

故障限流器在电力系统中应用研究现状

刘凯¹, 陈红坤¹, 林军², 黄娟³, 何志勤⁴

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 浙江金华武义供电局, 浙江 金华 321202;
3. 湖南益阳电业局, 湖南 益阳 413000; 4. 华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 故障限流器可以快速地限制短路电流, 保证系统安全稳定运行, 是一种具有发展潜力的限制短路电流技术。在综合大量文献的基础上综述了国内外故障限流器的应用研究现状、发展应用; 详细介绍了故障限流器的分类、基本原理和应用要求, 归纳了它们在电力系统中的安装地点, 提出了在实用化过程中故障限流器研究亟待解决的问题, 包括: FCL 与电力系统整体性能的交互影响; FCL 与电网关键设备的交互影响; FCL 的经济性评价; FCL 与其他现有 FACTS 装置控制系统、电网调度控制系统的协调配合问题; FCL 的最优化配置问题等。

关键词: 电力系统; 短路电流; 限制控制; 故障限流器 (FCL); 实用化

Study situation of applications of fault current limiter in power system

LIU Kai¹, CHEN Hong-kun¹, LIN Jun², HUANG Juan³, HE Zhi-qin⁴

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Jinhua Wuyi Electric Power Bureau, Jinhua 321202, China; 3. Yiyang Electric Power Bureau, Yiyang 413000, China; 4. Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Fault current limiter (FCL), which is able to limit short circuit current quickly to ensure safe system operation, is a very promising technology. According to the research results of many papers, the research and application situation of fault current limiter is summarized in this paper. The main classifications, basic principle and the application requirements as well as the locations of fault current limiter in power system are presented in detail. Finally, some problems in practice about the research of fault current limiter, including the interactive impacts between FCL and the whole performance of power system, the interactive impacts between FCL and key equipments of power system, economic evaluation of FCL, the coordination problem between FCL and key control systems, such as other existing FACTS device control system and power dispatching control system, optimal equip of FCL, etc, are put forward.

Key words: power system; short circuit current; controlling measurement; fault current limiter (FCL); practicability

中图分类号: TM66 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0147-05

0 引言

随着电力系统负荷的迅速增长以及各大电网的紧密互联, 导致各级电网短路电流水平的不断增大。短路电流对电力系统的安全稳定运行以及电气设备本身具有很大的危害性。因此, 限制电力系统短路电流, 从而有效减轻断路器等各种电气设备的负担, 提高其工作可靠性和使用寿命, 提高电力系统的运行可靠性, 已成为目前我国电力系统安全稳定运行和电力建设、发展的迫切问题。

一般可从调整电网结构、改变系统运行方式和加装限流设备三方面来考虑限制短路电流。具体方法主要有^[1-2]:

(1) 提升电压等级, 下一级电网分层分区运行;

- (2) 变电所采用母线分段运行;
- (3) 加装变压器中性点小电抗接地;
- (4) 采用高阻抗变压器和发电机;
- (5) 装设线路串联电抗器或母线分段电抗器;
- (6) 采用 FACTS 和直流背靠背技术;
- (7) 提高断路器的遮断容量;
- (8) 装设故障电流限制器。

其中装设故障电流限制器 (fault current limiter, FCL) 是一种有效的技术措施。FCL 能够限制电网的短路容量, 减轻断路器等各种高压电气设备的动、热稳定负担, 提高其动作可靠性和使用寿命。另一方面, 由于限制了短路容量, 有可能显著降低电网对各种电气设备 (如变压器、断路器、互感器等) 以及电网结构的设计容量要求, 节省投

资^[3]。因此研究性能优良、经济合理的新型故障限流器对我国电网建设具有重要的现实意义。

1 故障限流器的分类和基本原理

1.1 故障限流器的分类

FCL 早在 70 年代就出现在国内外的文献中,但真正受到重视和快速发展是在柔性交流输电技术提出以后,从近十年的发展来看可以将故障限流器分为两大类:

1) 电力电子型 FCL

电力电子型 FCL 又称柔性化的短路电流控制器 (flexibiled short current limiter, FSCCL), 按实现方案可分为固态短路限流器、采用功率电子器件的可控故障限流器和具有可控串联补偿的故障限流器^[4]。其中固态电流限制器(solid state current limiter), 因利用电力电子技术, 具有动作速度快、允许动作次数多、控制简便等优点, 在电力系统中有广阔的应用前景^[5]。

