

超高压电网

串联谐振型限流器技术

王华昕 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

超高压电网

串联谐振型限流器技术

王华昕 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

大负荷中心短路电流超标严重危害系统安全稳定运行,现有限流手段无法满足超高压电网需求,而串联谐振型限流器是唯一实用于超高压电网的故障电流限制器。本书依托华东电网限流器工程,阐述了限流器基础理论和工程应用的关键技术,主要内容包括示范工程主电路结构及其参数优化、限流器主电路拓扑结构、限流电抗快速接入控制策略、限流器故障态保护策略、故障电流快速识别方法、限流器阀组件设计及其试验方法、限流器最优投切策略和限流器对断路器恢复电压影响。

本书的一大特点是理论与工程实际紧密相结合,适合从事故障限流器的科研、设计和运行的工程师参考使用,并可供高校电气工程及其自动化专业的教师 and 研究生自学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

超高压电网串联谐振型限流器技术/王华昕著. —北京:中国电力出版社, 2014. 6

ISBN 978 - 7 - 5123 - 5588 - 0

I. ①超… II. ①王… III. ①超高压电网—串联谐振—高压断路器 IV. ①TM56

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 035630 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 6 月第一版 2014 年 6 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 9.75 印张 167 千字

定价 40.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

序言

由于大电网的快速发展，我国三大负荷中心——京、沪、广的短路电流水平不断增长，尤以华东电网短路电流超标问题最为严重。华东电网采用了各种手段限制短路电流，如加入串联电抗器、更换大容量断路器等，但断路器更换经济代价昂贵，而串联电抗降低系统稳定性，迫切需要一种更为可靠实用的故障电流限制器来保障系统稳定运行。

为此，国家电网公司在 2004 年开展了“限流器基础理论研究”工作。在中国电力科学研究院郑健超院士领导下，项目组组织了高电压、电力电子、电力系统方向的工程技术人员对各种类型的限流器进行研究。研究成果显示，串联谐振型限流器是实用于超高压电网的故障电流限制器。因此，2008 年，国家电网公司又开展了“故障限流器关键技术研究”工作。项目组对限流器控制保护策略进行了研究，并研制了限流器核心部件晶闸管阀组件。该阀组件采用自冷式冷却方式和混合取能方式，其耐受放电电流峰值达到 70kA，在技术上处于国内领先地位。该项目获得中国电力科学研究院科技进步一等奖，其“一种自冷式晶闸管阀”的发明专利获得了第十四届中国专利优秀奖。随后国家电网公司实施了华东电网限流器工程项目。自此限流器的基础研究成果在工程中得到了应用，有力地指导了工程设计和制造。

本书总结了串联谐振型限流器项目的研究成果和实际经验，同时也反映了这一领域的最新进展。作者是限流器项目主要研究人员，在该研究方向上发表了多篇高水平论文，相信本书的出版对提高我国限流器研究领域的水平，促进智能电网的高速发展，培养电力系统方向人才起到积极的作用。

汤广福

2014 年 2 月

前言

随着我国电网互联和发电厂机组容量的快速上升，系统中部分地区的短路电流已经达到甚至超过了断路器的遮断容量，而且上升趋势越来越快。如华东电网在 2008 年的枢纽变电站的短路电流超过了 50kA，而站内断路器遮断容量普遍为 50kA。短路电流已经成为威胁大电网安全稳定运行的重要因素。

超高压电网是整个输配电环节的核心组成部分，它对于电力系统运行安全性和可靠性的要求极高。传统的解决方法如系统解裂、母线分裂和串联电抗器等，实际上是以牺牲系统稳定性、可靠性和供电质量为代价而获得电力系统安全性的有限提高。随着电网的发展及经济的快速发展，对电网提出了越来越高的要求，应用于超高压电网的故障电流限制器的提出，恰好满足了电力系统对于安全性、可靠性和稳定性的要求。研究应用于超高压电网的故障电流限制器有着巨大的经济和社会效益，是电网发展进程中的必然选择。

