



核科学与工程

基于人工过零的失超保护 100 kA 真空断路器试验

胡星光^{1,2}, 钟积科³, 李 华⁴, 李 航², 吴木泉²

(1. 深圳大学 物理与光电工程学院, 广东 深圳 518061; 2. 深圳大学 新能源研究中心, 广东 深圳 518060; 3. 武汉长海电气科技开发有限公司, 武汉 430073; 4. 中国科学院 合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要: 在超导磁体电源系统中, 失超保护系统具有重要的地位, 能够将磁体能量迅速转移并消耗。聚变堆主机关键系统综合研究设施项目对失超保护系统提出了 100 kA 直流分断的技术要求, 其中采用真空断路器作为转移支路开关。针对 CRAFT 失超保护系统, 设计了串联结构的 100 kA 直流真空断路器并完成了样机制造。通过现场试验, 在人工过零电路的配合下, 所设计和制造的真空断路器完成了 100 kA 直流分断测试。

关键词: 失超保护; 真空断路器; 串联结构; 人工过零; 直流分断

中图分类号: TL629

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210552

Test of 100kA vacuum circuit breaker based on artificial current zero for quench protection

Hu Xingguang^{1,2}, Zhong Jike³, Li Hua⁴, Li Hang², Wu Muquan²

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China;

2. Advanced Energy Research Center, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

3. Wuhan Changhai Electric Technology Development Co., Ltd, Wuhan 430073, China;

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

Abstract: Quench protection system plays an important role in superconducting magnet power supply system, as it can transfer and consume magnet energy rapidly. In the project of Comprehensive Research Facility for Fusion Technology (CRAFT), the technical requirement of breaking 100 kA direct current (DC) is proposed for the quench protection system, in which the vacuum circuit breaker is used as the switch of transfer branch. In this paper, a 100 kA DC vacuum circuit breaker with series structure is designed for the CRAFT project's quench protection system, and the prototype is manufactured. In field test, with the cooperation of artificial zero-point circuit, the vacuum circuit has completed the 100 kA (DC) breaking test successfully.

Key words: quench protection, vacuum circuit breaker, series structure, artificial zero crossing, DC breaking

超导托卡马克核聚变装置中, 依靠超导磁体中流通的强直流来产生高强磁场, 以实现等离子体的约束与控制^[1-2]。超导磁体中储存着巨大的磁场能量, 由于运行中的各种不稳定因素可能令超导磁体失去超导状态, 此时巨大的磁场能量将转化为热能, 产生大量的焦耳热, 导致超导体损坏, 造成巨大的经济损失^[3]。失超保护系统能够在发生失超事件时切断磁体电流, 将磁体中的磁场能量迅速转移并耗散, 实现对超导线圈的可靠保护, 在磁体设计中具有非常重要的地位^[4-6]。聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)项目中, 超导磁体电源系统的电流等级达到了直流 100 kA, 其参数要求对失超保护系统的设计提出了新的挑战。本文针对 CRAFT 失超保护系统的电流转移支路, 设计了串联双断口结构的真空断路器, 并完成了相应的电流分断试验。

1 CRAFT 失超保护系统

CRAFT 项目是我国《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》中优先部署的大科学装置。其基本思路是建

* 收稿日期: 2021-12-08; 修订日期: 2022-06-03

基金项目: 国家重大科技基础设施建设项目 (2018-000052-73-01-001228); 国家重点研发计划项目 (2017YFE0300500); 青年科学基金项目 (11805134)

联系方式: 胡星光, xghu@ipp.ac.cn。

通信作者: 李 航, lih@szu.edu.cn。

设具有国际领先水平的超导磁体研究系统和偏滤器研究系统,为磁约束聚变堆主机关键系统研究提供粒子流、电、磁、热、力等极端实验条件。设施建成后,将成为国际磁约束聚变领域参数最高、功能最完备的综合性研究平台,为开展聚变堆核心部件研发和建设提供建设技术基础。

