

# 控制与保护开关电器操作机构 动力学仿真研究

黄世泽<sup>1</sup>, 郭其一<sup>2</sup>, 贺雅洁<sup>2</sup>, 窦晓斌<sup>2</sup>, 仇仙者<sup>3</sup>

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804;

2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804;

3. 浙江中凯科技股份有限公司, 浙江 温州 325604)



黄世泽(1983—), 男, 助理教授, 博士, 研究方向为虚拟样机及其在低压电器中的运用、智能交通系统。

**摘要:** 利用虚拟样机技术建立控制与保护开关电器(CPS)操作机构动力学仿真模型,合理施加手动操作力及故障脱扣力,仿真正确有效地完成了操作机构执行开关合闸、分闸、脱扣、再扣功能的动作过程。分析扭簧刚度系数及侧凸轮形状对操作机构动作性能的影响,可辅助完成操作机构的故障点定位并确定关键参数的设置范围。

**关键词:** 控制与保护开关电器; 操作机构; 动力学仿真; 虚拟样机技术

**中图分类号:** TM 564 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8188(2014)20-0024-05

## Dynamic Simulation and Study for Operating Mechanism of Control and Protective Switching Device

HUANG Shize<sup>1</sup>, GUO Qiyi<sup>2</sup>, HE Yajie<sup>2</sup>, DOU Xiaobin<sup>2</sup>, QIN Xianzhe<sup>3</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. Zhejiang Jonk Technology Co., Ltd., Wenzhou 325604, China)

**Abstract:** Based on control and protective switching device(CPS) dynamic models of operating mechanism established by virtual prototyping, the simulation finished the processes of switching on, switching off, drop out, resetting accurately and effectively by applying reasonable analog manual operation forces and fault tripping force. The simulation also analyzed the impact of torsion spring's stiffness coefficient and the location of side cam's centroid on the dynamic performance of operating mechanism, and the results of simulation could assist to position the cause of the malfunction and formulate the setting range of the objective parameter.

**Key words:** control and protective switching device (CPS); operating mechanism; dynamic simulation; virtual prototyping technology

## 0 引言

多功能集成化控制与保护开关电器(Control and Protective Switching Devices, CPS)主要由操作机构、电磁传动机构、主电路接触组以及热磁脱扣器等部件组成<sup>[1]</sup>。作为实现CPS主电路与控制电路通断的控制功能和过载、过流、短路等故障脱扣保护功能的动作执行机构,操作机构内部构件之间动作的协调配合直接影响到CPS实现控制

与保护的工作性能。作为CPS工作过程中力的传递机构,操作机构内部零件结构形式各异、动作速度快、运动关系复杂、影响因素繁多,因此要保证产品工作可靠性,对CPS操作机构动态特性及影响其可靠性的因素进行分析研究显得尤为重要。在文献[2-4]中,虚拟样机技术成为操作机构设计的一种新方法;文献[5]研究了分断弹簧、关键轴位置、杆件质心位置和质量等对操作机构性能的影响,并通过对这些参数的优化设计提高了

郭其一(1961—)教授,博导,研究方向为新型低压电器。

贺雅洁(1989—)硕士研究生,研究方向为虚拟样机技术及其在CPS中的应用。

机构的打开速度。文献[6]则研究了电动斥力等对操作机构打开速度的影响。实际上,除了文献中介绍的这些影响操作机构性能的因素外,在机构打开过程中扭簧刚度和侧凸轮质心位置同样对操作机构的性能产生非常重要的影响。关于这方面的研究工作,国内外的文献还十分少见。

本文以 KBO 系列 CPS 操作机构为研究对象,对比实际产品建立操作机构虚拟样机模型并合理添加约束及载荷,实现 CPS 操作机构合闸、分闸、脱扣、再扣 4 种运动过程的仿真模拟。通过产品实际运动过程验证了仿真的正确性和有效性,并在此基础上分析扭簧刚度和侧凸轮质心位置对操作机构工作性能的影响并确定参数设置范围。

