

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.12.008

大功率弹簧操动机构设计开发与应用

杨志轶, 潘艳明, 蒋 舒

(思源电气股份有限公司, 上海 201108)

摘要: 弹簧操动机构具有结构简单、免维护、高可靠性等优点, 在高压断路器中得到广泛应用, 然而由于技术水平有限, 现有的弹簧操动机构不能满足 550 kV 及以上高压断路器的要求。笔者提出了基于功能设计与虚拟样机仿真的现代设计方法, 完成了一款储能时间小于 15 s、合闸(含分闸)操作功为 6 600 J、分闸操作功为 5 200 J 的弹簧操动机构的设计开发, 并成功应用在 550 kV SF₆ 断路器上。试验结果表明, 开发的弹簧操动机构完全可满足 550 kV SF₆ 断路器开断与关合的设计要求。

关键词: 弹簧操动机构; SF₆ 断路器; 功能设计; 虚拟样机仿真; 机构设计

Development and Application of High-power Spring Operating Mechanism

YANG Zhiyi, PAN Yanming, JIANG Shu

(Sieyuan Electric Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: The existing spring operating mechanism cannot meet the requirements of 550 kV or higher voltage circuit breaker due to the limitation of technical level. In this study, a modern design method based on the functional design and virtual prototype simulation was presented to develop a spring operating mechanism, whose storage energy time is less than 15 s, closing energy (including opening energy) is 6 600 J, and opening energy is 5 200 J. This spring operating mechanism has been applied in the 550 kV SF₆ circuit breaker. Test results showed that the spring operating mechanism could fully satisfy the design requirements of opening and closing operation for the 550 kV SF₆ circuit breaker.

Key words: spring operating mechanism; SF₆ circuit breaker; function design; virtual prototype simulation; mechanism design

0 引言

随着用电需求的快速增长, 不断发展更高电压等级的输电技术, 对实现远距离、大容量输电, 优化资源配置, 降低环境影响具有重要意义。作为高压断路器关键部件的操动机构是其核心基础部件单元。操动机构的工作性能和质量优劣, 对高压断路器的工作性能和可靠性起着极为重要的作用。其中弹簧操动机构以其结构简单、体积小、寿命长、对环境无污染、耐气候条件好、免运行维护、可靠性高等优点在高压断路器中得到广泛使用^[1-3], 然而由于技术水平所限, 现有的弹簧机构操作功不能满足 550 kV 及

以上高压断路器的要求, 需要进行大功率弹簧操动机构的技术研究与产品开发。提出了基于功能设计与虚拟样机仿真的现代设计方法, 开发了一款可满足 550 kV SF₆ 断路器开断与关合要求的大功率的弹簧操动机构。

1 基于功能设计与虚拟样机仿真的现代设计方法

采用“基于功能设计与虚拟样机仿真的现代设计方法”开发 550 kV SF₆ 断路器用大功率弹簧操动机构, 基本思路如下: 首先, 基于功能设计方法确定弹簧操动机构的关键特性参数, 包括机构的出力特性与负载特性、分合闸弹簧操作功、分合闸速度与时

收稿日期: 2017-05-24; 修回日期: 2017-07-27

间等参数,为整机结构方案设计确定设计输入。然后,从总体功能要求角度出发,对弹簧操动机构的结构方案关键模块单元进行理论分析和详细设计。最后,基于虚拟样机技术对弹簧操动机构进行运动学和动力学仿真分析。

1.1 功能设计方法

功能是指一个产品或者一个部件最终产生的作用,分为服务功能和限制功能。服务功能是对客户需求的最好的技术—工业化—经济三者的折衷,用于满足某些客户需求。服务功能是产品开发的输入,是客户购买的价值所在。限制功能是除了服务功能以外的其他所有对产品有要求的功能。限制功能来自外部需求和企业内部需求,例如产品的使用环境、外观、标准、安装方式等。

