海上平台电力系统故障限流技术应用

高 璇，王凯藤，于 璐

（中海油研究总院有限责任公司，北京 100028）

摘要：近年来，随着海上油田群电力组网技术的应用，海上电网的容量和复杂性不断扩大，从而增大了电力系统的短路故障电流水平，给短路电流的限制提出了挑战。整理了故障限流技术的国内外研发现状，探讨了电网中故障限流技术的不同应用场合，以实际工程案例分析了海上电网中故障限流器的适用性，为后续工程中类似故障限流问题提供借鉴。

关键词：海上平台电力系统；短路电流；故障限流；短路开断电流

Application of fault current limiting technology in power system of offshore platform

GAO Xuan, WANG Kaiteng, YU Lu

(China National Offshore Oil Corporation Research Institute Co. Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: In recent years, with the application of power networking technology in offshore oil fields, the capacity and complexity of offshore power grids are constantly expanding, which increases short-circuit fault current of power system and challenges the limitation of short-circuit current. This paper summarizes the research and development status of fault current limiting technology at home and abroad, discusses the different application occasions of fault current limiting technology in power grid, analyzes the applicability of fault current limiting devices in offshore power grid with engineering cases, and provides reference for similar fault current limiting problems in subsequent projects.

Key words: offshore platform power system; short-circuit current; fault current limiting; short-circuit breaking current

0 引言

海洋石油平台上钻修井、采油、生产设备及生活用电等众多用电设备均由平台的电力系统提供电力。其供电模式一般是在油气田中心平台或 FPSO 上设置一个电站，然后通过海底电缆向周边井口平台供电。近年来，为使油田间共享备用机组、实现电力互补，通过复合海底电缆进行电力组网，电网容量不断扩大的趋势越来越明显。

这不仅增大了平台电力系统的短路故障电流水平，增加了电气设备(如断路器等)的配置容量；而且增加了对系统短路故障的保护配合和处理难度，给系统中一些设备的安全、稳定和可靠性埋下了隐患。

电力系统一旦发生短路，就要求电网中开关设备在尽可能短的时间内隔离故障点。当短路电流超过常规断路器切断短路电流的水平时，就需要采取相应措施来限制短路电流水平，保障电力系统安全。本文将探讨海上油田电网中故障限流技术的应用情况。

1 故障限流技术

1.1 国内外研发现状

由于实现限流的方式众多，所以目前故障限流器（FCL）种类繁多。

按限流阻抗类型，可分为阻抗型和非阻抗型。其中，阻抗型又可分为电阻型、电感型和整流型；

非阻抗型可分为爆破型（ABB 公司的 Is-limiter、美国 G&W 公司的 Clip 和法国 FERRAZ 公司的 Pyro-breaker）和自愈合熔丝型（Rehealing fuse）等[1]。

按限流材料与设备类型，可分为常规材料型和特殊材料型。常规材料型可分为电力电子型、常规设备型和混合型，也可分为串联谐振型、并联谐振型、整流型和电弧电流转移型等。谐振型故障限流器可利用串联谐振电路阻抗为零、并联谐振电路导纳为零的特点设计[2]。特殊材料型以超导型为主，根据其是否利用超导体的失超特性限制短路电流，可分为失超型和非失超型。失超型超导限流器的超导体在系统发生短路故障时从无阻态转变为高阻态，有电阻型和感应耦合型[3]；非失超型超导限流器通过控制运行模式实现限流[4]，有桥路型和饱和铁心型等。美国阿贡实验室、日本东京电力和日新公司以及中国科学院电工所从事该项研究较多；此外还有 PTC 聚合材料型，主要研究机构有瑞典 ABB 研究协会。

基于电力电子技术的 FCL 又称固态限流器，一般利用电力电子器件代替传统的开关设备来高速接通或断开电路，由常规电抗器、电力电子器件和控制器构成，投入电阻器、电容器和电抗器等器件构成不同的拓扑结构，通过改变电力电子器件的工作状态来改变回路的等效阻抗，从而起到限制故障电流的作用。其具有控制迅速灵活、允许动作次数多、成本低、体积小和技术复杂等特点[5]，易于实现综合型多功能的 FACTS 控制，适合于超高压电力系统。

