

非平面接触永磁机构与双动式真空灭弧室探讨

韩筛根¹, 张重乐¹, 何叶青², 向驰¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;

2. 北京中科三环高技术股份有限公司, 北京市 海淀区 100080)

Discussion on Permanent Magnetic Actuator With Non-Plane Contact and Double-Acting Vacuum Interrupter

HAN Shai-gen¹, ZHANG Chong-le¹, HE Ye-qing², XIANG Chi¹

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. Beijing Sanhuan High-Technology Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: The basic structure and working principle of a new type of permanent magnetic actuator, namely the non-plane contact permanent magnetic actuator, is presented. Such a permanent magnetic structure can produce magnetic field with high axial gradient, so the dynamic response ability of coil magnetic field to moving iron-core can be remarkably improved to achieve the aim of increasing the initial velocity of the moving iron-core; meanwhile, the differences between basic working principle of double-acting vacuum interrupter and that of common vacuum interrupters are described, then a scheme to combine and match these two technologies are analyzed and researched; and then a brand new design idea which can greatly improving the performance of vacuum circuit breaker is proposed and applied in the development of a new generation of vacuum circuit breaker.

KEY WORDS: non-plane contact; high-dynamic response-capability; axial high-gradient magnetic field; permanent magnetic actuator; double-acting vacuum interrupter

摘要: 介绍了一种新型结构的永磁机构——非平面接触永磁机构的基本结构和工作原理, 这种结构的永磁机构能产生轴向高梯度磁场, 可以大幅提高线圈磁场对动铁心动态反应能力, 达到提高动铁心初始运动速度的目的; 同时介绍了双动式真空灭弧室的基本动作原理及其与普通真空灭弧室的区别, 对这 2 种技术的组合、匹配方案进行了分析研究, 提出了一种能大幅提高真空断路器性能的全新设计思路, 并在新一代真空断路器研发中予以应用。

关键词: 非平面接触; 高动态反应能力; 轴向高梯度磁场; 永磁操动机构; 双动真空灭弧室

0 引言

随着国民经济的迅速增长, 我国电网规模扩展

迅速, 真空断路器被广泛地应用到电力系统中, 目前已在中压领域占据了大部分市场^[1-3], 高可靠性、免维护、小型化、智能化是真空断路器的发展目标, 如何降低真空断路器故障率是备受关注的课题。据国际大电网会议以及国内有关部门对断路器故障的统计, 操动机构故障占断路器全部故障的一半以上^[4], 除加工质量不良外, 机构的零部件及传动环节过多是产生故障的主要原因, 尽管各种新技术、新材料、新工艺不断应用于弹簧操作机构和电磁操作机构中, 但仍难以从根本上消除这些故障, 20 世纪 80 年代后期, 出现了一种结构简单、动作可靠的新型操作机构——永磁操作机构, 可以解决上述问题。本文以永磁机构为研究对象, 结合研发产品的实际, 提出永磁机构优化设计的创新方案, 可用于高压断路器的研究设计中。

1 永磁机构的主要特点

永磁操作机构是集电工、磁场、机械及微电子理论等于一体的综合应用技术, 永磁操作机构也被称作永磁保持的电磁操动机构, 具有如下特点:

1) 将断路器的合闸机械锁扣保持变为永磁保持。

2) 通常只有 1 个运动部件, 故障源少, 机械寿命可轻易达到 3 万~10 万次。

3) 结构简单, 零部件数量少, 不足传统弹簧操作机构的 40%。

4) 操作能量以电能的方式储存在电容器中, 对外界供电电源要求低。

5) 没有机械脱、锁扣装置, 利用电磁性能实

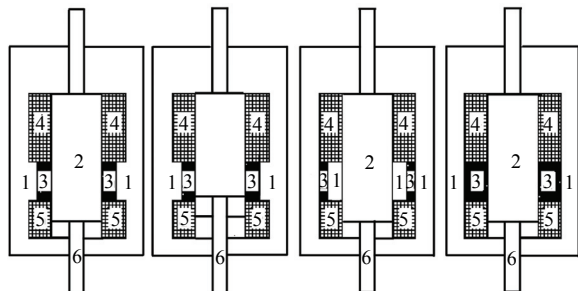
现脱、锁扣功能，从结构上消除了故障频率高的机械脱、锁扣装置。

6) 合、分闸动作时间稳定且分散性很小，完全可以控制在 $\pm 1\text{ms}$ 之内，为断路器实现同步操作提供了保障。

7) 永磁机构的合闸特性(出力特性)与真空灭弧室的反力特性能达到几近完美的匹配^[5]；这也是永磁机构能迅速占领真空开关领域的重要原因之一。

2 平面接触永磁机构应用在真空断路器中的不足

从 1989 年英国曼彻斯特大学设计出第一台永磁机构模型到现在，永磁机构发展的时间虽然不长，但发展速度却很快，它的优点十分突出，有着弹簧机构和传统电磁机构无法比拟的众多优势，目前的结构型式主要为图 1 中的几种型式。



1 为静铁芯；2 为动铁芯；3 为永磁体；4 为分闸线圈；
5 为合闸线圈；6 为驱动杆；7 为极靴

图 1 常见永磁机构结构图

Fig. 1 Common permanent magnet body scheme

尽管后来 Alsthom 公司也研制出了不同于以上 4 种结构的非对称结构永磁机构(存在第 2 个内部运动部件，也叫做磁分离器，它不与操作动触头的操作杆连接，靠合闸时储能的压缩弹簧驱动，并采用传统的机械锁扣方式)^[6]，但其磁路原理和结构没有改变，即都是采用平面接触型的磁路，这样的磁路结构仍然无法消除 2 方面的不足：

1) 分闸特性差。因动铁心参与分闸运动，分闸时系统的运动惯量大，永磁体的吸力在分闸过程中起着阻碍分闸的作用，使得永磁机构的刚分速度和平均分闸速度都难以提高。

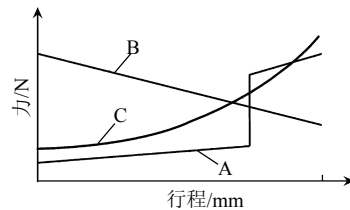
2) 不能保证有效熄灭电弧和消除重燃。永磁机构真空断路器要求在规定的行程内动铁心要有较高的运动速度，但这会增加动触头运动终了时的惯性，加大合闸弹跳和分闸反弹，损害永磁机构的电气和机械寿命。提高动铁心的运动速度与减小碰撞反弹是一对同时存在的技术矛盾，是制约着平面接触永磁机构发展的技术瓶颈。

3 真空断路器触头运动特性与操作机构运动特性分析

3.1 真空断路器反力特性和永磁机构分、合闸出力特性的匹配

永磁机构的动态特性是由电磁吸力和负载反力的配合过程决定的，它们之间的相互关系如图 2 所示^[6]。图 3 为真空断路器的反力特性与永磁机构合闸出力特性的匹配图，曲线 *abcd* 是真空断路器需要的合闸力特性，由 *oabcde* 组成的阴影部分面积为对应所需要的合闸功。从图中可以看出，从合闸起始位置到触头处于刚闭合位置时，系统反力较小，一旦触头弹簧开始压缩，反力就突然增大(图中线段 *bc* 部分)。永磁机构所输出的合闸操作力曲线为图中的 *fg* 部分，*ofge* 组成的阴影部分面积为对应的合闸输出功。曲线 A 为机构永久磁铁产生的磁力，开始阶段它位于横轴下方，可知在合闸开始过程中起阻碍作用，在合闸后期曲线 A 位于横轴的上方，可知在合闸后期起加快合闸速度的作用；曲线 B 为合闸电磁铁产生的合闸力，曲线 C 为曲线 A 和曲线 B 两方面力合成后的总的合闸力输出特性。真空断路器与永磁机构二者理想的合闸配合，不仅要求 C 始终高于曲线 *abcd*，而且还要求 *ofge* 的面积适当大于 *oabcde* 的面积。

图 4 为真空断路器的反力特性与永磁机构分闸



A 为真空断路器要求的特性曲线；B 为弹簧操作机构提供的特性曲线；
C 为永磁机构提供的特性曲线。

图 2 力与行程特性示意图

Fig. 2 Force-stroke characteristic diagram

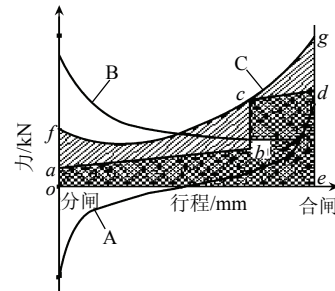


图 3 真空断路器反力特性与
永磁机构合闸出力特性的匹配曲线

Fig. 3 Reaction force characteristics of vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator recloser curve matching output characteristics