功能分析是一种用于识别客户从产品、系统、服务上期望提供的功能的方法。功能分析包含两个方面:①客户需求功能分析;②技术方案功能分析。

对产品全生命周期(包括订单获得、设计、制造、仓储、运输、安装、用户使用、维护、报废)进行功能分析,并根据其重要度与严重度进行功能优先级分级,其目的是用于确定产品开发中功能分析的优先次序、以及资源的合理分配等,确保客户满意度。

功能设计方法就是按照产品的功能要求,在对客户需求及内部需求(又称工程化需求)进行客户需求功能分析的基础上,获得系统或产品需求,进而对所定位产品进行技术方案功能分析,获得技术需求,最终将技术需求转化为产品的一种设计方法^[4-6]。功能设计方法的工作思路见图1。通过功能设计方法,获得产品的概念方案,进而形成3D实体模型。

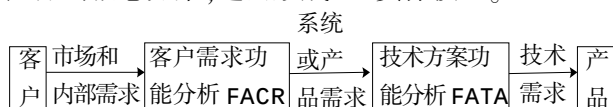


图1 功能设计方法工作思路

Fig. 1 Flow chart of functional design method

1.2 虚拟样机仿真分析方法

虚拟样机技术是基于机械系统运动学和动力学的动态仿真技术,通过建立虚拟样机仿真模型进行动力学仿真分析,可获得机构的分闸特性、各零部件之间的运动规律及相互之间的作用力。根据动力学仿真中获得的零部件的受力情况,对机构零件的强度进行核算;在设计初期可根据虚拟样机仿真结果进行结构设计优化,以验证是否满足设计要求,从而减少物理试验的次数,缩短产品研发周期,降低设计成本和样机试验成本^[7-12]。

2 弹簧操动机构原理

弹簧操动机构是以弹簧作为动力元件对断路器进行分闸及合闸操作的操动机构。主要由储能、控制、动力、传动等几部分组成^[2,13]。电动机通过减速装置和储能机构的动作,使合闸弹簧储存机械能。合闸时,合闸控制部分接受合闸信号后进行动作,使合闸动力施加于传动部分,使动触头合闸动作。合闸的同时给分闸弹簧储能。另一方面,当合闸弹簧释放能量、动触头合闸动作过程中或合闸动作接近完成时,电机立即接通电源动作,通过储能机构使合闸弹簧重新储能,以便为下一次合闸动作做准备。分闸时,分闸控制部分接受分闸信号后进行动作,使分闸动力施加于传动部分,使动触头分闸动作。机构能量传递图见图2。

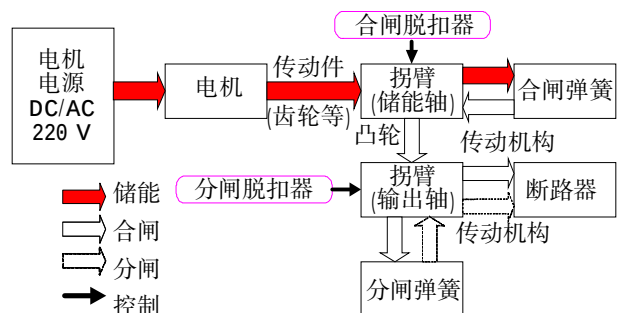
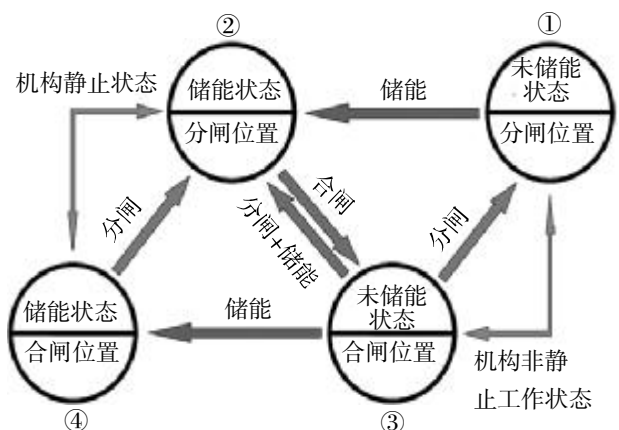


