

基于 Ansys 的短路脱扣器 电磁吸力仿真研究

贺雅洁, 黄世泽, 郭其一, 毛中亚
(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200331)



贺雅洁 (1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为低压电器。

摘要: 借助三维场分析软件 Ansys 建立短路脱扣器三维有限元模型, 通过分析静态电磁特性, 得到了短路脱扣器电磁力与动、静铁心间空气隙的关系特性。研究仿真脱扣器模型外部的空气体对仿真影响, 可为类似 Ansys 仿真分析提供借鉴, 也可对实际产品技术指标提升和产品优化设计提供建议。

关键词: 三维有限元; 短路脱扣器; 静态电磁特性; 空气隙

中图分类号: TM 56; TM 153+.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5531(2012)19-0005-05

Simulation of Electromagnetic Suction for Short-Circuit Release Based on Ansys

HE Yajie, HUANG Shize, GUO Qiyi, MAO Zhongya

(College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200331, China)

Abstract: 3D finite element models were set up in Ansys for short-circuit release of control and protective switching devices. Then based on the analysis of the static electromagnetic characteristics, the relation between electromagnetic force and air gap was researched. The effect of exterior air of short-circuit release in simulation was discussed. The study provided a reference for the similar Ansys simulation and suggestion to improve technology index and future optimization design of products.

Key words: 3D finite element; short-circuit release; static electromagnetic performance; air gap

0 引言

控制与保护开关电器 (Control and Protective Switching Device, CPS) 是一种多功能、集成化低压电器。在低压配电系统中, CPS 能够替代隔离器、断路器 (熔断器)、接触器、热继电器、起动机等多种传统分立元器件, 且其技术指标性能高于传统分立元件^[1-2]。额定运行短路分断能力 I_{cs} 是考核产品性能的一个重要技术指标。KBO 系列 CPS 采用双断点触头结构, 利用电动斥力和短路脱扣器共同作用快速断开触头, 从而实现限流作用。其额定运行短路分断能力 I_{cs} 达到 80 kA。

短路时, 短路脱扣装置能否快速断开直接决定了短路分断能力的大小。而实际测短路脱扣力

的试验十分复杂, 且不精确。本文以大容量 KBO 系列 CPS 螺旋管式短路脱扣器为研究对象, 通过 Ansys 仿真研究短路脱扣器的脱扣力。同时, 分析了脱扣器模型铁磁体外部空气体对仿真影响, 提出通过适当简化脱扣器模型和放大外部空气体的解决方法, 得到符合要求的电磁脱扣力, 为其他类似仿真提供借鉴, 同时为 CPS 产品技术指标提升和产品优化设计提供建议。

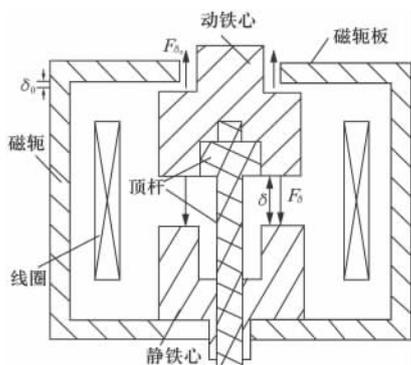
1 基于 Ansys 的短路脱扣器的三维有限元分析

本文以大容量 KBO 系列 CPS 短路脱扣器为研究对象, 借助 Ansys 的 APDL 语言^[3], 分析短路脱扣器的电磁吸力特性。

黄世泽 (1983—), 男, 博士后, 研究方向为虚拟样机在低压电器中的应用。

郭其一 (1961—), 男, 教授, 研究方向为控制理论与方法及其在电力系统中应用、虚拟样机在低压电器中应用。

求解电磁吸力的方法通常有两种: 磁场的方法和磁路的方法。一般在动、静铁心间空气气隙较大时选用磁场的方法计算; 当空气气隙较小时, 用磁路的方法较为精确^[4-5]。由于短路脱扣器正常工作时气隙较大, 因此, 本文主要用磁场的方法进行计算。短路脱扣器原理图如图 1 所示。



δ_0 —磁轭板与动铁心大头间的空气气隙; F_{s_0} — δ_0 对动铁心产生的向上的电磁力; δ —动静铁心间的空气气隙; F_s — δ 对动铁心产生的向下的电磁力