串联谐振型限流器稳态时电容和电抗谐振，阻抗为零。当短路故障时，电容器并联的旁路电路中的快速旁路电容器相当于串联电抗器插入系统中，从而达到限流的目的。电容器的快速旁路电路与串联补偿的过电压保护电路很类似，而串联补偿应用于超高压电网有着丰富的工程经验。因此，串联谐振型限流器凭其较高的可靠性成为超高压电网目前唯一应用的限流器。

限流器关键技术是快速旁路电路的设计和制造。快速旁路电路动作速度决定限流器动作速度，还可以降低短路电流对限流器本身的冲击。本书详细讨论了限流器的动作机理和提高限流器快速性和可靠性的措施。全书共 8 章，第 1 章对限流器的研究动态进行综述；第 2 章论述了限流器主电路拓扑结构特点；第 3、4 章讨论了限流器控制保护策略；第 5 章论述了基于谐振电压差的短路故障快速识别方法；第 6 章讨论了快速旁路电路核心部件晶闸管阀组件的设计和试验方法；第 7 章论述了限流器最优投切策略；第 8 章讨论了限流器对高压

断路器恢复电压的影响。书中提供了许多试验数据和仿真算例来对限流器的动作机理进行验证。

在本书完成之际，特别感谢我的导师郑健超院士和汤广福教授级高工多年来的教诲。此外，还要感谢蓝元良高工、贺之渊博士和洪健山博士，为本书的编写提供了资料和意见。在此还要感谢我的家人对我的支持和鼓励。

限于作者的能力水平，本书难免存在缺点和不足，恳请读者包涵并不吝赐教。作者电子信箱为 2009000032@shiep.edu.cn。

王华昕

2014 年 2 月

目录

序言

前言

1 概述	1
1.1 故障电流限制器应用背景和意义	1
1.2 故障电流限制器发展现状	3
1.3 串联谐振型限流器研究现状	7
参考文献	12
2 示范工程主电路结构及其参数优化	15
2.1 概述	15
2.2 基本结构	15
2.3 接入系统条件与主元件参数	16
2.4 阻尼回路结构	20
2.5 本章小结	28
参考文献	28
3 限流电抗快速接入控制策略	30
3.1 概述	30
3.2 基本控制策略	30
3.3 动作时序	32
3.4 快速保护判据方案	41
3.5 本章小结	49
参考文献	49
4 限流器故障态保护策略	50
4.1 概述	50
4.2 快速旁路电路故障态保护策略	50
4.3 重合闸故障态保护策略	59
4.4 BOD 动作电压阈值	61

4.5	火花间隙无源自触发保护策略	71
4.6	本章小结	74
	参考文献	75
5	故障电流快速识别方法	77
5.1	概述	77
5.2	谐振电压差识别方法	79
5.3	保护判据方案	84
5.4	快速触发系统	86
5.5	本章小结	88
	参考文献	89
6	限流器阀组件设计及其试验方法	91
6.1	概述	91
6.2	晶闸管阀组件设计	91
6.3	短路电流试验方法	98
6.4	导通试验验证	104
6.5	本章小结	106
	参考文献	106
7	限流器最优投切策略	109
7.1	概述	109
7.2	限流器投入机理研究	109
7.3	退出过程分析	114
7.4	本章小结	116
	参考文献	117
8	限流器对断路器恢复电压影响	118
8.1	概述	118
8.2	限流器对断路器恢复电压影响的研究和分析方法	119
8.3	不同条件下限流器对断路器恢复电压的影响	123
8.4	限流器对断路器恢复电压的影响原因分析	138
8.5	降低恢复电压上升率方法的建议	140
8.6	本章小结	143
	参考文献	144
	附录 限流器晶闸管阀装置	146

