，很难用单个的可靠性指标来描述其可靠性。笔者建议针对拒动故障、误动故障及操作故障分别规定两个可靠性指标。对于拒动故障、误动故障，可采用保护成功率 R 的高低作为可靠性指标（成功率是指产品在规定的条件下完成规定功能的概率，或在规定条件下试验成功的概率）；对于操作故障，可采用操作故障率 λ 的大小作为可靠性指标（故障率是指已工作到 t 时刻的产品，在 t 时刻后的单位时间内发生操作故障的概率）。

在规定的条件下完成规定功能的概率，或在规定条件下试验成功的概率）；对于操作故障，可采用操作故障率 λ 的大小作为可靠性指标（故障率是指已工作到 t 时刻的产品，在 t 时刻后的单位时间内发生操作故障的概率）。

3 低压断路器和漏电保护电器的可靠性指标

断路器对用电设备的保护包括过载和短路保护。鉴于发生短路故障时对用电设备造成的危害比发生过载时严重得多，笔者提出主要考虑断路器在线路发生短路时的保护可靠性，采用瞬动保护成功率 R （简称保护成功率）和操作故障率 λ 作为断路器的可靠性特征量，并分别将操作故障率和保护成功率等级作为其可靠性指标。

笔者推荐按最大操作故障率 λ_{\max} 的数值分为三个操作故障率等级（三级、亚四级、四级）；按不可接收的保护成功率 R_1 的数值分为五个保护成功率等级（一级、二级、三级、四级、五级）。操作故障率等级和最大操作故障率 λ_{\max} 的数值见表1，保护成功率等级和不可接收的保护成功率 R_1 的数值见表2。

表1 断路器操作故障率等级与 λ_{\max} 数值

Table 1 Failure rate level and maximum failure rate of circuit-breaker

操作故障率等级	最大操作故障率 λ_{\max} (1/10次)
三级	1×10^{-3}
亚四级	3×10^{-4}
四级	1×10^{-4}

表2 断路器保护成功率等级与 R_1 数值

Table 2 Success ratio level and unacceptable success ratio of circuit-breaker

保护成功率等级	不可接收的保护成功率 R_1
一级	0.99
二级	0.98
三级	0.97
四级	0.96
五级	0.95

对于漏电保护电器，同样可采用保护成功率 R 和操作故障率 λ 的等级作为可靠性指标，但保

护成功率除了考虑是否发生短路故障时拒动或误动外,还应考虑是否发生漏电故障时的拒动和误动。

4 低压断路器和漏电保护电器的可靠性验证试验方案

可靠性验证试验方案中有截尾序贯试验方案和定时或定数截尾试验方案。序贯试验方案是指在一批产品中抽取一定数量样品进行试验,每当有一个样品失效或一次试验失败时就进行是否应拒收或接收的判断,若还无法做出判断,则继续试验直到能做出拒收或接收的判断为止。为防止经很多次试验仍不能做出判断而使试验时间过长,规定了停止试验的判断方法,故称为截尾序贯试验方案。定时或定数截尾试验方案是指所抽取的试验样品的累积试验时间达到了规定的截尾时间而累积的失效数未达到截尾失效数,则判为接收;若累积试验时间还未达到规定的截尾时间而累积的失效数已达到截尾失效数,则判为拒收。两者各有优缺点。对于截尾序贯试验方案,在做出判决时所需要的平均失效数和平均累积试验时间最少,但最大的累积试验时间和失效数可能会超过定时或定数截尾试验方案,试验费用及试品数的变化幅度也较大,且在试品、试验设备及人员安排等管理方面存在一定的困难,因此一般适用于价格昂贵的产品可靠性验证试验。对于定时或定数截尾试验方案,在试验前就能确定试验的最大累积试验时间或试品的最大数量,因而在试验之前就可以确定费用、试验设备及人力的最大需要量,一般适用于价格较低、生产批量较大的产品的可靠性验证试验。

