

Simulation Computation of Repulsion Forces in the CPS Conductive Loop

Shu Lusi / Guo Qiyi / Huang Shize / Qiu Xianzhe

CPS 导电回路电动斥力的仿真计算

舒露丝¹ / 郭其一¹ / 黄世泽² / 仇仙者³

1. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200331
2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200331
3. 浙江中凯科技股份有限公司, 浙江 温州 325604

摘要 额定运行短路分断能力(I_{cs})是CPS的一个重要技术指标。影响短路分断能力的因素很多,其中一个重要的因素就是触头系统的电动斥力,在短路分断过程中,电动斥力随着电流和距离的变化而变化,因此准确地计算触头电动斥力对分析提高CPS的短路分断能力有重要意义。基于电流-磁场-电动斥力的关系方程,运用有限元分析软件ANSYS分析电流、导电回路结构、动静触头位置对电动斥力的影响,为后期KBO产品的设计和 optimization 提供参考。

关键词 动静触头 有限元仿真 电动斥力

DOI:10.13857/j.cnki.cn11-5589/tu.2015.05.008

Abstract Rated-operation short-circuit breaking capacity (I_{cs}) is an important technical index of CPS. There are many factors that influence the short-circuit breaking capacity, like the repulsion force of the contact system, which is an important factor. The repulsion force varies with the current and distance during short-circuit breaking. Therefore, accurately computing the repulsion force of the contact system is very helpful for improving the short-circuit breaking capacity of CPS. Based on the equation describing the relation between the current, magnetic field and the repulsion force, the finite element analysis software ANSYS is employed to simulate the system. In addition, the effect of the current, the structure of the conductive loop as well as the positions of the moving and fixed contacts on the repulsion force are analyzed to provide theoretical foundation for subsequent design and optimization of the KBO products.

Keywords moving and fixed contacts, finite element analysis, repulsion force

0 引言

控制与保护开关电器(CPS)是一种同时具备控制与保护功能的集成式的模块化多功能低压电器,集合了断路器、接触器、热继电器及隔离器的功能^[1]。在国内的众多CPS产品中,KBO系列出现较早。 I_{cs} 作为CPS的一个重要技术指标,在短路电流产生时,要求其能够在设定的时间内承受相应的电

动力和温升等作用。触头系统的电动斥力与短路分断能力密切相关,在短路分断过程中,电动斥力随着电流和距离等因素的改变不断变化,因此准确地计算触头电动斥力,研究其在短路电流作用下的影响因素尤为重要。

直接以Holm公式为基础,分析求得触头间的电动斥力,忽略了触头间的电流线收缩现象,这种方法已经对模型进行简化,使得分析结果与实际情

况存在一定的差距,进而影响磁场分布^[2]。通过建立圆柱体导电桥模型求得电动斥力,联立电流-磁场-电动斥力方程求解,对触头形状、导电斑点以及铁磁物质等因素对电动斥力的影响作了深入仿真计算与验证^[3-5]。

传统的分析方法主要通过估算以及经验,针对可能影响电动斥力的要素进行定性分析。本文结合虚拟样机仿真技术^[6]与数字化设计技术,对KBO系列的CPS的短路分断性能进行分析,提出优化设计方案,辅助分析工具选用有限元分析软件ANSYS,获取稳态电流及静态工作气隙下的触头间霍姆力及导电回路电动斥力。动静触头的接触点采用的是圆柱体导电桥模型,使电流分布更加接近实际,且对可能影响导电回路电动斥力的因素采取定量分析。在已有的研究基础上针对触头位置、导电回路结构等不同因素对电动斥力的影响进行仿真分析,旨在提高设计效率。经过模拟仿真,基本确立试验方向,不再像过去一样盲目试验,在一定程度上节约了开销。对于优化后的低压电器,期望能够获得高效的触头分断能力,电器寿命得以延长,全面提高低压电器的可靠性。

