

含冗余保护的超高速故障限流器设计与试验研究

针对牵引供电系统短路电流冲击频繁的特点，设计了一种基于超高速开关、具有冗余保护功能的故障限流器。其中超高速开关和限流电抗器构成保护主电路Ⅰ，而双分裂电抗器、并联电容器和电抗器组成的并联谐振回路为冗余保护电路Ⅱ。二者之间通过互锁开关并联，在功能上均可单独实现故障限流的功能。正常情况下保护主电路Ⅰ运行，冗余保护电路Ⅱ热备，主控制器通过实时监测系统电流和保护支路Ⅰ的状态控制保护支路Ⅱ投切。在此基础上，研制了故障限流器样机，并对其构成关键部件功能进行了分析。最后，通过故障限流器仿真与现场试验分析验证了该样机的可靠性。结果表明该限流器能够在断路器动作之前检测到故障电流并动作，在最大程度上起到了限流作用。

何常红/中国铁路设计集团有限公司 方怡/中铁电气化勘测设计研究院有限公司



何常红/高级工程师

0 引言

随着我国高速、重载铁路的快速发展，客运快速化和货运重载化成为目前铁路发展的主要目标。与此同时，列车用电负荷不断增加，低阻抗大容量变压器逐步投入使用，牵引供电系统的短路电流水平大幅提升，部分地区牵引网的短路电流水平已直逼甚至超过相关规程所允许的最大值。大容量牵引系统下的短路故障已成为我国各大区牵引电网电力牵引供电系统安全、稳定运行的严重隐患和关键技术难题之一^[1]。为此，寻找有效的短路限流措施，从而提高系统的短路容量，在一定程度上减轻断路器等各种电气设备的负担，提高其工作可靠

性和使用寿命，进而提升牵引供电系统的安全稳定性，已成为目前我国牵引供电系统和电力建设、发展的迫切问题^[2]。

为减小短路电流对电力系统的危害，故障限流器（FCL）近年来在电力系统得到了一定应用。相关技术研究和产品也不断出现，常见的FCL类型包括磁控式（也称饱和电抗型）、快速开关式串联谐振型（SR）、桥路型、串联补偿型、节能型及基于超导材料构成的超导型等^[2-7]。其中，快速开关式FCL和SRFCL是实际研究和投运较多的两种短路电流保护设备，也是目前FCL发展的一个主要方向^[8]。快速开关式FCL因性价比高而得到广泛认可；而SRFCL是在晶闸管保护串联电容补偿装置技术上发展而来的新型FCL，它通过电抗器与电容器相串联，使二者能够在谐振状态下工作。当短路发生时，并联于电容器两侧的避雷器、保护间隙和晶闸管等开关器件可将其快速旁路，此时电抗器投运并实现故障电流的限制作用。

目前，牵引供电系统故障电流限制方面的应用仍采用多种开关和保护器件相配合的方案。但由于牵引负荷的冲击性、不平衡性和非线性等特点，加之过电流冲击频率远高于电力系统，因此常规用于电力系统的FCL无法满足牵引供电系统安全运行的要求。为此，针对牵引供电系统频繁过电流冲击和对供电安全高可靠性要求的特点，本文设计了一种基于超高速开关和串联谐振的冗余保护型FCL，采用超高速开关、电抗器和

关键词/Keywords

超高速开关 ·
串联谐振 ·
故障限流器 ·
高频电流传感器 ·
冗余保护 ·

超高频电流传感器构成限流电路，与串联谐振电路限流电路并联，两种电路之间采用互锁开关，由主控制器控制，互为冗余。通过分析限流器主要参数之间的内在关系，分别采用仿真和实际测试对所设计FCL的故障限流能力进行了分析。

1 故障限流器构成和工作原理

牵引供电系统采用27.5 kV单相供电，受行车密度的影响，运行密集区段牵引供电所内主设备（如牵引变压器等）所承受的牵引过电压和过电流冲击频率远大于低行车密度时的水平。这一特点在重载和高速铁路的行车区间更为明显。传统串联谐振型FCL由于采用了大功率的晶闸管器件，故频繁开断在一定程度上降低了其服役寿命和可靠性。相比之下，牵引供电系统因过电流频率远高于电力系统，而当前主流FCL均针对电力系统设计，其对于牵引供电系统的适用性有待进一步验证。

