

文章编号:1001-1609(2003)02-0023-03

# 从 FCL 看开关技术发展的新增长点 ——混合式开关设备

王章启<sup>1</sup>, 姚月娥<sup>1</sup>, 王慧<sup>2</sup>, 穆双录<sup>2</sup>, 高骥超<sup>1</sup>, 刘全志<sup>1</sup>

(1.华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 2.西安西电高压开关有限责任公司, 陕西 西安 710077)

## HYBRID SWITCHGEAR — THE NEW GROWING POINT OF SWITCHGEAR AS VIEWED FROM FCL

WANG Zhang-qi<sup>1</sup>, YAO Yue-e<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, MU Shuang-lu<sup>2</sup>, GAO Ji-chao<sup>1</sup>, LIU Quan-zhi<sup>1</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Xi'an XD High Voltage Apparatus Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**摘要:** 限流开断装置(CLID)是断路器本质功能向高层次发展的产物,将有触头开关(或触发间隙)与无触头器件(GTO, 超导材料、热敏材料等)、储能元件( $L, C$ )及吸能元件(如  $ZnO, R$ ) 等恰当配置而构成的混合式阻抗转换与调节装置是开关设备发展的必然结果。笔者从剖析几种典型的 CLID 构成原理入手,对这种趋势作了分析,呼吁开关制造业应加大该类设备研制和开发的力度。

**关键词:** 故障限流器; 限流开断装置; 混合式; 阻抗转换  
**中图分类号:** TM56      **文献标识码:** A

**Abstract:** The current-limiting interrupting device (CLID) is a higher level outcome of the traditional circuit breaker development. Traditional contact switch (or trigger gap) being appropriately hybridized with contactless device, i.e. GTO, super conducting device and thermal sensitive device will dominate the future development of switchgear. Through explaining several typical CLID principles, this paper analyzes the tendency of hybrid switchgear and suggests that switchgear works should step up the research and development of such device.

**Key words:** fault current limiting apparatus; current-limiting interrupting device; hybrid; impedance transform

## 1 前言

20 世纪 70 年代曾炙热一时的故障电流限制器(FCL)<sup>[1]</sup>几十年来一直不乏研究者,尤其近几年,随着大功率半导体器件、微电子控制技术及高温超导技术的发展而又一次出现研究热潮。但一直没有较

广泛的工程应用,除了其技术难度较大外,主要是没有引起开关制造业的足够重视。笔者曾在文[2]中强调了传统机械开关不可取代的一面,对混合式开断设备或类似的阻抗转换与调节装置还没有今天的认识高度,希望能通过这里的介绍与分析,促进开关行业开发与研制混合式开断装置。

另需说明的是,文中所述的混合式,除传统的有触头与无触头的混合外,还扩充进储能与吸能元件的混合。

## 2 混合式限流开断装置是断路器向高层次的发展,是名副其实的智能电器

传统机械开关设备的本质功能是在电路中起阻抗变换与控制作用,接通时可视为零,断开时为无穷大。无触头晶闸管开关也起类似的作用,只是转换深度比有触头开关要低  $10^6 \sim 10^7$  倍(转换深度定义为断开态与接通态电阻之比)<sup>[3]</sup>。这两类开关均有优缺点,但其共同点是只有两种工作状态(通态和断态)。随着电网的发展和人们对用电方式、供电质量要求的提高,这两类独立工作的两工位开关和开关特性都面临着无法克服的固有矛盾。有触头开关的响应速度慢,寿命低,对于短路故障,无论接通还是断开,都对电网的稳定性与安全运行造成巨大的冲击,无法对电网和用电设施的需求作出实时适当的调控。半导体功率器件通态热损耗大,耐压水平低,不能完全开断电路,虽然人们利用它的优势制造各种起阻抗变换作用的 FACTS 控制器<sup>[2]</sup>,但大量半导体器件应用于电网也是严重的谐波污染源,如果不在开关