1 接触组的基本原理及电动斥力理论计算

1.1 接触组结构

KBO系列CPS主体三大构成部件为操作机构、电磁传动机构和主电路接触组,三大部件各成独立的模块单元,采用立体布置形式,在较小体积内即可紧凑而合理地装配于一体。接触组的性能直接影响CPS是否能够及时可靠地开合。主电路接触组的构成示意图如图1所示。触头系统主要由动、静导电杆及其上的动、静触头、触头支持、宝塔弹簧等构成。其中动、静触头各采用双断点结构,用以传递主回路电流;触头支持用于固定动导电杆并联动铝推杆及电磁传动机构的顶杆;宝塔弹簧用以对动触头产生超程和接触压力,锁扣用于对铝推杆进行限位并与操作机构的短路推杆联动。触头系统的构成示意图如图2所示。

1.2 接触组短路分断原理

当短路电流产生时,其电流幅值以及允许电流流过的时段应远小于预期值,防止由于热效应和电磁干扰引起的对电气设备的损坏,延长小型断路器

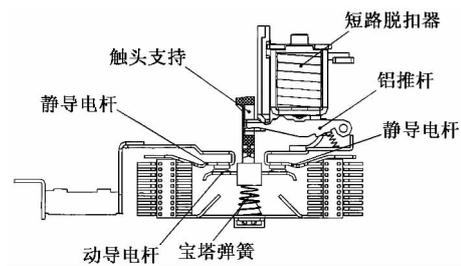


图1 主电路接触组构成示意图

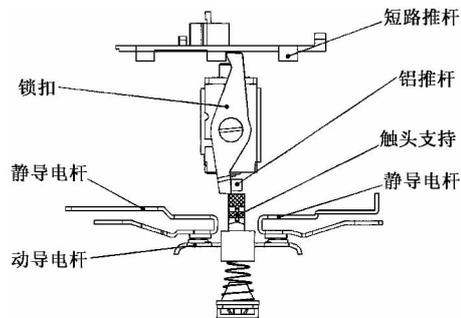


图2 触头系统构成示意图

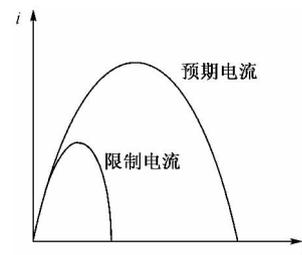


图3 限流特性

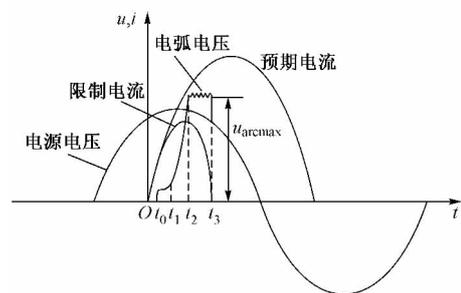


图4 电弧分断过程示意图

的使用寿命。电弧分断过程示意图见图3。

CPS接触组的电弧分断过程一般可分为4个阶段(如图4所示)。

1) 从0时刻点产生短路电流到 t_0 时刻触头开始动作,由于触头依旧处于接触状态,此时的电弧电压恒定为0。

2) $t_0 \sim t_1$ 时间段内触头斥开产生电弧,但电弧不会马上离开触头。在电弧停滞阶段,电弧电压在数值上变化不大,与级间电压降近似。

3) 到 t_1 瞬时,电弧被拉长,且自励磁场产生了一定的电动力,在电动力的作用下,电弧向灭弧栅片运动。与此同时,电弧电压快速增大,电弧电压的增长速度直接影响电弧运动的速度以及电弧被引入灭弧栅片的时刻点 t_2 $t_2 \sim t_1$ 为电弧运动时间。

4) 电弧被引入灭弧栅片后,电弧电压达到峰值 u_{arcmax} ,且大于电源电压的瞬时值。电弧在 t_3 时刻熄灭,电流值为0。

可见,若能够合理地控制电动斥力的大小,就可以有效地缩短电弧停滞时间,使电弧电压快速增大,增强断路器的限流分断能力。

1.3 电动斥力的理论分析计算

触头系统的电动斥力主要由两部分组成:霍姆力 F_H 和洛仑兹力 F_L ,如图5所示。图5中,动触桥所受到的总的电磁斥力等于触头回路电动斥力 F_L 与两个触点间的电动斥力 F_H 之和,即 $F = F_L + 2F_H$ 。