1.1 基本构成

在上述背景下，含有冗余保护配置的FCL原理如图1所示。该FCL共由三部分组成，分别为保护支路I、保护支路II和测控电路。

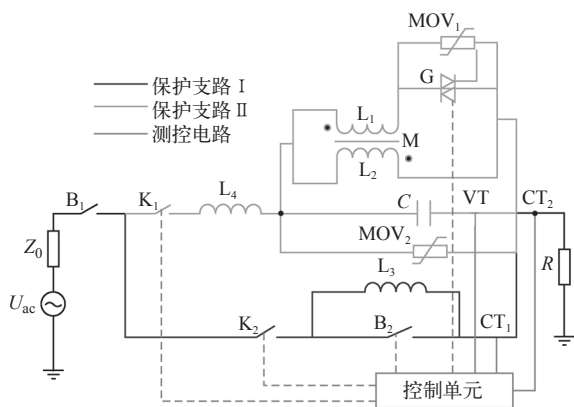


图1 含冗余保护配置的FCL原理图

保护支路I为基于超高速开关的故障限流电路；保护支路II为改进型串联谐振限流电路。在功能上二者均可单独实现故障电流的限制，起到保护后端设备的作用。检测与控制电路主要实现电流电压的检测和保护设备动作信号的控制。图1中， U_{ac} 为电源； Z_0 为等效线路阻抗； B_1 为FCL进线

端断路器，用于断开故障电流； R 为负载。

1) 在保护支路I中， B_2 为基于电磁斥力的超高速开关； L_3 为并联与超高速开关的电抗器； K_2 为保护支路I的互锁开关。保护支路II与保护支路I两者并联互锁。

2) 在保护支路II中，限流电抗器 L_4 和电容器 C 一起构成串联谐振回路，在系统稳态时谐振于工频；引入具有双绕组（ L_1 和 L_2 ）的双分裂电抗器 M 、反并联晶闸管 G 和避雷器 MOV_1 共同组成了电容器 C 的旁路系统，用于降低快速合闸开关的短路电流，且 MOV_1 对反并联晶闸管起到保护作用；同时采用另一避雷器 MOV_2 对 C 进行并联保护； K_1 为保护支路II的互锁开关。

3) 检测与控制电路主要由两个电流互感器 CT_1 和 CT_2 、电压互感器 VT 和控制单元构成。电流互感器用于故障电流监测，电压互感器则用于电容器 C 两端电压监测。

1.2 工作原理

为保证设计的故障限流器能够在频繁过电压、过电流工况下正常工作，设计过程中在两个限流器支路中分别加入互锁开关。正常情况下保护支路I投运，保护支路II热备，运行中不影响电力系统的稳定性，也不会引起无功损耗和电压降落的问题。

正常工作时，互锁开关 K_2 闭合， K_1 断开，超高速开关 B_2 闭合，限流电抗器 L_3 被短路，系统电流只流过 B_2 ，损耗小。当系统发生故障，FCL接到投入指令后， B_2 在第一个自然过零点前3 ms开始分闸动作，3 ms后短路电流自然过零， B_2 绝缘水平恢复到一定能力，短路电流被转移至并联限流电抗器 L_3 ， L_3 起到限制短路电流作用。

在保护支路I失效情况下，保护回路II的电容器 C 和双分裂电抗器 M 的绕组 L_2 构成并联回路并与 L_4 共同构成谐振电路，此时反并联晶闸管处于关断状态。采用 L 表示 L_4 的电感； L_p 和 L_q 分别代表绕组 L_1 与 L_2 的自感和漏感，该谐振关系可表示为^[13]

$$j\omega L + \frac{j\omega L_p}{1 - \omega^2 L_p C} = 0, \quad \omega^2 L_p C \gg 1 \quad (1)$$