图 1 短路脱扣器原理图

根据对麦克斯韦方程组的研究^[2] 得出计算脱扣器电磁力的公式为

$$F = \frac{1}{2} \frac{B^2 A}{\mu_0} = \frac{1}{2} \frac{\Phi^2}{\mu_0 A} \quad (1)$$

式中 B ——动、静铁心磁极中产生电磁吸力的空气磁通密度

A ——动、静铁心磁极中产生电磁吸力的有效计算面积

μ_0 ——空气绝对磁导率常量

Φ ——磁通

由图 1 可知, 动铁心除了受到静铁心对其产生的电磁吸力 F_s 之外, 还受到顶部磁轭板对动铁心的电磁吸力 F_{s_0} , 这两个电磁吸力方向相反, 故动铁心受到的合力大小为 $F_s - F_{s_0}$ 。

短路脱扣器的工作原理是: 当主回路发生短路故障时, 动、静铁心在巨大短路电流产生的电磁吸力 F_s 作用下快速吸合, 压缩压力弹簧, 同时快速推动顶杆, 打开主触头, 带动扭杆扭转, 让打开后的触头处于锁扣状态, 从而实现短路保护功能。

短路脱扣器与其他保护装置配合动作, 根据相关标准规定, 其动作电流一般为额定电流的 16 倍。以大容量 KBO 系列 CPS 短路脱扣器为

例, 其额定电流为 220 A, 则最佳瞬动脱扣电流整定为 $I = 220 \times 16$ A。

本文采用三维静态有限元方法对短路脱扣器进行仿真, 分析方法采用磁标量位法(MSP)中的差分标势法。当 $I = 220 \times 16$ A, 线圈匝数 $N = 2$, 空气气隙 $\delta = 9$ mm, 忽略顶杆(顶杆材料为 Cu, 忽略顶杆对仿真的影响), 仿真分析如下:

(1) 建模。在 Ansys 中用 APDL 命令建立短路脱扣器的简化模型, 主要包括动、静铁心, 磁轭和线圈。为了便于观察铁磁体周围的漏磁分布状况, 在模型的外部建立了一个空气体, 脱扣器模型铁磁体外部的圆柱形空气体将其包围。

(2) 网格划分。网格划分采用自由剖分方式, 用 SmartSize 法(智能网格划分技术) 设定网格尺寸参数, 选择智能网格划分的等级为 6, 设定网格单元为三维四面体^[6]。短路脱扣器模型的剖分图如图 2 所示。

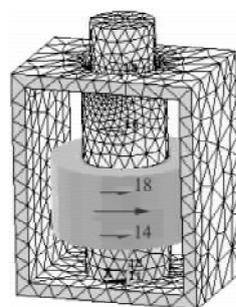


图 2 短路脱扣器剖分图

(3) 加载边界条件和载荷。输入材料属性, 空气及线圈的相对磁导率为 1(空气材料号为 1, 线圈材料号为 4), 动、静铁心的相对磁导率为 8 500(材料号为 3), 磁轭和磁轭板的材料号为 2。三维静态 DSP 分析需施加垂直边界条件^[7]。平行边界条件为自然边界条件, 不用施加。动铁心组件需施加力的标志, 并添加力边界标志。

(4) 求解。在 Ansys 中对短路脱扣器进行三维静态分析求解, 得到其磁场分布如图 3 所示。

由图 3 可见, 绝大部分磁通经过动、静铁心构成主磁路, 空气层内仅有极少部分漏磁, 铁心中柱和旁柱间漏磁稍多, 越接近气隙漏磁越多, 且气隙处出现扩散磁通^[8-9]; 动铁心受到静铁心给的向下电磁吸力 F_s 较大; 此外, 动铁心台阶形结构处受到指向外侧和向上的电磁吸力 F_{s_0} (该吸力可以理解磁轭部分通过气隙对动铁心产生的电动

