

新一代 110 kV 真空断路器挂网试运行研究

刘波¹, 陈轩恕¹, 兰贞波¹, 李辉², 王卓¹

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074;

2. 中国电力科学研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了使高压断路器满足超大规模电网进一步发展的要求, 研究了一种新一代高压大容量真空断路器。该断路器通过对 40.5 kV 断路器模块的串并联使得其额定工作电压、电流分别提升至 126 kV 和 5 000 A, 短路开断电流达到 80 kA。并通过紧耦合分裂电抗器自动均流/限流技术和动态均压技术提高了设备的可靠性。完成了该断路器的整机安装和挂网试运行的工作, 并对运行中的断路器进行了相关的数据测量, 包括电流、温度和漏磁。由该断路器正常稳定运行以及变电站挂网运行的数据验证了该断路器的设计方案的有效性, 该工作为今后真空断路器的发展方向提供了很好的思路。

关键词: 真空断路器; 串并联技术; 高耦合电抗器; 挂网试运行

Research on trial operation for a new generation of 110 kV vacuum circuit breaker

LIU Bo¹, CHEN Xuanshu¹, LAN Zhenbo¹, LI Hui², WANG Zhuo¹

(1. Wuhan Nari Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to meet the requirement of further development of large scale grid, a new kind of high voltage and large capacity vacuum circuit breaker is presented. This new equipment adopts series-parallel technology of 40.5 kV circuit breaker module to make its rated working voltage and current upgrade to 126 kV and 5 000 A respectively, and short-circuit breaking current reach up to 80 kA. Through the tightly coupled split reactor's automatic current sharing/current limiting technology and dynamic uniform voltage technology, the reliability of equipment is improved. The installation and trial operation of the circuit breaker machine are completed, the data measurement of the running equipment is accomplished, including current, temperature, and magnetic flux leakage value. Relevant test data and the stable operation of the circuit breaker during the trial operation verify the validity of the circuit breaker. The whole work provides a good idea for the future development of vacuum circuit breaker.

Key words: vacuum circuit breaker; series-parallel technology; high coupling reactor; trial operation

中图分类号: TM561.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)16-0126-07

0 引言

电力工业是保证国民经济发展的基础产业, 电力系统的安全稳定运行是国民经济持续发展的根本保证。然而, 由于受到电力系统自身原因和外部干扰的影响, 电网故障时有发生。近 20 年来, 我国各大电网也发生过 100 余起的大停电事故, 每次都造成了非常大的社会影响和数亿元以上的经济

损失, 停电事故已经“危及国家安全”。但由于材料技术等因素的限制, 单个断路器开断能力的提高已经非常困难^[1-9]。

目前普遍使用的高压断路器已难以满足超大规模输电网进一步发展的技术要求, 主要包括: 国内外 110 kV 及以上电压等级高压断路器的最大开断电流只有 63 kA, 已难以满足现有电力系统故障电流开断的要求, 限制了超大规模输电网的进一步发展^[10]; 同时随着输电网规模的不断扩大, 高压断路器操作引起的操作过电压及涌流等问题日益严重, 直接影响着电力系统的安全稳定运行和系统建

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAA19B02); 国网公司重大科技项目(SG0846)

设投资;另外高压超高压断路器普遍采用 SF₆ 气体作为绝缘和灭弧介质,增大了温室气体减排压力。

为解决大电流开断的难题需要引入串并联结构模块化断路器成倍提高断路器的开断能力,使之满足大电网开断的要求^[11]。本文所述的新一代高压超高压大容量真空断路器的研制成功很好地解决了上述技术难题。该断路器采用多断口串并联技术,每个真空断口为 40.5 kV 电压等级,额定电流 2 500 A,短路开断电流 40 kA 的模块。三串联模块形成额定电压 126 kV 高压真空断路器单元。在此单元基础上,采用具有自动均流/限流作用的高耦合电抗器,将两个单元并联后形成额定电压 126 kV,额定电流 5 000 A,短路开断能力 80 kA 的 ZW-126/5000-80 型新一代高电压大容量真空断路器。