式中, ω 为电流的角频率。

当铁心耦合时, 双分裂电抗器绕组 L_2 自感 L_p 远大于 L_4 的电感 L , 式 (1) 可重写为

$$\omega^2 LC \approx 1 \quad (2)$$

在线路故障情况下, 流经线路的电流 i 骤增, 流经电容器 C 的电流 I_C 和流经 L_2 的电流 I_{L2} 随之增大。由于 L_2 与 L_1 为异名磁极连接, 因而避雷器 MOV_1 两端电压飙升将使其导通, 从而将电容器 C 短路。与此同时, 控制单元产生相应触发信号, 控制晶闸管 G 导通, 从而使电容器彻底短路。

这一过程中, 流经双分裂电抗器 M 绕组 L_1 的电流 I_{L1} 从零直接快速增大; 而流经绕组 L_2 的电流 I_{L2} 却逐渐减小, 直至二者相等。此时, 双分裂电抗器的电感值将仅为绕组漏感, 这一过程实现了电容器的旁路操作。保护回路 II 的输出阻抗则可表示为

$$Z_{p1} = j\omega L + \frac{j\omega L_q}{2 - \omega^2 L_q C} \quad (3)$$

在漏感 L_q 较小的情况下, 式 (3) 表示的保护回路 II 的阻抗可近似为

$$Z_{p1} = j\omega L \quad (4)$$

在保护回路 II 中, 双分裂电抗器一方面可以通过其绕组磁通变化实现电容器快速旁路; 另一方面电容器在短路过程中存在较高的放电电流。

然而, 在重载或高速铁路中, 当列车行车密度较高时, 牵引变电系统所承受的牵引过冲击频率远大于电力系统, 严重时甚至会发生连续电流过冲击的情况。因此, 在首次电流冲击保护动作后, 由于保护回路 I 中电容器 C 的存在, 其充电需一定时间。设电源 U_{ac} 的电压为 V_U , 通过电抗 Z_0 给电容 C 充电, V_0 为电容上的初始电压值, V_U 为电容充满电后的电压值, V_t 为任意时刻 t 时电容上的电压值, 则有

$$V_t = V_0 + (V_U - V_0)(1 - e^{-\frac{t}{Z_0 C}}) \quad (5)$$

经过约 $5 Z_0 C$ 时间, 电容器 C 两端电压 $V_t \approx 0.99 V_U$, 可视为电容器充电基本完成。

2 样机设计与制作

基于以上原理, 设计了以串联谐振电路为冗余限流保护电路的超高速 FCL 样机。该限流器由大容量真空灭弧室、电磁斥力操动机构和储能触发与冗余保护单元三部分组成。图 2 给出了所设计的故障限流器样机 3D 视图。

