

永磁机构的研究与发展

朱学贵, 王毅, 罗礼全, 毛慧勇

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

Research and Development of Permanent Magnetic Actuator

ZHU Xue-gui, WANG Yi, LUO Li-quan, MAO Hui-yong

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

摘要: 从机械设计、电子控制、数学方法、计算机辅助技术和材料科学的角度, 对永磁机构的研究进展进行综述、分析和展望, 并提出学科交叉、综合设计的发展理念, 促进永磁机构的系统化研究和发展。

关键词: 永磁机构; 研究; 发展; 综合设计

中图分类号: TM561

文献标识码: A

Abstract: Based on several aspects, such as the mechanical design, electronic control, mathematical method, computer aided and material technology, the permanent magnetic actuator (PAM) is summarized in this paper. And comprehensive design theory is proposed, thus leading a promotion in the development and the systematized research of PMA.

Key words: permanent magnetic actuator(PMA); research; development; comprehensived design

0 引言

永磁机构零部件少、可靠性高、加工容易、结构简单、与真空断路器配合良好, 可以实现免维护运行。但其不利因素则是直流电源与控制单元所带来的成本及可靠性问题, 影响了永磁机构发展与推广^[1]。

1 机械结构与优化

机械结构与优化的主要目的是缩小永磁机构的体积, 降低磁路磁阻, 满足应用功能和寿命要求。

1.1 基本结构

根据永磁机构的工作特点和内部结构, 大体可分为双线圈双稳态、单线圈单稳态和双线圈单稳态(分离磁路)三种。双稳态和单稳态永磁机构在不同的场合各具优势, 应在满足技术要求的前提下, 作出合理的选择^[2]。

从外形结构看, 可以分为方形和圆形结构。由于

方形结构体积偏大、耗材多、加工工艺复杂, 所以永磁机构一般采用圆形结构, 在对空间具有特殊要求的场合, 也可以采用方形结构^[3]。

1.2 永磁体和线圈布置

永磁体是永磁机构的核心元件。基于可靠性的考虑, 现有的永磁机构一般安装在静铁心上。根据保持力、能耗和体积要求, 永磁体可以具有不同尺寸、结构和布置方式。对圆形结构, 可以由多块镶嵌布满全周, 或周向部分布置, 做成两个或多个并联扇形结构, 其余扇形空间用非金属块填充, 形成一个圆形套^[4]。同时应根据减小能耗和体积的不同需求, 改变永磁体的安装位置和大小^[5]。

线圈是实现配永磁机构断路器可靠开合的关键元件。线圈的匝数、线径和布置方式都将影响永磁机构的动态性能。如果线圈的截面积一定, 改变线圈的线径与匝数, 就可以改变开关的速度特性^[6]。对于两个控制线圈, 可以根据始动安匝数和输出机械功的需要选择不同的线圈布置形式^[7]。

1.3 改进设计

为保护永磁体, 在永磁体与动铁心之间增添用软磁材料构成的极靴连接动铁心, 再通过端盖、外磁轭形成封闭磁路^[4]。

在动铁心与静铁心之间设计适当的非工作气隙, 可以改善开关与机构的匹配特性, 减小合闸时的启动电流^[6]。在合闸端和分闸端的主气隙中加非磁性垫片, 与动铁心和永磁体间的间隙共同构成各自的防剩磁间隙, 以防动铁心被剩磁“粘住”^[8]。

目前永磁机构几乎全部用于中压真空断路器领域, 但是发展长行程高压永磁机构有着十分重要的意义, 专家们一致认为理论上是可行的, 且已有一些单位进行了卓有成效的试验研究。通过分析动铁心行程与机构特性之间的关系, 行程增加(或动铁心变

收稿日期: 2005-12-06; 修回日期: 2006-04-05

作者简介: 朱学贵(1975-), 男, 四川南江人, 博士研究生, 现从事智能电器, 磁场数值计算等方面的研究。

短时),机构的静态保持力将增加,但线圈的安匝数也几乎成相同比例增加^[9]。为此,在基本不增加磁系统体积和安匝数的前提下,通过在分闸线圈工作气隙区域内设置磁分路,使动铁心的电磁吸力特性趋于平坦,且长行程的动铁心在合分闸时均能获得所需的动能^[10]。

