

直流开关器件极限性能测试系统的设计与实现

谢鹏飞, 唐德平, 黄才能, 彭 凯

(合肥科威尔电源系统股份有限公司, 安徽 合肥 230093)

摘要: 针对直流开关器件在容性接通能力、极限分断能力和短路耐受能力的极限性能测试需求, 设计了一款新型的满足 150 ~ 1 200 V 直流开关器件极限性能测试系统, 包括系统的主回路拓扑设计、控制单元设计、核心器件的设计选型以及操作界面设计。提出了一种通过超级电容存储能量, 利用 IGBT 作为控制单元, 满足短时大电流、高功率输出的极限性能测试系统。研制的测试系统响应速度达到微秒级, 时间控制准确度小于 0.5 ms, 满足直流开关在 1 ~ 12 kA 的极限工况性能测试要求, 同时解决了该类测试平台对于电网容量的依赖。

关键词: 直流开关器件; 极限性能测试; 容性接通能力; 极限分断能力; 短路耐受能力

Design and implementation of limit performance testing system for DC switching devices

XIE Pengfei, TANG Deping, HUANG Caineng, PENG Kai

(Hefei Kewell Power System Co., Ltd., Hefei 230093, China)

Abstract: In order to meet the testing requirements of the ultimate performance of DC switching devices in capacitive switching ability, ultimate breaking ability and short circuit tolerance ability, a new type of ultimate performance testing system for 150 ~ 1 200 V DC switching devices is designed, including the topological design of the main loop of the system, and the control unit design, and the design and selection of the core devices, and the operating interface design. A ultimate performance test system which can store energy by ultracapacitor and use IGBT as control unit was proposed to meet the requirements of short-time large current and high power output. The response speed of the test system is up to μs level, and the time control accuracy is less than 0.5 ms, which can meet the performance test of DC switch in the ultimate working condition of 1 ~ 12 kA. At the same time, the dependence of the test platform on power grid capacity is solved.

Key words: DC switching devices; ultimate performance; capacitive switching ability; ultimate breaking ability; short circuit tolerance ability

0 引言

伴随着新能源发电、新能源电动汽车产业发展的市场需求, 对于直流开关器件的需求逐步向

DC 1 000 V 以上的电压发展, 同时过电流能力和极限耐受能力要求越来越高^[1]。在各类电气系统中, 以直流继电器为代表的直流开关器件, 其功

合肥市关键共性技术研发项目 (2021GJ050)

能与性能以及可靠性直接决定了整个系统的安全可靠性。

直流开关器件通常会通过机械寿命、电气寿命的测试考察其稳定性,通过接通容性负载测试、极限工况的分断能力测试以及短路耐受能力测试,验证其在极限工况下的产品性能和可靠程度。而后述三项的极限测试在传统的测试方法中利用电网直接提供能量输入,通过电网专线的方式直接取电,再加上整流调压器和阻感类负载进行测试,并且测试中采用开关、熔断器实现带电情况下的硬断[2]。

相较于传统测试方法,本文设计的直流开关器件的极限性能测试系统方案,克服了传统测试

方法成本高、电网容量依赖大等缺点,所采用的拓扑结构和控制方法保证了短时极限工况测试下的高动态响应性、高准确度控制,同时保障了测试环境的安全、可靠。

1 测试系统方案的设计

1.1 系统方案设计

直流开关器件极限性能测试系统是一种高准确度、可控的大电流发生装置,可模拟直流开关器件在接通容性负载、极限大电流下的分断能力以及短路承载电流能力的测试工况。测试系统由双向直流电源、超级电容、控制开关柜以及高准确度负载组成,主回路拓扑设计如图1所示。

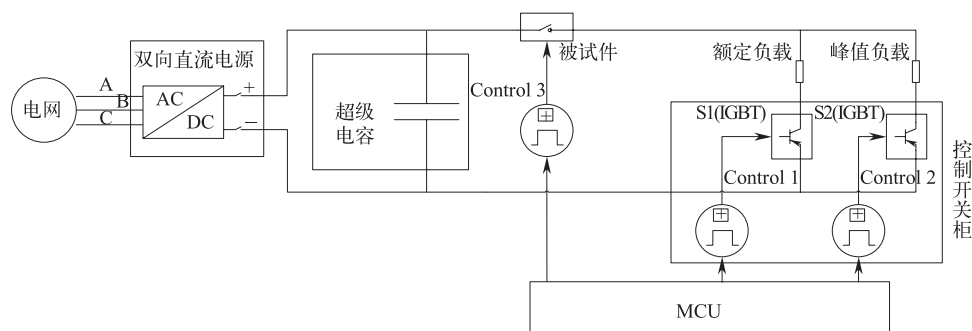


图1 直流开关器件的极限工况测试系统主回路拓扑

Fig. 1 The main circuit topology of limit performance testing system for DC switching devices

