

# EAST 极向场电源失超保护系统的设计 及模拟实验

宋执权, 傅 鹏, 汤伦军, 吴义兵

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘 要:** 给出了 EAST 极向场磁体电源失超保护系统的设计方案, 描述了两种失超保护开关——直流快速开关和爆炸开关采用的两级换流结构的设计和工作原理, 分析了这种结构在换流过程中的规律, 该结构有效地解决了开关开断直流大电流的难点。通过模拟实验证明了该失超保护系统满足设计要求。

**关键词:** 失超保护; 直流快速开关; 爆炸开关; 两级换流结构

**中图分类号:** TM561

**文献标识码:** A

## 1 引言

极向场电源系统是 EAST 超导托卡马克装置的重要组成部分, 等离子体的产生、约束、加热与平衡等都必须依赖于 12 个极向场超导线圈。装置正常运行时, 它们都储存着巨大的磁场能量。一旦超导线圈发生失超, 其储存的巨大能量必须立即释放出去, 否则将会损坏磁体, 造成不可估量的损失。由于失超保护系统可以迅速将储存在磁体中的巨大磁场能量转移到移能电阻中释放掉。因此它对整个超导托卡马克装置的安全运行非常重要。

EAST 极向场电源失超保护系统包括 12 套失超保护系统单元, 每个失超保护单元主要由直流快速开关、爆炸开关、熔断器、移能电阻和控制系统等组成。为提高开关动作的可靠性, 采用两个直流快速开关作为主保护开关, 一个爆炸开关作为后备保护开关。

本文将重点介绍失超保护开关的两级换流结构的设计和工作原理, 同时还分析了电流在两级换流结构间的切换过程, 并给出了移能电阻和控制系统的基本设计方案。

## 2 失超保护开关两级换流结构的设计和工作原理

由于装置正常运行时, 超导磁体上需要通过数十千安的大直流电流, 因而要求失超保护开关正常运行时的载流能力强, 失超分断时产生的开断电压高, 所以失超保护开关实际上就是一种大功率直流开关。另外, 由于开断电压要加在断流后的开关断口上, 此时开关断口所承受的恢复电压很高, 一般单级开关很难承受如此高的直流恢复电压。

因此为满足上述要求, 大功率直流开关通常采用的是双触头(主触头和灭弧触头)或开关-熔断器组合电器的两级换流结构来实现<sup>[1]</sup>。

### 2.1 直流快速开关换流结构设计和工作原理

为实现开关正常运行时长期通过大电流、分断时能承受高电压的要求, 直流快速开关的设计采用水冷式双触头的两级换流结构, 其中主触头承载长期工作电流, 灭弧触头承担开断产生的脉冲高电压以减轻主触头断流的负担<sup>[2]</sup>。

为保证主触头可以长期通过大电流的要求, 在主静触头内设计水腔, 通过循环水进行冷却, 而对主动触头则采用轴流风扇进行风冷, 两种冷却方式相结合大大提高了触头的电流容量并缩小了开关的体积。