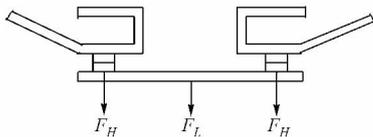


图5 双断点触头的触头斥力

两金属接触时,只有小部分的金属接触或非金属接触的斑点才能导电^[7]。电流流经导电斑点时,电流线会收缩,以接触面为基准,将电动力分解成平行与垂直两个方向上的分力。由图6可知,水平方向的分力抵消后不计,垂直方向的分力则叠加,即触头间的电动斥力。

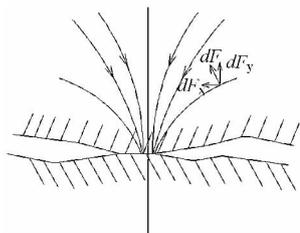


图6 触头间电动斥力

霍姆(Holm)力可由式(1)进行计算。

$$F_H = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (1)$$

式中, i 为触头系统流过的电流,A; μ_0 为真空磁导率, N/A^2 ; R 为触头半径,mm; r 为接触点半径,mm。

接触点的半径 r 由触头材料、接触压力、触头接触系数等决定,计算公式见式(2)。

$$r = \sqrt{\frac{F_k}{\pi \xi H}} \quad (2)$$

式中, F_k 为触头接触压力,N; ξ 系数的确定依据触头表面的接触情况而定,在0.3~0.6之间,可取0.45; H 为触头材料的布氏硬度, N/mm^2 。

由电流线收缩产生的霍姆力 F_H 只存在于动静触头保持金属接触状态的时间段内,即在短路分断过程中,当动静触头分开后,该力就不存在了。

通过式(1)可求得触头间的电动斥力,通过式(3)可获得导电回路的电动斥力^[8]。

$$F = 2 \times 10^{-7} \frac{i_1 i_2}{d} A l K \quad (3)$$

式中, i_1 、 i_2 为两导体的电流,A; d 为导体间的距离,mm; A 为由于两导体长度有限产生的系数; l 为导体的长度,mm; K 为矩形截面平行导体的截面因子。

2 基于 ANSYS 的电动斥力仿真

2.1 基于 ANSYS 的电动斥力仿真步骤

- 1) 定义单元类型 SOLID97 和 INFIN111。
- 2) 对动静导电杆、触头、灭弧栅片等实体进行建模,另外在周围设置空气环境,以整体为分析对象。
- 3) 定义材料性能,如相对磁导率、电阻率。
- 4) 给三维实体模型分配材料并建立不同的组件以便分析计算,导电回路的单元类型为 SOLID97。
- 5) 设置网格密度并划分网格。
- 6) 改变单元类型,初始设定为 SOLID97,后期改为 SOLID69,以期对电流传导的分析更有效、准确^[9]。
- 7) 对电流传导分析施加边界条件和载荷。耦合静导电杆电流流入端面的 VOTL 自由度,并在该端面一个关键点上施加励磁电流;在静导电杆电流流出端面加 VOTL 约束,设置 $VOTL = 0$ 。
- 8) 进行电流传导分析求得电流密度分布。
- 9) 进行磁场分析,将之前修改的单元类型恢复

为 SOLID97。

10) 进行磁场分析,对模型施加边界条件和载荷。以之前电流传导分析中得出的电流密度作为载荷,将无限表面(INF)标志施加于空气模型的外界面,最后再设定约束矢量 MVP 模拟通量线垂直或平行。

11) 求解,计算导电回路的电动斥力。

2.2 详细计算结果

本文的分析都以 KBO 系列的 CPS 产品为依据,模型采用 C 框架的结构进行仿真分析。实体模型包括:静导电杆、动导电杆、静触头、动触头、灭弧栅片、触头支持的金属部分等。由于几何模型的形状不规则,因此采用自由剖分。图 7 为接触组触头系统的网格剖分图。



