

基于电磁斥力开断器的直流限流熔断器 设计方法与限流特性

张超^{1,2}, 王晨¹, 庄劲武¹, 徐国顺¹

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在考虑短路分断特性和温升特性要求的基础上, 得到了额定直流 640 V/2 kA 限流熔断器的性能指标设计约束条件, 推导出了各性能指标的解析计算式和各组件参数的设计原则。分析了不同短路电流上升率下的限流特性, 结果表明: 介质恢复时间 t_z 和起弧分断时间 t_p 都随着短路电流 di/dt 的增大而减小, 限流峰值 I_p 随着 di/dt 的增大而增大。为了进一步增加介质恢复时间和改善限流性能, 采取了减小电弧触发器支路电感的方法, 改进后的样机可将 di/dt 为 8.3 A/ μ s 的短路电流限制在 22.2 kA, t_p 减小为 3.3 ms, t_z 增加到 600 μ s, 限流熔断器限流性能和可靠性得到了明显提高。

关键词: 电磁斥力; 开断器; 限流熔断器; 介质恢复

中图分类号: TM 471

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.025

0 引言

随着船舶电力系统容量的不断增大, 短路电流水平也日益提高, 现有断路器、熔断器的极限分断能力不足, 且动作时间较长, 难以满足短路故障快速限流分断的要求^[1-2]。在电网中装设新型故障限流装置是解决该类问题的理想方案^[3-4], 混合型限流技术是很有前途的发展方向, 其将不同限流技术相结合形成性能更优的限流装置, 如混合型超导限流器^[5-7]、混合型限流断路器^[8-10]、混合型限流熔断器^[11-14]等。其中, 混合型限流熔断器将爆炸开断技术与快速熔断器技术相结合, 是目前商用化应用最广泛的限流保护技术之一。根据故障检测方式的不同, 混合型限流熔断器可分为电子测控式限流熔断器和电弧触发式限流熔断器 2 种。

电子测控式限流熔断器和电弧触发式限流熔断器的主要区别在于: 电子测控式限流熔断器是通过电流传感器检测电流的幅值或变化率作为故障判据来触发开断器分断^[11]; 而电弧触发式限流熔断器采用了电弧触发器取代电流传感器和控制单元, 直接利用短路电流的热效应作为检测触发条件, 因此具有可靠性高、不需外接电源等优点^[12-13]。然而无论是电子测控式限流熔断器还是电弧触发式限流熔断器, 它们的高速开断器都是依靠炸药爆炸产生的冲击力来进行驱动, 使开断器快速分断并将电流转移到灭弧熔断器上。而采用炸药驱动的局限性在于: 炸药寿命有限, 会随使用时间的增长而逐渐

分解失效; 炸药等火工品的价格昂贵, 每次动作后需要更换, 经济性差; 对环境温度要求苛刻^[14]。因此, 需要考虑能够替代炸药驱动开断器的其他新型快速驱动的开断器方案。

1972 年 S. Basu 等提出了一种电磁斥力机构方案^[15], 其利用脉冲放电电流通过盘状线圈, 在附近铜盘中感应出较大涡流, 并产生斥力作用, 从而推动机构快速动作。电磁斥力机构机械延迟时间短, 初始运动速度快, 特别适合作为快速驱动机构。此后, 日本、瑞士、荷兰、韩国等国都开展了电磁斥力机构的研究^[16-19], 国内大连理工大学、山东大学、华中科技大学、西安交通大学、海军工程大学等也开展了相关研究, 并取得了大量成果^[20-24]。目前主要的应用方案都是将电磁斥力技术应用于快速断路器的操作机构中, 短路发生时驱动触头快速分断, 其他应用方案并不多见。

本文在前期电磁斥力技术和电弧触发式限流熔断器的研究基础上, 将电磁斥力技术应用于限流熔断器的开断器中, 设计了一种采用电磁斥力技术来分断银片的新型开断器方案, 针对船舶直流电力系统, 开展了额定直流 640 V/2 kA 限流熔断器的设计和限流特性试验。在考虑短路分断特性和温升特性要求的基础上, 推导了样机关键性能指标的解析计算式, 得到了各组件的参数设计原则。样机的限流特性试验表明: 整机工作的可靠性和限流性能满足了系统设计的要求, 并验证了本文提出的参数设计方法的正确性。

