

新型电磁感应式无源触发器分析与设计

吕智勇¹, 岳海波², 王向军¹, 庄劲武¹, 李思光¹, 薛 婕², 袁志方³, 武 瑾^{1*}, 马丽莉⁴

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 中国船舶集团第七〇八研究所, 上海 200011;

3. 海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033;

4. 江南造船(集团)有限责任公司, 上海 201913)

摘要:针对混合型限流熔断器中电子触发器存在的有源触发和不能全范围分断问题, 该文提出了一种能够实现无源供电且具备全范围分断能力的新型电磁感应式无源触发器方案。首先介绍了新型触发器的工作原理, 开展了自感应供电、幅值整定两个内容的分析设计; 然后利用有限元仿真软件将电磁场和电路进行耦合建模, 基于该模型分析了铁芯线圈磁感应强度随位置的变化特性; 提出了采用单霍尔芯片进行短路电流幅值判断的方法, 减小了芯片的功耗, 从而解决了新型触发器在低上升率工况下感应供电不足的问题; 同时为了提高触发器的可靠性, 设计了延时控制电路; 最后根据设计参数制造样机, 在短路判断幅值 10 kA 的限流条件下分别对混合型限流熔断器进行了 8 A/ μ s 最小短路电流上升率和 33 A/ μ s 最大短路电流上升率的检测试验, 试验结果验证了分析设计方法的可行性和有效性。

关键词:短路; 电磁感应; 触发器; 霍尔芯片; 故障检测

中图分类号: TM933

文章编号: 1000-0682(2024)03-0003-06

文献标识码: B

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.001

Analysis and design of a new electromagnetic induction passive trigger

LÜ Zhiyong¹, YUE Haibo², WANG Xiangjun¹, ZHUANG Jinwu¹, LI Siguang¹,

XUE Jie², YUAN Zhifang³, WU Jin^{1*}, MA Lili⁴

(1. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033, China; 2. Marine Design and

Research Institute of China, Shanghai 200011, China; 3. National Key Laboratory of Science and Technology

on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Hubei Wuhan 430033, China;

4. Jiangnan Shipbuilding (Group) Co., Ltd., Shanghai 201913, China)

Abstract: In view of the problem that the electronic trigger active power supply and the arc trigger in the hybrid current limiting fuse cannot be fully disconnected and heated, this paper presents a passive electromagnetic induction trigger scheme with full range breaking capability. This paper introduces its working principle, and focuses on the analysis and design of two functional modules: self-induced power supply and amplitude setting. The electromagnetic field and circuit are coupled by the finite element method, and the variation characteristics of magnetic induction intensity of iron core coil with position are studied. At the same time, in order to solve the problem of insufficient supply of induced voltage under low rise rate, a single Hall chip is proposed to judge the amplitude of short-circuit current to reduce power consumption. In order to improve the reliability of trigger, a delay control circuit is designed. Finally, the engineering prototype is designed according to the simulation parameters, and the minimum short-circuit current rise rate of the rated 4000 V/6000 A fuse is 8 A/ μ s and maximum short circuit rise rate 33 A/ μ s. The test is carried out under the current limiting requirement of 10 kA short-circuit judgment amplitude, and the test results verify the feasibility and effectiveness of the design scheme.

Keywords: short circuit; electromagnetic induction; trigger; hall chip; fault detection

收稿日期: 2024-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(电磁轨道发射混合储能系统尽限应用的短路保护机理研究, 52107136)