基于爆破切割技术的 FCL 采用特殊的结构形式来实现切断短路电流的功能。美国 G&W 公司 Clip 限流保护器采用平板式结构，瑞士 ABB 公司 20 世纪 50 年代[6]开发出的 Is-Limiter 快速隔离器采用管式导体单断口结构，法国 FERRAZ 公司的 Pyro-Breaker 快速隔离器采用活塞撞击式结构。

国内也有一些研究机构和公司进行了相关研究，如陕西蓝河电气公司研发出 DDX1 短路电流限制器，合肥凯高电气设备有限公司研发出 FSR 短路电流限制器。浙江大学对新型固态短路限流器技术进行过大量研究，以晶闸管构成的全控桥及限流电感为核心，通过控制各晶闸管的触发脉冲相位改变桥路工作状态，从而实现限流。目前已完成了各种工况下样机模型的试验。

1.2 FCL 工作原理

不同种类的 FCL 虽然结构形式不同，但最基本的工作原理相类似：在电网正常运行时表现为零阻抗或微小阻抗，功耗接近于零；在电网发生短路故障时，迅速呈现高阻抗以限制故障电流。

以陕西蓝河 DDX1 为例，由图 1 可以看出，普通断路器由于继电保护和操动机构的固有特性需要经过数个周波、在短路电流自然过零时才能开断，而 DDX1 在短路故障发生后几毫秒内完成限流开断，短路电流的持续时间降低至 10 ms 以内，实际通过电力设备的短路电流的峰值 I_c 在第一个半波被限制到预期短路电流峰值的 15%～50%，故障电流的总能量 i^2t 降低至普通断路器的约 1/200，从而有效地保护了电气设备免受损坏。

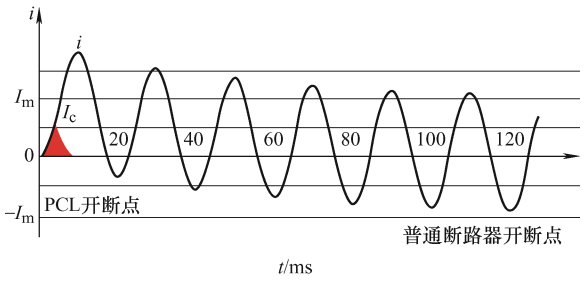

图 1 FCL 与普通断路器开断后短路电流波形图

Fig. 1 Waveform figure of short-circuit current after cutting by FCL and common circuit breaker

1.3 应用场合

(1) 旁路限流电抗器

将 FCL 并联于降压变压器或发电机出口的限流电抗器旁，配合限流电抗器限制系统的短路电流。正常运行时，负荷电流几乎全部流过 FCL；当母线或出线发生两相或三相短路时，FCL 快速开断，从而使电抗器投运，起到限制短路电流的作用。旁路限流电抗器原理接线如图 2 所示。

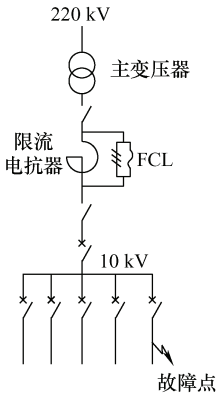

图 2 旁路限流电抗器原理接线图

Fig. 2 Schematic diagram of bypass current limiting reactor

(2) 分段母线并列运行

图 3 中，两台变压器若并列运行，则变压器低压侧母排的短路电流超过馈线断路器的额定短路开断电流。正常情况下，母联断路器不能闭合，分段母线不能并列运行。在母联断路器位置串接一台 FCL。合理整定 FCL 的动作电流，当出线发生短路且预期短路电流值接近馈线断路器额定短路开断电流时，使 FCL 动作、母线分裂运行，馈线断路器只承担单台变压器的短路电流，从而实现分段母线并列运行。