1 新型限流熔断器方案

新型限流熔断器方案如图 1(a) 所示, 主要由电弧触发器、电磁斥力开断器和灭弧熔断器三部分构成。电弧触发器由 2 根铜排和焊接在两者之间的银片组

收稿日期: 2014-12-19; 修回日期: 2015-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307179, 51207166)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307179, 51207166)

成。新型电磁斥力开断器由 2 根铜排和焊接在两者之间的银片、绝缘窄缝灭弧室、绝缘栅片、斥力盘和斥力驱动电路组成^[25]。图 1(b)为限流熔断器换流过程等效电路图,图中, R_a 为电弧触发器电阻; R_b 为开断器电阻; R_2 为灭弧熔断器支路电阻; U_a 为电弧触发器熔断后的电弧电压; L_1 为电弧触发器和开断器串联后的支路电感; L_2 为灭弧熔断器支路电感。

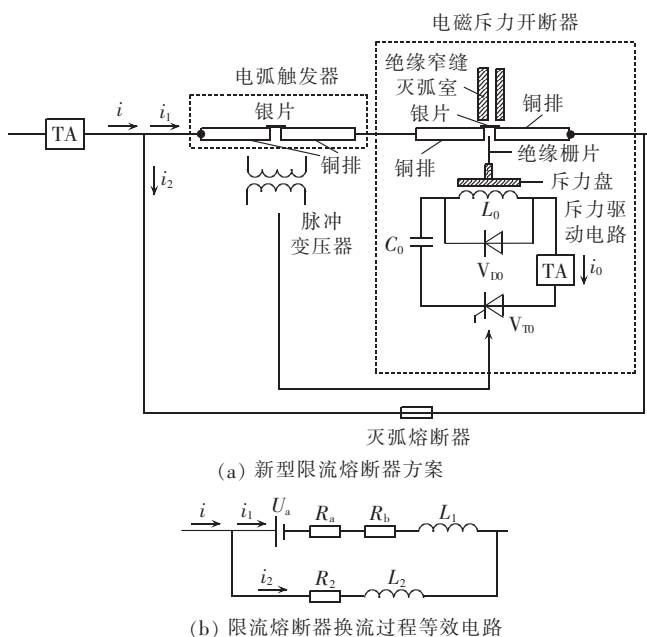


图 1 基于电磁斥力开断器的限流熔断器方案

Fig.1 CLF based on electromagnetic repulsion isolator

新型限流熔断器工作原理是:正常工作时,电流主要从电弧触发器及开断器上流过,灭弧熔断器有少量电流流过。电弧触发器是一个带有狭颈的熔体导电部件,正常工作时,大额定电流流过电弧触发器,其熔体狭颈处的热量可以通过相邻的金属带传出去。发生短路时,狭颈处的发热量来不及传导,温度迅速上升而使熔体狭颈熔断起弧^[26]。限流熔断器短路分断过程示意图如图 2 所示。短路发生后,电弧触发器在 t_0 时刻熔断起弧,电流 i_1 将立即向灭弧熔断器上转移,同时由脉冲变压器向 V_{T0} 触发信号,由于绝缘栅片顶断开断器中的银片需要经过 t_d 动作延迟时间,即当 t_2 时刻栅片顶断银片时,电流 i_1 经过 t_c 的换流时间已经全部或大部分转移到灭弧熔断器上,因此开断器中银片分断时所形成的燃弧能量极小。然后栅片继续向上运动并形成足够的开距, t_p 时刻灭弧熔断器熔断起弧产生过电压,峰值为 U_p ,此电压加载到开断器两端,如果开断器内部介质恢复绝缘,则可以承受该过电压, t_z 为开断器电流过零后的介质恢复时间。

该方案又称为触发器内置方案,与文献[21-23]将触发器置于并联支路外部的触发器外置方案相比,

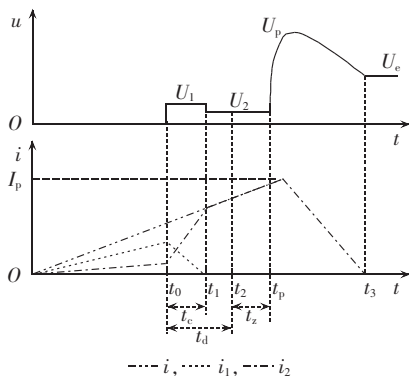


图 2 限流熔断器分断过程的电流、电压示意图

Fig.2 Schematic diagram of CLF current and voltage during disconnection

该方案主要优点是开断器换流时刻早、换流时间短、燃弧能量小和介质恢复特性好。触发器内置方案的唯一不足是增加了开断器支路的电阻,从而增大了正常通流时流过灭弧熔断器的电流,可通过参数优化减小其影响。

