

电子式剩余电流保护器脱扣电磁铁 可靠性提高研究

石菲菲¹, 朱文灏^{1,2}, 郭其一²

(1. 上海施耐德低压终端电器有限公司, 上海 201109;

2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)



石菲菲(1985—), 女, 工程师, 主要从事低压终端电器可靠性研究。

摘要: 分析电子式剩余电流保护器产品故障的原因, 提出其脱扣电磁铁可靠性提高的必要性。通过脱扣电磁铁的改进设计以及关键参数的计算, 得出改进后参数。采用仿真方法验证此改进设计方案的效果。通过试验对装有改进后脱扣电磁铁的产品进行验证, 验证其性能达到设计指标和可靠性要求。

关键词: 剩余电流保护; 脱扣电磁铁; 磁通变化; 可靠性

中图分类号: TM 561; TM 574 文献标志码: B 文章编号: 2095-8188(2015)06-0010-05

Research on Improvement of Reliability for Electromagnetic Release for Residual Current Operated Protective Device

SHI Feifei¹, ZHU Wenhao^{1,2}, GUO Qiyi²

(1. Schneider Shanghai Low Voltage Terminal Apparatus Co., Ltd., Shanghai 201109, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Analysis was made on the failure model of residual current operated protective device and the root cause is the failure of electronic relay inside. Research was taken to improve the parameters of the relay. Simulation was done and the result could meet the goal. The tests result of the products with this new relay shows the improvement of reliability was obvious.

Key words: residual current protection; electromagnetic release; magnetic flux change; reliability

0 引言

剩余电流保护器(Residual Current Protective Device, RCD)主要是用在用电设备发生剩余电流或人体发生击电事故时,对人身和设备安全进行保护。电子式RCD相对于电磁式产品,其成本低,市场普及较广。当前,电子式RCD已被大量使用,并在减少或避免由于线路或电气设备发生剩余电流事故方面发挥了巨大作用。然而,电子式RCD故障损坏的现象并不少见,从而影响了正常的人体保护与用电安全。因此,研究电子式RCD的故障原因、提高其可靠性具有重要的现实意义。

电子式RCD在实际使用中,产品拒动多数

是因为内部脱扣电磁铁烧毁。若RCD安装不当(未和断路器正确拼装或进出线接反)或用户多次频繁按测试键使其频繁脱扣时,容易产生脱扣电磁铁线圈烧毁故障。脱扣电磁铁烧毁后,RCD不能正常脱扣或不能在额定时间内脱扣,此时若线路中再次产生剩余电流故障,RCD则不能及时触发动作,无法切断线路中的电流,起不到应有的保护功能,将对人身和设备安全造成极大威胁。

1 原理及故障分析

电子式RCD电路如图1所示。

朱文灏(1977—),男,高级工程师,博士研究生,研究方向为智能电网用户端安全性与可靠性。

郭其一(1961—),男,教授,研究方向为控制理论与方法及其在电力系统中的应用、虚拟样机在低压电器中的应用。

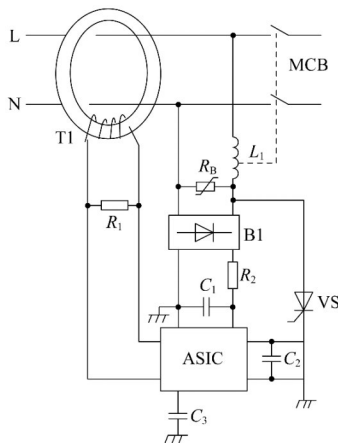


图1 电子式RCD电路原理

在正常情况下,回路中无剩余电流,电流的矢量和等于零,即 $I_L + I_N = 0$ 。当回路中存在剩余电流时 $I_L + I_N \neq 0$,即零序电流互感器一次侧矢量和不为零,这样,在零序电流互感器的二次线圈中就有一个感应电压输出。此感应电压信号传输到检测芯片ASIC,经其判定确认并延时后,控制晶闸管VS导通,脱扣电磁铁线圈 L_1 得电,推动断路器MCB动作,断开回路,脱扣电磁铁线圈 L_1 两端无电压,停止工作。

