

基于 Ansys 的磁通变换器的 电磁吸力仿真

李凡璋¹, 黄世泽¹, 郭其一¹, 邱建洪²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804;

2. 浙江中凯科技股份有限公司, 浙江 乐清 325604)



李凡璋(1989—), 男, 研究方向为电力系统及其自动化。

摘要: 通过有限元分析软件 Ansys 对磁通变换器的电磁场进行仿真分析, 计算出铁心所受到的电磁合力和磁链的分布情况。结合对磁通变换器成品的测力试验, 对测力结果进行分析, 与理论计算结果进行比较, 验证理论和仿真分析的正确性, 从而为实际生产中的磁通变换器优化设计提供理论依据。

关键词: 磁通变换器; 有限元分析; 静态特性; 电磁合力

中图分类号: TM 564 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5531(2013)23-0005-06

Simulation of Electromagnetic Suction of Flux Transfer Trip Based on Ansys

LI Fanzhang¹, HUANG Shize¹, GUO Qiyi¹, QIU Jianhong²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Zhejiang Jonk Technology Co., Ltd., Yueqing 325604, China)

Abstract: The electromagnetic field of flux transfer trip was simulated by finite element analysis software Ansys, and the electromagnetic force and flux of the mandrel were calculated. According to the force test on flux transfer trip, comparison and analysis of the simulation results were made to verify the correctness of the theory and simulation analysis, which can provide a theoretical basis for the optimization design of flux transfer trip in practical manufacture.

Key words: flux transfer trip; finite element analysis; static characteristics; electromagnetic force

0 引言

磁通变换器是控制与保护开关数字化控制器的执行元件。其性能对数字化控制器的工作性能、结构小型化及可靠性有重要意义, 在很大程度上影响到断路器的工作可靠性。

传统研究磁通变换器特性的方法包括场的方法和路的方法。20 世纪 80 年代中期, L. Bompa 采用二维磁场、电路方程、机械瞬态方程耦合求解, 进行动特性的分析, 但精度不高。进入 21 世纪, 法国电力试验室和施耐德电气公司利用磁路进行静特性优化, 再用磁场进行校核, 最后用手工

计算进行动特性分析。Ansys 是融合结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件, 在电磁场分析中应用广泛^[1]。本文利用 Ansys 对磁通变换器的三维磁场分布进行了仿真分析。

1 磁通变换器的工作原理

低压断路器智能脱扣器的执行元件采用特殊的磁通变换器, 由电流互感器通过电容器来供电, 因此要求磁通变换器动作灵敏、功耗低。磁通变换器是一种小型储能式脱扣装置, 由于利用了永磁存储能量, 故仅需很小的功率脉冲即可使其动

黄世泽(1983—) 男, 博士后, 研究方向为低压电器虚拟样机技术、智能配电系统。

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的应用, 虚拟样机在低压电器中的应用。

作。对磁通变换器的要求是:①体积小,价格低;②动作灵敏,动作功率低;③动作快;④工作可靠^[2]。如图1所示。

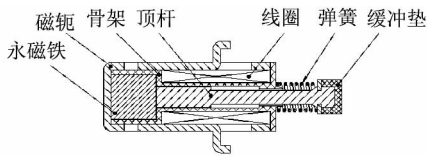


图1 磁通变换器实物结构图

磁通变换器由充电电容来供电。其工作原理如图2所示。

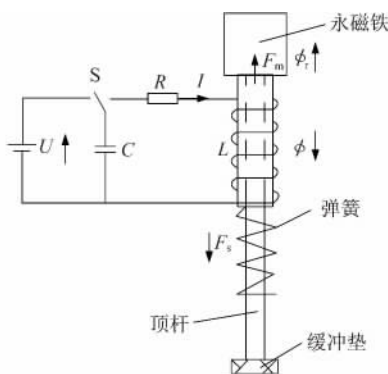


图2 磁通变换器的工作原理

磁通变换器中的电容通过一个单刀双掷开关,分别连接电压为12V的稳压电源和磁通变换器的线圈。永磁体产生的磁通 ϕ 及对应的吸力使动铁心处于吸合状态,当单刀双掷的开关合向线圈一侧的时候,电容放电,提供线圈电流 I 。当电流 I 通过线圈时,产生的磁通削弱了永磁体产生的磁通,从而使电磁合力 F_m 减小。随着电容放电电流 I 的增大,当 F_m 大于弹簧压缩产生的弹力时,在合力的作用下,动铁心做脱离永磁体的运动,从而推动断路器的脱扣机构动作。

