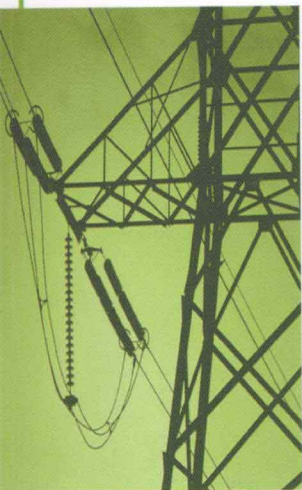


DIANLI XITONG JINGJIXING GUZHANG XIANLIU JISHU



电力系统 经济型故障 限流技术

◎ 李庆民 娄杰 张黎 刘洪顺 邹亮 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电力系统经济型 故障限流技术

李庆民 娄杰 张黎 刘洪顺 邹亮 著

机械工业出版社

本书汇集了著者近年来在电力系统经济型故障限流技术领域的最新研究成果, 涵盖串联谐振式、ZnO 避雷器式、快速开关式、永磁偏置式等多种故障限流拓扑及其工作原理, 还包括故障限流器与电力系统及设备的交互影响研究进展, 涉及对断路器开断特性的作用机制、对输电线路潜供电弧特性与重合闸技术的影响机理等多个研究专题。本书注重基础理论与工程应用相结合, 力求表述严谨, 注重图文并茂。

本书适合于从事电力系统故障限流技术、智能电网电磁装备技术、高电压技术研究的科研人员、研究生、技术开发与工程设计人员阅读, 也可作为相关领域研究生的参考教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统经济型故障限流技术/李庆民等著. —北京: 机械工业出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-111-35604-2

I. ①电… II. ①李… III. ①电力系统 - 限流措施 - 研究 IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 162146 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 付承桂 责任编辑: 付承桂

版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 12.75 印张 · 243 千字

0 001—2 500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-35604-2

定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着高压电力网络的大规模发展，系统的短路容量和水平日益增高，而人们对系统运行安全、电能质量及供电可靠性也提出了更加苛刻的新要求，如何限制故障电流已成为电力工业面临的重大技术与经济问题之一，同时也促使故障限流技术发展成为一个具有突出前沿交叉特征的分支学科研究领域，创新性的研究成果不断涌现。

电力系统故障限流技术在近十年内得到了迅速发展，并逐渐由基础与应用基础研究转向工程应用与实施。但就发展的具体故障限流技术而言，在物理拓扑结构与材料组成、工作原理、技术实施方式与有效性、经济特性等方面，呈现出千差万别、千姿百态、百花齐放的局面，涉及物理学、材料学、电气工程学、气体放电、优化与控制论等多个领域基础理论与方法的综合应用，很难用一种理论或方法来描述和界定当前发展中的故障限流技术。正是缘于上述原因，非常遗憾的是，除了一些零星的文献译丛或论文集外，目前国内外尚没有一本系统论述电力系统故障限流技术最新研究成果的专著或教材，给人们系统掌握故障限流技术的最新研究进展以及实现文献溯源带来不便，这也是长期困扰该领域科研人员的一大问题。

分析表明，故障限流器只有实现高电压大容量化才具有实际应用价值，而经济特性是其获得应用不可或缺的关键因素。就目前发展而言，故障限流器的结构拓扑各异、种类繁多，但其中占主导作用的包括电力电子型、超导型以及经济型故障限流器。电力电子型故障限流器存在稳态功耗和发热严重、触发与控制复杂、造价较高等问题，其技术的实用性与可靠性在应用中也受到一定程度的限制，但随着大功率电力电子器件的技术进步会得到进一步发展。超导型故障限流器的研究也遇到了诸多亟待解决的技术问题，特别是在高压大功率场合的应用，仍有赖于高温超导材料的科学研究与生产工艺以及相关集成技术取得新突破，尽管如此，超导故障限流技术仍将是未来本领域发展的重点和前沿方向之一。

鉴于上述情况，人们同时也开始转而探索其他形式的故障限流理论与创新技术，旨在通过科学研究和技术创新实现限流拓扑的优化，促进故障限流器朝高压大容量化发展，并因此出现了种类繁多的非电力电子式、非超导式的故障限流技术方案，这就是所谓的“经济型”故障限流技术。“经济型”

故障限流技术的关键在于利用常规电气元器件实现拓扑优化和方法创新,因具有运行可靠性高、无需外加控制而实现自动投切、技术经济性能优异、易于实现高压大容量化等突出优点,成为目前最为经济、实用、可靠的故障限流技术和研究热点之一,在高压电力系统中应用前景广阔。

