

① 11-15

第 27 卷 第 2 期
1999 年 5 月低温与超导
CRYOGENICS AND SUPERCONDUCTIVITYVol. 27 No. 2
May, 1999

HT-7 超导托卡马克装置 超导纵场磁体失超保护系统及运行经验

刘彦琴 胡燕兰

(中科院等离子体物理研究所, 合肥, 230031)

TL631.24
TL622

【摘要】 简明介绍了 HT-7 托卡马克装置中超导磁体失超保护系统的组成, 并重点总结了四年来装置运行中, 失超保护系统工作的情况和经验。

关键词: 托卡马克 超导磁体 失超保护 系统

1 概述

HT-7 超导托卡马克装置是中科院合肥等离子体物理研究所通过国际合作, 于 1995 年调试成功的我国第一个超导核聚变装置。纵场(或称环向场)磁体是用来约束高温等离子体的, 它是托卡马克装置的主要部件。超导磁体由 NbTi 超导线、铜管和铜组成的超导母排绕制而成, 采用两相氮迫流冷却。

当超导线圈一旦发生由超导态向正常相转变(称之为失超)时必须及时、准确、可靠地监测出并发出相应指令进行保护。否则会因超导线圈失超引起线圈温度骤然升高, 液氮制冷剂大量汽化, 损坏纵场磁体及低温制冷系统, 甚至给装置造成破坏。

从 1995 年至今 HT-7 装置做过 9 轮约计 7440 小时工程调试和物理试验研究工作。失超保护系统也经过了一个从多次发生误动作, 到现在准确、可靠地对失超进行保护的过程。

2 纵场超导磁体的基本参数

1. 超导纵场线圈数: 24 饼; 2. 超导纵场线圈中最大储能: 20MJ; 3. 额定中心场强: 2.5T; 4. 额定电流: 5.3kA; 5. 线圈电感: 1.0H; 6. 线圈正常态电阻: 1.5Ω; 7. 线圈对地最大电压: ±300V; 8. 维持电流稳定度: 0.5%; 9. 电流上升或下降速率: 0~5/A/s; 10. 外回路电阻: 0.23mΩ。

3 超导纵场磁体的供电和保护主回路

超导纵场磁体的供电和保护主回路见图 1。

原理图中, G 为直流发电机(ZH-60, 电压: 6/12V, 电流: 10/5kA)是超导纵场磁体的工作电源。纵场中的电流调节是通过改变发电机励磁电流大小来实现的。当纵场磁体线

• 本文于 1999 年 3 月 1 日收到。

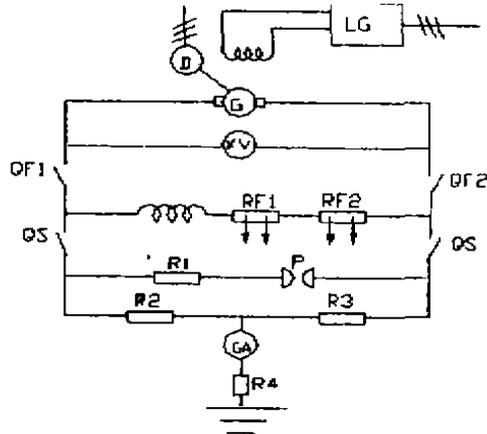


图1 超导纵场磁体供电和保护主电路

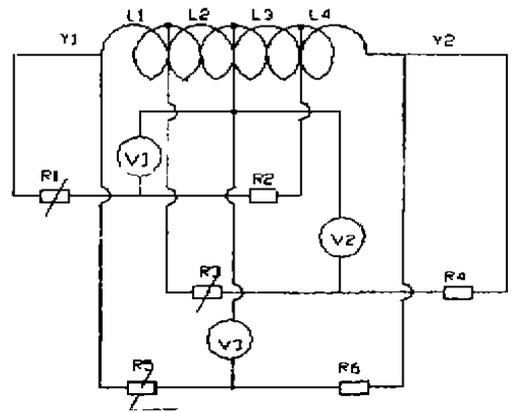


图2 磁体线圈失超桥路图

圈发生失超时,失超保护系统发出指令,跳开 QF 开关,集中在线圈中的能量通过泄能电阻 R_2 和 R_3 快速引出, R_2 和 R_3 的总电阻值为 0.1Ω ,这样限制超导纵场线圈对地最大电压小于等于 $250V$ 。

R_2 和 R_3 泄能电阻中点接限流电阻 R_4 和过流继电器 GA,然后接大地, R_4 把对地短路电流限制在 $\leq 5A$ 。

泄能电阻 R_2 和 R_3 与串有电阻 R_1 和放电间隙 P 的回路并联,间隙放电电压为 $1.1kV$,以保护由于快速切断电流而产生的过电压。

为实现超导纵场线圈的感应放电,或检查线圈的冷却过程,借手动隔离开关 QS,将超导纵场线圈由发电机供电转接到其它电源供电。

4 超导纵场磁体线圈失超保护系统

失超保护亦称之为正常相保护,它是超导装置中非常重要的组成部分,尤其在托卡马克装置中,触发失超的因素远多于其它设备的超导磁体,因此可靠的失超保护十分重要。

当超导磁体线圈由超导态向正常相转变过程中,将发生:线圈电阻出现并增大;线圈温度升高;同时磁体线圈上会产生电压信号。HT-7 失超保护系统是通过检测电压信号来检查超导纵场线圈失超与否。