图 7 接触组触头系统有限元模型

耦合静导电杆一端面的 VOLT 自由度并在一个关键点上施加励磁电流 AMPS = 10 500A,在约束导体另一端面的 VOLT 为 0 后开始电流传导分析。所得到导电回路部分电流密度矢量分布如图 8 所示。

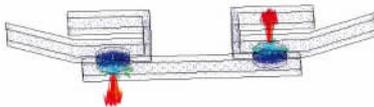


图 8 导电回路电流密度矢量分布

通过 LDREAD 命令把电场分析所得的电流密度作为激励读入磁场分析中。最后施加通量线垂直、平行条件以及远场单元无限表面标志,进行磁场分析。图 9 为动导电杆电动斥力分布图。

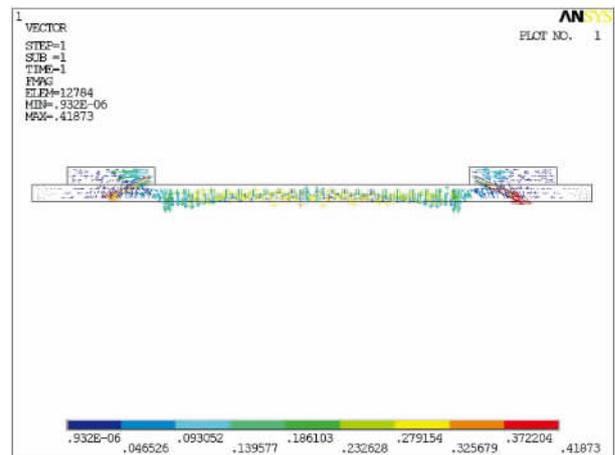


图 9 动导电回路电动斥力分布矢量图

利用有限元法和公式法分别计算出的触头间电动斥力(由于是双断点,所以触头力 $\times 2$)及导电回路电动斥力见表 2,参数设置见表 1。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	取值
电流/kA	10.5
触头截面半径/mm	2.5
触头高度/mm	2
导电桥半径/mm	0.1855
导电桥高度/mm	0.2
导电桥数目	1
导电桥位置	触头中心

依据表 2,可以发现触头间的电动斥力与电流的平方呈现正比关系^[10]。从数据对比可以看出,若要分析作用在动触头和动导电杆上的电动斥力,使用这两种方法,得出的结果偏差不大,两者的相对误差基本能够控制在 6%,造成该差异的原因可能是由于接触系数不同;导电回路的电动斥力误差在

表 2 有限元法和公式法计算出的触头间电动斥力比较

	有限元法				公式法	有限元法			
	电流/kA	触头力/N	回路力/N	合计/N		电流/kA	触头力/N	回路力/N	合计/N
有限元法	0.54	0.143	0.040	0.183	公式法	0.54	0.152	0.037	0.189
	0.63	0.194	0.054	0.248		0.63	0.206	0.050	0.256
	0.72	0.254	0.070	0.324		0.72	0.270	0.066	0.336
	0.81	0.321	0.089	0.410		0.81	0.342	0.083	0.425
	0.9	0.396	0.112	0.508		0.9	0.422	0.105	0.527
	10.5	53.92	14.99	68.91		10.5	57.36	14.00	71.36
	15	110.04	30.58	140.6		15	117.04	28.58	145.6
	24	281.7	78.30	360.0		24	299.6	73.16	362.8

8%左右,主要原因可能是在用公式法计算电动斥力时忽略了触头、灭弧栅片等触头系统的金属材料的影响。在触头未分开前,触头力在总的电动斥力中相对于回路力所占比例较大,该力产生的机理就是触头间电流收缩,所占比重达到80%左右。