主回路特点:

1) 采用超级电容作为能量存储单元,满足电压连续可调和瞬间大功率能量短时输出的能力,同时利用前端的双向直流电源完成超级电容测试前充电和测试后的放电,既保证了测试电压的精确控制,又保证了整个测试阶段与电网的完全隔离,实现安全、可靠和无冲击。

2) 控制开关柜采用电力电子开关IGBT控制器件,利用IGBT快速的响应特性,实现了对于测试时间的精准控制;同时,IGBT开关与被试件的通断控制配合,满足了对于容性接通、极限分断和短路测试三种不同极限工况的逻辑控制。

3) 系统采用工控机和DSP组合的控制核心,上位机采用研华的工控机,通过人机交互的上位机软件实现测试工况的配置、数据监控

以及系统内各单元的精准配置;下位机采用DSP28335为控制单元的开关控制柜,在接收到上位机操作指令后,负责执行逻辑控制和闭环控制,通过IGBT开关和被试件的配合动作,产生可控的极限工况电流,同时实现测试时间的高准确度控制。

4) 高准确度负载由额定负载和峰值负载两部分组成,满足容性接通下尖峰电流,同时又能保证额定电流的工况测试;高准确度负载通常由纯阻性负载或阻感负载实现,本文主要针对的是高准确度纯阻性负载。

1.2 控制回路设计

控制回路设计包括上位机控制回路和下位机控制回路两部分。其中上位机控制回路实现各单元的指令控制和状态监控,下位机控制回路实现

测试逻辑控制。

上位机控制回路的指令控制逻辑如图2所示。

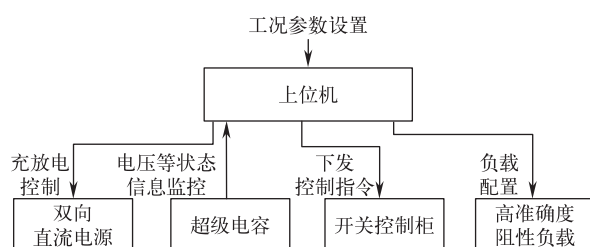


图2 直流开关器件的极限工况测试系统上位机控制回路

Fig. 2 Control loop of UPPER computer in limit performance testing system for DC switching devices

下位机的控制单元采用DSP28335作为主控制器，该DSP是一款高速浮点型数字信号处理器，具有150 MHz的高速处理能力，具备32位浮点处理单元，同时具备准确度高、成本低、功耗小、性能高和A/D转换更精确快速等优点。DSP接收到上位机的控制指令后，利用光纤通信控制IGBT开关，同时通过光耦信号调理电路控制被试件开关，通过逻辑配合实现不同工况的性能测试，再通过采样电路监控测试电流，实现对于测试时间的精确控制^[3]。下位机控制回路逻辑如图3所示。

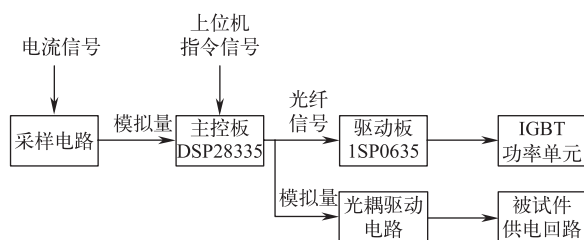


图3 直流开关器件的极限工况测试系统下位机控制回路

Fig. 3 Control loop of limit performance testing system for DC switching devices

2 软硬件设计

2.1 硬件设计

在主回路的设计选型时，需要考虑以下关键参数设计指标：①测试电压范围满足DC 150~1 200 V；②额定电流满足最大600 A的过电流能力；③峰值电流覆盖1~12 kA，满足1 000 A/s、4 000 A/150 ms、6 000 A/100 ms、8 000 A/

50 ms和10 000~12 000 A/30 ms的峰值电流测试能力；④满足最高DC 750 V电压下12 kA的短路测试、1 000 V电压下6 000 A的分断测试能力；⑤最小控制时间满足1 ms，时间控制准确度小于0.5 ms。

由图1主回路拓扑可知，在设计直流开关器件极限工况测试系统时，需要根据测试指标综合考虑超级电容的容量选型、开关控制柜的IGBT开关选型和均流设计以及高准确度负载的选型设计，同时需要综合考虑测试系统的总阻抗设计。

