

引用格式:王琨,孟祥娟,仝玮,等.基于超导磁体测试的大型聚变装置动态失超保护[J].南方能源建设,2025,12(4):35-43. WANG Kun, MENG Xiangjuan, TONG Wei, et al. Dynamic quench protection of large-scale fusion devices based on superconducting magnet testing [J]. Southern energy construction, 2025, 12(4): 35-43. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-105.

基于超导磁体测试的大型聚变装置动态失超保护

王琨¹, 孟祥娟¹, 仝玮¹, 宋蕾², 李伟², 徐猛³, 张希宁³, 李华³✉

(1. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230601;

2. 中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100029;

3. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: [目的]大型超导测试平台(Large-scale Superconductor Test Facility, LSTF)是聚变研究中超导磁体负载测试的重要组成部分,主要为超导磁体提供各类类型的测试。在测试过程中,失超保护系统(Quench Protection System, QPS)对于防止超导磁体因失超而发生过热损坏至关重要。[方法]首先,介绍了大型超导测试平台,并分析系统运行时超导磁体失超的过程,阐述失超保护系统中各回路电流情况;然后,通过分析失超保护系统各作用单元动作原理,详细阐述面向不同超导磁体参数下的系统作用单元动作调整,特别是反向脉冲电容单元和移能电阻的调节;最后选取了一种超导磁体的参数来说明文章提出的失超保护系统动态保护框架。[结果]文章提出了一种有效、安全且具备兼容性的动态失超保护系统框架,以满足不同参数下超导磁体的防护需求,包括转移时间、保护电压、温度升高速度和电流衰减速度等。[结论]通过研究发现,提出的大型聚变装置动态失超保护框架可为大型化发展的超导磁体提供快速有效的保护。

关键词: 大型超导测试平台; 失超保护系统; 回路电流; 作用单元; 动态保护框架

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-105

文章编号: 2095-8676(2025)04-0035-09

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-105

中图分类号: TL6; TM26



论文二维码

Dynamic Quench Protection of Large-Scale Fusion Devices Based on Superconducting Magnet Testing

WANG Kun¹, MENG Xiangjuan¹, TONG Wei¹, SONG Lei², LI Wei², XU Meng³, ZHANG Xining³, LI Hua³✉

(1. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co, Ltd., Hefei 230601, Anhui, China;

2. China Power Engineering Consulting Group Co, Ltd., Beijing 100029, China;

3. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: [Objective] The large-scale superconductor test facility (LSTF) is an important component of load testing for superconducting magnets in fusion research. It can provide various types of testing for superconducting magnets. During the testing process, the quench protection system (QPS) is crucial in preventing superconducting magnet coils from being overheated and damaged due to quench. [Method] Firstly, a large scale superconducting testing platform the paper was introduced and the process of superconducting magnet quenching during system operation was analyzed, which could elaborate the current situation of each circuit in the QPS. Then, by analyzing the operating principles of each unit in the system, the adjustment of operating units in the system for different superconducting magnet parameters, especially the reverse pulse capacitor unit and the fast discharge resistor were elaborated in detail. Finally, a parameter of the superconducting magnet coil was selected to illustrate the dynamic protection framework of QPS proposed in this paper.

收稿日期: 2025-04-09 修回日期: 2025-05-16

基金项目: 国家重大科技基础设施建设项目“聚变堆主机关键系统综合研究设施”(2018-000052-73-01-001228); 合肥市博士后科研经费资助项目“基于人工过零换流的大功率超导磁体失超保护系统回路研究”(2020B477)

[Result] The paper proposes an effective, safe, and compatible dynamic quench protection framework to meet the protection requirements of superconducting magnet under different parameters, including transfer time, protection voltage, temperature rise rate, and current decay rate. [Conclusion] Through research, it can be found that the dynamic quench protection framework proposed in this paper can provide a rapid and effective protection for the large-scale development of superconducting magnets.

Key words: large scale superconducting testing platform; quench protection system; circuit current; action unit; dynamic protection framework

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

可控核聚变是一种实现可再生和可持续能源的新途径,使轻原子核(氘、氚)在超高温高压环境下发生核聚变反应,可产生巨大能量。在可控核聚变装置中,通过使用超导磁体来创造并维持受控核聚变所需的约束条件,将反应元素限制在特定区域内,以保持所需的极端条件^[1-2]。

随着超导磁体技术不断发展,在规模和参数上都取得了显著的进步。例如,在下一代核聚变装置如紧凑型聚变能实验装置 BEST、中国聚变工程试验堆(CFETR)的设计中,都对超导磁体提出了更高参数要求。然而,目前世界上现有的超导测试平台无法满足这些高性能超导磁体的测试需求。因此,迫切需要一个能够提供大规模超导磁体测试条件的新平台^[3-4]。