图2 机构能量传递路线

Fig. 2 Energy transfer route of spring operating mechanism

机构有4种工作状态,见图3^[14],通常机构长期运行状态是状态④,要求在需要的时候可以快速分闸(以及重合闸)。



注:①—未储能状态、分闸位置;②—储能状态、分闸位置;③—未储能状态、合闸位置;④—储能状态、合闸位置。

图3 机构状态图示

Fig. 3 States of operating mechanism

3 关键模块结构设计

以550 kV SF₆断路器用弹簧操动机构为例,介

绍弹簧操动机构关键模块的结构设计。

3.1 主要功能参数

总体功能需求是为 550 kV SF₆ 断路器提供合闸、分闸、重合闸操作,并保持在分、合闸状态的功能。主要功能参数有:

1)操作功:根据断路器本体设计需求,合闸速度 4 m/s,分闸速度 7 m/s,初步估算合闸(含分闸)操作功 6 600 J,分闸操作功 5 200 J。分闸时间 ≤ 30 ms,合闸时间 ≤ 100 ms。

2)机构输出轴旋转角度为 60°。

3)弹簧机构储能时间 ≤ 15 s。

3.2 分合闸弹簧设计

根据断路器本体运动质量、分合闸速度要求,初步估算合闸(含分闸)操作功 6 600 J,分闸操作功 5 200 J。为节省空间,分合闸弹簧采用双簧并联设计,且要求分合闸弹簧线径尽可能做到统一。分合闸弹簧设计见表 1。

表 1 分合闸弹簧设计参数

Table 1 Design parameters of closing/opening springs				
参数	合闸 弹簧 1	合闸 弹簧 2	分闸 弹簧 1	分闸 弹簧 2
线径/mm	30	22	30	22
中径/mm	198	136	198	136
原长/mm	640	640	537	537
F ₁ 作用力/N	5 120	3 046	6 875	3 992
F ₂ 作用力/N	31 059	18 479	31 742	18 430
F ₂ 合力/N	49 538		50 172	
储能/J	4 125	2 455	3 280	1 910
储能合计/J	6 580		5 190	
弹簧重量/kg	35.8	19.0	28.5	15.4
弹簧总重量/kg	54.8		43.9	

3.3 储能模块设计

储能模块设计包括减速传动设计、电机选型等设计。储能电机输出通过减速传动机构实现对合闸弹簧储能,减速机构采用全齿轮传动设计^[15]。储能机构的设计的关键包括:电机能够提供足够的功率和转速在规定时间内(15 s)内完成合闸弹簧的储能;储能完成时电机断电方式;由于存在惯性作用,电机断电后不能立即停止,需要在传动环节中设置离合装置。

在电机选型时,需考虑电机的励磁类型和工作制^[16]。这里选用交直流两用串励电动机,1 min 短时工作制。电机额定转速为 $n_1=10\ 000\text{ r/min}$,从电机轴到储能轴之间采用 5 级减速,整体储能减速机构的原理见图 4。单向轴承布置在传动轴 2 上,手动储能轴位于传动轴 3 上。齿轮 z_5 通过超越离合器与轴 5 连接,用于实现单向传动。齿轮 z_6 为不完全齿轮,当

储能完成时,齿轮 z_6 的缺齿段对应齿轮 z_5 ,用于实现储能完成时传动系统离合。各齿轮的参数见表 2。由此可以获得机构的传动比

$$i = \frac{z_2 z_3 z_4 z_5 z_6}{z_1 z_2' z_3' z_4' z_5'} = \frac{77 \times 82 \times 99 \times 88 \times 154}{21 \times 16 \times 21 \times 19 \times 16} \approx 3\ 949.22。$$