低压断路器和漏电保护电器的年产量较大,价格不太贵,建议在断路器和漏电保护电器的操作故障率验证试验和保护成功率验证试验中采用定时或定数截尾试验方案进行考核。

4.1 操作故障率验证试验抽样方案

故障率是指产品工作到 t 时刻后的单位时间内发生故障的概率。

故障率抽样检查采用一次计数抽样检查方案。根据抽样检查的基本理论可知,抽样检查方案的接收概率 $L(\lambda)$ 与故障率 λ 间的关系如图1所示^[7]。

其中, λ_0 为可接收的故障率, λ_1 为不可接收的故障率, α 为生产方风险, β 为使用方风险。由图1可得下列关系式:

$$L(\lambda_0) = 1 - \alpha \quad (1)$$

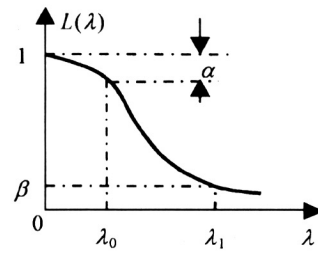


图1 故障率抽检特性曲线

Fig.1 OC curve for failure rate

$$L(\lambda_1) = \beta \quad (2)$$

故障率抽样方案就是根据给定的 λ_0 , λ_1 , α 和 β 值来确定试品数 n 和允许失效数 A_c 。

当批产品总数 $N > 10n$ 时,可用二项概率公式计算接收概率 $L(\lambda)$ 。设所抽 n 个样品试验到规定时间(或操作次数) t_g 时 r 个样品故障(失效),其概率为 $C_n^r p^r q^{n-r}$, 抽样方案的接收概率为 $\sum_{r=0}^{A_c} C_n^r p^r q^{n-r}$, 在故障率抽样检查时, p 及 q 分别可用累积故障概率 $F(t_g)$ 及可靠度 $R(t_g)$ 代替,即

$$L(\lambda) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r [F(t_g)]^r [R(t_g)]^{n-r} \quad (3)$$

当产品寿命服从单参数指数分布时, $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$; $R(t) = e^{-\lambda t}$, 将其代入式(3)可计算出故障率抽样方案的接收概率为

$$L(\lambda) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r (1 - e^{-\lambda t_g})^r (e^{-\lambda t_g})^{n-r} \quad (4)$$

对于故障率较低的产品, λt_g 不太大, 这时 $e^{-\lambda t_g} \approx 1 - \lambda t_g$, $1 - e^{-\lambda t_g} \approx \lambda t_g$, 式(4)可变成

$$L(\lambda) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r (\lambda t_g)^r (1 - \lambda t_g)^{n-r} \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)和式(2)可得

$$1 - \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r (\lambda_0 t_g)^r (1 - \lambda_0 t_g)^{n-r} = \alpha \quad (6)$$

$$\sum_{r=0}^{A_c} C_n^r (\lambda_1 t_g)^r (1 - \lambda_1 t_g)^{n-r} = \beta \quad (7)$$

如满足 $n\lambda t_g < 5$ 及 $\lambda t_g < 0.1$, 则二项概率可用泊松概率近似, 因而故障率抽样方案的接收概率 $L(\lambda)$ 可用下式计算:

$$L(\lambda) \approx \sum_{r=0}^{A_c} \frac{e^{-n\lambda t_g} (n\lambda t_g)^r}{r!} \quad (8)$$

将式(8)代入式(1)和式(2)可得:

$$1 - \sum_{r=0}^{A_c} \frac{e^{-n\lambda_0 t_g} (n\lambda_0 t_g)^r}{r!} = \alpha \quad (9)$$

$$\sum_{r=0}^{A_c} \frac{e^{-n\lambda_1 t_g} (n\lambda_1 t_g)^r}{r!} = \beta \quad (10)$$

