

机电一体化开关

黄 群

(北京机械工业学院[分部], 北京 100026)

摘要: 对有触点开关和电子开关的串联、并联及串并联电路构成的机电一体化开关的性能进行了研究, 分析了机电一体化开关的机理, 介绍了机电一体化的实现方式, 指出机电一体化开关可以集中并发展有触点开关和电子开关双方的优点, 如可控性好、过载能力强、抗干扰能力强、使用寿命长等; 特别是由于可以彻底地消灭电弧, 因而可显著地简化现有的开关尤其是高压负荷开关的结构, 提高其性能。

关键词: 机电一体化开关; 串联; 并联; 串并联

中图分类号: TM 56; TM 57

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2005)09-0057-05

1 机电一体化开关的机理

实用新型专利《机电一体化开关》(专利号: 200520005260.4)^①所提出的是一种新型电器开关。机电一体化开关是由有触点开关和无触点开关组合而成。如图 1 所示, 在有触点开关如接触器的常开触点上并联着电子开关, 并且有触点开关和电子开关的动作都由共同的控制装置所控制并彼此协调, 这样就构成了机电一体化开关。其中的接触器是依靠机械的动作来完成触点的通断转换的, 属于机械开关。它与电子开关组合成为机电一体化开关后, 只要通过适当程序的控制, 就能够实现在开关中保留有触点开关和电子开关各自的优点, 并且相互弥补各自性能上的不足, 实现整体性能上的提高。

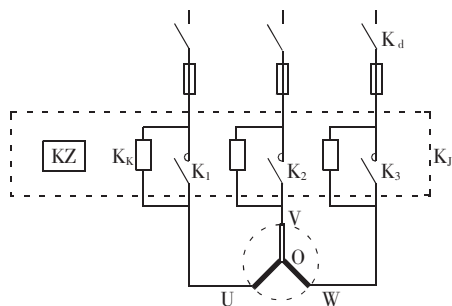


图 1 机电一体化开关在三相电动机上的安装

Fig.1 Mechano-electric integrative switch installed in three-phase motor

从机电一体化开关的动作过程中可以看出它是如何在一体化的过程中实现在性能上扬长补短的。例如, 如果利用图 1 中的机电一体化开关实现电动机的启动(启动的操作过程: 首先是电子开关接通电源并进行软启动, 完成软启动后才是接触器触点持续闭合使电动机转入正常工作), 则首先可利用调节交流电子开关的导通角等办法来调节施加在电动机定子绕组上的三相等效交流电压 U_d (其实它基本上就

是其调制波形的傅里叶级数中的基波电压), 使其从零逐渐增大, 这样电动机转速将从零逐渐升速。由于电子开关可以均匀和连续地调节导通角的大小, 故可实现使电动机在启动时的旋转磁场的强度均匀和连续可控, 以实现启动升速过程中的动态力矩的均匀平滑控制, 避免发生启动冲击, 直到电动机升速至规定值、三相等效交流电压 U_d 达到预定值时再通过它们的控制环节的控制及时地把机械开关的动、静触点闭合以完成启动。

由此可见, 启动过程必须在预定的程序或者相关的条件(如电流、转速、电压等参数的反馈信号)的准确控制之下才能顺利进行。由于在启动开始以后机械开关的动、静触点闭合前已经存在着电子开关的电流旁路, 故机械开关的触点闭合时即使发生弹跳也不会产生电弧, 这样就减轻了触点的电磨损和发热, 减少了触头维护工作量, 延长了寿命, 既解决了环境污染的问题, 又避免了产生触头粘连造成事故。而在软启动结束后由于电子开关被闭合的触头所短接, 电子开关因此被锁定而不能工作, 不但降低了电子开关的发热, 而且为它屏蔽了电磁干扰, 既延长了它的寿命, 也提高了可靠性。这样, 机电一体化开关很好地完成了软启动。