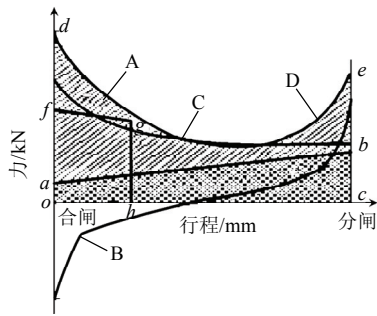


图4 真空断路器反力特性与永磁机构分闸出力特性的匹配曲线

Fig. 4 Reaction force characteristics of vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator sub-gate output matching characteristics curve

出力特性的匹配图，由 $oabc$ 组成的阴影部分面积为配有永磁机构的真空断路器所需要的分闸功，它主要由断路器可运动部分质量和真空灭弧室触头的额定反力构成，呈均匀上升分闸力曲线态势，如图中曲线 ab 所示。释放出的分闸功为 $ofgh$ 组成的阴影部分面积，永磁机构分闸操作时输出的分闸功为 $odec$ 组成的阴影部分面积。从图中可以看出，触头弹簧对提高断路器的动触头刚分速度起着重要作用。

图4中曲线A为触头弹簧产生的分闸力，曲线B为机构中的永磁铁产生的分闸力，曲线C为分闸电磁铁产生的分闸力，曲线D是A、B、C合成后的总分闸力输出特性曲线。永磁机构分闸操作时的分闸功如图中的 $odec$ 组成的阴影部分面积^[7]。可以看出，分闸后期机构的出力较大，而实际上在断路器的分闸后期是不需要这样大的出力的，因此给系统带来了很大的冲击，对机构的寿命和断路器的开断都是不利的。

3.2 真空灭弧室动触头的理想运动曲线

操作机构的机械特性除应与负载特性匹配外，理想情况下，真空断路器触头合闸速度应满足2个相互矛盾的要求：为了降低机械应力和合闸终了时的冲击反弹，合闸速度不宜过高；为了减小触头的合前预击穿和磨损量，又要提高合闸速度。同时满足这2个要求的触头运动曲线称之为理想触头合闸运动曲线。同样，真空断路器触头的分闸速度也必须满足2个相互矛盾的要求：为了降低机械应力和分闸终了时的冲击反弹，分闸后期速度不宜过高；为了提高开断能力，防止重击穿，又要尽可能提高初分闸速度。同时满足这2个要求的触头运动曲线称之为理想触头分闸运动曲线。

图5为满足上述要求的触头最佳分闸位移曲线。这个曲线要求操作机构能提供较高的初分速度

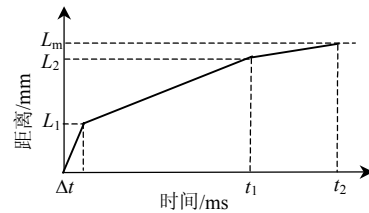


图5 真空灭弧室触头最佳分闸位移曲线
Fig. 5 Vacuum interrupter contact displacement curve of the best sub-gate

(刚分速度)以缩短燃弧时间，使触头快速运动到 L_1 ，然后再低速运动到 L_2 ，使短路电流在此区间过零，熄灭电弧，最后再达到终了开距 L_m 。因此，同样的真空断路器反力特性与不同的永磁机构出力特性进行匹配，会得出不同的分、合闸特性曲线^[8]。

图6为分闸特性图，表示灭弧室动触头分闸时的2种分闸特性，尽管2条曲线中的动触头6mm刚分速度一样，但对开断性能和开断结果的影响差异很大。图中曲线A表示传统永磁机构的分闸特性曲线，该曲线初速度较曲线B不够快，即刚分速度低；在分闸终了时速度大，因此产生的震动和对机构的冲击也都比较大。图中B为理想状态下的分闸曲线，它与曲线A比，刚分速度高、终了速度低，因此产生的震动和对机构的冲击也都比曲线A小，这样就会产生以下差异很大的后果：