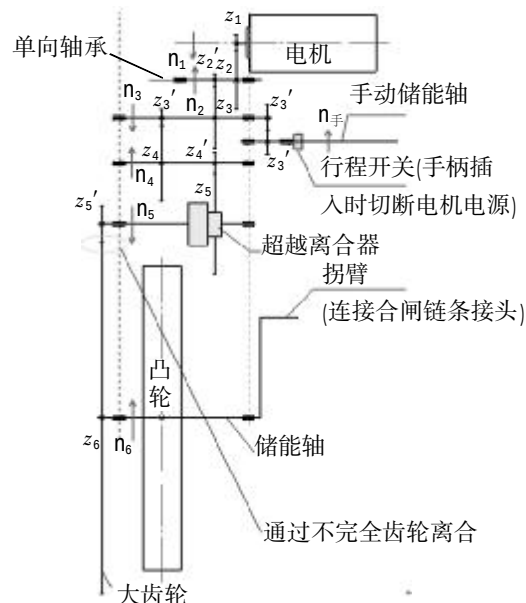


图 4 操动机构整体储能减速传动原理图

Fig. 4 The principle diagram of the reduction drive of operating mechanism

表 2 储能减速传动环节中各齿轮参数表

Table 2 Gear parameters of the reduction drive							
齿数	模数 m	分度圆 直径 d/mm	压力 角/(°)	变位 系数 x	轴间中心 距 a _{i-1+i} /mm	所在轴最小 直径 d _i /mm	
$z_1=21$	1.0	21.0	20	0.00	$a_{12}=49.00$	$d_1=12$ (电机输出轴)	
$z_2=77$	1.0	77.0	20	0.00		$d_2=12$	
$z_2'=16$	1.0	16.0	20	0.10	$a_{23}=49.00$	$d_3=12$	
$z_3=82$	1.0	82.0	20	-0.10		$d_4=25$	
$z_3'=21$	1.0	21.0	20	0.00	$a_{34}=60.00$	$d_5=40$	
$z_4=99$	1.0	99.0	20	0.00		$d_6=80$	
$z_4'=19$	1.5	28.5	20	0.00	$a_{45}=80.25$	$d_7=15$	
$z_5=88$	1.5	132.0	20	0.00			
$z_5'=16$	3.0	48.0	20	0.40	$a_{34}=255.00$		
$z_6=154$	3.0	462.0	20	-0.40			
$z_3''=32$	1.0	32.0	20	0.00	—		

由此可得储能轴的转速为 $n_6=n_1/i$, 完成一次储能(约 0.5 圈)的时间 $t = \frac{60 \times 0.5}{n_6} = 11.85\text{ s}$, 满足小于 15 s 的设计要求。

根据机构整体布局和合闸弹簧行程, 计算得到电机额定输出转矩为 $T_{2N}=0.80\text{ N}\cdot\text{m}$, 则电机的额定功率 $P_{\text{input}}=T_{2N}\omega=0.8 \frac{10\ 000 \times 2\pi}{60} = 837.76\text{ W}$, 圆整取

$P_N=900\text{ W}$ 。

3.4 合闸脱扣系统设计

电机对合闸弹簧进行储能后, 机构保持在合闸弹簧储能状态, 储能拐臂扣接在合闸脱扣系统的一级合闸杠杆上。合闸脱扣系统见图 5, 合闸脱扣系统采用 3 级脱扣传动。当需要为断路器进行合闸操作时, 合闸脱扣系统的电磁铁得电, 使得合闸脱扣系统脱扣, 在合闸弹簧的弹簧力作用下, 图 5 中的大凸轮进行顺时针运动, 由凸轮驱动输出拐臂上的滚子运动, 从而使输出拐臂围绕输出轴逆时针运动, 见图 6, 实现断路器本体的合闸操作。