## 1 CPS 操作机构工作原理

CPS 操作机构的组成部分包括安装板和面壳,面壳上标识有自动控制位置(AUTO)、脱扣位置(TRIP)、分断位置(OFF)、复位位置(RESET)。安装板内部装有侧凸轮、侧止动器、中凸轮、中止动器、摇架、轴及弹簧等构件,各构件合理装配、协调动作,通过力的传递实现操作机构作为执行机构的功能。此外,安装板内还装有与 CPS 的电磁传动机构并联的摇臂使 CPS 实现控制的目的,与热磁脱扣器并联的过载推杆使 CPS 实现过载、过流保护功能;与主电路接触组并联的短路推杆使 CPS 实现短路实时分断主电路的功能<sup>[7]</sup>。CPS 操作机构物理样机模型如图 1 所示。

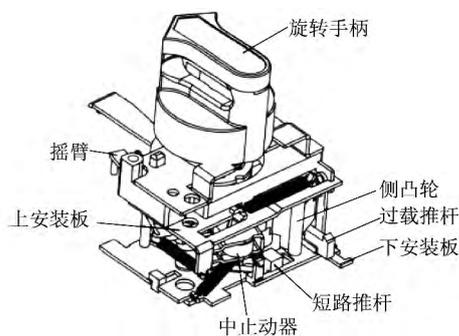


图 1 CPS 操作机构物理样机模型

## 2 CPS 操作机构虚拟样机建模

### 2.1 零件建模与处理

CPS 操作机构动作过程瞬间完成,包含高速的碰撞,涉及因素较多,因此在 UG 环境下精确建

模<sup>[8]</sup>。隐藏对仿真无影响的构件,将简化后的模型导入 ADAMS,然后对各构件修改名称及颜色以便识别,新建 Nylon PA66 材料(需定义杨氏模量、密度、泊松比)并赋值给操作机构内部凸轮、止动器等塑料件,安装板、轴等材料属性,选取 ADAMS 内置钢材<sup>[9]</sup>。参照实物各弹簧位置添加弹簧,准确定义弹簧的刚度系数、预作用力以及预作用力下的长度,以保证弹簧有正确的输出力特性。

### 2.2 约束的合理添加

样机约束的正确添加很重要,要充分考虑实际操作机构中可能存在的约束并对构件逐步添加以保证没有约束错误<sup>[8]</sup>。CPS 操作机构中的约束关系包括固定约束、旋转约束、滑移约束、碰撞或接触约束。

### 2.3 动力的合理施加

针对不同位置的操作机构,施加合理的模拟手动操作力或故障脱扣力,可仿真模拟操作机构合闸、分闸、脱扣、再扣 4 个运动过程。

(1) 合闸:以手柄指向末端标记点与转动中心标记点关于 X 轴的距离为第一自变量,以恒定力 13 N 为因变量进行 AKISPL 插值施加手柄操作力;

(2) 分闸:采用阶跃函数生成一短时大脉冲力模拟手动操作力;

(3) 脱扣:施加在过载推杆上的故障脱扣力由阶跃函数生成一个幅值为 5 N 的小脉冲力模拟;

(4) 再扣:由于再扣过程中构件运动轨迹存在重合部分,利用样条插值方法施加手动操作力无法再以标记点间的距离为自变量实现,所以时间为第一自变量,以两个方向相反的恒定力为因变量,合理选择施加力的时间节点进行 AKISPL 插值施加手柄操作力。

## 3 CPS 操作机构动态特性的仿真

### 3.1 CPS 操作机构动力学仿真模型

#### 3.1.1 合闸过程工作原理(OFF→AUTO)

分断位置的操作机构虚拟样机模型如图 2 所示。当手柄旋钮位于分断位置时,侧止动器扣住侧凸轮,弹簧 1 拉伸储能。手动操作旋钮使中凸轮在手动力及扭簧的作用下顺时针旋转直至中止动器逆时针旋转扣住中凸轮,摇臂在中止动器带动下逆时针旋转,释放对电磁传动机构导电夹的

