

新型 126 kV 高压真空断路器的设计及 开断能力试验研究

文化宾¹, 宋永端¹, 邹积岩², 郑占锋²

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京市 西城区 100044;

2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁省 大连市 116024)

Test on Novel Design and Breaking Capacity for 126 kV High Voltage Vacuum Circuit Breaker

WEN Huabin¹, SONG Yongduan¹, ZOU Jiyan², ZHENG Zhanfeng²

(1.School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Xicheng District, Beijing 100044, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: A novel design method for 126 kV high voltage vacuum breakers was presented based on the application of vacuum switch technology in 126 kV voltage class. The fundamental idea behind the proposed approach is to use double-breaks with novel distribution, so as to achieve voltage-sharing distribution in each break; thus the voltage-sharing capacitance is no longer needed in contrast with the traditional method. As a result, potential problems can be avoided. The breaker's moving system was designed with the novel structure, and optimized with the Virtual Prototyping technology of ADAMS. The synthetic test system was built up to test the breaking capacity of the breaker. A series of experiments verify that the breaker has the breaking capacity of 31.5 kA short-circuit current, demonstrating that the proposed scheme for designing the 126 kV high voltage vacuum breaker is not only feasible but also novel and effective.

KEY WORDS: 126 kV high voltage vacuum breaker; double-breaks; voltage-sharing; ADAMS; breaking capacity; synthetic test

摘要: 针对真空开关技术在 126 kV 高电压等级应用的问题, 提出了一种新型的 126 kV 高压真空断路器的设计方法。基本思想是采用双断口模式, 设计了断路器的断口布置, 使断口电压均匀分布, 从而无需加装均压电容, 避免传统方法中因均压电容的增加带来的隐患; 根据断口布置, 确定断路器

的运动系统, 利用虚拟样机软件 ADAMS 确定了优化结果; 针对该新型断路器的开断能力测试, 搭建了合成试验回路, 经过一系列的试验, 证实了新型的 126 kV 高压真空断路器具有 31.5 kA 短路电流开断能力, 表明该 126 kV 高压真空断路器的设计不仅可行, 而且新颖有效。

关键词: 126 kV 高压真空断路器; 双断口; 均压; 虚拟样机软件 ADAMS; 开断能力; 合成回路

0 引言

在 40.5 kV 及以下电压等级的开关设备中, 真空断路器由于具有不可比拟的优势被广泛的使用^[1-2], 但在 40.5 kV 电压等级以上的开关设备被 SF₆ 断路器主宰。早在 1997 年的日本京都会议上, SF₆ 气体被正式定为温室效应气体, 它的影响超过 CO₂ 的影响 25 000 倍^[3]。随着全球气温变暖及各国对环保重视程度日益提高, 真空断路器向高电压等级发展成为重要研究课题。

在 126 kV 高压真空断路器的研究中, 文献[4]介绍了中国开发 126 kV 高压真空断路器的必要性及其初步研究; 文献[5]介绍了采用多个光控断口模块串联搭积木式开发高电压等级真空断路器; 文献[6]介绍了 126 kV 单断口真空断路器的开发; 文献[7]介绍了高压真空灭弧室的电场设计新方法, 但是, 目前还没有完全国产 126 kV 高压真空断路器通过全工况短路电流开断试验的报道。

因此, 针对真空开关技术在 126 kV 电压等级应

基金项目: 国家自然科学基金项目(50537010)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50537010).

用的问题,本文提出了一种新型的 126kV 高压真空断路器的设计:采用 2 个 72.5 kV 的真空灭弧室串联构成的双断口结构,分析双断口的真空断路器的理论优势,并巧妙设计断口布置,使断口电压比较均匀分布,根据断口的布置设计了断路器的运动系统,利用研制出的样机,通过合成回路试验,验证了新型 126 kV 高压真空断路器的短路电流开断能力测试。