概 述

1.1 故障电流限制器应用背景和意义

1.1.1 大负荷中心短路电流超标现状

由于电力系统不断发展,单机和发电厂容量、变电站容量、城市和工业中心的负荷继续增长,以及电力系统之间的互联加强,出现了一个新的突出问题,即现代大电力系统各级电网中的短路电流水平不断增长^[1]。我国三大负荷中心——北京、上海、广州随着经济快速的发展,负荷和负荷密度急速增长,围绕着负荷中心大电源的投入加大了短路电流水平的增长。下面以华东电网和广东电网为例说明短路电流超标的严重性。华东地区的电网容量位居全国首位,具有负荷重、地域集中、网络结构紧密、支路繁多、区域内电厂与主干网络距离近的特点。2004 年底~2005 年华东 500kV 电网枢纽变电站短路电流变化趋势见表 1-1^[2]。

表 1-1 2004 年底~2005 年华东 500kV 电网枢纽变电站
短路电流变化趋势

单位: kA

地点	2004 年底未采取措施	2005 年夏季高峰	2005 年底	站内断路器遮断容量
黄渡	51.72	52.45	57.80	50
南桥	50.39	51.00	54.42	50
石牌	49.93	54.26	63.40	63
武南	54.21	59.49	63.09	63
斗山	49.81	53.27	58.08	50
王店	54.32	55.12	58.64	63

由表 1-1 可见,2005 年夏季高峰和年底时黄渡、南桥、斗山 500kV 母线三相短路电流均超过了站内断路器的遮断容量,一旦发生接地短路故障,极有可能发生严重的事故。

随着在主环网附近建设的岭澳核电站、阳江核电站等大型电厂相继投入运行,广东电网2010年系统总容量超过50 000MW。在环网运行和未采取任何限制措施的情况下,到2015年,其500kV电网短路电流超过50kA的节点有9个,超过45kV的节点有8个。其220kV电网在2005年短路电流超过50kA的节点有6个,到2010年超过50kA的节点将有12个,而到2015年,超过80kA的节点将有两个,超过70kA的节点将有7个,超过60kA的节点将有3个。可见广东电网短路电流水平超标已经成为一个重要问题^[3]。

随着我国电网互联和发电厂机组容量的快速上升,系统中部分地区的短路电流已经达到甚至超过了断路器的遮断容量,而且上升趋势越来越快,已经严重威胁到电力系统的安全运行。

1.1.2 限制短路电流方法

增加系统阻抗是限制故障电流最为可行的技术方案,从实施的层次来看,可以分为系统级措施和设备级措施两大类。系统级措施中电网解裂和母线分裂运行是我国电网中经常采用的一种降低系统短路电流水平的措施,但这些措施降低了电力系统运行的稳定性和可靠性^[4,5]。建设更高一级电压的国家主干电网是提高电网运行可靠性和稳定性的最为有效的手段之一,然而并不能解决多数电网短路电流水平超标问题,且高等级电网建设难度大,周期长,需要更深入研究。

在设备级的措施中目前较多采用的是串联电抗器和高阻抗变压器。串联电抗器是目前广泛应用于高、中、低压系统的故障电流限制技术,也是最为成熟的故障电流限制器^[6]。高阻抗变压器也是一种切实可行的故障电流限制技术,但这两种限流技术不仅会增加网损,还会降低系统稳定性,由于传统限流措施固有的一些缺点,研制各种新型的故障电流限制器成为目前重要的发展方向。

1.1.3 新型故障电流限制器研究意义

从设备级措施角度来看,如果能够在系统中某些点建设一些专门用于限制系统故障电流的设备(如故障电流限制器),可以从根本上解决系统短路电流水平超标问题,从而大大简化系统规划的难度。另外,若在规划与建设阶段即考虑用故障电流限制器降低系统短路电流,还有可能降低建设造价和运行费用。

超高压电网是整个输配电环节的核心组成部分,它对于系统运行安全性和可靠性的要求极高。传统的解决方法如系统解裂、母线分裂和串联电抗器等方法实际上是以牺牲电力系统稳定性、可靠性和供电质量为代价而获得安全性的有限提高。随着电网的发展及经济的快速发展,对电网提出了越来越高的要