为提高永磁机构,特别是长行程永磁机构的分闸能力,作者设计了一种新型的自动装置^[11]。该装置由两个磁短路环组成,安装在动铁心的分闸端,可以在动铁心启动前大大地削弱合闸永磁保持力。配上这种装置的永磁机构能快速分闸,且只需较小的分闸电流。

1.4 传动及安装方式

永磁机构与真空开关之间的传动有直动式、单连杆传动和多杆传动等三种方式。直动式的传动方式有利于减小整个真空断路器的体积,减少传动环节,提高传动可靠性。作为直动式传动的典型,某公司的ISM系列真空断路器的所有开关零件为轴向对称装配,运动部件全部为直线运动,且其真空灭弧室为透明外壳,内部工作情况一目了然。单连杆传动方式的好处是设计时可以选择不同的传动比,以适应不同的力学特性和行程要求,但是永磁机构的输出力矩为定值时,受力与行程恰恰是矛盾的。因此对于大开距的高压真空断路器,既要求保持力大,又要求动铁心行程长,就变得十分困难。为此,一些断路器借鉴了弹簧机构的特点,采用了多杆机构传动方式,起到了省力的作用。但是,连杆传动的可靠性不如直动式的高,且断路器体积大。

永磁机构的安装主要有立式和卧式两种,但前者是主要的安装方式。

2 特性分析及其数学方法

永磁机构的特性包括静态特性和动态特性。永磁机构的静态特性是指线圈激磁电流为零时,由永磁体产生的力学特性和磁场分布,是永磁机构各元件(包括永磁体)机械结构设计和优化的理论依据,也是动态特性分析的基础。永磁机构的动态特性是指激磁电流不为零,即在永磁机构执行开关状态转换的过程中,与永磁体共同形成的力学特性、运动特性、磁场分布特性和电流电压变化特性,以及相互关系,它是永磁机构机械系统、电磁系统,特别是电源与控制系统的理论基础和性能评判依据。由于动态特性是与时间相关的、机电磁耦合的,且包含永磁场,分析起来要复杂得多。不过,如果不考虑涡流的影响,常常基于特定的时间或者基于特定的动铁心位置,将动态问题转化为恒定磁场问题,运用静态分析的方法进行逐点分析。

特性分析的理论基础包括电路平衡方程、达朗贝尔运动方程和麦克斯韦方程组。分析可以采用场

量分析法和磁路分析法^[12]。

2.1 静态特性

永磁机构具有对称性。对于方形永磁机构来说,忽略端面效应时可以采用平面场进行计算。对于圆形永磁机构来说,由麦克斯韦方程组推导出二维非线性轴对称方程,并利用有限元方法进行数值求解。边界条件为第1类和第2类边界条件。得到磁场分布后,作用在动铁心上的电磁吸力可以通过包围动铁心的任意表面上的应力的面积积分得到。动铁心的表面存在一层气隙单元,在选择积分表面时,为提高计算准确度,积分路径应通过三角形元素的中心^[13]。

2.2 动态特性

动态特性的建立较为复杂,且在动特性计算前,需要进行质量归算和反力归算^[14]。

在动特性的计算中,可以将动铁心的运动行程分为若干个子步,与之对应的各步磁通密度可以用迭代的方法求出,进而求出出力特性,线圈电流等其它特性值。可以将磁场区域分成若干个几何块,并设每块内磁通密度处处相等,忽略漏磁。线圈及永磁体磁路可用相应的几何子磁路的串并联来等效代替,这样简单的直流磁路计算方法就可应用到机构的磁场计算中^[6]。也可将永磁材料的磁化曲线 $B=f(H)$ 扩展、转化为永磁部件的磁化曲线 $\phi=f(IN)$,将永磁磁路计算转化为一个普通的电磁铁磁路计算,从而使永磁机构的计算方法更合理、简单^[15]。考虑涡流的影响时,可以将求解区域分为涡流区和非涡流区两部分,分别导出用矢量磁位和标量磁位表示的涡流问题方程,并利用库仑规范条件导出该涡流问题的边界条件^[16]。