本书著者长期从事故障限流技术领域的科学理论与工程应用研究,愿将自己的研究所得与同行分享,但实在难以涵盖所有的故障限流技术领域及其研究进展,权以“电力系统经济型故障限流技术”偏其一隅,详细论述著者在该分支方向的研究结果,涉及多种经济型故障限流拓扑及其工作原理,以及故障限流器与电力系统的交互影响等多个研究专题。著者深知自己的工作乃冰山一角,但毕竟是个开头,但愿起到抛砖引玉之功效。

本著作由李庆民、娄杰、张黎、刘洪顺、邹亮共同完成,其中李庆民编写第1、2章和第5章的5.1~5.3节以及前言,娄杰编写第4、9章,张黎编写第5章的5.4~5.6节和第6章,刘洪顺编写第3、7章,邹亮编写第8章,最后由李庆民和娄杰负责完成统稿。

本著作得到了国家自然科学基金(项目批准号:51077088, 51007048)的资助;在撰写过程中,孙秋芹、许家响、吕鑫昌、王学磊、师伟、马元、孟君等研究生也做了大量的编辑和插图等辅助工作,在此一并表示谢忱;最后应特别强调的是,倘若没有机械工业出版社责任编辑的鼓励和帮助,本书将难以付诸出版,向他们表示最衷心的感谢。

限于著者水平所限,书中难免存在一些错误或疏漏之处,恳请广大读者批评指正。著者联系方式: lqmeee@sdu.edu.cn。

著者

2011年7月1日

于山东大学茗香斋

目 录

前言

第 1 章 导论	1
1.1 故障限流技术研究的意义	1
1.2 故障限流的传统技术与措施	2
1.3 故障限流器的研究及发展现状	4
1.3.1 超导型故障限流器	5
1.3.2 电力电子型故障限流器	11
1.3.3 经济型故障限流器	14
第 2 章 经济型故障限流器的主要拓扑与工作原理	19
2.1 基于 ZnO 避雷器的故障限流器	19
2.2 基于快速开关的故障限流器	19
2.3 基于永磁偏置饱和原理的故障限流器	20
第 3 章 ZnO 避雷器式故障限流器	22
3.1 样机研制与实验研究	22
3.1.1 低压物理模拟实验	22
3.1.2 10kV 等级样机研制与模拟运行实验	28
3.2 110kV 样机总体设计方案	35
3.2.1 串联电容器设计方案	36
3.2.2 串联电抗器设计方案	36
3.2.3 避雷器设计方案	36
3.2.4 并联可控放电间隙 G 设计方案	37
3.2.5 旁路快速合闸开关 K 设计方案	38
3.2.6 隔离开关设计方案	38
3.3 数字化在线监测与综合保护策略研究	38
3.3.1 电容器的监测与保护	38
3.3.2 避雷器的监测与保护	40
3.3.3 可控并联间隙的监测与保护	41
3.4 总结	42
第 4 章 快速开关式故障限流器及其关键技术	43
4.1 快速开关式故障限流器原理及仿真	43
4.1.1 工作原理	43
4.1.2 仿真分析	43
4.2 电磁式快速开关	46

4.2.1 盘状推斥式快速开关	46
4.2.2 音圈电机式快速开关	60
4.2.3 反绕嵌套式快速开关	66
4.3 快速电磁式操动机构动态特性比较	79
4.3.1 材料与结构	79
4.3.2 电磁力灵敏度评价指标	80
4.3.3 拓扑结构的统一性分析	85
4.3.4 小结	89
4.4 总结	90
第5章 永磁饱和型故障限流器	91
5.1 永磁饱和型故障限流器的工作原理	91
5.1.1 系统正常时 FCL 工作状态分析	92
5.1.2 系统短路时 FCL 工作状态分析	93
5.2 磁性材料在永磁饱和型故障限流器中的应用	94
5.2.1 永磁材料	95
5.2.2 软磁材料	97
5.2.3 小结	98
5.3 运行机理分析与等效建模	98
5.3.1 静态特性分析	98
5.3.2 动态特性分析	103
5.3.3 小结	111
5.4 大容量化参数设计与优化方法	111
5.4.1 大容量化参数设计算法	111
5.4.2 大容量化参数优化研究及算例分析	117
5.4.3 小结	123
5.5 实验研究与拓扑优化	124
5.5.1 小容量等级综合限流特性实验	124
5.5.2 永磁体稳定性机理研究	127
5.6 总结	129
第6章 经济型故障限流器对电力系统暂态稳定的影响	130
6.1 系统暂态物理过程分析	130
6.2 具有 FCL 的单机一无穷大系统的功角特性	131
6.2.1 系统功角特性	131
6.2.2 极限切除时间	132
6.3 单机一无穷大系统仿真分析	134
6.3.1 不同限流比下系统的暂态稳定特性	134
6.3.2 不同切除时间下系统的暂态稳定特性	135
6.3.3 不同短路形式下系统的暂态稳定特性	136