1 新型 126 kV 高压真空断路器的设计

1.1 新型 126 kV 高压真空断路器的结构设计

1.1.1 双断口真空断路器的理论优势

1) 真空间隙的耐压能力饱和效应。

真空间隙的击穿电压随间隙增大而增大,但并不呈线性关系,文献[8]通过众多研究成果分析指出,板一板电极的直流击穿电压 U 与真空间隙 d 有如下近似关系:

$$U = f(d) \propto \begin{cases} d, & 0 \text{ mm} < d \leq 0.4 \text{ mm} \\ d^{0.58}, & 0.4 \text{ mm} < d \leq 40 \text{ mm} \\ d^{0.34}, & 40 \text{ mm} < d \leq 100 \text{ mm} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)表明,真空间隙的击穿电压随着真空间隙的增加而呈耐压饱和性。文献[9]中提出 126 kV 真空断路器的触头开距为 60mm 左右,如果采用 2 个 30mm 的串联断口构成 126kV 真空断路器会有更高的绝缘特性。另外,双断口真空断路器具有击穿电压增益性。文献[5]推导了 n 个真空断口的击穿电压增益倍数 K_n 为

$$K_n = n^{(1-\alpha)} \quad (2)$$

式中 α 为非常重要因子,取值在 0.4~0.7 之间,若 $\alpha=0.5$,对于双断口真空断路器来说,击穿电压增益倍数为 1.414。

2) 真空断口的动态绝缘特性。

真空开关的动态绝缘特性实质上是指真空开关的开断能力。文献[10]通过分析研究,指出双断口真空开关比单断口真空开关具有更高的开断能力。文献[11-12]的研究表明双断口真空开关比单断口真空开关的开断能力高出 1 倍以上。

3) 真空断口动触头机械特性。

设断口总开距为 H ,断口数量为 n ,运动时间为 t ,动触头的质量为 m ,则其所需动能 W_n 为

$$W_n = n \times \frac{1}{2} m \left(\frac{H}{nt} \right)^2 = \frac{m}{2n} \left(\frac{H}{t} \right)^2 \quad (3)$$

那么,对于相同开距和运动时间下,单断口动触头的动能需求是双断口的 2 倍。

1.1.2 基于断口电压分布均匀化的 126 kV 高压真空断路器的结构设计

目前,常用的双断口真空断路器的断口布置如图 1 所示。文献[5]分析了双断口真空断路器的断口电压不均匀分布情况,断口电压的不均匀分布势必会降低整个断路器的击穿电压,也降低整个断路器的开断能力,为此需要在每个真空断口上并联一个均压电容,而均压电容的增加又会带来绝缘隐患、铁磁谐振等问题[13]。

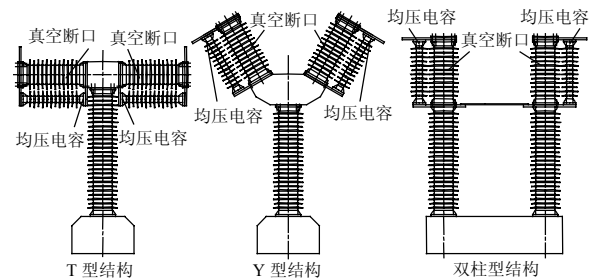


图 1 传统双断口高压真空断路器结构图

Fig. 1 Structure of the traditional high voltage circuit breaker with double-breaker

双断口高压真空断路器的断口电压分布不均匀的实质是由于 2 个真空断口之间对地存在较大的分布电容,因此,减小 2 个真空断口之间的对地电容分布有利于断口均压。基于此理论设计新型的 126kV 高压真空断路器的断口布置如图 2 所示。2 个真空断口距离较短,并且断口对地距离较大,从而减小断口之间的对地分布电容。文献[14]对图 2 所示结构进行断口电压的分布测试,测试结果表明该结构具有较高的断口均压性,从而避免了并联均压电容而带来的隐患。

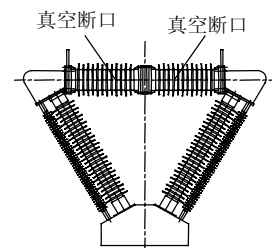


图 2 新型 126 kV 高压真空断路器结构

Fig. 2 Structure of the novel 126 kV high voltage vacuum circuit breaker

1.2 新型 126 kV 高压真空断路器的运动系统设计

1.2.1 运动系统的设计分析

运动系统是高压断路器的重要部分，操动机构是运动系统的动力部件，新型 126kV 高压真空断路器的操动机构采用双稳态永磁机构，归因于其具有高运动精度、高可靠性等优点^[15-17]，为了便于分析，可以对其单个断口的运动系统进行分析。

