

永磁式真空断路器的仿真建模与故障分析

王帮田¹, 姜亚军¹, 张杰¹, 刘莎², 刘定新²

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461001; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 真空断路器是中压配电网的关键设备,其运行可靠性对于配电网安全至关重要。由于断路器本身结构和电气特性比较复杂,如何通过少量的运行状态参数(如在线监测获得的分合闸行程曲线)准确评判其工作性能,是广受关注的问题。笔者针对许继集团永磁式真空断路器开展研究,采用ADAMS与ANSOFT软件相结合,找到了断路器中电特性、力特性和机械运动特性的相互关系,并进而在线监测主轴角位移行程曲线和永磁线圈电流基础上,提出了评估断路器机械状态的方法及判据。

关键词: 永磁式真空断路器; ADAMS; 四参数法; 在线监测

中图分类号: TM561

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)05-0036-06

Modeling and Failure Analysis of a Permanent Magnet Vacuum Circuit Breaker

WANG Bangtian¹, JIANG Yajun¹, ZHANG Jie¹, LIU Sha², LIU Dingxin²

(1. XJ Group Corporation, Henan Xuchang 461001, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Vacuum circuit breaker is a key equipment of medium-voltage distribution network, its operational reliability is crucial to the safety of the distribution network. Because of the structural and electrical complexity of vacuum circuit breaker, how to accurately evaluate its working performance by a small number of running parameters, e.g. the time-travel curve of moving contact obtained by online monitoring, is a problem of much concern. In this paper, a permanent magnet vacuum circuit breaker manufactured by XJ Group Corporation is studied. The software ADAMS and ANSOFT is used for modeling, and the relationship among electrical characteristics, force characteristics and mechanical motion characteristics is unraveled. Accordingly, the method and criteria for mechanical performance evaluation of the circuit breaker are put forward by using the angular displacement curve of principle axis and the current waveform of permanent magnet coil obtained by online monitoring system.

Key words: permanent magnet vacuum circuit breaker; ADAMS; four-parameter method; online monitoring

0 引言

智能电网是电网自动化技术的进一步发展和提升,而智能电力设备作为智能电网的节点基础,不仅要具有传统电力设备强电控制功能,还要具有在线监测和智能诊断的功能。加强对智能电力设备运行状态的监测与诊断,提前发现潜在故障,对电力系统的安全运行具有非常重大的意义^[1-5]。

真空断路器在中压配电网中应用非常广泛,担任着重要的角色^[6-8]。对其机械特性进行深入研究,配合在线监测技术实现断路器运行状态的自

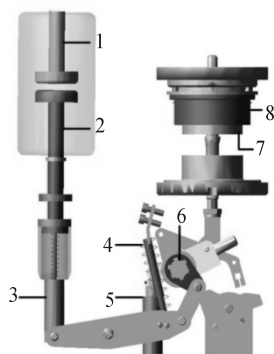
我诊断,是真空断路器智能化的重要内容^[9-10]。笔者针对许继集团生产的 12 kV 永磁式真空断路器开展机械特性仿真研究,通过 ANSOFT 软件分析了永磁线圈电流与动铁心力特性的相互关系,通过 ADAMS 软件分析了整个机构的分合闸动作特性。仿真研究找出了断路器电特性、力特性和机构运动特性的相互关系^[11]。

相比于传统的弹簧机构真空断路器而言,永磁机构真空断路器结构简单,可靠性高^[12-15]。但对于机械特性的仿真研究而言,弹簧机构只需要使用多体动力学软件(如 ADAMS)进行一体化仿真,永磁机构还需要结合电磁场和电磁力的仿真,更加复杂^[16-18]。

目前,对永磁真空断路器的机械特性仿真研究还较少。沈阳工业大学、西南交通大学、西华大学等单位开展了相关研究,但主要针对永磁机构的设计与优化^[19-21]。笔者主要针对机械状态的在线诊断,对永磁机构开展仿真研究。研究工作模拟了分闸电流过小,合闸电流过小,分闸弹簧刚度系数过大,分闸弹簧刚度系数过小,一相分闸弹簧脱落及油缓冲失效等6种故障情况,得到了故障情况下主轴角位移行程曲线和控制线圈电流波形的变化规律。采用四参数法等分析方法获取了关键的机械状态特征参数,为断路器机械状态的在线诊断提供了判断依据。笔者的研究方法对于永磁式真空断路器的在线监测与故障诊断具有推广应用价值^[22]。