1) 根据断路器开断波形分析可知，开断过程中的80%后开相的灭弧时间在10~12ms之间，曲线A分闸运动产生的最强烈时间段基本也在这个时间段，这样刚刚凝固的触头弧根遭遇强烈震动，开断产生的金属微粒会再次飞溅悬浮，触头空间未能得到恢复洁净，触头表面也不能及时保持平整，很有可能引起重击穿甚至开断失败；而理想分闸特性曲线B分闸运动产生的最强烈时间段基本在20ms左右，这给触头弧根的凝固提供了充足的时间，有利于触头表面保持平整和触头空间恢复洁净，消除了产生重击穿的外界条件，减小了产生重击穿的概率，提高了开断成功率。

2) 由于理想曲线B提高了刚分速度，这样有

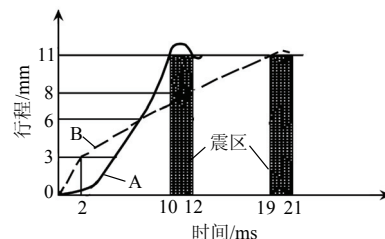


图6 真空断路器分闸行程特性
Fig. 6 Vacuum circuit breaker trip characteristics of sub-gate

利于开断短路电流(通常分闸速度越高越有利)。

3) 对于一定的开断电流, 当触头间隙大于一定值后, 随着间隙的进一步增加, 开断电流会有所下降, 受阳极斑作用, 开断电流电弧过零点时不能熄灭。所以每一种真空灭弧室都有一最佳开距区, 动触头在此区间的运动速度稍低一些, 以便于电弧在此间隙内熄灭, 这样真空灭弧室才能充分发挥出其开断能力。分闸特性曲线 A 在开断小电流时, 因后开相间距太大, 金属蒸汽的平均密度小, 维持小电流的能力差, 截流水平就会增大; 而理想状态下的分闸特性曲线 B 在开断小电流时, 因后开相间距小, 金属蒸汽的平均密度高, 维持小电流的能力增强, 截流水平就会降低^[9]。

从以上的分析不难看出, 真空灭弧室的动触头有一条理想状态的分闸运动特性曲线, 要提高真空断路器的开断性能和机构的操作寿命, 就必须使机构的运动特性曲线与真空灭弧室的动触头理想状态的分闸运动特性曲线相吻合或接近, 而且越接近、越吻合效果越好。

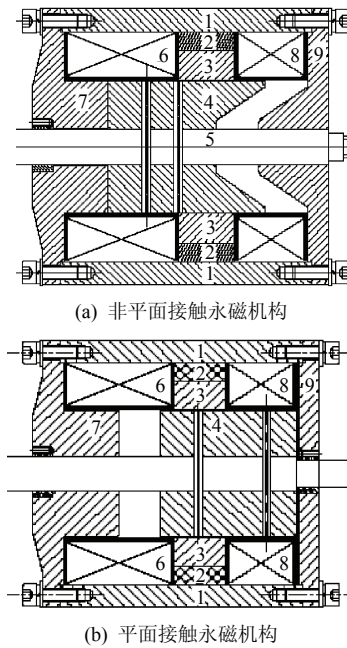
4 非平面接触永磁机构与双动式真空灭弧室的优点分析

4.1 非平面接触永磁机构的优点

评价永磁机构和永磁机构真空断路器的水平高低一般可以从单位开断电流下的机构体积、线圈激磁电流的大小、控制器的可靠性(指令的精准性、抗干扰能力)、储能电容器的体积和可靠性、机构和断路器的整体电气和机械寿命几个方面进行。这几个方面是相互作用、相互影响的, 单从某一方面是无法彻底解决这些问题的, 永磁机构与永磁机构真空断路器应该是一体的, 永磁机构加真空断路器并不等于永磁机构真空断路器^[10]。必须从这 2 方面予以全面创新和整体设计, 否则很难突破技术瓶颈、形成技术优势, 达到理想的效果。

本文在常规永磁机构基础上, 将动铁心与一侧或两侧端盖的接触面设置为曲面, 通过提高永磁机构的轴向磁场梯度, 提高线圈磁场对动铁心动态驱动力, 进而提高永磁机构中动铁心单侧或双侧运动的动态反应速度。用此方法加工出的永磁机构, 替代传统的永磁机构, 可以大幅提高永磁机构的分闸运动速度, 尤其是动态分闸速度, 从根本上解决永磁机构分闸速度偏低的问题。