失超保护系统有三部分组成:a. 桥路取信号;b. 失超信号处理;c. 供电电源。

4.1 电路

根据桥路原理将 24 饼磁体线圈分成四组, L_1, L_2, L_3, L_4 。另外 Y_1, Y_2 为两端的电流引线,共计六个单元,组成三个桥路,这样可以避免失超死区,如图 2。

在纵场磁体进入超导态时,将桥路电压调整为零,包括欧姆电压和电流变化率在电感上的电压为零。试验运行中,如果超导纵场线圈某处发生失超,失超部位出现电压,破坏桥路平衡,桥路将输出其失超信号。

4.2 失超信号处理单元

桥路输出电压的高低反映失超情况的大小。失超信号处理单元将桥路电压同时送入

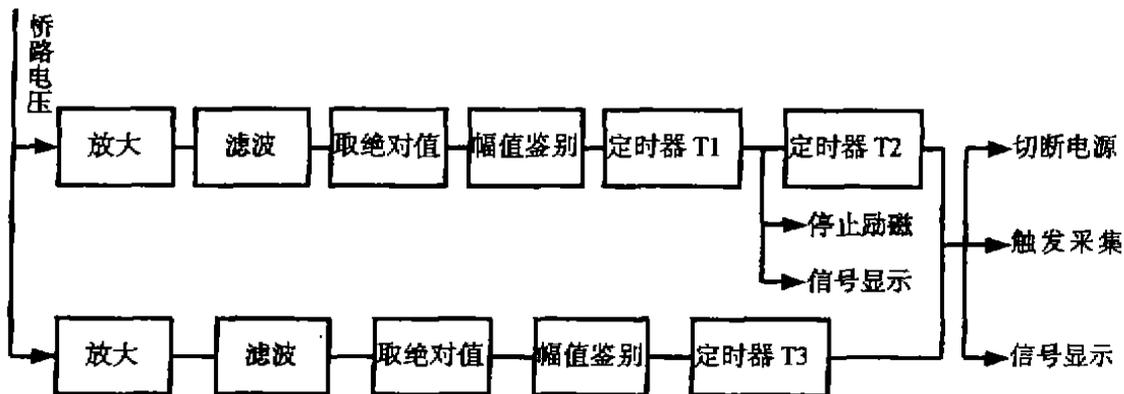


图 3 失超信号处理单元方框图

两个通道分别进行处理鉴别,见图 3。

两个通道的区别在于其幅值整定值和时间整定值不同。一通道为小信号通道,二通道为大信号通道。保护整定值的给定是根据理论计算结合实际运行经验确定的。

HT-7 超导纵场磁体失超保护整定值如下表 1。

表 1 HT-7 超导纵场磁体失超保护整定值

信号	整定值	幅值整定值范围	实际幅值整定值	时间整定值范围		实际时间整定值	
				T_1	T_2	T_1	T_2
小信号		90~150mV	100mV	$T_1 = 1s$	$T_2 = 2\sim 5s$	$T_1 = 1s$	$T_2 = 3s$
大信号		1~2V	2V	$T_3 = 0.2\sim 3s$		$T_1 = 1s$	

5 超导纵场磁体多轮运行经验

5.1 减少失超保护的误动作率

桥路上检测的毫伏级失超信号很容易受到杂散信号干扰,如 HT-7 装置放电和等离子体破裂等在纵场线圈及传输线上的耦合信号。必须将真正失超信号与杂散耦合信号区别。HT-7 失超保护信号经过了多级滤波和集中补偿。

HT-7 托卡马克装置开始两轮试验,失超保护系统虽然对发生的真正失超都进行了保护,但出现过多次误动作,误动作率占 40%。

为准确补偿桥路上耦合来的杂散信号,对装置放电时没经补偿的桥路信号进行了采集、分析。图 4 为装置放电时没有补偿的桥路信号。

纵场线圈垂直于等离子体电流流动方向,受工艺限制,不垂直分量将会与装置放电磁场变化率相耦合。为此,在垂直场的铁芯变压器上绕制 5 匝补偿线圈,取补偿信号中与桥路信号大小相等、方向相反的信号串接于桥路,如图 5。