2) 新型材料 FCL

新型材料 FCL 目前主要有超导型故障电流限流器(superconducting fault current limiter, SFCL) 和热敏电阻型 FCL(positive temperature coefficient, PTC)等。其中 SFCL 集检测、转换和限流于一身, 能在较高电压下运行, 可在极短时间内有效地限制故障电流, 是 FCL 发展的重要方向^[6]。专家预测在未来几年内超导技术必将在电力工业中获得广泛的应用^[7]。目前 SFCL 可分为电阻型^[8]、变压器型^[9]、混合型^[10]、磁屏蔽型^[11]、饱和和铁心电抗器型^[12]、三相电抗器型和桥路型等^[13]。

1.2 故障限流器的基本原理

FCL 主要有以下四部分组成, 如图 1 所示: 快速故障电流探测元件、快速切换开关、限流电抗器以及过电压保护元件。

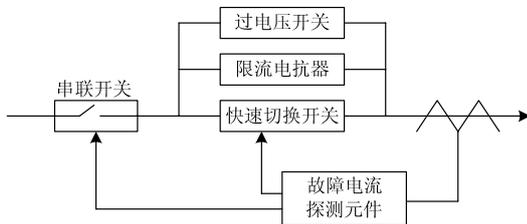


图 1 故障限流器原理图

Fig.1 Theory of FCL

FCL 的基本原理是在串联电抗器限流的基础上发展起来的, 同 FACTS 中的其他控制器一样, 依靠电力电子技术及其相应的传统技术进行改造而来。

它克服了传统串联电抗器限流的缺点, 模型可抽象为图 2, 在系统正常运行时, 开关装置处于闭合状态, FCL 无电抗投入; 而只在系统故障时开关快速断开投入电抗器进行限流。

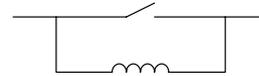


图 2 故障限流器模型

Fig.2 The model of FCL

2 国内外故障限流器的研究现状

2.1 故障限流器的安装地点

FCL 在电力系统中有多种应用, 可安装的位置如图 3 所示^[14-15]:

- (1) 应用于发电机出线端, 保护发电设备受过大的短路电流冲击而损坏;
- (2) 应用于发电厂用电线路, 限制通常很大的发电厂附属设备短路电流;
- (3) 应用于高压输电网连接处, 提高系统安全稳定, 解决电网互联、增容带来的短路电流开断困难问题, 优化潮流输送, 保障电压稳定;

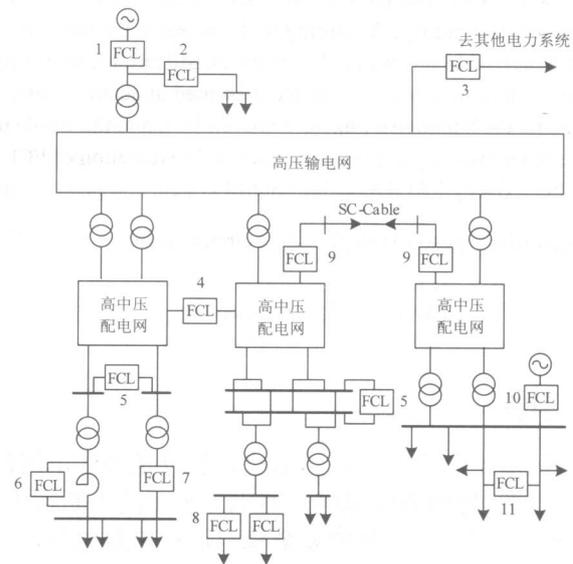


图 3 故障限流器在电力系统的安装点

Fig.3 Locations of FCL in power systems

- (4) 应用于高中压配电网连接处, 使电力供应更加安全、稳定, 优化潮流输送;
- (5) 应用于低压配电网母线或母线连接处, 提高系统紧凑性, 保障母线电压稳定;
- (6) 与限流电抗器并联, 故障电流限制器在系统正常运行时表现为很低的阻抗, 可将限流电抗器

短路, 避免电压降落和损耗;

(7) 应用于配电变压器输出馈线, 保护后续设备, 降低短路电流对变压器的损害, 并且在增大变压器容量后不必更换开关设备;

(8) 应用于配电母线向用户的输出线, 在任一出线发生短路时维持母线电压;