1 断路器采用的关键技术

新一代高压超高压大容量真空断路器的研制,主要包括有如下四个关键技术:

1) 光控真空断路器模块的结构优化和智能控制技术^[12-13]。将现代信号处理技术、快速操作机构及其自适应控制技术、大电流短间隙电弧开断技术综合运用模块化真空断路器的选相投切中,以此智能模块为基础,理论上可构成任何更高电压等级的具有选相分合闸功能的高压/超高压断路器。

2) 基于高耦合度分裂电抗器的自动均流/限流技术^[14-15]。通过引入高耦合度分裂电抗器,实现正常工作状态下对各并联灭弧室间的强制均流作用,以及异常工作状态下对各并联灭弧室的强制限流作用,以此保证各断路器模块在各种工况下的可靠性和安全性。

3) 动态均压技术。通过真空断路器模块串联后的多间隙金属蒸气电弧弧后动态介质恢复特性研究及其击穿电压增益特性及击穿统计特性研究,可掌握各模块零区电弧的差异及电流开断能力的提高等技术,掌握实用有效的动态均压措施,有效提高其击穿电压增益倍数,降低击穿概率^[16-17]。

4) 多断口串联技术。利用真空间隙击穿电压与间隙长度之间的关系,当间隙长度较短时 $U = kd$; 当间隙较长时 $U = k\sqrt{d}$ 。选择多个短间隙串联实现提高间隙击穿电压^[17]。

图 1 为断路器整机单相示意图,从左往右依次为 380 V 电源箱、风道、紧耦合电抗器、单相断路器串并联模块、控制器、220 V 电源箱。

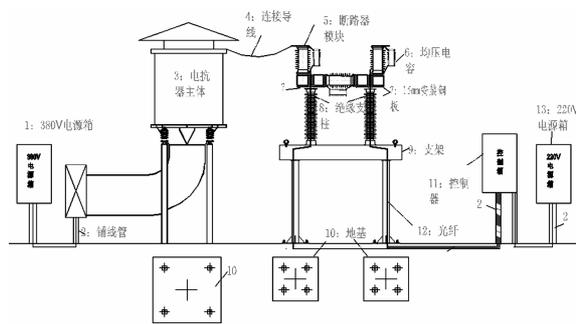


图 1 断路器整机单相示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a single-phase circuit breaker

2 挂网试运行安全风险评估

考虑设备在挂网后可能存在的风险,在此分析了该断路器挂网试运行中对系统、装置及电力元件带来的影响以及相应的应对措施。

2.1 设备对系统影响

1) 系统暂态稳定影响

大容量断路器的制造属极端制造技术,由于材料、加工工艺等方面的诸多限制,进一步提高现有单体断路器的开断容量,难度很大。借助断路器并联技术,可以提高断路器的总体开断能力。本设备采取分裂电抗器将两支路并联起来,但电抗器的使用会给系统引入阻抗。

由于本设备采用强耦合分裂电抗器(耦合系数高达 0.97),电抗器引入系统的阻抗值很小(单臂电感 2.6 mH)仅相当于在原导线基础上延长 3 km。并且研究分析表明:并联型断路器在均流、限流开断状态下,强耦合分裂电抗器的引入并没有对系统的暂态稳定性造成不利影响,相反在非平衡开断的限流状态下,强耦合分裂电抗器的限流电感的引入使得系统的暂态稳定性有所提高。

2) 系统电磁环境影响

本设备采用强耦合分裂电抗器,形成开放式磁场,可能对周边电气设备特别是二次设备正常运行产生不良影响。但对电抗器产生的开放磁场经数值计算后得出在距离电抗器中心为 1 倍直径处,可忽略电抗器磁场的影响。表明设备接入系统后对原有系统电磁环境在一定的距离范围内是很小的,不会对原有系统产生干扰。

同时通过实测安装现场设备周边环境电磁场强度,适当增加设备间的安装距离,及加装外屏蔽来削弱磁场产生的影响。在安装现场增设实时监控系,监视设备的实时运行状态,确保保护设备不因电磁干扰而误动或拒动。