实际工作中,线路中剩余电流故障产生到保护器动作断开的的时间间隔较短(约50ms)。在正常工作电压下,根据发热公式 $Q = I^2 R t$,并叠加铁心内产生的磁滞损耗和涡流损耗发热,脱扣电磁铁线圈动作瞬间产生的热量约为40~90J,线圈上的瞬时温升达4~9K。当发生剩余电流故障后,若MCB未能断开主回路,则脱扣电磁铁线圈 L_1 始终处在导通状态。ASIC的导通延时为130ms,即VS导通130ms后关断。极限状态下,若剩余电流故障产生时主回路未断开,脱扣电磁铁线圈B1接通过程产生的热量导致的温升高达到20~30K,由于产品内部线圈散热缓慢,而线圈骨架塑料(PBT)的最高工作温度为150℃,若在产品故障状态下短时间内频繁导通线圈,脱扣电磁铁极易烧损。

脱扣电磁铁烧毁后进行解剖可知脱扣电磁铁内弹簧在顶杆孔处卡死,导致顶杆不能正常伸缩,功能丧失。另外,顶杆在骨架内的运动倾斜,说明在过度热量下,线圈支架塑料发生形变,导致顶杆及弹簧运动部件受力偏移。

由上述分析可知,提高脱扣电磁铁动作可靠性,需改进其参数,增大其内阻,降低发热,同时应避免脱扣力大幅降低和最低脱扣电压升高。根据GB 16917.1—2004《家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCBO)第1部分:一般规则》中9.9.1.5要求,RCD产品需要在50V电压下正常工作。选取脱扣电磁铁线圈参数的最佳特性平衡点尤为关键。本改进设计目标:①脱扣电磁铁发热功率下降20%;②最低工作电压 ≤ 40 V(考虑一定的设计裕量)。此设计通过设计优化和仿真计算的方法对参数进行改进,以提高脱扣电磁铁的可靠性。

2 改进设计及仿真

2.1 脱扣电磁铁线圈静态特性计算及仿真

脱扣电磁铁结构如图2所示。在静态下,铁心受到弹簧压力静止处在螺管线圈末端。当线圈中有电流通过时,铁心受到电磁力和弹簧的合力,当电流增大使得电磁力大于弹簧力时,铁心克服弹簧力运动,并推动顶杆产生动能,从而推动外部机构脱扣,完成输出。

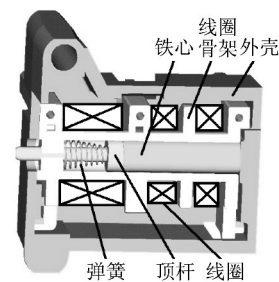


图2 脱扣电磁铁结构

假设铁心处于饱和状态,则有

$$\begin{cases} F_x = F_{\max} f(x) \\ F_{\max} = C S_{xt} \frac{IN}{h_{xq}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_x ——铁心受到的电磁力;

F_{\max} ——最大电磁吸力;

x ——为铁心位移;

C ——常数;

IN ——线圈激磁安匝;

S_{xt} ——铁心的横截面积;

h_{xq} ——线圈高度。

通过式(1)计算可得不同安匝数下脱扣电磁

铁的脱扣力。对计算得到的参数进行仿真。仿真过程运用运动分析、磁场分析、位移分析,模拟计算不同线圈匝数脱扣电磁铁在电磁力作用下的受力与运动位移。通过仿真计算可得脱扣电磁铁的动作时间 t 与输入电压 U 之间的关系曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,当匝数增加或输入电压 U 下降时,动铁心受到的电磁力 F_x 下降,脱扣电磁铁动作时间增加。当 F_x 下降到等于动铁心受到的反力弹簧的反力 F_f 时,脱扣电磁铁不输出动作,脱扣时间为无穷大。随匝数增加,脱扣电磁铁的最低工作电压值在上升。