图 7 是 2 种永磁机构结构对比图。永磁机构的保持力与两接触面间的气隙成反比关系^[11], 在其他



1 为外筒; 2 为永磁体; 3 为环型铁心; 4 为动铁心; 5 为驱动杆; 6 为合闸线圈; 7 为合闸端板; 8 为分闸线圈; 9 为分闸端板。

图 7 2 种永磁机构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of permanent magnet bodies of two structures

零件完全相同的条件下, 将动铁心和合闸端板之间的接触面结构由平面接触改为非平面接触后, 可迅速降低永磁体在分闸瞬间对端盖的吸力, 在图 7 中, 当机构从合闸状态向分闸状态运动时, 在相同的位移条件下, (a) 中的 7 与 4 间的气隙面要远大于 (b) 中的 7 与 4 间的气隙, 有利于提高永磁机构分闸时的刚分速度, 使得其分闸运动特性与真空灭弧室的刚分速度更加接近, 提升了真空断路器的开断能力。

动铁心与端盖之间的静磁保持力与线圈磁场对动铁心的动态驱动力在磁学机理上是有所不同的。通过磁场的能量方程分析, 运用虚功原理可以得出, 线圈磁场对动铁心的动态驱动力满足下式

$$F_z = \mu_0 \chi V_m H \frac{\partial H}{\partial z} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; χ 为铁心的磁化率; V_m 为动铁心的体积; H 为线圈磁场强度; F_z 为磁场驱动力; 其方向指向 H 增大的方向。

动铁心与端盖之间的静磁保持力乃是永磁磁场在介质界面上 Maxwell 张力, 其大小满足下式

$$F_g = \frac{1}{2} \mu_0 H_g^2 S_m \quad (2)$$

式中: H_g 为动铁心与端盖之间的气隙磁场强度; S_m 为动铁心与端盖之间的接触面积。

由此可见，在动铁心的材质、体积以及线圈磁场强度不变的情况下，根据磁力线折射原理，通过提高线圈磁场强度的梯度便可显著提高线圈磁场对动铁心的动态驱动力。虽然在动铁心与端盖的接触面为平面状态时，线圈磁场也存在梯度，但其梯度值较小，磁场对动铁心的动态驱动力较弱。由铁磁性材料的磁场感应原理可知，将动铁心与端盖的接触面设计为曲面，可大幅度提高磁场梯度。通过形成高梯度磁场，使永磁机构在具有足够高的静态定位保持力的同时，动铁心还有足够高的动态反应能力，这是平面接触永磁机构所不具备的。

4.2 双动式真空灭弧室的优点

目前的真空灭弧室都只有一端是可以运动的，另一端固定。为了保证真空灭弧室在合闸状态下有足够的触头压力和合闸时永磁机构具有足够的保持力，通常合闸是不加缓冲装置的，在合闸运动结束时的碰撞是很严重的，不仅增大了合闸时的弹跳，而且加大了分闸时的初始阻力，对提高分闸速度尤其是刚分速度是极其不利的，对整个真空灭弧室的电气寿命和机构的机械寿命都有很大的影响。双动真空灭弧室的出现，使这个问题可以得到圆满解决。双动真空灭弧室的基本结构原理如图 8(b)所示，它的两侧触头都可以运动，只是一侧位移距离大(主动端，相当于原来的动端)，另一侧位移距离小(副动端，相当于原来的静端)。利用这种独特的结构，合闸时触头压力簧在被压缩的同时可以充分吸收机构运动能量，减少触头碰撞，降低或消除弹跳；分闸时，触头压力簧和副动端可以随着主动端同步运动，延缓了触头间的电弧产生时间，由

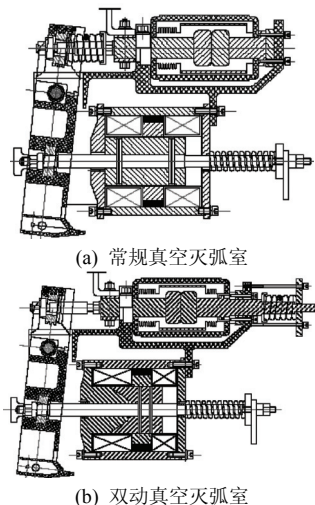


图 8 双动真空灭弧室与常规真空灭弧室结构对比示意图

Fig. 8 Comparison of double-acting and conventional vacuum interrupter schematic structure