主回路设计说明：

(1) 超级电容的设计选型

超级电容的设计选型一方面需要考虑设计容量；另一方面需要考虑超级电容内部阻抗的影响。由于超级电容放电过程是一个电流逐步降低的过程，本方案参考IEC 62055-31 2005的规定^[4]，将测试过程中电流变化控制在（+5%，0%）范围作为设计依据，结合各电流段的放电时间要求，选用超级电容核心参数为：容量6.875 F；最大允许电压DC 1 296 V；工作电压范围DC 0~1 200 V；多档位输出DC 270 V/540 V/810 V/1 296 V；等效直流内阻≤100 mΩ。

(2) 开关控制柜的设计

开关控制柜的设计分为额定回路设计和峰值回路设计。其中峰值回路设计除IGBT的选型设计外，还需要对多组IGBT并联进行均流控制设计。

额定回路的IGBT选用英飞凌的单组DF1000R17IE4模块，满足最大DC 1 700 V的耐压和1 000 A的最大通流能力；峰值回路的IGBT设计，选用6组英飞凌的FZ3600R17HP4_B2模块，单个模块具备最大DC 1 700 V的耐压和3 600 A的最大通流能力，通过6组并联，其理论通流能力可达到21 600 A。

对于峰值回路的IGBT模组设计，采用两个模组并联的方案，每个模组设计有3组IGBT并联，通过叠层母排和软导线的连接设计，均衡每组的过电流阻抗，实现均流设计。另外，驱动回路采用驱动控制方案，利用主从控制板设计，通

过光纤通信和同步排线的通信方式，保障驱动信号动作的一致性，如图4所示。

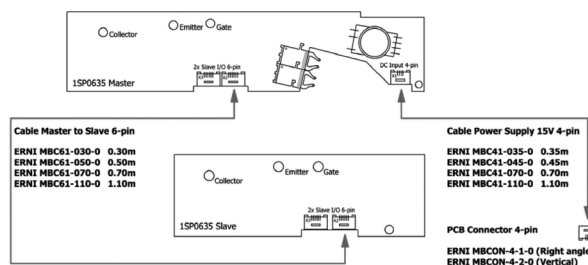


图4 驱动同步控制方案

Fig. 4 Drive synchronous control scheme

(3) 高准确度阻性负载和系统阻抗设计

考虑到超级电容内阻影响，在电阻设计和整个测试系统内阻方面做了精细化的设计，峰值负载回路采用铜排连接，同时预留多个毫欧级的细调档位。

2.2 软件设计

本方案设计的直流开关器件极限性能测试系统具备三种极限测试工况：容性负载接通测试、极限分断能力测试以及短路承载能力测试。

2.2.1 容性负载接通测试

直流开关器件的容性接通测试是为了验证在接通瞬间，因为负载端有容性负载而产生的短时长电流冲击，在冲击过后又能够正常实现负载工作的能力。

本系统方案搭建峰值电流负载和常规电流负载两组负载，通过两路IGBT电子开关，分别实现在被测直流开关接通后，按照峰值电流时间和额定电流时间的分断控制。

直流开关器件的容性接通测试逻辑时序图如图5所示。图5被试件的线圈供电延时时间设定为5 ms。

2.2.2 极限分断能力测试

直流开关器件的极限分断测试是为了验证在闭合状态下，回路中突然出现大电流时被测开关分断的能力。

本系统方案通过峰值电流负载的电压和电流工况环境，提供验证被测直流开关在大电流下的分断能力。

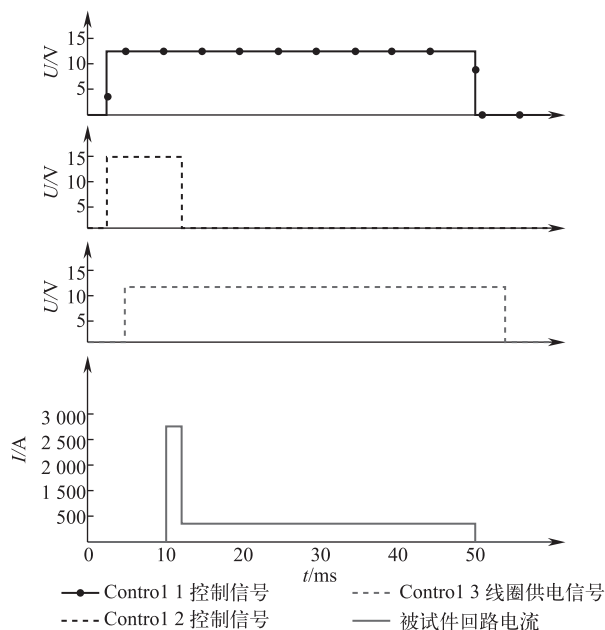


图5 容性接通测试逻辑时序图

Fig. 5 Capacitive switch on test logic sequence diagram

直流开关器件的极限分段能力测试逻辑时序图如图6所示。若这一阶段被试件的分断能力失效，系统在被试件接通40 ms后会自动切断峰值回路的S2（IGBT）开关，同时判定测试结果失败。