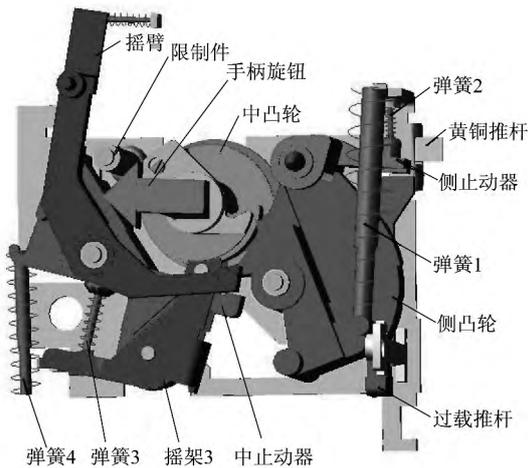


图2 分断位置操作机构虚拟样机模型

压力使触点闭合,控制回路导通使得铁心吸合并释放对主电路触头支持的压力,触头闭合接通主电路完成合闸动作。

3.1.2 分闸过程工作原理(AUTO→OFF)

自动控制位置的操作机构虚拟样机模型如图3所示。

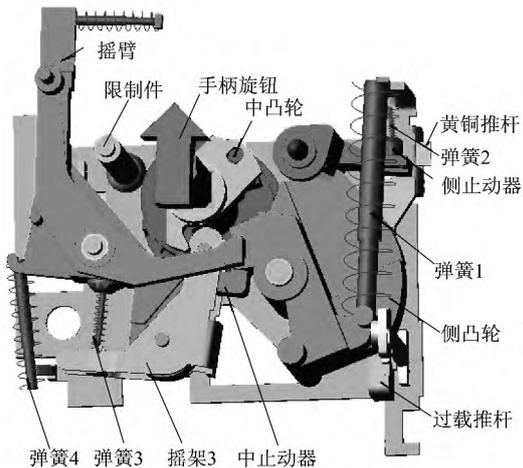


图3 自动控制位置操作机构虚拟样机模型

当手柄旋钮位于自动控制位置时,侧止动器扣住侧凸轮,中止动器扣住中凸轮,手动操作旋钮使中凸轮逆时针旋转顶开中止动器后撤掉手动力,中凸轮在扭簧作用下旋转至分断位置被侧凸轮限位停止动作,中止动器被顶开后顺时针旋转并带动摇臂同向旋转,压迫导电夹使电磁传动机构触头分离,断开控制回路从而导致铁心释放并压迫主电路触头支持,主触头分离,断开主电路完

成分闸动作。

3.1.3 脱扣过程工作原理(AUTO→TRIP)

脱扣位置的操作机构虚拟样机模型如图4所示。当CPS处于接通状态带动负载正常工作时,若出现过载、过流等故障,侧止动器受到来自过载推杆的力而逆时针旋转,旋转一定角度后,侧凸轮与侧止动器脱扣并在弹簧1拉力作用下逆时针旋转。侧凸轮顶开中止动器使得中止动器对中凸轮的限位消失,中凸轮在扭簧的作用下逆时针旋转直至碰撞侧凸轮停止运动,中止动器被侧凸轮顶开而顺时针旋转并带动摇臂同向旋转,再通过操作机构与电磁传动机构及主电路接触组的并联动作完成脱扣动作。