2 磁通变换器的静态有限元分析

2.1 磁通变换器简化建模

在实际的磁通变换器产品设计中,为了装配的需要,磁轭上会有一些不规则边角、凸起、凹陷和螺钉孔等。在Ansys仿真时,选用四边形单元划分网格,这些不规则的部分相对复杂,导致单元退化和Jabbic矩阵(雅克比矩阵)奇异^[3],以致于出现三角形单元;而选用单元出现单元退化,会导致不能划分网格。因此采用适当简化磁通变换器

模型的办法来解决,主要简化周围的磁轭模型。在仿真中忽略这些部分,避免了出现三角形单元和Jabbic矩阵奇异,更有利于网格划分,对仿真结果无影响^[4]。

2.2 三维静态非线性磁场标量法分析

Ansys静态磁场分析针对顶杆整个运动的时间历程,将其离散为若干个静态的时间点。在每个离散点处(即给定动、静铁心间气隙和线圈电流的情况下),得到不同状态下的磁场分布图和磁链、电磁合力值。

2.2.1 环境建立、仿真建模及材性赋值

使用Magnetic-Nodal节点法对后面的仿真设定环境条件^[5],定义单元类型以及材料属性。磁通变换器所用的永磁体材料是钕铁硼。仿真时将永磁体的磁化曲线做线性处理,故直接计算得到相对磁导率为

$$\mu_r = \frac{B_r}{\mu_0 H_0} = \frac{1.47}{4\pi \times 10^{-7} \times 992\,000} = 1.18 \quad (1)$$

式中 μ_r ——介质的相对磁导率

B_r ——介质中的磁感应强度

μ_0 ——真空磁导率

H_0 ——介质中的磁场强度

分块建模逐步塑造出磁轭、永磁体、顶杆等模块,并使用布尔运算将部件组合为完整模型。同时建立顶杆外空气模型以便添加力标志,建立圆柱形空气层包裹整个模型以便提供电磁仿真介质。磁通变换器有限元模型如图3所示。

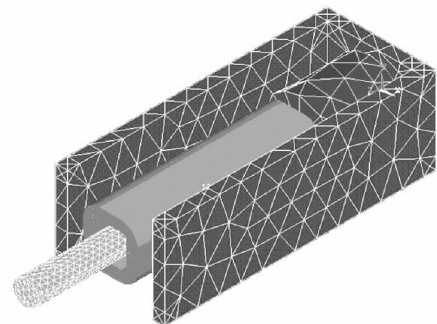


图3 磁通变换器有限元模型

2.2.2 划分网格、建立线圈、施加边界条件

网格的划分对Ansys的有限元分析结果有着至关重要的决定性作用。选择动铁心上所有单元生成一个组件,给其添加一个麦克斯韦力的标志,

此力即为后期计算中的电磁合力 F_m 。建立跑道型线圈,施加边界条件,同时避免仿真计算时病态矩阵的出现。

2.2.3 差分标势法求解、后处理

本文的磁通变换器属于“单连通”区域模型,需要采用差分标势法(Differential Scalar Potential, DSP)进行三维有限元静态非线性分析。提取出代表电磁合力 F_m 的组件,并定义矢量参数,计算线圈磁链。

3 磁通变换器静态特性仿真结果与分析

对磁通变换器的静态工作阶段进行仿真分析。显然电磁合力 F_m 和线圈磁链都是线圈电流 I 和工作气隙 x 的函数。电流来源于已充电电容的放电过程,电流大小由电源电压 U 以及电容 C 的大小决定,并且随着放电过程不断变化,是一个非线性的变化过程。工作气隙大小,即动、静铁心的间距由磁通变换器产品生产过程直接决定,实际上不同的电流气隙参数条件代表的是磁通变换器整个工作过程中不同的工作状态^[6]。

