

引用格式: 吴琳君, 李海燕, 雷泉, 等. HL-3 聚变用大容量 Crowbar[J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 137-145. WU Linjun, LI Haiyan, LEI Xiao, et al. Large capacity crowbar for HL-3 fusion [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 137-145. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.15.

## HL-3 聚变用大容量 Crowbar

吴琳君<sup>1</sup>, 李海燕<sup>1</sup>, 雷泉<sup>1,✉</sup>, 吴一<sup>2</sup>, 刘邵轩<sup>3</sup>

(1. 广州擎天实业有限责任公司, 广东 广州 510860;

2. 中国核工业集团公司核工业西南物理研究院, 四川 成都 610225;

3. 新奥聚变研究中心, 河北 廊坊 065099)

**摘要:** [目的]面向 HL-3 聚变大科学装置极端故障能量快速转移, 配置短路保护用大容量旁路开关需求。[方法]基于 HL-3 磁体电源参数, 结合电力电子变流技术及可控硅触发应用基础, 针对快速冲击应用中多并联可控硅一致性导通及稳定均流的严苛工况, 融合电力电子变流工程实践经验, 经并联分支导电路径等长型改良; 并联元件参数一致性筛选, 并联臂内元件位置与参数差异化选配; 通过在可控硅侧附加串联电阻物理强迫均流, 并对附加电阻热稳定性核算, 并联桥臂电动力冲击验算; 可控硅元件高频脉冲列强触发等手段和方法。[结果]推导设计了一种稳定的可控硅 220 kA 级大容量聚变用 crowbar 旁路保护电子开关系统, 经试验模拟实测试验及实载 160 kA 冲击考验, 实现了 HL-3 保护用大容量旁路开关的匹配要求。[结论]在做好热动、稳定性验算的基础上, 采用线路改良, 附加物理强迫均流, 元件参数筛选及装配, 触发模式调整等综合手段, 实现大容量 crowbar 在聚变中的配套应用是完全可行的。

**关键词:** 核聚变; 可控硅; Crowbar; 保护开关; 设计应用

中图分类号: TL4; TL62

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0137-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.15

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Large Capacity Crowbar for HL-3 Fusion

WU Linjun<sup>1</sup>, LI Haiyan<sup>1</sup>, LEI Xiao<sup>1,✉</sup>, WU Yi<sup>2</sup>, LIU Shaoxuan<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Kinte Industrial Co., Ltd., Guangzhou 510860, Guangdong, China;

2. Southwestern Institute of Physics, China National Nuclear Corporation, Chengdu 610225, Sichuan, China;

3. ENN Fusion Technology R & D Center, Langfang 065099, Hebei, China)

**Abstract:** [Introduction] Facing the rapid transfer of extreme fault energy of the HL-3 fusion scientific apparatus, it is required to configure a large-capacity bypass switch for short-circuit protection. [Method] Based on the parameters of HL-3 magnet power supply, and in combination with power electronic converter technology and thyristor trigger application foundation, this paper integrated the practical experience of power electronic converter engineering, and used the following means and methods at the harsh working conditions of multi-parallel thyristor consistency conduction and stable current sharing in fast impact application: the equal length type improvement of parallel branch conductive circuit; consistency screening of parallel component parameters, differential selection of component position and parameters in parallel arm; physically forced current sharing by adding a series resistance on the side of the silicon controlled rectifier, calculation of the thermal stability of the additional resistance, and checking calculation of the electrodynamic impact of the parallel bridge arm; thyristor high-frequency pulse train strong trigger. [Result] A stable crowbar bypass protection electronic switch system for high-capacity fusion of 220 kA class of thyristor was deduced and designed, which was verified by experimental simulation and 160 kA impact test under actual load, and the matching requirements of large-capacity bypass switch for HL-3 protection were realized. [Conclusion] Under thermal and stability checking calculation, it is completely feasible to realize the

收稿日期: 2024-04-13 修回日期: 2024-05-07

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项资助项目“高精度数据实时获取处理及通讯技术研究”(2018YFE0301103)

matching application of large-capacity crowbar in fusion by adopting comprehensive means such as circuit improvement, additional physical force current sharing, component parameter screening and assembly, and trigger mode adjustment.

**Key words:** nuclear fusion; thyristor; crowbar; protection switches; design application

2095-8676 © 2024 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

伴随着人们对高效、绿色能源的迫切需求,聚变能源作为未来能源之一,备受世界各国关注。此前,国家原子能机构已经布局建设一体化核聚变研究创新体系研究平台。其中,中国环流三号(HL-3)作为我国目前设计参数最高、规模最大、最先进的磁约束核聚变实验研究大科学装置,被称为中国新一代的“人造太阳”<sup>[1]</sup>。其等离子体体积达到国内现有装置 2 倍以上,等离子体电流能力提高到 2.5 MA 以上,等离子体离子温度可达到 1.5 亿 °C,能实现高密度、高比压、高自举电流运行<sup>[2]</sup>,是实现我国核聚变能开发事业跨越式发展的重要依托装置,也是我国消化吸收 ITER 技术不可或缺的重要平台<sup>[3]</sup>,是加快中国经济绿色低碳转型,着力解决制约国家发展和安全的重大难题的科学基础研究装置。

