

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.02.010

多断口真空快速隔离开关试验研究

刘 彬, 石亲民, 吕 玮, 杨 兵, 石 巍

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211100)

摘要: 快速隔离开关是混合式直流断路器的关键部件之一,其分合闸时间在数毫秒以内的,常规断路器难以提供如此快速的操作速度。文中在借鉴已有真空开关研制经验的基础上,从分析直流快速隔离开关的需求入手,重点对真空小间隙应用在直流隔离、无弧分断场合的情况进行有针对性的系列试验,同时借助试验和理论分析,解决了多断口均压问题,使中压真空开关得以扩展到高压直流隔离开关应用领域。研制出一台分闸速度小于3 ms的200 kV直流快速隔离开关,且该方案具有易于向高压扩充的优势,能满足混合式直流断路器的应用需求。

关键词: 超高速开关;真空灭弧室;多断口;均压;混合式直流断路器

Experimental Study on Vacuum Fast Disconnectors with Multi Breaks

LIU Bin, SHI Qinmin, LYU Wei, YANG Bing, SHI Wei

(Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: The fast disconnectors is one of the key components of hybrid DC circuit breaker. It is difficult for conventional breakers to provide such a fast operating speed when the switching time is within a few milliseconds. In this paper, based on the study of the vacuum switch, focusing on the application of small vacuum gap in DC isolation, arc less breaking situation, a series of experiments are designed. After solving the problems of synchronous as well as voltage distribution in every break, a 200 kV DC fast disconnectors with less than 3 ms switching time is developed, and the scheme has the advantage of easy to expand to high voltage, and can meet the application demand of the hybrid DC circuit breaker.

Key words: ultra high speed switch; vacuum interrupter; multi breaks; voltage grading; hybrid DC breaker

0 引言

当今,高压直流输电被广泛应用于远距离范围内传输能量,如通过架空线、海底电缆等方式实现,到目前为止,几乎所有的直流输电连接都是点对点的方式。但在高压直流输电技术领域,对于节点互联能力的追求以及最终形成大面积直流输电网络的渴望却从来没有停止。这其中,没有合适的高压直流断路器一直是制约相关技术进步和行业发展的主要障碍之一^[1]。

高压直流输电系统的一个显著特点是网络阻抗低,这直接导致故障电流会快速上升,且很快达到较大的峰值,因此,高压直流断路器必须比交流断路器更快地实现分断,甚至快10倍以上。直流断

路器面对的第2个挑战是必须克服故障电流没有过零点的问题。在直流断路器的众多实现方案中,结合了半导体器件快速中断能力和快速隔离开关绝缘能力的混合型断路器受到关注并得到一定发展,国内外主流厂家均作了大量研究工作,如ABB、智研院、南瑞继保等。根据混合型直流断路器的拓扑需要,能承载额定电流、短时故障电流、实现毫秒级分断的高压快速隔离开关成为关键设备之一^[2]。

文中从高压快速隔离开关的需求、真空断路器的特性入手,提出一种高压直流快速隔离开关的解决方案,即基于真空断路器的多断口串联。并进行了大量直流及冲击耐受试验研究,最终研制出一台200 kV高压快速隔离开关,并成功应用于混合型直流断路器,并且,根据这种设计思想,该方案可以方便地向更高电压等级扩展。

1 混合式直流断路器快速隔离开关的需求分析

分析混合式断路器的工作原理,可以梳理出该类型快速隔离开关(简称快速开关)的以下几个特点:

1)速度快—快速开关必须能够实现毫秒级分断,这通常比交流断路器快10倍。

2)无弧分断—快速开关在分断时,电流已经被转移出去,换句话说,快速开关基本不需要考虑灭弧,它只承受分断过程中的冲击过电压以及分断以后的直流电压。

3)电流载荷—快速开关必须承受线路设计的额定电流及短时故障电流,尽管在开始分断时这些电流已经降至零。

通常而言,对于高电压等级的断路器来说,人们首先会想到基于 SF_6 气体的GIS设备,尤其是在交流系统中。即使是在文中所述及的快速开关领域,在解决了快速分断的相关技术难题之后,仍然是一种不错的选择。另一方面,近年来,真空断路器无论在理论研究和工艺制造方面都取得了长足的进步^[3-4],发展更高电压等级的真空开关有两种途径:一是继续发展单断口型真空开关,提高单个断口的耐受能力;二是发展多断口真空开关,所谓多断口真空开关技术,其实质是采用多个小真空间隙串联,使得真空开关整机获得更高的电压耐受能力,从而实现高电压等级应用,文[5-7]在真空多断口领域做了大量研究工作。众所周知,真空短间隙具有优秀的绝缘能力,且真空间隙的击穿电压与间隙长度存在饱和效应,文中的快速开关正是充分利用了这一特性。

快速开关的快速动作需求,决定了其操作机构多采用具有微秒级响应特性的电磁斥力机构原理^[8-10],这种操作机构的显著特点是斥力随距离的增大快速衰减。因此其断口开距不宜设计得过大,同时希望小间隙断口仍然具有优良的绝缘性能,这一特点正契合了多断口真空开关技术的优势。但是,在将该技术方案应用于适合混合式直流断路器的快速开关之前,仍然要解决下列问题:①真空短间隙的直流耐受特性;②多断口的静态直流及冲击电压的均压情况;③在高速运动工况下,多断口的动态均压特性是否出现新的变化;④真空灭弧室必须做适用于电磁斥力机构的轻量化设计改进,以同时满足快速动作及额定通流能力。文中的工作即以解决上述问题为目标展开,进行了相关试验数据积累。

2 真空断口在直流电压下的耐受能力试验研究

根据混合式断路器的工作原理,快速开关分断

后,需要承受来自线路的额定直流电压、直流过电压,该电压将直接由相互串联的真空断口承受。因此,真空小间隙的直流电压耐受能力是研究直流多断口真空开关技术绝缘结构设计的基础。目前来看,真空断路器多用于交流系统中,直流应用场合的试验数据、经验资料较少,为此,笔者设计了系列试验,借以取得真空断口在直流电压耐受能力的基础数据,并为其在直流快速隔离开关领域的应用、改进提供依据。

2.1 单断口真空短间隙直流电压耐受试验

试验时,将一款额定开距为18 mm的真空灭弧室调整到试验开距,然后装入长度匹配的复合套管内并可靠固定,套管内充0.3 MPa的 SF_6 气体,以保证包含灭弧室在内的试验系统外绝缘满足要求,并在试验中考察有无外绝缘防护时的数据差异。每轮试验的时长为1 h,在此期间,如出现下列现象中的任何一项即视为试验未通过:出现放电声、局部放电显著增大、泄漏电流明显增大。某型号真空灭弧室见图1,某型号单断口真空灭弧室直流耐受试验见图2。按照上述程序,经过多轮试验,得到试验数据见表1。单断口真空灭弧室的直流耐受同样存在饱和区域,同时试验结果受外绝缘状态影响较大。