3.1 电流对磁通变换器电磁合力和磁链的影响

取磁通变换器的线圈匝数 $N = 200$ 匝不变,选定某一确定的工作气隙,得到电磁合力与电流的关系曲线,如图4所示。

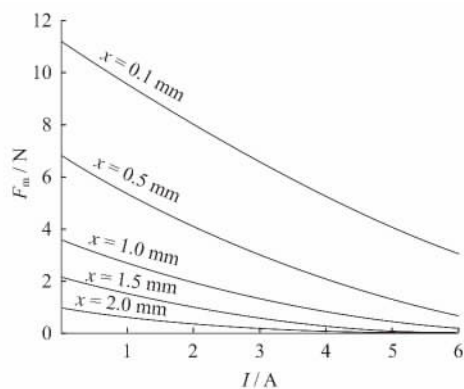


图4 电磁力与电流的关系曲线图

通过分析图4可得:

(1) 保持工作气隙大小不变,改变线圈中电流大小,顶杆所受到的电磁合力随着电流的增大而减小。当电流足够大时,合力可以达到零,即脱离。

(2) 当气隙值相对较小时,即顶杆与永磁体间距较小,此时改变电流值,得到的电磁合力变化较大;反之,当气隙值较大时,改变电流值,合力的变化较小。

(3) 整个曲线图相对光滑,即在某一特定气隙值下,电磁合力与电流的变化关系不存在“突变”现象,因此调节气隙值和电流值,就能得到所需的电磁合力。

磁链 ψ 与电流的关系曲线如图5所示。

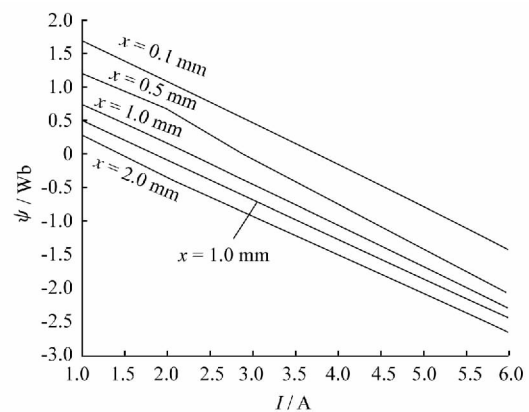


图5 磁链与电流的关系曲线图

通过分析图5可得:

(1) 保持工作气隙大小不变,改变线圈中电流大小,线圈中的磁链大小随着电流的增大而减小。

(2) 当电流足够大时,磁链值等于零甚至为负,即磁链方向改变,线圈中电流产生的磁作用开始超过永磁体本身的磁作用。

当电流通过线圈时产生的磁通削弱了永磁体产生的磁通,从而使电磁合力减小,因此,得到结论:随着线圈电流 I 逐渐增大,电磁合力 F_m 逐渐减小。选择气隙为 0.5 mm 的单组数据进行观察,不通电时永磁体对顶杆的吸力约为 6.8 N,随着电流的不断增大,永磁体产生的磁通被抵消,电磁合力 F_m 不断减小,当电流为 6 A 时, $F_m < 1$ N,顶杆虽然仍保持静止,但已经接近脱离状态,即将进入脱离的动作阶段;气隙为 2 mm 时,可以看到在 $I = 5$ A 和 $I = 6$ A 两种情况下, $F_m > 0$,实际上顶杆已经脱离永磁体的吸引。磁链的变化则更加明显,每一组确定的气隙值下,电流的增大都导致了磁链由正转化为负,即磁链在方向上改变,线圈电流产生的磁链逐渐减小了永磁体固有的磁链,

最终完全抵消。

3.2 气隙对磁通变换器电磁合力和磁链的影响

取磁通变换器的线圈匝数 $N = 200$ 匝不变, 选定某一确定大小的线圈电流, 得到电磁合力与气隙的关系曲线, 如图 6 所示。

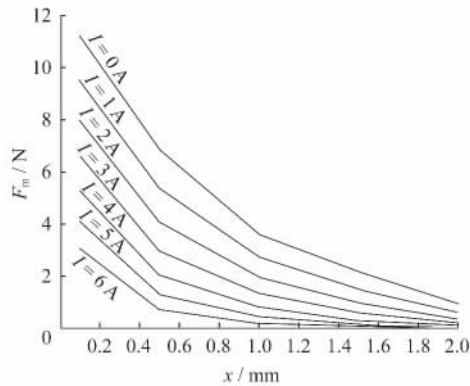


图 6 电磁力与气隙的关系曲线图

通过分析图 6 可得:

(1) 保持线圈电流大小不变, 改变工作气隙值的大小, 顶杆受到的电磁合力的大小随着气隙值的增大而减小, 间距越大, 永磁体的作用越小。

(2) 当电流值相对较小时, 改变气隙值, 得到的电磁合力变化较大; 反之, 当电流值较大时, 改变气隙值, 电磁合力的变化较小。

(3) 在某一确定的电流值下, 气隙值在不同区间上对电磁合力的影响也有显著的不同。当 $x \in [0, 0.5]$ 时, 曲线最为陡峭。当 x 取接近于 0 时, 微小的变动可以引起电磁合力数量级上的变化。这也在最初的仿真修改参数调试过程中得到了验证。

(4) 在某一确定的电流值下, 当气隙值逐渐增大时, 电磁合力逐渐趋向于 0, 无论电流的取值为多少, 总可以得到一个气隙值, 实现合力为 0 的脱离条件, 因此, 仿真分析数据结果认为, 在合适的电流值和合适的实际产品设计气隙值组合下, 总能实现磁通变换器的脱扣作用, 进而使得低压断路器智能脱扣器能够正常工作。

磁链与气隙的关系曲线, 如图 7 所示。

通过分析图 7 可得:

(1) 保持线圈电流大小不变, 改变气隙值大小, 线圈中的磁链值随着气隙的增大而减小。

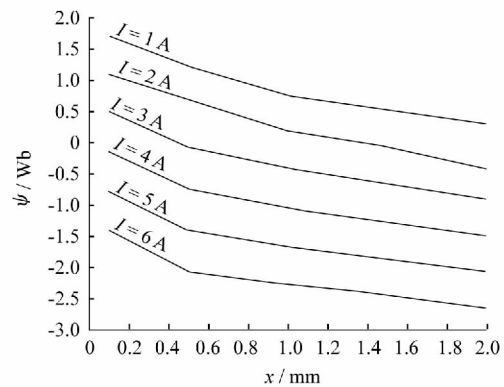


图 7 磁链与气隙的关系曲线图

(2) 当气隙值足够大时, 磁链值等于零甚至为负, 即磁链方向改变, 永磁体的磁作用越小。

(3) 当气隙 $x \in [0, 0.5]$ 时, 曲线较为陡峭, 即磁链随着气隙改变而变化较大。这也是因为顶杆离永磁体越近, 线圈中的总磁链受永磁体作用越大, 呈非线性的剧烈变化。

显然, 工作气隙大小主要影响的是永磁体对顶杆的作用。工作气隙越小, 顶杆与永磁体靠得越近, 永磁体对顶杆的吸力就越大。在一个确定的电流 I 下, 气隙越大, 电磁合力 F_m 越小。同时, 进一步仔细观察数据, 可以发现, 相比于气隙值更大的情况, 气隙值相对较小时, 随着电流的增大, 电磁合力 F_m 的变化幅度也更大。

总之, 电流和气隙的不同设定体现的是磁通变换器不同的工作状态。研究不同电流气隙值组合下的电磁合力、磁链仿真结果就能分析出不同工作状态下的磁通变换器的静态特性。

3.3 验证

试验目的是在不通电流的情况下, 测量能够使得磁通变换器顶杆脱离永磁体的最大力 F 的大小, 以验证 Ansys 的静态仿真结果。因为在 Ansys 静态仿真中同样忽略了弹簧的弹力, 所以试验拆除了磁通变换器上的弹簧装置。

在试验前先在顶杆与永磁体之间塞入一张 A4 纸片, 在之后分析中认为 A4 纸的厚度即为工作气隙的大小。然后把磁通变换器和测力计固定在水平的测试平台上, 将磁通变换器顶杆的外端与测力计相连接, 初试的磁通变换器状态为吸合, 缓慢地将测力计往外拉, 同时观察磁通变换器的顶杆, 当顶杆弹出时读取测力计的示数, 即为所需

