

# 直流快速开关换流分析\*

宋执权, 傅鹏

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要:**介绍了超导托卡马克装置中失超保护开关——直流快速开关的工作原理,并通过理论和实验分析了其在换流过程中的规律。为超导磁体失超保护开关及电感储能脉冲电源电路的开关选择和电流换流回路参数的确定提供依据。

**关键词:**直流快速开关;绝缘恢复时间;换流;电弧电压

**中图分类号:** TM 501+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5531(2005)05-0010-03



第一作者:宋执权(1975-),男,博士研究生,研究方向为超导磁体失超保护系统及大功率机械开关。

## Analysis of the Direct Current Circuit Breaker in Current Commutating

SONG Zhi-quan, FU Peng

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

**Abstract:** The operation principle of a direct current circuit breaker, which is used as quench protection in the Tokamak, was introduced, and the law of the commutating current of the circuit breaker was presented with theory and test results in details. The law will be used for selecting the circuit breaker of the quenching protection of super conducting magnet and the switch of the inductive energy storage pulsed power. It will also be used for confirming the commutating circuit parameters.

**Key words:** direct current circuit breaker; insulator recovery time; commutating current; arc voltage

### 0 引言

超导托卡马克装置中纵场与极向场磁体是大型超导电感储能系统,磁体一旦失超需要通过失超保护开关迅速将其储存的能量转移释放,故要求失超保护开关正常运行时载流能力强,失超分断时分断电压高。由于分断电压要加在断流后的开关断口上,此时开关断口承受的恢复电压很高。一般开关很难承受很高的恢复电压,通常采用的开关是水冷和双触头(主触头和灭弧触头)的结构或开关-熔断器组合电器。

本文介绍直流快速开关就是采用双触头水冷结构,主触头承载长期工作电流而灭弧触头则用于分断电压来减轻主触头断流的负担,并产生脉冲高压<sup>[1]</sup>,以此来解决开关的高热稳性、大电流分断和脉冲高电压的产生等问题。重点研究了电流在开关两触头间的切换过程,该问题的解决将

为失超保护开关和电感储能系统开关的选择和电流切换回路参数的确定提供理论依据。

### 1 开关的工作原理

开关的基本工作原理是:开关稳态运行时,电流主要从主触头通过;当分断电流时,首先是主触头先分离断开,其产生的较低弧压将分断电流立即转移到灭弧触头支路上,约几毫秒后,灭弧触头再断开,其上产生的电弧由于灭弧栅的作用而迅速熄灭并产生高压。此时,主触头两端间隙之间的绝缘强度已恢复,主触头不会被击穿而发生重燃,这种触头动作上的时间顺序的主要作用就在于保护开关的主触头,因而大大延长了开关的使用寿命<sup>[2]</sup>。

### 2 换流过程分析

图1所示为极向场超导磁体电源电路简图。

\* 基金项目:国家九五科学工程 EAST 超导托卡马克装置失超保护开关项目(DU1030020)

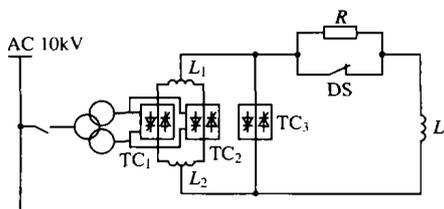


图1 超导磁体电源电路简图

该电路的基本工作过程为：整流器 TC<sub>1</sub>、TC<sub>2</sub> 经直流快速开关向超导磁体线圈 L 充电储能，当电流为 I 时磁体发生失超，失超检测装置立即发出失超信号给 DS 开关的分闸控制单元，分闸操作机构动作，开关立刻分断并产生较高的电弧电压，使 DS 开关中的电流迅速转移到与之并联的高阻抗移能电阻 R 中，使超导磁体 L 中储存的磁场能量以极高的脉冲功率在电阻中迅速释放，以保护超导磁体不受损坏。

电流在开关内部由主触头向灭弧触头切换过程的等效计算电路如图 2 所示。其中：L<sub>1</sub>、R<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、R<sub>2</sub> 分别为开关的主触头、灭弧触头支路的电路参数；M 为两支路之间的互感。