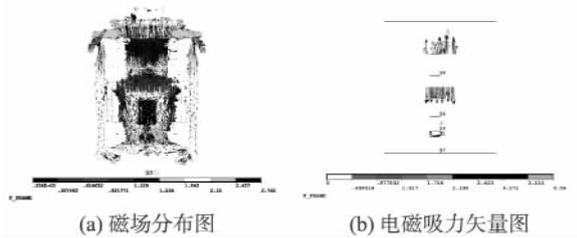


图3 磁场三维静态分析

斥力) 相对较小。

2 短路脱扣器模型和铁磁体外部空气对仿真的影响分析

在仿真过程中,导入的短路脱扣器模型和脱扣器模型铁磁体外部的空气对仿真均有影响。

2.1 简化短路脱扣器模型有利于网格剖分

划分网格时,出现如图4所示的问题,显示不能划分网格,分配了负的请求长度,网格划分失败,Ansys 自动退出。

```
An allocation was made with a negative length requested:
-2033774592
Blockname: iMemArray.
+++++
The above error is non-recoverable by ANSYS_
ANSYS run terminated by the indicated error_
Current data base saved if possible
+++++
```

图4 仿真中出现的错误提示

经反复尝试和分析,发现出现错误的原因是选用四边形单元划分网格,导入模型太复杂,出现三角形单元,单元退化;而选用单元不允许出现单元退化,导致 Jacobi 矩阵(雅克比矩阵)奇异,不能划分网格。解决的办法是,适当简化短路脱扣器模型,主要简化磁轭模型。在生产设计中,考虑到装配需要,磁轭上会有一些不规则边角、凸起、凹陷和螺钉孔等部分,仿真中忽略这些部分,不但对仿真结果无影响,还能使整个模型边角光滑,不出现三角形单元。Jacobi 矩阵非奇异,更有利于网格剖分^[10]。

2.2 脱扣器模型铁磁体外部的圆柱形空气对仿真结果的影响

脱扣器模型铁磁体外部的圆柱形空气大小通常根据脱扣器铁心模型的大小自定。在短路脱扣器仿真中,令其圆柱形空气半径为 38 mm,长

度 87 mm。在求解过程中,空气大小改变对仿真求解的电磁力会产生影响。当保持线圈匝数 $N=2$,短路电流 $I=220 \times 16 \text{ A}$,动、静铁心间的气隙 $\delta=9 \text{ mm}$ 不变时,电磁力与外部圆柱形空气长度的关系如表 1 所示。

表1 电磁力与空气长度关系

空气体模型长度/mm	80	83	84	85	87	89
F/N	0	46.219	74.013	70.807	74.206	71.074

通过仿真求解,得到短路脱扣器在不同空气长度时的磁场分布图如图 5 所示。

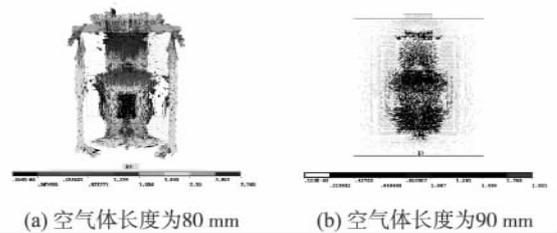


图5 不同空气长度下的磁场分布图

由于在 Ansys 里求解三维电磁场问题的各种约束,当铁磁体外部的圆柱形空气长度为 80 mm 时,不能形成完整磁路,不能求解出动、静铁心间的电磁力;而在圆柱形空气长度为 83 mm 或 83 mm 以上时,能形成完整磁路,可以仿真求得动、静铁心间电磁力值。

要使短路脱扣器快速动作,提高 KBO 系列 CPS 的快速分断能力,就要求短路脱扣器动、静铁心间的电磁力足够大,同时要求脱扣器模型铁磁体外部的圆柱形空气半径大小是铁心半径的 3~5 倍,空气体的长度能包覆铁心模型。综合上述要求,本文取铁磁体外部的圆柱形空气半径大小为 38 mm,为铁心模型(铁心半径为 11 mm)的 3.5 倍左右,长度取最大概率分布值 87 mm。以下所有仿真结果都是在此条件下进行,可以得到较为理想的电磁力值。

3 短路脱扣器三维静态仿真结果分析

短路脱扣器动、静铁心间的电磁力与动、静铁心间空气气隙、线圈匝数和线圈中的电流大小有关。

3.1 线圈中电流大小与短路脱扣器电磁力的关系

令动、静铁心间空气气隙长度为 5 mm, 短路线圈的匝数为 2 不变, 改变线圈电流大小, 电磁吸力和线圈电流之间的关系曲线如图 6 所示。

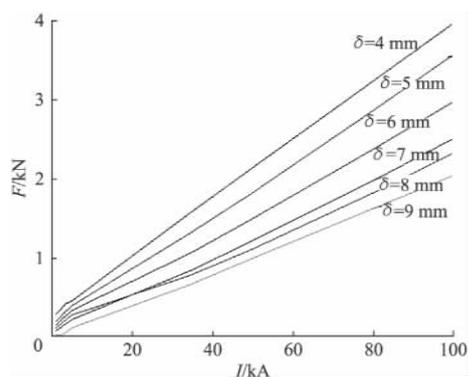


图 6 电磁力与线圈电流的关系曲线图

分析图 6 可知:

(1) 保持动、静铁心间气隙大小不变, 改变线圈中的电流大小时, 动、静铁心间的电磁力随线圈电流的增大而增大, 与理论分析相符。

(2) 当电流较小时, 改变动、静铁心间空气气隙大小, 电磁吸力变化较小; 当电流较大时, 改变动、静铁心间空气气隙大小, 电磁吸力的变化较大, 与理论分析相符。

(3) 相同气隙情况下, 电磁吸力随电流变化的曲线较为平滑, 无大的波动, 即在相同电流作用下, 调节空气气隙和线圈匝数, 可得设计所需的电动斥力。

3.2 线圈匝数与短路脱扣器电磁力的关系

当保持电流不变、气隙不变、改变线圈匝数时, 得到电磁力与线圈匝数的二维表如表 2 所示。由表 2 可见, 在短路电流和动、静铁心间气隙一定时, 电磁力随线圈匝数的增加而增大, 与理论分析相符。

表 2 电磁吸力与线圈匝数的关系

N/匝	2	3	4	5
F/N	47.198	106.260	137.990	152.560

按照理论分析, 电磁力与线圈匝数的关系应呈平方关系增长^[2]。但由表 2 可知, 在匝数为 2 和 4 匝时, 电磁力的值并非是 4 倍关系, 即电磁力与匝数关系非平方关系。仿真是在忽略脱扣器动

铁心粗端平面与磁轭板之间工作气隙产生电动斥力、动铁心磁阻和磁路不饱和等影响因素情况下进行, 故电磁力与线圈匝数不是平方而是接近平方关系, 不影响脱扣器正常分断。仿真结果与理论分析相符。

3.3 动、静铁心间空气气隙大小与短路脱扣器电磁力的关系

保持短路线圈匝数 $N = 2$ 、改变气隙时, 得到电磁力与气隙的关系图如图 7 所示。

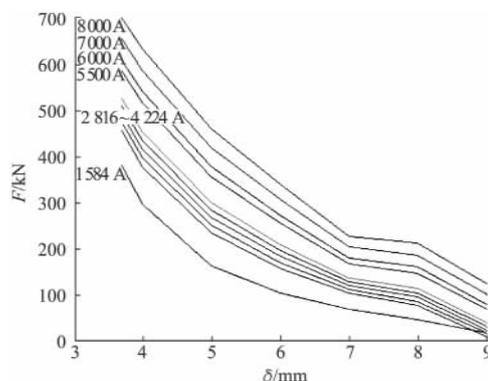


图 7 电磁力与空气气隙的关系曲线图

分析图 7, 可得到以下结论:

(1) 保持线圈电流不变, 改变动、静铁心间气隙大小, 电磁力随气隙的增大而减小, 与理论分析相符。

(2) 在相同气隙情况下, 动、静铁心间的电磁力在线圈电流较大时变化较大; 在线圈电流较小时变化幅度相对较小。

(3) 相同电流情况下, 气隙较小的地方比气隙较大的地方电磁力变化较为陡峭些。

动、静铁心在吸合过程中, 同时还受到动铁心和磁轭板之间气隙产生的电动斥力 F_{δ_0} 作用。由于在动、静铁心间气隙 δ 较大时, 磁轭板与动铁心间的气隙 δ_0 较小, δ_0 产生的磁阻较大, 即 F_{δ_0} 较大; 随着动、静铁心间气隙 δ 增大, δ_0 产生磁阻越来越小, 即 F_{δ_0} 越小。由于动铁心受到的电磁力为 $F_{\delta} - F_{\delta_0}$, 故在气隙 δ 较小时 F_{δ_0} 越小, $F_{\delta} - F_{\delta_0}$ 越大, 曲线变化更为陡峭些。仿真结果与上述理论分析相符。