6.4 多机系统仿真分析	137
6.5 总结	138
第7章 经济型故障限流器对高压断路器开断特性的影响	139
7.1 对高压断路器开断特性的影响	139
7.1.1 经济型故障限流器等效分析模型	139
7.1.2 出线故障对 RRRV 的影响	140
7.1.3 近区故障对 RRRV 的影响	144
7.1.4 限流器杂散电容对 RRRV 的影响	147
7.1.5 小结	149
7.2 对高压断路器失步故障开断特性的影响	149
7.2.1 对失步开断电流的影响	150
7.2.2 对瞬态恢复电压的影响	152
7.2.3 对断路器开断苛刻度的影响	157
7.2.4 小结	158
第8章 经济型故障限流器对继电保护的影响	159
8.1 计及故障限流器和故障过渡电阻的接地距离保护补偿算法	159
8.1.1 双端电源系统接地短路故障分析	159
8.1.2 双端电源系统仿真分析	164
8.1.3 小结	165
8.2 安装氧化锌避雷器式故障限流器的输电线路潜供电弧特性与重合闸策略	166
8.2.1 超高压输电系统分析模型	166
8.2.2 旁路开关断开时间对潜供电流的影响	167
8.2.3 潜供电流低频分量的产生机理分析	168
8.2.4 含限流器的线路单相重合闸操作	171
8.2.5 小结	174
第9章 结束语	175
参考文献	177

第1章 导 论

1.1 故障限流技术研究的意义

随着我国电网规模的日益扩张、电力系统中负荷的迅速增长、大容量机组的不断投入运行以及各大区电网的互联,电力系统短路电流水平也日益增高,许多地区特别是沿海经济发达地区电网的短路电流水平,已经达到甚至超过电力规程所限定的最大允许值。巨大的短路电流不但增加了系统主设备的选择配置难度,而且严重威胁系统的安全运行,因此,日益严重的短路故障问题必须得到足够的重视和有效解决。

短路故障对电力系统的正常运行以及电气设备本身具有严重的危害作用。具体包括以下方面:①短路电流通过电气设备中的导体时,其强烈热效应会引起导体或其绝缘的破坏;另一方面,导体也会受到很大的电动力冲击,致使导体变形,甚至损坏。②短路故障还会引起电网中电压降低,特别是靠近短路点处的电压显著下降,结果可能使用户的供电质量受到影响,从而造成产品报废及设备损坏等严重后果。③短路故障破坏电力系统并列运行的稳定性并引起系统振荡,从而可能导致并列运行的发电机失去同步,造成大面积停电,甚至使整个系统瓦解。④不对称接地短路引起的不平衡电流将产生严重的不平衡磁通,在邻近通信线路内形成相当大的感应电动势,造成对通信系统的干扰,甚至危及通信设备及人身安全。

为保证电力系统的安全、可靠与稳定运行,这就需要更新电网内各种输变电设备,诸如高压断路器、变压器、互感器以及变电站母线、构架、导线、支撑绝缘子和接地网等,以满足短路电流水平增高所带来的更加苛刻的要求,使得电网投资成本大大增加,甚至可能导致电网无高压断路器可选。因此,必须采取行之有效的技术措施限制短路电流,否则,新建变电站的设备投资和现有变电站的设备改造将付出巨额代价。目前,世界上大多数国家都采取一定措施对各级电网的短路水平予以适当限制。

根据我国电网发展规划,在一些负荷密度大的城市和地区的 500kV 和 220kV 变电站中,预期短路电流水平将可能超过 100kA。资料表明,三峡水电站可能的最大短路电流周期分量可达到 300kA。目前国际上可生产的开关设备,除了用于严酷电网条件的少量气体绝缘金属封闭开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS),其最大短路开断电流可达 100 kA (国内无此生产能力),大部分高

压断路器的额定短路开断电流在 63kA 以下，一般难以满足开断系统较大短路电流的要求，而且随着全国联网不断加强以及电网容量不断扩大，这种矛盾会越来越突出。如何限制短路电流已成为我国电网发展中一个不可避免的重大技术和经济问题。