船舶直流电力系统的限流熔断器样机提出的设计指标要求如表 1 所示。

表 1 限流熔断器样机设计指标
Table 1 Design specifications of CLF

参数	参数值
额定电压	DC 640 V
额定电流	DC 2000 A
最大预期短路电流	峰值 50 kA, 时间常数 6 ms, 即初始 di/dt 为 8.3 A/ μ s
限流峰值	<30 kA
起弧分断时间	<5 ms
接线端子温升	<70 K

2 样机的参数设计及限流特性分析

2.1 参数设计方法

进行限流熔断器参数设计时需要考虑装置的短路分断特性和温升特性的要求,短路分断特性主要是电弧触发器、开断器和灭弧熔断器三者动作特性的配合关系设计,温升特性主要是电弧触发器、开断器和灭弧熔断器电阻的设计。根据表 1 的系统要求,性能指标设计时的具体约束条件如下:

- 分断最大短路电流时,整机的起弧分断时间 t_p 小于 5 ms,短路限流峰值 I_p 小于 30 kA;
- 电弧触发器和灭弧熔断器的换流时间 t_c 应尽量短,使其小于开断器的动作延迟时间 t_d ,以便开断器在换流结束后再分断,减小其燃弧能量;
- 开断器的介质恢复时间 t_z 要足够,根据前期介质恢复试验结果,开断器电流过零后需要预留 100 μ s 以上介质恢复时间才能承受 1.5 kV 过电压;
- 整机的电阻 R 应小于 40 $\mu\Omega$,即发热功率小于 160 W,以满足 2000 A 通流温升小于 70 K 要求。

由以上约束条件可得:

$$\begin{cases} t_p|_{di/dt=8.3} < 5 \text{ ms} \\ I_p|_{di/dt=8.3} = di/dt \cdot t_p < 30 \text{ kA} \\ t_c < t_d \\ t_z = t_p - (t_0 + t_d) > 100 \text{ } \mu\text{s} \\ R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) < 40 \text{ } \mu\Omega \end{cases} \quad (1)$$

其中, $R_1 = R_a + R_b$; t_d 可看作恒定值, 约为 200~300 μs 。

下面对式(1)中性能指标 t_p 、 I_p 、 t_c 、 t_0 、 t_z 的解析式进行推导。

假设短路电流 i 从 0 开始按恒定上升率 di/dt 持续增长, 则可以推导得到触发器的动作时间 t_0 :

$$t_0 = \sqrt[3]{3Q_1(L_1 + L_2)^2 / (L_2 di/dt)^2} \quad (2)$$

其中, Q_1 为电弧触发器的弧前 $I_1^2 t$ 值, I_1 为 i_1 有效值。

在电弧触发器和灭弧熔断器换流过程中:

$$\begin{aligned} i_2 &= kt + C \\ k &= (L_1 di/dt + U_a) / (L_1 + L_2) \\ C &= -U_a t_0 / (L_1 + L_2) \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可推得:

$$t_1 = \frac{U_a}{U_a - L_2 di/dt} t_0 \quad (4)$$

则电弧触发器和灭弧熔断器的换流时间为:

$$t_c = t_1 - t_0 = \frac{L_2 di/dt}{U_a - L_2 di/dt} t_0 \quad (5)$$

灭弧熔断器的弧前 $I_2^2 t$ (I_2 为 i_2 有效值) 值 Q_2 为:

$$\begin{aligned} Q_2 &= \int_0^{t_1} i_2^2 dt = \int_0^{t_0} \left(\frac{L_1 di/dt \cdot t}{L_1 + L_2} \right)^2 dt + \\ &\int_{t_0}^{t_1} (kt + C)^2 dt + \int_{t_1}^{t_p} (di/dt \cdot t)^2 dt \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可以得到 t_p 的解析式:

$$\begin{aligned} t_p \approx & \left\{ \frac{3Q_1 U_a^2}{L_2^2 (di/dt)^4} \left[1 - \frac{U_a^3}{(U_a - L_2 di/dt)^3} \right] + \right. \\ & \left. \frac{3Q_2}{(di/dt)^2} - \frac{3L_1^2}{(L_1 + L_2)^2} \right\}^{1/3} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可进一步得到 I_p 、 t_z 的解析式。此时式(1)中各性能指标的解析式都已得到, 通过式(1)可以检验限流熔断器中各组件参数设计是否能满足约束条件。同时, 从 t_p 、 I_p 、 t_c 、 t_0 、 t_z 的解析式并结合式(1)可以得到各组件参数设计原则:

a. 为了减小 t_0 使装置快速动作, 应尽量减小 Q_1 和 L_1 ;

b. 为了减小 t_c 以使 $t_c < t_d$, 应尽量减小 t_0 和 L_2 , 增大 U_a ;

c. 为了减小 t_p 、 I_p 以增强装置限流效果, 应尽量减小 Q_1 、 Q_2 、 U_a 、 L_1 ;

d. 为了增加 t_z 以增强关断的可靠性, 应尽量增大 Q_2 、 U_a , 减小 L_1 ;

e. 为了减小 R , 应尽量减小 R_a 、 R_b 、 R_2 。

设计原则 **c**、**d** 对部分参数的要求有矛盾, 但考虑到关断可靠性比限流效果更为重要, 因此设计时应优先考虑原则 **d** 对参数的要求。综上所述, 对限流熔断器中各组件参数进行了设计, 具体数值如表 2 所示。

表 2 限流熔断器各组件参数设计值
Table 2 Design parameters of CLF components

参数	参数值	参数	参数值
R_a	20 $\mu\Omega$	Q_1	220 $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$
R_b	15 $\mu\Omega$	Q_2	400 $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$
R_2	100 $\mu\Omega$	L_1	0.2 μH
U_a	25 V	L_2	0.1 μH

2.2 限流特性计算和分析

在表 2 设计参数基础上, 利用前文得到的性能指标计算方法, 可以计算得到图 3 所示的样机限流特性。其中, 电源设为直流 640 V 蓄电池, 线路电阻 12.8 $\text{m}\Omega$, 即预期短路电流峰值保持为 50 kA, 通过改变线路电感取值, 调节不同的短路电流上升率 di/dt , 作出不同 di/dt 下的限流特性。

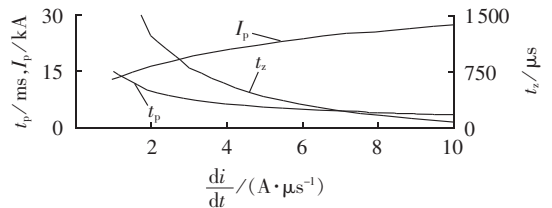


图 3 预期短路电流为 50 kA 时的限流特性

Fig.3 Current-limiting characteristics when expected short circuit current is 50 kA

图 3 中 3 条曲线分别是不同 di/dt 下的短路限流峰值 I_p 、整机起弧分断时间 t_p 以及介质恢复时间 t_z 曲线。由图 3 可知, 介质恢复时间 t_z 随着 di/dt 的增大而减小, 当 di/dt 为 8.3 $\text{A}/\mu\text{s}$ 时, t_z 为 170 μs , 满足大于 100 μs 的设计要求; 起弧分断时间 t_p 随着 di/dt 的增大而减小, 当 di/dt 大于 6.5 $\text{A}/\mu\text{s}$ 时, t_p 将小于 5 ms, 当 di/dt 为 8.3 $\text{A}/\mu\text{s}$ 时, t_p 为 4.3 ms; 短路限流峰值 I_p 随着 di/dt 的增大而增大, 当 di/dt 为 8.3 $\text{A}/\mu\text{s}$ 时, I_p 为 25.3 kA, 满足系统对限流熔断器的指标要求。