1 仿真模型的建立与实验验证

使用 ADAMS 软件建立的断路器多体动力学模型见图 1。



1—静触头; 2—动触头; 3—绝缘拉杆; 4—分闸弹簧;
5—油缓冲器; 6—主轴; 7—动铁心; 8—永磁体。

图 1 断路器多体动力学模型

Fig. 1 Multi-body model of the circuit breaker

采用双线圈单稳态永磁机构,同时控制断路器3相分合闸操作(图1为侧视图,只能看到1相)。线圈部分没有放到多体动力学模型中。线圈和永磁体作用于动铁心的电磁力,是通过 ANSOFT 软件分析得到,并作为模型参数输入到多体动力学模型中。

应用 ANSOFT 软件建立的永磁机构电磁力计算模型与典型磁场分布见图 2。

应用图 2 所示的电磁力仿真模型,将分合闸线圈电流和动静铁心距离作为输入参数,即可求得动铁心获得的电磁力。将不同电流、不同动铁心位置下获得电磁力做成网格数据,导入到 ADAMS 仿真软件中,可以得到以分合闸电动力为应变变量,以分合闸电流和动静铁心之间的距离为自变量的曲面。在此基础上,将实验测试得到的分合闸线圈电流曲线通过 AKISPL 插值函数拟合,作为 ADAMS 软件

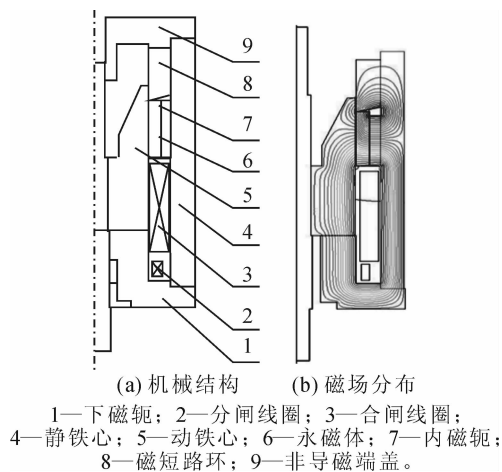


图 2 永磁机构结构及合闸时刻磁场分布图

Fig. 2 Configuration of permanent magnet actuator and its magnetic field distribution at closing moment

的输入参数,就可以在多体动力学模型中获得准确的分合闸电动力。

为了验证仿真模型,将仿真得到的绝缘拉杆(见图 1) 分合闸行程曲线与实验进行对比,结果见图 3、4。

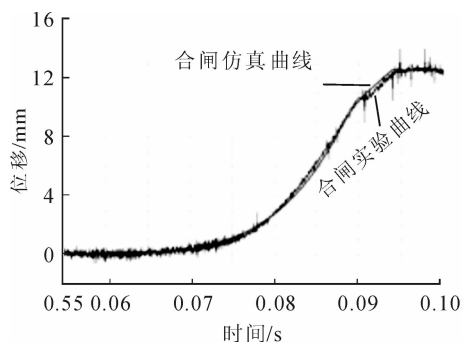


图 3 合闸行程曲线的仿真与实验对比

Fig. 3 Comparison of numerical and experimental closing-displacement curves for insulating bar

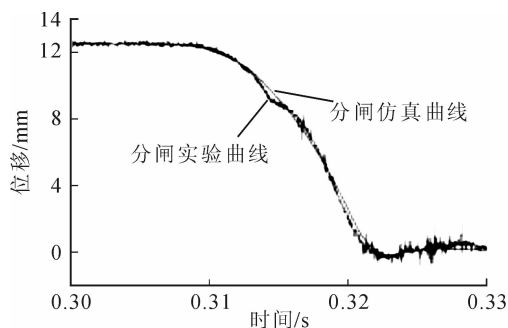


图 4 分闸行程曲线的仿真与实验对比

Fig. 4 Comparison of numerical and experimental opening-displacement curves for insulating bar