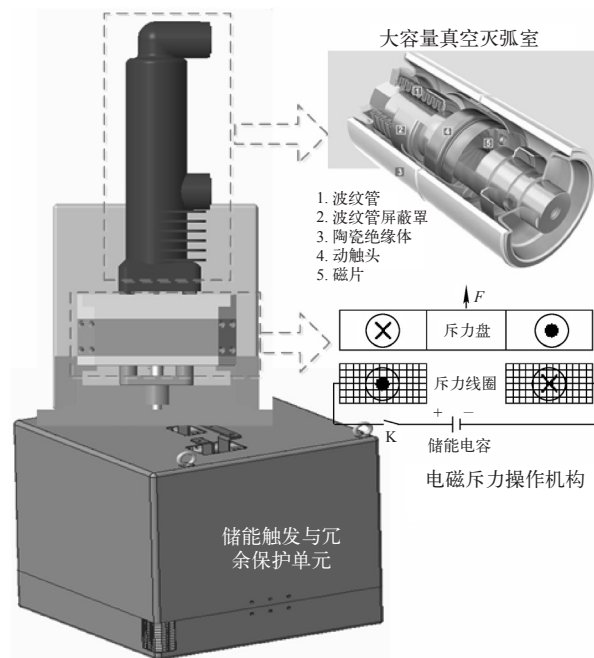


图2 故障限流器样机3D视图

图2中, 真空灭弧室可以快速有效地熄灭分合闸过程中产生的电弧, 而真空灭弧室的快速分闸作用由电磁斥力操动机构实现。储能触发与冗余保护单元主要作用是与超高速机械开关本体配合, 其作用如下: ① 接收上级控制保护发给 FCL 的动作指令, 起动限流动作或分合闸动作; ② 同时给超高速机械开关提供分合闸所需的能量, 是一次主开关动触头动能的来源; ③ 由 SRFCL 为主的保护支路 II 对主保护支路 I, 即快速开关式 FCL 所在回路起到冗余保护作用。由于 SRFCL 采用晶闸管控制, 触发延时只有数微秒。此外, 储能触发及冗余保护单元自身包含了电气量监测、故障自检上报等功能。

3 超高速开关和双分裂电抗器作用分析

3.1 超高速开关特性及其作用分析

在保护支路 I 中, 超高速开关正常工作时闭

合。根据设计,故障发生时超高速开关可在5 ms内分断,将限流电抗器投入故障线路中。与传统开关不同,超高速开关采用的是基于电磁斥力的操作机构,其原理如图3所示。预先充电的储能电容向分闸或合闸线圈放电,斥力盘因为线圈上的脉冲电流产生感应涡流,涡流产生的磁场与线圈脉冲电流产生的磁场相互作用,从而推动斥力盘以及连杆运动,实现分合闸动作。

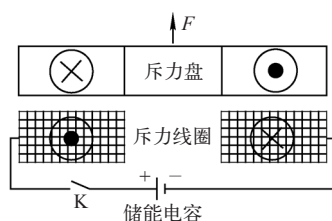
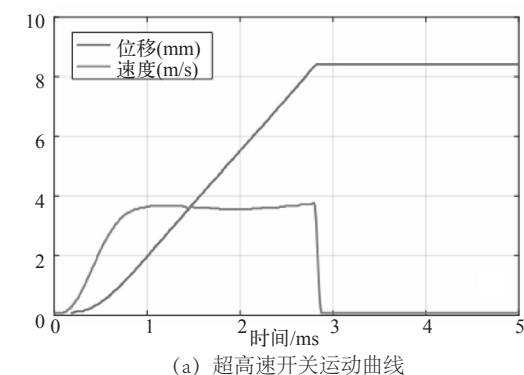


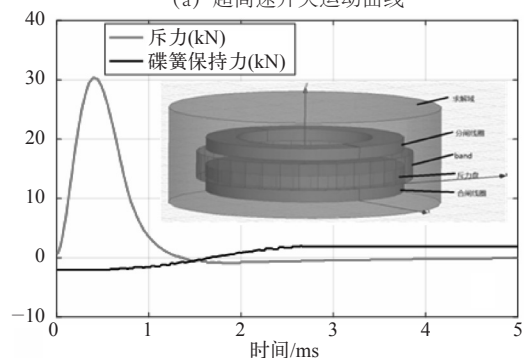
图3 电磁斥力操作机构原理

从图3可以看出,电磁斥力机构能够在3 ms的时间内完成分合闸动作,而弹簧斥力则仅需0.5 ms即可达到最大值,验证了其快速动作的特点。

为明确所设计故障限流器保护支路I所采用的电磁斥力操作机构的动作特性,本文利用有限元分析软件Ansoft Maxwell对电磁斥力机构进行了仿真分析,得到的仿真结果如图4所示。



(a) 超高速开关运动曲线



(a) 超高速开关力学特性曲线

图4 超高速开关运动及力学特性曲线

由于保护支路II采用的晶闸管为门极关断晶闸管(GTO)。该支路不能在短路电流未上升到峰值之前将其快速断开;而且因GTO快速截断数值远大于额定值的短路电流,而使之引起较大的 di/dt 及 du/dt ,虽然采用了MOV₁对反并联晶闸管进行保护,在一定程度上可以抑制由它所产生的高压及附加振荡。若其一旦发生故障,则必须由保护支路I的超高速开关担负故障限流的主要作用。同时,当线路出现连续短路电流冲击、保护支路II电容器处于充电状态或保护电路II出现故障时,超高速开关所在的保护支路I能够起到冗余保护的作用。