对弧触头则设计了引弧角和灭弧栅, 它们的主要作用是: 开关分断时, 电弧电流在自身所产生的电磁力作用下通过引弧角被拉长并进入灭弧室, 电

弧与灭弧栅相接触, 散出热量。这样对电弧的综合作用, 使得电弧被迅速熄灭而产生很高的弧电压<sup>[3]</sup>。

直流快速开关的基本结构如图 1 所示。从图 1 中可以看出它主要由主触头(包括动、静触头)、灭弧触头(包括动、静弧触头)、灭弧室和操作机构等组成。

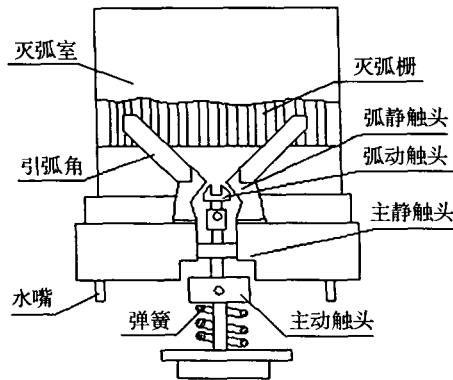


图 1 直流快速开关结构图

开关基本工作原理是: 稳态运行时, 大电流主要从主触头上通过; 开断电流时, 主触头首先分离断开, 将开断电流立即转移到与之并联的二级机构即灭弧触头支路上, 约几 ms 后, 灭弧触头再断开, 产生很高的弧电压, 使磁体中的能量迅速转移到高阻抗负载中释放出来。这种触头动作上的时间顺序, 主要作用就是保护开关主触头, 因而可大大延长开关的使用寿命<sup>[4]</sup>。

主触头与灭弧触头间动作的时间差是通过设计灭弧触头与主触头间存在的超行程来实现的。超行程大小调整的原则是, 保证两触头间动作的时间差值必须大于主触头绝缘强度的恢复时间。

这种直流快速开关的额定电流为 15kA, 额定开断电压 1500V, 它的最大开断电流可以达到 50kA, 最大开断电压为 3kV。由于它的操作机构简单, 运行时操作维护方便, 所以将它作为失超主保护开关。

### 2.2 爆炸开关结构和工作原理

图 2 是极向场失超保护系统实验电路图。失超保护单元电路中的爆炸开关换流结构与直流快速开关采用的双触头结构不同, 采用开关-熔断器组合电器来实现大电流开断。爆炸开关作为主开关承载长期工作电流, 而熔断器则用于开断电压来减轻爆

炸开关断流的负担。

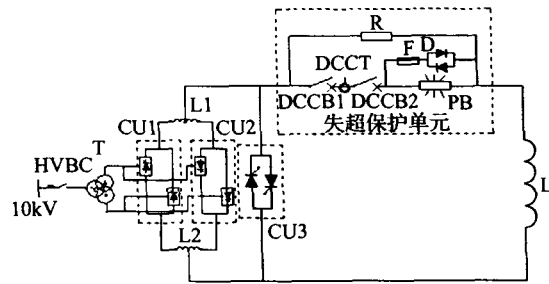


图 2 极向场失超保护系统实验电路图

HVBC——高压开关柜; T——整流变压器; CU1、CU2——整流器; CU3——旁通堆; L1、L2——电抗器; L——负载电感; DCCB1、DCCB2——直流快速开关; PB——爆炸开关; F——熔断器; D——二极管; R——移能电阻; DCCT——电流传感器。

为保证爆炸开关能长期通过大电流而其内部放置的炸药和雷管处于安全起爆温度以下, 采用在开关各接触部分设计水冷通道, 通过水冷通道中的冷却水循环将触头间接触电阻所产生的大部分焦耳热, 通过热交换带出开关, 保证整个开关内部和外部温升在 20℃ 以内。

爆炸开关主要由开关主体、触头系统、夹持机构和驱动部分组成。开关的基本结构如图 3 所示。上圆盘、底盘、绝缘筒组成了开关主体; 上、下触头和上、下导电环构成了触头部分; 水冷环、钢衬套和螺栓形成了夹持机构; 雷管、炸药和上、下触头间的绝缘块组成了驱动部分。

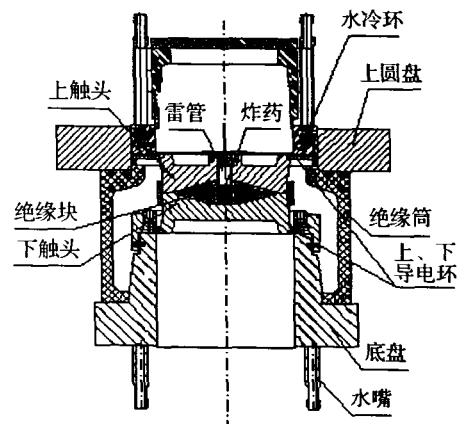


图 3 爆炸开关基本结构图

熔断器采用了配有撞击器的高压限流熔断器, 熔断后具有指示功能。它结构简单, 在爆炸开关系

统换流过程中起着重要的作用<sup>[5]</sup>：一是进行二次换流，通过人为控制熔断时间来减轻主开关灭弧负担，使开关绝缘介质强度得到迅速恢复；二是产生脉冲高压，使磁体中的能量迅速转移到移能电阻中释放出来。可见熔断器的作用与直流快速开关的灭弧触头作用相类似。