1.2 故障限流的传统技术与措施

限制电力系统短路电流的传统技术与措施，可从调整电网结构、改变系统运行方式和加装限流设备等三方面予以考虑，具体方法包括：

1) 提升电网电压等级，下一级电网分层、分区运行。将下一级网络分成若干区，以辐射状接入更高一级电网，大容量电厂也直接接入更高一级电网中，这样，原电压等级电网的短路电流将随之降低。例如，在发展 500 kV 电网的基础上，对 220 kV 电网实施分层、分区运行，是限制短路电流最直接有效的方法。

2) 变电站内采用母线分段运行方式。打开母线分段开关，使母线分列运行，可以增大系统阻抗，从而有效降低短路电流水平。该措施实施方便，但将削弱系统的电气联系，降低系统安全裕度和运行灵活性，也可能引起母线负荷分配不均衡。

3) 加装变压器中性点小电抗。中性点小电抗对于减轻三相短路电流无效，但对于限制不对称短路电流的零序分量具有明显效果。在变压器中性点加装小电抗，施工便利且投资较小，故在单相短路电流过大而三相短路电流相对较小的场合应用很有效。不过，中性点小电抗仅对降低 220kV 电网局部区域单相短路电流的作用较大。

4) 采用高阻抗变压器和发电机。采用高阻抗发电机会增大正常情况下发电机自身的相角差，对系统静态稳定不利；再者，漏磁增加，故障初期的过渡阻抗增大，因转动惯量减小将进一步使系统动态稳定性下降。采用高阻抗变压器也同样存在类似问题。因此，是否采用高阻抗变压器和发电机，需要综合考虑系统的短路电流水平和稳定问题。

5) 限流熔断器。利用熔断器的快速性可将短路电流在到达第一个峰值前强行限制。由于限流熔断器分断能力有限，只能用于 35kV 以下电压等级，在输电系统还没有应用的可能。而且，熔断器熔断时会产生操作过电压，需配合氧化锌电阻、负荷开关共同使用。

6) 采用串联电抗器。加装串联电抗器可有效限制短路电流，但会造成正常情况下的无功功率消耗，必须另加无功功率补偿设备。利用晶闸管技术，可实现正常运行时串联电抗器的零阻抗，但目前受单个半导体器件的容量所限，必须采用串并联方案，有关技术和经济可行性问题尚待进一步研究。

7) 采用直流背靠背技术。交流系统的短路电流含有无功分量, 而直流系统只输送有功功率。通过直流系统将已有的交流系统适当分区, 即在同一地点装设整流、逆变装置而不需架设直流输电线路, 将电网分成相对独立的几个交流系统, 避免系统间相互的短路电流, 可以很好地限制短路电流水平。

8) 更换断路器。提高断路器的遮断容量, 选择开断电流水平高的断路器, 也不失为一种解决办法, 但开关设备造价昂贵, 同时需要对相关输变电设备进行改造, 总投资较大。

由表 1-1 可知, 传统限流技术尽管可在某种程度上解决电网短路电流的抑制问题, 但无一例外地将对电网运行的灵活性与经济性带来不同程度的负面影响。鉴于上述情况, 人们与此同时开始转而探索其他形式的故障限流理论与创新技术。其中, 故障限流器能较好地克服传统限流技术的不足, 愈加受到国内外的关注。作为一种较理想的技术措施, 故障限流器可有效限制电网的短路容量, 从而极大地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, 保证电网的安全与稳定运行。另一方面, 由于限制了短路容量, 有可能显著降低对电网中各种电气设备 (如变压器、断路器、互感器等) 以及电网结构的设计容量要求, 大大节省投资。因此, 研究性能优良、经济合理的新型故障限流器是大势所趋, 对我国电网建设具有重要的现实意义和应用价值。

表 1-1 传统限流技术比较

方 法	优 点	缺 点
提升电压等级, 下一级电网分层分区运行	有实际经验 直接有效	投资昂贵
母线分段运行	国内外普遍采用 实施简单易行	降低系统安全裕度 降低运行灵活性 引起母线负荷分配不均衡
变压器中性点经小电抗接地	有实际经验 单相接地短路电流限制效果好	不限制三相短路电流
高阻抗变压器	有实际经验 广泛使用	影响电网运行稳定性 设备费用高 电压降和电网损耗增加
高阻抗发电机	有实际经验, 空载损耗减小 设备成本降低	相位差增大 降低系统稳定能力
限流熔断器	简单, 成本低, 可靠性高 有显著的限流特性	故障电流容量低 不适合自动重合闸 会产生操作过电压, 须手动更换