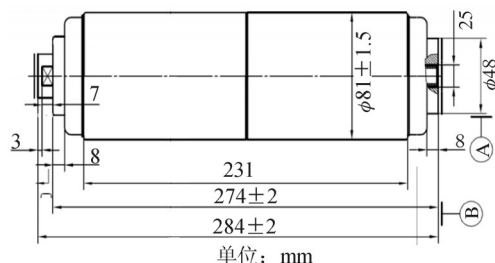


图1 某型号真空灭弧室

Fig. 1 Test vacuum breaker

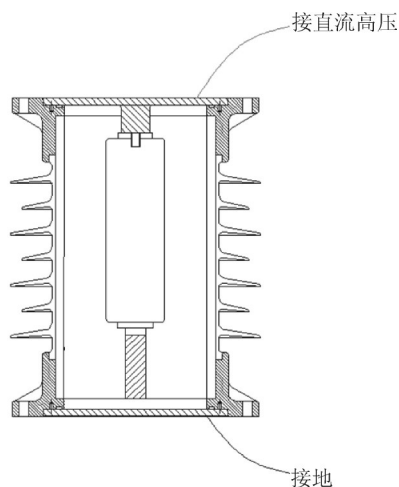


图2 某型号单断口真空灭弧室直流耐受试验

Fig. 2 Single vacuum breaker DC withstand test

表1 单断口直流耐受试验数据—同一灭弧室的不同外绝缘状态

试验状态	1 h最大直流耐受电压值((DC)-无SF ₆ 防护)/kV	1 h最大直流耐受电压值((DC)-有SF ₆ 防护)/kV
14 mm 开距	120 ~ 130	150 ~ 170
16 mm 开距	120 ~ 135	160 ~ 175
18 mm 开距	130 ~ 145	170 ~ 180

试验数据表明,对该额定开距为18 mm的试验用真空灭弧室,其开距在14~18 mm之间的极限试验直流耐受能力差异并不明显,但有无SF₆防护状态下的试验结果差异较为明显,可以判断为真空断口自身的绝缘能力较强,但受灭弧室自身结构的限制,外绝缘是其薄弱环节。为此还设计了如下试验加以验证:用一款总体结构高度更高、陶瓷外壳的总爬电距离更大,而内部构造相近的灭弧室进行对比试验,得到如下试验数据,见表2。

表2 单断口直流耐受试验数据—不同外绝缘结构灭弧室的同一状态

灭弧室类别	试验状态	试验开距/mm	结构高度/mm	1 h最大直流耐受电压值/kV
灭弧室1	SF ₆ 防护	18	250	170 ~ 180
灭弧室2	SF ₆ 防护	18	350	210 ~ 220

在开距相等、外绝缘防护相同的试验条件下,灭弧室2因为结构高度较高,外绝缘条件相对改善,其1 h直流耐受电压提高至200 kV以上,虽然试验结果会受环境条件、灭弧室构造差异的影响,但其基本趋势是一致的:即在一定的开距范围内,真空灭弧室耐受直流电压的能力受灭弧室自身的外绝缘和断口距离共同约束^[11-13],当其应用在高速条件下,对开距敏感的快速开关应用场合,不宜将开距设置的过大。

2.2 双断口真空开关的耐受能力

在取得单断口真空灭弧室的直流耐受试验数据前提下,文中对同种型号的某真空灭弧室进行直接串联,考察其在直流电压作用下的绝缘性能。某型号双断口真空灭弧室直流耐受试验见图3,双断口直流耐受试验数据—不同外绝缘结构灭弧室的同一状态见表3。

试验结果表明,双断口串联的直流耐压性能远低于单个断口极限直流耐受能力的2倍,主要原因

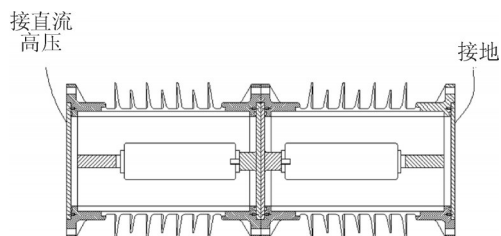


图3 某型号双断口真空灭弧室直流耐受试验

Fig. 3 Double vacuum breakers DC withstand test

表3 双断口直流耐受试验数据—不同外绝缘结构灭弧室的同一状态

灭弧室类别	试验状态	设定开距/mm	结构高度/mm	单断口1 h最大直流耐受电压值/kV	双断口1 h最大直流耐受电压值/kV
灭弧室1	两节串联	18	250	170 ~ 180	270 ~ 280
灭弧室2	两节串联	18	350	210 ~ 220	330 ~ 340

是,在直流电压作用下,当两个灭弧室断口均处于分位时,决定各个灭弧室直流电压大小分配关系的是与断口呈并联状态的等效电阻值。在试验条件下,等效电阻包含灭弧室及外套管的体积电阻、沿面电阻,通常沿面电阻值要小得多;而不同灭弧室之间的沿面电阻值往往差异较大。从试验情况看,两串并联的电压倍数小于1.6。以上是针对2断口真空灭弧室的试验数据,不难推论,对于采用多个断口的情况,各个断口之间电压分布不均匀现象会更明显,必须采取必要的直流均压措施。