3) 对系统保护距离影响

针对本系统的仿真表明给系统引入附加阻抗

值后，并未对原有系统距离保护产生影响。并且通过并约定动作时序为挂网设备先动作，当挂网设备保护失败后再由原系统保护设备动作可以避免设备引入后对原有系统继电保护产生的影响。

2.2 设备存在的风险

1) 设备的绝缘

由于电抗器的耦合度要求很高，电抗器的两个耦合线圈之间的距离很近。应用于 220 kV 及以上系统时对电抗器匝间绝缘与层间绝缘提出了很高的要求。线圈的绝缘应能无损伤地承受工作电压及在电网中可能发生的操作过电压和大气过电压。

2) 设备的温升

本设备电抗器线圈间采用很厚的绝缘材料，同时采用高强度的气体绝缘和金属外壳封闭，并加装强制风冷系统，在必要时可以将其开启以确保电抗器不过热。

2.3 设备对电力元件影响

对电力元件的影响主要源于耦合分裂电抗器附加阻抗的引入及磁场的引入。附加阻抗会影响保护装置方向判别元件，及电流相位检测。

仿真表明电抗器的引入使得原有系统相角改变了 0.1 ms (即改变 1.8°)，可见附加阻抗引入后对原系统参数的影响程度很小，相位偏差也很小，不会影响方向判别元件。同时给出相位校正系数可以补偿电流检测的相位偏差。

通过上述分析表明，新设备的挂网试运行对原电网的安全风险是可控的，并可以通过采取相关措施使运行风险降到最小。

3 挂网形态及相应的方案

3.1 挂网地点概况

挂网地点选址在湖北省武汉市汉阳汤山变电站。该变电站已于 2005 年投运，建设规模如表 1。

表 1 汤山站概况

Table 1 Overview of Tangshan substation

项目名称	已建	远景
主变/MVA	2×50	3×50
110 kV 出线/回	2	4
10 kV 出线/回	30	45
10 kV 并联电容器/Mvar	16	24
110 kV 母线三相短路电流/kA	23.35	/
10 kV 母线三相短路电流/kA	18.75	/

其电气主接线：110 kV 侧采用单母线简易分段接线，10 kV 侧采用单母线分段带旁路母线接线。110 kV 中性点采用经隔离开关直接接地或经避雷

器、放电间隙间接接地的方式。

3.2 挂网方案

经对该变电站现场接线方式的研究表明该新一代高压超高压大容量断路器挂网的运行方式可采用的有两种方案：

方案一：将挂网设备串入主线，当进线发生短路故障时，串并联模块化断路器先动作，1#断路器作为后备保护用断路器，保护时序设置为延时动作，如图 2 所示。

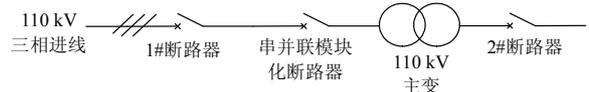


图 2 运行方式方案一示意图

Fig. 2 One of the circuit breaker operating mode

该种方案不改变原有运行方式，不会对原有系统距离保护产生影响，同时该种方案能够投切系统负荷，不必引入人工负载，较符合电力系统运行实际状况，并且该方案的挂网施工改造难度相对较小，可以利用现有变电站布局做相应改造，将挂网设备接入系统。

方案二：从 110 kV 母线引出支路，将挂网设备和人造负载安装在支路，人造负载侧发生故障时，串并联模块化断路器先动作，1#断路器作为后备保护用断路器，保护时序设置为延时动作，如图 3 所示。