3.2 双分裂电抗器在保护支路II中的作用分析

作为保护支路II中新增的关键部件,双分裂电抗器对于电路谐振关系的改善和电容器C稳态载流能力有显著的影响。双分裂电抗器漏感在一定程度上有助于提升保护支路II的故障限流能力。

(1) 对谐振关系和稳态载流的影响

在线路正常情况下,故障限流器保护支路II中的电容器C和双分裂电抗器绕组 L_2 并联,与电感线圈 L_4 构成谐振关系,将式(1)改写为

$$\omega \left(\frac{L_p}{L + L_p} \right) C \omega L = 1 \quad (6)$$

采用 k 表示绕组自感对谐振关系的影响程度,则有

$$k = \frac{L_p}{L + L_p} = \frac{1}{k_1 + 1} \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{L}{L_p}$$

由此可以看出, k 随着绕组 L_2 的自感 L_p 取值的增大而增大,且对电容器C的取值影响逐渐越小;而 k 减小时,电容器C电容值增大,电容器稳态电流增加。为了在正常运行情况下保证故障限流的损耗最小,则需式(7)中 k 取值越大越好。因此,必须满足绕组 L_2 自感 L_p 大于绕组 L_4 的电感 L ,即 $k_1 < 1$ 。

同时,保护支路II中流经电感线圈 L_4 的电流 I_1 和流经绕组 L_2 的电流 I_{L2} 满足

$$\begin{cases} I_C = I_1 - I_{L2} \\ I_C = I_{L2} \omega^2 L_p C \end{cases} \quad (8)$$

即流经电容器 C 的电流 I_C 等于支路II电流 I_1 减去流经绕组 L_2 电流 I_{L2} ，随绕组电流增大而增大。

(2) 双分裂电抗器漏感对限流能力的提升

由式(3)可知，双分裂电抗器的绕组漏感 L_q 对限流电感绕组 L_4 的限流作用有一定提升。在绕组漏感存在情况下，保护回路II的输出阻抗相对增量为

$$\Delta Z_{PI} = \frac{k_2}{2 - k_2}, \quad \omega L_p \gg \frac{1}{\omega C} \quad (9)$$

式中， $k_2 = L_q/L$ ，此处的输出阻抗增量可等效为限流电感的增量。

图5给出了保护回路II输出阻抗随 k_2 的变化规律，这一规律为双分裂电抗器绕组漏感和电感绕组 L_4 优化取值的参考依据之一。从图5中可以看出，当 $k_2 \rightarrow 2^-$ 时，双分裂电抗器漏感与电容器并联后呈电抗特性，可提高保护支路II的限流能力；当 $k_2 \rightarrow 2^+$ 时，双分裂电抗器漏感与电容器并联后呈容抗特性，会降低保护支路II的限流能力。因此，设计过程中应保证 $k_2 < 2$ 。

4 故障限流器仿真与现场试验

4.1 仿真研究

为验证所研制FCL的限流效果，根据样机结构和参数，再结合实际测试电路的参数，在PSCAD

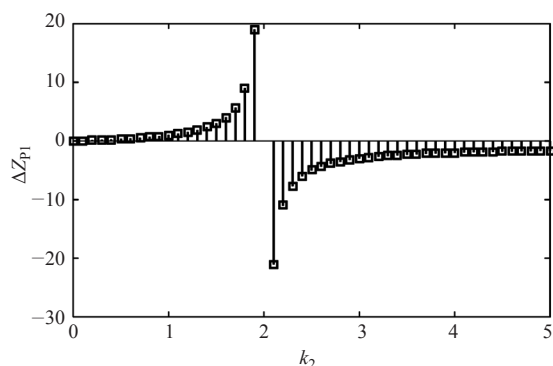


图5 保护回路II输出阻抗随 k_2 的变化规律

平台进行了仿真测试。其中，实际测试电路中的变压器为110/35 kV降压变压器，FCL安装在变压器低压侧的出线端，然后分别接断路器馈出3路；单相接地故障设定在馈出线1断路器出口处；断路器安装在变压器与馈线断路器入口之间。