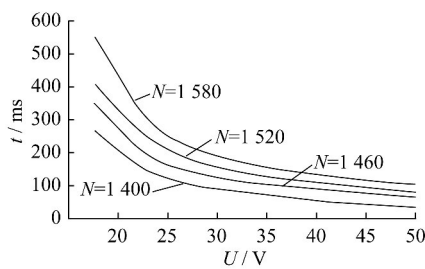


图 3 不同匝数脱扣电磁铁脱扣时间与工作电压的关系

在相同直流电压下,对不同参数线圈样品进行脱扣力 F 和位移 x 的静态仿真,仿真结果如图 4 所示。由图 4 可见,线圈匝数增加后,脱扣电磁铁的静态力值下降,但下降值与匝数增加值并非成线性关系。

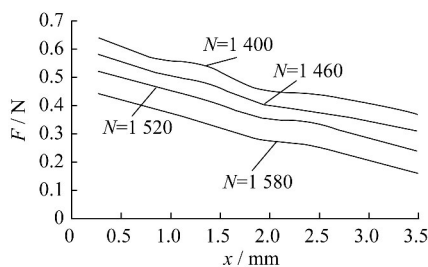


图 4 脱扣力和位移的关系

通过静态特性计算及仿真,对比原脱扣电磁铁线圈常数 $N = 1400$ 匝、线径 $d = 0.12$ mm 下的特性,综合各组计算参数和产品设计要求,并考虑一定的设计裕量,选取 $N = 1520$,线径 $d = 0.1$ mm 为改进后优化参数。

2.2 脱扣电磁铁动态计算及仿真

脱扣电磁铁的动作过程包含电、磁和机械等参量的变化。在电路上遵守电压平衡方程,在磁

场上遵守麦克斯韦方程,在运动上遵守达朗贝尔运动方程。因为动态过程历时极短,电磁系统又存在热惯性,热的变化小,故可忽略不计。若忽略铁心中的涡流,不计铁心磁阻,将这些方程进行转化和综合之后,电磁铁吸合过程的动态方程组可描述为

$$\begin{cases} \frac{d\psi(t)}{dt} = u(t) - i(t)R \\ \frac{dv}{dt} = \frac{[F_x - F_f(x)]}{m} \\ \frac{dx(t)}{dt} = v(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\psi(t)$ ——通过磁系统的磁链值;

u, i ——电路中的电压和电流值;

R, ρ, m ——铁心磁阻、速度、质量;

F_f ——动铁心受到的反力弹簧的反力。

电磁系统动态特性计算方法有基于磁场计算和基于磁路计算两种不同途径。求解电磁系统动态特性方程时的经典工程简化计算方法有简化分析法、图解法、图解分析法等。当前,广泛应用的是有限元分析技术对电磁系统进行数值求解。此方法是将时间变量 t 离散化,用四阶龙格-库塔法求解。由于变量 F_x 是在 u, R, m, F_f 都给定的条件下的 ψ, x 的函数,其求解实质是在已知系统的磁链 ψ 和给定动铁心位移 x 、电流 i 的条件下,求吸力 F_x 和运动时间 t 的问题。本设计使用 Ansys 软件对脱扣电磁铁线圈进行有限元分析计算。首先,建立模型,根据三维图形尺寸对铁心、线圈分别建模,忽略对计算影响不大的因素,如倒角、壁孔等。其次,对建模实体进行网络剖分,并定义所选的材料属性,包括空气磁导率、铁心磁导率、铜导线电阻率等,并对区域网格单元剖分。最后进行加载求解。

设定仿真边界条件:运动初始时刻交流电压相角 $\varphi = 0^\circ$,结束时 $\varphi = 180^\circ$,分别对改进前和改进后脱扣电磁仿真,得出不同电压下铁心位移与时间的关系,如图 5、图 6 所示。可见,电磁铁输入电压越高,铁心位移越短,当电压低到一定值时,铁心位移始终不能达到脱扣终止位置,高于此电压的最小值为最低工作电压值。由图 5、图 6 可得,改进前、后的最低工作电压值分别为 28 V 和 33 V,均可满足产品在 40 V 工作电压下