同样, 使 U_d 从规定值逐渐降低也可实现软制动。电动机制动的过程是机械开关先动作然后电子开关继续完成工作, 即: 在机械开关触头首先打开时由于电子开关仍然构成负载电流的并联通路, 相当于打开了机械开关的动、静触点仍然被电子开关连通着, 因此触点上也不会产生电弧; 然后由电子开关自动介入继续完成软制动过程, 直到电动机停转完成软制动后停发电子开关的触发脉冲(当是晶闸管时要到电流过零时), 电子开关自动被断开, 电动机被停止。

可以把软启动、软制动之类的利用调节三相等效交流电压 U_d 实现的操作统称为软操作。可见, 这样就在机电一体化开关中保留了电子开关的能控性好的特点。并且, 只要恰当地使电子开关和机械开关

互相配合地完成工艺要求指定的工作,就能够充分地发挥机械开关和电子开关双方的优点来弥补原先的不足。例如在电子开关完成软启动后机械开关触头才闭合,这样既发挥了电子开关切换负载时不会产生电弧的特长,使开关切换负载时产生的电磁干扰显著降低,又因触头闭合使电子开关不工作而受到保护,即使处在强大的电磁干扰的环境中,此时的电子开关也不会产生误动作,可见机电一体化开关提高了电子开关的抗干扰能力。同时,此时的负载电流完全由过载能力强的机械开关承担,电子开关不工作,故还可改善电子开关的散热问题,延长其使用寿命。

除图1的形式之外,机电一体化开关的实现方式还可以有多种。例如图2就是在负载的零点上实现的机电一体化开关。实际上,如果把图1中的电子开关 K_K 和接触器 K_1, K_2, K_3 按照图2的方式设置在电动机定子绕组的零点上,就成为图2所示的一体化开关。它作为参考文献[1]中所定义的一种形式的零点开关而具有零点开关的普遍优点。由于在正常状态下零点具有零电位,这样使得位于零点的机电一体化开关的工作条件比较安全;而且由于在零点和电网之间有电抗性的电动机定子绕组的隔离,使得电磁干扰波在它们之间的相互传播受到阻隔而大为削弱,因此可以使电网和用电设备电子开关工作的可靠性都得到提高。上述两项优点对于机电一体化开关中的电子开关来说是意义重大的。同时,由于其中的零点无论是在接通或者断开于电网时都具有相同的零电位,因此开关的三个静触头可以连成一体并加以翅型散热片,使触头及电子开关的散热条件都得以改善而提高开关的载流能力。

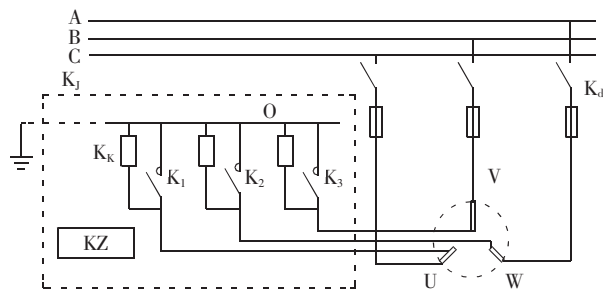


图2 在零点上安装的并联形式的机电一体化开关

Fig.2 Mechano-electric integrative switch installed at neutral point in parallel connection

对于采用接触器作为控制器的传统系统来说,如果图2是在原有的直流电网主电路中接触器的主触点上并联电子开关(例如用IGBT或者GTO构成),即可构成直流电路的机电一体化开关。这种机电一体化开关能控性好,有很强的过载能力和抗干扰能力,适合于承担冲击负载,也十分安全可靠。这样使用在发电机、轧钢机、电气机车、龙门刨床等直流传动系统中时可以获得经济、安全、可靠的效果。同样,机电一体化开关在鼓风机、卷扬机、重型机械等大、中、小容量的交流传动系统中也有显著的利用价值。

图2中电动机的零点O还可以接地,这样还可以进一步提高消除电磁干扰的性能。

机电一体化开关中的有、无触点开关还可以采用串联形式构成。即在动或者静触点上直接地与无触点开关的一极相连接构成串联电路。这时机电一体化开关的软操作程序是:有触点开关先接通电压后,再由无触点开关接通负载电流进行软启动直至完成升速;或者由无触点开关先进行软制动直至完成降速、无触点开关断开电路结束制动后有触点开关才断开电压。在这种方式中,机电一体化开关接通负载的同时无触点开关即电子开关也必然要接通负载进行工作,因此电子开关的工作时间比前者较长。