1) 真空灭弧室的触头压力较大，对于 126 kV 断路器的传动系统，由于绝缘拉杆较长，合闸时如果采用绝缘拉杆受压方式传递动力，容易出现挠度不稳定性。因此，采用绝缘拉杆受拉方式传递动力。

2) 提高分闸速度对电弧的开断是非常有利的，但是永磁机构的力输出特性是随着其动铁芯与静铁芯的气隙减少而逐渐增大，这对于提高断路器的刚分速度很不利，为了提高刚分速度，要在其运动系统中增加分闸弹簧。

3) 分闸弹簧的增加，势必增加永磁机构的保持力和输出功。利用机械运动系统“死点”原理，使真空灭弧室的触头压力的反作用涉及不到永磁机构，这样永磁机构的合闸保持力只需满足分闸弹簧力，从而优化了永磁机构的设计。

基于以上分析，确定断口运动系统如图 3 所示。

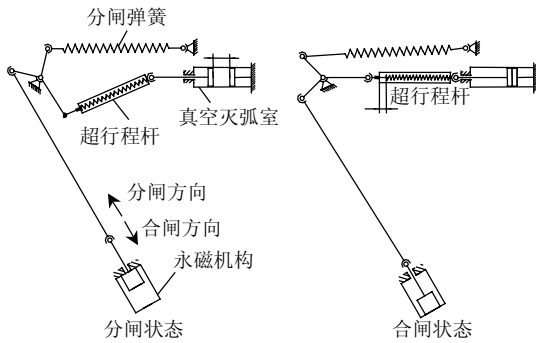


图 3 新型 126 kV 高压真空断路器运动系统原理图
Fig. 3 Mechanical principle of the novel 126 kV high voltage vacuum circuit breaker

1.2.2 基于虚拟样机技术 ADMAS 的运动系统优化设计

新型 126 kV 高压双断口真空断路器的运动系统优化设计主要是动力系统的优化设计，优化目标是断路器的分、合闸速度达到真空灭弧室规定的分、合速度，从而确定优化变量为动力系统中的分闸弹簧拉力及永磁机构的输出力。对于分闸弹簧力 F_t 有：

$$F_t = F_0 + ks_t \quad (4)$$

式中： F_0 为分闸簧的初拉力； k 为弹簧的弹性系数；

s_t 为弹簧的拉伸长度。

对于永磁机构力 F_c ，由于其力过程极为复杂，为了便于对运动系统分析，将 F_c 简化为恒力。

因此，动力系统的优化变量确定为 F_c 、 F_0 、 k 。虚拟样机技术是基于计算机技术的一个新概念技术，通过计算机仿真分析来代替物理样机的分析，在机械动力学领域里，常用的虚拟样机技术是 ADAMS 机械系统动力学仿真分析软件。文献[18]详细介绍了使用方法；文献[19]利用 ADAMS 虚拟样机技术实现了低压断路器操动机构的动态仿真和优化设计。因此，对于新型 126kV 高压双断口真空断路器的动力系统优化设计采用了 ADAMS 仿真软件，图 4 为断路器运动系统在 ADAMS 下建立的运动模型，通过输入不同变量 F_c 、 F_0 、 k 值可得到不同的运动参数，从而确定变量值。



图 4 新型 126 kV 高压真空断路器运动系统机械动态分析
Fig. 4 Mechanical dynamics analysis of the novel 126 kV high voltage vacuum circuit breaker

2 新型 126 kV 高压真空断路器开断能力的试验研究

2.1 合成回路试验的总体构成

根据 GB/T 4473—2008^[20]的要求，合成回路试验的原理图如图 5 所示。

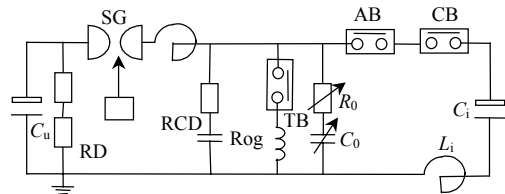


图 5 合成回路试验接线图
Fig. 5 Connecting diagram of the synthetic test

图 5 中左侧为电压源回路，右侧为电流源回路。 C_u 和 L_u 分别为电容和电感，它们与调频电阻 R_0 、调频电容 C_0 一起振荡产生恢复电压； C_i 和 L_i 用于提供 50 Hz 工频短路电流；RD 是电阻分压器，用