3 导电回路结构对电动斥力的影响

在分析了模型电动斥力的基础上,进一步定量分析计算导电回路结构对电动斥力变化的影响。在改变导电回路结构的同时要保持通过导电回路的电流密度大小和方向不变,图10所示为导电回路电流密度矢量图,定性分析结构对电动斥力的影响。

后期对KBO系列产品的设计优化中,主要改变静导电回路的结构,例如主回路接触组中的进线板,新模型进线板部分,如图11所示。在其他参数不变的情况下,改变电流大小,通过ANSYS仿真求出电动斥力,结果见图12。可以看出,新的结构会产生较大的电动斥力,与原设计结构相比,电动斥力的增大值几乎恒定,两条曲线基本呈平行关系。电动斥力变化率的变化趋势基本保持同步,随着导电回路电流的增大,电动斥力变化率减小。



图10 导电回路电流密度矢量图



图11 新模型部分图

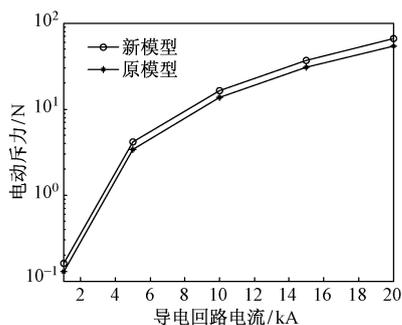


图12 改变导电回路结构对电动斥力的影响

4 动静触头位置对电动斥力的影响

原模型动静触头中心点之间的距离 x 为23mm,现改变触头的位置,导电回路的其他参数保持不变,依次左右同步移动,电流方向如图13所示,同时设定电流恒定为10.5kA,利用ANSYS仿真求得电动斥力的大小。仿真结果见图14,从图14中可以看出,随着两个触头之间的距离增加,电动斥力缓慢增加,呈现一定的线性关系。

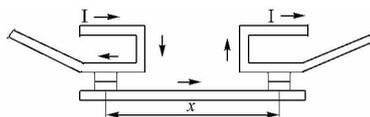


图13 动静触头位置示意图

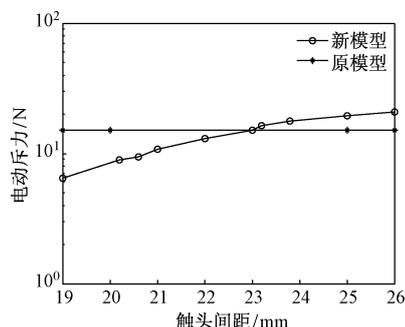


图14 改变触头位置对导电回路电动斥力的影响

产生这种现象的原因分析如下:由式(1)可知,触头位置改变不会影响霍姆力的大小,即 F_H 不变。同时根据Frick公式(3),触头位置改变会使导体长度改变,直接影响 F_L 的大小,并且呈现一定的线性关系。当动静触头之间的间距增加,导体长度增大,使得动导电板上总的电动斥力变大,有利于提高断路器的电动稳定性。反之,当动静触头间的距离减小,动导电板所受的电动斥力和总的电动斥力会增大。

5 结束语

经ANSYS有限元法与公式法的比较可知,公式法更适用于简单模型,ANSYS仿真结果更精确,电流和磁场的密度分布显示更直观。从表2的分析可得,随着电流的增加,触头力的差异与电动斥力的误差都明显增大,因此可采用导电桥模型进行电动斥力的数值分析(当电流大于24kA)。通过采用新的导电回路结构以及改变触头位置的方法,可以发

现在 CPS 接触组通过较大的短路电流时,触头电磁力明显增大,有助于动静触头快速斥开。但触头电磁力并非越大越好,因为电磁力过大易引起机械振动,不利于设备安全可靠地运行。

参考文献

[1] 黄世泽,郭其一,章敏娟,朱奇敏. 控制与保护开关电器电磁机构运动轨迹仿真研究[J]. 低压电器, 2013, 11:5-9.
 [2] 孙海涛,陈德桂,李兴文,刘庆江. 低压断路器触头系统三维磁场的可视化分析[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4):31-35.
 [3] 刘颖异,陈德桂,李兴文等. 用三维有限元方法研究影响框架断路器电动斥力的因素[J]. 中国电机工程学报, 2005, 16:63-67.
 [4] 李兴文,陈德桂,刘洪武等. 触头间电动斥力的三维有限元分

析[J]. 高压电器, 2004, 01:53-55.