与熔断器串联的二极管的作用是，利用其导通时所需的门槛电压，阻断开关正常运行时主回路电流从熔断器上通过。

爆炸开关基本工作原理是，当起爆信号到达雷管触发装置时，立刻引爆雷管和炸药；在炸药爆炸产生的巨大爆轰压力下，绝缘块迅速变形、膨胀，产生巨大的推力，从而使处于上、下位置的触头分别冲断导电环并迅速分离。触头分离过程中产生的电弧在巨大的爆轰波气流作用下迅速熄灭，同时开断电流立刻由开关向与其并联的熔断器支路换流。

爆炸开关是一种炸药驱动的特殊机械开关，它额定工作电流可达 20kA，额定开断电压为 2kV，它可通过的最大脉冲电流达 200kA，最大开断电压为 10kV。它具有结构简单、分断速度快、分断可靠性高等优点。主要缺点在于它使用雷管与炸药，有一定的危险性，另外每次分断后需要更换触头和驱动机构部分，增加了造价和维护的负担；因此将它作为后备保护开关。

### 3 换流过程分析

下面将分析电流由开关的第一级向第二级机构的换流过程。

在换流过程中，电弧电压除与换流回路的电感及电阻有关外，还决定于电流的变化率。为计算开关电弧电压的等效电路如图 4 所示。其中  $L_1$ 、 $R_1$ 、 $L_2$ 、 $R_2$  分别为开关第一级支路和第二级支路的电路参数。

在超导储能电源系统中，超导磁体的储能大，线圈的时间常数为秒级，而电流的切换过程仅需几 ms，因此可假定在此期间储能线圈中电流和电路参数不变。

由图 4 可得如下电路方程：

$$U_a + i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$i_1 + i_2 = I \quad (2)$$

式(1)中， $U_a$  为开关电弧电压。当  $t = 0$  时， $i_1 =$

$\frac{R_2}{R_1 + R_2} I$ ， $i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$ 。因电流  $I$  视为常数，所

以  $\frac{di_1}{dt} = -\frac{di_2}{dt}$ 。经变换得：

$$\frac{di_2}{dt} + \frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} i_2 = \frac{IR_1 + U_a}{L_1 + L_2} \quad (3)$$

假设电弧电压为矩形波且为一恒定值，则电流  $i_2$  的解为：

$$i_2 = \frac{U_a + IR_1}{R_1 + R_2} - \frac{U_a}{R_1 + R_2} \exp\left(-\frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2} t\right) \quad (4)$$

由式(4)得：

$$U_a = \frac{i_2(R_1 + R_2) - IR_1}{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (5)$$

式中， $\tau = \frac{L_1 + L_2}{R_1 + R_2}$ 。设  $t = t_g$  ( $i_2$  上升时间)、 $\tau_g = \frac{t_g}{\tau}$ ，

则电弧电压的最大值为：

$$U_{am} = \frac{I_2(R_1 + R_2) - IR_1}{1 - \exp(-\tau_g)} \quad (6)$$

由式(6)可知，当电流  $I_2$  一定时，换流时间越短，则换流过程中产生的电弧电压越高。同时也表明，在换流回路几何尺寸确定之后，减小回路电阻可降低电弧电压。在实际运用中，灭弧触头或熔断器的阻值确定后，只有最大限度的减小换流回路在空间的几何尺寸，才能使杂散电感及引线电阻减小，达到降低电弧电压的目的<sup>[6]</sup>。