图 3、4 中,同一时刻仿真与实验结果的差异不超过 5%(滤除实验结果的毛刺后比较),说明仿真能够较为真实地反映断路器分合闸特性,验证了仿真模型的正确性。

2 典型故障的仿真分析

永磁式真空断路器运行过程中出现的常见故障有永磁机构的线圈电路故障、分闸弹簧故障、油缓冲器失效故障等。笔者针对这些故障,通过仿真求取故障状态下线圈电流波形与分合闸过程中的主轴角位移行程曲线,与正常情况进行对比,为机械状态的智能诊断提供依据。

2.1 永磁机构的线圈电路故障

永磁机构的线圈电路故障主要反映为电流过小/过大、通流时间过短/过长几种类型。线圈电流过大与通流时间过长会导致线圈烧坏,产品中有明确的阈值规定^[23-24]。对于线圈电流过小和通流时间过短,产品则缺乏定量指标。为此,笔者仿真研究了电流的下限阈值。

断路器合闸线圈的标准电流为 30 A(平均值),分闸线圈的标准电流为 2 A。仿真发现,当合闸线圈电流低于标准电流 80%(即 24 A)时,断路器不能完成合闸操作;当分闸线圈电流低于标准电流 60%(即 1.2 A)时,断路器不能完成分闸操作。考虑到实际应用中断路器摩擦力参数的不确定性,比如产品相互之间的差异,长期静置后摩擦力增大等,分合闸线圈电流的下限阈值应设置得更高,以留足裕量。标准电流与下限电流时分合闸角位移行程曲线对比见图 5。

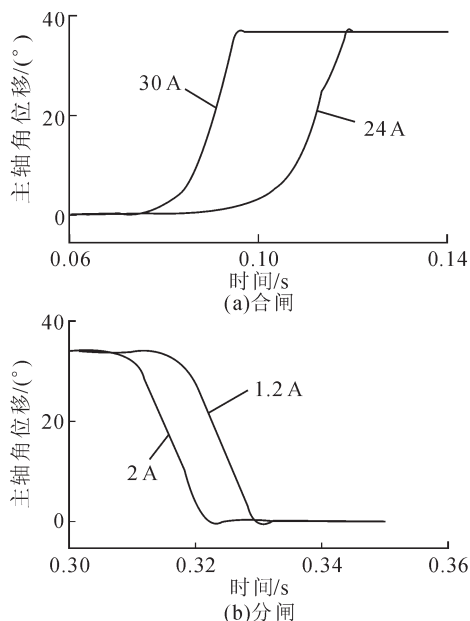


图5 正常与下限电流时的角位移曲线

Fig. 5 Angular displacement curves for standard and floor level coil currents

合闸过程中的驱动力主要是动铁心电磁力,而分闸过程中的驱动力包括动铁心电磁力和分闸弹簧力。仿真得到的分闸电动力最大值为 4 700 N,分

闸弹簧力最大约 3 000 N。因为分闸弹簧的存在,使得分闸线圈电流下限降幅大于合闸线圈电流。

2.2 分闸弹簧故障

针对分闸弹簧刚度系数过大、过小以及一相分闸弹簧脱落的故障类型,进行仿真研究。分闸弹簧的刚度系数标准值为 34 N/mm。研究发现,当分闸弹簧刚度系数增加到正常至 120%以上时 ($K=40.8$ N/mm),不能可靠合闸;当分闸弹簧刚度系统减小到正常值的 60%以下时 ($K=20.4$ N/mm),不能可靠分闸。刚度系数分别为 20.4、34、40.8 N/mm 时的合闸与分闸主轴角位移曲线对比见图 6。