第一作者: 吕智勇(1994—), 男, 博士, 主要从事直流快速保护的研究。E-mail: 1564738140@qq.com

通信作者: 武瑾(1984—), 女, 副教授, 主要从事电力系统自动化与安全运行等方面的研究工作。E-mail: wujin.lj@163.com

0 引言

故障限流保护设备能有效限制电力系统故障电流峰值,因此近年来研究者们进行了广泛的研究,其中最主要的故障限流保护设备有超导限流器^[1-2]、混合型限流断路器^[3-4]、混合型限流熔断器等多种方案。目前在舰船直流电力系统故障限流领域中应用最广泛的是混合型限流熔断器,代表的有 Bussman 公司的 nTM 系列和 ABB 公司的 Is-Limiter 等产品^[5-8]。上述产品的共同点是都采用电子测控式触发器作为混合型限流熔断器的触发方式,但该方法需要外部提供额外电源^[9-14],存在一旦供电电源出现异常将会导致熔断器拒动无法切断故障电流的问题^[15-16]。为了解决有源触发的问题,文献[17]提出了一种电弧触发式混合型限流熔断器方案,采用电弧触发器取代电流传感器和电子测控单元,直接利用短路电流的热效应作为故障检测和触发条件。相较于电子测控式混合型限流熔断器,电弧触发式限流熔断器无需外部电源供电,实现了无源触发;但由于电弧触发器需要串联在主回路中,通过额定电流时会产生显著损耗,限制了其额定通流能力,导致其在低过载故障电流下存在检测盲区,分断特性不理想^[18]。文献[19]提出了利用冶金效应改善熔体低过载分断特性,做到了 5 倍额定电流就可以使电弧触发器动作,但仍无法满足低过载电流(5 倍以下)的保护需求。

针对上述问题,该文提出了一种无源触发且具备全范围分断能力的电磁感应触发器方案;首先介绍了其工作原理,重点对自感应供电、幅值整定两大功能模块进行分析与设计。基于有限元方法,利用商用软件 COMSOL Multiphysics,将电磁场和电路进行耦合分析,研究了铁芯线圈磁感应强度随位置的变化特性,同时分析了铜排在短路工况下的磁感应强度分布规律,确定了单霍尔芯片的测点位置;最后根据仿真参数,设计工程样机,试验结果验证了该设计方案的可行性和有效性。

1 工作原理

混合型限流熔断器是将高速开断器和限流熔断器相结合的一种电力系统限流保护装置,是当前应用最广泛的限流保护技术^[2]。混合型限流熔断器如图 1 所示,主要由触发器、火药开断器和灭弧熔断器等构成。正常工作时电流主要流经高速开断器,通态损耗低;当发生短路故障时,触发器发出点火信

号,引爆高速开断器内的炸药,开断器迅速断开,迫使短路电流转移到并联的灭弧熔断器上,灭弧熔断器迅速熔断,从而彻底切断短路电流。

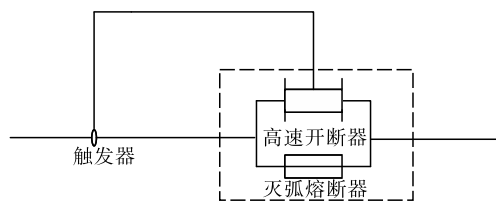


图1 混合型限流熔断器结构示意图

根据触发器的工作原理,混合型限流熔断器可分为电子测控式混合型限流熔断器和电弧触发式混合型限流熔断器。电磁感应触发器结构示意图如图 2 所示,其主要由铁芯线圈,霍尔元件,感应控制器三个部分组成。