收稿日期:2002-10-02

设备本身引入  $R, L, C$  等耗能及储能元件, 并且巧妙地加以配合和利用, 就永远不能把自身阻抗变换的本质功能跃升到高水平, 也就永远不能改变自身被系统不得不用, 但又不满意不放心的处境和角色。

如果 1 台由有触点、无触头晶闸管及其它  $R, L, C$  元件恰当配合而构成的混合装置能在正常和非正常的情况下迅速可靠地按人为设定实施阻抗转换, 对系统而言不是更受欢迎, 更加满意吗? 且这样的装置必然要用到微电子控制和检测技术, 是连同本质功能在内的完全地道的智能电器。

### 3 蓬勃发展的 FCL 无一不是混合式

值得首先强调的是, FCL (Fault Current Limiter) 与 CLID (Current Limiting Interrupting Device) 对系统的事故处理而言, 其物理过程是完全一致的。FCL 都是伴随着机械开关的动作而消除故障。且只有机械开关动作才能恢复到它的额定状态, 待命第二次限流任务, 否则会导致永久损坏。这两个术语的主要区别在于人们强调限流的实现而将限流部分作为器件单独开列, 实际应用中也确有断路器独立存在的, 即便如此, 在限流部分也离不开辅助开关和间隙, 更少不了  $L$  或  $C$  或其它阻性元件, 仍然是几种不同阻抗元件的混合体。

图 1 是早期的一种调谐式限流开断装置<sup>[1]</sup>, 限流部分由两个并联的  $LC$  串联调谐电路及跨接的电阻与间隙串联电路组成。正常运行时, 每个支路各承担一半的负载电流, 事故情况下, 电流超过设定值, 点燃间隙, 阻抗即刻跃升而限流。且任一支路的任一  $L$  或  $C$  故障, 会因间隙的击穿而使装置自动转换为高阻抗。显然这个装置的 FCL 部分设计很简单, 可靠性也很高, 但当时没有得到工程应用, 原因时体积大, 成本高。这种  $L, C$  调谐式的 FCL 后来又有很大的发展, 如加入功率半导体器件后做到电感可调<sup>[4]</sup>, 甚至阻抗特性可调<sup>[2]</sup>。不言而喻, 这些都是混合式, 都有机械开关 QF 或阻性及容性元件等。

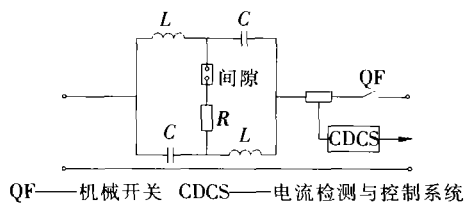


图 1 调谐式 CLID

图 2 示出两种典型的超导 CLID<sup>[5,6]</sup>, 以超导材料的失超作为限流装置动作诱因的方案很多<sup>[7]</sup>, 以下两种为例。在图 2(a)中, A, B 为两个闭合的独立磁

路, 1, 2 为铜导体交流常规绕组, 3, 4 为超导直流线圈, 请注意两个常规绕组的极性是反相串接。正常运行期间, 调节直流电压使两个铁心饱和, 整个装置呈低阻抗。一旦短路发生, 在短路电流作用下, 视正负半周的不同, 总有一个铁心处于去饱和状态, 而使装置的总体阻抗增大, 从而达到限流的目的。在图 2(b)中, 正常运行时,  $QF_1 \sim QF_n$  及辅助快动开关 S 都在闭合位置, 超导线圈处于超导态, 其交流阻抗仅由漏抗和导体截面涡流决定, 较之低值并联电阻  $R$  更要小得多。一旦故障发生, 短路电流会很快超过超导线圈的临界电流而失超为常态 (约  $20 \mu s$ ), 电流被转换到并联电阻  $R$ , 短路电流得以限制。在电流被转移的同时, 开关 S 在  $QF_1$  尚未切除故障的情况下迅速打开, 以切除加于超导线圈两端的电压, 否则超导线圈极易烧毁。图 2(a)中虽然不存在超导线圈的失超, 但图中的 QF 也必须迅速切除被限制电流, 因为常规线圈及装置铁心的设计不可能设计长期工作在限流状态, 这正是任何限流装置离不开传统机械开关的缘故。可以看到, 超导 CLID 也同样是混合式。