核工业西南物理研究院负责设计、建造、运行的 HL-3 装置已于 2022 年 12 月装置建成并实现放电;2022 年 10 月,HL-3 装置等离子体电流突破 115 万安培;2023 年 8 月,HL-3 首次实现 100 万安培等离子体电流高约束运行<sup>[4]</sup>;多次刷新中国磁约束聚变装置运行纪录。标志着我国已自主掌握大型先进磁约束核聚变实验装置的设计、建造、运行技术,并为深度参与 ITER 计划及未来自主设计建造聚变堆提供重要技术支撑。

## 1 设计及验算

HL-3 装置运行时,各配套磁体电源分别向不同的线圈释电,以约束和调整等离子体位置和形态。其中 CS 四限象电源由 8 套±30 kA/750 V 可控硅变流器并联汇流,形成 240 kA 级供电能力。为有效保护 HL-3 装置和供电电源,在发生故障或需要保护时需快速释放转移线圈中的巨大能量,在电源和装置的联通线路上,可以通过并联非线性电阻、并联旁路开关(Crowbar)等手段迅速为故障释能提供通道。

旁路开关已在高压直流输电<sup>[5-7]</sup>和聚变领域具有研究和应用<sup>[8-9]</sup>,如李华等<sup>[10]</sup>结合国内外超导聚变装置简述了机械开关、人工电流过零关断开关全控器件混合式直流开关在聚变中的最新研究进展。指出磁体线圈电流及储能较小时可直接配置机械开关。开断电流大时人工过零关断开关为主流选择,全控器件因自身参数限制,虽具有未来发展趋势,但提高器件的开断电压和电流的技术挑战仍有待解决,暂未能有广泛应用。温家良等<sup>[11]</sup>针对 EAST 超导托卡马克电源系统,设计了一种新型高功率双向直流快速 15 kA 晶闸管能量转移开关。白小龙<sup>[12]</sup>基于 ITER 磁体电源系统直流开关,提出一种新的聚变装置直流开关的设计思路。

国内,EAST 全超导托卡马克,线圈的失超保护系统采用了并联熔断器的机械开关方式<sup>[13]</sup>,而中国科学院等离子体物理研究所研制的 15 kA 晶闸管分断开关已在 EAST 装置中成功应用<sup>[14]</sup>。中国聚变工程试验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)其超导线圈失超保护开关最大电流分断能力预计大于 70 kA<sup>[10]</sup>。国际上,ITER 保护系统的直流开关设计电流参数约为 70 kA<sup>[15]</sup>。韩国 KSTAR 超导托卡马克装置选用真空断路器并联晶闸管的半控混合式直流开关,其电流设计能力近 40 kA<sup>[16]</sup>。日本 JT-60SA 采用 IGCT 作为固态开关,其电流最大开断能力可达 25.7 kA<sup>[17]</sup>。

起旁路作用的机械开关动作时间随电流增大而延长。半控型混合式直流开关的成本相对较低。全控型混合式直流开关,关断可控、动作迅速,但器件价格高,有待于全控型器件的发展和性能提升。而随着聚变系统需求容量的不断增加,运行电流的不断攀升,旁路开关的热、动稳定及可靠性要求愈发严苛。半控型晶闸管(Thyristor)作为一种三端四层的半导体器件,体积小,通过控制门极触发电流来实现导通或截止,响应速度快,能承受较高的电压和电流。反向特性好,适宜反向阻断的电路应用。

### 1.1 设计参数

HL-3 的 Crowbar 选用成本相对较低, 控制响应速度快的晶闸管方案, 无机械触点, 电流自然衰减, 匹配前级 CS 电源±240 kA/750 V 激励, Crowbar 冲击电流设计能力需大于 220 kA, 为双向旁通型, 直接并联于电源和装置回路, 当发生故障或需保护时启动 Crowbar 快速释放装置线圈中的主要能量。因 Crowbar 仅针对最极端故障, 大部分时间处于待机状态, 供电、器件状态和连锁控制的检测保养较少, 存在一定的失效概率。启动 Crowbar 时可与前级可控硅电源联动, 利用可控硅电源导通管做续流提供备用通道, 双通道结合, 提升保护系数, 有效保障 HL-3 科学装置的安全。

由 HL-3 仿真运行电流衰减曲线可见, 如图 1 所

示, 其冲击电流大于 220 kA, 在 7.0 s 内呈指数衰减, 单峰  $i^2t$  瞬时最大值大于  $9.0 \times 10^9 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ , 5.0 s 内衰减至零附近。从安全角度出发, 需以晶闸管通态平均电流为基础, 进而匹配 CS 磁体电源可控硅型号 KPc-4 600 A/3 400 V, 预计电压安全系数大于 4.5, 选用 60 只并联, 理论通流量 276 kA。预计单只晶闸管平均最大瞬时冲击电流约为 3 667 A, 兼顾元件参数离散差异和母排线路杂散参数导致的均流偏差, 综合取值 0.8, 其平均和不均流电流负荷率分别为 79% 和 98.75%, 相比其他电力电子开关元件, KPc-4 600 A/3 400 V 晶闸管器件具有极强的短时耐受能力, 查询其通态浪涌电流和周波数的关系曲线可知周波数 10/@50 Hz 和 100/@50 Hz 的通态浪涌电流值分别大于 30 kA 和大于 10 kA。