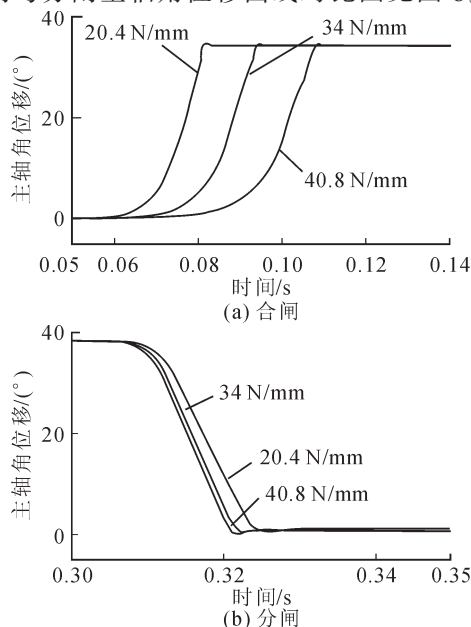


图6 分闸弹簧刚度系数对角位移曲线影响

Fig. 6 Influence of stiffness factor of opening spring on the angular displacement curve

一相分闸弹簧脱落后,对合闸而言少了反力,对分闸而言少了动力,因此合闸速度会增大,分闸速度会降低。角位移行程曲线见图 7。

2.3 油缓冲器故障

油缓冲器漏油过多导致液压缓冲力严重不足,视为油缓冲器失效。这时,在分闸后期由于没有足够的缓冲力,会使得分闸结束时动触头运动速度过大,分闸弹跳程度和次数会增加。油缓冲失效时的分闸角位移行程曲线见图 8。

3 基于主轴角位移曲线的断路器故障诊断

从图 5-8 可以看出,正常与故障情况下角位移行程曲线具有明显的差异,甚至对不同故障类型也有所不同。虽然如此,如何通过在线监测系统判别故障,并区分故障类型,仍然是当前断路器智能化研究的重要课题^[25-26]。