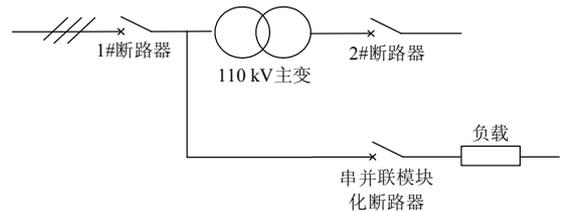


图 3 运行方式方案二示意图

Fig. 3 Another operating mode of the circuit breaker

该种方案避开对原电力系统的冲击，对原有系统影响较小，但该种方案必须引入人工负载，人工负载不可能引入过大，不能模拟电力系统运行的实际状况，同时该种方案需要考虑人工负载的引入，对场地改造要求高，实施难度相对较大。

经分析比较，考虑到现场施工等因素，新一代高压超高压大容量断路器挂网运行方式最终选用方式一。

如图 4 所示，本次挂网示范应用串接于 110 kV 1#主变间隔，其中粗线框部分就是挂网的新一代断路器。挂网运行时将 1#主变间隔靠 I 段母线侧隔离开关及接地刀闸断开，新一代断路器接入 1#主变间隔即可挂网运行。

本期加装的 110 kV 新一代高压超高压大容量

断路器串接在 110 kV 锅汤 I 回间隔内的原出线隔离开关和新增的隔离开关之间, 布置在环形道路与变电站围墙之间的空地上, 并新增出线避雷器 3 台, A 相线路电容式电压互感器移装至线路侧。平面布置图如图 5 所示。

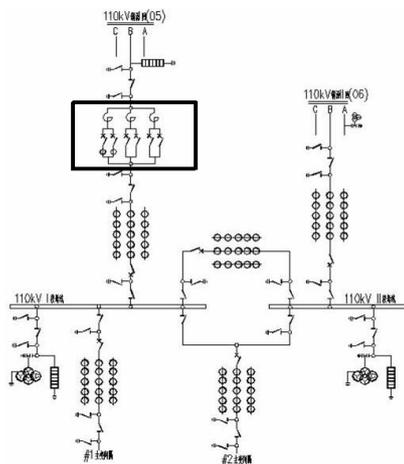


图 4 变电站接线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of substation wiring

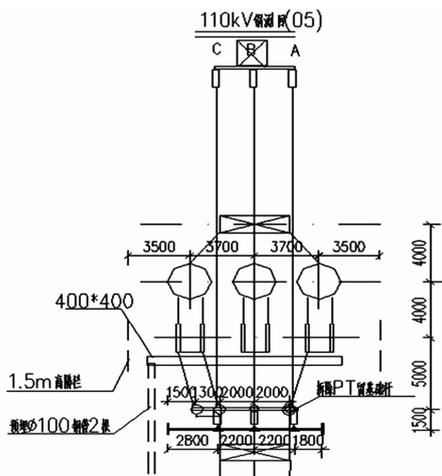


图 5 平面布置图

Fig. 5 Plane layout of the substation site

4 挂网运行现场及数据

新一代高压超高压大容量断路器于 2013 年 12

月 9 日下午 6 时 15 分在示范基地武汉市 110 kV 汤山变电站正式带电试运行, 至今运行状况良好。其现场的安装和挂网运行情况如图 6、图 7 所示。

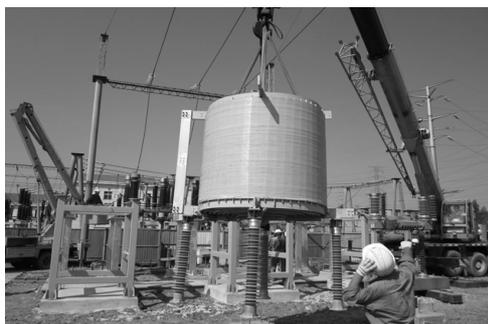


图 6 整机现场安装图

Fig. 6 Installation site of the circuit breaker



图 7 挂网试运行

Fig. 7 Situation of trial operation

4.1 电流监测

电流监测为变电站日常监测, 本示范工程从挂网第一日开始, 每天都进行电流监测, 表 2 为某日的电流监测数据。

4.2 温度监测

为了检验电抗器和断路器设备的发热状况, 现对电抗器和断路器在不同位置、不同时刻的温度分别进行了测量。其中电抗器分别取 3 个接头和包封由内至外的 3 个点作为温度测量点, 而断路器分别将 4 个接头和 4 个联接板作为温度测量点。具体的温度测量点如图 8、图 9 所示。表 3、表 4 为部分温度监测数据。