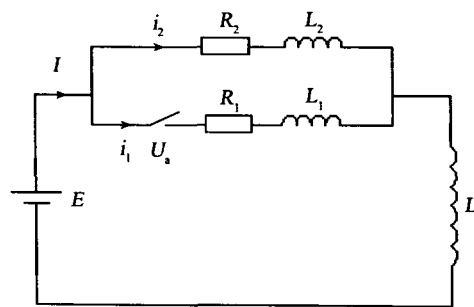


图 4 换流等效电路

显然，第二级机构向移能电阻的二次换流过程与第一级的一次换流过程类似，不同的是换流过程中它产生的电弧电压更高，在第二级机构中消耗的能量更大。

### 4 移能电阻的设计

移能电阻的主要作用是吸收超导磁体失超后释放的磁场能量。

极向场磁体失超时允许的最大  $I^2t$  为  $5.1 \times 10^8 \text{A}^2 \cdot \text{s}$ , 磁体两端承受的最高电压不能超过  $5000\text{V}^{[7]}$ 。因此, 考虑一定裕量时, 移能电阻阻值大小需满足如下方程:

$$\begin{cases} \int_0^{+\infty} i^2 dt \leq 0.5 \times 5.1 \times 10^8 \\ I_0 R < 5000 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $i = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ ,  $\tau = \frac{L}{R}$ ,  $I_0 = 15\text{kA}$ 。

最大一组极向场线圈电感为  $L = 178\text{mH}$ , 可得:  $R \geq 0.078 \Omega$ , 则取  $R = 0.1 \Omega$ 。

由于极向场磁体失超时, 需向移能电阻释放达  $20\text{MJ}$  的能量, 在满足移能要求的条件下, 设计采用不锈钢管构成的移能电阻比较经济且符合实际要求。

移能电阻的基本结构如图 5 所示。它由几十根  $\text{O}20$  的不锈钢管组成, 每根不锈钢管之间的连接既可串联也可并联。这种设计可方便的实现移能电阻的阻值改变。

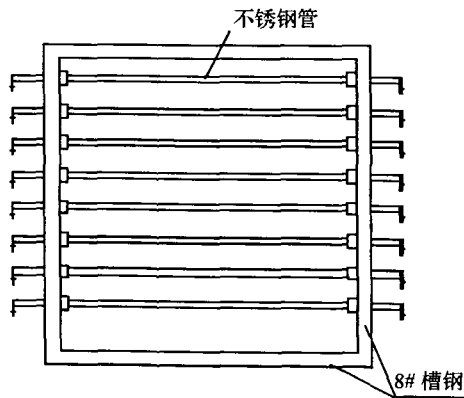


图 5 移能电阻基本结构图

### 5 失超保护控制系统的设计

由图 2 可知失超时三个开关中至少有一个必须动作, 由于爆炸开关分断后维护费时费力, 应尽量减少其不必要的动作次数。因此, 极向场失超保护控制系统的基本设计 requirements 是必须保证直流快速开

关的可靠动作, 同时应避免爆炸开关的误动作。

具体设计要求是在磁体失超时, 各失超保护开关要能确保按照设定的时间顺序可靠动作, 也即首先要保证两个直流快速开关的可靠分断, 分闸控制线路要简单可靠。其次是要减少爆炸开关不必要的动作次数。爆炸开关作为失超后备保护开关, 其动作条件是在两个直流快速开关都拒动的情况下才能动作。为实现这一要求则在开关支路中加入电流传感器 DCCT(如图 2 所示), 其主要作用就是检测开关支路的电流, 以判断失超后直流快速开关是否断开, 从而决定是否分断爆炸开关。

此外, 通过现场总线对开关的各种状态量实现在控制室中就可以实时监测, 以便出现故障时能及时报警并处理。

失超保护控制系统的设计方案流程如图 6 所示。从图中可以看出, 一旦磁体失超信号来到, 一路信号通过计算机程序控制以太网现场总线来实现各开关的动作; 另一路信号直接送达现场的硬件电路保护来实现开关分断。软件保护与硬件电路保护的并行控制, 确保了失超保护系统工作的可靠性。