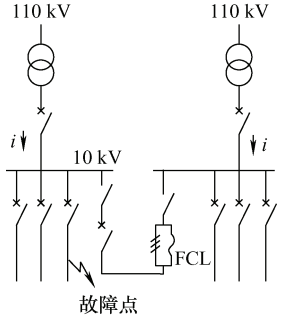

图 3 FCL 实现分段母线并列运行原理接线图

Fig. 3 Schematic diagram of switchable bus running in parallel by using FCL

(3) 发电机出口短路保护

大容量发电机出口短路时，由发电机提供的短路电流的周期分量可超过 90～100 kA；同时短路电流中含有 50%～60%的非周期分量，不仅短路电流幅值增大，而且非周期分量超过了断路器型式试验的条件，已无国产断路器可供选型，而进口的发电机断路器价格昂贵。因此目前只能采用发电机-变压器组连接方式或者采用封闭母线避免相间短路的发生，但缺点明显，运行不灵活，升压变压器高压侧断路器动作频繁、寿命短，不仅不便于设备检修及维护，也不利于系统稳定。

如图 4 所示，采用 FCL 配合普通断路器可为发电机出口短路保护提供更好的解决思路。当发电机出口短路时，小于 FCL 整定值的短路电流直接由普通断路器开断；超过者则由 FCL 快速开断并联动与之串联的普通断路器三相跳闸，避免发电机非全相运行。

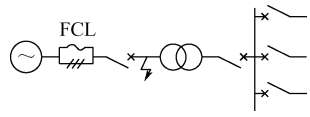

图 4 FCL 实现发电机出口保护原理接线图

Fig. 4 Schematic diagram of generator outlet protection by using FCL

1.4 技术优点

将 FCL 串接于线路中，电力系统正常运行时，FCL 呈低阻抗，几乎不影响系统正常工作，对系统干扰小，稳态和暂态稳定性较高；短路故障时，FCL 迅速自动插入足够高的限流阻抗，限制短路电流至合理水平，保证系统及电气设备的安全；FCL 切除故障回路时不会引起系统暂态振荡和过电压；FCL 的限流阻抗可根据不同限流水平要求进行设计和选型。

2 海上电网应用

2.1 母联并列运行方案

渤海某油田 CEPF 平台上设 3 台额定功率为 12 980 kW 的燃气轮发电机组，为 CEPF 平台或通过海底电缆为其他平台供电。平台 6.3 kV 系统分为 MA 和 MB 两段母排，正常情况下并列运行。该油田电力系统经过 6.3 kV /35 kV 升压变压器及 35 kV 海底电缆与附近另一个 70 MW 油田电网实现电力组网。

在电站最大运行方式下，CEPF 平台 3 台主发电机同时运行并与海上电网并网，MA 段母排与 MB 段母联开关闭合时，采用 IEC 61363 计算方法[7]对 CEPF 平台 6.3 kV 母排处短路电流进行计

算，母线处短路电流瞬时值的峰值为 130.8 kA，初始交流分量有效值为 56.6 kA。

对于断路器开断电流能力应不小于计算的预期短路断开电流，不仅需要校核开断短路电流的交流分量有效值，也需要校核直流分量百分比。本实例以某 50 kA 真空断路器为例，很明显初始交流分量有效值高于该真空断路器额定开断短路电流。

断路器应能在最严重的情况下开断短路电流，故开断计算时间取为主保护动作时间和断路器固有分闸时间。本实例断路器固有分闸时间为 40～60 ms，再考虑到发电机、变压器等设置的差动保护实际动作时间为 10～20 ms，故其开断时间为 50～80 ms。按照 50 ms 开断时间[8]核算 6.3 kV 母排直流分量百分数为 54.7%，超过该断路器开断直流分量的 40%。

故该常规配电型断路器无法开断最大运行方式下的短路电流，针对海上油气田电力系统的特点，推荐采用爆破式快速限流技术来解决常规断路器因非周期分量过大无法分断短路电流的难题。

如图 5 所示，在母联位置加装 FCL，在短路故障几个毫秒内开断故障电流，及时分开两段母线。经过软件仿真，两段母线上的短路电流分别约为 21.4 kA 和 35.2 kA，低于母线能承受的最大短路电流以及断路器额定开断短路电流 50 kA，同时短路电流直流分量百分数降至 40%以下，断路器承受的短路电流降低、断路器开断容量不足的问题得以解决。