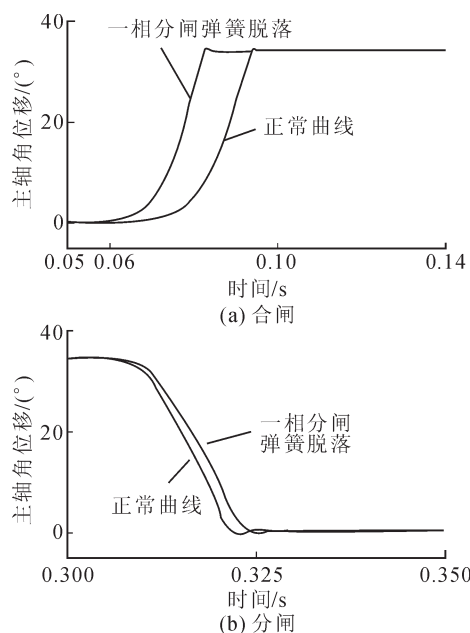


图7 一相分闸弹簧脱落下的角位移曲线

Fig. 7 Angular displacement curve for the detach of an opening spring

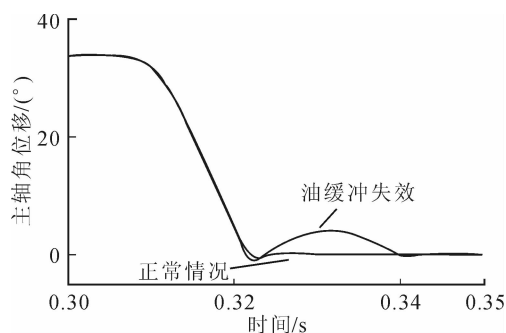


图8 油缓冲失效故障分闸角位移曲线

Fig. 8 Angular displacement curve for oil buffer failure

根据受力情况的不同,把分闸过程分为4个阶段:第1阶段为从主轴开始运动到三相触头都断开为止,这一阶段操动机构运动过程主要受触头弹簧分闸动力、分闸弹簧分闸动力、动铁心电磁力和摩擦阻力的作用;第2阶段为三相触头断开时刻到主轴上的缓冲拐臂跟油缓冲器刚接触(油缓冲器尚未起作用),这一阶段只有分闸弹簧的分闸动力、动铁心的电磁力和摩擦阻力作用;第3阶段为从油缓冲器被压缩时刻到油缓冲器被压缩到最大行程位置为止。油缓冲器受压缩后产生一个反力,以减缓主轴的转动速度,油缓冲器被压缩到最大行程时,分闸锁扣装置已经将断路器分闸位置锁住。该部分包括了分闸弹簧分闸动力、动铁心电磁力、油缓冲器阻力和摩擦阻力;第4阶段为从油缓冲器被压缩到最大行程时刻到断路器分闸过程终止时刻。在真空断路器正常工作状态下,第4阶段斜率可以忽略不计,在油缓冲

器发生漏油导致分闸回弹较大的情况下,第4阶段将有一定斜率^[23]。

合闸过程与分闸过程的力作用时序基本相反,因此同理可将合闸过程也分为4个阶段。在此基础上,可将分合闸角位移行程曲线按照上述4个阶段进行参数化描述,见图9。对标准分合闸角位移曲线的4个阶段分别求取斜率,得到4个阶段的平均角速度(v_1-v_4),作为故障识别的关键参数。

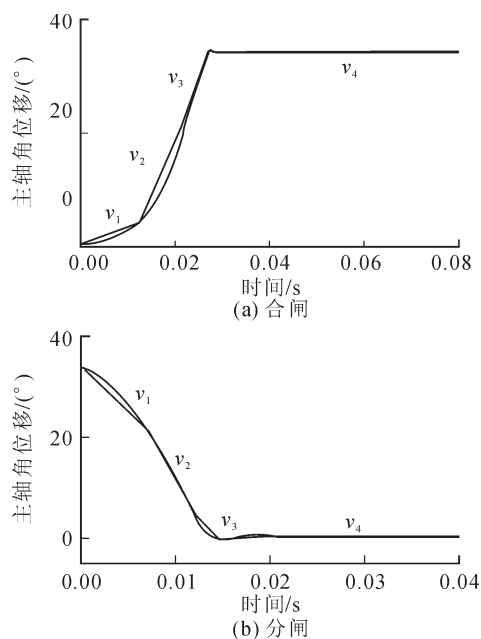


图9 4参数法分析图

Fig. 9 Schematic diagram of 4 parameters method

针对正常与故障情况下的合闸与分闸角位移行程曲线,用四参数法得到的关键参数见表1、2。表1、2中数据说明,可以在一定监测误差的条件下,通过四参数法对分合闸角位移行程曲线进行分析,在线诊断断路器的机械状态,识别断路器故障。比如:对于油缓冲器失效故障,在分闸曲线中得出的参数 $v_4=-0.43$,与正常情况及其他故障类型有明显差异,可用于准确识别此类故障。

4 结语

真空断路器作为中压配电网的关键设备,在线获取它的运行状态对于提高配电网安全性非常重要^[27]。笔者采用ADAMS和ANSOFT软件相结合,对永磁真空断路器的电特性、力特性和机构运动特性进行了系统的仿真分析,得出了这些特性的相互关系。根据在线监测获得的永磁线圈电流波形和主轴角位移曲线,笔者提出了4参数法等机械故障诊断方法,并给出了关键的故障判据。利用这些判断方法和判据,可以对永磁线圈电流过小、分闸弹簧弹

表1 合闸角位移行程曲线的4参数法分析结果

Tab. 1 Analysis result by 4 parameters method of closing angular displacement curves

平均角速度 ($^{\circ}\cdot\text{ms}^{-1}$)	正常情况	分闸弹簧刚度系 数 40.4 N/mm	分闸弹簧刚度系 数 20.4 N/mm	油缓冲失效	一相分闸弹簧 脱落	合闸电流 24 A	分闸电流 1.2 A
v_1	0.35	0.25	0.41	0.34	0.42	0.18	0.35
v_2	1.76	1.51	2.09	1.76	2.07	1.32	1.76
v_3	2.49	2.17	3.01	2.53	3.06	1.80	2.49
v_4	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.02