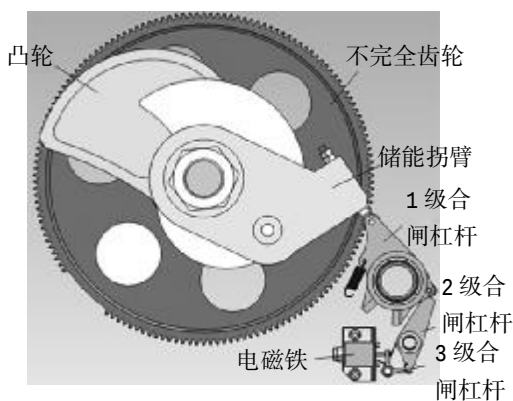


图 5 合闸脱扣系统

Fig. 5 Closing operating tripping system

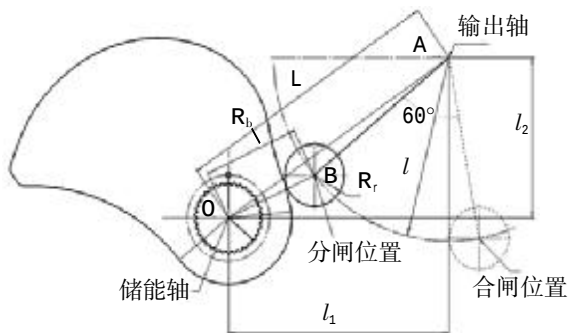


图 6 凸轮传动关系示意图

Fig. 6 Cam transmission relationship diagram

3.5 分闸脱扣系统设计

机构的输出是通过输出轴的旋转运动进行断路器本体的合闸和分闸操作。输出轴的合闸位置是靠分闸脱扣系统进行合闸保持, 在需要进行分闸操作时, 分闸脱扣系统的电磁铁得电, 从而使分闸脱扣系统进行脱扣来实现机构的分闸操作的^[7]。因分闸操作功、操作力比较大, 分闸脱扣系统采用 4 级脱扣传动, 见图 7。