(续)

方 法	优 点	缺 点
串联电抗器	有实际经验 可靠性高	影响电网稳定性 有电磁干扰 电压降和电网损耗增加
直流背靠背技术	成熟的电力系统技术 限流效果良好	换流装置设备费用较高 直流系统间的相互影响问题
更换断路器	有实际经验 可靠性高	造价昂贵 遮断容量受限 需对相关变电设备进行改造

1.3 故障限流器的研究及发展现状

20 世纪 70 年代就有人提出了故障电流限制器 (Fault Current Limiter, FCL, 简称故障限流器) 的概念。美国电力科学研究院 (Electric Power Research Institute, EPRI) 在 20 世纪 90 年代初期, 成立了一个面向电力系统和电力用户的专门调查组织, 针对电力系统短路电流及其抑制方法开展了深入的调查研究, 最终的研究报告认为故障限流器的研制势在必行。国际大电网会议也在 1996 年成立了专门的工作组 (CIGRE working group A3.10), 开始进行限流器的规范化研究。近年来, 世界各国特别是发达国家都投入大量人力与物力研究限流技术, 研制具有良好限流性能的新一代限流装置。

从近几十年的发展历程来看, 研制的 FCL 虽然结构形式不同, 且种类繁多, 但其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, 最大不超过输送功率的 0.25%; 在电网发生短路故障时, 迅速呈现高阻抗以限制故障电流。对各种 FCL 的共性要求包括: 动作速度快, 反应时间小于 20ms 甚至更短 (几毫秒); 具有故障时自动触发功能, 可将短路电流限制到预期值的一半以下; 故障切除后, 具有快速自动复位功能, 可在几秒之内实现多次动作, 以配合线路的重合闸操作; 工作可靠性应高于同时运行的断路器等设备。

由于实现限流的方式千差万别, 故障限流技术属于多学科交叉研究领域, 故对其进行准确分类十分困难, 这里仅给出大致的分类方法。从限流阻抗类型或作用方式上, 可将 FCL 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、法国 FERRAZ 公司的 Pyro-breaker、西安铭金科技有限公司的产品等) 和自愈合熔丝型 (Rehealing fuse) 等。从限流材料与设备类型上, 可

将 FCL 分为特殊材料型和常规材料型。特殊材料型以超导型为主, 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研究所从事该项研究较多; 此外还有 PTC (Positive Temperature Coefficient) 聚合材料型, 瑞典 ABB 研究协会在这方面取得了较大进展。常规材料型可分为电力电子型、常规设备型和混合型, 或者根据 FCL 的拓扑连接方式, 也可将其分为串联谐振型、并联谐振型、整流型、永磁饱和型和电弧电流转移型等。

近十年来, 国内外针对故障限流器开展了大量的研究工作, 研制的故障限流器结构拓扑各异, 种类繁多, 其中占主导地位的是超导型和电力电子型故障限流器。

1.3.1 超导型故障限流器

超导型故障限流器 (Superconducting Fault Current Limiter, SFCL) 早在 1970 年即被提出, 到 20 世纪 80 年代已有不少基础研究和实际开发方面的报道。1991 年, 日本东芝公司和东京电力公司联合攻关, 采用低温超导材料 NbTi/CuNi 和液氮低温冷却装置 (临界温度 77K) 研制成功三相 6.6kV/1.5kA 的 SFCL, 经试验表明该装置可将 55kA 的预期短路电流限制到 1.8kA, 该试品已接近实用规模, 并已开始试运行。

1986 年以来, 临界温度达 87 ~ 135K 的若干陶瓷系列高温超导材料的问世, 将使超导电力设备的研制、运行与维护费用大幅度下降。从事该项技术研究的国家遍及东西欧、北美、澳洲和东亚各国, 研究单位并不局限于大学, 也包括许多国际著名的电气公司如 ABB、西门子、施耐德、东芝、GEC、Alstom 和 CISE 等。国外一些重要的电力公司和研究所, 如加拿大的 Quebec、日本的几大电力公司和中央电力研究所等均积极参与了该项科研工作。我国超导电力设备的研究工作已开展多年, 具备了一定的研究基础。中国科学院电工研究所、北京大学、华中理工大学、清华大学、有色金属研究院和核物理研究院等单位都开展了超导型 FCL 的研究工作。我国首台高温超导限流器已于 2005 年 8 月在湖南省娄底电业局高溪变电站顺利通过短路试验, 挂网试运行已近一年, 其主要技术性能指标均已达到国际先进水平, 成为继瑞士、德国和美国之后全球第四台并入 10kV 电网试运行的高温超导限流装置, 极大地推进了高温超导技术在电力工业中的实用化研究进程。超导型故障限流器的样机研制情况见表 1-2。