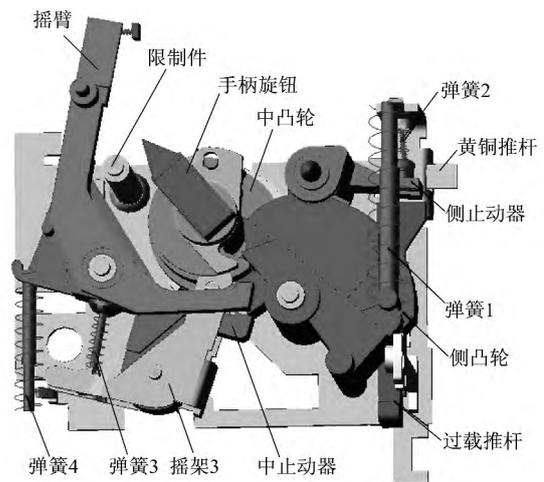


图4 脱扣位置操作机构虚拟样机模型

3.1.4 再扣过程工作原理(TRIP→RESET→AUTO)

根据施加手动操作力的不同可将再扣过程分为三步:

(1) 手动操作旋钮逆时针旋转由脱扣位置到分断位置再到复位位置,这一过程手动操作力持续存在且侧凸轮反向旋转至最大角度位置。

(2) 撤掉手动操作力,中凸轮会在扭簧作用下顺时针旋转至分断位置受侧凸轮限位而停止动作,侧凸轮在拉簧作用下回转一定角度被侧止动器扣住。

(3) 添加反向手动操作力使旋钮持续顺时针旋转至自动控制位置。第三步构件间运动及配合与合闸过程相同。

### 3.2 CPS 操作机构动力学仿真结果分析

按照工程实际在虚拟环境下完成上述工作后,即可在 ADAMS 后处理阶段观察分析各构件的旋转角度、角速度以及平移位移、速度、加速度等动态信息。按照仿真理论,若仿真构件几何形体的质量、质心位置、惯性矩和惯性积同实际构件相同,则仿真结果是等价的<sup>[8]</sup>。本文在未考虑构件装配中的碰撞、摩擦等因素但不影响横向讨论的前提下,得到如图 5~图 8 所示操作机构合闸、分闸、脱扣、再扣过程中关键对象构件的运动过程旋转角度曲线图。

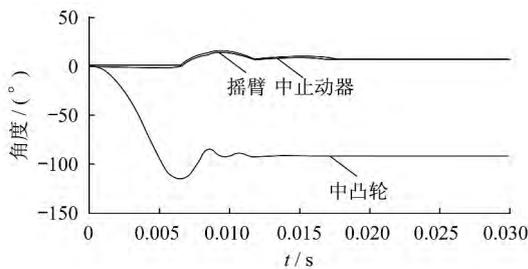


图 5 合闸过程中凸轮、中止动器、摇臂旋转角度

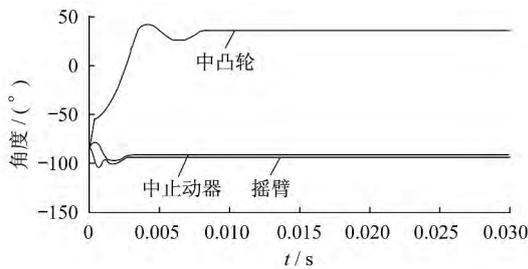


图 6 分闸过程中凸轮、中止动器、摇臂旋转角度

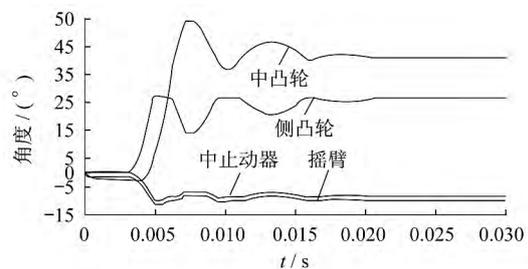


图 7 脱扣过程中凸轮、侧凸轮、中止动器、摇臂旋转角度

分析图 8 可知,中凸轮的脱扣角度为  $41^\circ$ ,而实际脱扣角度为  $45^\circ$ ,因此在理想仿真条件下,CPS 操作机构各构件旋转角度与工程实际十分相近,构件之间由于碰撞等相互作用造成的振动等现象在无阻尼的纯粹条件下较之现实情况更加明