CRAFT 项目中的超导磁体研究系统,其失超保护系统需要保护的超导磁体单线圈储能高达 4 GJ,额定电流 100 kA,图 1 为 CRAFT 超导磁体失超保护系统电路结构示意图。其中,机械开关需要长期承载主回路大电流,一旦发生磁体失超事件,系统发出机械旁路开关分断指令,机械旁路开关触头打开并拉伸空气介质电弧,能够产生 20 V 以上弧压,电流在机械旁路开关电弧电压作用下,将磁体电流自然换流至真空断路器支路,待电流完全转移至真空断路器支路,机械旁路开关触头间空气电弧自然过零熄灭。待机械旁路开关恢复一定电压阻断能力,系统发出真空断路器分断信号,经过真空断路器操动机构固有分断时间后触头打开,此时导通晶闸管 T,利用人工过零电路中预充电电容的放电强迫真空断路器电流过零,并将电流转移到耗能电阻,实现磁体能量的耗散,从而保护超导磁体^[7-9]。CRAFT 超导磁体研究系统对失超保护系统提出了 500 ms 以内的分断要求,包括机械旁路开关分断换流及真空开关在人工过零电路配合下完成直流分断转移的时间,如何在大电流下完成直流可靠分断,对各开关的设计提出了新的挑战。图 2 显示了 CRAFT 超导磁体失超保护系统的控制逻辑和各支路电流转移过程预期波形。

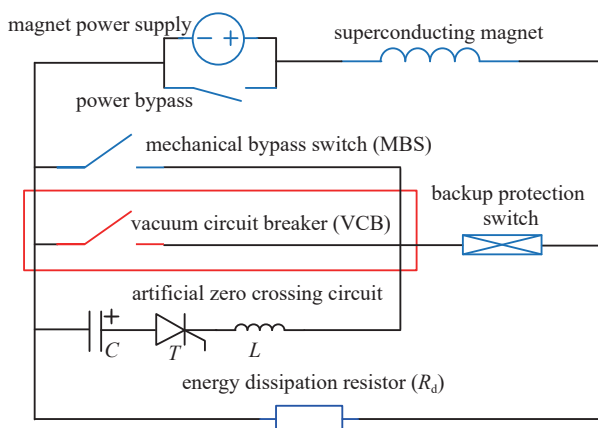


Fig. 1 Schematic diagram of quench protection system for CRAFT superconducting magnet

图 1 CRAFT 超导磁体失超保护系统示意图

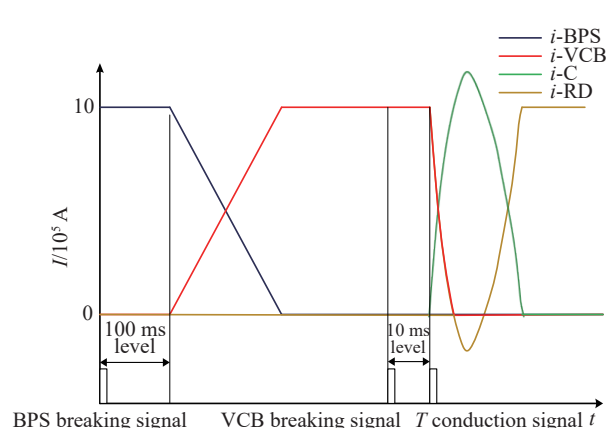


Fig. 2 Control logic and expected current waveform of quench protection system

图 2 失超保护系统控制逻辑与预期电流波形

2 真空断路器设计

2.1 结构设计

真空断路器需要满足系统应用场景与技术要求,根据国内现有真空灭弧室产品条件,设计了一种串联双断口结构的真空断路器,应用于 CRAFT 失超保护系统转移支路,需要能够承载短时 100 kA 直流,同时配合人工过零电路完成电流分断。该真空断路器还需要具有较快的介质恢复能力,能够承担 10 kV 系统电压不发生电弧重燃现象。

经过调研,本设计采用了宝光股份公司所研制的 BGH6210 型真空灭弧室,其主要参数如表 1 所示,该款真空灭弧室能够满足失超保护系统的要求。考虑到所需要设计的真空断路器应用场景的特殊性,对于可靠性提出了较高的要求,所以提出双断口串联结构,使用两个真空灭弧室串联,通过操动机构设计在断路器动作时确保动作一致性。该设计一方面提高了断路器整体的系统耐压能力,另一方面保证了即使其中一个真空灭弧室发生分断失败现象,真空灭弧室也具有独立完成所需分断要求的能力。

图 3 为制造的 100 kA 真空断路器样机实物图,真空灭弧室通过竖直摆放串联的结构形式大大减小了占地面积。为了保证两个真空灭弧室触头分合闸动作的快速性与一致性,设计两套动触头的下部驱动杆通过底部同轴连杆相互连接,并采用电磁斥力驱动方式,通过同一套电容器组放电控制分合闸线圈动作。同时为每根驱动杆设置四个均匀分布的弹簧拉杆,也为分合闸动作稳定性提供了保障。