表 2 变电站现场电流监测数据

Table 2 Current monitoring data of the substation

电流/A	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
A 相互感器数据	114	123	130	132	128	124	123	128	132	136
A 相 1#路互感器数据	56	62	64	66	65	61	62	65	67	68
A 相 2#路互感器数据	57	62	65	67	64	62	62	64	66	68



图 8 电抗器温度测量点

Fig. 8 Temperature measuring point of the reactor

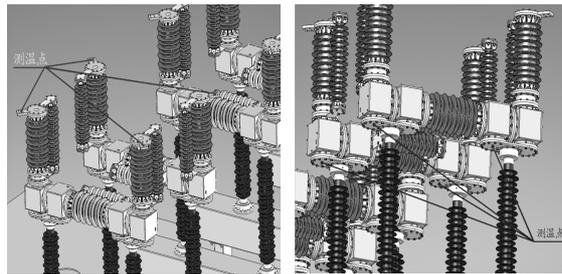


图 9 断路器温度测量点

Fig. 9 Temperature measuring point of the circuit breaker

表 3 电抗器 A 相测量点温度值

Table 3 Reactor's temperature value of the A phase point
°C

测试点	时刻 1	时刻 2	时刻 3	时刻 4	时刻 5
	16:30	16:40	16:47	16:53	16:57
连接头 1	10.4	10.3	9.9	9.9	9.9
连接头 2	11.6	11.6	11.4	11.3	11.2
连接头 3	11.8	11.6	11.4	11.4	11.3
包封 1	10.8	10.7	10.9	11.2	10.9
包封 2	10.7	11.6	11.4	11.3	11.3
包封 3	10.5	11.3	11.3	11.1	11.3

表 4 断路器 A 相模块测量点温度值

Table 4 Circuit breaker's temperature value of the
A phase point
°C

测试点	时刻 1	时刻 2	时刻 3	时刻 4	时刻 5
	16:37	16:43	16:50	16:55	16:59
连接头 1	10.4	10.8	10.9	10.9	10.6
连接头 2	10.2	10.3	10.6	10.4	10.3
连接头 3	10.4	10.4	11.1	10.8	10.8
连接头 4	10.6	10.5	10.1	10.1	10.4
连接板 1	12.4	12.7	12.2	12.3	12.2
连接板 2	11.8	12.5	12.6	12.4	12.3
连接板 3	12.3	12.8	12.8	12.8	13.0
连接板 4	12.1	12.3	12.3	12.4	12.2

由测量数据可知，电抗器和模块本身各处的温度随时间的变化有相应的变化，主要是由环境温度变化和线路电流变化(变化负荷导致)引起。在初始测量时环境温度为 9.8 °C，相对湿度为 45%。其中在测量 A 相设备温度时线路电流有效值为 114 A。

对于电抗器部分的温度，连接头 2 处的温度普遍高于连接头 1 和连接头 3，主要是由于连接头 2 位于电抗器上端，而靠空气自然冷却的电抗器上端温度要高于下端温度。而 3 处包封点的温度基本一致。对于模块部分 4 个连接头和 4 个连接板的温度基本一致，其不同的温度主要是由于不同连接处的接头和接板的松紧程度不一样，导致对应的电阻值不一致导致发热量有差别。由测量数据可知断路器和电抗器发热不明显，并未影响设备的正常运行。

4.3 漏磁检测

为了检验电抗器的漏磁对其他设备的影响，现对电抗器对地面不同高度和距离产生的漏磁进行了测量。对 A 相电抗器漏磁的测量分别取离地面高度 1 m、1.5 m、2 m 处和离电抗器轴心距离 1.5 m 到 5 m(每隔 0.5 m 取一个测试点)处作为磁场测试点，磁场测试点示意图如图 10 所示。