实验中的另一个明显的具有统计意义的规律是,相同试验条件下,直流负极性的放电电压略低于同等条件正极性的放电电压,约5%左右。文中试验中的数据是在实验室条件下一定开距真空断口的极限直流电压耐受能力,应用于工程需给予必要的安全系数,并配合详细的设计试验及型式试验来检验确定。同时考虑工程应用的可靠性,设计中应采取措施避免环境因素的影响。

3 真空断口在冲击电压下的耐受能力试验研究

前已述及,根据混合式断路器的工作原理,快速开关在开始分断过程时开关中已经没有电流(通常是转移到限流支路),但是其要承受来自IGBT阀分断过程中的冲击过电压,冲击电压的大小取决于阀的过电压水平,它通常是额定直流电压的1.5~2倍之间。鉴于直流故障电流的上升速度非常之快,隔

离开关越早(通常是2~3 ms以内)建立这种耐受冲击电压的能力,就越有利于缩短混合型直流断路器的整体分断时间,这也是快速开关的难点所在。

在前述某真空灭弧室直流耐受电压的试验基础上,文中进一步设计了相关雷电、操作冲击耐受试验。目标是找出上述真空灭弧室在多断口串联工作条件下的静态、动态绝缘特性,为高压快速开关的设计提供基础数据。

3.1 真空小间隙的动、静态冲击电压绝缘特性的差异

近年来,随着真空灭弧室在中压断路器的广泛应用,国内外对多断口真空开关的静态击穿特性、静态击穿统计特性和静态冲击绝缘击穿机理等方面都进行了大量研究;文[14-15]对单、双断口的击穿特性进行比较研究;文[16-17]对多断口开展了理论方面的研究工作,文[16]还提出了多断口真空开关击穿电压增益的概念。文中所述的直流断路器用快速隔离开关,其一个显著特点是更关注断口开距还处在不断变化中的过程的绝缘能力,即对于一个额定开距18 mm的真空灭弧室,往往不需要其达到额定开距,例如当其动触头运动至12 mm开距时,只要具备系统所要求的冲击电压耐受能力,则认为绝缘能力已经成功建立,可以进行电流分断操作,而此时动触头导杆仍然处于高速运动中,为此文中提出真空断口动态绝缘能力的概念,并设计了相关试验,连续15次操作冲击的平均值见表4。

表4 单断口动、静态操作冲击试验数据表
Table 4 Single break dynamic and static impulse test

参数	数值				
断口距离/mm	10	12	14	16	18
静态操作冲击耐受电压/kV	109	121	135	143	155
动态操作冲击耐受电压/kV	90	110	128	137	145

试验数据表明,真空开关的动触头还处在动态运动过程中时,其操作冲击耐受能力有所下降,这种情况在断口距离较小时尤其明显,例如:10 mm开距下动、静态操作冲击耐受电压的比例为1:1.2,该数据在18 mm断口时仅为1:1.07。这一试验结果在随后的多断口动态试验中也呈现相同的规律。

3.2 多断口真空灭弧室的绝缘特性试验

文中试图通过增加开关断口数量来提高快速隔离开关的耐受电压。为了提高各断口电压分布的均匀性,通过加装均压电容的方式实现,文[18]研究了在双断口真空开关中使用均压电容时对双断口真空开关的开关能量的影响,通过实验证明均压电容的存在能显著提高恢复电压分布的均压程度,

从而提高绝缘耐受能力。关于均压电容的取值,文[19]通过分析指出,在有电弧分断过程中,均压电容并非越大越好,因为在均压电容值很大,当上下灭弧室燃弧时间不同时,均压电容会影响弧后3~5 μs内的暂态电压恢复,导致双断口真空开关发生击穿,以至于降低开断能力。但文中所述快速隔离开关为无弧分断,其可以充分利用提高均压电容值的方法来提高各断口分布电压的均匀性,从而提高有效耐受电压。为此,文中对5断口真空断路器在不同均压电容情况下进行操作冲击试验,试验结果见图4。