于 C_u 充电时充电电压的测量；RCD 是阻容分压器，用于测量恢复电压；Rog 是一个罗氏线圈，为控制台提供短路电流测量信号；SG 为放电球隙，TR 为点火电极，用于将电压源投入合成回路；CB 为合闸断路器，用于将电流源投入合成回路；AB 为辅助断路器，它与试品断路器 TB 同时开断，在电流源产生电流的零点灭弧，将电流源回路和电压源回路隔离。

结合 GB 1984—2003^[21]中规定的单元试验法和合成回路接线原理，将 126 kV 高压真空断路器的一个断口作为 TB，另一断口作为 AB。

2.2 开断能力的参数设定

2.2.1 电流源回路参数设定

电流源电路工作时，相当于电容 C_i 对 L_i 及回路电阻放电，电流源放电电流 i_1 与充电电压 U_{1m} 的变化规律为

$$i_1 = I_m \sin \omega_1 t = \frac{U_{1m}}{\omega_1 L_i} \sin \omega_1 t \quad (5)$$

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 1/\sqrt{L_i C_i} \quad (6)$$

$$I_m = U_{1m} / (\omega_1 L_i) = U_{1m} \sqrt{C_i / L_i} \quad (7)$$

式中 f_1 为电流源的振荡频率，取工频 50 Hz。

由式(7)可推得每支路输出电流与充电电压 U_{1m} 的计算关系为，

$$U_{1m} = \sqrt{2} s \omega_1 L_i I_1 \quad (8)$$

式中 s 是电流衰减比，这里取 1.1； I_1 为放电电流第一半波的有效值。

设 C_i 为 60 000 μ F，由式(6)可以计算出 L_i 为 0.169 mH。由式(8)可求得电流源充电电压 U_{1m} 和放电电流 I_1 的参数设定。

2.2.2 电压源回路参数设定

电压源回路放电过程与电流源回路基本一致，都是 LC 振荡回路零输入放电过程，可得：

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_u C_u}} \quad (9)$$

$$I_{2m} = \sqrt{C_u / L_u} U_0 \quad (10)$$

式中： f_2 为电压源放电电流频率； U_0 为电压源回路放电电容的充电电压值； I_{2m} 为引入电流的峰值。

为了保证合成回路试验的等价性，电流源与电压源的电流间的关系应满足下式：

$$\frac{I_{1m}}{I_{2m}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{f_2}{f_1} \quad (11)$$

引入电流的频率 f_2 应足够高，以防止在燃弧阶段因引入电流和工频电流叠加而引起过度的电流畸变，而且 f_2 还应低于瞬态恢复电压的基频，使回路易于调整，因此， f_2 通常为 250~1 000 Hz。由于该电压源回路只能产生单频振荡，决定依照两参数法来预设瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)。由 GB 1984—2003 可得 126 kV 断路器开断型式试验的预期瞬态恢复电压值 U_c ，则试验断口预期瞬态恢复电压峰值 U_m 的计算如下：

$$U_m = \frac{K_u}{n} U_c \quad (12)$$

式中： n 为总断口数 2； K_u 为综合系数，取 1.1。

对调频电容 C_0 和调幅电阻 R_0 进行分析。当试品开关 TB 开断后，电路的结构如图 6 所示。

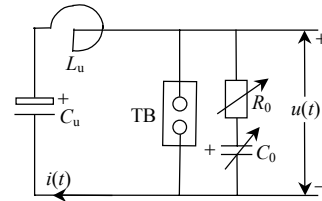


图 6 TB 开断后，电压源回路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of the voltage source circuit after the TB broke

在 TB 断开瞬间，电容 C_u 上充有反向电压最大值。根据电路定律，可得：

$$\frac{d^2 u_{C_u}}{dt^2} + \frac{R_0}{L_u} \frac{du_{C_u}}{dt} + \frac{1}{L_u C} u_{C_u} = \frac{C_u}{L_u C_0} U_0 \quad (13)$$