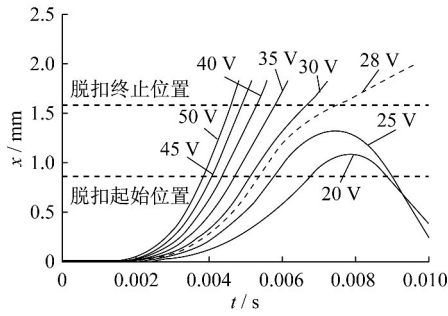


图5 $N=1400$ 匝时,改进前脱扣时间与位移关系

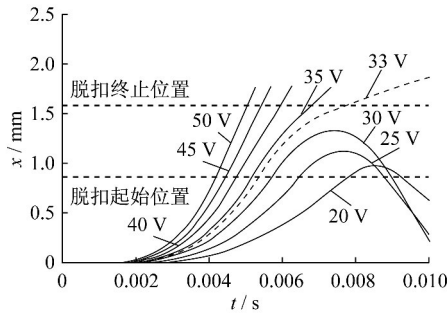


图6 $N=1520$ 匝时,改进后脱扣时间与位移关系

正常脱扣的设计要求。

2.3 脱扣电磁铁线圈发热计算

由于脱扣电磁铁线圈的发热在短时间产生(一般在100 ms以内),线圈未散热,全部热量都被用来提高线圈的温度,故可根据式(3)推导得线圈温升。

$$\begin{cases} I^2 R_{xq} = K_T S_{sr} \tau_{xq} \\ R_{xq} = \frac{\rho_x \pi N (D_w + d_z)}{2q_x} \\ Nq_x = f_t b_{xq} h_{xq} \end{cases} \quad (3)$$

$$\tau_{xq} = \frac{\rho_x}{2K_T f_t b_{xq} h_{xq}^2} (IN)^2 \quad (4)$$

式中: τ_{xq} ——线圈温升;

K_T, S_{sr} ——线圈散热系数及面积;

R_{xq}, f_t ——线圈电阻及填充系数;

b_{xq}, h_{xq} ——线圈厚度及高度;

ρ_x, q_x ——导线电阻率及截面积;

D_w, d_z ——线圈外径及铁心直径。

利用上述公式进行线圈发热计算,并通过软件仿真对比改进前和改进后的脱扣电磁铁线圈温升,如图7所示。可见在 $t=100$ ms 时刻,改进后的温升比改进前下降了20%,达到设计要求。

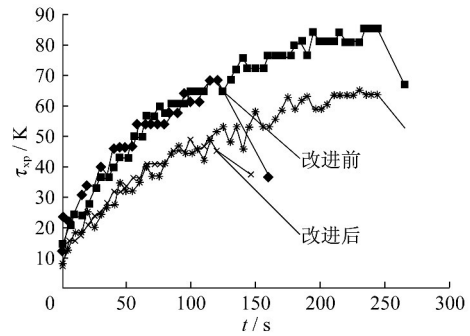


图7 脱扣电磁铁改进前、后发热温升比对

2.4 脱扣电磁铁机械结构优化设计

顶杆、弹簧和线圈骨架运动部件之间的机械公差配合也是引起脱扣电磁铁不能正常工作的原因之一,故需对此进行改进。改进图如图8所示。首先,增加顶杆直径 D_1 ,以减小与线圈骨架孔 D_2 的间隙配合,降低顶杆在孔中运动偏斜的风险,同时减小弹簧卡入线圈骨架孔的概率;其次,增大顶杆台阶 g_1 尺寸,同时减少 g_2 尺寸,以增大与弹簧的过盈配合,增大摩擦力,达到在运动中较好地导向和减少顶杆和弹簧脱离导致受力偏斜的风险。

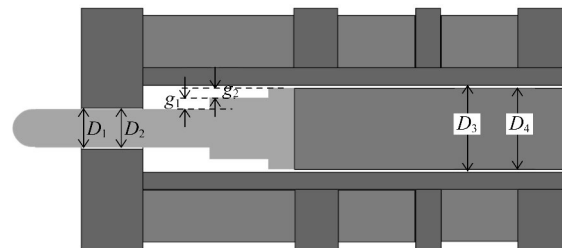


图8 改进图

3 试验验证

3.1 脱扣性能测试

增大电磁线圈阻值,虽然会降低流经电磁线圈的电流,从而达到降低发热的效果,但会对剩余电流脱扣阈值及脱扣时间产生影响。下面两组试验分别对比改进前、后的脱扣电磁铁的脱扣阈值、脱扣时间以及最低工作电压进行测量。每组样品10个,以平均值做比较。

