

固态断路器技术的应用

冯 源,郭忠文

(中国海洋大学 信息科学与工程学院,山东 青岛 266100)

摘要: 在介绍固态断路器技术的发展及其在电力系统中的主要应用的基础上,总结了目前固态断路器的分类、特点、功能和结构。指出了固态断路器所使用的功率器件存在的均流、均压,通态功耗,动态过载与换流,故障电压、电流突变量实时检测,混合式断路器建模等问题是固态断路器研究与设计的技术难点,并针对这些问题提供了国内外固态断路器有关研究动态。

关键词: 固态断路器; 固态转换开关; 限流器

中图分类号: TM 561

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)10-0096-04

断路器作为输电线路中的一个重要环节,其性能直接影响电网的正常运行,而目前交流输电中大量采用的机械式断路器,尽管它导通稳定、带负载能力强,但在断开负载时往往产生电弧,触头易烧损,开断时间长,难以满足一些电力用户对故障电流开断的速动性要求^[1-3];在运行过程中有噪声,机械、电气寿命受限制等缺点随着对电能质量要求的提高也越来越突出。因此,应采用现代电力电子技术设计、研制新型断路器。

1 固态断路器发展

作为电力电子技术的基础,电力电子器件的发展自 1980 年后进入了现代电力电子技术阶段。此阶段的器件向全控化、多功能化、高频化和集成化方向发展,从最初的普通晶闸管(SCR),演化出可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)及最近刚出来的集成门极换向晶闸管(IGCT)、电子注入增强栅晶体管(IEGT)。因此现代电力电子技术的飞速发展,为固态断路器研制提供了坚强的物质基础和更多选择余地。目前常用器件的容量参数如表 1 所示。

表 1 常用器件容量

Tab.1 Parameters of devices commonly used

器件	性能	器件	性能
SCR	35 kA/6.5 kV	IGBT	1.2 kA/3.3 kV
GTO	10 kA/8 kV	IGCT	4 kA/4.5 kV
MOSFET	200 kA/1.5 kV	IEBT	3 kA/4.5 kV

根据固态断路器的发展历程看,又可分为静止型断路器和混合型断路器^[4-5]。

1.1 静止型断路器

静止型断路器(基于 SCR)的基本拓扑结构如图 1 所示。

与传统断路器相比,静止型断路器具有开断时

间短、无声响、无弧光、无关断死区、寿命长及工作可靠性高等特点,但是它同时也存在设备的过压与过流、器件损耗过大而必须加上较大的冷却系统及相较于机械式断路器价格高等缺点,以上这些缺点极大地影响了静止型断路器的推广应用。

1.2 混合型断路器

针对静止型断路器的缺点,提出利用机械式断路器良好的静态特性,结合电力电子回路的动态特性而构成混合型断路器,即在机械式开关的基础上,利用电力电子器件作为无触头开关与机械式开关的触头并联,构成一种综合两者共同优点的新型断路器,其基本拓扑结构(基于 IGBT)如图 2 所示(图中 R_V 为压敏电阻,下同)。

其工作原理是:主开关 S 与固态开关同时通、断,利用主开关 S 触点间电弧电压的反电势作用将电流切换到固态开关部份,主开关 S 作为正常工作时的电流通路,固态开关部份只负责断路器通断切换时的动态换流。与静止型断路器相比较,由于电力电子器件只在开关开断的瞬间导通,平时几乎没有损耗,所以省却了笨重的冷却设备。

2 固态断路器应用

固态断路器因其快速通断性、可靠性及重复操作性在柔性交流传输系统(FACTS)中的应用越来越广泛,并通过与其它装置,如静态补偿器(STATCOM)及统一潮流控制器(UPFC)等的配合使用,极大提高了电力系统的稳定性和可靠性。但是,由于目前电力