在国家“十三五”重大科技基础设施“聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)”中,中国科学院等离子体物理研究所(ASIPP)开发了一种新型的高功率、大电流和高磁场强度的聚变超导磁体测试装置,即大型超导测试平台^[5-7]。大型超导测试平台建设的目标是为大型超导磁体的性能测试提供全面条件,其主要额定功率指标目标是:2 kV/100 kA 稳态电源、10 kV/100 kA 失超保护条件、110 kV/150 Mvar 无功和谐波功率以及测试区域的 2.1 m/0.5 T 稳态磁场,可以看出平台具有极端的电流和电压功率参数。此外,面向不同参数的测试超导磁体,所提供的测试参数也会随之变化,从而为超导磁体提供合适的保护解决方案。与其他聚变装置中固定工作于特定超导磁体保护的失超保护系统相比,大型超导测试平台中的失超保护系统可以提供灵活的保护参数,以应对不同参数下测试超导磁体的失超^[8-11]。

在测试过程中,高磁场造成超导磁体中储存的

高能量会增加线圈过热损坏的可能性,从而造成超导磁体失去超导性^[12-13]。当失超发生时,超导磁体会由电感性转为部分电阻性,从而在短时间内释放出巨大的能量,造成超导磁体在巨大能量下随着温度的升高而燃烧。一旦超导磁体发生失超,储存在线圈的能量需要被及时转移并释放。因此,大型超导测试平台需要一个有源保护系统,能够检测失超、关闭电源并快速释放磁体内部能量^[14-16]。

与 EAST、JT60-SA、ITER 和 KSTAR 等其他聚变装置中的失超保护系统相比,CRAFT 中大型超导测试平台所测试的超导磁体具有较大功率的失超保护要求,详见表 1。在额定条件下,由于待测试的超导磁体功率较大,100 kA 失超电流对测试过程中的磁体失超保护提出了巨大挑战^[17-18]。

表 1 不同聚变装置的电气参数

Tab. 1 Power parameters of different fusion device.

参数	EAST	JT60-SA	ITER	KSTAR	CRAFT
额定电压/kV	2	5	10	8	10
额定电流/kA	15	25.7	70	40	100
最大能量/GJ	0.4	1	41	0.5	10

同时,为了给不同参数的超导磁体提供测试条件,大型超导测试平台中失超保护系统调整系统内作用单位的响应参数以满足超导磁体失超保护的目标。根据 CRAFT 对超导磁体测试的要求,超导磁体负载的范围为磁体电感 0 ~ 2 H,额定电流 0 ~ 100 kA,额定电压 0 ~ 10 kV。因此,大型超导测试平台需要一个兼容且可调的动态框架来指导失超保护系统参数设置^[19-21]。

本文提出了一种用于不同参数下超导磁体负载测试的新型失超保护框架,该框架可针对不同参数的超导磁体,针对性调整系统内各作用单元的参数,从而在超导磁体失超时提供安全有效的保护手段。

1 失超保护过程

1.1 失超保护工作时序分析

在大型超导测试平台失超保护系统中, 电流换向是决定系统能量传递和动作响应时间的关键因素。通过对失超保护系统中换流方案与其他聚变装置的优缺点进行分析, 目前主要有以下几种方案: (1) 有大功率直流机械开关作主回路, 爆炸开关并联熔断器作为后备, 但此方案开关容量较大, 维护简单, 但辅助设备多, 占地面积大, 成本高, 控制复杂; (2) 真空开关并联熔断器作主回路, 爆炸开关作为后备, 此方案成本低, 占地空间小, 可靠性高, 但维修成本高, 每次需更换熔断器; (3) 固态开关作主回路, 爆炸开关作为后备, 此方案成本低, 占地空间小, 开关容量较小, 维护复杂; (4) 人工过零关断的真空开关作主回路, 爆炸开关作为后备, 此方案开关容量大, 维护简单, 但辅助设备多, 占地面积大, 成本高, 控制复杂。基于本文装置的参数设置, 人工过零型换流方式由于其响应快、开关容量大、开关寿命长的优点, 被选择作为失超保护系统的换流方式。

大型超导测试平台失超保护系统包括由旁路开关(BPS)和真空断路器(VCB)组成的主断路器(MCB)单元、反脉冲电容器(CPC)单元、移能电阻(FDR)单元和爆炸开关(PB)单元。失超保护系统的空间布局如图1所示, 2套失超保护系统共用1个移能电阻单元, 可满足2套超导磁体的保护要求。

大型超导测试平台中失超保护系统的拓扑方案和运行流程图分别如图2和图3所示。主断路器单元(旁路开关和真空断路器)和爆炸开关单元在正

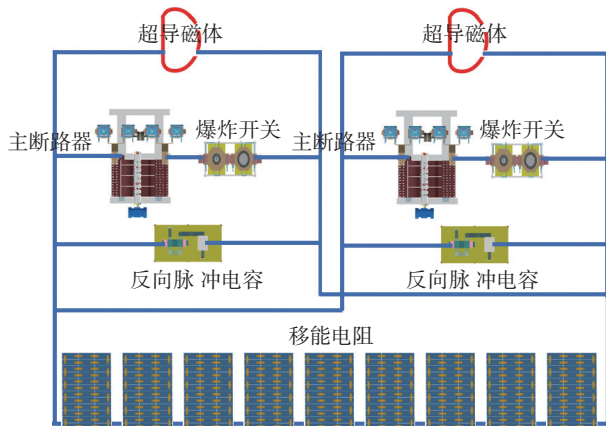


图1 失超保护系统布局图

Fig. 1 The layout of quench protection system

常工况下传递测试电流。真空断路器和反脉冲电容器单元负责将失超时超导磁体中的电流转移到移能电阻单元。移能电阻单元通过热量消耗来承载超导磁体内储存的能量, 从而实现超导磁体的保护。