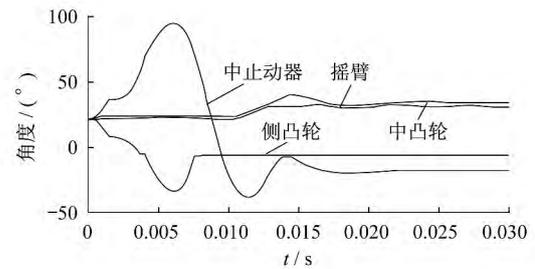


图 8 再扣过程中凸轮、侧凸轮、中止动器、摇臂旋转角度

显。这非但不会影响仿真过程的正确性与有效性,而且会更加直观地体现构件间的相互作用关系。

## 4 弹簧刚度及构件形状对操作机构动作性能的影响

CPS 操作机构的动作速度是影响其工作性能的主要方面,而操作机构动作速度又受到弹簧刚度系数及构件形状等因素的影响。构件形状由构件的质心位置、质量决定<sup>[10]</sup>。本文以操作机构脱扣动作仿真过程为例,分析扭簧刚度系数及构件质心位置对操作机构动作性能的影响,仿真确定关键参数并得到了物理样机试验验证。

### 4.1 扭簧的刚度系数对动作性能的影响

位于中凸轮与限制件之间的扭簧在操作机构位于自动控制位置时属于储能状态,过载或过电流导致的故障脱扣动作过程中,中凸轮转至最大角度所用时间决定了操作机构动作的快速性,转至稳定状态所用时间决定了操作机构动作的可靠性,确定扭簧刚度系数需兼顾操作机构动作快速性及可靠性两种工作性能。改变扭簧的刚度系数分别取  $0.391\ 984\ 6$ 、 $0.491\ 984\ 6$ 、 $0.591\ 984\ 6$ 、 $0.691\ 984\ 6$ 、 $0.791\ 984\ 6$ 、 $0.891\ 984\ 6\ \text{N}\cdot\text{mm}/^\circ$ 。不同刚度系数下中凸轮的旋转角度曲线如图 9 所示,由图 9 可知,中凸轮动作信息以及旋转至稳定状态所用时间分别为不稳定  $20.4\ \text{ms}$ 、较不稳定  $19.8\ \text{ms}$ 、较稳定  $19.3\ \text{ms}$ ,中凸轮到达最大旋转角度所用时间分别为  $7.6$ 、 $8.0$ 、 $7.5$ 、 $7.0$ 、 $6.9$ 、 $6.7\ \text{ms}$ 。

仿真结果表明,在一定取值范围内,操作机构动作速度随着扭簧刚度系数的提高而提高,但是在这一范围之外,过小的扭簧刚度系数会导致动作状态的不稳定,过大的扭簧刚度系数对操作机

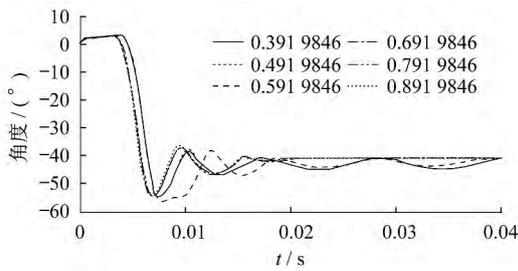


图9 不同刚度系数下的中凸轮脱扣角度

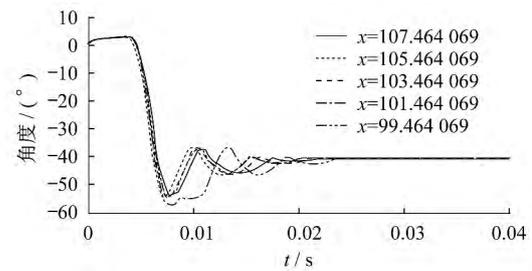


图10 不同侧凸轮质心位置下的中凸轮旋转角度

构动作快速性影响不大。因此结合仿真结果及分析,将扭簧刚度系数定位于 0.691 984 6 ~ 0.791 984 6 N · mm/°。物理样机试验中取扭簧刚度系数为 0.791 984 6 N · mm/°,扭簧材料选择 0.9 碳素弹簧钢丝,有效圈数为 3.5,自动控制位置扭簧储能角度为 145°,结果表明操作机构有良好的动作快速性与可靠性。