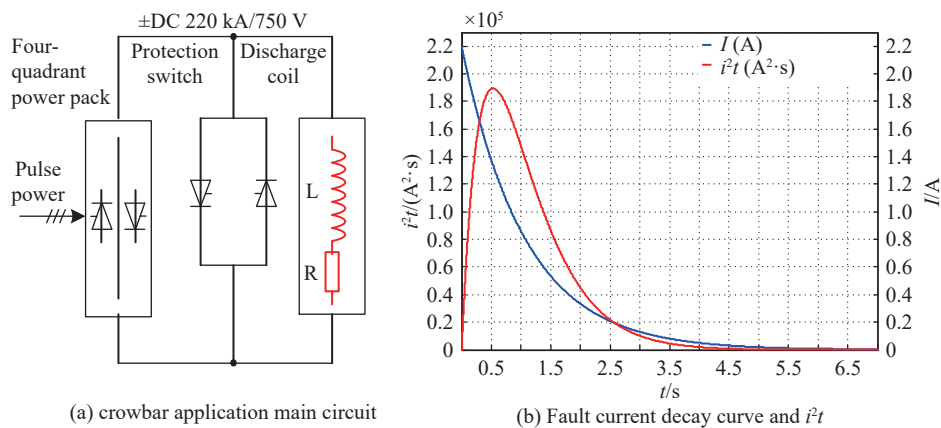


图 1 Crowbar 应用参数

Fig. 1 Crowbar application parameters

### 1.2 等效验算

将电流衰减曲线按照积分法则,  $i^2$  曲线与时间轴形成区域面积, 在电流衰减 4 s 后, 积分基本不再增加, 至少要达到  $2.6 \times 10^{10} \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ 。采用直流电流进行等效测试, 要求提供的直流短时能量需大于  $2.6 \times 10^{10} \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ 。稳态测试中采用一套 DC 20 V/51 kA 低压直流源, 如进行 10 s 耐受测试, 折算的稳态电流对于每个 Crowbar 中的晶闸管元件约为 850 A, 不均流晶闸管元件约为 1 000 A。

$$Q_{\text{plus}} = \int_0^{t_i} (i^2 t) dt \quad (1)$$

式中:

$Q_{\text{plus}}$  ——积分能量(J);

$i$  ——电流瞬时值(A);

$t$  ——时间(s)。

### 1.3 结构型式

均流的可靠性是 Crowbar 设计及应用的关键, 直流工况下的硬件均流, 需要充分匹配线路的杂散参数, 将 60 只晶闸管, 均分为 6 个模块, 每模块为 1 臂, 臂上下分 5 层双面对称压装分布 10 只元件, 如图 2 所示, 组成开关的 6 个臂模块, 采用等路径物理均流, 3 和 4 号支路母排故意折弯, 使其路径与其余臂导电等长, 归集汇入正负极。

### 1.4 元件选配

因可控硅元件参数的离散性, 生产时元件未能具有完全相同的正向特性, 且其特性也仅能限制在一定的动态范围内。而在相同的电压下, 元件因正

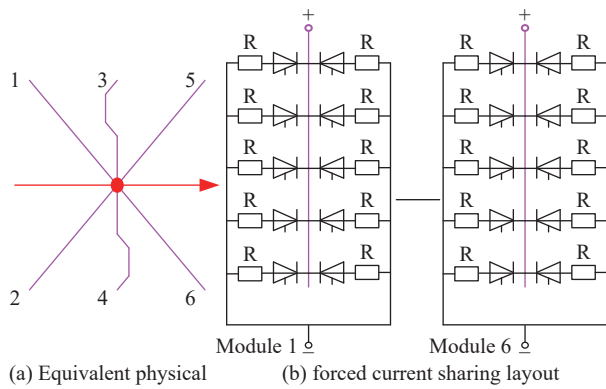


图 2 等物理路径及强迫均流布局

Fig. 2 Equivalent physical path and forced current sharing layout

向特性差异极易造成电流不均。且阳极电压较低时更容易引起并联元件不能同时导通,当并联元件的开通阈值电压差异较大,阈值电压较低的元件往往先导通,使其余未导通元件阳极电压保持在首先导通的元件门电压<sup>[18]</sup>,使它们无法导通。

为了提高并联元件同时导通率,匹配伏安特性是必要的,而小电流区由于元件负荷都较轻,虽然电流差异大,但并不至于过热损坏元件。但大电流工作区时,通态伏安特性差异会引起不平衡的元件电流分配,因此必须对并联元件的通态(正向)峰值压降进行严格的筛选,尽量使直接并联元件的通态(正向)峰值压降差小于 5 mV。匹配元件的通态伏安特性时,优先考虑大电流区特性<sup>[19]</sup>,如图 3 所示,使各元件特性呈 U 形或马鞍形排布,以保证大电流区有较好的均流。