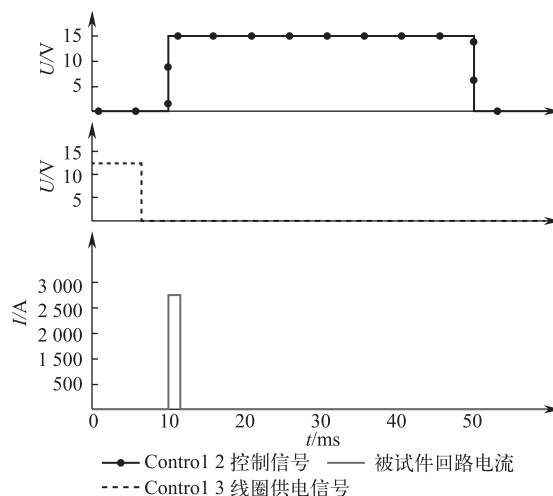


图6 极限分断能力测试逻辑时序图

Fig. 6 Logical sequence diagram of limit breaking ability test

2.2.3 短路承载能力测试

直流开关器件的短路承载能力测试是为了验证在闭合状态下，通过短时耐受电流的能力。本系统方案利用超级电容的能量存储实现短时放

电, 放电过程中, 超级电容的电压逐渐降低, 也会带动整个回路的电流逐渐降低。因此, 本系统设计在持续时间内, 回路中电压、电流的降低不超过5%。

直流开关器件的短路承载能力测试控制逻辑如图7所示。

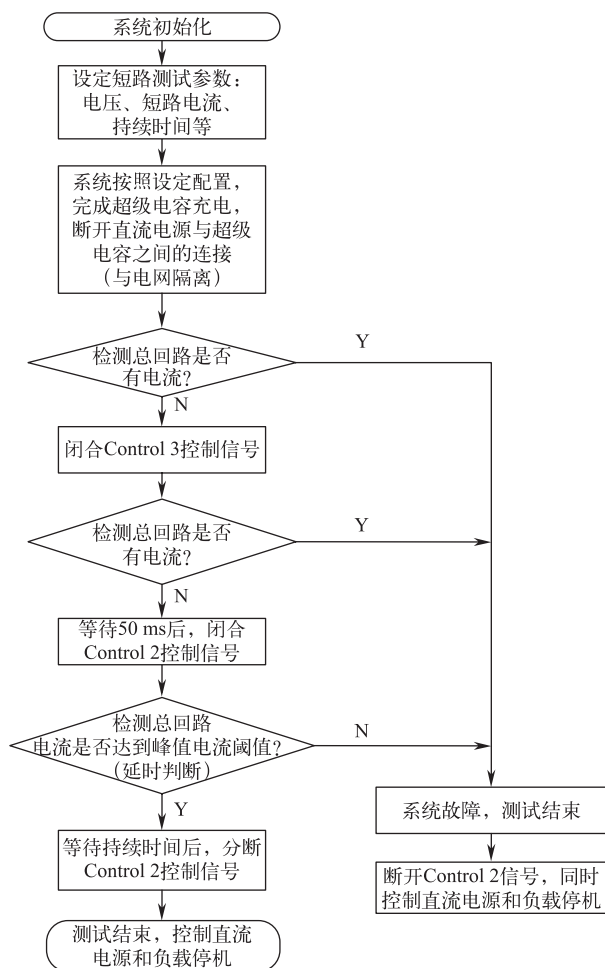


图7 短路承载能力测试控制逻辑图

Fig. 7 Short circuit load capacity test control logic diagram

3 试验及结果分析

利用研制的直流开关器件极限工况测试系统, 对某国内品牌的直流继电器进行短路测试, 测试波形如图8所示。从测试波形可以看出, 电流爬升时间为 $289\ \mu\text{s}$, 电流快速达到 $9\ 365\ \text{A}$, 随后稳定在 $9\ 880\ \text{A}$ 左右, 电流短路持续控制时间为 $4.77\ \text{ms}$, 与设定的 $4.8\ \text{ms}$ 误差值相比, 小于 $0.1\ \text{ms}$ 的控制准确度。