(9) 应用于保护某些重要的电力设备, 如超导电缆等;

(10) 连接新建设的局部发电机组, 如应用于连接新建热电站或风电站, 限制局部电网短路电流的增长;

(11) 应用于闭合环路, 在中压系统中, 故障电流限制器的应用可以使系统环网运行, 同时避免短路电流过大的问题, 使供电更稳定、安全, 并降低损耗。

2.2 对故障限流器的要求

故障限流器 FCL 是一种串接在线路中的电气设备。它正常时阻抗为零或很小, 而故障时阻抗很大。对故障限流器的技术要求主要有以下几个方面^[16]:

(1) 正常运行时, 限流装置呈低阻抗或零阻抗状态, 系统的有功功率和无功功率损耗小, 对系统无任何影响(压降为零);

(2) 故障发生后, 装置应能在极短时间内动作, 在故障电流到达第一个峰值前有效限制短路电流;

(3) 有一定的限制容量和限流时间;

(4) 控制简单, 无须高速短路故障检测技术;

(5) 动作时不引起系统暂态振荡、过电压等副作用;

(6) 不影响继电保护等设备的正确动作;

(7) 装置有自动复位功能和多次连续动作能力;

(8) 设备的成本及运行费用低, 可以承受的体积和重量, 可靠性高, 维修量小。

2.3 故障限流器的实用化进展

1) 国内情况

随着FCL受到重视的程度日益提高, 国内很多机构单位投入其研究与应用。中国科学院电工研究所联合国内多家单位共同研究开发的我国首台三相高温超导限流器成功将3 500 A(有效值)限制到635 A(有效值), 且短路瞬间波形无突变^[17]。由天津机电工业控股集团公司和北京云电英纳超导电缆有限公司联合研制的35 kV超导磁饱和型FCL, 于2007年成功投入实际应用, 是目前世界上挂网试运行的电压等级最高、容量最大的超导限流器^[18]。华中科技大学研究的基于串联补偿的FCL使用了真空触发间隙或高速斥力机构操作的合闸开关^[19], 具有动作速

度快、成本较低的优点。上海交通大学提出了一种适用于中高压电网的磁控开关型故障限流器结构, 并研制了一台220 kV/50 A限流器模型机^[20]。华东冶金学院提出一种由普通电感和IGBT桥路构成的无损耗电阻器式限流器拓扑并取得国家专利^[21]。浙江大学研制的10 kV/500 A/2500 A带交流旁路限流电感采用耦合变压器的新型固态限流器样机于2006年12月在绍兴电力试验站通过试验, 取得了令人满意的试验结果, 目前正在加紧工程实用方面的关键技术研究^[22]。

2) 国外情况

自20世纪90年代初, EPRI 推出固态 FCL 方案后, 国外在固态限流器方面的研究取得巨大进展。1993年初, 在美国新泽西州 Mort Monmouth 的 Army Power Center 的 4.6 kV 交流馈电线路上安装了一个由反并联 GTO 构成的 6.6 MW 的固态断路器, 平均工作电流为 800 A, 在发生短路故障 300 μ s 的时间内切断故障, 起到有效的保护作用^[23]; 西屋公司与 EPRI 合作, 制造出一台(13.8 kV, 675A)FCL (与固态断路器 SSCB 组合), 于 95 年 2 月安装在 PSE&G 的变电站投入运行^[24]; 日本东北电力公司及日立公司研制了 (Distribution Current Limiting Device, DCLD)的试验装置, 并进行了试验^[25]。

SFCL 在国外工程研究文献报道较多, 其工程应用方面较早的是 1995 年 Lockheed martin 公司(美国)研制的桥路型 2.4 kV/80 A 的超导限流器; 在 1999 年 General Atomics 公司又研制了指标为 15 kV/20 kA 的桥路型超导限流器; 瑞士 ABB 公司也分别在 1996 年和 2002 年研制了 1.2 MVA 和 6.4 MVA 的电阻型超导限流器; 2004 年, 日本 Toshiba 公司利用超导高温材料研制了 66 kV/750 A 的超导限流器。