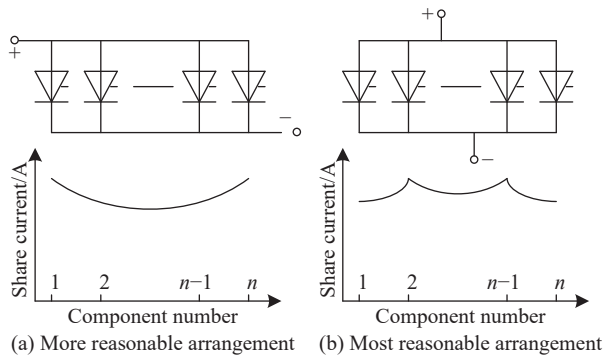


图 3 伏安特性对电流分配影响

Fig. 3 Effect of volt-ampere characteristics on current distribution

### 1.5 附加电阻强迫均流

采用等路径使主臂物理性均流,而模块内对称压装晶闸管元件可以串接附加电阻强迫均流,以

降低晶闸管参数离散及臂内线路阻抗差异影响,进而提高动态均流的可靠性。KPc-4 600 A/3 400 V 晶闸管斜率电阻值  $r_T$  为 0.115 m $\Omega$ ,附加强迫均流电阻值  $R_{add}$  预计大于  $r_T$  值 10 倍以上<sup>[20]</sup>,附加电阻可以采用高阻性的不锈钢或镍铬等合金材料绕组而成,稳态电流下,附加电阻吸收的热量可由(2)式计算得到<sup>[21]</sup>。

$$Q_H = I^2 R_{add} t \quad (2)$$

式中:

$Q_H$  ——注入附加电阻热量(J);

$I$  ——施加于电阻上的电流(A);

$R_{add}$  ——强迫电阻( $\Omega$ );

$t$  ——施加时间(s)。

注入电阻的能量使电阻升温,预计的温升可由(4)得出。质量  $m$  可以拆分成密度  $\rho_m$  和体积  $v$  的乘积,进一步将体积  $v$  拆分成材料长度  $L$  和截面积  $s$  的乘积,并联立式(2)和式(3),可以得出冲击工况下附加电阻的温升计算公式为:

$$Q_H = cm\Delta T \quad (3)$$

$$\Delta T = \frac{I_2 R t}{c \rho_m (L s)} \quad (4)$$

式中:

$c$  ——电阻材料的比热( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ );

$m$  ——质量(kg);

$\Delta T$  ——温升( $^\circ C$ );

$\rho_m$  ——密度( $kg/m^3$ );

$L$  ——材料长度(cm);

$s$  ——截面积( $cm^2$ );

$R$  ——电阻( $\Omega$ )。

$R_{add}$  需大于等于 1.15 m $\Omega$ ,附加钢或镍铬金属外形尺寸与稳态冲击下材料的耐受能力,需要综合电阻值和外形配比,进行验算。

$$R_{add} = \rho_R \frac{L}{s} \quad (5)$$

式中:

$\rho_R$  ——电阻材料的电阻率( $\Omega \cdot m$ )。

单只晶闸管 3.67 kA 电流冲击持续 1 s,均流电阻预计温升 442  $^\circ C$ ;晶闸管 1.02 kA(0.85 kA $\times$ 1.2)电流冲击持续 10 s,电阻预计温升 328.6  $^\circ C$ 。此时金属材料必将熔解或损伤,而在确保电阻值不变的前提下,成比例增加电阻的长度和截面积,进而增加均流电阻的热容量,以此来降低器件的热应力,当长度和

截面积分别增加 4 倍, 电阻的质量相应增加 16 倍, 热冲击温升减低 16 倍, 此时, 对应的温升区间为 20.5 ~ 27.6 °C。

### 1.6 动稳定性分析

多并联装置中, 并联臂除了受自身电流变化的磁场影响外, 还会受其余臂换流时磁场的耦合影响。更需要注意并联母排的设置方式, 如增大每臂母线之间的距离及母线对柜体的距离, 以免引起有害的影响及干扰<sup>[18]</sup>。短路时母线所承受的电动力和最大计算应力分别为<sup>[21]</sup>:

$$F = \frac{2K_x i_1 i_2 L_h}{L_a} 10^{-7} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{F^3 L_a}{80.167 L_h b^2} \quad (7)$$

式中:

$F$  ——作用力(N);

$i_1, i_2$  ——导体中的电流瞬时值(A);

$L_h$  ——平行导体长度(cm), 取 166 cm;

$L_a$  ——导体的轴向距离(cm), 取 50 cm;

$K_x$  ——形状系数, 其数值与导体截面形状及相互位置有关, 当  $L_h > L_a$  时,  $K_x = 1$ ;