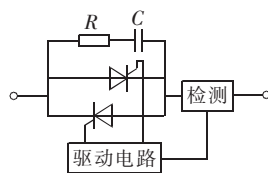


图 1 静止型断路器的拓扑结构

Fig.1 Topology of static circuit breaker

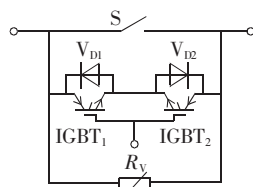


图 2 混合型断路器的拓扑结构

Fig.2 Topology of hybrid circuit breaker

电子器件的局限性,固态断路器尚不能完全替代机械式断路器。

2.1 固态限流断路器

固态断路器不仅具有快速的通断能力,在实际应用中,还可利用电力电子器件的快速通断性,将固态限流器运用于断路器中,构成固态限流断路器,其原理如图 3(a)所示。

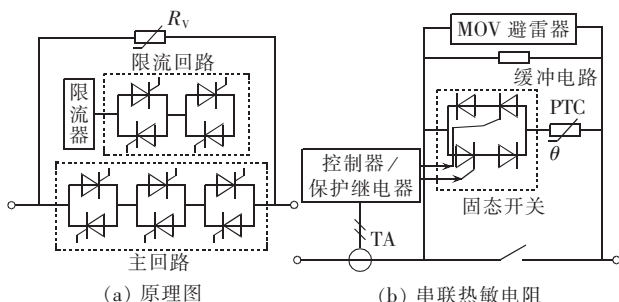


图 3 固态限流断路器

Fig.3 Topology of solid state current limiter

当系统发生短路故障时,控制电路将主回路断开,同时将限流回路导通,此时限流器投入线路中,以达到限流目的。如果同时控制限流回路功率元件的导通角,还可以在不增加限流器容量情况下进一步限制电流的增长,直到最终将故障切除。

在文献[4]中提到了一种串联补偿故障电流限制器,这种限流器能防止故障保护期间由电容器容抗和系统感抗引起的谐振电流问题。

有人对混合式断路器电路进行改进^[5],如图 3(b)所示在无触头回路中加入热敏电阻(PTC),利用 PTC 的正温度特性,在消弧的同时达到限流的目的。

2.2 固态转换开关

对于敏感性负载(如计算机等)由 2 路独立电源供电,正常运行时由一路电源供电,转换开关单元 A 连接负载与主电源,单元 B 连接负载与备用电源,通常当主电源发生故障时,转换开关自动将负载直接从主电源转换至备用电源;主电源恢复正常时,则自动将负载转换至主电源。机械式转换开关由于倒换电网的速度较慢(通常需要 2~10 s),往往会导致用电设备中途停机而造成损失。用固态转换开关 SSTs (Solid - State Transfer Switch) 控制双电源馈线向电力敏感用户供电时,固态转换开关可在 1/4 个电源周期时间内完成备用馈电路径切换,向用户提供不间断电源。其结构见图 4(a)。

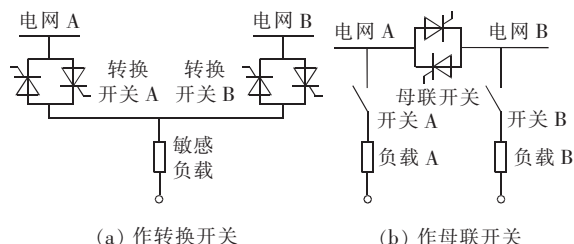


图 4 固态转换开关电路配置

Fig.4 Circuit configurations of solid state transfer switch

其中,运用 SCR 构造的固态转换开关,因 SCR 的过零关断特性,转换时间最大需 1/2 个电源周期时间。而利用 IGBT 构造的固态转换开关,在实行强制切换时,其转换时间甚至可达到微秒级^[6]。

另外一种应用是作为母联开关使用,其结构见图 4(b),也可实现快速切换的功能。这种结构用于 2 个以上敏感性负载系统正常运行状态时,2 路电源分别给各自负载供电,当一路电源如电源 A 发生故障时,转换开关自动将负载 A 转为电源 B 供电,直至故障恢复,负载再次切换到电源 A 供电。

2.3 其它应用

其它一些应用还包括:输电系统中的地线转换断路器、负荷开关等。以上的这些应用,多半在于利用固态断路器快速性上,如果需要与其它继电保护装置协调动作或者是在发生短路故障而需通过较大故障电流时,固态断路器往往因其电力电子器件自身性能的限制尚难胜任,这也要求电力电子器件需要向更大功率方向发展。

3 技术难点

固态断路器因突出的优点,其发展得到各国极大的重视。但同时也带来了一些新的技术难点。

3.1 均流、均压

目前,固态断路器所使用的功率器件的额定电压和额定电流较低,如市场上全控型器件 IGBT 最高只能做到(1 200~1 600 A)/(1 800~3 300 V)。对于中高压电路,往往需要采用多个功率器件串并联的方式来提高固态断路器的开断容量。但是,由于器件开关特性的分散性、驱动电路的信号传递延迟所造成时间的不同步等因素,在各功率器件开通与关断时电压或电流分配不均匀,导致器件或装置的损坏,因此,设计合理的静态与动态平衡变得极其重要。静态平衡可通过简单地并联大电阻而获得,动态平衡相对要复杂些。在文献[7]中提出了一种基于门极控制的实现方法,其优点是避免了额外的缓冲电路。