表2 分闸角位移行程曲线的4参数法分析结果

Tab. 2 Analysis result by 4 parameters method of opening angular displacement curves

平均角速度 ($^{\circ}\cdot\text{ms}^{-1}$)	正常情况	分闸弹簧刚度系 数 40.4 N/mm	分闸弹簧刚度系 数 20.4 N/mm	油缓冲失效	一相分闸弹簧 脱落	合闸电流 24 A	分闸电流 1.2 A
v_1	1.90	1.96	1.80	1.90	1.80	1.90	1.80
v_2	3.12	3.29	2.75	3.12	2.82	3.12	3.09
v_3	2.47	2.80	1.83	3.23	2.01	2.47	2.49
v_4	0.00	0.00	0.00	-0.43	0.00	0.00	-0.02

性力超出范围、分闸弹簧脱离、油缓冲器失效等故障进行识别和判断。文中的建模与故障分析方法对于其他类型永磁真空断路器具有推广应用价值。

参考文献:

- [1] 荣命哲,贾申利,王小华. 电器设备在线监测[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
RONG Mingzhe, JIA Shenli, WANG Xiaohua. Online monitoring of electrical apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [2] 荣命哲,王小华,王建华. 智能开关电器内涵的新发展探讨[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 1-3.
RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, WANG Jianhua. Discussion on new development of connotation for intelligent switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 1-3.
- [3] 李金,孙斌,张静,等. 电能质量监测终端的 IEC 61850 信息模型[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(11): 20-24.
LI Jin, SUN Bin, ZHANG Jing, et al. An IEC 61850 standard model for power quality supervision terminal[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(11): 20-24.
- [4] 王建华,宋政湘,耿英三,等. 智能电器理论与关键技术研究[J]. 电力设备, 2008, 9(3): 1-4.
WANG Jianhua, SONG Zhengxiang, GENG Yingsan, et al. Study on intelligent electrical apparatus and key technology[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(3): 1-4.
- [5] 杜彦明,顾霓鸿. 中国电力系统配电开关设备现状及事故情况[J]. 高压电器, 2001, 37(3): 1-5.
DU Yanming, GU Nihong. Present situation of distribution switchgear in chinese power system and analysis of failures[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(3): 1-5.
- [6] 李炜,李玉春,高以梅,等. 关于真空断路器电寿命极限开断次数的研究[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 222-223.
LI Wei, LI Yuchun, GAO Yimei, et al. Research on maximal breaking times for vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 222-223.
- [7] 高齐利,刘峰. 断路器辅助保护瞬时跟跳逻辑存在问题分析及改进[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(9): 45-49.
GAO Qili, LIU Feng. Analysis and improvement for the instantaneous linkage tripping logic of circuit breaker auxiliary protection[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(9): 45-49.
- [8] 徐靖东. 高压断路器电寿命诊断方法的对比分析[J]. 陕西电力, 2013, 41(3): 56-60.
XU Jiangdong. Analysis on high voltage circuit breaker electrical life diagnosis method[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(3): 56-60.
- [9] 张华赢,杨兰均,李良书,等. 投切电容器组专用真空断路器性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 38-44.
ZHANG Huaying, YANG Lanjun, LI Liangshu, et al. Study on the performance of special vacuum breaker for switching capacitor banks[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3): 38-44.
- [10] 郭江,刘亚锦,邹积岩. 面向优化检修的真空断路器状态监测与诊断[J]. 高压电器, 2007, 43(6): 454-456.
GUO Jiang, LIU Yajin, ZOU Jiyan. Optimal maintenance oriented condition monitoring and diagnosis of vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 454-456.
- [11] 王恪典,徐海波. 虚拟样机实验仿真技术及其在真空断路器操动机构中的应用[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 1-3.
WANG Kedian, XU Haibo. Experimental simulation