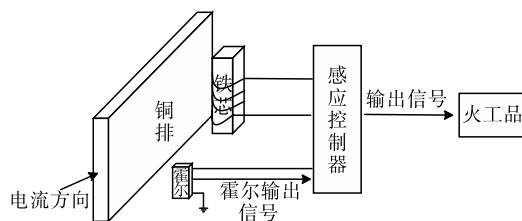


图2 电磁感应触发器结构示意图

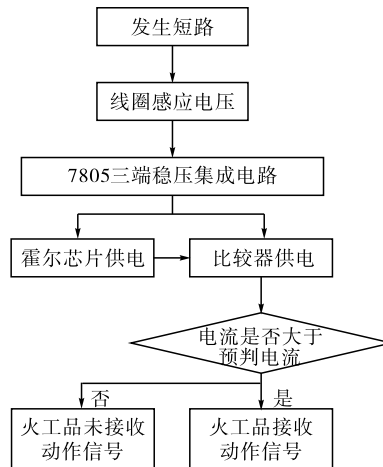


图3 电磁感应触发器工作原理

电磁感应触发器工作原理如图 3 所示,正常通流时,铜排上的电流变化率小,线圈感应的电动势小,储能电容基本不充电,感应触发装置不工作;当系统中出现短路故障时,铜排上的电流会按一定上升率增大,电流的变化会引起铜排周围磁场发生改变使得线圈两端产生感应电动势,利用感应电动势为感应控制器的电容充电并提供控制器正常工作所需的电能,其中采用霍尔芯片检测短路电流大小,当达到短路电流判定值时,控制器输出点火信号引爆火工品。

2 自供电单元设计

该文以 4 kV/6 kA 混合型限流熔断器在最小短路电流上升率 8 A/ μ s、最大短路电流上升率 33 A/ μ s、短路电流判断值 10 kA 的限流指标下进行设计。铁芯线圈的设计不仅受到从发生短路到短路判断的时间限制,还受到感应控制器电压需求的限制,因此需要分析影响铁芯线圈感应电压的因素才能最终确定具体参数。

2.1 数学模型

通流铜排回路中变化的磁场,将会在铁芯线圈中产生感生电动势为整个装置提供正常工作所需的电能。铁芯通过聚集空间磁场,使得穿过线圈截面的磁场强度大大增强。根据法拉第电磁感应定律:

$$E = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{dNBS}{dt} = -NS \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

式中: E 为感应电动势(V); N 为线圈匝数; S 为线圈截面积(m^2); dB/dt 为穿过线圈截面积的磁感应强度变化(T/s)。

为了减小磁滞损耗,采用冷轧硅钢片,其磁饱和强度 2 T。在铁芯磁饱和前,当铁芯面积和线圈匝数固定时,电流与磁感应强度成线性关系,即

$$B = f(I) = IK \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中为:

$$E = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{dNBS}{dt} = -NSK \frac{di}{dt} \quad (3)$$

式中:感应电动势 E 与 $N, S, K, di/dt$ 成正相关。

2.2 仿真模型

利用有限元仿真软件进行三维模型仿真,其中铜排的宽厚比为 200 mm:25 mm,设置空气域为无限元域。仿真模型涉及的电磁场问题可由 Maxwell 方程微分形式和相应的本构方程进行描述,基本方程如下:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (5)$$

$$B = \mu H \quad (6)$$

$$J = \sigma E \quad (7)$$

式中: H 为磁场强度(A/m); B 为磁通密度(T); J 是电流密度(A/ m^2); E 为电场强度(V/m); μ 为磁导率(H/m); σ 为电导率(S/m)。

2.3 系数 K 的确定

系数 K 为磁感应强度与电流的比值,当铁芯工作在线性区时, K 为定值,大小与铁芯的几何尺寸和距离铜排的高度有关。对铁芯尺寸及距离铜排表面的高度进行分析,得到系数 K 的变化规律,从而选取合适的铁芯尺寸及摆放位置。

由于铜排表面还要放置霍尔芯片,为避免铁芯磁场对霍尔芯片周围磁场产生影响,该文选择把铁芯与铜排的一端平齐,结构如图 4 所示。仿真中给铜排通以 33 A/ μ s 上升率的电流,处理后可以得到铁芯中心磁感应与电流的比值即为系数 K ,仿真结果如下。

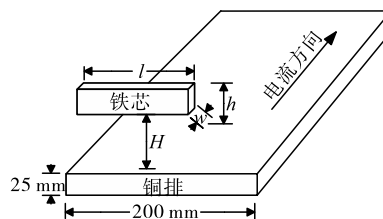


图4 铁芯尺寸及位置摆放示意图

(1)假设铁芯长度一定,探究不同截面积对系数 K 大小的影响,结果如表 1 所示。仿真结果表明,当铁芯长度一定时,截面积越小,系数 K 越大。

表 1 铁芯截面积对系数 K 大小的影响

h/mm	w/mm	l/mm	$K/10^{-4}$
10	20	60	0.36
10	30	60	0.31
10	40	60	0.25
10	50	60	0.25
20	10	60	0.35
30	10	60	0.3
40	50	60	0.25
50	50	60	0.25