$b$  ——导体厚度(cm), 取 2.8 cm。

对于母线要求允许应力须大于短路时母线所承受的最大计算应力。母线允许应力, Pa; 硬铜为 137 MPa, 硬铝为 69 MPa, 铝合金 6063 为 160 MPa, 钢为 98 MPa。当 Crowbar 通过 220 kA 瞬时电流时, 各桥臂预计瞬时电流为 36.6 kA; 则对应的电动势约为 892 N, 母线所受的最大应力约为 20.4 MPa, 当均流偏离到极端 0.8 的特殊状况下, 电动势约增大 1.56 倍, 最大应力增加 3.79 倍, 达 77.316 MPa。因铜导体成本高且易老化, 而铝和铜相比虽电阻率偏高, 但在满足电导电流密度, 电阻率, 温升允许前提下, 采用热容量更大的铝合金材料, 利用大截面及强比热容量, 扩大储热能力和散热面积。可使导电母排热吸收能力有所增长, 进而提升 Crowbar 整体的热稳定性。绝缘支撑及紧固选用中温下机械强度高, 高温下电气性能稳定的环氧树脂绝缘板。其具有较高的绝缘能力和抗压强度, 并能够有效避免漏电、击穿等事故的发生。同时其耐热性能好, 在 180 °C 下亦不变形。

## 2 触发脉冲

变流应用中, 可控硅可采用窄脉冲和宽脉冲触发<sup>[22]</sup>, Crowbar 多并联同时触发的特殊性, 瞬时导通的一致要求, 使触发的复杂程度更高。常规双窄脉冲触发模式, 脉冲间隔 60°, 时间跨度 3.3 ms, 要求极强的触发前沿陡度, 如第一脉冲未导通, 并联器件的通态特性, 使阳极电压减低, 未导通晶闸管无法再导通, 而已导通的晶闸管通路电流急剧增大过载造成损坏。如此往复几次, 使开关整体抗峰值电流能力急剧下降, Crowbar 整体击破, 丧失基本保护功能。

宽度大于 60°, 小于 120° 的宽脉冲, 虽提高了触发的可能性, 但对前沿陡度的持续性, 要求极高。合理利用晶闸管开通特性粒子的输运时间<sup>[23]</sup>, 在极短时间内, 多次强触发, 可增加触发的成功率<sup>[19]</sup>。针对 60 只晶闸管并联同时导通一致性需求, 选用宽脉冲高频脉冲列技术, 如图 4 所示, 在 20 μs 内形成多个波次的陡脉冲, 其第一波电流幅值大于 2 A, 前沿陡度大于 1.5 A/μs, 第 5 波电流幅值大于 0.8 A, 对比图 5 晶闸管门级触发特性曲线, 高频脉冲列及门极强触发电压下将有效提高晶闸管触发导通的一致性。

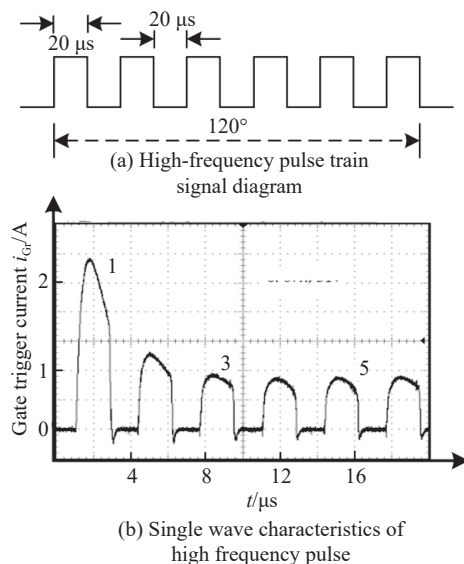


图 4 Kpc4 600/3200 晶闸管门级触发特性曲线

Fig. 4 Kpc4 600/3200 SCR gate trigger characteristic curve

## 3 验证测试

为验证 Crowbar 的热及导通一致性, 考核在高、低压时的导通差异, 验证系统配置了一台高压 DC

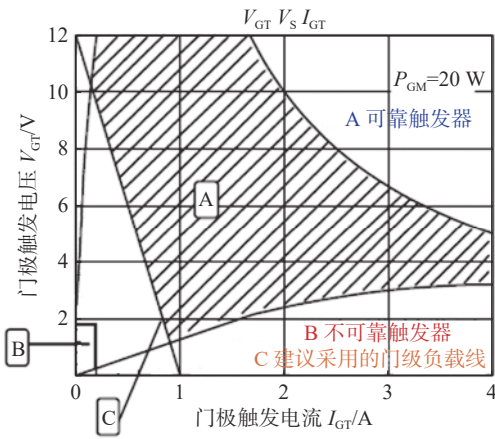


图 5 高频脉冲列及其电流输出特性

Fig. 5 High-frequency pulse train and its current output characteristics

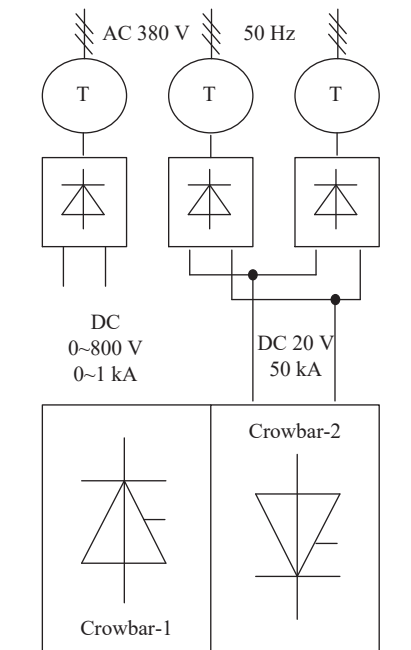
0~800 V/1 kA 直流源和一套 DC 20 V/51 kA 低压直流源, 如图 6 所示。开关中 6 模块支路分别卡装直检式霍尔电流传感器, 各晶闸管上卡装 4 000 A 级均流传感器, 进行单模块, 双模块, 三模块, 6 模块 12 只元件进行分层及上下错层, 及全模块导通测试。高压电源驱动下随阳极电压升高, 晶闸管触发导通数量增多。低压直流 DC 20 V/51 kA 源触发和热验证时, 任选模块在最上和下侧晶闸管串联强迫均流电