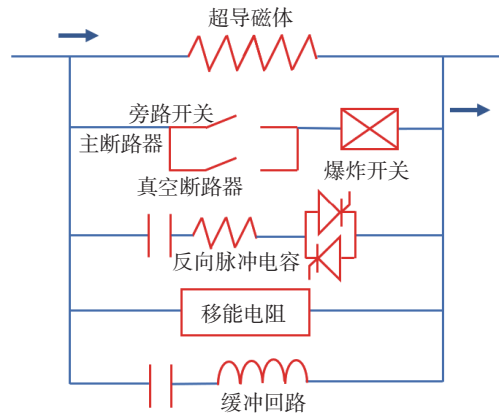


图2 失超保护系统拓扑结构图

Fig. 2 Topology diagram of quench protection system

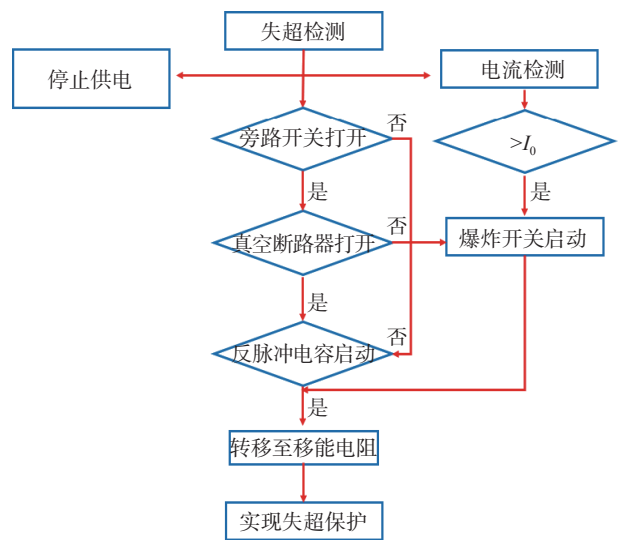


图3 失超保护系统运行流程图

Fig. 3 Operating process of quench protection system

当运行时, 失超保护系统中每个作用单元动作过程总结如下:

步骤 1: 当大型超导测试平台正常工作时, 电流流过主断路器(由于真空断路器的阻抗更大, 因此旁路开关主要承载电流)。

步骤 2: 当超导磁体发生失超, 失超保护系统接收到启动信号后。平台停止供电, 检测失超电流, 并与额定电流 I_0 比较进行判断。当失超电流超过 I_0 时, 爆炸开关装置将直接启动, 紧急关闭系统。

步骤 3: 在步骤 2 进行时, 旁路开关打开并通过弧压将失超电流转移到真空断路器中。

步骤 4: 一旦失超电流完全转移至真空断路器, 反脉冲电容器单元触发产生反向脉冲电流, 将真空断路器中的电流抵消到零电流从而开断真空断路器。

步骤 5: 在真空断路器打开后, 失超电流被转移至移能电阻单元, 并在规定时间内被移能电阻单元承载并消耗, 从而实现超导磁体在失超下的能量转移。

步骤 6: 如果上述任何操作失败, 爆炸开关单元将立刻通过爆炸形式打开并停止系统工作。

失超保护系统和各作用单元的电流传输和变化如图 4 所示, 失超系统中的每个作用单元都必须在规定时间内动作以保障系统的安全运行, 实现对超导磁体的及时保护。失超保护的動作时间应小于 330 ms, 这要求信号控制系统具有高检测精度和动作响应。电流必须在 10 ms 内从真空断路器转换到移能电阻, 真空断路器和反脉冲电容器的動作时间应小于 10 ms。电流从真空断路器传输到移能电阻的时间应小于 10 ms, 能量转移后的消耗时间因超导磁体类型而异, 在全尺寸超导磁体的工况下应小于 120 s。