表 1 真空断路器用灭弧室主要参数 (BGH6210)

Table 1 Main parameters of interrupter for vacuum circuit breaker (BGH6210)

rated voltage/kV	rated current/A	rated short-circuit breaking current/kA	rated short-time withstand current/kA	rated short circuit duration/s
18	6300	100	100	2

对该真空断路器样机进行了操动机构测试, 测试结果表明: (1)真空断路器的串联两断口分闸不同期时间平均值不大于 600 μs ; (2)多次测试获得其串联断口固有分断时间平均值约 3.8 ms; (3)机构动作后期断口位移动作轨迹能够保持较好的重合度, 从触头开始动作到断口位移距离保持一致的时间约为 6.1 ms, 此时两断口开距均为 7 mm。

从以上操动测试结果可以看出, 真空断路器的串联双断口总体动作一致性能满足较好的一致性要求。且真空断路器触头在给出分闸信号后 9.9 ms 时, 双断口位移距离能够保持较好一致性, 此时到达最佳开距, 该操动机构测试结果对控制人工过零电路的放电时间给出了参考依据^[10]。

2.2 结构设计

直流开关分断没有自然过零点, 人工过零电路的作用是通过向真空断路器反向叠加脉冲电流, 强迫真空断路器支路电流过零, 实现分断直流^[11-12]。图 4 为 CRAFT 失超保护系统真空断路器采用的人工过零电路拓扑方案, 其两端接口与真空断路器并联。人工过零电路由储能电容 C_b 、调波电抗器 L_b 及晶闸管桥 (T_{b1} 、 T_{b2} 、 T_{b3} 、 T_{b4}) 组成, 可实现双向故障电流开断, 各桥臂为 3 只晶闸管串联, 采用株洲中车 KPE 6900-065 晶闸管; S_1 为储能电容充电回路控制开关, R_c 为充电限流电阻; S_2 为放电回路控制开关, R_1 为储能电容放电电阻。

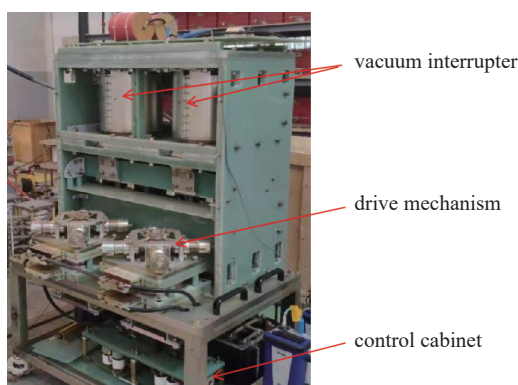


Fig. 3 Prototype of 100 kA vacuum circuit breaker

图 3 100 kA 真空断路器样机

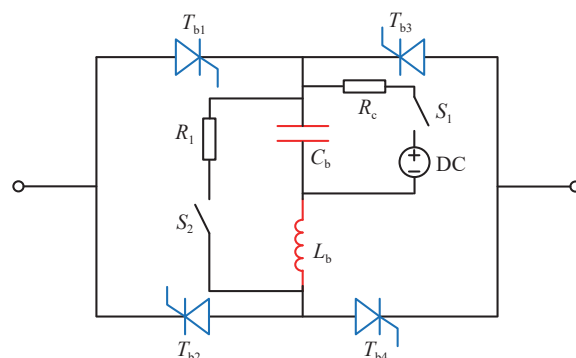


Fig. 4 Topology of artificial zero crossing circuit for quench protection system

图 4 失超保护系统人工过零电路拓扑

人工过零回路参数设计原则应从真空开关两断口 VB1、VB2 分断可靠性角度出发, 真空开关电流零区附近的电流变化率和电压变化率直接影响到弧后阶段介质强度及介质恢复速度, 在综合考虑换流回路设备体积的情况下, 通过适当增大换流电感数值来减小真空断路器零区电流变化率。针对磁体电源电压等级, 换流回路储能脉冲电容预置电压 U_b 为 10 kV, L_b 为真空断路器电感, 将换流脉冲电流初始上升率控制在 160 A/ μs 以下, 忽略晶闸管桥臂参数对换流过程的影响, 有