在动态系统的方程组中,等效激磁电流和电磁吸引力与磁链和动铁心位移有关,由于永磁体的存在,求解激磁电流十分困难,当磁链和动铁心位移一定时,可以引入一个变量 G ,其中 $G=(\psi - \psi_0)/i$,则 $\psi = \psi_0 + iG$,其中, ψ_0 为动铁心位移确定且激磁电流为零时永磁体产生的磁链。这样简单地处理永磁体形成的磁链,使耗费的计算时间减少,且计算结果与实测结果很相近^[17]。

进行有限元分析时,采用变形区单元平移技术和区域压缩技术,可以更好地适应动铁心的运动^[18-19]。后者已经集成到三维应用软件 FLUX 里,并在某公司的电磁机构上得到了成功应用。

3 电源与控制技术

从国内外情况看,目前,永磁机构的电源主要采用以下几种方式:①采用电容器对分、合闸线圈放电的方式;②对于有条件的电站,可以直接使用站内的直流电源;③直接使用高能量的锂电池。对于上述3种方式,永磁机构的分、合闸线圈电流的大小对电源的影响很大,而且如果电流较大,电压较高,靠锂

电池供电就行不通,就要从电网取得能量。

配真空断路器的永磁机构控制系统应该满足以下几个条件:应工作可靠且具有足够的抗干扰能力;动作迅速且延时短;工作电压范围宽,环境适应性强。这些要求促进了电力电子、光纤通讯、智能控制等技术在永磁机构控制系统中的发展和应用。

永磁机构的控制系统可以通过光纤接口接受光电信号,并通过逻辑判断控制机构动作和发出分合闸操作的命令。原先的触点开关被电力电子开关所替代。还可具有智能化功能,融合在线检测技术等来最大限度地体现永磁机构的优越性。国内机构开发的一种智能控制与电子驱动装置,采用 CPLD 完成智能控制,并采用由 SCR 和 IGBT 组成的电子开关通断合分线圈电流。它不仅能完成断路器的合分闸操作,改善了断路器的分合闸运动特性,还具有过流、欠压分闸、合分闸闭锁,以及操作系统的故障监测、诊断与报警等功能^[20-21]。

近几年同步开关控制技术正在蓬勃发展,将大大推动永磁机构的研究和应用。

4 计算机辅助技术

计算机辅助技术已经成为永磁机构设计的一个重要手段,包括永磁机构的实体建模,特性分析与计算,运动过程的虚拟仿真,运行状况的实时控制与监测以及相关软件的应用和开发等方面。

由于永磁机构的动态方程组不能用严密的解析方法求解,应用 MATLAB 语言的 SIMULINK 工具箱对动态过程方程组进行了仿真,不仅可以获得动态过程的时域解,而且可以方便地修正储能电容器和激磁线圈的电气参数^[10]。

采用 ANSYS 编程语言 APDL 实现耦合场的计算,对线圈电流、动铁心位移和动铁心受力进行分析,并可以计算不同电导率时涡流效应的影响^[16]。还可用 ANSYS 软件对极化磁系统交流稳磁过程进行虚拟设计,得到满足工程要求的永磁回复线起始点^[22]。

有限元分析软件 ANSYS 能够在大量的 CPU 时间和存储开销的基础上,提供对电磁机构场域的精确求解,但是求解前需要详细地定义几何结构和边界条件,而且要仿真电磁机构的动态行为和进行优化设计并非易事。基于耦合的数学模型和改进的退火算法,开发出 MAG.ACT 软件,无需进行复杂的有限元建模就可以进行动态仿真和优化设计^[23]。