(2)假设铁芯截面积一定,探究不同铁芯长度对系数 K 大小的影响,结果如表 2 所示。仿真结果表明,当铜排的截面积一定时,铁芯长度越长,磁感应强度越大,但在实际选取中也不能太长,否则会影响霍尔芯片测量精度。

表 2 铁芯长度对磁感应大小的影响

h/mm	w/mm	l/mm	$K/10^{-4}$
10	20	30	0.14
10	20	60	0.36
10	20	80	0.53
10	20	100	0.72

(3)综合仿真结果考虑选取截面积 200 mm^2 、长 100 mm 的铁芯尺寸,下面探究铁芯距离铜排表面的摆放位置,结果如表 3 所示。仿真结果表明,铁芯与

铜排的距离 H 越小,系数 K 越大,同时考虑绝缘问题,文中选择把铁芯放置在距离铜排表面 5 mm 处,此时 $K = 0.77 \times 10^{-4}$ 。

表 3 铁芯的摆放位置对磁感应大小的影响

H/mm	h/mm	w/mm	l/mm	$K/10^{-4}$
20	10	20	100	0.7
15	10	20	100	0.72
10	10	20	100	0.75
5	10	20	100	0.77

感应电动势与线圈截面积,线圈匝数成正比,当铁芯尺寸确定时,线圈截面积随之确定。虽然增大线圈匝数可以提高感应电动势,但在发生短路到短路预判的过程中有时间要求,线圈匝数增大势必会增大线圈电感导致电容充电速度过慢,感应控制器还未完成短路判断时短路电流就已经超过判定值。因此,在满足各短路工况条件下,选用线圈匝数为 100 匝,线径 1 mm。

3 短路电流幅值判断设计

3.1 短路电流幅值判断的设计原理

当某一上升率电流通过矩形铜排时,其周围的磁力线分布如图 5 所示,可以看到铜排周围的等值线呈蝴蝶结型,这是由于铜排中变化的电流的趋肤效应,其强弱与电流频率有关。不同短路电流上升率对应不同频率的短路电流,短路电流上升率越大,频率越高,其磁场分布在直角处则更加密集。基于此,当铜排流过不同上升率电流时,可以找到某一电流幅值下的特定磁场等值线交点,并把霍尔芯片放置于此,以此来完成电磁感应触发器幅值整定模块设计。

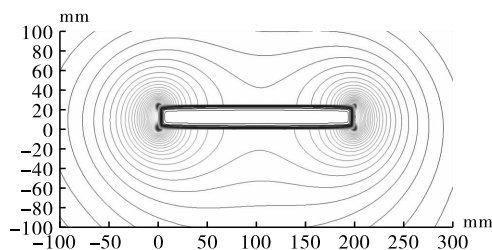


图 5 通流铜排磁力线分布图

以短路电流幅值 10 kA 为判断条件,同时需要满足 10 kA 大电流幅值检测和小功耗损耗条件。该文使用单霍尔芯片直接测量被测电流在空气中产生的磁感应强度,并将检测的结果实时发送给感应控制器。电流检测的动态范围和测量准确度取决于磁敏感元件霍尔片的性能,其具有体积小、测量范围大、功耗小、响应速度快等优点。霍尔元件有正向磁

场时输出 2.5 ~ 4.8 V 之间的电压,有反向磁场时输出 2.5 ~ 0.2 V 的电压,灵敏度为 5 mV/g, A1324 可测量磁感应强度范围 ± 460 G。

3.2 仿真模型

不同上升率的短路电流流经铜排时铜牌周围的磁场分布不同,因此需要对汇流铜排在不同上升率下的磁场分布进行仿真,并选取合适位置放置霍尔芯片。该文建立了三维有限元仿真模型,铜排尺寸为 200 mm \times 25 mm,四周预留了足够空间的空气域,施加的短路电流上升率的范围为 8 ~ 33 A/ μ s,这里以 8 A/ μ s, 20 A/ μ s, 33 A/ μ s 为例,求解这三种短路电流工况下幅值 10 kA 时的磁场分布情况。文中选取短路电流在 10 kA 时 250 G 等值线分布情况如图 6 所示。