- technology of virtual prototype and its application in the design of operating mechanism of vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6): 1-3.
- [12] 彭搏, 肖登明. 断路器电寿命的在线监测[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(12): 38-41.
- PEMG Bo, XIAO Dengming. Online monitoring of the breaker's electrical life[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(12): 38-41.
- [13] RONG Mingzhe, LOU Jianyong, LIU Yiying. Static and dynamic analysis for contactor with a new type of permanent magnet actuator[J]. IEICE Trans. on Electronics, 2006, 89(8): 1210-1216.
- [14] 荣命哲, 娄建勇, 王小华. 永磁式接触器动触头动作特性仿真分析与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 109-113.
- RONG Mingzhe, LOU Jianyong, WANG Xiaohua. Simulation analysis and experimental research of operating characteristic for moving contact of contactor with permanent magnet actuator[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(1): 109-113.
- [15] BASSANI R, CIULLI E, PUCCIO F. Study of conic permanent magnet bearings[J]. Meccanica, 2002, 36(6): 745-754.
- [16] 骆虎, 游一民, 陈德桂, 等. 采用 ADAMS 与电磁系统的耦合优化永磁机构[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 335-337.
- LUO Hu, YOU Yimin, CHEN Degui, et al. Optimum design of permanent magnet mechanism by coupling ADAMS and electromagnetism system[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 335-337.
- [17] 杨武, 荣命哲, 王小华, 等. 考虑电动力效应的高压断路器动力学特性仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 103-107.
- YANG Wu, RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, et al. Dynamic simulation of high-voltage circuit breaker concerning electrodynamic force[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2003, 23(5): 103-107.
- [18] 鞠海林. 12 kV 真空断路器永磁机构的改进研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [19] 石运强. 永磁式真空断路器操作机构的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [20] 周丽丽, 方春恩, 李伟, 等. 27.5 kV 永磁机构真空断路器动作特性仿真与试验研究[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 214-216.
- ZHOU Lili, FANG Chun'en, LI Wei, et al. Simulation and testing of operating characteristic of 27.5 kV vacuum circuit breaker with permanent magnet actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 214-216.
- [21] 张宗伟. VS1 型真空断路器合闸线圈烧毁故障处理及对策[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 89-91.
- ZHANG Zongwei. Fault disposal and countermeasures for VS1-type vacuum circuit breaker closing coil burn-out[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 89-91.
- [22] 许沛丰, 高军委, 张予洛, 等. 对断路器电容器电容及介损测量预试方法的探讨[J]. 电力电容器, 2007, 28(4): 53-56.
- XUE Peifeng, GAO Junwei, ZHANG Yuluo, et al. Discussion about the way to measure capacitance and dielectric loss of circuit breaker[J]. Power Capacitor, 2007, 28(4): 53-56.
- [23] 张杰, 姜亚军, 郭大庆. 12 kV 真空断路器双线圈单稳态永磁机构的设计[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 34-38.
- ZHANG Jie, JIANG Yajun, GUO Daqing. Design of the double coils and single stable permanent magnetic actuator used in 12 kV vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 34-38.
- [24] RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, YANG Wu. Theoretical and experimental analyses of the mechanical characteristics of a medium-voltage circuit breaker[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 2005(152): 45-49.
- [25] RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, YANG Wu. Mechanical condition recognition of midium-voltage vacuum circuit breaker based on mechanism dynamic features simulation and ANN[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1904-1909.
- [26] 王小华. 真空断路器机械状态在线识别方法的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [27] 李志兵, 许沛丰, 刘华伟, 等. 断路器电容器介损随电压变化关系研究[J]. 电力电容器, 2007, 28(6): 26-30.
- LI Zhibing, XU Peifeng, LIU Huawei, et al. Research on dielectric loss variation of circuit-breaker capacitors with voltage[J]. Power Capacitor, 2007, 28(6): 26-30.
- 王帮田(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事中压开关设备、智能化电器设备的技术研究。
- 姜亚军(1976—), 男, 工程师, 主要从事智能化开关设备的技术研究。
- 张杰(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事智能化开关设备的技术研究。
- 刘莎(1989—), 女, 助理工程师, 主要从事电气设计工作。
- 刘定新(1982—), 男, 副教授, 主要从事电器智能化及气体放电等离子体研究。