因两参数法预设的 TRV 曲线是单频的衰减欠阻尼振荡，可得试品断路器 TB 两端电压为

$$u = -\frac{C_u}{C_0 + C_u} U_0 [1 - e^{-\delta t} \cos(\omega_d t)] + \left(\frac{C_u \delta}{C_0 \omega_d} - \frac{R_0 C_u \omega_0^2}{\omega_d}\right) U_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_d t) \quad (14)$$

式中： $\delta = R_0 / 2L_u$ ，为衰减系数； $\omega_0 = 1/\sqrt{L_u C_u}$ ，为角频率； $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ，为衰减震荡角频率。

由两参数包络线定义可知，当 $t = 1/(2f_0)$ 时， u 取 TRV 的峰值 U_m 。可得，

$$U_m = -\frac{C_u}{C_0 + C_u} U_0 [1 + e^{-\delta/(2f_0)}] \quad (15)$$

通过以上公式, 可得电压源回路的试验参数。

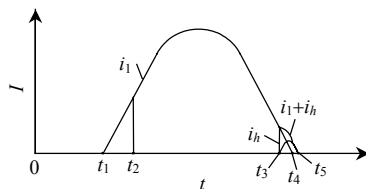
2.2.3 控制系统触发控制时序设定

根据合成回路试验原理, 需要确定控制系统的触发控制时序, 图7为合成试验各开关投入的时刻图。引入电流开始流过TB的时刻, 应当保证TB单独处于电压源回路中的时间大于电弧电压的显著变化阶段, 小于引入电流的四分之一周期, 一般不大于 $500\mu\text{s}$, 由此可得:

$$t_5 - t_3 = \frac{1}{2f_2} \quad (16)$$

$$t_4 - t_3 > t_5 - t_4 \quad (17)$$

$$200 < t_5 - t_4 < 500 \quad (18)$$



t_1 —CB 刚合时刻; t_2 —TB 和 AB 触头刚分时刻; t_3 —引入电流开始流通时刻; t_4 —TB 开断电流的时刻; t_5 —AB 电流的过零时刻。

图7 合成试验各断路器投入时刻图

Fig. 7 Acting instants of the circuit breakers in the synthetic test

3 开断能力试验研究

根据上文的参数设置, 进行126kV高压真空断路器的开断能力测试, 试验现场如图8所示。

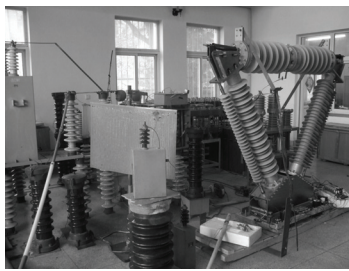


图8 126 kV 高压真空断路器合成试验现场

Fig. 8 Testing field of the 126 kV high voltage vacuum circuit breaker

开断能力的试验一方面验证断路器的开断能力, 另一方面验证断路器的运动参数对开断能力的影响。试验前对断路器的运动参数进行调整, 并测出运动时间以便确定控制系统的触发时序。断路器的运动参数可通过提高永磁机构的操作电源电压和分闸弹簧的初拉力进行调整, 这些参数的调整存在最大值, 通过测试, 分闸速度的最大值为 3.5 m/s 。

首先在最大值的情况下进行开断能力的试验, 需要指出的是, 过高的分闸速度会产生更大的冲击力, 容易降低断路器的寿命。

在分闸速度为 3.5 m/s 时进行测试, 将电压源电容充电到设定电压值, 将电流源充电电压分别按短路电流为12.5、16、20、25、31.5kA时对应的电压值进行充电, 依次进行合成试验, 结果都获得成功开断, 开断的典型波形如图9所示。恢复电压波形在图中上侧, 电流波形在图中下侧, 从图中可以看出, 当恢复电压震荡到负值时, 并无电流产生, 说明真空断口绝缘恢复, 电流成功开断。

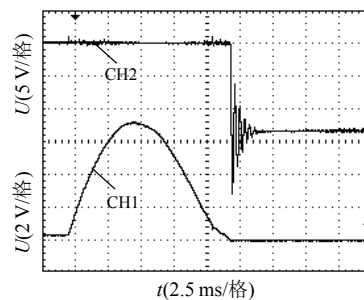


图9 成功开断波形图

Fig. 9 Oscillogram of the successful test

通过减小分闸弹簧的初拉力和机构操作电压, 降低断路器的分闸速度进行开断能力验证。当在31.5kA的电流下进行合成试验, 分闸速度为 2.6 m/s 时, 出现不能开断的情况, 其波形图如图10所示, 断口恢复电压与电流同向, 说明开断失败。