$$\frac{U_b}{L_b} \leq 160 \text{ A}/\mu\text{s} \quad (1)$$

计算可知 $L_b \geq 62.5 \mu\text{H}$, 实际采用 66 μH , 根据二阶电路解析知真空开关电流人工过零附近 di/dt 为

$$\frac{di}{dt} = \frac{\sqrt{U_b^2 - \frac{I_0^2 L_b}{C_b}}}{L_b} \quad (2)$$

式中: I_0 为磁体故障电流, C_b 为人工过零回路换流电容, 超导线圈发生故障时, 在断路器动作过程中故障电流近似不变, 取 $I_0=100 \text{ kA}$ 。根据表达式可知, 在预置电压 U_b 、换流电感 L_b 及故障电流 I_0 不变的情况下, 换流电容 C_b 越小, 真空开关电流零区附近 di/dt 越小, 同时为了制造真空开关电流有效零区, 换流回路脉冲电流峰值应在大于磁体故障电流的基础上并保持一定换流系数, 即 α 值, 可得

$$U_b \sqrt{\frac{C_b}{L_b}} = \alpha I_0 \quad (3)$$

式中: α 越大, 换流电容 C_b 越大, 且真空开关零区 di/dt 越大, 不利于弧后介质可靠恢复, 实际选用 8 个 1100 μF 电容并联组成 8.8 mF 放电储能电容 C_b , 此时 α 取值 1.15, 可满足对真空断路器支路反向放电过零的裕量要求。

3 分断试验与分析

3.1 试验平台搭建

为了验证设计的真空断路器能够在人工过零电路的配合下完成 100 kA 直流分断,搭建了如图 5 所示的直流分断测试电路,其中简化了图 4 所示人工过零电路的双向电流开断拓扑。

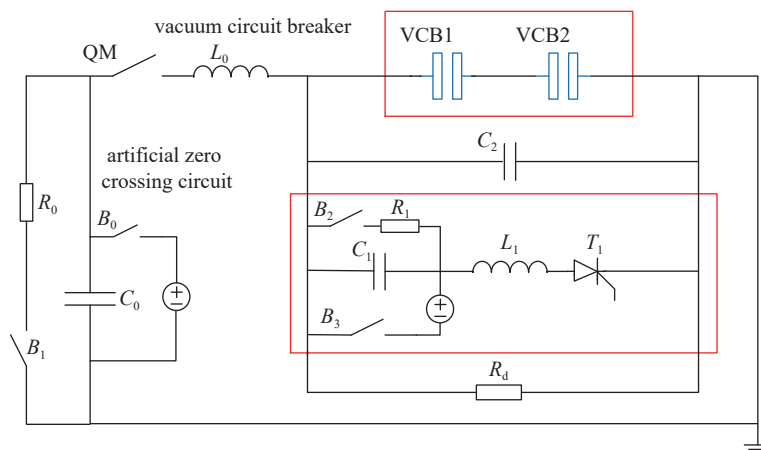


Fig. 5 Breaking test circuit of 100 kA vacuum circuit breaker based on artificial zero crossing

图 5 基于人工过零的 100 kA 真空断路器分断测试电路示意图

试验原理为(1)准备阶段闭合开关 B_0 、 B_3 , 打开开关 B_1 、 B_2 , 为主回路放电电容 C_0 和人工过零支路放电电容 C_1 进行预充电, 在各自电容到达预设电压后断开相应 B_0 和 B_3 开关, 此阶段主回路合闸开关 QM 为打开状态;(2)主回路放电阶段闭合开关 QM, 电容 C_0 放电, 主回路电流上升, 且主要由真空断路器承载主电流;(3)待真空断路器支路电流上升至预定分断值, 给出真空断路器分断信号, 并按照预定设定时间延迟控制导通晶闸管 D_1 , 此时已经预充电的电容 C_1 开始放电, 对真空断路器支路施加反向脉冲电流, 迫使真空断路器支路电流下降并在开关断口到达最佳开距附近电流过零, 主回路电流将转移至耗能电阻 R_d , 试验电路选用耗能电阻为管式不锈钢电阻柜, 最大耗能 20 MJ。