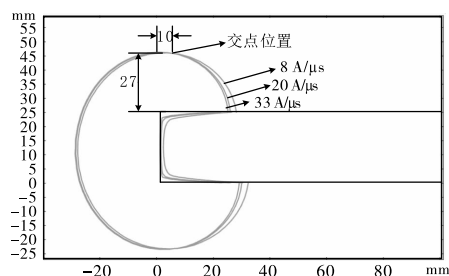


图 6 三种短路电流(幅值 10 kA)工况下 250 G 等值线分布

由仿真图可以看到,三种短路工况下在电流幅值 10 kA 时的磁场 250 G 等值线交汇位置在距离铜排边界 10 mm,高度 27 mm 处。将霍尔固定在上述位置,并对铜排进行三种短路电流上升率试验,检测霍尔输出电压。

表 4 不同短路工况下仿真与试验对比

短路工况	仿真磁场强度	霍尔输出差值	霍尔测得磁场
8 A/ μ s	250 G	1.305 V	261 G
20 A/ μ s	250 G	1.309 V	262 G
33 A/ μ s	250 G	1.308 V	262 G

三种短路电流上升率工况下 10 kA 时霍尔位置对应感应磁场对比如表 4 所示。由试验结果与仿真对比得,仿真与试验结果基本吻合,误差在 5% 左右,由此验证了霍尔芯片在不同短路上升率下检测判定电流 10 kA 的可行性。

4 试验验证

图 7 所示为文中使用的试验测试平台,使用大电容供电,回路中串接电感来模拟短路情况,并按仿真结果在铜排相应位置上放置好霍尔元件和铁芯线圈。将采集到的电流电压信号输出到计算机进行处

理和显示。试验采用 60 mF 电容作为放电电源,给电容预充电电压为 1000 V,分别选用电感为 125 μH , 30 μH 来得到 8 A/ μs 和 33 A/ μs 上升率的两种短路电流工况。

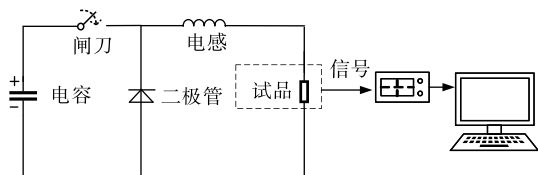


图7 高速开断器短路分断测试平台

在感应控制器设计过程中为了避免霍尔元件和比较器提前上电,设计了 7805 三端稳压电源 - 霍尔元件和比较器 - 光电三极管依次导通的延时电路以防止误触发。由表 4 知,短路电流为 10 kA 时,霍尔输出电压为 3.8 V,因此调整比较电阻电压为 3.8 V 作为 10 kA 比较电压。

图 8 为短路上升率 8 A/ μs 工况下整机试验结果,结果表明感应控制器时序正确,霍尔输出电压与 10 kA 比较电压相等,比较器输出为低电平,火工品电路触发。主回路短路电流实测为 9.831 kA 时,实测与理论误差为 1.69%。

图 9 为短路上升率 33 A/ μs 工况下整机试验结果,结果表明感应控制器时序正确,7805 三端稳压电源输入控制在 30 V 以下。霍尔输出电压与 10 kA 比较电压相等时,比较器输出低电平,火工品电路触发。主回路短路电流实测为 10.34 kA,实测与理论误差为 3.4%。