利用英国 VF 公司的 VectorFields 软件中的三维磁场分析模块 TOSCA 对永磁机构进行构造,进而在三维空间内自动剖分,可以得到用于电磁场分析的剖分图^[24]。另外其它 CAD/CAE 软件,如 Pro/Engineer, ADAMS 等对于永磁机构的建模和动力学分析都十分有用。

软件的自行开发着眼于永磁机构设计的参数

化、可视化和系列化。国内已经开发出永磁机构的设计与分析软件^[6,25]。软件系统包括:友好的前处理人机界面、永磁机构电磁场数值计算模块、机械磁场动态耦合场计算模块、AUTOCAD 机械设计模块、电子控制系统设计模块、三维动画形式的机构运动过程、后处理曲线输出、材料器件明细表和技术文档建立模块等。将其用于真空断路器和真空负荷开关永磁机构的设计,可以缩短设计周期和提高产品性能。

5 材料技术

永磁机构的发展得益于高质量、高稳定性、长寿命、耐高温及耐冲击的钕铁硼永磁材料的应用。

真空断路器的永磁机构所选用的钕铁硼材料,主要考虑以下方面特性:磁场强度(矫顽力)、剩磁、最大磁能积、退磁临界温度、温度退磁率(温度降低时磁性可恢复)、自然老化退磁率^[26]。由于钕铁硼材料的祛磁曲线几乎是一条直线,且它的回复曲线与祛磁曲线基本重合,因此不必担心永磁体的退磁^[27]。由于动铁心和静铁心(外壳)的剩磁特别小,不会产生磁化问题。

对于没有预先充磁的永磁体,在永磁机构装配之后必须进行充磁。采用电容器产生脉冲电流进行充磁,为保证充磁电路不发生振荡,充磁之前对激磁线圈电感进行测量。充磁后,可以用测力计测量电磁力,如果与设计计算的结果极为接近,说明充磁是成功的,永磁材料是正品,性能可靠^[4]。

6 结语

永磁机构的研究,应从结构原理与电源控制系统入手,积极寻求突破,充分结合计算机辅助手段,引入新型材料,创立一套理论体系,使永磁机构的设计生产系列化,应用广泛化。存在的问题是,过分依赖经验,缺少理论指导,且试验条件不足,特别是高压永磁机构难以进行现场试验,阻碍了进一步的研究与应用。用户、生产与研究部门成果与经验交流太少,单独的资金和人力投入与开发力度不够。

但是,随着机械设计、电子控制、计算机辅助、材料新技术的快速发展以及理论系统的完善,加上永磁机构固有的优势,永磁机构面临着很好的机遇,会得到迅速的发展。

参考文献:

- [1] 游一民, 马如海, 刘向军. 中压电器设备的现状与发展[J]. 电气时代, 2005(1): 20-24.
- [2] 卢芸, 林莘. 双稳态及单稳态永磁操动机构的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2002, 24(2): 103-106.
- [3] 游一民, 陈德桂, 孙志强, 等. 方形与圆形永磁机构的比较[J]. 高压电器, 2004, 40(6): 436-438.
- [4] 苗本健, 王章启, 龚昊, 等. 9 000~10 000 N 永磁操动机构的研制[J]. 华通技术, 2004(1): 3-8.
- [5] 王海峰, 徐建源. 永磁操动机构磁场数(下转第 381 页)

能够更稀疏是值得探讨的问题。由表 1 可知,图 4 (c) 作为中间半导电层的应力锥时最大切向场强的值最小,图 4(b) 的值最大,然而作为工艺上的实现来说,更多的生产厂家把这部分设计成图 4(a) 或图 4(b) 的形状。国外很多电缆附件厂家也常常用一个很简洁的方式处理,即把中间的半导电层两头削成一个锐角,其实那样并不能够改善场强,只是一种经济上的处理。如果更科学地考虑电缆附件的使用寿命,那么屏蔽管形式应该引起大家的重视。