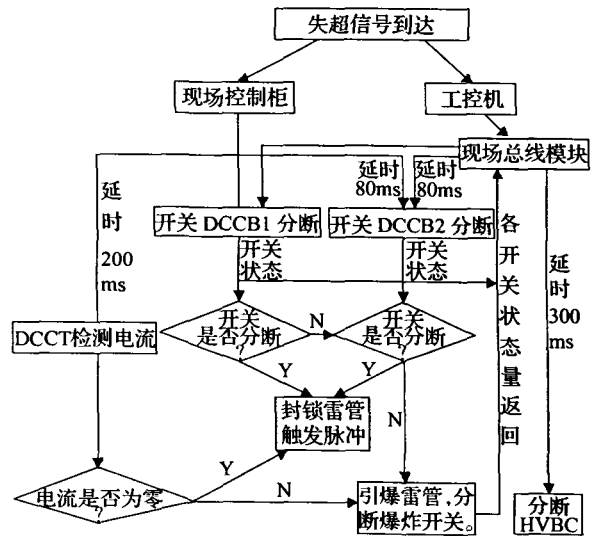


图 6 失超保护控制系统流程图

### 6 实验结果

首先对直流快速开关进行了分断能力实验。图 7 给出了开关分别开断  $12\text{kA}$ 、 $15\text{kA}$  主电流情况下开关两端的电弧电压和与之并联的电阻支路的电

流波形。其中 CH1、CH2、CH3 分别为主电流波形、电阻支路电流曲线和开关两端的弧电压波形。

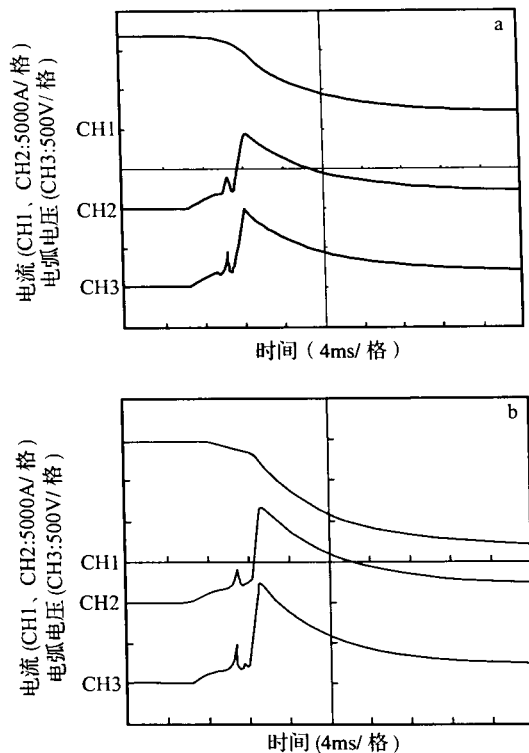


图 7 直流快速开关两端弧电压与电流波形图

a——直流快速开关开断 12kA 电流时，开关两端的弧电压与电流波形；b——直流快速开关开断 15kA 电流时，开关两端的弧电压与电流波形。

由图 7 可知，直流快速开关分断时间约为 6ms，从主触头分断到弧触头完全分断的时间约为 2ms。在此期间未出现主触头被击穿的现象表明，该开关的主触头绝缘强度恢复时间小于 2ms。开关完全分断后电流全部转移到了电阻支路，成功地实现了两级换流。从这两波形图中还可以看出，随着开断电流的增加，开关两端产生的弧电压变大。

然后通过改变熔断器的熔断时间，来调节爆炸开关的绝缘恢复时间，对爆炸开关系统进行了几次成功的开断实验。

图 8a、b 分别是在不同熔断器的熔断时间下，爆炸开关开断 15kA 电流时，熔断器熔断后的弧电压波形以及主回路、熔断器支路和高阻抗负载支路的电流波形。图 8 中 CH1、CH2、CH3 分别表示主回路电流、熔断器支路电流和和移能电阻支路电流的波形；CH4 为熔断器熔断后产生的弧压波形。两