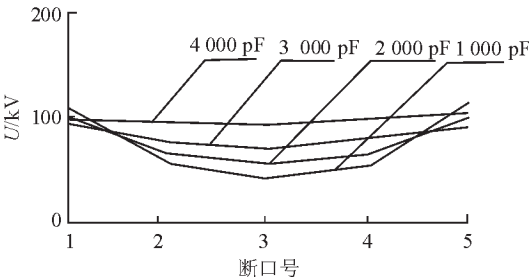


图4 五断口真空灭弧室均压特性
Fig. 4 Five vacuum breakers impulse voltage-sharing characteristics

从图4中可以看出,随着均压电容的增大,各个真空开关所承受的电压趋于一致,虽然个别断口所承受电压值不是最大,但所有断口耐压值之和呈递增趋势,从而有效提高整机的操作冲击耐受水平。开关断口均压电容的取值还受直流断路器整机性能的限制,不宜过大。

4 基于真空灭弧室多断口快速隔离开关的试验及存在的问题

按照前述试验过程数据,基于多断口真空断路器的高压快速隔离开关将由以下方法组建而成:

- 1)选取混合式断路器分闸速度需求的小开距中压真空断路器;
- 2)采用具有μs级触发速度的电磁斥力机构;
- 3)采用带有均压技术的多断口串联结构。

文中设计、制造了一台支柱式4断口200 kV直流快速隔离开关。按照系统要求,其建立能满足200 kV额度直流混合式断路器分断时产生的冲击过电压的整体时间应小于3 ms。为此,文中设计了整机动态冲击电压耐受试验,见图5。

快速开关动态绝缘试验程序如下:首先,冲击发生器高压引线接到第一个断口进线侧,其他断口相互串联连接,最后一断口出线端接地,每个断口均处于合位;然后,冲击发生器和快速开关阀控装

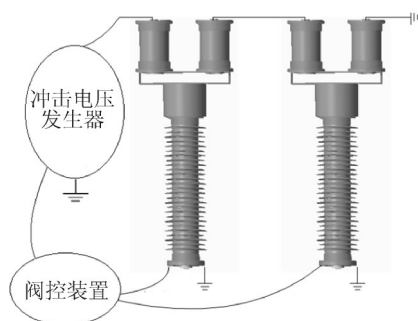


图5 200 kV快速开关动态冲击电压试验

Fig. 5 Dynamic impulse test of 200 kV fast switch

置通过光纤连接至阀控装置,阀控装置首先给快速开关控制装置发分闸命令,3 ms后给冲击发生器触发命令;此时快速开关动导体仍然处于动态运动过程中,在规定3 ms预定时间内,成功耐受系统要求的冲击电压。

文中成功研制了一台基于真空多断口的200 kV快速开关,但在试验过程中仍存在问题待解决,例如:由于断口数目较多,断口本身、操作机构等的故障率相应提高;快速开关整机的维护困难;真空断口在操作冲击电压极性快速变换过程中存在不稳定现象;一旦发生击穿,多断口真空开关的绝缘能力再次恢复所需的时间较长,这与文[20-21]的研究成果有一定关联,具体成因还有待进一步探究。

5 结语

文中从混合式直流断路器对高压直流快速隔离开关的需求分析入手,结合真空小间隙的绝缘优势和特性,通过大量详细的试验摸索出一条基于真空多断口的实现方案,并研制了样机,最终通过试验检验了设计成果,完全满足混合式断路器的系统需求。通过详细设计的大量试验,积累了真空小间隙在无弧情况下绝缘性能的基础数据,尤其是直流及操作冲击耐受特性,同时对真空多断口串联方案的工程应用提出了具体方案。同时文中也提出了试验及研制过程中遇到一些不能完全解释的现象,这些都有赖于真空断路器领域相关理论的深入研究及试验的进一步开展。

参考文献:

[1] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: A review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.

[2] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers - a key innovation for reliable HVDC grids[C]//Integrating Supergrids and Microgrids International Symposium.