根据式 (6) 和式 (7)，或在 $n\lambda t_g < 5$ 及 $\lambda t_g < 0.1$ 的条件下，根据式 (9) 和式 (10)，就可由给定的 λ_0 ， λ_1 ， α 和 β 值来确定故障率抽样方案的 n 及 A_c 值。故障率抽样检查中常常采用所谓 λ_1 方案或 LTRFR 方案，即只根据给定的 λ_1 ， β 值来确定故障率试验抽样方案，所以由式 (7) 或式 (10)

来确定 n 及 A_c 。由一个方程来确定两个未知数会有许多组解，所以笔者取 $A_c = 0, 1, 2, \dots$ ，根据式 (7) 或在 $n\lambda t_g < 5$ 及 $\lambda t_g < 0.1$ 条件下根据式 (10) 求出相应的 n 值。若求得的 n 值不是整数，则取比求得值较大的整数作为 n 的值。

所求得的故障率验证试验方案见表 3，表 3 中的截尾时间 $T_c = nt_g$ 。

表 3 故障率验证试验方案 ($\beta = 0.1$)

Table 3 Sampling test plans for failure rate with $\beta = 0.1$

允许失效数 A_c	0	1	2	3	4	5	6	7	8
三级故障率等级	2.3	3.89	5.32	6.68	7.99	9.27	10.53	11.77	13.0
截尾时间 T_c (10^4 次)									
四级故障率等级	7.68	13.0	17.7	22.3	26.6	30.9	35.1	39.2	43.3
四级故障率等级	23.0	38.9	53.2	66.8	79.9	92.7	105.3	117.7	130

4.2 保护成功率验证试验抽样方案

成功率是指一个产品在规定条件下完成规定功能的概率，或产品在规定条件下试验成功的概率。它是包括断路器在内的所有保护类电器共有的可靠性特征量，是针对使用中出现的拒动故障和误动故障而提出的。

根据成功率定数验证试验理论，在参数 R_0 ， R_1 ， α 和 β 条件下，接收概率 $L(R)$ 与产品成功率 R 间的关系如图 2 所示。

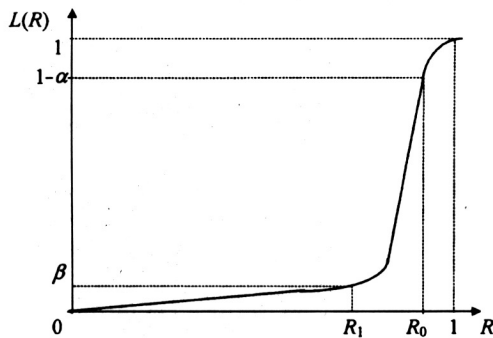


图 2 成功率抽检特性曲线

Fig.2 OC curve for success ratio

图中 R_0 为可接收的成功率； R_1 为不可接收的成功率。

由图 2 可得到下列关系式：

$$L(R_0) = 1 - \alpha \quad (11)$$

$$L(R_1) = \beta \quad (12)$$

当生产批量 $N > 10n$ 时，定数验证试验方案

的接收概率可用下式计算：

$$L(R) = \sum_{r=0}^{A_c} C_n^r R^{n-r} (1-R)^r \quad (13)$$

式中 R 为产品成功率； A_c 为合格判定数。

将式 (13) 代入式 (11) 和式 (12) 可得

$$\sum_{r=0}^{A_c} C_n^r R_0^{n-r} (1-R_0)^r = 1 - \alpha \quad (14)$$

$$\sum_{r=0}^{A_c} C_n^r R_1^{n-r} (1-R_1)^r = \beta \quad (15)$$

当对某批产品提出一定的成功率要求后，即给定了 R_0 ， R_1 ， α 和 β 值，则可由式 (14)、式 (15) 确定出验证试验方案的试品数 n 及合格判定数 A_c 。由于 n 及 A_c 为正整数值，公式的精确解很难求出或根本不存在，因此可将式 (14)、式 (15) 改为