机电一体化开关还可以构成带负载切换负载电路的换接开关,如图3所示。图中 L_1, L_2 是两个相互独立的负载(例如是变压器的两个分绕组),D是动触头(或旋转刀片),O是D的转轴,O与电源相连接; C_1, C_2, C_3, C_4 是静触头, K_1, K_2 是电子开关。图示的状态是 L_1 接通电源而 L_2 被脱离电源。如果要进行切换,则转动D,首先D与 C_1 打开但是仍然与 C_2 接通,此时 L_1, L_2 的接通状态仍然没有变化。继续转动D至使 C_2 与 C_3 同时被D接通,即 C_2 与 C_3 同时接向电源,此时令电子开关进行电路切换,使 K_1 由通变断而 K_2 由断变通,然后D继续转动至D与 C_2 脱离,继续转动至D与 C_4, C_3 同时接通为止,完成了从 L_1 向 L_2 的负载切换。 L_1, K_1 被脱离了电源而 L_2 接通了电源, K_2 被短路而不承担负载。

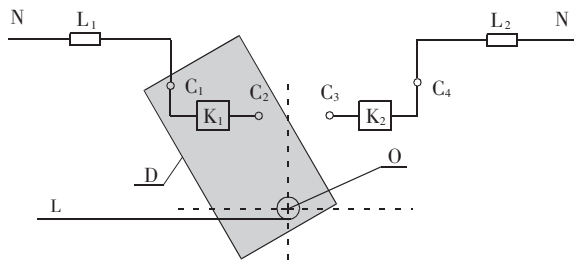


图3 作为换接开关的机电一体化开关

Fig.3 Mechano-electric integrative switch used as changeover switch

机电一体化开关构成的这种换接开关除了具有上述机电一体化开关的特点之外,在快速精确地切换负载上还有以下显著的特点:

a. 由于使用电子开关完成负载的切换,如果电子开关是由只能在电流过零时自然关断的半控器件晶闸管构成的,则当停发 K_1 的触发脉冲使 K_1 关断并且使 K_2 的触发脉冲和电流过零这两个条件之“与”作为 K_2 的触发信号的话,可以在电流过零的瞬间很自然地完成 L_1, L_2 电路切换;

b. 如果电子开关是由全控器件如IGBT构成的,则由于它的通断时间(由 t_r, t_{on} 和 t_f, t_{off} 组成)在微秒(μs)级,因此可以做到使在电流过零的瞬间在几微秒至多在几十微秒的微小时间范围内通过精确地操作 K_1, K_2 的通断切换来平滑地完成电源在两个负载之间的转换。

对于由电源的切换而在 L_1, L_2 之内必然引发的过渡过程,还可以采用上述软操作的方法,使加在 L_1 上的三相等效交流电压(U_d)逐渐下降直至为零后才进行电路的换接。完成电路的换接之后,再使加在 L_2 上的三相等效交流电压逐渐上升直至达到给定值,这样通过控制三相等效交流电压的幅度达到限制整个过渡过程中电压波动的幅度,以使过渡过程能够尽量平滑地完成。这样即使会使过渡过程的时间略有延长,却可以换取使整个换接操作对电网产生的冲击降低到趋近于零的效果,那也是值得考虑的。

另外,机电一体化开关构成的这种换接开关在简化开关设计、降低产品成本方面也具有显著优势。由于大多数电子开关需要在长得多的时间内要承担负载,而图 3 中的电子开关只在动触头(或旋转刀片)通断转换中的部分时间(例如从 D 与 C_1 断开到 K_1 断开的时段,或者从 K_2 接通到 D 与 C_4, C_3 同时接通的时段)即若干毫秒的瞬间内承担负载,其他时间内的负载由动(或旋转刀片)、静触头承担,因此,不但可使得机电一体化开关中的电子开关的发热量大大降低,使用普通的翅片散热器在空气中自然冷却就足以满足散热的要求,开关的整体体积也因此很小,而且还可有效地避免电子开关受到干扰而产生误动作,提高了机电一体化开关运行的可靠性。而据参考文献[2]记载,某种为变压器专门设计的晶闸管有载分接开关不但需要几乎与变压器相当的庞大的体积,需要超过变压器投资额 15 % 的资金,而且还需要消耗大量的冷却水、电力,当然还要有相应配套的管道、阀门、仪表、控制装置、支架等。不仅增加了设备投资,而且增加了水、电等多种资源的耗费。