3 样机的短路限流试验

设计了如图 4 所示的新方案样机的短路限流试验电路, 采用 180 mF 电容 C_1 替代蓄电池组作为试验电源, 预先充电至 900 V, 线路电感 $L_1 = 108 \mu\text{H}$ 、线路电阻 11 $\text{m}\Omega$, 通过控制 V_{T1} 导通使 C_1 放电, 来模拟电流上升率为 8.3 $\text{A}/\mu\text{s}$ 的短路电流。样机由电弧触发器串联电磁斥力断路器再并联灭弧熔断器并联组成, 样机参数取表 2 的设计参数。试验测量了流过样机的总电流 i 、支路电流 i_1 和 i_2 、限流熔断器两端电压 u 和电弧触发器两端电压 u_a 。试验中在样机两端还并联了一个保护用晶闸管 V_{T2} , 其作用是在短路试

验开始后一定时间触发其导通,将短路电流转移到 V_{T2} 上,防止发生样机分断失败时流过开断器的能量过大将样机损毁。

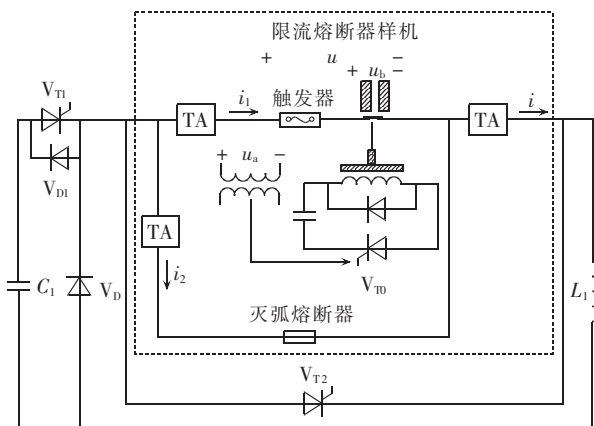


图 4 短路限流试验电路示意图

Fig.4 Test circuit of short circuit current limiting

按照前文所述的试验条件进行一次短路限流试验,采用的分流器和阵列式霍尔电流传感器测量误差均不超过 1%。试验开始后 5 ms 时触发 V_{T2} 导通,波形如图 5 所示。

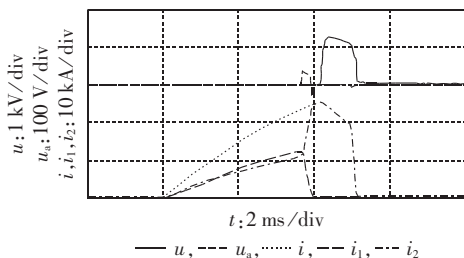


图 5 样机的短路限流试验波形

Fig.5 Experimental waveforms of short circuit current limiting test for prototype

从试验波形可知,短路电流 i 的上升率为 $8.3 \text{ A}/\mu\text{s}$,电弧触发器和灭弧熔断器两支路的分流比接近 1:1。电弧触发器在 3.66 ms 时熔断起弧,弧压 u_a 约 25 V ,触发器上的 12 kA 电流开始向灭弧熔断器上转移,换流时间约 $300 \mu\text{s}$,电弧触发器电压在 3.89 ms 变负,说明开断器经过 $230 \mu\text{s}$ 动作时间分断了。开断器支路电流 i_1 过零后又经过 $150 \mu\text{s}$ 的介质恢复时间,灭弧熔断器在 4.15 ms 时熔断起弧,电流在 4.4 ms 时到达峰值 25.5 kA ,同时电压峰值为 1300 V ,开断器未被该过电压击穿,说明其介质恢复良好。换流晶闸管 V_{T2} 在 5 ms 时导通分流,将 19 kA 换流到 V_{T2} 上,起到保护限流熔断器样机的作用。短路限流的试验结果也验证了 2.2 节中 I_p, t_p 计算结果的准确性。

4 样机优化设计及试验

通过图 5 试验结果表明开断器具有较好的介质恢复特性,但 $150 \mu\text{s}$ 介质恢复时间所留的裕量偏小,

存在击穿的隐患。根据 2.1 节中设计原则,考虑将触发器支路的连线尽量缩短,以减小触发器支路的电感 L_1 ,使触发器支路的分流比提高。这样一方面可以使触发器动作时间 t_0 减小,更快触发熔断,向开断器发出分断信号;另一方面可以使灭弧熔断器支路分流比降低,使其起弧时刻 t_p 后移,增加介质恢复时间 t_z ,从而提高整机工作的可靠性。改进后的电感 L_1 减小为 $0.05 \mu\text{H}$ 。