表 1-2 超导型故障限流器样机研制进展

时间	研究机构	容量	材料	类型
1982	NEI Peebles Ltd (英国)	3kV/556A	—	饱和铁心式
1990	GEC, Alstom (法国)	25kV/200A	Nb-Ti	饱和铁心式
1991	Seikei University (日本)	200V/13A	NbTi/CuNi	三相电抗器式

(续)

时间	研究机构	容量	材料	类型
1991	TEPCO, Toshiba(日本)	6.6kV/1.5kA	Nb-Ti	电阻式
1994	GEC, Alstom(法国)	150V/50A	NbTi/(Cu + CuNi)	混合式
1994	Ben Gurion University(以色列)	1 kV/25A	BSCCO	电抗式
1995	Lookheedmartin(美国)	2.4kV/80A	BSCCO-2223	桥路式
1996	Alcated Alstom(法国)	40kV/315A	BSCCO-2212	电阻式
1996	ABB(瑞士)	10.5kV/1MVA	BSCCO-2212	电阻式
1996	Wollongong University(澳大利亚)	34V/10A	Bi-2223	饱和铁心式
1996	Central Research Institute of EPI(日本)	6.6kV/400A	Bi2212	磁屏蔽式
1997	ABB(瑞士)	10.5kV/700A	Bi-2212	磁屏蔽式
1996	VPTI Hydro-Quebec(加拿大)	450V/95A	BSCCO 2212	电抗式
1997	LANL, ASC, LMC(美国)	2.4kV/2kA	Bi-2223	桥路式
1998	CNRS-CRTBT/LEG(法国)	1.1kV/1.08kA	Bi-2223	电阻式
1999	Siemens, AG(德国)	100kVA	YCBO	电阻式
1999	LANL, ASC, LMC等(美国)	15kV/1.2kA	Bi2223/Ag	桥路式
1999	Kurchatov Institute(俄罗斯)	240VA	HTS	饱和铁心式
1999	General Atomics(美国)	15kV/20kA	BSCCO-2223	桥路式
2000	Kyoto University(日本)	60V/200A	NbTi/(Cu + CuNi)	桥路式
2001	CNRS(法国)	1kV/730A	YBaCuO	电阻式
2001	Hokkaido University(日本)	30V/50A	Bi-2223	磁屏蔽式
2002	东北大学(中国)	220V/10A	Bi-2223	饱和铁心式
2002	Central Research Institute of EPI(日本)	100V/100A	Bi-2212	电抗式
2002	ABB(瑞士)	6.4MVA	BSCCO 2212	电阻式
2002	Yousei University(韩国)	1.2kV/80A	HTS	电抗式
2002	Toshiba Corporation(日本)	66kV/750A	Bi-2223	桥路式
2004	AIST(日本)	5kVA	NbTi/CuNi	变压器式
2004	Central Research Institute of EPI(日本)	2kV/8kA	Bi-2223	电抗式
2004	Nexans Superconductors(德国)	10 kV/10 MVA	BSCCO-2212	电阻式
2005	中国科学院电工研究所(中国)	10.5kV/1.5kA	BSCCO-2223	桥路式
2006	Bar-Ilan University(以色列)	400 V/ 300 A	BSCCO-2223	饱和铁心式
2008	北京云电英纳超导电缆有限公司(中国)	35kV/90MVA	Bi-2223	饱和铁心式

目前已研究过的 SFCL 可分为电阻式、变压器式、混合式、磁屏蔽式、电抗式、磁饱和式、三相电抗器式和桥式等八种, 下面分别对它们的结构原理和技

术特点作一介绍。

1. 电阻式

电阻式 SFCL 是利用交流超导体从超导态向常态（高阻）的快速转变原理来限制电力系统的故障电流的。图 1-1 为电阻式 SFCL 的结构图，它主要含有一个由低交流损耗的极细丝超导电缆绕制而成的无感线圈，称为触发线圈；同时，为降低触发线圈状态转变时产生的过电压，通常还要并联一个限制线圈或限制电阻。限制线圈可以是常规的，也可以是失超电流比触发线圈高得多的超导线圈。