$$\sum_{r=0}^{A_c} C_n^r R_0^{n-r} (1-R_0)^r \geq 1 - \alpha \quad (16)$$

$$\sum_{r=0}^{A_c} C_n^r R_1^{n-r} (1-R_1)^r \geq \beta \quad (17)$$

由式 (16)、式 (17) 求出最小整数解，就可以得到定时或定数验证试验方案，它既保证了使用方的利益，又保证了生产方的利益。但由这些试验方案做出拒收/接收某批产品所需的试品数都比较大，试验费用也比较高，在实际应用中，生产厂家和用户都无法接受。所以，一般可采用两参数 λ_1 和 β 来确定试验方案的方法，即根据式 (17) 及给定的 A_c 值确定出最小解 n 。表 4 为参数 R_1 和 β 条件

下的成功率验证试验方案。

表4 成功率验证试验方案 ($\beta = 0.1$)

Table 4 Test plans for success ratio with $\beta = 0.1$

A_c	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_1 = 0.95$	77	105	132	158	184	209	234	258
$R_1 = 0.96$	96	132	166	198	230	262	292	323
$n_f R_1 = 0.97$	129	176	221	265	308	349	390	430
$R_1 = 0.98$	194	265	333	398	462	525	587	648
$R_1 = 0.99$	388	531	667	798	926	1051	1175	1297

表中 n_f 为做出接收判决所必须的试品数或试验次数。

5 结语

笔者阐述了继电器等控制类电器和低压断路器及漏电保护电器等保护类电器元件可靠性的重要性,从故障模式出发,首次提出了以保护成功率等级及操作故障率等级作为低压保护电器的可靠性指标体系;从抽样理论与可靠性理论出发,提出了低压保护电器保护成功率和操作故障率的验证试验方案,为电器行业开展低压保护电器的可靠性工作提出了理论依据与具体方法,对研究与提高低压保护电器的可靠性具有重要意义。

参考文献

- [1] O'Donnell P, Braun W F, Heising C R, et al. Closure to discussion of "Survey results of low-voltage circuit breakers as found during maintenance testing: working group report" [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33 (5): 1372
- [2] Nochumson C J. Discussion of "Survey results of low-voltage circuit breakers as found during maintenance testing: working group report" [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33 (5): 1370~1371
- [3] O'Donnell P, Braun W F, Heising C R, et al. "Survey results of low-voltage circuit breakers as found during maintenance testing: working group report" [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33 (5): 1367~1369
- [4] Norris A. Report of circuit breaker reliability survey of industrial and commercial installations [A]. IEEE Conference Record of Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference [C]. 1989. 1~16
- [5] 漏电保护器的一般要求 [S]. GB6829 - 1995, 北京: 中国标准出版社, 1995
- [6] 梁静毅, 陈晓东, 刘炳彰. 二极漏电保护器失效分析 [J]. 低压电器, 1993, (1): 17~19
- [7] 陆俭国主编. 电器可靠性理论及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996

Study on Reliability of Low-voltage Circuit Breakers and Residual Current Protective Electrical Apparatus

Lu Jianguo

(Hebei University of Technology National Key Academic Subject of Electric Machine and Electrical Apparatus, Tianjin 300130, China)

[Abstract] This paper expounded the importance of reliability study on low-voltage circuit-breakers and residual current operated circuit-breakers, introduced the general situation of their reliability study carried out by the international authoritative academic academy IEEE and pointed out the difficulty and significance of the research work on these aspects. Then this paper discussed the failure modes of low-voltage circuit-breakers and residual current operated circuit-breakers, and provided their reliability indexes and reliability compliance test plans at the first time, which provided a kind of theory and method for the reliability research work of low-voltage protective electrical apparatus carried through in Chinese electrical apparatus industry.

[Key words] failure modes; reliability indexes; reliability compliance test plan