此外 1994 年日本富士电机与关西电力公司联合开发出由真空开关和 GTO 并联构成的 400 V 配电用混合式限流器^[26]。1998 年 ACEC-Transport 和 GEC-Alsthom 开发了交直流两用的混合式故障限流器, 且已形成商业化^[27]。最近两年来, 一方面主要完善前面的几种固态限流器, 使之满足工业现场运行更加实用化、商业化。另一方面, 更多工作均放在具有多种功能的限流器研究上, 大部分研究倾向于将串联无功补偿和限流功能集于一身^[28]。

3 故障限流器的研究方向

FCL在电力系统中的应用可以有效提高电力系统的综合运行效率, 但也有可能对电力系统产生负面影响, 对于这些负面影响应采取其它措施消除, 如需要重新整定距离保护等(故障限流器的存在可

能会缩短线路的距离保护范围)。

目前, FCL的应用还局限于个别工程, 但已经日益受到关注, 将来应用于电力系统中的前景乐观。如果大规模应用故障限流装置, 最迫切需要进行的研究工作如下:

(1) 研究故障限流器提高电网输送能力的作用, 并研究其对电网稳定性的影响, 提出满足电力系统稳定要求的基本参数;

(2) 结合典型区域电网结构, 研究故障限流器的最佳配置点和配置容量等相关参数, 提出在典型区域电网结构下满足系统稳定和设备动热稳定的最佳配置点和配置容量等相关参数;

(3) 研究多个故障限流器或与其他现有FACTS装置控制系统的协调配合问题;

(4) 研究故障限流器与已有的常规控制、继电保护的衔接问题;

(5) 研究故障限流器控制纳入现有的电网调度控制系统问题;

(6) 研究故障限流器应用于各种类型负荷地点时与系统之间的相互影响以及对策;

(7) 研究故障限流器在大联网中的作用;

(8) 研究故障限流器的经济性评价指标, 量化技术因素的影响, 建立合理的技术经济学评估模型。

4 结语

目前华东、广东 500 kV 电网部分地区短路电流已超过 63 kA, 电网中某些断路器的开断容量已经无法满足短路电流水平的要求。抑制短路电流成为当前的一项紧迫任务。FCL 的使用能够直接减轻断路器的开断负担, 有利于提高电网电压质量和线路的输电能力, 为抑制输电网络短路电流过大提供了一种有效解决方案。同时由于 FCL 功能单一, 在系统正常时不工作。考虑到现有配电网中装设了大量电能质量补偿装置, 如果能够将 FCL 与它们相结合研究综合型控制装置, 则可实现一机多用, 提高 FCL 性能价格比, 这将是 FCL 的一个重要发展方向。

参考文献

- [1] Power A J, Avenue K. An Overview of Transmission Fault Current Limiters[A]. in: IEE Fault Current Limiters-a Look at Tomorrow[C]. London: 1995. 1-5.
- [2] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 1-5.
YE Lin, LIN Liang-zhen. Superconducting Fault Current Limiter Applications in Electric Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 1-5.
- [3] 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 Shu-min, LIU Hong-shun, LI Qing-min, et al. A Summarization of Research on Fault Current Limiter of Power System[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 75-79.
- [4] 李明, 张小青. 电力系统故障限流器技术的研究[J]. 电气时代, 2005(4): 54-56.
LI Ming, ZHANG Xiao-qing. Studies on Fault Current Limiter of Power System[J]. Electric Age, 2005(4): 54-56.
- [5] 陈金祥, 董恩源, 邹积岩. 固态故障电流限制器(FCL)的应用与发展[J]. 继电器, 2000, 28(12): 35-37.
CHEN Jin-xiang, DONG En-yuan, ZOU Ji-yan. Application and Development of Fault Current Limiter (FCL)[J]. Relay, 2000, 28(12): 35-37.
- [6] 肖霞, 李敬东, 叶妙元, 等. 超导限流器研究与开发的最新进展[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 64-68.
XIAO Xia, LI Jing-dong, YE Miao-yuan, et al. Development of High Temperature Superconducting Fault Current Limiter System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 64-68.
- [7] 唐跃进, 李敬东, 叶妙元, 等. 未来电力系统中的超导技术[J]. 电力系统自动化 2001, 25(2): 70-75.
TANG Yue-jin, LI Jing-dong, YE Miao-yuan, et al. Applied Superconducting Technique in the Future Electric Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 70-75.
- [8] Kreutz R, Bock J, Breuer F, et al. System Technology and Test of CURL 10,a 10 kV,10 MVA Resistive High-Tc Superconducting Fault Current Limiter[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2005,15(2): 1961-1964.
- [9] Yamaguchi H, Kataoka T. Effect of Magnetic Saturation on Fe Current Limiting Characteristics of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2006,16(2): 691-694.
- [10] 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.
LIN Yu-bao, LIN Liang-zhen. Superconducting Fault Current Limiters and Their Research Status[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1997(3): 14-19.
- [11] Onishi T, Kawasumi M, Sasaki K, et al. An Experimental Study on a Fast Self-acting Magnetic Shield Type Superconducting Fault Current Limiter[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): 868-871.