波形不同在于，图 8a 中熔断器的熔断时间约为 8ms，而图 8b 中的熔断时间为 4ms，而熔断后两者产生的弧压和转移到电阻上的电流基本相同。

可以看出，爆炸开关断开后，在不同的熔断时间下，熔断器熔断时产生的恢复电压均低于爆炸开关的绝缘介质恢复电压。爆炸开关未被击穿，可见爆炸开关的绝缘介质恢复时间小于 4ms。这时回路中的能量除小部分消耗在熔断器中，大部分能量都转移到移能电阻中消耗了，开系统成功开断。

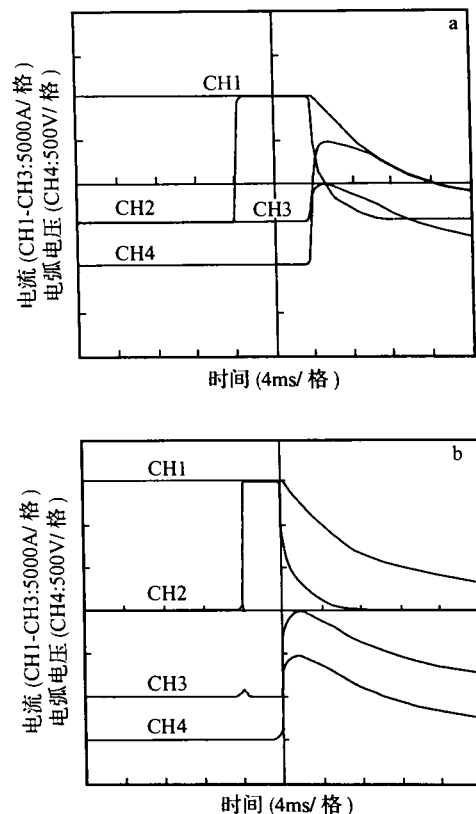


图 8 开关系统开断弧电压和支路电流波形图  
a——熔断器熔断时间 8ms；b——熔断器熔断时间 4ms。

## 7 结论

在设计超导储能装置或磁体失超保护系统中使用的大功率直流开关，通常采用双触头开关或开关-熔断器组合电器的方案，也可设计具有二级换流结构的直流开关来实现。这种结构能有效地解决开关开断大直流电流的困难。此外，为了降低开关开断弧压和减少开关开断过程中的能量损耗，应最大限度地减少换流回路的空间几何尺寸，从而减小杂散电感和引线电阻。

通过上述实验证明, 整个失超保护系统符合设计要求, 满足了装置运行的需要, 即将应用于 EAST 装置的实际运行中。

#### 参考文献:

- [1] 郭增基. 电流由开关向低阻抗负载切换的规律 [J]. 高压电器, 1991, 6: 81.
- [2] 林莘. 现代高压电器技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 王其平. 电器电弧理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [4] 李天和. 大功率开关装置的物理基础与工程应用[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [5] 傅鹏, 许家治, 汤广福. 开断感性直流 90kA 开关系统的研制 [J]. 高压电器, 1995, 6: 7.
- [6] 许家治, 傅鹏, 郭乐先. 用于脉冲电路的熔断器的熔断时间及开断电压上升时间精度的研究 [J]. 高压电器, 1991, 4: 74.
- [7] FU Peng, LIU Zheng-zhi, XU Jia-zhi, et al. Poloidal field power supply systems for the HT-7U steady state superconducting tokamak [J]. Fusion Science and Technology, 2002, 42: 155.

## Design of the quench protection system of the EAST PFPS and its simulation

SONG Zhi-quan, FU Peng, TANG Lun-jun, WU Yi-bing

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** The design schemes of the quench protection system of the EAST poloidal field power supply (PFPS) are given. The detailed descriptions of structure of two stages commutating current and its operated principle are introduced, which are applied to two quench protection breakers—the direct current circuit breaker (DCCB) and the explosively operated circuit breaker (EOCB). The regulation of the commutating current of the structure is analyzed, the structure resolves the problem of large current interruption effectively. The simulation results show that the quench protection system meets the requirements of design.

**Key words:** Quench protection; Direct current circuit breaker (DCCB); Explosively operated circuit breaker (EOCB); Structure of two stages commutating current