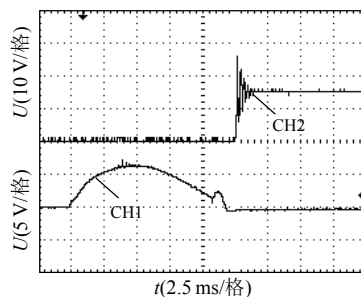


图10 失败开断波形图

Fig. 10 Oscillogram of the unsuccessful test

当降低开断电流时, 断路器仍能开断, 通过反复试验, 当断路器分闸速度低于 2.0 m/s 时, 12.5 kA 的电流也无法开断。说明过低的分闸速度, 使断路器断口的绝缘恢复速度小于断口恢复电压的速度, 从而引起重击穿和复燃。

通过以上试验, 表明这种新型的126kV真空断路器的开断能力能够达到 31.5 kA , 并且分闸速度在

3.0 m/s 左右, 过高的分闸速度不利于断路器的寿命, 过低的分闸速度无法开断短路电流。

4 结论

1) 本文通过理论分析提出一种新型的 126 kV 高压真空断路器的设计, 即采用双断口模式。基于断口均压的方法确定 126 kV 高压真空断路器结构和运动系统。通过合成回路的搭建完成 126kV 高压真空断路器的断路开断能力测试, 进一步验证 126kV 高压真空断路器的设计是可行的。

2) 126 kV 高压真空断路器的分闸速度对其开断电流能力有直接影响, 当分闸速度低于 2.0 m/s 时, 不能开断 12.5 kA 及以上的短路电流; 在开断 31.5kA 短路电流的合理分闸速度为 3.0m/s。

参考文献

- [1] Liu Z Y, Wang J M, Wang Z, et al. Analysis of axial magnetic field of an iron stator bipolar axial magnetic field vacuum interrupter[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 29(5): 749-753.
- [2] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩. 单断口和三断口串联真空灭弧室绝缘击穿统计特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 97-102.
Liao Minfu, Duan Xiongying, Zou Jiyan. Dielectric strength and statistical property of single and triple breaks vacuum interrupters in series[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 97-102(in Chinese).
- [3] Okubo H, Yanabu S. Feasibility study on application of high voltage and high power vacuum circuit breaker [C]//The 20th International Symposium on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum. Paris, France: IEEE, 2002: 275-278.
- [4] 刘东晖, 王季梅, 王中奕, 等. 我国开发 126 kV 真空断路器的必要性及其初步研究[J]. 高压电器, 2003, 39(2): 26-28.
Liu Donghui, Wang Jimei, Wang Zhongyi, et al. Preliminary study on the development of 126 kV vacuum circuit breaker in China[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(2): 26-28(in Chinese).
- [5] 廖敏夫. 基于光控模块的多断口真空开关研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
Liao Minfu. Study on vacuum circuit breaker with multiple breaks based on fiber-controlled vacuum interrupter modules[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004(in Chinese).
- [6] 王季梅, 刘志远, 修士新, 等. 126 kV 真空断路器的改进与提高[J]. 华通技术, 2006(3): 21-23.
Wang Jimei, Liu Zhiyuan, Xiu Shixin, et al. Improvement and enhancement of 126 kV vacuum circuit breaker [J]. Hua Tong Technology, 2006(3): 21-23(in Chinese).
- [7] 赵智忠, 邹积岩, 文化宾, 等. 高压真空灭弧室的电场设计的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 109-112.
Zhao Zhizhong, Zou Jiyan, Wen Huabin, et al. A new method of electric field optimization of high voltage vacuum interrupters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 109-112(in Chinese).
- [8] Slade P G. The vacuum interrupter theory, design and application[M]. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008: 10-20.
- [9] 刘志远. 高电压真空灭弧室触头间长间隙的真空绝缘特性[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 66-69.
Liu Zhiyuan. Vacuum insulation characteristics with long contact gaps between high voltage vacuum interrupter contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 66-69(in Chinese).
- [10] 廖敏夫, 段雄英, 邹积岩, 等. 多断口真空开关的动态介质恢复及统计特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 82-87.
Liao Minfu, Duan Xiongying, Zou Jiyan, et al. Analysis of dynamic dielectric recovery and statistical properties for vacuum circuit-breakers with multi-breaks [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 82-87(in Chinese).
- [11] Fugel T, Koening T D. Switching performance of two 24 kV vacuum interrupters in series[C]//IEEE XXth.symp. on discharge and Electrical Insulation in Vacuum. Paris, France: IEEE, 2002: 164-168.
- [12] 廖敏夫, 邹积岩, 段雄英. 双断口真空断路器开断能力的探讨[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 34-36.
Liao Minfu, Zou Jiyan, Duan Xiongying. Discussion on breaking capacity PF vacuum circuit breaker with double breaks[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 34-36(in Chinese).
- [13] 沈毅, 陈水明, 陈刚, 等. 由于断路器并口电容引起的铁磁谐振[J]. 华北电力技术, 2006(3): 7-10.
Shen Yi, Chen Shuiming, Chen Gang, et al. Study on ferroresonance caused by breaker parallel capacitance [J]. North China Electric Power, 2006(3): 7-10(in Chinese).
- [14] 文化宾. 基于虚拟样机技术的新型高压真空开关研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
Wen Huabin. Research on novel high voltage vacuum switches based on virtual prototyping technology