[5] 李兴文,陈德桂,李志鹏,刘洪武,向洪岗. 考虑触头间电流收缩影响的低压塑壳断路器中电动斥力分析[J]. 电工技术学报, 2004, 10:1-5.
 [6] 黄世泽,郭其一,贺雅洁,龚晓斌,仇仙者. 控制与保护开关电器操作机构动力学仿真研究[J]. 电器与能效管理技术, 2014, 20:24-28.
 [7] 张冠生. 低压电器. 北京:中国工业出版社, 1961.
 [8] 陆俭国,仲明振,陈德桂等. 中国电气工程大典第 11 卷. 配电工程. 北京:中国电力出版社, 2009.
 [9] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
 [10] 李兴文,陈德桂,向洪岗,李志鹏,刘洪武. 低压塑壳断路器中电动斥力的三维有限元非线性分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24:150-155.

(上接第 26 页)

6 结束语

基于控制与保护开关的智能配电系统已经在示范工程中经过长时间的通电运行,连续长时间测试结果表明:该智能配电系统运行性能稳定,网络状况稳定。

本文基于控制与保护开关电器构建集监视、控制、保护等功能于一体的智能配电系统。该系统是智能电网的重要组成部分,不仅实现了传统的配电系统的功能,而且还集成了能源管理系统、智能消防系统以及太阳能光伏发电系统。该系统的实施,将会提高电力系统可靠性、实时性和实用性,为工厂的信息化建设奠定坚实的基础。

参考文献

[1] 吴潇俊,黄世泽,郭其一,杨阳. 基于可通信控制与保护开关的智能配电系统设计[J]. 低压电器, 2013, 11:46-49.
 [2] 陈德仙. 基于 Modbus 现场总线的智能配电控制系统研究与

实现[D]. 浙江工业大学, 2009.

[3] 胡景泰. 电控系统控制与保护统一理论及其信息化研究[D]. 上海:同济大学, 2006.
 [4] 张扬,柴熠. 基于 3S-Net 的楼宇智能配电系统[J]. 低压电器, 2006(4):40-45.
 [5] 史旺旺,陈虹,刘敏华,等. 智能建筑变电站综合自动化的分析和实施[J]. 电力自动化设备, 2003, 3(10):46-47.
 [6] 朱懿,蒋念平. Modbus 协议在工业控制系统中的应用[J]. 微计算机信息, 2006(22):118-120.
 [7] 陈德仙,郝登峰,俞国勇,刘彦杰. 基于 MODBUS 协议的智能配电系统设计[J]. 江苏电器, 2007, 04:25-28.
 [8] 唐喜,孟岩. 应用于电网故障信息关联的以太网通信协议[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(9):61-64.
 [9] 王春. 基于组态软件的 PLC 实验教学系统[D]. 四川:西华大学, 2009.
 [10] 国家技术监督局,中华人民共和国建设部. 高层民用建筑设计防火规范(2005 年版)(GB50045-95) [S]. 中国计划出版社, 2005.
 [11] 马一鸣,马龙翔. 太阳能光伏发电与建筑一体化[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2011, 01:9-12.

《公共建筑节能设计标准》(GB 50189 - 2015) 本月起实施

《公共建筑节能设计标准》为国家标准,编号 GB 50189-2015,自 2015 年 10 月 1 日起实施。其中,第 3.2.1、3.2.7、3.3.1、3.3.2、3.3.7、4.1.1、4.2.2、4.2.3、4.2.5、4.2.8、4.2.10、4.2.14、4.2.17、4.2.19、4.5.2、4.5.4、4.5.6 条为强制性条文,必须严格执行。原《公共建筑节能设计标准》(GB 50189 - 2005)同时废止。