正常运行时，触发线圈处于超导态，由其交流损耗和漏感决定的阻抗很小，线路电流全部通过触发线圈；发生故障时，短路电流很快超过触发线圈的临界电流，触发线圈瞬间变为常态而呈现高阻，电流被转移到限制线圈或限制电阻中去，从而抑制了故障电流。

电阻式 SFCL 具有结构简单、响应速度快、电流过载系数低和正常运行压降低等优点，低电压等级样品在国外已接近实用化。但是，超导线圈在正常运行期间流过线路全电流，需要由低交流损耗的大电流超导电缆绕制，而目前这种超导电缆（尤其 4 ~ 5kA 以上）在制造中尚存在难以解决的机械和传热等关键技术问题。鉴于此，国外研制的

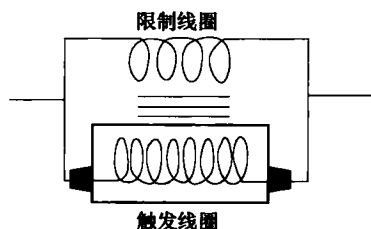


图 1-1 电阻式 SFCL 的一般结构原理

电阻式 SFCL 的额定电流尚未超过 2kA，而且这种 SFCL 的超导恢复时间长，难以配合快速重合闸操作。具备快速重合闸功能的电阻式 SFCL 必须采用两套独立的超导线圈，结构复杂，造价昂贵。

2. 变压器式

变压器式 SFCL 包括二次侧超导绕组短路（DA SC）的变压器式和四绕组变压器式两种。DA SC 的概念是由法国学者于 1986 年提出的，其限流拓扑由通过线路电流的一次侧常规绕组、短路的二次侧超导绕组和铁心组成。系统正常运行期间，变压器因二次侧短路表现为低阻抗；故障发生时，变压器二次绕组因感应电流很快超过其临界值而出现失超，使变压器阻抗增大，从而限制故障电流。DA SC 式限流器的超导线圈不需电流引线，结构简化，降低了低温损耗。当超导线圈整体失超时，限流装置没有过电压。

四绕组变压器式 SFCL 的一次侧和二次侧都有各自并联的主绕组和辅助绕组。一、二次侧主绕组间的间隙很小（漏感很小），而辅助绕组间的间隙很大（漏感很大），主绕组的临界电流比辅助绕组低得多。正常运行时，绝大部分电流在感抗小的一、二次侧主绕组中流动；发生故障时，一、二次侧主绕组因电

流过大大而失超，强迫电流转移到辅助绕组中去，从而达到限流的作用。四绕组变压器式 SFCL 兼具变压器和限流器功能，提高了变压器效率，总损耗仅为相同铁心重量的传统变压器的 1/3。

不过，这两种 SFCL 不仅需要大电流交流超导电缆外，而且需要非金属杜瓦，目前仍处于初期研究阶段。

3. 混合式

混合式 SFCL 的概念由法国学者于 1992 年提出。该种限流器由具有可变耦合磁路的常规变压器和无感绕制的超导线圈组成，其原理结构如图 1-2 所示。图 1-2a 中的变压器一、二次绕组彼此反绕，二次绕组和超导线圈串联后与一次绕组并联；图 1-2b 中的变压器二次绕组被超导线圈短路。混合式 SFCL 的变压器二次绕组匝数远多于一次侧，从而减小了通过超导线圈的电流。

系统正常运行期间，由于一、二次绕组磁场相互抵消或二次绕组被超导线圈短路，限流装置的阻抗非常小。故障时，二次绕组电流迅速增大，超导线圈失超，SFCL 表现为高阻抗而限制故障电流。这时，变压器一次电压降很大，磁路便自动饱和，一、二次绕组的耦合急剧减小，降低了二次电压和电流，从而减小了失超的超导线圈的热损耗，缩短其恢复时间。

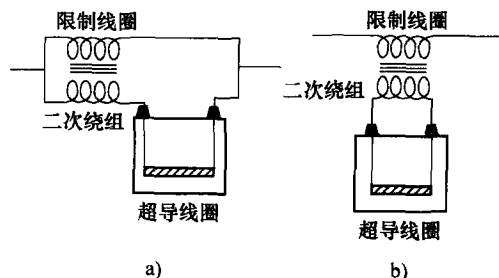


图 1-2 混合式 SFCL 工作原理

混合式 SFCL 只需采用比线路电流小得多的交流超导电缆，简单易制，并减轻了超导体重量，大大降低了低温损耗；同时，因故障期间磁路饱和而降低了二次电压和电流值，从而减小了超导线圈发热，有利于超导态的恢复。但常规变压器的引入使 SFCL 的总损耗很大且很笨重，此外，故障期间会出现较高过电压，故障后磁路饱和还会引起电流和电压波形畸变。这种 SFCL 的超导恢复时间长，也不能配合快速重合闸操作。