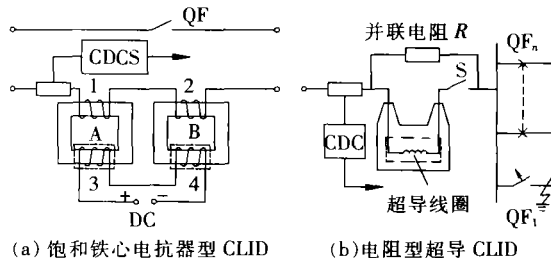


图 2 两种典型的超导 CLID

图 3 为基于基波磁通补偿的 CLID<sup>[8]</sup>, 还兼有一定程度的对高次谐波的抑制作用, 滤除负载谐波对电源的污染。该装置的限流原理是 CDCS 实时跟踪变压器一次 AX 的基波电流, 控制补偿电流源产生方向相反、大小成一定比例的补偿电流注入变压器的二次侧, 使变压器在正常工作时处于双边强制励磁状态。在满足一定的补偿条件下, 变压器铁心中基波主磁通补偿为零 (近于零), 使变压器对电网仅呈现漏抗, 阻抗值很小, 压降低。一旦短路发生, 控制系统使变压器二次侧的电流为零, 使变压器瞬时呈励磁高阻抗。由于二次侧仅注入基波, 故正常运行时, AX 对高次谐波仍呈现高阻抗。在这里, 装置限流部

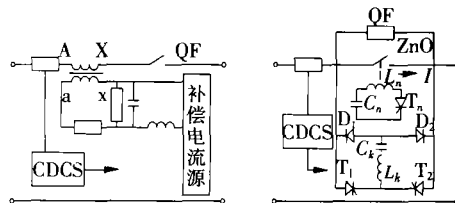


图 3 基于基波磁通补偿的 CLID 图 4 混合式交直流 CLID

分似乎只有变压器和 QF 两个元件的组合,实际上,功率半导体器件隐含在补偿电流源中,较之其它位于高压主回路的结构有其优势的一面。

图4为混合式低压无弧 AC/DC 限流开断装置<sup>[9]</sup>,用有触头和无触头的混合来实现交直流的无弧限流开断。如果没有  $C_k, L_k$ ,就达不到限流和无弧开断。图中  $C_n$  和  $C_k$  都预充电压,  $L_n$  和 QF 构成电动斥力开关,设直流负载如图中  $I$  的方向,一旦短路发生,同时导通 GTO 管  $T_1$  和  $T_n$ , 短暂的动作时延后, QF 触头分开。  $T_1$  导通后,  $C_k$  经  $D_1$  和  $D_2$  放电,  $D_2$  支路的放电电流与短路电流  $I$  的方向相反。若参数配合恰当, QF 完全可以做到无弧分离,因为在  $C_k$  放电期间,  $D_1, D_2$  都是导通的 ( $T_1$  导通了, QF 还没有打开), QF 两端不够起弧电压。当放电电流上升到和  $I$  相等时 (放电频率远大于工频), 若配合成 QF 的触头正好分开,则故障电流转换到从  $T_1-L_k-C_k-D_2$  通过,直到  $D_1$  中无电流通过时, QF 两端才承受电压。这就是说,从触头分开到加上恢复电压有个时延,因而也完全可以避免无弧分离后的重击穿。若为交流,只是检测系统要能识别电流方向,选择性的导通  $T_1$  和  $T_2$  即可。  $ZnO$  是为了吸收线路过大的储能,消除  $C_k$  过高的反充电电压。