- [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009(in Chinese).
- [13] 邹积岩, 王瑛, 董恩源. 电子操动的概念与实践[J]. 高压电器, 2000(5): 29-31.
Zou Jiyan, Wang Ying, Dong Enyuan. The concept and practice on the electronic-actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2000(5): 29-31(in Chinese).
- [14] 付万安, 宋宝韞. 高压断路器永磁机构的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 21-26.
Fu Wanan, Song Baowen. Research on ACTUTOR of HV switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 21-26(in Chinese).
- [15] 马少华, 王季梅. 72.5kV 高压真空断路器永磁机构的研究与设计[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
Ma Shaohua, Wang Jimei. Research and design of permanent magnetic ACTUTOR for 72.5kV HV vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 109-114(in Chinese).
- [16] 范成健, 熊光明, 周明飞. 虚拟样机软件 MSC. ADAMS 应用与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 2-3.
Fan Chengjian, Xiong Guangming, Zhou Mingfei. The application and improve of virtual prototype software MSC. ADAMS[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 2-3(in Chinese).
- [17] 张敬菽, 陈德桂, 刘洪武. 低压断路器操作机构的动态仿真与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 102-107.
Zhang Jingshu, Chen Degui, Liu Hongwu. Dynamic simulation and optimum design of low-voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 102-107(in Chinese).
- [18] 全国高压开关设备标准化技术委员会. GB 4473—2008 高压交流断路器的合成试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
National Technical Committee on High-voltage Switch Gear of Standardization Administration of China. GB 4473—2008 Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers[S]. Beijing: Chinese Standardization Press, 2008(in Chinese).
- [19] 全国高压开关设备标准化技术委员会. GB 1984—2003 交流高压断路器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National Technical Committee on High-voltage Switch Gear of Standardization Administration of China. GB 1984—2003 High-voltage alternating-current circuit-breakers[S]. Beijing: Chinese Standardization Press, 2003(in Chinese).



文化宾

收稿日期: 2011-05-20。

作者简介:

文化宾(1975), 男, 博士后, 主要研究方向为高电压技术、开关设备及其智能化, hbwen@bjtu.edu.cn;

宋永端(1962), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、容错控制、自适应协调控制、飞行器导航与控制、可再生能源系统、群体无人机系统、仿生智能控制系统, 可靠安全协调控制系统及其应用, ydsong@bjtu.edu.cn;

邹积岩(1954), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为真空电弧、智能化电器、开关状态在线检测和 FACTS 方面等, jyzou@dlut.edu.cn;

郑占锋(1980), 男, 博士研究生, 主要研究方向为真空电弧、智能化电器, zzfdut@gmail.com。

(编辑 胡琳琳)