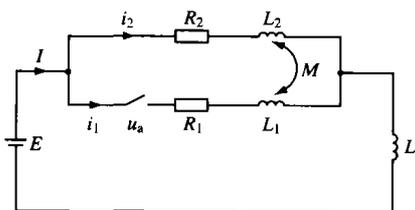


图2 两触头间换流过程的计算电路

在超导储能系统中，超导磁体的储能巨大，超导磁体线圈的时间常数通常为秒级，而电流的换流过程仅几毫秒，可假定在此期间储能线圈中的电流和电路参数保持不变。

此外，由于灭弧触头是低阻抗负载，换流过程中的弧压不高，故主触头分断过程中消耗的能量 E<sub>a</sub> 远小于磁体线圈 L 中储存的能量。同时考虑到与断路器并联的是高阻抗的移能电阻，其阻抗远大于主触头和灭弧触头的支路阻抗，在电流从主触头切换到灭弧触头的一级换流过程中可忽略。

基于以上假设，由图 2 可得：

$$\begin{aligned} u_a + i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} &= \\ i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} &= \end{aligned} \quad (1)$$

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

式中，u<sub>a</sub> 为主触头的电弧电压。

当 t = 0 时，

$$i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I, \quad i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

因电流 I 可视为常数，故  $\frac{di_2}{dt} = -\frac{di_1}{dt}$ 。

将  $\frac{di_2}{dt} = -\frac{di_1}{dt}$ ，i<sub>2</sub> = I - i<sub>1</sub> 代入式(1)，经变换得

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{R_1 + R_2}{L_1 + L_2 - 2M} i_1 = \frac{IR_2 - u_a}{L_1 + L_2 - 2M} \quad (3)$$

开关的电弧电压是决定电流切换过程的关键参数。根据大量的实验观察，在切换电流过程中，u<sub>a</sub> 可近似表达为<sup>[3]</sup>

$$u_a = \begin{cases} U_{am} = \text{const} & \text{情况 1} \\ \frac{U_{am}}{T_g} \cdot t & \text{情况 2} \end{cases} \quad (4)$$

式中：T<sub>g</sub> 为主触头向灭弧触头换流时所经历的时间；U<sub>am</sub> 为电弧电压的最大值。除换流初始和换流过程末的一小段时间外，电弧电压所描述的波形通常都落在式(4)所描述的两种情况间。

解式(3)的微分方程可得开关主触头支路上电流的变化为

$$i_1 = \frac{R_2}{R_\Sigma} I - \frac{U_{am}}{R_\Sigma} F\left(\frac{t}{T_\Sigma}\right) \quad (5)$$

$$F\left(\frac{t}{T_\Sigma}\right) = \begin{cases} 1 - e^{-t/T_\Sigma} & \text{情况 1} \\ \frac{1}{\tau} \left[ \frac{t}{T_\Sigma} - (1 - e^{-t/T_\Sigma}) \right] & \text{情况 2} \end{cases} \quad (6)$$

式中，

$$T_\Sigma = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma}, \quad \tau = \frac{T_g}{T_\Sigma}$$

$$L_\Sigma = L_1 + L_2 - 2M, \quad R_\Sigma = R_1 + R_2$$

由式(4)和式(5)可求得切换电流的过程中消耗在开关主触头中的能量为

$$E_a = \int_0^{T_g} U_a i_1 \quad (7)$$

设 K<sub>u</sub> = IR<sub>2</sub>/U<sub>am</sub>，为主触头向灭弧触头换流时理论上所需最低电弧电压与实际产生的电弧电压峰值之比，利用式(5)和式(6)可知，当 t = T<sub>g</sub> 时，i<sub>1</sub> = 0。可得

$$K_u = \frac{IR_2}{U_{am}} = \begin{cases} 1 - e^{-\tau} & \text{情况 1} \\ 1 - \frac{1}{\tau}(1 - e^{-\tau}) & \text{情况 2} \end{cases} \quad (8)$$