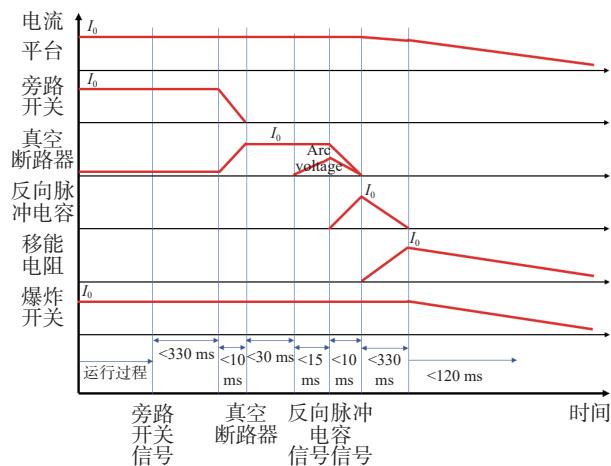


图 4 失超保护系统电流传输和变化

Fig. 4 Current transfer and change of quench protection system

2 不同超导磁体负载下失超保护参数变化

面向不同参数的超导磁体, 失超保护系统中的各作用单元应能够调整参数, 以完成超导磁体在失超下的能量传递和消耗。失超保护过程中各参数如表 2 所示。

表 2 超导磁体的标称参数

Tab. 2 Parameter notations of superconducting magnet

项目	符号
额定电流	I_0
额定电压	V_0
负载电感	L_0
失超延迟时间	T_{delay}
热点温度条件	I^2t

超导磁体负载存储的能量以 $\frac{1}{2}I_0^2L_0$ 计算。当发生失超时, 失超保护系统的响应时间不能超过 T_{delay} 。

在测试过程中, 为确保系统安全, 大型超导测试平台中失超保护系统还应满足:

1) 超导磁体并联的每个作用单元电压不能超过容限负载电压(额定电压) V_0 。

2) 能量必须在特定时间内转移并消耗, 并满足热点温度条件 I^2t 的要求, 其中, 超导磁体负载的实际热点最大值(I^2t)为 $I^2t - I_0^2t_0$ 。

3) 真空断路器中来自反脉冲电容器的中和电流不能小于失超电流 I_0 。

在失超保护系统未动作时, 主断路器和爆炸开关始终在稳态下工作, 因此, 它们被设置为承受全尺寸负载条件下的最大电流。

反脉冲电容器单元的中和电流(用于抵消流经真空断路器中的电流)通过从充电电容器到串联连接的电感器以 LC 放电形式产生, 因此, 脉冲电流及其频率可以通过电容器单元的电容和充电电压值来改变。

对于移能电阻单元, 随着测试超导磁体不同参数的变化, 移能电阻单元必须通过改变电阻连接方式相应地改变, 调整电阻、重量、温升等参数以符合超导磁体能量转移需求。

3 失超保护系统各作用单元

3.1 主断路器

承载大型超导测试平台稳态电流的主断路器单元由旁路开关和真空断路器组成, 其中旁路开关负责承担测试工况下的额定电流, 真空断路器负责转移失超电流, 以启动失超保护的转移过程。

在大型超导磁体测试过程中, 主断路器始终设置在额定电流状态(始终最大电流为 100 kA)。当失

超发生后, 电流从旁路开关转移到真空断路器, 转移过程如图5所示。与真空断路器相比, 旁路开关等效接触电阻可忽略不计, 因此正常工况下, 电流主要流经旁路开关。当失超时, 旁路开关的接触端子上产生电弧电压, 将失超电流强行转移至真空断路器, 为下一步电流转移做准备。为通过降低零电流前后的电流下降率, 从而提高关断可靠性, 主断路器还需与真空断路器串联可饱和电抗器 L_{VCB} 。

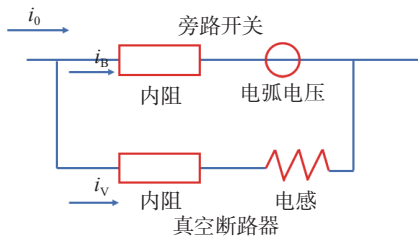


图5 主断路器单元拓扑结构

Fig. 5 Topology diagram of MCB

电流转移过程如下式(1)所示:

$$\begin{cases} L_{VCB} \frac{di_V}{dt} + i_V R_{VCB} = i_B R_{BPS} + V_{arc} \\ i_V + i_B = i_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

- i_B —— 旁路开关电流(A);
- i_V —— 真空断路器电流(A);
- R_{BPS} —— 旁路开关电阻(Ω);
- R_{VCB} —— 真空断路器电阻(Ω);
- V_{arc} —— 真空断路器的电弧电压(V)。

式(1)获得的解由下式给出:

$$\begin{cases} i_B(t) = \frac{i_0 R_{VCB} - V_{arc}}{R_{BPS} + R_{VCB}} + \frac{V_{arc}}{R_{BPS} + R_{VCB}} e^{-\frac{t}{\tau}} \\ i_V(t) = \frac{i_0 R_{BPS} + V_{arc}}{R_{BPS} + R_{VCB}} - \frac{V_{arc}}{R_{BPS} + R_{VCB}} e^{-\frac{t}{\tau}} \\ \tau = \frac{L_{VCB}}{R_{BPS} + R_{VCB}} \end{cases} \quad (2)$$