- [12] Kcilin V, Kovalcv I, Kmglov S, et al. Model of HTS Three-phase Saturated Core Fault Current Limiter[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2000,10(1): 836-839.
- [13] Hoshino T, Muta I, Nakamura T, et al. Non-inductive Variable Reactor Design and Computer Simulation of Rectifier Type Superconducting Faultcurrent Limiter[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2005,15(2): 2063-2066.
- [14] Slade P G, Wu J L, Stacey E J, et al. The Utility Requirements for a Distribution Fault Current Limiter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 507-515
- [15] Noe M, Oswald B R. Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, 9(2): 1347-1350
- [16] Engelman N, Schreurs E, Drugge B. Field Test Results for a Multi-shot 12.47 kV Fault Current Limiter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991,6(3): 1081-1087
- [17] 陆佳政, 惠东, 方针. 基于改进桥路型的高温超导限流器的研制及现场试验研究[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 181-184
LU Jia-zheng, HUI Dong, FANG Zhen. Development of High Temperature Superconductor Current Limiter Based on Improved Bridge-type and Its On-site Testing[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 181-184.
- [18] 刘洪顺, 王伟, 邹亮, 等. 磁饱和型故障限流器的研究与发展[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(1): 18-23.
LIU Hong-shun, WANG Wei, ZOU Liang, et al. Advances of Saturated Iron Core Fault Current Limiters[J]. Journal of Shangdong University: Engineering Science Edition, 2008, 38(1): 18-23.
- [19] 陈金祥, 董恩源, 邹积岩. 具有串联补偿作用的新型故障限流器(FCL)的研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 48-51.
CHEN Jin-xiang, DONG En-yuan, ZOU Ji-yan. Study of New Fault Current Limiter with Series Compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001,16(1): 48-51.
- [20] 潘艳霞, 凌志斌, 蔡旭, 等. 新型磁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.
PAN Yan-xia, LING Zhi-bin, CAI Xu, et al. Study on Parameter Design and Test Model of a Novel Magnetic-controlled Switcher Type Fault Current Limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 59-64.
- [21] CHEN Ji-yan, CHEN Zhong-ming. Fault Current Limiting by Means of Loss-less Resistor [A]. in: Proceedings of the American Conference[C]. Chicago: 2000.544-548.
- [22] 江道灼, 敖志香. 短路限流技术的研究与发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3): 8-19.
JIANG Dao-zhuo, AO Zhi-xiang. Research and Development of Short-circuit Current Limiting Technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007,19(3): 8-19.
- [23] 中国电工技术学会. 电工高新技术丛书[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [24] Podlesak T F, Singh H, Fonda K. Megawatt High Speed Solid State Circuit Breaker for Pulse Power Application[A]. in: Pulsed Power Conference, 1993. Digest of Technical Papers, Ninth IEEE International[C]. 1993.984-987.
- [25] Ueda T, Morita M, Arita H. Solid-State Current Limiter For Power Distribution System[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993: 1796-1801.
- [26] Briece C W, Dougal R A, Hudgins J L. Review of Technologies for Current-Limiting Low-Voltage Circuit Breakers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996,32(5): 41-47.
- [27] Czueha J, Lipski T, Zyborski J. Hybrid Current Limiting Interrupting Device for 3-Phase AC Application[A]. in: IEE Trans in Distribution Switchgear[C]. 1998. 161-166.
- [28] Chang C S, Yang S W. Optimal Multi-objective Planning of Dynamic Series Compensation Devices for Power Quality Improvement[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2001,148(4).

收稿日期: 2009-04-30; 修回日期: 2009-08-24

作者简介:

刘凯(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; Email: liu_kai.2008@163.com

陈红坤(1967-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电能质量分析、电力系统运行与控制方面的科研和教学工作;

林军(1984-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统运行与控制方面工作。