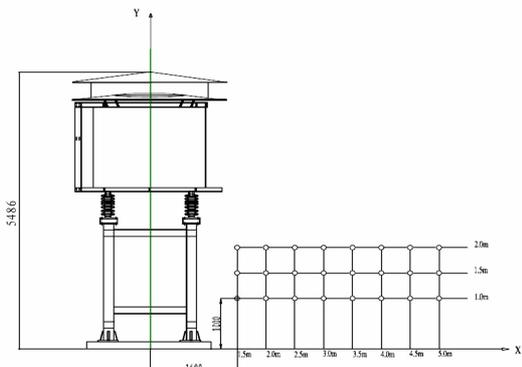


图 10 磁场测试点示意图

Fig. 10 Schematic diagram of magnetic field test point

表 5 为电抗器漏磁场监测数据。根据所测数据可知，该电抗器 A 相下方磁场强度随地面高度的升高而变大，随着离电抗器中心距离变大而减小，且距离地面高度为 1 m 处的磁场强度最大值为 2.522 A/m(对应磁感应强度为 3.167 T)；距离地面高度为 2 m 处磁场强度最大值为 2.758 A/m(对应磁感应强度为 3.464 μT)；距离地面高度为 2 m 处磁场强度最大值为 3.614 A/m(对应磁感应强度为 4.539 μT)。

由测量数据可知电抗器下端的漏磁并不大，且由距离地面 2 m 高度处(断路器支架高度约为 2 m)的磁感应强度为 μT 数量级，而断路器流过的电流约为 100 A，故由该磁场对断路器导电部分产生的电磁

力很小, 并不影响断路器的正常动作, 同时由监测 显示并未影响其他设备的正常运行。

表 5 A 相电抗器磁场测量数据

Table 5 Magnetic value of the A phase reactor

	1.5 m	2.0 m	2.5 m	3.0 m	3.5 m	4.0 m	4.5 m	5.0 m	A/m
1.0 m	0.400	0.591	0.481	0.592	0.656	0.643	0.622	0.635	H_x
	2.490	1.426	1.664	1.553	1.353	1.223	0.964	0.979	H_y
	2.522	1.544	1.732	1.733	1.577	1.382	1.147	1.167	H_s
1.5 m	0.591	1.267	0.714	0.795	0.825	0.817	0.817	0.884	H_x
	2.530	2.450	1.835	1.595	1.285	1.191	0.965	0.915	H_y
	2.598	2.758	1.969	1.782	1.527	1.444	1.264	1.272	H_s
2.0 m	2.170	2.060	1.711	1.245	1.278	0.892	0.706	0.773	H_x
	2.890	2.640	2.520	1.311	1.525	1.300	1.025	0.915	H_y
	3.614	3.349	3.046	1.808	1.989	1.576	1.245	1.198	H_s

注: 表中横坐标表示测量点离电抗器中心水平距离, 纵坐标表示测量点离地面高度, H_x , H_y , H_s 表示测量水平磁场强度、垂直磁场强度和磁场强度矢量和的值, 磁场单位为 A/m。

5 结论

新一代断路器挂网试运行方案综合考虑了电力部门相关新设备挂网规程要求, 使得挂网风险降到最小, 使得该设备在变电站的试运行成功。该新型断路器在断路器领域开创了新的技术思路, 在参数指标上达到了新的高度, 此次挂网试运行则是国内首次 110 kV 电压等级真空断路器示范应用案例。挂网试运行的成功可以深入研究新设备的技术可行性, 对后续高压大容量断路器的研究与推广提供依据, 同时可以对设备在系统中的各种问题及处理预案深入分析, 制定该断路器产品验收、试运行技术规范。

参考文献

- [1] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 27-33.
- [2] 杜砚, 陈轩恕, 刘飞, 等. 用于并联断路器的高耦合度分裂电抗器设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2870-2875.
DU Yan, CHEN Xuanshu, LIU Fei, et al. Design of coupled reactors used for parallel circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2870-2875.
- [3] 尹婷, 陈轩恕, 杜砚. 采用高耦合度电抗器的大容量高压断路器设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1577-1582.