机电一体化开关的实现方式还可以是集群方式。即:如果将每一个机电一体化开关作为一个单元,那么把两个以上这样相同的单元并联起来作为一个大容量的开关,并且通过协同一致的动作来共同承担起完成对电路的总负载电流的操作任务,也就是用许多小设备集合起来共同完成一项比较巨大的任务。这样借助于小单元的大并联的作用可以将总负载电流基本上均匀地分布在每个单元的机电一体化开关上(因并联电路中各支路电流将与各个支路电阻的大小成反比,而在这里各个支路的电阻大致平衡,故各支路的负载电流也大体平衡),而各单元的机电一体化开关的磨损、发热等涉及使用寿命的工作状态也基本相同。由于每个单元的可靠性很高,而且各个单元还可以互为潜性备用,因此并联后的单元集群的可靠性更高。

2 机电一体化开关应用

据参考文献[3]报导,作为高压开关的真空断路器在闭合接通电路时触头常常会因为产生弹跳而产生电弧,造成烧蚀触头甚至产生触头焊死的故障,以至造成电力系统事故。那么,针对这种情况,如果采用机电一体化开关就可很好地解决问题。

方案一:在真空断路器的动、静触头之间直接并

连接着电子开关,再加上微处理器构成机电一体化开关。其原理接线图仍如图 1 所示。此电子开关 K_k 直接承担着无电弧通断负载和比真空断路器触头 K_1, K_2, K_3 先通后断的任务,即在接通的过程中,当动触头动作之前电子开关 K_k 先行接通构成动、静触头的旁路,然后动、静触头才接通,此时动、静触头之间即使弹跳也已无燃弧的可能;同时,动、静触头稳定闭合后电子开关 K_k 被闭合的触头所短路而退出工作。在断开的过程中,当动触头充分打开之后电子开关才断开旁路,因此在断开的过程中动、静触头之间也无燃弧的可能。可见,方案一的机电一体化开关能够确保在通断操作中都不产生电弧,从而彻底解决高压电弧所带来的一系列问题。但是,由于方案一的电子开关 K_k 在断开时仍然长期在高电压的作用下,工作条件比较严酷,这样就导致了对电子开关 K_k 的各项技术指标要提出较高的要求。

方案二:如图 4 所示为有触点开关和无触点开关组成的串并联电路。

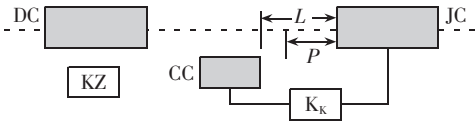


图 4 带侧触头的机电一体化开关的结构
Fig.4 Configuration of mechatronic integrative switch with side contactor

在真空断路器的动触头 DC 与静触头 JC 之间的适当位置上设置着固定的侧触头 CC ,侧触头经过电子开关 K_k 与静触头相串连,再加上微处理器 KZ 就构成了机电一体化开关。侧触头与静触头之间的距离大于动触头弹跳的距离 P ,也大于在该电压下在动、静触头之间可能点燃电弧的动、静触头最大距离 L 。在动触头闭合的过程中,动触头首先接触侧触头,而此时电子开关尚未导通,故动触头与侧触头、动触头与静触头之间都不可能产生电弧。然后,微处理器使电子开关导通而通过侧触头 CC 构成动与静触头之间的旁路;动触头继续运动至接触静触头时,即使动触头发生弹跳,由于已经存在旁路,故在动触头与静触头之间都不可能产生电弧。而在触头稳定闭合之后,电子开关即使仍然导通也是处于被闭合的触头所短路的状态而退出工作。同样,在动触头断开的过程中也不会产生电弧。在动触头打开之初,由于动触头与静触头之间仍然有经过侧触头的旁路,所以动触头和静触头之间不可能产生电弧;当动触头运行到与侧触头即将分离时,微处理器才使电子开关断开,此时虽然高压重新加到动、静触头之间,但是其距离已经大于距离 L ,而与侧触头连接的电子开关也已断开,故动触头与侧触头、动触头与静触头之间已经不可能再产生电弧;直到动触头完全打开电弧也不会重新点燃。这样,机电一体化开关就彻底解决了触头通、断及弹跳而产生电弧的问题。