基于以上描述，给出了FCL仿真测试电路如图6所示。其中，变压器采用Γ形等效电路，等效参数为： $R_T=14.778 \text{ m}\Omega$ ， $L_T=1.5397 \text{ mH}$ ， $R_L=752.11 \text{ }\Omega$ ， $L_L=5.5141 \text{ H}$ 。仿真电路中3条馈出线路的等效参数为： $R_1=R_2=R_3=14 \text{ }\Omega$ ， $L_1=L_2=L_3=29.9 \text{ mH}$ 。

图6中，限流器出口额定电流为1.1 kA，额定电压为7.5 kV。FCL保护支路I动作前后线路电流电压波形如图7所示。由图7可以看出，在0.572 s单相短路故障发生时，在无FCL保护的情况下，系统电压迅速跌落，由原来的7.5 kV降至2.1 kV；短路故障电流在第2个周波内增大至正常运行的10倍（由1.1 kA增大至11.8 kA）。相比之下，当FCL保护支路I投运后，故障电流在第2个周波内被限制在5.4 kA以下，系统电压也维持在正常运行的69%。

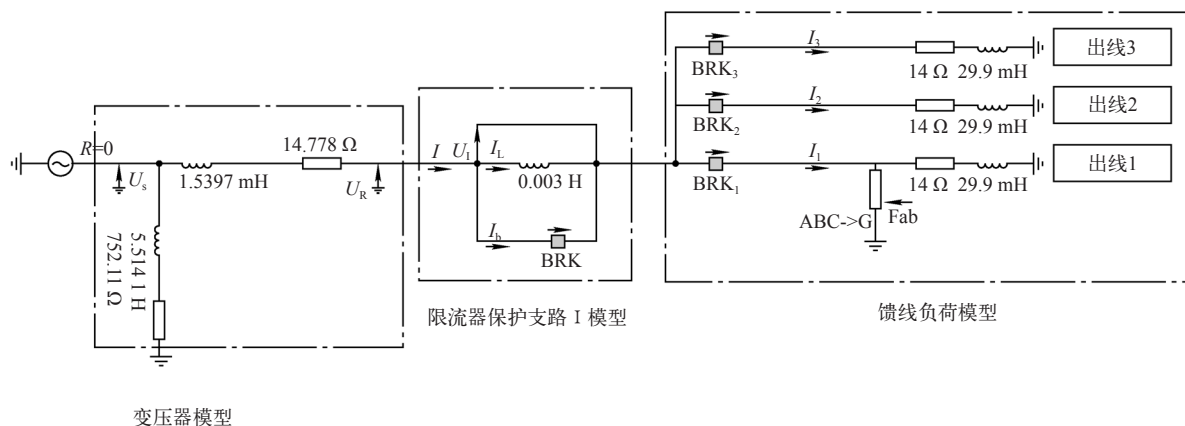
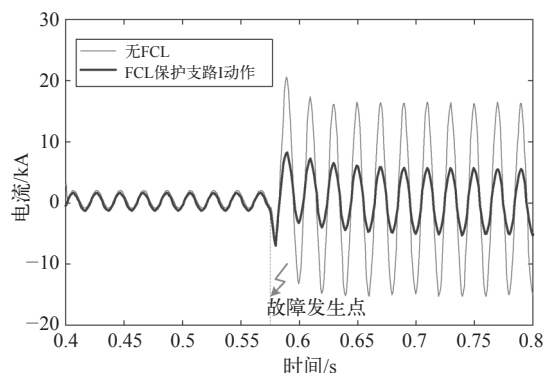
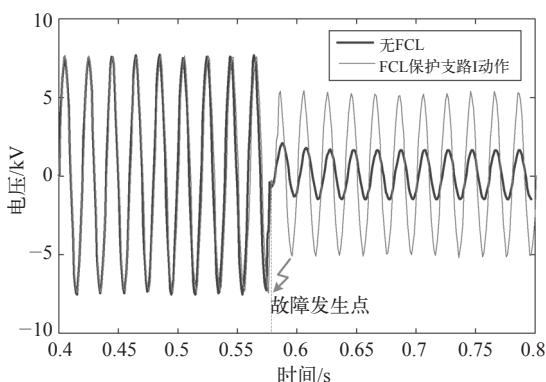