表 1 3 种不同屏蔽管形式的电缆附件最高场强的比较

	$E_{\text{max}}/(V \cdot m^{-1})$	坐标/mm	$E_r/(V \cdot m^{-1})$
(a)	1.878×10^6	(118.47, 10.89) A 点	2.920×10^6
(b)	2.624×10^6	(117.23, 12.90) B 点	1.664×10^6
(c)	1.340×10^6	(120.33, 11.20) C 点	6.733×10^5

E_{max} ——最大切向场强 坐标——最大切向场强处的坐标位置
 E_r ——该位置的径向场强 (a), (b), (c)——分别为图 4 所示的应力锥形状的附件类型

3 电缆附件尺寸设计要求

不同电压等级的电缆附件在设计时需要考虑各尺寸参数的匹配问题。应力锥与屏蔽管的距离是一个不可忽视的参数,见图 5。表 2 列出了当 d 分别取

80, 50, 35 cm 时点 A 与 B 的场强大小。由此可见, d 值减小会使得应力锥和屏蔽管附近的场强值增加。因此,在电缆附件设计时不能为了节省用料而缩短 d 的值。当然,无谓的增大 d 的值也是不科学的。在电缆附件行业里, d 值有专门的标准规定,不同电压等级的冷缩预制式电缆附件 d 值都有所不同。

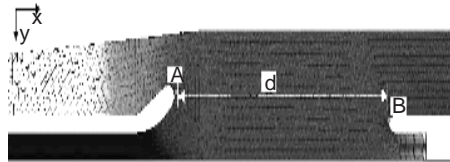


图 5 电缆附件场强分布(场强大小随颜色由深到浅显示)

表 2 取不同 d 值时 A, B 点的场强大小比较

d/cm	A 点场强 $/(V \cdot m^{-1})$	B 点场强 $/(V \cdot m^{-1})$
80	3.287×10^5	1.084×10^6
50	3.369×10^5	1.098×10^6
35	3.760×10^5	1.148×10^6

参考文献:

- [1] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- [2] 江 汛, 王仲奕. 复合高压套管的电场计算和分析 [J]. 高压技术, 2004, 30(3): 17-21.
- [3] 游一民, 陈德桂, 孙志强, 等. 基于动态分析的永磁机构最佳设计参数的选择 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23(1): 43-46.
- [4] 钱家骊, 徐国政, 奚晓峰. 中压断路器用永磁机构中线圈不同布置的分析 [J]. 高压电器, 2000, 36(2): 25-28.
- [5] 胡 双, 左全璋, 左才科. 永磁操动机构设计参数的调整 [J]. 华通技术, 2003(4): 3-6.
- [6] E. Dullni, H. Fink, M. Heimbach, et al. A Family of Vacuum Circuit Breakers with Worldwide Applications Using Common Components [C]// 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, IEE Conf. Publ. No. 482, London, 2001.
- [7] 马少华, 王季梅. 72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
- [8] 朱学贵, 王毅. 为提高分闸能力的永磁操动机构的研究与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 163-168.
- [9] 王双红, 周理兵. 永磁操作机构电磁设计及其动态特性分析 [J]. 华中科技大学学报, 2003, 31(5): 75-77.
- [10] 林 莘, 高会军, 铁 韧. 永磁操动机构磁场数值计算 [J]. 高压电器, 2000, 36(3): 3-6.
- [11] 林 莘, 徐建源, 高会军. 永磁操动机构动态特性计算与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 85-88.
- [12] 胡 双, 左全璋, 左才科. 永磁机构计算方法的改进 [J]. 低压电器, 2003(1): 10-13.
- [13] 李 岩, 王胜辉, 林 莘, 等. 真空断路器永磁机构计算与分析 [J]. 高压电器, 2003, 39(1): 34-36.
- [14] LIU Fugui, GUO Hongyong, YANG Qingxin, et al. An Improved Approach to Calculate the Dynamic Characteristics of Permanent Magnetic Actuator of Vacuum Circuit Breaker [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 1918-1921.
- [15] Kyung Il Woo, Byung Il Kwon. Characteristic Analysis and Modification of PM-type Magnetic Circuit Breaker [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 691-694.
- [16] Philippe Wendling, Vincent Leconte, Patrick Lombard, et al. 3D Motion in Magnetic Actuator Modelling [C]// 39th IAS Annual Meeting, Industry Applications Conference, Seattle: 2004(3): 2105-2110.
- [17] 张俊民, 徐国政, 钱家骊, 等. 一种永磁操动机构的智能控制与电子驱动装置的研制 [J]. 高压电器, 2003, 39(1): 27-29.
- [18] 黄瑜珑, 王静君, 徐国政, 等. 配永磁机构真空断路器运动特性控制技术研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(5): 321-323.
- [19] 梁慧敏, 翟国富, 罗福彪. 基于有限元法的极化磁系统永磁回复线起始点的虚拟设计 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 148-152.
- [20] Li Z, Renforth L A, Auckland D W, et al. Computer Aided Optimal Design of Magnetic Actuator for Autorecloser Application [C]// Fifth International Conference on Trends in Distribution Switchgear: 400 V ~ 145 kV for Utilities and Private Networks, Conf. Publ. No. 459, IEE, London, 1998.
- [21] 孙海涛, 陈德桂, 李兴文, 等. 真空断路器永磁操动机构的三维有限元分析 [J]. 电工技术杂志, 2001(7): 8-10.
- [22] 李 岩, 王胜辉, 林 莘, 等. 真空断路器永磁机构设计与分析软件的开发 [J]. 高压电器, 2003, 39(1): 34-36.
- [23] 朱朝敏, 刘 凯, 刘新广. 永磁机构在真空断路器上的应用 [J]. 电力设备, 2004, 5(12): 60-62.
- [24] 游一民, 陈德桂, 罗文科, 等. 关于永磁机构中永磁工作点的讨论 [J]. 高压电器, 2002, 38(4): 39-41.