阻上分别贴装热电偶测温, 进行 DC 0.85 kA 持续 10 s 热验证, 实测一次性导通率 53 只, 模块间均流系数大于 0.94, 强迫均流电阻温升小于 60 °C, 模块内 10 晶闸管均流系数大于 0.92, 低阳极电压情况下, 通流能力已达 243 kA, 满足配套需求。

主回路电压幅值的升高, 可增大可控硅阳极和阴极间的场强, 加快门极驱动电荷的扩散速率, 提升晶闸管的导通成功率, DC 0~800 V/1 kA 直流源激励下, 瞬时电流不足以覆盖 60 只可控硅的擎住电流, 而 DC 20 V/51 kA 低压激励时, 阳极电压不足以匹配所有可控硅门极驱动电荷的扩散速率, 因此未能全部触通。在 HL-3 现场该双向旁通型 Crowbar 就近置于装置侧部下方, 2023 年一次聚变试验中, 因误操作, 导致大电流瞬时冲击 Crowbar, 历时约 3 s, 冲击期间开关主体虽有晃动, 但仍安全挺过, 后经故障分析, 数据核对, 确认开关承受电流峰值已超 160 kA。

#### 4 控制策略

托卡马克装置是一个集众多学科于一体构成的庞大系统工程, 仅装置及其配套设施的供电电源技术研究, 就包括电力电子、电机与拖动、大功率高压脉冲、电气工程与自动控制, 以及计算机应用等技术。



(a) Schematic diagram of high and low voltage DC actual measurement



(b) Low voltage DC measured circuit diagram

图 6 测试示意图  
Fig. 6 Test schematic

随着对等离子体物理特性的深入理解和不断探索,电源控制系统性能要求愈加严苛。历经多年的沉淀和发展,西南所电源控制系统已从单一的功能电路板迭代至高性能实时操作系统。可采用反射内存共享网络、Lab VIEWRT、FPGA 等技术,有效确保控制等离子体位形时激励电源稳定可靠、实时的快速配置需求<sup>[24]</sup>。

基于 Lab VIEWRT 和 FPGA 的 HL-2A 磁场电源实时控制系统,只需在上位机中设定电源运行参

数,应用消息处理机制将电源的运行参数传输至电源实时控制系统。系统即实时解析每个控制周期内的各磁场电源的运行参数,7813R FPGA 板卡根据同步信号、使能信号、故障输入/输出信号和当前的触发延迟等完成实时周期测量和延时设定产生触发脉冲输出,实现对晶闸管电源的控制。而 Crowbar 的触发需将结合四象限电源的电压、电流方向,放电线圈的运行状态和控制保护系统的综合信号来判断并触发对应支路的保护开关,如图 7 所示。