的拉力值。经过多次试验,最终得到拉力的范围为 6~8 N,即 $F \in (6 \text{ N } 8 \text{ N})$ 。

对试验的分析:普通 A4 纸的厚度约为 0.1 mm,考虑到实际空气介质与 A4 纸对磁场不同的影响,与仿真在电流值设为 0 A 时,气隙为 0.1 mm 或 0.5 mm 的电磁合力 F_m 结果相比较,初步认为该试验表明仿真数据具有一定的准确性,也为下文中使用 Ansys 对磁通变换器进行模型优化设计分析时涉及到的气隙参数设置提供了依据,使给出的优化设计建议具有一定的参考价值。

4 改变磁通变换器模型设计参数对仿真结果的影响

4.1 线圈匝数对磁通变换器的电磁合力影响

使用 APDL 语言进行编辑,设置参数 $I = -2 \text{ A}$, $x = 0.1 \text{ mm}$ 且保持不变,改变线圈匝数 N ,可以得到不同的电磁力的结果,如表 1 所示。

表 1 匝数与电磁合力的关系

$N/\text{匝}$	F_m/N	$N/\text{匝}$	F_m/N
100	-9.509 5	400	-5.234 0
200	-7.954 9	500	-4.067 4
300	-6.529 7	600	-3.030 3

又令电流 $I = 0 \text{ A}$,其他条件不变,气隙为 0.1 mm 时永磁体对顶杆的吸力 $F = -11.193 0 \text{ N}$ 。与表 1 中不同匝数得到的电磁合力 F_m 逐一相减,即为仅由线圈电流产生的电磁力 F_f 。得到线圈电流引起的电磁力 F_f 与匝数的关系,如表 2 所示。

表 2 匝数与电磁力 F_f 的关系

$N/\text{匝}$	F_f/N	$N/\text{匝}$	F_f/N
100	1.683 5	400	5.959 0
200	3.238 1	500	7.125 6
300	4.663 3	600	8.162 7

分析表 1 和表 2 可得:在线圈电流和工作气隙保持不变的情况下,线圈匝数越多,线圈上产生的电磁力 F_f 越大,顶杆所受的电磁合力为 $F_m = F - F_f$,因此总的电磁合力 F_m 越小。这与理论分析相符。

总的来说,在磁通变换器模型中,保持其他模型参数不变,改变包围在顶杆周围的线圈匝数,可以改变电流引起的电磁力 F_f ,进而起到改变磁通变换器静态特性的作用。在足够的线圈匝数条件下,线圈匝数越多,顶杆受到的合力越小,也越容易脱离永磁体的吸引,易引起磁通变换器的错误工作,即来自外界的物理震动也会导致脱扣动作执行。线圈匝数太少,可能会导致脱扣动作超过指定的动作时间甚至不执行,从而影响控制与保护开关的正常工作。因此,在实际的产品设计优化中,可以不断改变线圈匝数进行产品调试,从而在两种情况中寻找一种平衡。

4.2 永磁体截面大小对磁通变换器电磁合力的影响

为了相对直观体现出永磁体参数的改变对磁通变换器静态特性的影响,这里主要分析永磁体的截面积与顶杆所受的电磁合力的关系。根据试验结论,选择工作气隙 $x = 0.1 \text{ mm}$,电流 $I = 0 \text{ A}$,在 Ansys 界面采用 APDL 语言编辑设定不同的永磁体截面半径进行仿真分析,得到永磁体截面积与电磁合力的关系,如表 3 所示。

表 3 永磁体截面积与电磁合力的关系表

半径/mm	截面积/ mm^2	电磁合力 F_m/N
3.20	32.17	-10.557
3.25	33.18	-11.193
3.30	34.21	-11.605
3.40	36.32	-11.710
3.50	38.48	-12.488
3.60	40.72	-12.035