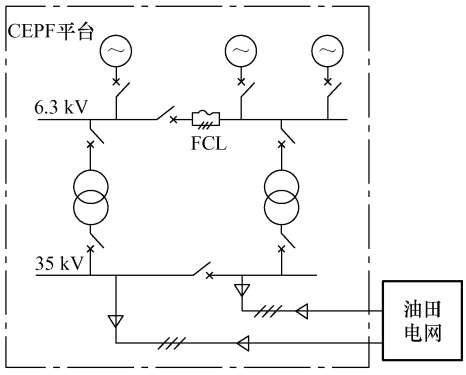

图 5　母联并列运行方案接线图

Fig. 5 Wiring diagram of bus parallel operation scheme

FCL 的使用为短路电流超标情况下分段母线并列运行创造了条件，两台主变压器所带负荷可以自动优化分配，有利于变压器的合理使用，降低了网络阻抗，提高了供电质量及可靠性。此外，母线上断路器可以选择较小容量的产品，降低工程和设备造价。

2.2　发电机出口短路保护方案

某改造项目中，将 3 个压缩机改为电动机驱动，并由发电机出口中压母排供电。由于新增了压缩机，驱动电动机反馈的短路电流 1.2 kA，中压母排发生三相短路时，短路电流起始周期分量有效值增大至 51.8 kA，超过馈线断路器额定开断短路电流 50 kA。

考虑到在母联处增加 FCL 需拆除原有中压盘，改造工作量太大，且需要长时间停产，故将 FCL 安装在发电机出口侧，如图 6 所示。

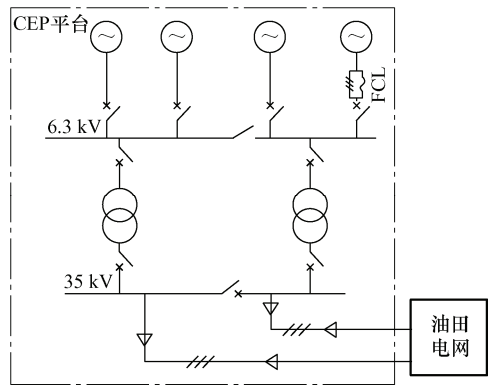

图 6　发电机出口短路保护方案接线图

Fig. 6 Wiring diagram of generator outlet short circuit protection scheme

经过计算，加装在发电机出口的 FCL 需要将发电机提供的短路电流限制在 8.1 kA 以内。当短路电流超过该值时，要求 FCL 开断短路电流并联跳发电机出口断路器，将中压母排的短路电流水平降至 50 kA 以下，从而保护其他用电设备的安全运行。

将 FCL 安装于发电机出口，因改造工作量小、对原电力系统影响小及易于实施的优点，非常适合于后期改造类项目。

3 结束语

当常规断路器在切除短路电流水平方面不能满足要求时，可考虑在电力系统中应用 FCL 来限制故障电流。通过对其动作值进行合理的整定，可以实现对海上平台电站不同运行方式下短路电流的有效限制。尤其是考虑到空间、经济效益等多因素影响，FCL 的应用会为海上油气田工程电气设计提供更可行更经济的技术方案，有效保障了海上油气田平台电力系统及电气设备的安全，其应用具有可推广性。**EA**

参考文献

[1] 孙树敏，刘洪顺，李庆民. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术，2008，32(21)：75-79.

[2] 王振宇. 电力系统中的新型故障限流器的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2009.

[3] 潘艳霞，凌志斌，蔡旭，等. 新型磁控开关型故障限流器参数设计及模型机研究[J]. 电工技术学报，2008，23(11)：59-64.

[4] 金鑫. 固态限流器安装地点及故障诊断方法的研究[D]. 杭州：浙江大学，2010.

[5] 王正斐. 电力系统故障限流器的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2008.

[6] 吴巍. I_s 快速限流器对提高电能质量的应用[J]. 低压电器，2008(9)：55-58.

[7] Procedures for calculating short-circuit currents in three-phase a.c.：IEC 363-1[S]. 1998.

[8] 袁洪平、李冬根. 短路电流对高压断路器及其开断电流选择的影响[J]. 江西电力，2009，33(1)：42-45.

作者简介：

高 璇

高璇(1987—)，女，硕士，工程师，现从事海上油气田电力系统研究与分析。

(收稿日期：2021-01-28)