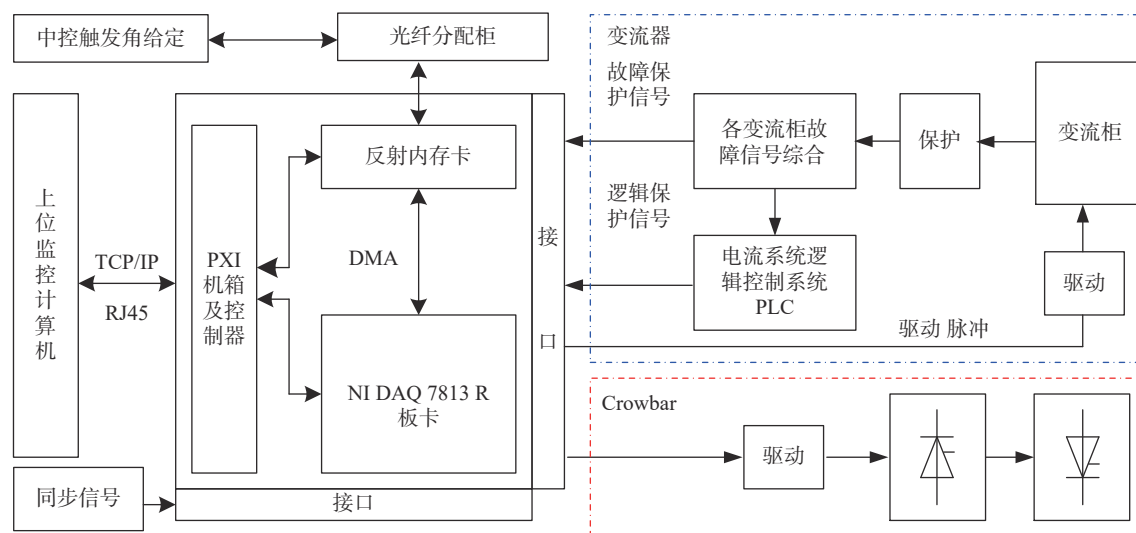


图 7 Crowbar 触发决策结构图

Fig. 7 Crowbar trigger decision structure diagram

## 5 结语

随着清洁、绿色能源研究的深入,我国在超导磁体与磁约束核聚变技术方面均取得了可喜的成绩<sup>[25-27]</sup>,如 HL-3、“玄龙-50”等科学装置建成、“和龙”装置的研究,正如火如荼地进行着。面对聚变中旁路保护开关研究的热点和难点,利用半导体器件作为主开关的保护方式时,需结合聚变装置具体回路形态进行分析其换流过程,人为设置自然过零点,再融合绝缘状态检测、自动 BOD 触发、远程触发控制及信息化采集分析、故障诊断等方法,进一步完善旁路开关的功能及配套,促进电力电子变流装置在聚变中广泛应用和发展。

### 参考文献:

[1] 光明网. 我国核聚变发展取得重大突破 新一代“人造太阳”建成并实现首次放电 [EB/OL]. (2021-12-31) [2024-05-06]. <http://www.gmww.com.cn>

[www.jintv.cn/folder2228/folder2229/folder2702/2020-12-05/1425468.html](http://www.jintv.cn/folder2228/folder2229/folder2702/2020-12-05/1425468.html).

Bright Network. A major breakthrough has been made in the development of nuclear fusion in China [EB/OL]. (2021-12-31) [2024-05-06]. <http://www.jintv.cn/folder2228/folder2229/folder2702/2020-12-05/1425468.html>.

[2] 武小强, 冉红, 张党申, 等. HL-2M 装置真空室成环工艺技术 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2022, 42(3): 327-330 DOI: 10.16568/j.0254-6086.202203010.

WU X Q, RAN H, ZHANG D S, et al. Ring forming technology for vacuum vessel of HL-2M tokamak [J]. Nuclear fusion and plasma physics, 2022, 42(3): 327-330. DOI: 10.16568/j.0254-6086.202203010.

[3] 核工业西南物理研究院. 中国核聚变发展取得重大突破 新一代“人造太阳”装置中国环流器二号 M 装置建成并实现首次放电 [EB/OL]. (2020-12-04) [2024-04-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/iCVKUvIoJTCny9w8XwrjRg>.

Southwestern Institute of Physics. Major breakthroughs in China's nuclear fusion development. The new generation of 'artificial sun' device China circulator No. 2 M device was