(上接第 374 页)

- [5] 值计算和结构分析 [J]. 高压电器, 2002, 38(1): 11-13.
- [6] 游一民, 陈德桂, 孙志强, 等. 基于动态分析的永磁机构最佳设计参数的选择 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23(1): 43-46.
- [7] 钱家骊, 徐国政, 奚晓峰. 中压断路器用永磁机构中线圈不同布置的分析 [J]. 高压电器, 2000, 36(2): 25-28.
- [8] 胡 双, 左全璋, 左才科. 永磁操动机构设计参数的调整 [J]. 华通技术, 2003(4): 3-6.
- [9] E. Dullni, H. Fink, M. Heimbach, et al. A Family of Vacuum Circuit Breakers with Worldwide Applications Using Common Components [C]// 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, IEE Conf. Publ. No. 482, London, 2001.
- [10] 马少华, 王季梅. 72.5 kV 高压真空断路器永磁操动机构的研究与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 109-114.
- [11] 朱学贵, 王毅. 为提高分闸能力的永磁操动机构的研究与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 163-168.
- [12] 王双红, 周理兵. 永磁操作机构电磁设计及其动态特性分析 [J]. 华中科技大学学报, 2003, 31(5): 75-77.
- [13] 林 莘, 高会军, 铁 韧. 永磁操动机构磁场数值计算 [J]. 高压电器, 2000, 36(3): 3-6.
- [14] 林 莘, 徐建源, 高会军. 永磁操动机构动态特性计算与分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 85-88.
- [15] 胡 双, 左全璋, 左才科. 永磁机构计算方法的改进 [J]. 低压电器, 2003(1): 10-13.
- [16] 李 岩, 王胜辉, 林 莘, 等. 真空断路器永磁机构计算与分析 [J]. 高压电器, 2003, 39(1): 34-36.
- [17] LIU Fugui, GUO Hongyong, YANG Qingxin, et al. An Improved Approach to Calculate the Dynamic Characteristics of Permanent Magnetic Actuator of Vacuum Circuit Breaker [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 1918-1921.