图6 含冗余保护配置的FCL仿真测试电路

FCL投运前后系统电流电压的变化具体情况如下表所示。



(a) FCL投运前后线路电流大小



(b) FCL投运前后线路电压大小

图7 FCL保护支路I动作前后线路电流电压波形

表 仿真结果汇总

项目	无FCL	FCL支路I动作	效果
短路电流 (RMS)	11.3 kA	5.4 kA	降低48%
短路电流峰值 (0.2 s)	21.7 kA	8 kA	降低34%
线路短路电压	2.1 kV	5.2 kV	提升147%

4.2 短路试验

为了测试设计的FCL能在故障电流出现时快速动作，从而起到保护后端电路的作用，设计的测试电路如图8所示，采用方波脉冲电流对主保护电路I和冗余保护电路II分别进行了试验测试。图中， K_2 为单刀双掷开关； Z_2 为故障电流检测阻抗（1 Ω ）；V为电压测试部件；VD为保护测试电路的晶闸管；I为可控电流源（51 A）。

采用方波脉冲电流模拟故障短路电流，测试了故障限流器的短路电流限制能力与开关响应速度。其中，方波脉冲电流占空比为45%。当故障电

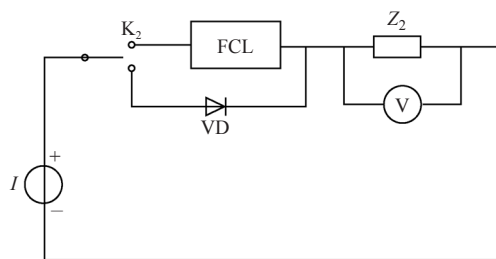
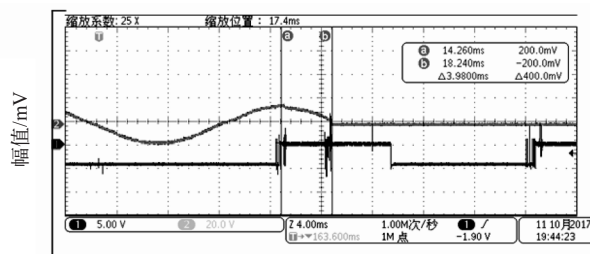
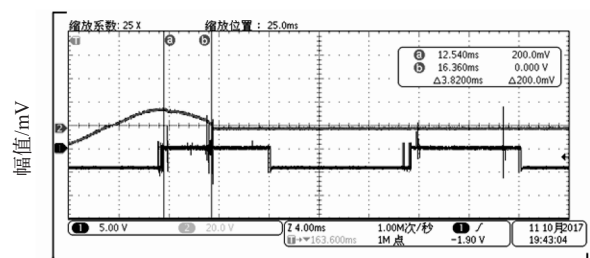


图8 故障限流器绝缘耐压测试电路

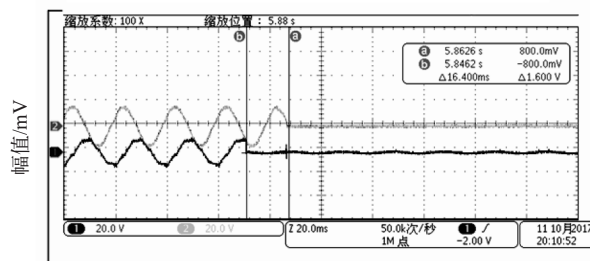
流流经电路时，由电流传感器 CT_2 进行检测，并根据设定阈值控制响应保护支路或开关动作。设定FCL动作电流阈值为50 A(RMS)。图9给出了所设计FCL在方波脉冲电流下的响应特性。图9中，标签1为故障电流信号；2为电阻两端检测到的电压波形。在设计的故障限流器中，保护支路II是保证限制故障电流的最后屏障，由于采用了超高速开关，因此动作特性比应优于断路器。