通过仿真得到短路脱扣器电磁力与线圈匝数、动、静铁心间空气气隙和电流的关系特性。在具体产品设计中, 线圈匝数受电流密度和线圈尺寸等空间结构的限制, 无法改变线圈匝数来得到

所需短路脱扣器电磁力。按产品性能要求,在规定电流倍数下需动作,线圈电流为定值,因此只能通过调节动、静铁心间空气气隙 δ 来提高短路脱扣器动作特性。由电磁力与 δ 关系可知,调节动、静铁心间空气气隙可得设计所需电动斥力,有效提高短路脱扣器短路分断能力。

正常情况下,由于产品调试环节短路脱扣器内部空间结构已固定,故动、静铁心间空气气隙 δ 无法调节。为调试方便,在生产调试过程中可设计出气隙自动调节装置,通过此装置调节动、静铁心间空气气隙的大小来调节动、静铁心间的电磁力,从而提高短路脱扣器额定短路分断能力。

4 试验和仿真结论

由于短路脱扣器分断瞬间电磁力较大,故分断过程较快,导致脱扣力瞬时测试无法直接进行或测试数据不精确。根据短路脱扣动作原理,动、静铁心在短路电流产生电磁力作用下吸合主要需要克服动、静铁心间反力弹簧和主触头反力弹簧作用。本文试验在接触器专用试验台进行。该试验台能提供给接触器设定电流并持续时间40 ms,观察接触器脱扣器是否动作。

以额定电流为220 A、线圈匝数为2匝的KBO系列CPS接触器作为试验对象,在KBO系列CPS接触器专用试验台进行试验。当电流为3 500 A时,接触器脱扣器不动作;当电流约在3 520 A时,接触器脱扣器动作。由此可知,接触器脱扣器的临界动作电流区间为[3 500 A, 3 520 A]。

根据接触器的设计参数,接触器主触头反力弹簧力折算值为30 N,短路脱扣器动、静铁心间反力弹簧力折算值为10 N,即脱扣器初始运动的临界电磁力要大于40 N。

综上所述,当流过短路脱扣器的电流为3 520 A时,短路脱扣器的临界电磁力为40 N。由上述仿真分析表2可得,当电流为3 520 A、线圈匝数为2匝时,仿真计算得动、静铁心间电磁力为47.198 N,此时脱扣器能正常动作。上述分析和试验验证了仿真计算结果的准确性。

5 结 语

本文利用Ansys软件分析了KBO系列CPS

短路脱扣器的电磁特性,分析结果能清楚显示短路脱扣器在动作过程中磁场的分布情况和电磁吸力矢量分布。解决了Ansys仿真过程遇到的相关问题,即脱扣器模型铁磁体外部的空气体对仿真结果的影响问题;得到了短路脱扣器电磁吸力与线圈电流和线圈匝数的关系曲线,以及短路脱扣器电磁吸力与动、静铁心间空气气隙的关系特性。仿真分析和试验结果表明,本文给出分析方法是正确的。

【参考文献】

- [1] 胡景泰. 智能化控制与保护开关电器(CPS) [J]. 电气时代, 2004(8): 64-66.
- [2] 陆丽君. CPS短路保护装置动态仿真分析及优化 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
- [3] 博弈创作室. APDL参数化有限元分析技术及其应用实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [4] SCHMIDT E, DEGWERTH A. Design studies on low voltage contactors by using transient finite element analyses with circuit coupling [J]. Electrical and Computer Engineering, 2005, 1(4): 482-485.
- [5] GERSEM H D, MERTENE R, LAHAYE D, et al. Solution strategies for transient, field-circuit coupled systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1531-1534.
- [6] 王世山, 王德林, 李彦明. 大型有限元软件ANSYS在电磁领域的使用 [J]. 高压电器, 2002, 38(3): 27-33.
- [7] 孙明礼. Ansys 10.0电磁学有限元分析实例指导教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] KAWASE Y, TATSUOKA S, YAMAGUCHI T, et al. 3D finite element analysis of operating characteristics of AC electromagnetic contactors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(5): 3244-3247.
- [9] 贾峰. 交流接触器三维电磁场分析 [D]. 天津: 河北工业大学, 2006(3).
- [10] BOUTANA I, MEKIDECHE M R. Modeling of electromagnetic forming devices by finite element analysis [J]. Transactions on Systems, Signals & Devices, 2006, 2(2): 131-141.

收稿日期: 2012-02-23