方案二与方案一相比较,当开关处于完全打开的状态时,由于方案二中侧触头与动触头处于隔离状态,

故能够使电子开关 K_K 与高压完全隔离,因而能够改善电子开关的工作条件。

方案三:如图5所示也是有触点开关和无触点开关组成的串并联电路,把真空断路器的动触头 DC 经过其辅触头 FC 与电子开关 K_K 一端相串连、把静触头与电子开关另一端相串连,再加上传感器及微处理器 KZ 就构成了机电一体化开关。

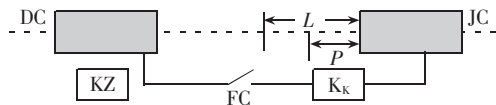


图5 带辅触头的机电一体化开关的结构

Fig.5 Configuration of mechano-electric integrative switch with auxiliary contactor

此开关在触头闭合的过程中首先使辅触头闭合,将尚未导通的电子开关与动触头连通;然后,当动触头运行到与静触头之间距离减小到等于距离 L 或者距离 P 之前由微处理器、位置或者时间传感器发出信号使电子开关导通以构成动、静触头的旁路,此后即使动、静触头之间距离减小到小于 L 或 P ,但是由于已经被电子开关所短路而动、静触头之间不可能产生电弧;故在动触头继续运动直到与静触头接通,即使动触头弹跳,但是由于已经存在电子开关的旁路,触头之间也不可能产生电弧。而在触头稳定地完成闭合之后,电子开关即使仍然导通也是处于被闭合的触头所短路的状态而退出工作。开关断开时的动作顺序正好相反:在动、静触头之间达到距离 L 之前电子开关处于导通状态,使正在打开的动、静触头被导通的电子开关所旁路而不会产生电弧;当动触头打开到与静触头之间超过规定的距离 L 时,由微处理器或传感器给出的信号控制下电子开关才断开,而此时由于动、静触头之间的距离已经超过距离 L ,触头之间已经不会再点燃电弧了。在此后才使辅触头打开,使已经断路的电子开关与动触头之间再断开,以隔断经过动触头加到电子开关上的高电压;最后动触头打开到规定位置而停止运动。由此可见,机电一体化开关可以可靠地避免在通、断负载及在触头弹跳时产生电弧以及由它所引发事故。

方案三与方案一相比,当开关处于完全打开的状态时,由于方案三中打开的辅触头能够切断高压,故能够使电子开关 K_K 与高压完全隔离,因而也能够改善电子开关的工作条件。能够同样承受高电压的辅触头需要特殊设计,其作用是比动触头先通后断。当然,辅触头的这种作用也可用其他开关及传感器替代。

如果在开关通断操作中同时利用调节电子开关的导通角等办法调节三相等效交流电压(U_d),实现高压开关软操作,则在操作中还能够降低甚至消除对用电设备以及对高压电网产生的电磁冲击,从而还可以提高用电设备以及高压电网的运行质量和可靠性。

总之,从上述方案可见,机电一体化开关可以彻底解决开关操作中产生高压电弧所带来的一系列问题,因此机电一体化开关可以淡化甚至取消以真空断路器为代表的高压开关中相应的熄弧装置、材料的设