4. 磁屏蔽式

磁屏蔽式 SFCL 由外侧的铜线圈、中间的超导圆筒和内侧的铁心同轴配置而成，其中铜线圈串入电网，如图 1-3 所示。正常运行期间，圆筒处于超导态，铜线圈产生的磁通被短路超导圆筒中感应的屏蔽电流的磁通所抵消，装置的阻抗仅由铜线圈和超导屏蔽筒间的气隙漏磁通决定，表现为低阻抗。发生短路故障时，超导圆筒的感应电流快速增大到临界值而出现失超现象，使圆筒不再能屏蔽铜线圈的磁通，导致装置阻抗增大而限制故障电流。

磁屏蔽式 SFCL 的优点表现在：高温超导体用量在各种 SFCL 中最少；因超

导屏蔽筒的交流损耗低,且不需电流引线,所以低温热负荷小,可用 G2M 制冷机来冷却;装置外侧的杂散磁场也很小。但是,该装置的重量较大(比电阻式 SFCL 重一个数量级),超导恢复时间很长,限流期间会出现瞬态过电压,需要两套独立装置才能配合快速重合闸操作,并需另装转换开关。

5. 电抗式

电抗式 SFCL 由超导线圈与限制线圈反向绕制并联组成。正常运行时,限制线圈与触发线圈电流相等,产生的磁场反向并相互抵消,线圈内无主磁通,限流器阻抗接近于零。短路故障发生时,当电流超过临界值后,超导线圈失超产生高阻抗,短路电流被限制线圈所限制。电抗式 SFCL 同样存在超导体失超后恢复时间长的问题,不适于自动重合闸运行。

6. 磁饱和式

1982 年英国研制了一台 3kV/556A 的单相磁饱和式 SFCL 样机,其结构原理如图 1-4 所示。磁饱和式 SFCL 故障限流器主要由铁心、交流绕组(铜绕组)、超导直流偏置绕组和直流恒流电源组成。两个交流绕组反向串联在电网中,其在超导直流偏置绕组中产生的磁场方向相反。系统正常运行时,超导绕组产生的直流偏置场,使铁心处于深度饱和状态,交流绕组在电网中表现为低阻抗状态。当电网发生短路故障时,短路电流使两个铁心在一个周期内交替饱和,交流绕组的阻抗迅速增大,从而自动限制短路电流的增加。

磁饱和式 SFCL 的技术关键,是使用超导绕组代替直流励磁绕组,可大大降低直流恒流电源的功率。另外,超导材料比普通铜导体的允许电流密度大,可在绕组参数相同时提供更大的直流磁化场。直流绕组在故障时无超导态到失超态的转化过程,其反应和恢复时间都非常短。因而,磁饱和式 SFCL 特别适合于线路多次自动重合闸的要求。

尽管磁饱和式 SFCL 在理论上可行,但在工程应用中也会遇到技术与经济问题。例如,交流磁通在直流绕组中感应的交变电压,会增加 SFCL 的正常工作压降和功耗。发生短路故障时,额定电压的大部分降落在 SFCL 的交流绕组上,电网交流高压会通过交流绕组和 SFCL 铁心耦合到直流绕组中,对直流电源具有破

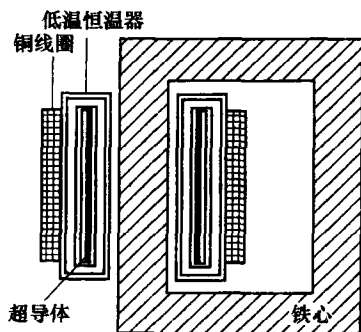


图 1-3 磁屏蔽式 SFCL 的结构

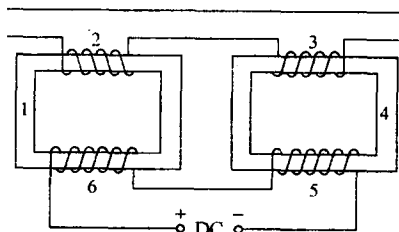


图 1-4 磁饱和式 SFCL 结构原理

- 1、4—铁心 2、3—交流限流绕组
5、6—超导直流偏置绕组