由式(4)~(6)和式(8)可解得式(7)的结果如下:

$$E_a = \frac{U_{am}^2 T_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \begin{cases} 1 - (1 + \tau)e^{-\tau} & \text{情况 1} \\ \frac{1}{6}\tau - \frac{1}{\tau^2} + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau^2}\right)e^{-\tau} & \text{情况 2} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知,消耗在开关中的能量与分断电弧电压峰值的平方成正比,从减少分断过程的能量损耗出发,在换流时希望开关仅产生较低的弧压,但从换流角度考虑又希望有较高的电弧电压值<sup>[4]</sup>。从式(8)可知,在其他电路参数不变的情况下,换流时间 $T_g$ 越小,开关分断时产生的电弧电压就越大;另外,从式(9)可知,对于情况1,随着 $\tau$ 值增大, $E_a$ 将趋于一定值 $E_a = U_{am}^2 T_{\Sigma} / R_{\Sigma}$ ;而对于情况2,在与情况1有相同的 $K_u$ 值时,其 $E_a$ 值通常比情况1小(当 $\tau < 6$ 时)。

显然,灭弧触头向高阻抗负载 $R$ 二次换流的过程与主触头一次换流过程类似,只是其产生的电弧电压更高,灭弧触头中消耗的能量更大。

### 3 实验结果

对 DS14-150/15 型直流快速断路器进行了分断能力实验。该开关的额定电流为 15 kA,额定分断电压为 1 500 V。开关实验的电路如图 1 所示。

图 3 和图 4 分别给出开关分断主电流为 12、15 kA 两种情况下开关两端的电弧电压、主回路电流和电阻支路的电流波形,它们是使用 Tek3014B 示波器采集的波形。其中:通道 1 为主电流曲线;通道 2 为电阻支路电流曲线,图中每伏代表实际电流 2 500 A;通道 3 为开关两端的弧压曲线,每伏代表实际电压 500 V。

由图 3 和图 4 可知,开关完全分断时间约为 6 ms,从主触头分断后到弧触头完全分断的时间约为 2 ms,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 $< 2$  ms。开关完全分断后电流完全转移到了电阻支路,成功地实现了换流。从波形图中还可看出,随着分断电流的增加,开关两端产生的弧压也变大。

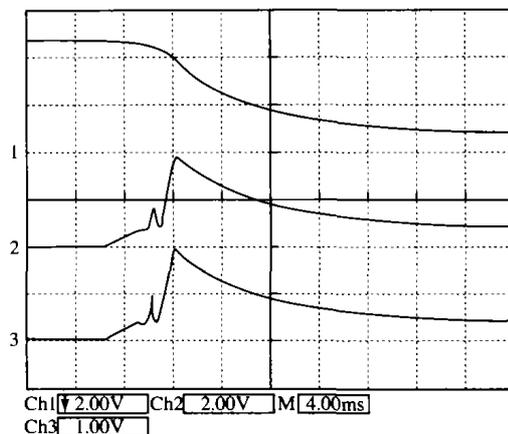


图 3 分断 12 kA 电流时开关两端的弧压与支路电流波形

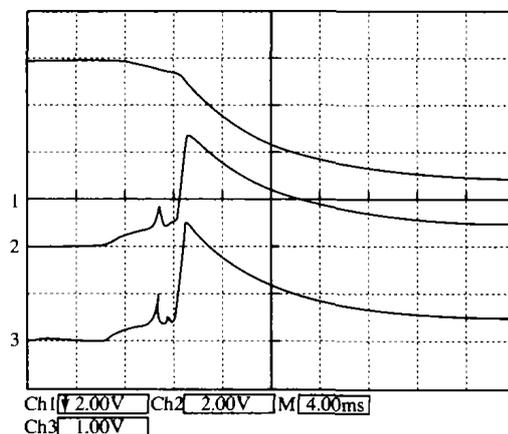


图 4 分断 15 kA 电流时开关两端的弧压与支路电流波形

### 4 结 论

在大电流分断的超导储能装置与磁体失超保护系统中,通常采用双触头开关或开关-熔断器组合电器来实现换流,其换流过程相似。开关除了要满足分断性能指标和可靠运行外,还要求降低分断过程中的能量损耗,使之达到较高的能量转换效率。通过对直流快速开关换流过程的理论分析和开关分断实验可知,在选择与设计开关以及确定其换流回路的电路参数时必须考虑以下因素:

(1) 灭弧触头分断的延时时间必须大于主触头的绝缘强度恢复时间。

(2) 为了降低弧压和减少开关分断的能量损耗,必须合理地选择换流回路参数,即要最大限度地减少换流回路在空间的几何尺寸,使杂散电感和引线电阻减小。

(下转第 45 页)

Plus 智能固态过载继电器,用户可以设置报警标准为 6.8 A,当电动机有出故障的趋势时,实际电流达到 6.8 A,智能继电器将发出警报信息。此时,用户可以及时排除故障,不至于影响生产。

### 3 应用实例

河北工业大学-罗克韦尔自动化智能电器实验室以 3 层网络(以太网,控制网,设备网)为架构,由智能电动机控制器、电力系统监视器、E3、SMP-3 智能继电器等实验模型组成。E3 Plus 智能固态过载继电器实验模型以 E3 Plus 为控制器,以电动机为控制对象,由断路器、接触器、磁粉制动器等构成实验模型。通过该模型可以实现电动机起动、停止的远程控制。通过调节磁粉制动器的励磁电流,改变磁粉制动器的制动力,模拟负载的变化。学生从该模型中可以了解智能电器网络化功能及其全面的保护、诊断和报警功能。该实验模型的结构如图 2 所示。

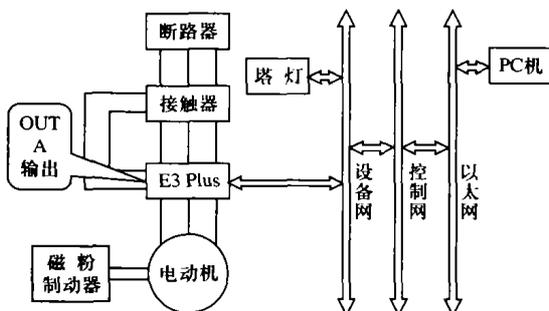


图 2 E3 Plus 智能固态过载继电器实验模型

在软件方面,该实验模型采用罗克韦尔自动化公司的组态软件 RSNetworx,编程软件 RSLogix 5000,界面编辑软件 Display Builder,Quick Builder

等。

系统硬件连接完成后,首先在 PC 机上对连接在设备网上的 E3 Plus 和塔灯(Stack Light)进行组态,建立 I/O 映射表,并根据电动机铭牌上的参数设置相应的 E3 Plus 的参数。组态完成后,建立监控界面。最后,编制 PLC 程序,发挥塔灯的声音和光电功能,并实现预报警功能。该实验模型的操作界面如图 3 所示。

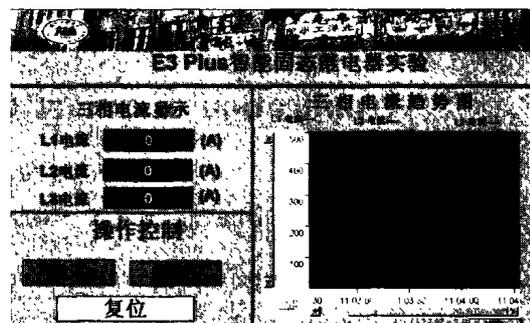


图 3 E3 Plus 智能固态过载继电器操作界面

作为一个新兴事物,智能继电器的最大缺陷就是价格较高,导致应用并不广泛。但是,随着工业现场要求的提高和智能继电器本身价格的降低,智能继电器会有一个广阔的市场前景。

### 【参考文献】

- [1] 钱晓龙,李鸿儒.智能电器与 MicroLogix 控制器[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 甘永梅,李庆丰,刘晓娟,等.现场总线技术及其应用[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [3] Rockwell Automation. E3 and E3 Plus Overload Relays User Manual [Z]. 2001.

收稿日期:2005-01-04

(上接第 12 页)

(3) 降低弧压与缩短换流时间是一个矛盾,故在保证能量损耗在开关容许的范围之内,应尽量提高分断弧压,以达到尽快换流、提高能量转换效率的目的。

### 【参考文献】

- [1] 林莘.现代高压电器技术[M].北京:机械工业出版社,2002.

- [2] 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.
- [3] 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):81~84.
- [4] 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):74~77.

收稿日期:2004-12-28