3.2 通态功耗

功率器件的通态损耗大,如 IGBT 饱和导通电压在 2~4 V,大功率 GTO 的通态电压也在 2 V 左右,当导通电流较大时,如达到几百安培时,器件上的功耗将是很大的。因此,静态型断路器需要添加必要的冷却装置,不仅增加费用、加大了设备的体积,而且维护不方便。混合式断路器则没有这个问题,其固态开关部分只工作于瞬间的换流,但此结构对于开关的时序要求比较精确,控制较复杂。

3.3 动态过载与换流

固态断路器用于线路中时要充分考虑导通与关断所造成的瞬间过载,例如当线路负载呈现感性或线路分布感抗较大时,在关断时会在断路器两端造成较大的瞬时浪涌电压,过大的 di/dt 或 du/dt 均会损坏器件或造成器件的闭锁失控。因此,在断路器电路需要加入相应的缓冲吸收电路,降低浪涌电压、减少

器件的开关损耗、减小 di/dt 、 du/dt 的影响以提高电路的可靠性。

为了减小线路通/断对主回路的影响,软开关技术开始应用于固态断路器的设计,利用外部回路的谐振作用强制主回路在电压或电流过零时进行切换,从而最大程度减小器件的通断损耗。其理想的通断转换波形应如文献[8]所示,此时可保证器件的安全工作。在文献[8-10]中给出了具体的依靠谐振实现换流的拓扑结构,其中利用串联谐振原理的结构如图 5 所示(图中 SDS 为短路电流检测系统),其特点是利用真空开关的快速性保证主回路电流为零时打开,此电路在设计思想上有其先进性,但其缺点是其固态开关回路同时只有一只开关管导通,导致强迫换流过程中主回路中会出现负向电流,因此,装置后改为以电流上升率为判据,避开检测电流幅度的时间与换流时间所造成时差,并严格控制通断时序的方法,取得了一定效果。

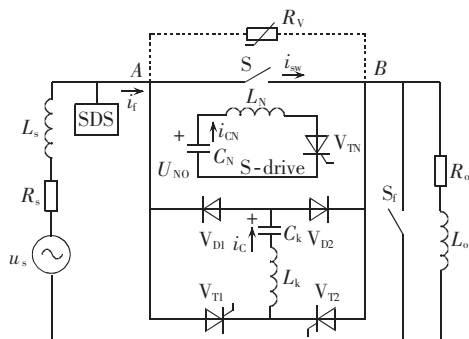


图 5 混合式电流限制电路结构

Fig.5 Circuit configuration of H-CLID

3.4 故障电压、电流突变量实时检测

对于固态断路器而言,实时有效地检测故障电压、电流是保证设备安全可靠运行的重要保证。在实际应用中,只检测幅度或有效值将会造成较大的动作延时,因此电压、电流的故障情况往往需要通过有效值和变化率进行综合分析判断,在文献[11]中介绍了一种通过电流的上升率来检测故障电流的方法。同时一些新的检测技术也在不断出现^[12],文献[13-14]中提到用小波变换来实时在线检测电压突变量的方法。在文献[15]中则介绍了一种利用 di/dt 计算后所形成的椭圆或圆形曲线来检测短路电流的算法,其检测时间最少可达到 $200\mu s$ 。在文献[16]中则给出了一种延时比较的短路电流检测结构及相应的波形,其原理是利用输入波形与存贮波形进行叠加,用其差值来反映 di/dt 的值,再通过电平检测电路,输出检测信号,该电路在 $0\sim 90^\circ$ 相位范围内,检测时间小于 $0.1ms$ 。

3.5 固态断路器建模

在对固态型断路器进行建模分析时,常用的电力电子仿真软件有:Matlab、Pspice、Saber 等,它们均有相应的电力电子器件的模型,使用较方便。在对混合式断路器仿真中,其主要难点在于机械式开关瞬态模型的建立。在开关动作时,在触点间会形成

弧光,延长通断动作时间,具体情况不仅与机械触点有关,比如触点大小、距离,而且与断路器的介质、负载有关,准确建模的难度较大,在文献[17-19]中都只能给出一些具体实验结果,而没有从理论的角度进行分析。这为混合式断路器设计的仿真验证与定量分析带来困难,从这个意义上讲,断路器的开发有大量工作需要完成。