3.6 整体结构

机构整体结构 3D 模型图见图 8, 物理样机照片见图 9。

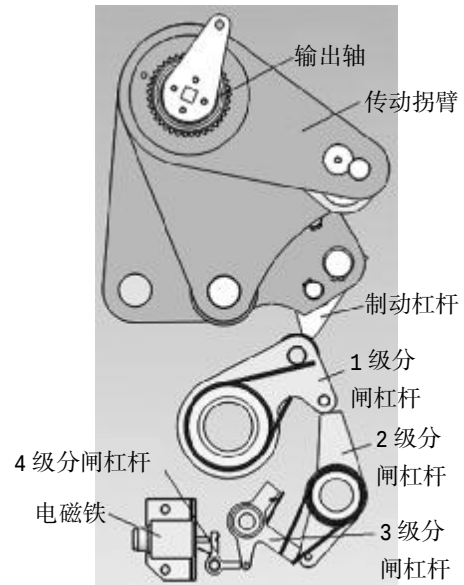


图 7 分闸脱扣系统

Fig. 7 Opening operating tripping system

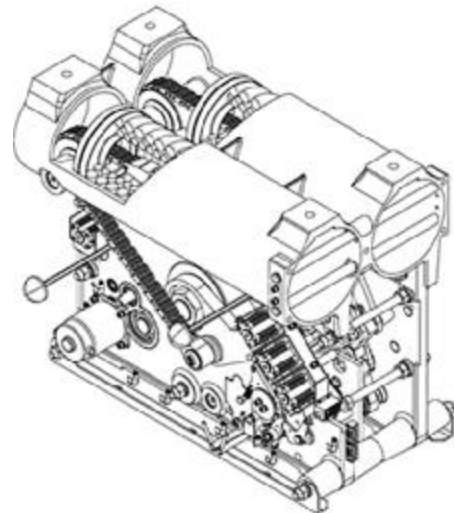


图 8 机构 3D 模型图

Fig. 8 3D model of operating mechanism



图 9 实物样机照片

Fig. 9 The physical prototype photos

4 550 kV SF₆ 断路器上的应用与验证

上述弹簧操动机构已成功应用在自主研发的

550 kV SF₆ 断路器上,该断路器是采用双断口、双动触头系统的自能式灭弧室设计。试验样机见图 10。



图 10 550 kV SF₆ 断路器样机

Fig. 10 550 kV SF₆ circuit breaker prototype

试验结果如下:机构输出角度 60°, 储能时间 10~12 s, 断路器合闸速度 3.8~4.2 m/s, 合闸时间 (80±8) ms; 分闸速度 6.8~7.2 m/s, 分闸时间 (23±3) ms, 完全满足设计要求。该样机已顺利通过了国家高压电器质量监督检验中心、荷兰 KEMA 输配电试验中心的各项型式试验要求,机械寿命达 10 000 次。

5 结语

以 550 kV 高压断路器弹簧操动机构为研究对象,基于功能设计与虚拟样机仿真的现代设计方法,完成了一款储能时间小于 15s、合闸(含分闸)操作功为 6 600 J、分闸操作功为 5 200 J 的弹簧操动机构的设计开发,并成功应用在 550 kV SF₆ 断路器上。试验结果表明,设计计算值能满足工程实际需要,和试验实测值基本吻合,综合技术性能达到了设计预期要求。目前该机构已随 550 kV GIS 和罐式断路器投入工程生产,应用和运行在多个 550 kV 工程项目中。作者为设计出满足高电压等级断路器的弹簧操动机构建立了一套系统的设计理论与设计方法,将“基于物理样机试验的传统设计方法”带入“基于功能设计与虚拟样机仿真的现代设计方法”,不仅可大幅度缩短产品研发周期,而且降低设计成本和样机试验成本,提高企业自主创新能力和企业竞争力。

参考文献:

- [1] 徐国政,张节容,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.
- [2] 苑舜. 高压断路器弹簧操动机构[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
YUAN Shun. High voltage circuit breaker spring operating mechanism[M]. Beijing:China Machine Press,2001.

- [3] 陈保伦,文亚宁. 断路器弹簧操动机构介绍[J]. 高压电器,2010,46(10):75-80.
CHEN Baolun,WEN Yaning. Introduction of spring operating mechanism for CB[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(10):75-80.
- [4] 丁立军,戴曙光,孟青云,等. 基于产品功能分析与结构优化的机械设计方法[J]. 机电工程技术,2014,43(5):57-60.
DING Lijun,DAI Shuguang,MENG Qingyun,et al. A mechanical design method based product function analysis and structure optimization[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2014,43(5):57-60.
- [5] 刘杰,侯智,廖林清. 基于功能分析的产品创新方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2004(8):13-15.
LIU Jie,HOU Zhi,LIAO Linqing. Research on product innovation method based on function analysis[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique,2004(8):13-15.
- [6] 姚海,鲍劲松,金焯. 产品功能需求的分类及分析方法[J]. 机械设计与研究,2009,25(3):7-9.
YAO Hai,BAO Jinsong,JIN Ye. Research on taxonomy and analysis of product function requirements from customers[J]. Machine Design and Research,2009,25(3):7-9.
- [7] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
LI Zenggang. Introduction and examples of ADAMS[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2008.
- [8] 苗红霞,王宏华,齐本胜. 高压断路器操动机构的动力学建模与仿真研究[J]. 计算机工程与应用,2010,45(17):212-215.
MIAO Hongxia,WANG Honghua,QI Bensheng. Research on dynamic modeling and simulating of operating mechanism of high-voltage circuit breaker[J]. Computer Engineering and Applications,2010,45(17):212-215.
- [9] 吴冬青,唐文献,李莉敏. 虚拟样机技术在断路器开发中的应用研究[J]. 机电一体化,2003(4):22-25.
WU Dongqing,TANG Wenxian,LI Limin. Research on application of virtual prototyping in design of breaker[J]. Mechatronics,2003(4):22-25.
- [10] 张应中,徐可新,阎崇毅,等. 高压断路器弹簧操动机构的优化与仿真[J]. 高压电器,2014,50(4):66-71.
ZHANG Yingzhong,XU Kexin,YAN Chongyi,et al. Optimization and simulation of the spring actuator for circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(4):66-71.
- [11] 崔彦彬,高志,曹云鹏. 基于 ADAMS 的高压断路器操动机构动力学仿真研究[J]. 机械设计与制造,2006(4):66-67.
CUI Yanbin,GAO Zhi,CAO Yunpeng. Dynamics simulation study on application ADAMS for the operating device for HV circuit[J]. Machinery Design & Manufacture,2006(4):66-67.