(a) 方波电流下保护支路I动作时序及波形



(b) 方波电流下保护支路II动作时序及波形



(c) 断路器替代超高速开关后保护支路II动作时序及波形

图9 不同电流波形下的FCL响应特性

由图9a、b可以看出，在检测到故障电流后，FCL能够快速动作，限流回路I能够在3.98 ms内

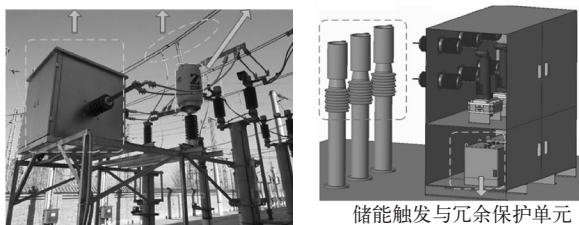
投切, 保护回路II同样能够快速响应, 在3.82 ms内动作, 可以保证后端系统安全可靠运行。该动作时间远小于继电保护系统对故障切除时间极差的要求(110 kV及以下系统要求故障切除时间为0.2~0.5 s)。为了对比分析, 采用断路器替代超高速开关后, 测试了断路器及采样电阻 Z_2 两端的电压波形, 如图9c所示。

与其他类型FCL相比, 在检测到过电流信号后, 断路器动作需16.4 ms才能起到限制故障电流的作用, 动作时间远大于采用超高速开关的保护支路II或采用并联谐振原理的保护支路I。

4.3 现场安装方案

在现场实际应用中, 本文设计的含冗余保护的超高速FCL有两种安装方式, 即户外支撑式安装和户内柜式安装, 如图10所示。在户外安装时, FCL进线端与牵引变压器二次侧出线经电缆相连, 出线经限流电抗器馈至接触供电网; 限流电抗器均由支撑绝缘子固定并架空安装, 与FCL满足电气安全距离。考虑到冬天北方户外结冰冰柱可能引起FCL或限流电抗器与地面之间安全距离缩短, 因此实际安装过程中二者与地面的距离应不小于正常电气安全距离的1.5倍。

故障限流器 馈线出线 限流电抗器 限流电抗器 故障限流器



(a) 牵引变电所户外支撑安装 (b) 变电所户内柜式安装

图10 故障限流器现场安装使用情况

5 结束语

针对牵引供电系统过电流频繁的特点, 将超高速开关与电抗器并联, 构成了一路单独的故障限流支路。同时, 在并联谐振电路的基础上, 将双分裂电抗器引入故障限流器设计, 与电容器、电抗器等部件构成了并联谐振回路。在系统正常

运行时, 所设计的两个保护支路对外输出阻抗均为零; 当系统故障时能在短时期内呈现高阻状态, 从而保护后端电路。通过引入互锁开关, 将两个保护支路并联, 正常情况下保护支路I工作, 保护支路II热备。当保护支路I故障或出现连续短路过电流时, 保护支路II投切。仿真和短路试验结果表明, 所设计的故障限流器动作速度快, 能够在5 ms内快速投切, 起到故障限流的作用, 可最大程度地满足牵引供电系统对故障保护设备高可靠性的要求。

参考文献

- [1] 王勇. 客运专线牵引供电系统短路试验的研究[J]. 铁道工程学报, 2009(11): 76-80.
- [2] 李晓明, 梁军, 王葵, 等. 新型磁控式故障限流器[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 42-46.
- [3] 卫元朋, 韩松, 许逵. 串联谐振型高压故障限流器研究及应用进展述评[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 104-109.
- [4] 陈柏超, 魏亮亮, 雷洋, 等. 饱和铁心型桥式故障限流器的性能参数设计与实验[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 185-193.
- [5] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 1-4.
- [6] 曾琦, 李兴源, 蔡鑫贵, 等. 带串联补偿故障限流器的仿真和实验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 54-56.
- [7] 陈伟, 宁嘉琦, 李敏, 等. 串联补偿型限流器的设计与仿真[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1861-1865.
- [8] 张志丰, 肖立业, 邱清泉, 等. 一种改进串联谐振型限流器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 169-177.
- [9] 刘红星. 新型故障限流器的设计与试验研究[J]. 华东电力, 2013, 41(12): 2526-2531.

(收稿日期: 2018-04-10) EA