因此, 在失超保护系统动作过程中, 旁路开关和真空断路器分支中的所有电流都可以在出现异常电流时提供警报信号。

3.2 反脉冲电容器单元

当失超电流完全转移到真空断路器时, 反脉冲电容器单元负责提供反向中和电流来抵消真空断路器中的失超电流, 使真空断路器电流降至零电流从而将电流转移至移能电阻单元中。反脉冲电容器单元产生的脉冲电流由 LC 电路构成, 随着真空断路器

动作信号指示, 反脉冲电容器单元的晶闸管阀块打开, 预充电容器启动, 向串联电感器放电, 从而提供脉冲电流来切断真空断路器。反脉冲电容器单元的拓扑结构如图6所示, 晶闸管阀块控制脉冲电流方向。

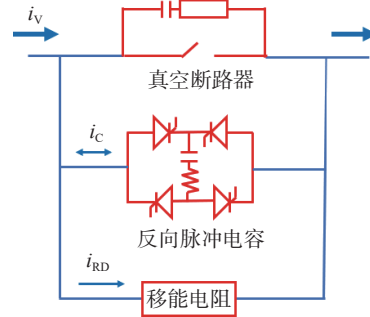


图6 反脉冲电容器单元拓扑结构

Fig. 6 Topology diagram of CPC

在真空断路器电流达到零之前, 各单元方程由式(3)表示:

$$\begin{cases} i_0 = i_V + i_C \\ u_C = U_{C0} + \frac{1}{C_C} \int i_C dt \\ i_C = C_C \frac{du_C}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

- U_{C0} —— 电容器的预充电电压(V);
- C_C —— 电容器的电容值(F)。

一旦真空断路器电流达到零, 并且假设电弧完全熄灭, 系统中换流各作用单元协同工作, 从而决定方向恢复电压特性并保持电弧电压的稳定性。该过程中的电路方程描述如下:

$$\begin{cases} i_0 = i_{RS} + i_{RD} + i_C \\ R_S i_{RS} + \frac{1}{C_S} \int i_{RS} dt = R_{FDR} i_{RD} \\ \frac{1}{C_C} \int i_C dt + L_C \frac{di_C}{dt} = R_{FDR} i_{RD} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

- i_0 —— 系统流经总电流(A);
- i_{RS} —— 缓冲回路支路电流(A);
- i_{RD} —— 反脉冲电容器支路电流(A);
- i_C —— 移能电阻支路电流(A)。

在每个测试过程之前, 电容器由额定电压为 U_{C0} 并联的充电器进行充电, 反脉冲电容器单元的电流和频率由方程式(5)给出。

$$\begin{cases} I_{\max} = \sqrt{\frac{C_c}{L_c}} \times U_{c0} \\ f = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L_c C_c}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:

I_{\max} ——反脉冲电容器单元中产生的脉冲电流(A);

f ——频率(Hz)。

在反脉冲电容器单元中,电容器组以串并联形式连接组成所需电容值。在满载情况下,反脉冲电容器需要在电流衰减的情况下产生略大于 100 kA 的电流。此外,考虑到电容器和电感器的组合形式,电容和电感值分别设置为 9 mF 和 13 μ H,最大充电电压为 3.5 kV,从而产生满足中和电流所需的脉冲电流。对于具有不同失超电流的不同测试磁体负载,反脉冲电容器单元需改变充电电压和电容,以提供特定的反向中和电流,如式(6)所示。

$$i_c = \sqrt{\frac{C_c}{L_c}} \times u_c \quad (6)$$

通过型号选择,反脉冲电容器单元中的电容器由 9 个并联电容器组成。每个电容器额定功率参数为 1 mF 的电容和 15 kV 电压。此外,电容的充电器具备 5 kV 的电压变化能力,以满足失超保护系统对反脉冲电容器单元的要求。

在每次测试过程中,反脉冲电容器单元中电容被重新组合并连接至电路,同时对充电电压进行调整。由于真空断路器单元的双向电流特性,反脉冲电容器单元必须具有能够为正向和反向电流提供脉冲功率,通过晶闸管阀组定向控制并选择电流方向以中和真空断路器中的电流,从而可靠地切断真空断路器。

3.3 移能电阻单元

移能电阻单元是超导磁体失超保护过程中能量传递的最后一步,它负责超导磁体在失超下的能量的消耗。在理想情况下,此阶段电路可以被视为一个满电状态的电感器向电阻传递能量的 LR 电路,如图 7 所示。在触发失超保护系统动作后,超导磁体中的电流呈现 $i = I_0 e^{-\frac{t}{L_0}}$ 的指数衰减状态,其中 L_0 是超导磁体的电感值。

在能量传递和消耗过程中,移能电阻单元必须满足保护要求条件:一是超导磁体能量必须在规定

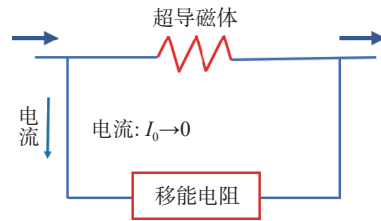


图 7 移能电阻单元拓扑结构

Fig. 7 Topology diagram of FDR

时间内转移至移能电阻单元被消耗,并满足热点温度条件要求;二是当失超电流转移时,移能电阻单元两端电压不能超过超导磁体负载的额定电压,限制条件如式(7)表示。

$$\begin{cases} \int_0^{+\infty} i^2 dt < (i^2 t)_{\max} \\ W = \int_0^{+\infty} i^2 R dt \\ iR < V_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:

W ——超导磁体的能量(J);

$(i^2 t)_{\max}$ ——热点温度条件上限值($A^2 s$)。

由式(7)得到的解:

$$\frac{(i^2 t)_{\max}}{W} \leq R \leq \frac{V_0}{i} \quad (8)$$

将最大失超电流 I_0 代入结果,移能电阻单元电阻值可从 V_0/I_0 计算得出。

在大型超导测试平台中,满载条件下移能电阻额定的电阻值为 0.1 Ω ,可消耗 10 GJ 的能量。移能电阻单元由 9 个电阻器堆叠组成,每个堆叠由 30 个电阻器模块组成。根据额定参数设计要求,每个模块的电阻单元阻值为 1/3 Ω 。对于不同的测试超导磁体负载,移能电阻单元设置时应该考虑数量和连接方式两个因素。通过式(9)可计算需要连接入回路的电阻质量,从而决定系统的连接数量和方式。

$$m = \frac{W}{C_c T_{\max}} \quad (9)$$

式中:

m ——电阻重量(kg);

C_c ——电阻材料比热(kJ/kg $^{\circ}C$)。

因此,通过不同数量的电阻模块累计可以达到移能电阻单元所需的质量,再通过改变电阻模块的串并联方式以获得移能电阻单元所需的电阻值。

如图 8 所示,移能电阻单元采用矩阵方式连接各电阻模块,铜制电流接头放置在模块外壳正面的

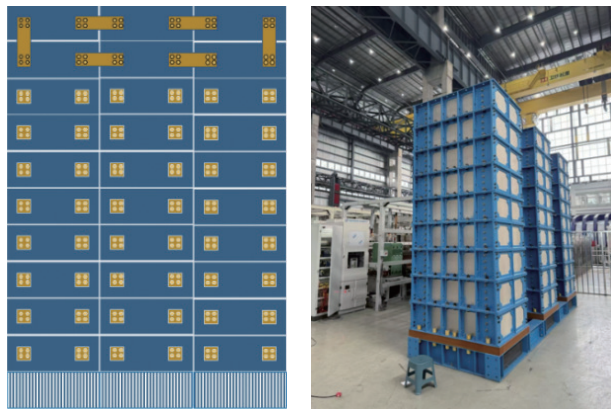


图 8 移能电阻单元结构示意图和实物图

Fig. 8 Structural schematic and physical object of FDR

同一垂直面用于改变模块间的连接方式。

3.4 爆炸开关单元

爆炸开关单元负责为失超保护系统提供最后一道保护程序,当超导磁体失超下的电流由于其他原因超过 100 A 或系统中其他作用单元无法正常运行时,爆炸开关通过点燃开关内部炸药从而通过爆炸开断的方式强制将电流转移至移能电阻单元。

4 CFETR 中超导磁体失超保护示例

为了阐述聚变装置中大型超导测试平台失超保护系统的作用框架,以 CFETR 中的中心螺线管(CS)超导磁体为测试案例来说明该过程。CS 超导磁体是 CFETR 关键部件,要求在 47.65 kA 的工作电流下产生 10.8 T 的最大磁场,其失超保护下的参数如表 3 所示。

在 CS 超导磁体的失超系统中,总延迟时间为 1.5 s,因此实际热点温度条件为:

$$(i^2t)_{\max} = I^2t - I_0^2t_{\text{delay}} = 8.5 \times 10^9 \text{ A}^2\text{s} \quad (10)$$

表 3 中心螺线管超导磁体失超保护参数

Tab. 3 quench parameters of CS coil

参数	数值
线圈额定电流/kA	47.65
线圈电感/mH	359
保护电压/kV	2.5
失超保护延迟时间/s	1
动作延迟时间/s	0.5
最高热点温度条件/(A ² ·s)	1.19 × 10 ¹⁰
线圈存储能量/MJ	407.6
最大温升/K	150

反向脉冲电容器单元可提供大于额定电流的脉冲电流。为达到需要的参数设置,反脉冲电容器单元中需由 3 个并联电容器组,充电电压为 3.2 MV,从而可产生 48.6 kA 的中和电流。

根据式(7)和式(9)中移能电阻单元参数设置要求,最终电阻设置为 51.2 mΩ。考虑温升限制要求,电阻器材料的总重量为 5435 kg,需要 17 个电阻模块来承载能量。为达到电阻值要求,17 个电阻模块最终组成电阻值为 51.2 mΩ,质量为 5667 kg 的移能电阻,其连接模式如图 9 所示。