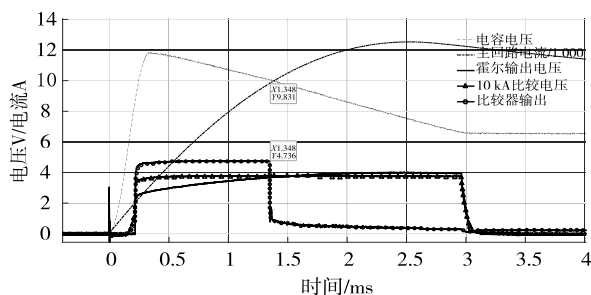


图8 8 A/ μs 短路工况下测试结果

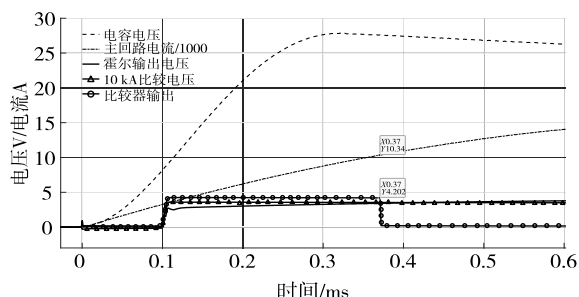


图9 33 A/ μs 短路工况下测试结果

5 电磁感应式触发器在系统中的应用边界

从工程应用的角度对电磁感应式无源触发器进行边界条件研究,探究其可应用的电流上升率边界以及对周边布置的要求。

5.1 不同上升率短路电流触发特性

由 3.1 知,当某一上升率电流通过矩形铜排时,变化的电流使铜排截面产生了很强的趋肤效应,其磁场分布在直角处更加密集。当接通不同上升率电流时,便能在铜排的一个角处找到相交的一点作为某一幅值的测量点。因此有必要对电磁感应式无源触发器可应用的最小上升率边界,最大上升率边界进行研究。图 10 为幅值 10 kA,等值线 250 G 分布图。从右往左依次是上升率 2 A/ μs , 3 A/ μs , 5 A/ μs , 10 A/ μs , 20 A/ μs , 50 A/ μs , 100 A/ μs , 200 A/ μs , 500 A/ μs 电流。从图中可以看到上升率分别为 3 ~ 500 A/ μs 在电流 10 kA 下的等值线相交于交点 1,而当上升率为 2 A/ μs 时,交于交点 2。因此装置能应用的最小上升率边界为 3 A/ μs ,最大上升率边界为 500 A/ μs 及更大。

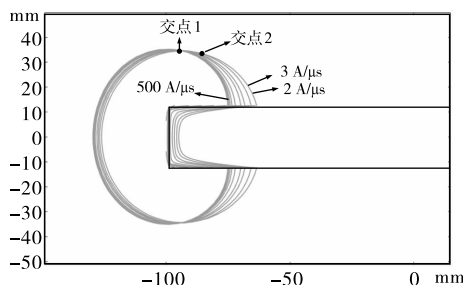


图10 不同短路电流(幅值 10 kA)工况下 250 G 等值线分布

5.2 周边布置要求

由前面论述,文中把单霍尔芯片放置在铜排的某一角处进行短路幅值判定,在实际应用中应考虑母排周边布置磁性材料对其影响,以此确定此触发器对周边布置的要求。文中以安装霍尔芯片铜排的某一角为中心,在其周边布置磁性物质,移动磁性物质,得到对霍尔芯片交点无影响的最小近距离,结果如图 11 所示。通过对比铜排两侧对称交点是否变化得,当距离小于 40 mm,交点位置开始变化。因此在放置霍尔芯片的铜排处,周围 40 cm 处不能放置磁性物质,否则会影响霍尔测量精度。