计,既可节能,又可免除环境污染;同时,无须考虑用加快动触头运动的速度缩短触头之间燃弧的时间和造成的影响,故动触头的动作速度也可大幅降低,使机构更加简化,震动减小,稳定性更好;维护简化,寿命延长;也不存在由于电弧引起的相间短路、对地短路的危险,因此开关的安全性能得以提高,结构尺寸、安装尺寸可以降低,从而使机电一体化开关的整体构成大为简化,各项性能指标得到大幅度的提高;同时,还能实现软操作,实现带负载快速换接电路,避免产生操作过电压,以提高用电设备运行的性能和避免影响高压电网的供电质量。如果机电一体化开关再采用零点开关的运行方式,则不但开关可以避免从电网传入各种杂波的干扰,绝缘和散热问题也可进一步改善。

当然,在真空断路器上并联的电子开关应该具有与电网特性和工作条件相适应的性能指标,才能满足正常工作和保证安全的需要。可喜的是,迅速发展的现代电力电子技术已经能够越来越全面地满足这些要求。据参考文献[4]报导:“第一个采用晶闸管阀的高压直流(HVDC)输电线路于1972年建成的依尔河(Eel River)电力系统,额定电压DC 80 kV,传输功率350 MW。我国于20世纪80年代中期建成的第一条由舟山—镇海的高压直流(HVDC)输电线路(电压100 kV,输送功率50 MW)以来,葛洲坝—上海HVDC系统采用 ± 500 kV双极联络线,额定容量1200 MW线路;天生桥—广州HVDC线路全长980 km,额定输送功率1800 MW,额定电流1800 A,采用 ± 500 kV,12脉波双极换流阀,……”。参考文献[5]报导:“近30年来,电力半导体技术一直持续不断地向大直径高厚度单晶片晶闸管方向发展以获得更高的单管传输功率。目前市场上大电流换流用晶闸管单片电压已达8.8 kV,而中、小电流换流用晶闸管的单片电压可达9 kV”。文献[2]报导:“用于三峡HVDC的3500 A/7200 V的晶闸管国内已经批量供货”。文献[6]还报导了固态断路器在国内实现应用的情况。由此可见,目前电力电子器件的技术水平既然达到了在电网中以晶闸管“阀”、双极换流“阀”、“固态断路器”等一次元件的形式在高压甚至超高压电网中长期安全运行,那么,使用当前最新电力电子技术的成果来帮助把真空断路器改造成机电一体化开关,并且完成其相应的任务实际上已经是非常现实的了。

3 经济性评估

机电一体化开关产品有以下优点:

- 在原来的主电路中主触点上并联设置电子开关实现软操作,使其获得良好的可控性,提高其过载和抗干扰能力;
- 在电网特别是在高压、超高压电网中能够消除电弧,彻底解决电弧所引起的一系列麻烦;
- 在提高设备的可控性的同时简化设备结构,提高可靠性、易维护性和延长其使用寿命(在高压、大容量、超大容量的系统中,这意味着可以获得更

为显著的经济效益),甚至可以获得对电网减少冲击、对环境减少污染等种种有利性能,使产品的使用价值显著提高。

从技术上来看,无论是电子开关还是有触点开关,目前都已经是成熟的技术,因此将电子开关和有触点开关组合在一起并联地设置,这属于将成熟技术组合使用。因此,该产品在技术上不会有大的风险。

为了说明该产品对生产厂方面所能够获得的经济效益,如果以元件制造厂为对象来分析,对于一个原来生产接触器的企业,如果要改产机电一体化开关,则在取得了新产品的定型设计资料后,除了要引进电子开关的装配、调试设备之外,还要按照新产品的需要改造接触器的产品生产线。当然,这种改造主要是减少、取消如灭弧罩之类的若干附件,以及因为缩短相间距离而进行的结构调整等,较容易实行。同时,在该新产品投放市场之前,还必须按照对新产品投产的要求进行型式试验及相应的修正,取得合格证后,才能进行批量生产和投放市场。整个过程虽然需要一些时日,但估计总投入只在 2~3 万元左右。同时,由于实现了产品性能的升级换代和扩大了市场,其取得的效益应是显著的。如果企业将原来生产的高压开关改产为高压的机电一体化开关,则由于高压、超高压产品中高压熄弧的技术复杂程度大大高于低压产品,故被取消的高压熄弧装置、材料(例如,如果取消了高压开关中的 SF₆ 等气体材料或者取消了油开关中的油料的应用,不仅显著地降低了产品成本,而且还可免除使用 SF₆ 所造成的环境污染及对工作人员身体的伤害;而所用电子开关的成本最初虽然很高,但在批量投产后产品的成本将随着时间的增长而显著下降)等所占总成本的比重明显增大,因此传统的高压开关改产高压机电一体化开关时所能获得的经济、环境、社会等效益将尤其显著。