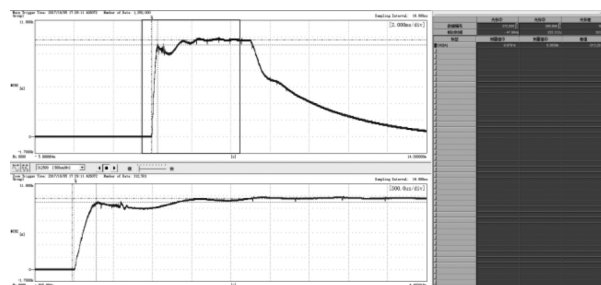


图8 短路承载能力测试波形图

Fig. 8 Short circuit load capacity test waveform

利用本方案平台验证DC $1\ 000\ \text{V}$ 工作电压时, $6\ 000\ \text{A}$ 工况下的极限分断能力, 如图9所示。通过测试波形可以看出, 测试时间能够精确控制在 $6\ \text{ms}$ 左右, 测试电压控制在 $1\ 000\ \text{V}$, 测试电流能够稳定维持在 $6\ 000\ \text{A}$ 。

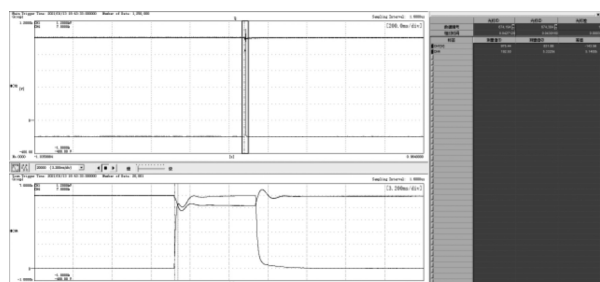


图9 极限分断能力测试波形图

Fig. 9 Waveform diagram of ultimate breaking ability test

利用本方案平台验证DC $450\ \text{V}$ 工作电压下, 峰值电流 $1\ 450\ \text{A}$ 、额定电流 $400\ \text{A}$ 的容性接通能力测试, 波形如图10所示。通过测试波形可以看出, 峰值电流持续测试时间能够精确控制在 $52\ \text{ms}$ 左右。

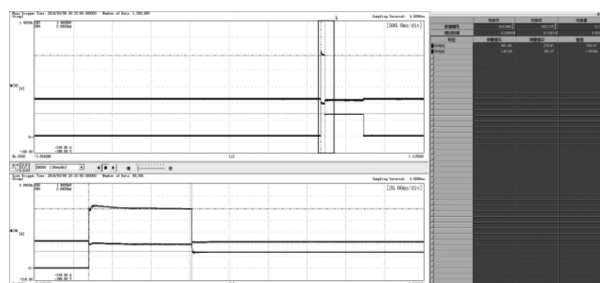


图10 容性接通能力测试波形图

Fig. 10 Capacitive switching ability test waveform

另外, 本方案设计的峰值回路IGBT模组大电流 $10\ 000\ \text{A}$ 下的均流效果见下表。测试结果表

明, 本方案设计的IGBT模组均流不平衡度小于10%。

表 峰值回路 IGBT 模组均流测试结果

Tab. Peak loop IGBT module flow equalization test results

	IGBT-1	IGBT-2	IGBT-3	IGBT-4	IGBT-5	IGBT-6	总输出
电流 /A	1 596	1 818	1 797	1 689	1 893	1 833	10 160

4 结束语

应用电力电子技术, 研制一种新型的直流开关器件极限工况测试系统, 实现了成本更优, 不依赖于电网容量, 并且测试系统具备很强的可拓展性, 可以广泛应用于各类型直流开关器件的研发测试、品质检测以及第三方检验等方面。

试验结果表明, 本套测试系统设计合理, 采用控制方法有效, 实现测试电压、测试电流和测试时间的精确控制。整个测试过程安全可靠, 对电网无任何冲击。

参考文献

- [1] 李思泓, 孙吉升, 陈永亮. 新能源用控制电器的发展与分析[J]. 电器与能效管理技术, 2019(5): 1-9.
- [2] 徐国田. 一种短路测试工装[P]. 中国专利: 201911260494. 6, 2020-04-10.
- [3] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] Electricity metering – Payment systems – Part 31: Particular requirements – Static payment meters for active energy (classes 1 and 2): IEC 62055-31 2005[S].

作者简介

谢鹏飞 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事新能源方向的测试电源和测试系统产品设计和开发工作。

(收稿日期: 2022-01-17)