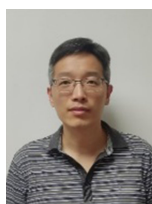
- completed and realized the first discharge [EB/OL]. (2020-12-04) [2024-04-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/iCVKUvIoJTCny9w8XwrjRg>.
- [4] 中国能源报. 我国核聚变研发多点开花 [EB/OL]. (2023-11-20) [2024-04-28]. [http://paper.people.com.cn/zgnybwap/html/2023-11/20/content\\_26028665.htm](http://paper.people.com.cn/zgnybwap/html/2023-11/20/content_26028665.htm).  
China Energy News. China's nuclear fusion research and development multi-point flowering [EB/OL]. (2023-11-20) [2024-04-28]. [http://paper.people.com.cn/zgnybwap/html/2023-11/20/content\\_26028665.htm](http://paper.people.com.cn/zgnybwap/html/2023-11/20/content_26028665.htm).
- [5] 古王荣, 王浩. 直流开关设备在换流站中的应用 [J]. *电气开关*, 2017, 55(1): 79-84. DOI: 10.3969/j.issn.1004-289X.2017.01.022.  
GU W R, WANG H. Application of DC switchgear in the convertor station [J]. *Electric switchgear*, 2017, 55(1): 79-84. DOI: 10.3969/j.issn.1004-289X.2017.01.022.
- [6] 门博, 钟建英, 仝永刚, 等. 高压直流旁路开关的温升仿真与试验研究 [J]. *高压电器*, 2016, 52(5): 154-157, 163. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.026.  
MEN B, ZHONG J Y, TONG Y G, et al. Temperature rise simulation and test of high voltage DC by-pass switch [J]. *High voltage apparatus*, 2016, 52(5): 154-157, 163. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.026.
- [7] 卢毓欣, 赵晓斌, 秦康, 等. 高压直流转换开关避雷器改造方案研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 76-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.012.  
LU Y X, ZHAO X B, QIN K, et al. Research on the modification plan of HVDC transfer switch arrester [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 76-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.012.
- [8] 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.
- [9] MILANI F, BENFATTO I, ROSHAL A, et al. Fusion applications of large DC-current interruption units [J]. *Fusion science and technology*, 2012, 61(1T): 83-88. DOI: 10.13182/FST12-A13401.
- [10] 李华, 宋执权, 汪舒生, 等. 核聚变装置中直流保护开关的研究进展 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(增刊 1): 233-239. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.161406.  
LI H, SONG Z Q, WANG S S, et al. Study on DC protection switch for superconducting coils in magnetic confinement fusion device [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(Suppl.1): 233-239. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.161406.
- [11] 温家良, 傅鹏, 刘正之, 等. HT-7U 托卡马克高功率双向直流快速晶闸管开关的研制 [J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(14): 49-53. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2003.14.011.  
WEN J L, FU P, LIU Z Z, et al. Development of high power bi-directional DC fast thyristor switch in HT-7U tokamak [J]. *Automation of electric power systems*, 2003, 27(14): 49-53. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1026.2003.14.011.
- [12] 白小龙. 聚变装置磁体电源系统直流开关技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016. DOI: 10.7666/d.D01076713.  
BAI X L. The study on techniques of DC circuit breaker for magnet power supply system in fusion facility [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016. DOI: 10.7666/d.D01076713.
- [13] FU P, SONG Z Q, GAO G, et al. Quench protection of the poloidal field superconducting coil system for the EAST tokamak [J]. *Nuclear fusion*, 2006, 46(3): S85-S89. DOI: 10.1088/0029-5515/46/3/S11.
- [14] LI D, FU P. Design and test results for the 15 kA thyristor switch network of EAST [C]//IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, Wuhan, China, May 17-20, 2009. New York: IEEE, 2009: 2599-2602. DOI: 10.1109/IPEMC.2009.5157845.
- [15] BONICELLI T, DE LORENZI A, HRABAL D, et al. The European development of a full scale switching unit for the ITER switching and discharging networks [J]. *Fusion engineering and design*, 2005, 75-79: 193-200. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2005.06.225.
- [16] SONG I, CHOI C, CHO M. Quench protection system for the superconducting coil of the KSTAR tokamak [J]. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2007, 17(1): 1-6. DOI: 10.1109/TASC.2006.887540.
- [17] GAIO E, MAISTRELLO A, COFFETTI A, et al. Final design of the quench protection circuits for the JT-60SA superconducting magnets [J]. *IEEE transactions on plasma science*, 2012, 40(3): 557-563. DOI: 10.1109/TPS.2011.2171008.
- [18] 张莹. 大功率电解电源及其监控系统研究与设计 [D]. 长沙: 中南大学, 2008. DOI: 10.7666/d.y1324855.  
ZHANG Y. High-power electrolytic power supply and its monitoring system [D]. Changsha: Central South University, 2008. DOI: 10.7666/d.y1324855.
- [19] 廖秀华. 电化学整流实用技术手册 [M]. 天津: 中国氯碱工业协会, 2009.  
LIAO X H. Handbook of practical techniques of electrochemical rectification [M]. Tianjin: China Chlor-Alkali Industry Association, 2009.
- [20] 王俊. 用于脉冲平顶波磁体的 35 kA 直流晶闸管开关系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. DOI: 10.7666/d.D230214.  
WANG J. The study of a 35 kA DC thyristor switch system for the pulsed flat-top magnet [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. DOI: 10.7666/d.D230214.
- [21] 陈远吉, 陈娅茹. 电气工程师常用计算公式速查通 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.  
CHEN Y J, CHEN Y R. Quick reference to common calculation formulas for electrical engineers [M]. Beijing: Chemical



- Industry Press, 2012.
- [22] 王兆安, 张明勋. 电力电子设备设计 and 应用手册 (3 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
WANG Z A, ZHANG M X. Power electronic equipment design and application manual (3rd ed.) [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [23] JAYANT BALIGA B. 功率半导体器件基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 353-358.  
JAYANT BALIGA B. Fundamentals of power semiconductor devices [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 353-358.
- [24] 李维斌, 王雅丽, 任青华, 等. 托卡马克脉冲电源实时控制系统设计 [J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(9): 096003. DOI: 10.11884/HPLPB201931.190016.  
LI W B, WANG Y L, REN Q H, et al. Design of a real-time control system for pulse power supply in tokamak [J]. High power laser and particle beams, 2019, 31(9): 096003. DOI: 10.11884/HPLPB201931.190016.
- [25] 王腾. 超导磁体技术与磁约束核聚变 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 108-117. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.014.  
WANG T. Superconducting magnet technology and magnetically confined fusion [J]. Southern energy construction, 2022, 9(4): 108-117. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.014.
- [26] 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.
- [27] 刘永, 李强, 陈伟. 磁约束核聚变能研究进展、挑战与展望 [J]. 科学通报, 2024, 69(3): 346-355.  
LIU Y, LI Q, CHEN W. Progress, challenge, and perspective of the development of magnetic confinement fusion energy [J]. Bulletin of science and technology, 2024, 69(3): 346-355.

---

作者简介:



吴琳君

吴琳君 (第一作者)

1981-, 男, 高级工程师, 华中科技大学水利水电工程专业硕士, 研究方向为电力电子高效变流技术及其应用( e-mail) wulj@kinte.com.cn。



雷泉

雷泉 (通信作者)

1983-, 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力电子变流、特种电源及设备、新能源装备研究工作(e-mail)leix@cei1958.com。

(编辑 徐嘉铨)