如果以低压成套产品为例,将一台为可逆转交流电动机配套的低压盘(有触点系统),经过重新设计改选了机电一体化开关后,低压盘面积可减少(由于机械开关设计的简化而缩小了盘上面积,可减少面积在 20% 以内);由于保留了原来的全套装置而又提高了软操作等性能指标,可以节省成本;新增加了电子开关后由于产品更新后自动控制的性能指标显著提高,低压盘的售价可能提高 250%~500%(对于大容量者取较高的值),可见效益是显著的。因此,对于一般的低压开关成套设备的制造厂而言,增加投资(技术培训及增加部分工艺装备)几万元即可投产,采用此项新技术投资的回收期在三个月左右。如果原来的低压盘是无触点系统类的产品,则经过重新设计改造成为机电一体化开关后,低压盘面积可能增加 40%~60%,由于其硬件中只增加了机电一体化开关中的简化而缩小了盘上面积的机械开关的硬件,总成本提高很少,而性能指标和寿命显著提高,估计低压盘的售价可能提高 50%~90%(对于大容

量者取较高的值)。根据上述分析,估计采用此项新技术的投资回收期在二个月左右。而对于高压产品而言,其经济效益、社会效益将远比低压产品更为显著。

4 结论

综上所述,与传统的有触点开关或者无触点开关比较,机电一体化开关集中并发展了双方的优点,因而更加能够适应和满足用户的需要。

a. 能控性好。可以和电子开关一样在高低压电网中实现软操作、快速精确地无电弧地完成带负载换接电路等复杂的控制功能,既可降低对用电设备的冲击,又能降低对电网产生的电磁干扰;而传统的有触点开关无此能力。

b. 不但具有较强的抗干扰能力、过载能力并且延长了使用寿命,而且因为操作过程中不产生电弧,不仅解决了有触点开关的电弧所产生的发热、触头焊死和环境污染问题,而且取消了熄弧装置的设计。

c. 由于在机电一体化开关中的电子开关只在极短的瞬间内通过负载电流,大部分时间都处于不工作的状态,发热极少,因此散热、保护、维护等条件大大改善,可以用简单的措施就能实现,简化缩小了盘(柜、厂房、场地)上面积,特别是在高压、超高压电网中应用时可以显著地简化、取消高压开关中相应的熄弧装置的设计,使机构更加简化,震动减小,稳定性更好,触头弹跳可完全消除,从而使低压和高压的机电一体化开关的整体构成大大简化,各项性能指标得到大幅度的提高。

d. 采取集群方式并联运行时,不仅可以降低设备成本,而且因为各个单元的机电一体化开关还可以互为潜性备用,因此总体上提高了开关运行的可靠性。

参考文献:

- [1] 黄 群. 零点开关及电网安全[J]. 电网技术, 2004, 28(增刊): 150-155.
HUANG Qun. The zero point switch and power system security[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(Supplement): 150-155.
- [2] 吴 畏. 晶闸管有载分接开关[J]. 高压电器, 2004, 40(1): 48-49.
WU Wei. Thyristor on-load tap changer[J]. **High Voltage Apparatus**, 2004, 40(1): 48-49.
- [3] 沈忠威, 薛培鑫. 浅谈真空断路器触头自闭力与合闸弹跳[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 385-387.
SHEN Zhong-wei, XUE Pei-xin. Discussion on contact closing force and closing bouncing of vacuum circuit breaker[J]. **High Voltage Apparatus**, 2004, 40(5): 385-387.
- [4] 王德忠. 高压直流输电技术综述[J]. 上海电器技术, 2004, (5): 3-9.
WANG De-zhong. The general programmer for HVDC techniques[J]. **Shanghai Electric Appliance Technology**, 2004, (5): 3-9.