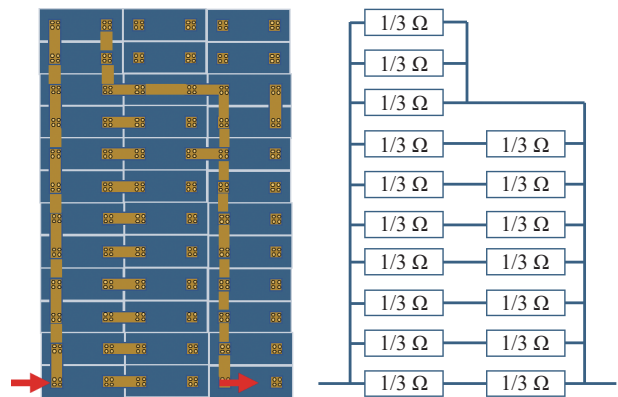


图 9 CS 线圈中移能电阻结构连接示意图

Fig. 9 FDR unit structure connection for CS

主断路器和爆炸开关单元可以保持在额定状态,电流检测信号可以设置为 50 kA,略大于额定电流。因此,在失超保护系统的动态框架下,通过设置系统内各作用单元参数可实现有效的超导磁体失超保护。如通过选择反脉冲电容器单元中适当数量的电容器,无需将所有电容器都纳入电路,还可确保充电电压。此外,通过选择移能电阻单元适当数量的电阻模块并设置合适的串并联模式,可为超导磁体提供最佳能量传输和承载条件,包括传输时间、保护电压、温升和电流衰减速度等。因此,通过这种方式,当测试过程中 CS 超导磁体发生失超时,失超保护系统可为其提供安全有效并具有经济性的保护措施。

5 结论

随着超导技术大型化的发展,在大型超导测试平台中需针对不同参数的超导磁体提供失超下的及时保护。本文基于大型超导测试平台超导磁体动态保护要求,提出了可变参数的失超保护系统框架。通过系统内各作用单元的参数改变,从而达到待测

试的超导磁体所需的失超保护参数要求。在设计失超保护框架中,反脉冲电容器中电容器的电容和充电电压被调整到超导磁体最大失超电流。移能电阻单元的数量和连接方式根据测试超导磁体的热点温度条件和存储能量进行调整,从而保障失超时超导磁体的能量可在安全时间内通过失超保护系统转移并消纳。然后以 CFETR 中 CS 超导磁体为例,验证了所提出的失超保护系统框架运行的有效可行性,此外,该失超保护框架还可扩展到未来聚变和其他领域超导磁体的失超保护中。

参考文献:

- [1] 王志斌,沈扬,余羿,等.我国磁约束核聚变能源的发展路径、国际合作与未来展望[J].南方能源建设,2024,11(3):1-13. DOI:10.16516/j.ceec.2024.3.01.
WANG Z B, SHEN Y, YU Y, et al. The development path, international cooperation and future prospects for magnetic confined fusion energy in China [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 1-13. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.01.
- [2] 徐浩睿,王苏鑫,李留江,等.聚变装置高温超导磁体系统电磁仿真方法研究[J].发电技术,2024,45(6):1030-1038. DOI:10.12096/j.2096-4528.pgt.24128.
XU H R, WANG S X, LI L J, et al. Research on electromagnetic simulation method of fusion high-temperature superconducting magnet system [J]. Power generation technology, 2024, 45(6): 1030-1038. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24128.
- [3] 许一泽,林睿,王思巍.基于超级电容器的核聚变磁体电源系统环形场线圈电源设计[J].南方能源建设,2024,11(3):117-125. DOI:10.16516/j.ceec.2024.3.13.
XU Y Z, LIN R, WANG S W. Supercapacitor-based toroidal field coil power supply design for nuclear fusion magnet power system [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 117-125. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.13.
- [4] 周渝深,潘垣,李传,等.氘氘聚变中子源大口径强磁场磁压缩磁体的设计与优化[J].发电技术,2024,45(6):1016-1022. DOI:10.12096/j.2096-4528.pgt.24173.
ZHOU Y S, PAN Y, LI C, et al. Design and optimization of deuterium-deuterium fusion neutron source large-size and high magnetic field magnetic compression magnet [J]. Power generation technology, 2024, 45(6): 1016-1022. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24173.
- [5] 苏杭,李华,宋执权,等.混合式新型聚变电源概念设计[J].南方能源建设,2024,11(3):56-64. DOI:10.16516/j.ceec.2024.3.06.
SU H, LI H, SONG Z Q, et al. Conceptual design of novel fusion power supply with energy storage [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 56-64. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.06.
- [6] SHI Y S, LI H, LI Z H, et al. Research on electromagnetic shielding device for pulse inductor in CRAFT quench protection system [J]. Fusion engineering and design, 2024, 203: 114451. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2024.114451.
- [7] WANG K, SONG Z Q, FU P, et al. Structure optimization of fast discharge resistor system for quench protection system [J]. IEEE access, 2019, 7: 52122-52131. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2911710.
- [8] WANG K, SONG Z Q, FU P, et al. Conceptual design of fast discharge resistor system for large superconducting fusion devices [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2019, 29(8): 4703408. DOI: 10.1109/TASC.2019.2945252.
- [9] WU Q K, SONG Z Q, LI H, et al. Design of control system for quench protection unit in CRAFT project [J]. Fusion engineering and design, 2024, 200: 114199. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2024.114199.
- [10] HU X G, LI H, LI H, et al. Design and test of magnetic shielding for vacuum circuit breaker of CRAFT quench protection system [J]. IEEE transactions on plasma science, 2023, 51(10): 3178-3187. DOI: 10.1109/TPS.2023.3314064.
- [11] WANG K, SONG Z Q, FU P, et al. Analysis and design of fast discharge resistor system based on forced-air cooling method [J]. IEEE transactions on plasma science, 2020, 48(2): 542-553. DOI: 10.1109/TPS.2019.2961095.
- [12] 黄亚,黄正义.面向磁约束聚变装置在强磁环境下磁性元件的失效分析及屏蔽效能研究[J].南方能源建设,2024,11(3):87-95. DOI:10.16516/j.ceec.2024.3.10.
HUANG Y, HUANG Z Y. Failure analysis and shielding effectiveness study of magnetic components in strong magnetic environments for magnetic confinement fusion devices [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 87-95. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.10.
- [13] XU M, LI H, SONG Z Q, et al. The challenge and solution of overvoltage for 100 kA quench protection system in CRAFT project [J]. Fusion engineering and design, 2022, 175: 113001. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113001.
- [14] 何诗英,黄连生,陈晓娇,等.核聚变高功率直流测试平台实时控制系统设计[J].发电技术,2024,45(6):1023-1029. DOI:10.12096/j.2096-4528.pgt.24169.
HE S Y, HUANG L S, CHEN X J, et al. Design of real-time control system for nuclear fusion high-power DC test platform [J].