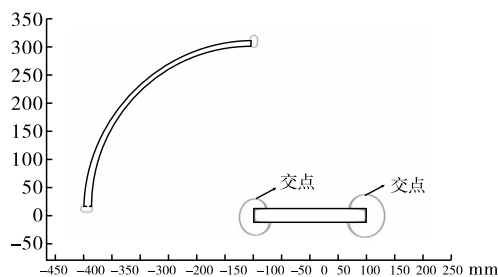


图 11 触发器对周边布置要求

6 结论

该文提出了一种能够实现无源供电且具备全范围分断能力的新型电磁感应式无源触发器方案,避免了有源触发带来的弊端。研究了不同短路电流上升率工况下矩形铜排的磁场分布情况,提出使用单霍尔芯片来检测短路判定值的方法,减小了芯片的功耗,从而解决了新型触发器在低上升率工况下感应供电不足的问题。对额定 4000 V/6000 A 的熔断器在最小电流上升率 $8 \text{ A}/\mu\text{s}$ 和最大电流上升率 $33 \text{ A}/\mu\text{s}$,短路判断幅值为 10 kA 的限流要求下进行试验。试验表明, $8 \text{ A}/\mu\text{s}$ 和 $33 \text{ A}/\mu\text{s}$ 短路工况下实测与理论误差为 1.69% 和 3.4%,验证了电磁感应触发器应用的可行性。从工程应用角度对电磁感应式无源触发器进行边界条件研究,探究其可应用的电流上升率边界以及对周边布置的要求,对实际工程应用有指导作用。

参考文献:

- [1] 庄劲武,张晓峰,王晨,等. 基于 YBa₂Cu₃O₇ 块材的高温超导限流器的限流特性研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):45-48.
- [2] 胡毅,唐跃进,任丽,等. 超导电力技术的发展与超导电力装置的性能检测[J]. 高电压技术,2007,33(7):1-8.
- [3] 王晨,庄劲武,张晓峰,等. 基于 IGBT 的新型直流电力系统限流装置的工作原理与实验研究[J]. 电工技术学报,2006,21(9):57-61.
- [4] 毛海涛,杨锋,庄劲武,等. 混合型限流器高压转换开关电动斥力简化计算[J]. 高电压技术,2007,33(9):159-162.
- [5] K H HARTUNG, V SCHMIDT. Limitation of short circuit current by an Is - limiter[C]// 10th International Conference of Electrical Power Quality and Utilization. Lodz, Poland, 2009.
- [6] Pflanz,Herbert M, Clark Thomas F, et al. The development of the current limiting protector (CLP)[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(7):3609-3616.
- [7] BENOUEAR M. Pyrotechnique circuit interrupter for the protection of electrical systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(8):2006-2010.
- [8] GLENN Douglas J, COOK Carey J. A new fault - interrupting device for improved medium - voltage system and equipment protection[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1985, 21(5):1324-1332.
- [9] CHAO Tung. Electronically controlled current limiting fuses[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 3(2):1052-1059.
- [10] WHARTON Bill E. Application of triggered fault current limiters in the pulp and paper industry[J]. Tappi Journal, 1992, 75(5):93-95.
- [11] FRANSEN Philip. Case history: electronically controlled fault current limiters allow inplant switchgear to be interconnected[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1997, 33(2):319-332.
- [12] WU Alex Y, YIN Yuexin. Fault - current limiter applications in medium and high - voltage power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1998, 34(1):236-242.
- [13] TONGSRICHANTRA Sithiwoot, SUWANASRI Thanapong, SUWANASRI Cattareeya. System study and fault level reduction techniques for a small scale power plant in Thailand[J]. Gmsarn International Journal, 2009, 3(2):73-80.
- [14] SMITH K S. JET fusion experiment 36 kV enhancement studies[C]//International Conference on Power Systems Transients (IPST'07). Lyon, France, 2007.
- [15] DAS J C. Limitations of fault - current limiters for expansion of electrical distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1997, 33(4):1073-1082.
- [16] HIBBERT M S, SMITH K S. Analysis of unexpected fault current limiter operation using EMT programs[C]// International Conference on Power System Transients (IPST05). Montreal, Canada, 2005.
- [17] PFLANZ H M, ACREE J A, SCHAFFER J S. Development and testing of power assisted current limiting fuses to 600 amperes and 38 kV[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(2):619-626.
- [18] 黄鑫健,耿英三,石晓光,等. 直流熔断器的研究现状与发展前景[J]. 电器与能效管理技术, 2019(2):1-7.
- [19] 付雪,戚连锁,庄劲武,等. 银镀锡电弧触发器电热耦合分析及实验验证[J]. 电器与能效管理技术, 2020(01):46-50.