每次分断试验完成后, 闭合开关 B_1 、 B_2 , 通过放电电阻 R_0 、 R_1 释放相应放电电容的残余电压, 确保试验安全。考虑到真空断路器收到分断信号后的固有分断时间 3.8 ms, 且多次试验中操动机构动作时间较为固定, 可以提前一定时间给出真空断路器分断信号, 令真空断路器在触头打开到最佳开距附近实现电流过零^[13-14]。图 5 中的主要器件参数值可见表 2。

表 2 分断测试电路部件参数

Table 2 Component parameters of breaking test circuit

capacitor of main discharge circuit C_0/mF	inductor of main discharge circuit $L_0/\mu\text{H}$	capacitor of artificial zero crossing circuit C_1/mF	inductor of artificial zero crossing circuit $L_1/\mu\text{H}$	buffer capacitor C_2/mF	energy dissipation resistor R_d/Ω
86.4	265	8.8	66	1	0.125

3.2 分断测试与分析

试验中采用高压探头、罗氏线圈等测量电压电流信号, 并通过 Perception 数据采集系统处理分断电流实验中的各项数据。首先针对试验电路进行整定试验, 保持真空开关合闸状态, 分别调节主回路电容 C_0 和人工过零电路电容 C_1 预充电电压完成放电, 记录放电电流大小。经测试, 主回路电容 C_0 预置电压 6.0 kV, 通过续流电感, 能够为真空开关支路提供 100 kA 电流分断条件; 对应下的人工过零电路电容 C_1 预置电压 10.7 kV, 则能够提供峰值达到 110 kA 的脉冲电流峰值, 帮助真空开关实现可靠过零。因此, 控制试验电路 C_0 和 C_1 的充电电压分别为 6.0 kV 和 10.7 kV, 可进行真空开关 100 kA 直流分断试验。图 6 为试验现场监控视频截图。

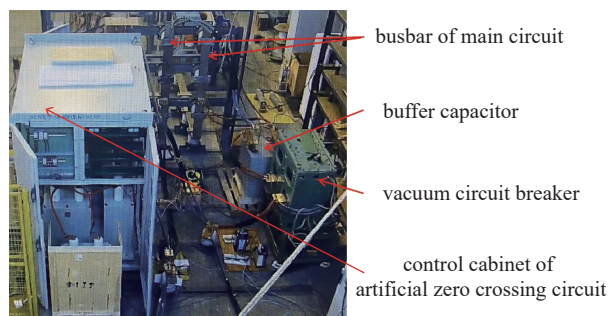


Fig. 6 Current breaking test site of vacuum circuit breaker

图 6 真空断路器电流分断试验现场

图 7 为真空断路器配合人工过零电路成功分断 100 kA 电流波形结果, 其中 I_m 为主回路总电流, I_v 为真空断路器电流, I_c 为人工过零支路电容电流, I_r 为耗能电阻电流。该次分断试验中, 真空断路器流通电流 103.1 kA 时刻, 人工过零电路晶闸管导通开始放电, 在其反向冲击电流作用下, 真空断路器经过 1.03 ms 电流下降过零, 人工过零电路经过 1.24 ms 达到半波峰值 114 kA。

4 结论

本文介绍了应用于聚变堆主机关键系统综合研究设施中超导磁体的失超保护系统, 对其电路拓扑和电流转移进行了进行了简要的说明。针对 CRAFT 失超保护系统中的重要器件真空断路器进行了设计, 并研制了串联双断口结构 100 kA 真空断路器样机, 通过对 100 kA 下人工过零电路的参数确定, 搭建了分断测试试验平台, 成功实现了真空断路器样机在 100 kA 直流等级下的分断试验。

该真空断路器能够满足 CRAFT 失超保护系统的基本技术要求。后续将研究双断口结构下缓冲电路的结构与参数设置, 并通过不同电路参数配合下的大量分断测试结果, 确定电路参数选值以优化分断特性, 防止真空断路器在大电流分断过程中可能出现的电弧重燃击穿现象。

参考文献:

- [1] Huang Ronglin, Fu Peng, Zhu Yinfeng, et al. Design and analysis of a high power supply for the research system of superconducting magnets[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2019, 147: 111248.
- [2] Mitchell N, Devred A, Libeyre P, et al. The ITER magnets: design and construction status[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, 22: 4200809.
- [3] Gavrilin A V, Eyssa Y M. Modeling of electromagnetic and thermal diffusion in a large pure aluminum stabilized superconductor under quench[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2001, 11(1): 2599-2602.
- [4] Fu Peng, Song Zhiqian, Gao Ge, et al. Quench protection of the poloidal field superconducting coil system for the EAST tokamak[J]. *Nuclear Fusion*, 2006, 46(3): S85-S89.
- [5] 江加福, 刘小宁, 许留伟, 等. 基于 EAST 超导纵场线圈的换流分析[J]. *高压技术*, 2009, 35(1): 186-191. (Jiang Jiafu, Liu Xiaoning, Xu Liuwei, et al. Analysis of discharge based on toroidal field coils of EAST[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(1): 186-191)
- [6] Song I, Roshal A, Tanchuk V, et al. The fast discharge system of ITER superconducting magnets[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011: 1-6.
- [7] 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(s1): 233-239. (Li Hua, Song Zhiqian, Wang Shusheng, et al. Study on DC protection switch for superconducting coils in magnetic confinement fusion device[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(s1): 233-239)
- [8] 宋执权, 傅鹏, 汤伦军, 等. EAST 极向场电源失超保护系统的设计及模拟实验[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2007, 27(1): 28-33. (Song Zhiqian, Fu Peng, Tang Lunjun, et al. Design of the quench protection system of the EAST PFPS and its simulation[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2007, 27(1): 28-33)
- [9] Hu Xingguang, Li Hua, Song Zhiqian, et al. Concept design of 100 kA hybrid DC breaker on China fusion engineering test reactor[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 158: 111740.
- [10] 朱军, 李波, 阮江军, 等. 基于人工过零技术的直流真空分断过程分析及验证[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(1): 63-72. (Zhu Jun, Li Bo, Ruan Jiangjun, et al. Analysis and test for the DC vacuum interruption process based on the artificial current zero technology[J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(1): 63-72)
- [11] 李博, 彭振东, 沙新乐, 等. 直流真空断路器强迫换流分断的可靠性[J]. *高压技术*, 2019, 45(8): 2486-2494. (Li Bo, Peng Zhendong, Sha Xinle, et al. Reliability of forced commutation breaking by DC vacuum circuit breaker[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(8): 2486-2494)
- [12] Zhang Yingkui, Shi Zongqian, Wang Qiaosen, et al. Experimental investigation on HVDC vacuum circuit breaker based on artificial current zero[C]//Proceedings of the 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2016: 1-4.
- [13] 苑舜, 王毅, 王季梅. 真空断路器触头分离时刻对开断性能影响的试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 1993, 13(5): 10-13. (Yuan Shun, Wang Yi, Wang Jimei. Effects of separating moment of electrodes on interruption ability in vacuum circuit breaker[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1993, 13(5): 10-13)
- [14] 王建华, 耿英三, 刘志远. 输电等级单断口真空断路器理论及其技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017. (Wang Jianhua, Geng Yingsan, Liu Zhiyuan. The theory and technology on electrical transmission voltage level single break vacuum interrupter[M]. Beijing: China Machine Press, 2017)

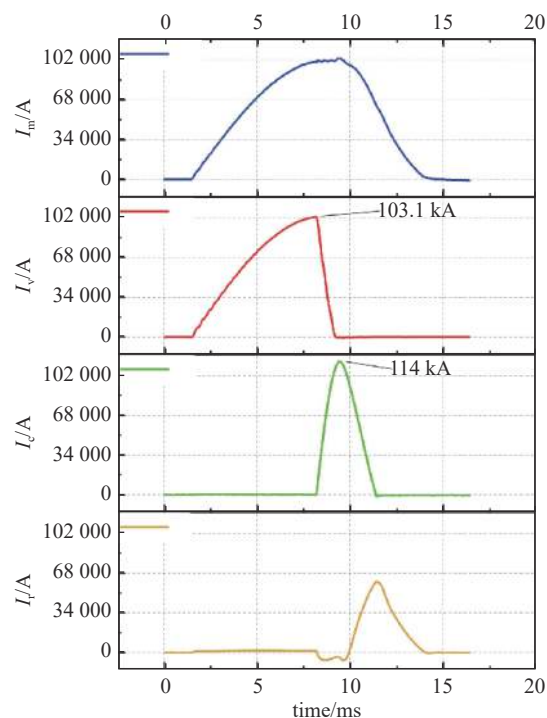


Fig. 7 Waveform of vacuum circuit breaker breaking 100 kA current

图 7 真空断路器分断 100 kA 电流波形