- [12] 苏东海, 刘 海. 新型大功率弹簧操动机构动力学仿真分析[J]. 制造业自动化, 2014, 36(4): 89-91.
SU Donghai, LIU Hai. Dynamics simulation and analysis of new high power spring operating mechanism[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(4): 89-91.
- [13] 楼家法. 高压开关机构设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
LOU Jiafa. Design of high voltage switchgear mechanism [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981.
- [14] 阿海珐. AREVA(阿海珐)弹簧操动机构简介[Z]. 法国: 阿海珐, 2007.
AREVA. The introduction of AREVA spring operating mechanism[Z]. France: AREVA, 2007.
- [15] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 第1卷. 北京: 化学工业出版社, 2011.
QIN Datong, XIE Liyang. Handbook of modern mechanical design[M]. First Volume. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [16] 尹 康, 马 峰, 李 欢, 等. 高压开关操动机构中直流电动机的应用[J]. 电器制造, 2014(7): 88-91.
YIN Kang, MA Feng, LI Huan, et al. The application of dc motor in high voltage switch operating mechanism [J]. Electrical Manufacturing, 2014(7): 88-91.
- [17] 范立新. 高压断路器操动机构的自由脱扣装置分析[J]. 机电信息, 2013(36): 52-53.
FAN Lixin. The analysis of free tripping device for high voltage circuit breaker operating mechanism [J]. Mechanical and Electrical Information, 2013(36): 52-53.
- 杨志轶(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事高压开关产品的设计开发与基础研究等工作。

(上接第 47 页)

- LIN Xin, WANG Deshun, XU Jianyuan. Linear servo motor operating mechanism and control technique for high-voltage circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 137-141.
- [10] 李光泉, 葛红娟, 刘天翔, 等. 永磁同步电机调速系统的伪微分反馈控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 18-23.
LI Guangquan, GE Hongjuan, LIU Tianxiang, et al. Pseudo derivative feedback control for PMSM drive system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 18-23.
- [11] BOSMA A, THURESON P O. A new reliable operating mechanism for HVAC circuit-breakers[C]//Transmission and Distribution conference and exposition. Atlanta, USA: [s.n.], 2001: 573-577.
- [12] BOSMA A, KOERBER F J, CAMERONI R, et al. Motor drive with electronic control for HVAC circuit-breakers[C]//CIGRE. Paris, France: CIGRE, 2002: 13-203.
- [13] 张先飞, 郑建勇, 胡敏强, 等. IGBT 串并联驱动信号补偿的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 187-191.
ZHANG Xianfei, ZHENG Jianyong, HU Minqiang, et al. Compensation of dynamic series and paralleling driver signal of IGBT[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 187-191.
- [14] 宋平岗, 官二勇. 级联多电平逆变器全调制比的特定谐波消除[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 81-87.
SONG Pinggang, GUAN Eryong. Selective harmonic elimination for all modulation indices of multilevel cascaded converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 81-87.
- 白世军(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事智能变电站电磁兼容、电子式互感器及分布式发电与微电网的研究工作(通信作者)。