#### 4.2 侧凸轮的质心位置对动作性能的影响

CPS 操作机构内部构件形状各异、结构形式复杂。在 ADAMS 中,刚体构件的运动状态是根据构件质心在计算坐标系的位置,改变构件质心位置即可改变构件的形状。以侧凸轮质心位置为变量,分析其对操作机构动作性能的影响。观察虚拟样机模型得知侧凸轮内旋转轴质心的 Y 坐标与侧凸轮质心的 Y 坐标相近。以侧凸轮质心 X 坐标为变量,根据侧凸轮结构形式,调整侧凸轮质心 X 坐标向侧凸轮内旋转轴质心靠拢,仿真可得不同侧凸轮质心 X 坐标下的中凸轮、侧凸轮旋转角度曲线图分别如图 10、图 11 所示。

分析图 10 及图 11 可知,在一定距离内,中凸轮和侧凸轮旋转到最大角度以及到达稳定状态的时间都随着侧凸轮质心靠近侧凸轮内旋转轴质心而减小,然而当侧凸轮质心与侧凸轮内旋转轴质心 X 坐标几近相同时,操作机构的动作过程发生变异,凸轮旋转过程振动增大且到达稳定时间延长,严重影响了操作机构的动作性能。因此,仿真结果可以指导产品制造环节将侧凸轮质心适当靠近旋转轴中心位置,重新分配侧凸轮质量分布比重,不仅可以提高产品工作可靠性、提高合格率以及整体工艺制造水平,而且可以降低构件材料使用量,符合产品朝着高速化、轻型化发展的趋势。

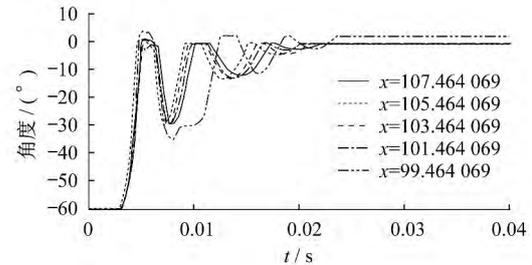


图11 不同侧凸轮质心下的侧凸轮旋转角度

## 5 结 语

本文利用 ADAMS 软件建立 CPS 操作机构的动力学仿真模型,仿真正确有效地模拟了操作机构作为动作执行机构而实现 CPS 各功能的动作过程,并得到物理样机动作过程的验证。以操作机构完成过载脱扣这一动作过程为例,仿真分析了扭簧刚度系数与侧凸轮质心 X 坐标位置对操作机构动作快速性及可靠性的影响,确定关键参数的取值范围,为改良制造水平、提升工艺能力、提高产品合格率提供理论指导与工程支持。

### 【参考文献】

- [1] 郭其一,黄世泽,王文均,等.一种模块化的多功能电器:中国,发明专利,200910252215.1 [P]. 2010-12-22.
- [2] 郑建荣. ADAMS-虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [3] 陈德桂. 虚拟样机成为开发新型低压电器的关键技术[J]. 低压电器,2002(6):3-7.
- [4] CHEN D G,JI L,WANG Y F,et al. Analysis and optimization for the operating mechanism of air circuit breaker[J]. IEICE Transactions on Electronics,2008,91(8):1280-1285.