由于受磁通变换器产品体积大小的限制,仅将永磁体的半径取为表 3 中的几个数值作以分析。这里用到的永磁体是一个规则的圆柱体,若截面积太小,永磁体对顶杆的吸引力 F 不够强, F 不足;若截面积过大,因为顶杆的设计尺寸固定,相对顶杆来说磁场分布会过于分散,永磁体的有效截面部分不会增大,因此 F 同样不够大。分析表 3 中的数据,可以看到,在截面大小取值为 $[36 \text{ mm}^2 \ 40 \text{ mm}^2]$ 时,永磁体对顶杆的吸引力 F 最大。考虑到仿真的误差,可得到一个定性的结论,在永磁体半径取到该区间附近某一个最优值

时,能使其对顶杆的吸引力最大,从而最大程度上确保磁通变换器不会轻易的执行脱扣动作。为了避免磁通变换器在受到外界震动时错误执行脱扣动作,应当在设计时考虑在不通电流的情况下尽可能增大永磁体对顶杆的吸引力。仿真数据为实际优化设计提供参考,实际优化设计试验中可采用接近该尺寸的永磁体。

5 结 语

本文基于有限元分析法对 A 型磁通变换器进行仿真,分析其静态的电磁特性,计算得出相关电磁合力和磁链的数据结论。在 Ansys 交互式图形界面建立磁通变换器虚拟样机模型,利用 APDL 语言编辑改变参数,将电流和工作气隙值设为变量,从而求得在磁通变换器不同的工作状态下动铁心所受电磁合力,以及线圈磁链数据结果,并且利用 Matlab 绘制出相对直观的关系曲线图,从中分析得到电磁合力以及磁链与变量之间的关系,并与试验验证相符;改变模型中线圈、永磁体的参数以分析磁通变换器设计参数的改变对其静态特性的影响,线圈匝数过多或过少都会导致其不正常工作,在优化设计时需要在匝数设定时兼顾两种情况,找到一个平衡点;永磁体的截面大小直接影响对顶杆的吸引力,参考仿真分析可

以寻找到最优的永磁体截面尺寸。相关的仿真分析可以对实际产品提出优化建议,并且提供优化设计的参考意见,对物理样机设计和改进提供仿真环境下的指导与验证。仿真分析和试验结果表明了本文给出的分析方法的正确性。

【参 考 文 献】

- [1] 向洪岗,陈德桂,李兴文,等.基于磁场和等效磁路的磁通变换器特性仿真和优化设计[J].电工技术学报,2009(4):85-91.
- [2] 陈德桂.磁通变换器的优化设计[J].低压电器,2005(9):7-9.
- [3] 贺雅洁,黄世泽,郭其一,等.基于 Ansys 的短路脱扣器电磁吸力仿真研究[J].低压电器,2012(19):5-9.
- [4] BOUTANA I, MEKIDECHE M R. Modeling of electromagnetic forming devices by finite element analysis [J]. Transactions on Systems, Signals & Devices 2005-2006 2(2):131-141.
- [5] 孙明礼,胡仁喜,崔海蓉,等. ANSYS10.0 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.
- [6] 周英姿,尹天文,李甲,等.磁通变换器的动态特性仿真[J].低压电器,2011(12):1-3.

收稿日期:2013-07-19

(上接第4页)

量,对比仿真分析结果,从机构脱扣分闸动触头平均速度来讲,基于仿真、优化设计的方法是可行的。

【参 考 文 献】

- [1] MASAHIRO F, TAKESHI K. Standardization and value analysis for molded case circuit breaker[J]. Mitsubishi Electric Advance 2011(133):6-8.
- [2] CHEN D G, KANG Y. Dynamic simulation and optimum design of operating mechanism for molded case circuit breaker: proceedings of 10th International Conference on Switching Arc Phenomena, Poland,

2005 [C].

- [3] 纽春萍,陈德桂,张敬菽,等.电动斥力作用下低压断路器分断特性的研究[J].电工技术学报,2005,20(7):34-38.
- [4] 张敬菽,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(3):102-107.
- [5] 吴翊,胡正勇,黄蓉蓉,等.万能式断路器操作机构运动特性仿真分析[J].低压电器,2011(12):4-7.
- [6] 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,2007.

收稿日期:2013-08-01