$V_1=V_0+at$ 及 $S=V_0t+1/2at^2$ 可知，由于初速度 V_0 的增加，增大了触头运动的刚分速度 V_1 ，这有利于提高永磁机构真空断路器的分断能力和断路器的整体性能。

在相同的超程条件下，断路器分闸时，常规真空灭弧室的动触头和永磁机构的动铁心一起向分闸方向移动了固定超程。由于触头压力簧的补偿作用，灭弧室的动触头在与静触头分离时没有形成有效的初速度，刚分速度低，不利于电弧熄灭，因此降低了真空灭弧室的分断能力；同样情况采用双动真空灭弧室，由于辅助动端(静端)可以随着主动端一起向分闸方向运动一段距离，因动静触头始终位于合闸状态，是不会产生电弧的。当动静触头间真正分离时，动触头已在做加速运动，形成了较高的刚分速度，有利于电弧的熄灭，提高了真空灭弧室的分断能力，这是普通真空灭弧室所不具备的。

4.3 非平面接触永磁机构和双动式真空灭弧室的应用

断路器操作通常是产生过电压和涌流的主要原因，特别是对无功设备(如电抗器、并联电容器组、空载变压器、空载线路)进行操作时，常常会产生剧烈的涌流、过电压等暂态冲击^[12]。因此，运用这 2 种技术可实现同步开合^[13]，解决这一问题。

由于电容器组负载的特殊性，断路器触头分开时电流的相位角 ψ 是随机的，而电弧总是在电流过零时才能熄灭，因此燃弧时间 t 与电流过零时动、静触头分开的距离 L 均和触头分开时电流的相位角 ψ 有关，并满足 $t=(180-\psi/180)\times 10$ ， ψ 越小， t 越长， L 愈大，介质强度愈高，就愈不易出现复燃或重击穿，反之，出现复燃或重击穿的机会就愈高。即使是同一台断路器在开断同一电容电流时，由于每次触头分离时的电流相位角 ψ 不同，产生的过电压大小也不相同。由此，即使在同一电流相位角 ψ 的前提下，增加触头开距和触头的分断速度，虽然 t 不会改变，但 L 可以增大，弧隙介质强度增高，就可避免弧隙出现重击穿，从而不出现过电压。因此，运用这 2 种技术可实现在 $U=0$ 时投入电容器，在 $I=0$ 时切开电容器，可降低操作过电压和引起重燃的概率，减少电弧对触头的烧损，提高真空灭弧室的电气寿命，同时能减小合闸涌流的冲击，提高设备和电网运行的安全性。

变压器在稳态运行时的励磁电流一般只有额定电流的 2%~10%，但在电源接通的瞬间会产生频率

很高、幅值很大的励磁涌流。中、小容量的变压器因涌流的总量不是很大，对变压器的冲击影响也较小，但对大容量的变压器，如果在相位角为 0° 或 0° 附近时操作，则可能产生高达额定电流的10倍以上的涌流，对变压器造成很严重的损害。运用这2种技术将合闸点控制在 90° 或 270° 附近，使合闸涌流大大降低，提高了变压器的安全性和使用寿命。

空载线路为一相对固定等值电容，在不同的电压相位关合所产生的操作过电压是不相同的，而且差异很大，在相位角为 90° 达到峰值，产生的过电压能达到运行时稳态值的2倍及以上，可以引起线路绝缘能力下降，导致局部放电加剧，乃至危及整个输电线路的安全。运用这2种技术将合闸点控制在 0° 或 180° 附近，使关合操作过电压大幅降低，提高线路运行的安全性。

从以上问题的解决方案中不难看出，真空开关采用永磁机构是一个更新换代的工作^[14]，要全面提升电网的供电能力和供电可靠性^[15]，单从一个方面考虑是不能解决问题的，必须多角度、全方位考虑，才能达到最理想的效果。