- Power generation technology, 2024, 45(6): 1023-1029. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24169.
- [15] 许强林, 李华, 宋执权, 等. CFETR 失超保护系统总体设计研究 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(2): 33-38. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.004.
- XU Q L, LI H, SONG Z Q, et al. Research on overall design of quench protection system for CFETR [J]. Southern energy construction, 2022, 9(2): 33-38. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.004.
- [16] 李振瀚, 李华, 鲍晓华, 等. 120 kA 脉冲电抗器在振荡放电电路中的电磁场分布优化 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 23-35. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.03.
- LI Z H, LI H, BAO X H, et al. Optimization of electromagnetic field distribution of 120 kA pulse inductor in oscillation discharge circuit [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 23-35. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.03.
- [17] SALMI T, BERSANI A, BOTTURA L, et al. Analytical estimation of quench protection limits in insulated, non-insulated, and metal-insulated ReBCO accelerator dipoles and quadrupoles [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2025, 35(5): 4604705. DOI: 10.1109/TASC.2025.3540791.
- [18] WU A B, BAI Y, XU M F, et al. Design and test of quench protection for superconducting generator field coils [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2023, 33(5): 5202605. DOI: 10.1109/TASC.2023.3264470.
- [19] TONG Y J, MEI E M, ZHENG S J, et al. Electro-thermal coupling model of quench protection with a quench-back for DCT&CCT superconducting magnets [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2022, 32(6): 4701106. DOI: 10.1109/TASC.2022.3161254.
- [20] CHENG Z W, ZHENG H K, LI L, et al. Quench protection design of a head-only 1.5 T MRI superconducting magnet [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2024, 34(5): 4700905. DOI: 10.1109/TASC.2023.3349240.
- [21] BADEL A, OKADA T, TAKAHASHI K, et al. Detection and protection against quench/local thermal runaway for a 30 t cryogen-free magnet [J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2021, 31(5): 4700705. DOI: 10.1109/TASC.2021.3059604.

作者简介:



王琨

王琨 (第一作者)

1989-, 男, 副研究员, 博士, 主要从事核聚变电源领域研究 (e-mail) kunwang210@126.com。

孟祥娟

1984-, 女, 正高级工程师, 主要从事电力系统领域研究 (e-mail) mengxj@ahedi.com.cn。

全玮

1993-, 男, 博士, 主要从事核能科学与工程领域研究 (e-mail) tongwei@hfut.edu.cn。

宋蕾

1998-, 女, 工程师, 博士, 主要从事核能科学与工程领域研究 (e-mail) lsong1309@cpecc.net。

李伟

1986-, 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事先进核能技术领域研究 (e-mail) wli@cpecc.net。

徐猛

1996-, 男, 博士在读, 主要研究方向为超导聚变装置高压大容量失超保护系统研究与设计 (e-mail) meng.xu@ipp.ac.cn。

张希宁

1997-, 女, 博士在读, 主要研究方向为失超保护系统真空断路器开断特性研究 (e-mail) xining.zhang@ipp.ac.cn。

李华 (通信作者)

BRID: 05807.00.62502

1984-, 男, 副研究员, 研究方向为高压电源、电磁兼容与大功率直流开关技术 (e-mail) lihua@ipp.ac.cn。

李华

(编辑 叶筠英)