触发器支路的电感 L_1 由 $0.2 \mu\text{H}$ 改为 $0.05 \mu\text{H}$,利用前文的性能指标计算方法,可以计算得到图 6 所示的改进样机的限流特性。由图 6 可知,当 di/dt 为 $8.3 \text{ A}/\mu\text{s}$ 时, t_z 为 $620 \mu\text{s}$, t_p 为 3.5 ms , I_p 为 22 kA ,介质恢复时间 t_z 明显提高, I_p, t_p 明显减小。

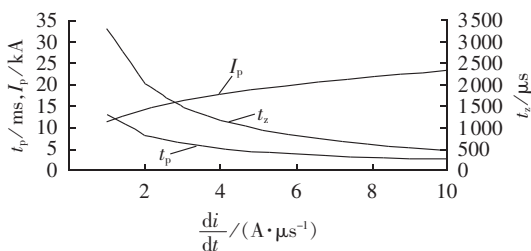


图 6 预期短路电流为 50 kA 时,改进样机的限流特性

Fig.6 Current-limiting characteristics of improved prototype when expected short circuit current is 50 kA

进行了一次和图 4 相同短路试验参数下的改进后样机限流试验,试验中去掉了保护用的并联晶闸管 V_{T2} ,得到的波形如图 7 所示。短路电流 i 的上升率为 $8.3 \text{ A}/\mu\text{s}$,由于触发器支路电感减小,因此触发器在 2.3 ms 时就熔断起弧,弧压 u_a 约 25 V ,电流开始向灭弧熔断器上转移,换流时间约 $210 \mu\text{s}$,电弧触发器电压在 2.6 ms 变负,说明开断器经过 $290 \mu\text{s}$ 时间分断了,在 2.7 ms 时换流结束。再经过 $600 \mu\text{s}$ 介质恢复时间时间后,灭弧熔断器在 3.3 ms 时熔断起弧,电流峰值 22.2 kA ,电压峰值 1450 V 。样机电流过零后两端电压为 650 V ,满足额定电压 640 V 要求。

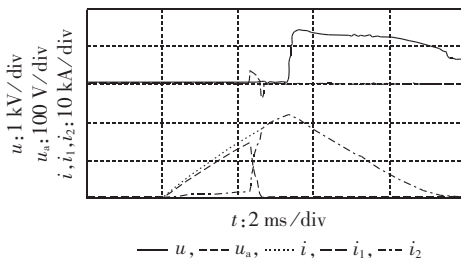


图 7 改进样机的短路限流试验波形

Fig.7 Experimental waveforms of short circuit current limiting test for improved prototype

试验结果表明,通过减小电弧触发器和开断器串联支路电感,触发器起弧时刻提前,且介质恢复时间明显增长,限流峰值和整机起弧分断时间减小,验证

了 2.1 节中设计原则的正确性。所研制的基于电磁斥力开断器的新型限流熔断器成功实现了限流分断,限流性能指标满足项目设计要求。

5 结论

本文提出了一种基于电磁斥力开断器的限流熔断器方案及其参数设计原则,开展了额定直流 640 V/2000 A 样机限流特性的计算与试验验证,得到了以下主要结论。

a. 在限流熔断器设计中,应综合考虑以下设计原则:为了减小 t_0 使装置快速动作,应尽量减小 Q_1 和 L_1 ;为了减小 t_e ,应尽量减小 t_0 和 L_2 ,增大 U_a ;为了减小 t_p 、 I_p 以增强装置限流效果,应尽量减小 Q_1 、 Q_2 、 U_a 、 L_1 ;为了增加 t_z 以增强关断的可靠性,应尽量增大 Q_2 、 U_a ,减小 L_1 。

b. 限流熔断器介质恢复时间 t_z 随着 di/dt 的增大而减小, t_p 随着 di/dt 的增大而减小, I_p 随着 di/dt 的增大而增大。试验结果表明开断器的动作时间为 200~300 μs ,开断器经过 150 μs 的介质恢复时间可以承受熔断器起弧产生的 1300 V 过电压。

c. 经过减小电感 L_1 后的改进样机,在 di/dt 为 8.3 A/ μs 时,触发器经过 2.3 ms 可以熔断起弧,换流时间约 210 μs ,经过 600 μs 介质恢复时间后,灭弧熔断器熔断起弧,电流峰值 22.2 kA,整机可靠性和限流性能明显提高,满足了系统设计要求,并验证了本文提出的参数设计原则。