5 结语

永磁机构真空断路器经过多年的发展，可靠性已有了很大的提高，但离真正免维护、小型化、智能化的要求仍有很大的差距。本文通过对非平面接触永磁机构和双动式真空灭弧室结构特点的分析研究，找出了常规真空断路器存在的不足，提出了解决这些问题的一些思路和探索性建议。随着对非平面接触永磁结构和双动真空灭弧室技术的不断深入研究和电子控制技术的迅速提高，由非平面接触永磁机构和双动式真空灭弧室结合形成的新型永磁机构真空断路器，将更广泛地应用在电力系统中。

参考文献

- [1] 孙树敏, 刘洪顺, 李庆民, 等. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 75-79.
Sun Shumin, Liu Hongshun, Li Qingmin, et al. A summarization of research on fault current limiter of power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 75-79(in Chinese).
- [2] 李洪涛, 张雷, 王圈, 等. 真空断路器电寿命在线监测系统关键技术[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊1): 112-114.
Li Hongtao, Zhang Lei, Wang Juan, et al. The key technology of vacuum circuit-breaker electrical endurance on-line monitor system[J]. Power System Technology, 2007, 31(S1): 112-114 (in Chinese).
- [3] 庞磊, 修士新, 王季梅, 等. 大开距纵磁结构触头磁场特性的数值分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 65-70.
Pang Lei, Xiu Shixin, Wang Jimei, et al. Numerical analysis on magnetic field characteristic of axial magnetic field contacts under long break distance[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 65-70 (in Chinese).
- [4] 郭琳, 黄兴泉, 张欲晓, 等. 高压断路器操作弹簧断裂及分析[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊1): 214-218.
Guo Lin, Huang Xingquan, Zhang Yuxiao, et al. Guo qiang analysis on fracture of operation spring in high voltage circuit breaker[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 214-218(in Chinese).
- [5] 王承玉. 高压开关运行情况与发展趋势[Z]. 森源电气评论, 2002.
- [6] 林莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 1-212.
- [7] 魏本纪. 双稳态永磁操动机构与真空断路器的特性配合问题探讨[J]. 高压电器, 2002, 38(1): 27-30.
Wei Benji. Discussion on characteristic matching of bi-stable permanent magnetic actuator and vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(1): 27-30(in Chinese).
- [8] 马少华, 徐建源, 王季梅. 永磁操动机构特性分析和配用于高压真空断路器的可能性[J]. 高压电器, 2000(4): 19-23.
Ma Shaohua, Xu Jianyuan, Wang Jimei. Permanent magnetic actuator characteristic analysis and distribution for the possibility of high-voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2000(4): 19-23(in Chinese).
- [9] 黄瑜龙, 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): 321-322.
Huang Yulong, Wang Jingjun, Xu Guozheng, et al. Investigation on the controlling techniques of moving contact behaviors for vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 321-322(in Chinese).
- [10] 王岩. 技术创新 打造精品: 开发免维护、高可靠性、智能化产品[Z]. 森源电气评论, 2002.
- [11] 钟定文. 铁磁学[M]. 北京: 北京科学出版社, 1998: 5-324.
- [12] 郑旭, 康健, 杜治, 等. 智能合闸控制器的原理及其在江陵换流站的应用[J]. 电网技术, 2007, 30(24): 72-76.
Zheng Xu, Kang Jian, Du Zhi, et al. Working principle of controlled with artificial intelligence technology and its application in Jiangling converter station[J]. Power System Technology, 2007, 30(24): 72-76 (in Chinese).
- [13] 黄明. 永磁操动机构极其应用[C]. 杭州: 中压开关学术研讨会, 2004.
- [14] 祝振鹏, 孔启翔. 浅谈永磁机构真空断路器的性能指标[C]. 许昌: 永新电器十年庆典(1996-2006), 技术交流, 2006.
- [15] 魏庆海, 吕鸣镝, 周莉梅, 等. 配电网采用20kV供电的前景分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 61-66.
Wei Qinghai, Lü Mingdi, Zhou Limei, et al. Prospective analysis of adopting 20 kV voltage in distribution system[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 61-66(in Chinese).



韩筛根

收稿日期: 2009-02-20.

作者简介:

韩筛根(1967—), 男, 工程师, 研究方向为中压开关结构设计和操作机构设计、低压电器检测;

张重乐(1963—), 男, 高级工程师, 研究方向为高压开关设备及工程、智能化电器技术及应用;

何叶青(1964—), 男, 高级工程师, 研究方向为磁性材料性能和磁路结构设计;

向驰(1967—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

(编辑 褚晓杰)