(下转第 59 页)

表3 4种无功补偿方式下补偿容量一览表

发电功率百分比	100%	50%	0%
按无功消耗量补偿	3 337 (19.07%)	1 123 (6.4%)	147 (0.84%)
并网点功率因数 $\pm 0.98$ 可调	51 ~ 7 015 (40%)	639 ~ 2 885 (16.5%)	138 ~ 156 (0.89%)
并网点电压调+5%	7 598(43%)		
补偿至送出线路一半	容性 3 690(21.09%) 感性 255.5(1.5%)		

由表3可以看出,依据电站内部无功消耗进行补偿的容量最小,为电站总容量的19.07%;补偿至送出线路一半处所需的无功容量为总容量的21.09%;按照并网点功率因数和电压调整要求进行补偿时所需容量较大,为电站总容量的40%和43%左右,补偿容量差别比较大的原因是补偿目标不同。

由于一般的小型光伏电站不参与系统的无功、电压调节,因此,只需补偿自身所消耗的无功功率,补偿目标为保证并网点的功率因数在1附近,因此光伏电站需配置20%左右的无功补偿;但大中型的光伏电站对系统的影响较大,电网要求对其进行直接调度以保证系统的稳定,所需配置的无功补偿装置容量考虑在40%左右。

## 5 结 语

本文在分析了光伏电站基本结构运行方式的基础上,结合某光伏电站的接线和运行情况的实测数据,对该算例中发电功率分别为0%、50%、100%时,各节点的功率流和功率因数进行了计算和分析。结果表明,理论计算与实际数据基本吻合,且一般情况下白天不进行无功补偿时,电站并网点和公共连接点的功率因数均高于0.98,但电站夜间不发电时由于变压器处于空载状态,此时

功率因数较低。

最后,本文按照提出的4种补偿方案对电站所需无功补偿容量进行了计算,计算结果为光伏电站中无功补偿装置的配置容量提供了一定的理论参考。

此外,光伏电站还可以利用逆变器自身的剩余容量发出一定的容性或感性无功功率,减少投入成本,虽然其输出无功受到逆变器自身容量的限制,同时受所发有功功率多少的影响,但如何通过控制为系统提供无功支撑,也是未来进一步值得研究的问题<sup>[9]</sup>。

## 【参 考 文 献】

- [1] 罗如意,林晔.世界光伏发电产业的发展与展望[J].能源技术,2009,30(5):290-302.
- [2] 赵为.太阳能光伏并网发电系统的研究[D].合肥:合肥工业大学,2003.
- [3] 郑志杰,李磊,王葵.大规模光伏并网电站接入系统若干问题[J].电网与清洁能源,2010,26(2):74-76.
- [4] 姚天亮,郑昕,杨德洲,等.打捆并网方式下光伏电站无功补偿及谐波问题[J].电力建设,2011,32(8):24-28.
- [5] 姚致清,张茜,刘喜梅.基于PSCAD/EMTDC的三相光伏并网发电系统仿真研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(17):76-81.
- [6] 邓浩,周念成,王强钢,等.光伏并网功率调节系统的建模与仿真[J].电力系统保护与控制,2012,40(17):62-66.
- [7] 单渊达.电能系统基础[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [8] 李东辉,王鹤雄,朱晓丹,等.光伏并网发电系统几个关键问题的研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):208-214.
- [9] 王海宁,苏建徽.光伏并网功率调节系统[J].中国电机工程学报,2007,27(2):75-79.

收稿日期:2014-07-25

(上接第28页)

- [5] 陈德桂,刘庆江,康艳.塑壳断路器操作机构分断速度的影响因素[J].低压电器,2005(12):9-12.
- [6] ITO S, KAWASE Y, MORI H. 3-D finite analysis of repulsion forces on contact system in low voltage circuit breakers[J]. IEEE Transaction on Magnetic, 1996, 32(3):1677-1680.
- [7] 邱建洪,潘礼纲,马贵智,等.一种控制与保护开关电器的操作机构:中国,发明专利,200520013030.2[P].2007-01-31.
- [8] 陈德桂,李兴文.低压断路器的虚拟样机技术[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [9] 郑建荣. ADAMS—虚拟样机技术入门与提高[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [10] 张静菽,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.

收稿日期:2014-06-18