参考文献:

- [1] 董恩源,丛吉远,邹积岩,等. 1500 V 船用新型直流断路器的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):153-156.
DONG Enyuan, CONG Jiyuan, ZOU Jiyan, et al. Study of 1500 V new type DC circuit breaker used in ship[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5):153-156.
- [2] 庄劲武,张晓锋,杨锋,等. 船舶直流电网短路限流装置的设计与分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):26-30.
ZHUANG Jinwu, ZHANG Xiaofeng, YANG Feng, et al. Analysis and design of fault current limiter for ship DC power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20):26-30.
- [3] 赵中原,吕征宇,江道灼,等. 新型固态限流器三相主电路拓扑及控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(12):42-46.
ZHAO Zhongyuan, LÜ Zhengyu, JIANG Daozhuo, et al. Study on three-phase main circuit topology and control strategy for a new-type solid-state current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12):42-46.
- [4] 刘懿莹,吴翊,荣命哲,等. 自收缩效应型液态金属限流器限流特性影响因素的研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):178-185.
LIU Yiyang, WU Yi, RONG Mingzhe, et al. Study of influence factors on current limiting characteristics of self pinch effect type liquid metal current limiter [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4):178-185.
- [5] ELMITWALLY A. Proposed hybrid superconducting fault current limiter for distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2009, 31(10):619-625.
- [6] PARK D K, CHANG K S, YANG S, et al. Analytical and experimental studies on the hybrid fault current limiter employing asymmetric noninductive coil and fast switch[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2009, 19(3):1896-1899.
- [7] HYUN O B, TIM S W, YU S D, et al. Long-term operation and fault tests of a 22.9 kV hybrid SFCL in the KEPCO test grid [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2011, 21(3):2131-2134.
- [8] 王晨,庄劲武,张晓锋,等. 新型混合型限流断路器分析及试验[J]. 电力系统自动化,2010,34(15):60-65.
WANG Chen, ZHUANG Jinwu, ZHANG Xiaofeng, et al. Analysis and test of novel hybrid current-limiting circuit breakers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15):60-65.
- [9] SMEETS R P P, FERTESZ V, DUFOURNET D, et al. Interaction of a vacuum arc with an SF₆ arc in a hybrid circuit breaker during high-current interruption[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2007, 35(4):933-938.
- [10] 袁志方,庄劲武,王晨,等. 高速开断器的 10 kV/10 kA 介质恢复试验系统关键技术[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):168-173.
YUAN Zhifang, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. 10 kV/10 kA dielectric recovery test system for high-speed isolators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):168-173.
- [11] ABB. Advertisement of Is-limiter[EB/OL]. (2006-05-08). <http://www.abb.de/calor/>.
- [12] HERBERT M, ACREE J, SCHAFFER J. Development and testing of power assisted current limiting fuses to 600 amperes and 38 kV [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(2):619-626.
- [13] 陈搏,庄劲武,肖翼洋,等. 10 kV/2 kA 混合型限流熔断器用电弧触发器的分析与设计[J]. 高电压技术,2012,38(8):1948-1956.
CHEN Bo, ZHUANG Jinwu, XIAO Yiyang, et al. Analysis and design of arc trigger of 10 kV/2 kA hybrid current limiting fuses[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8):1948-1956.
- [14] 王晨,庄劲武,袁志方,等. 基于电磁斥力型开断器的限流熔断器设计与试验[J]. 电工技术学报,2013,28(6):66-72.
WANG Chen, ZHUANG Jinwu, YUAN Zhifang, et al. Design and test of high speed current limiting fuse based on electro-magnetic repulsion type isolator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6):66-72.
- [15] BASU S, SRIVASTAVA K D. Analysis of a fast acting circuit breaker mechanism part I: electrical aspects[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91(3):1197-1203.
- [16] POLMAN H, FERREIRA J A, KAANDERS M, et al. Design of a bi-directional 600 V/6 kA ZVS hybrid DC switch using IGBTs [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2):1052-1059.
- [17] 袁志方,庄劲武,陈倩,等. 开断速度对电磁斥力高速开断器介质恢复特性的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):140-146.
YUAN Zhifang, ZHUANG Jinwu, CHEN Qian, et al. Influence of breaking speed on dielectric recovery characteristic of high-speed electro-magnetic repulsion isolator [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7):140-146.
- [18] MEYER J M, RUFER A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and Integrated Gate-Commutated Thyristors (IGCTs) [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2):646-651.