Bologna, Italy: [s.n.], 2011: 0264.

- [3] 王季梅. 真空开关理论及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- WANG Jimei. Vacuum switch theory and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.
- [4] 徐国政, 张节荣, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [5] 舒胜文, 阮江军, 黄道春, 等. 三断口真空断路器的动态均压措施[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 43-48.
- SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Dynamic voltage-sharing measures for vacuum circuit breaker with triple breaks[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 43-48.
- [6] 耿英三, 陈榆秀, 孙超, 等. 40.5 kV投切电容器组用双断口真空断路器的研究[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 24-28.
- GENG Yingsan, CHEN Yuxiu, SUN Chao, et al. Research on 40.5 kV two-break vacuum circuit breaker for switching capacitor banks[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 24-28.
- [7] 廖敏夫, 邹积岩, 段雄英, 等. 多断口真空开关技术的发展与研究现状[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 456-459.
- LIAO Minfu, ZOU Jiyan, DUAN Xiongying, et al. Development and current status of vacuum Switch with multiple breaks[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 456-459.
- [8] 王子建, 何俊佳, 尹小根, 等. 基于电磁斥力机构的10 kV快速真空开关[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 68-75.
- WANG Zijian, HE Junjia, YIN Xiaogen, et al. 10 kV high speed vacuum switch with electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 68-75.
- [9] 娄杰, 李庆民, 孙庆森, 等. 快速电磁斥力机构的动态特性仿真与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 23-29.
- LOU Jie, LI Qingmin, SUN Qingsen, et al. Dynamic characteristics simulation and optimal design of the fast electromagnetic repulsion mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 23-29.
- [10] 李庆民, 刘卫东, 钱家骊. 电磁推力机构的一种分析方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 20-24.
- LI Qingmin, LIU Weidong, QIAN Jiali. An analytical method for electromagnetic repulsion mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 20-24.
- [11] 冯亚清, 马志瀛, 刘韬, 等. 真空灭弧室外表面绝缘及其电场计算[J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 18-20.
- FENG Yaqing, MA Zhiying, LIU Tao, et al. Electric field calculation for interrupter's surface of vacuum circuit breaker and its insulation[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(3): 18-20.

- [12] GIERE S, KARNER H G. Dielectric strength of double and single-break vacuum interrupters[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1):43-47.
- [13] SENTKER P, KARNER H C. Double breaks in vacuum: Technical benefit and flashover mechanism[C]//IEEE Symposium on Electrical Insulation. Montreal, Quebec, Canada: IEEE, 1996: 16-19.
- [14] SHIOIRI T. Investigation of dielectrics breakdown probability distribution for double-break vacuum circuit breaker[C]//Proe. XxthISDEIV. Paris, France: [s.n.], 2002: 323-326.
- [15] SIDOROV V A, ALFEROV D F. High voltage high-current commutator based on series - connected triggered vacuum switches[C]//Proe. XxthISDEIV. Paris, France: [s.n.], 2002: 202-205.
- [16] 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]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 23(2): 82-87.
- [17] FUGEL T, KOENIG D. Influence of grading capacitors on the breaking performance of a 24 kV vacuum breaker series design[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 569-575.
- [18] BETZ T, KOENIG D. Simulation of reignition processes of vacuum circuit breakers in series[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(4): 370-373.
- [19] BETZ T, KOENIG D. Influence of grading capacitors on the breaking capacity of two vacuum interrupters in series[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(4): 405-409.
- [20] 王承玉, 王季梅. 真空灭弧室弧后介质强度恢复的不稳定性[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(4): 224-227.
- WANG Chengyu, WANG Jimei. Instability of back arc dielectric strength recovery in vacuum interrupters[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(4): 224-227.
- [21] 徐国顺, 江壮贤, 庄劲武, 等. 新型真空直流限流断路器设计及其介质恢复特性[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 171-177.
- XU Guoshun, JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, et al. A new DC vacuum current limiting circuit breaker and its dielectric recovery characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 171-177.

刘彬(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力电子设备及产品的开发工作。