4 结语

随着现代电力电子技术的进步,尤其是新型电力电子器件的出现,如 IGCT、IEGT 等,固态断路器今后的发展趋势将从低压、中压向高压、大电流级别发展。固态断路器因其优良的工作特性,在国民经济中也将起越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] 李岱,李晓霞. 灵活交流输电和电力电子学[J]. 电力电子技术, 1998,38(3):102-105.
LI Dai, LI Xiao-xia. Flexible AC transmission and power electronic[J]. Power Electronics, 1998,38(3):102-105.
- [2] 黄健. 配电自动化发展动向[J]. 电气时代, 2000,20(7):6-9.
HUANG Jian. Development direction of power distribution automation [J]. Electric Age, 2000,20(7):6-9.
- [3] 杨钦慧. 高低压混合晶闸管断路器的开发和应用[J]. 电气开关, 2000,38(1):31-34.
YANG Qin-hui. Development and application of low and high - voltages hybrid thyristor breaker [J]. Electric Switchgear, 2000,38(1):31-34.
- [4] PALAV L, GOLE A M. On using the solid state breaker in distribution systems[C]//IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Waterloo, Canada: IEEE, 1998:693-696.
- [5] 周颖. 串联补偿故障电流限制器的原理及特性[J]. 浙江电力, 2002,21(2):63-66.
ZHOU Ying. Principle and characteristics of fault current limiter with series compensation [J]. Zhejiang Electric Power, 2002, 21(2):63-66.
- [6] MOKHTARI H, DEWAN S B, IRAVANI M R. Analysis of a static transfer switch with respect to transfer time[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002,17(1):190-199.
- [7] CHUNG Yong-ho. Medium voltage hybrid transfer switch[C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. New York, USA: IEEE, 2002:1158-1163.
- [8] BAEK Ju-won, YOO Dong-wook, KIM Heung-geun. High-voltage switch using series-connected IGBTs with simple auxiliary circuit [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(6):1832-1839.
- [9] POLMAN H, FERREIRA J A, KAANDERS M, et al. Design of a bi-directional 600 V/6 kA ZVS hybrid DC switch using IGBTs [C]//The 36th Annual Meeting for the 2001, IEEE, Industry Applications Conference. Chicago, USA: IEEE, 2001:1052-1059.
- [10] ZYBORSKI J, LIPSKI T, CZUCHA J, et al. Hybrid arcless low-voltage AC/DC current limiting interrupting device[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000,15(4):1182-1187.
- [11] KISHIDA Y, KOYAMA K, SASAO H, et al. Development of the high speed switch and its application[C]//Industry Applications Conference, 1998, Thirty-third IAS Annual Meeting. St. Louis, Missouri, USA: IEEE, 1998:2321-2328.
- [12] EISSA M M, HASAN S. A new fault current detection technique for the AC hybrid circuit breaker[J]. Electric Power Systems Research, 1999,50(2):133-138.

[13] MOKHTARI H,KARIMI-GHARTEMANI M,IRAVANI M R. Ex-
perimental performance evaluation of a wavelet - based on - line
voltage detection method for power quality application [J]. IEEE
Transactions on Power Delivery,2000,17(1):161-172.

[14] KARIMI M,MOKHTARI H,IRAVANI M R. Wavelet based on
- line disturbance detection for power quality applications[J].
IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(4):1212- 1220.

[15] RIVETTI G. ‘Smart’ low-voltage circuit-breakers[J]. ABB Re-
view,1997(4):25-28.

[16] GENJI T,NAKAMURA O,ISOZAKI M,et al. 400 V class high
-speed current limiting circuit breaker for electric power system
[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1994,9(3):1428-1435.

[17] TAKEDA M,YAMAMOTO H,HOSOKAWA Y,et al. A low loss
solid-state transfer switch using hybrid switch devices[C]//
Power Electronics and Motion Control Conference,2000.

Beijing, China: [s.n.], 2000:235-240.

[18] TAKEDA M,YAMAMOTO H,ARITSUKA T,et al. Development
of a novel hybrid switch device and application to a solid
- state transfer switch [C] //IEEE Power Engineering Society
1999 Winter Meeting. New York,USA;IEEE,1999:11-51.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

冯 源(1978-),男,山东潍坊人,博士研究生,主要从事
设备状态检测及计算机网络方面的研究(E-mail:fengyuan
@ouc.edu.cn);

郭忠文(1965-),男,山东聊城人,教授,博士研究生导
师,主要从事设备状态检测及计算机网络方面的研究(E-mail:
guozhw@ouc.edu.cn)。

Applications of solid state circuit breaker

FENG Yuan, GUO Zhong - wen
(Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: By introducing the development of solid state circuit breaker and its applications in power system, its classification, characteristics, functions and structures are summarized. The key techniques in its research and design are pointed out; the current and voltage equalization of power devices, the on - state power loss, the dynamic overload and circuit commutation, the real - time detection of fault voltage and sudden current change, the modeling of hybrid circuit breaker, etc., of which the study conditions abroad and home are introduced.

Key words: solid state circuit breaker; solid state transfer switch; current limiter

+++++