补偿电路将桥路上的低频干扰信号进行有效抑制,桥路上的高频杂散干扰通过电路

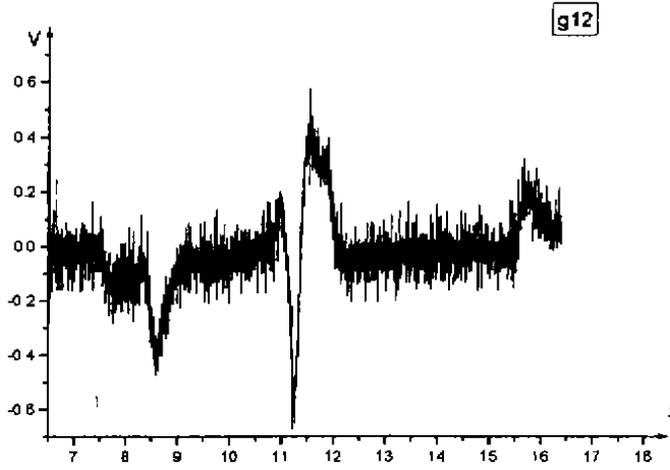


图4 HT-7装置放电时,没有补偿的桥路信号

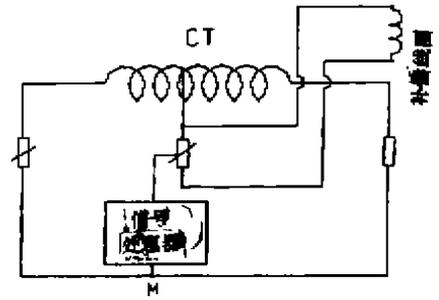


图5 失超保护桥路补偿电路

中的多级滤波处理。

桥路信号经以上补偿和滤波处理后,失超保护系统可靠性大大提高。试验时,保护系统误动作率仅占3.8%。

5.2 缩短失超纵场线圈再次进入超导态的周期

超导纵场线圈一旦发生失超,保护系统将纵场能量迅速转移到泄能电阻,伴随纵场线圈温度升高,需要再经过几个钟头的冷却,才能使线圈重新进入超导态,方能进行放电试验。

如能将再次进入超导的时间缩短,会大大提高试验效率。根据最低不可恢复失超值,将判断失超信号的幅值整定值由原来的150mV,下降为100mV。这样,失超保护后,超导磁体温升由原来的5~15K,下降为0.5~8K。同时,也减小了低温制冷系统的压力。

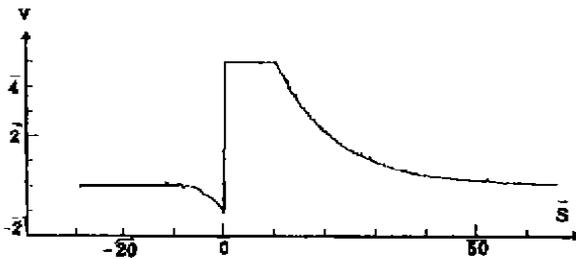


图6 失超饼线圈电压

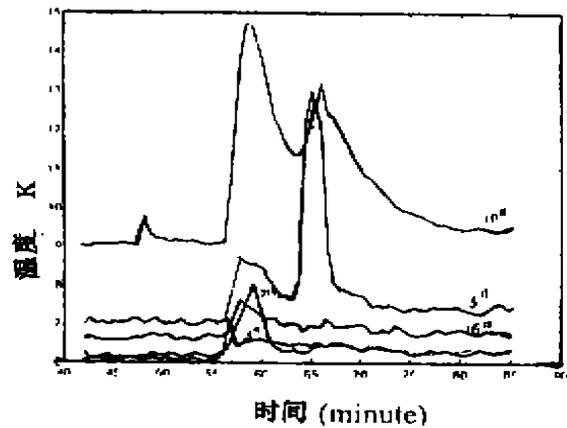


图7 失超后温度信号波形

图6为失超饼线圈信号。图中零时刻为开关断开时间。

零时刻之前为失超线饼电压,开始为零,随失超部位电阻出现,产生欧姆电压,当电压达到整定值时,保护发出指令,开关断开。零时刻之后为失超饼线圈泄能过程的电压信号。

图 7 为失超后温度信号波形。

【致谢】感谢技术诊断组邬显慧、查秀英提供可靠的温度和失超饼线圈检测数据。

参 考 文 献

- [1] 易昌练, 严陆光. 超导磁体保护装置的研制经验. 低温物理, 1981, 12
- [2] 翁佩德. HT-7 超导托卡马克装置. 鉴定材料主报告, 1997, 10
- [3] 中科院低温中心鉴定材料报告: 纵场磁体及低温致冷系统, 1997, 10

Introduction to Protection System of Normal State and Operational Experiments on Superconducting Toroid Magnet of Superconducting Tokamak HT-7 Device

Liu Yanqin, Hu Yanlan

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei, 230031)

ABSTRACT: We introduce briefly the composition of protection system of normal state for superconducting magnet of Tokamak HT-7. Also emphasis on generalizing experiments of this protection system in the last four years.

KEYWORDS: Tokamak, Superconducting magnet, Protection of normal state



作者简介: 刘彦琴, 女, 1943 年 12 月生, 1967 年毕业于北京理工大学自动控制系; 现为中科院等离子体物理研究所六室高级工程师。主要从事脉冲功率电源电动控制, 电磁测量和保护; 发表论文十余篇。