3.1.1 脱扣阈值及脱扣时间验证

不同工作电压下,改进前后脱扣电磁铁脱扣电流及时间如表1所示。由表1试验数据得出,在不同工作电压(230、50 V)下,增大电磁线圈阻值,改

进后的脱扣电磁铁未导致产品剩余电流脱扣阈值及脱扣时间显著增大,仍在产品设计要求范围内(脱扣电流 17.1~25.5 mA,脱扣时间 <100 ms)。

表1 改进前后脱扣电磁铁脱扣电流及时间

项目	$U_c = 230\text{ V}$		$U_c = 50\text{ V}$	
	改进前	改进后	改进前	改进后
脱扣电流/mA	22.4	22.5	22.3	22.5
脱扣时间/ms	37.9	39.6	51.3	66.6

3.1.2 最低工作电压验证

改进前后的最低工作电压下脱扣时间如表2所示。由表2可知,脱扣电磁铁线圈匝数改进后,最低工作电压下脱扣时间并未发生显著变化,结果符合产品设计要求。

表2 改进前后的最低工作电压下脱扣时间

工作电压/V	动作时间/ms	
	改进前	改进后
25	152.2	231.8
22	219.1	380.4

3.2 抗电涌试验

在电涌电压下,脱扣电磁铁线圈两端电压发生变化,对脱扣特性产生影响,如图9所示,改进前、后脱扣电磁铁两端电涌电压波形未有显著差异,均能正常通过此试验。

3.3 寿命试验

参照 GB 16917.1 中 9.16 测试按键试验要求和 9.9.1 动作特性试验要求,对改进前后的样机做了比对试验。其中,试验数据显示改进后的产品电寿命比改进前提高了 10%,达到了可靠性提高的预期。

4 结 语

本文针对 RCD 故障原因进行分析,采用设计优化和仿真的方法对脱扣电磁铁进行改进,增加线圈匝数及改进脱扣电磁铁结构。试验结果表明,采用优化改进的脱扣电磁铁有效降低了正常

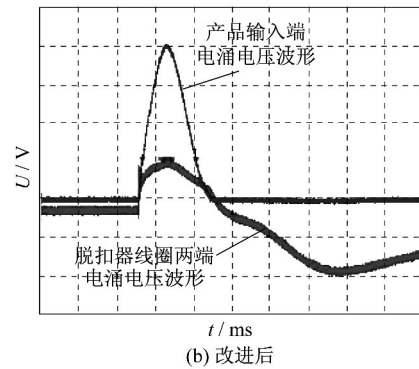
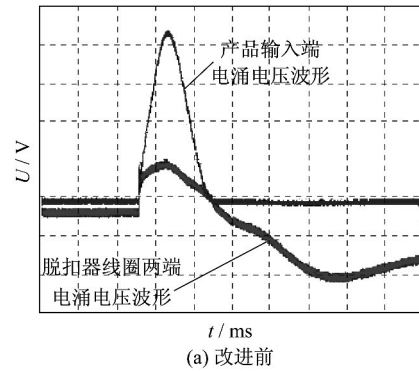


图9 脱扣电磁铁线圈两端电压变化对脱扣特性的影响

工作条件下电磁线圈上产生的热量,显著提高了脱扣电磁铁工作的性能,从而提高了 RCD 产品的动作可靠性。

【参考文献】

- [1] 张冠生. 电磁铁与自动电磁元件 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2] 陈德桂. 磁通变换器的优化设计 [J]. 低压电器, 2005(9): 1-5.
- [3] 周英姿, 尹天文, 李甲, 等. 磁通变换器的动态特性仿真 [J]. 低压电器, 2011(12): 1-3.
- [4] 张业. 电压型螺线管式脱扣器的设计与有限元分析 [J]. 低压电器, 2013(17): 18-21.
- [5] 李凡璋, 黄世泽, 郭其一, 等. 基于 Ansys 的磁通变换器的电磁吸力仿真 [J]. 低压电器, 2013(22): 5-10.
- [6] 周英姿, 许文良, 孙吉升. 磁通变换器的特性仿真及优化设计 [J]. 低压电器, 2014(9): 29-32.

收稿日期: 2014-12-12

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告