对开关制造业而言,在开关设备中配置电阻、电容、避雷器、互感器,甚至变压器等是早已认可的设计理念,如断口并联电阻,预加电容制造人工零点开断高压直流、GIS,箱式变电站等,但都不是从改变开关两工位阻抗为多工位可变阻抗的目标出发,而仅是为了提高开断容量、消除操作过电压、缩减体积、增加品种系列,因而也没有将引入无触点与有触点相配合,外添其它  $R, L, C$  元件作为提升开关本质功能的目的。

#### 4 开发混合式开关设备是开关制造业的历史责任

开关制造业之所以迟迟未在混合式开关的研制开发上形成热潮,笔者认为主要有两方面的原因:①电网的要求没有今天这么迫切,以前只要求能解决故障限流问题,且短路电流没有今天这么大,开关制造业认为自己有能力解决 50, 64 kA, 甚至更大的开断电流。②对半导体器件的弱点看得多,对它们在高电压大电流领域能否扎根心存疑虑。

目前,这两方面都有了显著的变化。在半导体开关器件的性能上,其单管耐压和通流能力都有了长足的发展,直流高压换流站已扎根电网几十年。混合式开关用于电力系统,其性价比已可与传统开关一拼高下,ABB 已在我国做类似产品的宣传工作。国内也已有不少单位开展了 GTO 相关特性的预研工作<sup>[10]</sup>。在需求迫切性上,除了电网容量愈扩愈大外,人们不再只要求能开断电流,而是在故障的快速切除、电网的稳定、供电质量与效率上看得更重。

因此,混合式限流开断装置和 FACTS 控制器的开发、生产只能靠开关业界的集团公司,因为只有他们最了解电路转换和开断过程中系统和设备之间相互作用的物理过程,最善于恰当选择与配置各功能构件,其辅助与控制系统也是开关行业的职业优势。GIS,箱式变电站等大型组合电器都出自开关业界就是明证,加大力度研发该类限流与阻抗转换装置是开关制造业向高层次产品进军的必然。

#### 参考文献:

- [1] V H Tahiliani, J W Porter. Fault Current Limiters—An Overview of EPRJ Research[J]. IEEE Trans. PAS, 1980, 99: 1964-1969.
- [2] 王章启, 邹积岩. FACTS 技术与高压断路器[J]. 高压电器, 1998, 34(3): 36-40.
- [3] 张冠生. 电器学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [4] E F King, A Y Chikhani, et al. A Microprocessor-controlled Variable Impedance Adaptive Fault Current Limiter [J]. IEEE Trans. on PWDR, 1999, 5(4): 1830-1837.
- [5] J X Jin, C Grantham, et al. Prototype Fault Current Limiter with a High T<sub>c</sub> Superconducting Coil [J]. Journal of Electrical and Electronics Engineering, 1995, 15(1): 117-124.
- [6] E Thuries, V D Pham, et al. Towards the Superconducting Fault Current Limiter[J]. IEEE Trans. on PWDR, 1991, 6(2): 801-808.
- [7] 林玉宝, 林良真. 超导故障限流器及其研究现状[J]. 电工电能新技术, 1997(3): 14-19.
- [8] 魏亚南. 基于磁通补偿的故障限流器[D]. 华中科技大学硕士论文, 2002.
- [9] Jacek ZyBorski, Tadeusz Lipski, et al. Hybrid Arcless Low-voltage AC/DC Current Limiting Interrupting Device [J]. IEEE Trans. on PWDR, 2000, 15(4): 1182-1187.
- [10] 李庆民, 徐国政. 大功率 GTO 损耗特性的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(3): 1-4.

作者简介:王章启(1947-)男,教授,从事开关电器智能化及电力设备状态监测与故障诊断的研究

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!