YIN Ting, CHEN Xuanshu, DU Yan. Design of large-capacity high-voltage breakers using tightly-coupled reactor[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1577-1582.

- [4] 张佩, 赵书涛, 申路, 等. 基于改进 EEMD 的高压断路器振声联合故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 77-81.
ZHANG Pei, ZHAO Shutao, SHEN Lu, et al. Research on vibration and acoustic joint mechanical fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on improved EEMD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 77-81.
- [5] 孙一航, 武建文, 廉世军, 等. 结合经验模态分解能量总量法的断路器振动信号特征向量提取[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 228-236.
SUN Yihang, WU Jianwen, LIAN Shijun, et al. Extraction of vibration signal feature vector of circuit breaker based on empirical mode decomposition amount of energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 228-236.
- [6] 李斌, 郭凤仪, 王志勇, 等. 双稳态永磁机构优化设计及智能控制器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 83-89.
LI Bin, GUO Fengyi, WANG Zhiyong, et al. Bi-state PMA optimization design and intelligent controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 83-89.
- [7] 徐国顺, 江壮贤, 庄劲武. 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 Jingwu. A

- new DC vacuum current limiting circuit breaker and its dielectric recovery characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 171-177.
- [8] 黄益庄. 智能变电站是变电站综合自动化的发展目标[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 45-48.
HUANG Yizhuang. Smart substation is the further objective of SAS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 45-48.
- [9] 李宝伟, 文明浩, 李宝潭, 等. 新一代智能变电站 SV 直采和 GOOSE 共口传输方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 96-101.
LI Baowei, WEN Minghao, LI Baotan, et al. Research of the scheme for SV direct sampling and GOOSE transmit in the same port in new generation smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 96-101.
- [10] 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.
- [11] 陈轩恕, 尹婷, 潘垣, 等. 基于单元化真空断路器串并联结构大容量高压断路器设计方案[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3157-3163.
CHEN Xuanshu, YIN Ting, PAN Yuan, et al. High voltage and large capacity vacuum circuit breakers with series-parallel structure[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3157-3163.
- [12] 廖敏夫, 邹继斌, 段雄英, 等. 多断口真空开关的绝缘与击穿统计特性[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 13-17.
LIAO Minfu, ZOU Jibin, DUAN Xiongying, et al. Dielectric strength and statistical property of single and multiple-break vacuum circuit breakers[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 13-17.
- [13] 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-breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 82-87.
- [14] 陈金祥, 董恩源, 邹积岩. 具有串联补偿作用的新型故障限流器 (FCL) 的研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 48-51.
CHEN Jinxiang, DONG Enyuan, ZOU Jiyan. Study of a new fault current limiter with series compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 48-51.
- [15] 董力, 李庆民, 刘卫东, 等. 两次电流转移型短路电流限制器的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(3): 21-24.
DONG Li, LI Qingmin, LIU Weidong, et al. Investigation of a double current-transferring type short circuit current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 21-24.
- [16] 吴高波, 阮江军, 黄道春, 等. 126 kV 模块化三断口真空断路器静、动态均压设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 215-223.
WU Gaobo, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Static and dynamic voltage sharing design of 126 kV modular triple-break vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 215-223.
- [17] 黄道春, 阮江军, 吴高波, 等. 具有串并联结构的模块化多断口真空断路器静态电压分布特性[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 181-186.
HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WU Gaobo, et al. Study on static and dynamic voltage distribution characteristics of modularized multi-break vacuum circuit break with series and parallel configuration[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 181-186.

收稿日期: 2014-10-30; 修回日期: 2014-12-22

作者简介:

刘波(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事一次智能化电气设备与电力电子技术研究;

陈轩恕(1969-), 男, 博士, 高工, 主要从事高电压新技术方面的研究;

兰贞波(1988-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究领域为高电压绝缘技术及电磁场数值计算。E-mail: lanzb@sina.com

(编辑 周金梅)