- [19] NA J B, KIM Y J, JANG J Y, et al. Design and tests of prototype hybrid superconducting fault current limiter with fast switch[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2012, 22(3):604-607.
- [20] 娄杰, 李庆民, 孙庆森, 等. 快速电磁推力机构的动态特性仿真与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16):23-29.
LOU Jie, LI Qingmin, SUN Qingsen, et al. Dynamic characteristics simulation and optimal design of the fast electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 23-29.
- [21] 李博, 董恩源, 李晓玮, 等. 基于 ANSYS 的高速斥力机构的分析与实验[J]. 电气开关, 2006, 44(4):40-44.
LI Bo, DONG Enyuan, LI Xiaowei, et al. Analysis and experiment of high-speed repulsion driver based on ANSYS [J]. Electric Switchgear, 2006, 44(4):40-44.
- [22] 王子建, 何俊佳, 尹小根, 等. 基于电磁斥力机构的 10 kV 快速真空开关[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11):68-75.
WANG Zijian, HE Junjia, YIN Xiaogen, et al. 10 kV high speed vacuum switch with electromagnetic repulsion mechanism [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 68-75.
- [23] 史宗谦, 贾申利, 朱天胜, 等. 真空直流断路器高速操动机构的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3):18-22.
SHI Zongqian, JIA Shenli, ZHU Tiansheng, et al. Investigations on high-speed actuator of vacuum DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3):18-22.
- [24] 江壮贤, 庄劲武, 王晨, 等. 新型强迫换流型限流断路器真空介
质强度的恢复特性[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13):152-158.
JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Vacuum dielectric recovery characteristics of a novel current limiting circuit breaker base on artificial current zero[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13):152-158.
- [25] 庄劲武, 王晨, 袁志方, 等. 电磁斥力驱动银片式断路器: 中国, 201310042523.8[P]. 2013-02-04.
- [26] 戴超, 庄劲武, 杨锋, 等. 大电流电弧触发式混合限流熔断器分析与设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10):81-85.
DAI Chao, ZHUANG Jinwu, YANG Feng, et al. Analysis and design of high-current arc-triggering hybrid current-limiting fuse [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10):81-85.

作者简介:



张 超

张 超(1979—),男,湖南永顺人,讲师,硕士,研究方向为电力系统自动化与安全运行(E-mail: 13396050578@189.cn);

王 晨(1981—),男,河北石家庄人,讲师,博士,研究方向为电力系统自动化与安全运行;

庄劲武(1967—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统自动化与安全运行;

徐国顺(1970—),男,湖北武汉人,副教授,硕士,研究方向为电力系统自动化与安全运行。

Design method and current-limiting characteristics of DC-limiting fuse based on electromagnetic repulsion isolator

ZHANG Chao^{1,2}, WANG Chen¹, ZHUANG Jinwu¹, XU Guoshun¹

(1. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the requirements of short circuit disconnecting characteristics and the temperature rising characteristics, the constraint conditions of performance specification design for DC 640 V/2 kA CLF (Current Limiting Fuse) are obtained, the performance index calculation formulas deduced and the component parameter design principles defined. The current-limiting characteristics are analyzed for different short circuit current rising rates (di/dt). The analytical results show: both the dielectric recovery time t_z and the arc interrupt time t_p decrease along with the increase of di/dt while the peak current I_p limited increases along with the increase of di/dt . The inductance of arc-trigger branch is reduced to further increase the dielectric recovery time and improve the current-limiting performance. The short circuit current with di/dt of 8.3 A/ μ s of the improved prototype is limited to 22.2 kA, t_p reduced to 3.3 ms and t_z increased to 600 μ s, which show the current-limiting performance and reliability of CLF are obviously improved.

Key words: electromagnetic repulsion; electric isolators; current limiting fuse; dielectric recovery