求,应用于超高压电网的故障电流限制器的提出恰好满足了系统对于安全性、可靠性和稳定性的要求。

综上所述,研究应用于超高压电网的故障电流限制器有着巨大的经济和社会效益,是电网发展进程的必然选择。

1.2 故障电流限制器发展现状

1.2.1 限流器系统要求

国际大电网联盟组织对故障电流限制器(Fault Current Limiter, FCL)给出了基本定义。故障限流器是一种当发生短路电流故障时,通过一个重要支路限制电流的电力设备,使得电力系统中设备不发生过载事故^[7]。当限流器接入系统时,系统和限流器相互影响,如限流器可靠性影响系统安全稳定运行,限流器改变了继电保护装置参数,系统的短路峰值的大小决定了限流器设备的工作能力等。因此短路电流限流器功能应满足如下要求。

- (1) 正常运行时对系统无影响。
- (2) 故障时能快速启动,限制短路电流峰值和稳态值。
- (3) 动作时不会造成过电压等副作用。
- (4) 故障后能自动复位。
- (5) 不影响继电保护的工作时序。
- (6) 短路故障能可靠触发,无故障时不会误动作。
- (7) 具有较低的成本。

随着新材料和工艺的出现,涌现许多新型原理限流器,从原理上可分为超导型和非超导型。下面对限流器新技术研究发展状况进行简要论述,从中找出最适合应用于500kV超高压电网的限流器类型。

1.2.2 超导限流器

超导型限流器超导电性已经在1911年由H. Kamerlingh Onnes在水银中发现(低于4.2K),目前已有超过100种不同的超导体被发现。超导体具有明显的电气特点:当低于临界温度(T_c)和临界电流密度(j_c)时,导体出现零电阻特性;一旦 j_c 或 T_c 被超过,材料的电阻迅速增加。

经典的金属超导体转变温度低于25K。低温超导(LTS)线是许多年的商业产品,它们的特性比较适合故障电流限制器应用。然而,由于低运行温度(通常用液氮冷却至4.2K)冷却费用相当昂贵,基于低温超导体的故障电流限制器目前还不能商业化。当高温超导材料发现之后,已经基本处于停止

状态^[7]。

大多数高温超导限流器都是在探索超导体这种从正常电流时的零电阻到高密度时的有限电阻值的明显转变。当临界电流被超过时，故障电流立刻被限制。由于这些特点，超导故障电流限制器是最为接近理想的故障电流限制器，并具有自触发特性，是一种具有故障保险功能的设备。但高温超导体具有以下缺点。

(1) 需要非常昂贵的冷却系统。

(2) 超导体趋向热不稳定性的开发（所谓的热点）。为了维持在这些热点下，保护材料，经常采用一个正常导通旁通支路。

(3) 交流电路造成所谓的交流损耗导致冷却费用的增加。

目前基于超导原理的故障电流限制器主要有电阻型超导故障电流限制器、屏蔽铁芯型故障电流限制器、饱和铁芯型故障电流限制器和整流式超导限流器四类。电阻型结构简单，但检修、维护较难；磁屏蔽铁芯型耗材少，但体积庞大，有过电压现象，已经停止研发；饱和铁芯型运行间有漏磁场，限流期间有较大的电压谐波；整流型启动速度快，能多次启动，但低温损耗较大。

表 1-2 为超导型限流器国内外实际工程调研结果^[8-12]。超导型限流器目前处于试验室研究阶段，现阶段样机限流参数普遍较小，距离实际工程化应还有较大的差距，特别是应用在超高压系统，还有许多基础问题需要研究。

表 1-2 超导型限流器国内外实际工程状况

单 位	限流器类型	工程参数	时 间
General Atomics (美国)	整流式	15kV/20kA	1999
ABB (瑞士)	电阻型	6.4MVA	2002
日本电力公司	电阻型	6.5kV/1.5kA	1999
日本中央电力试验研究所	磁屏蔽铁芯型	6.6kV/400A	1997
中国科学院电工所	整流式	10.5kV/1.5kA	2002

1.2.3 非超导型限流器

常用的非超导型限流器包括固态限流器、复合式限流器、高压限流熔断器和串联谐振型限流器。其共同特点是采用常规器件如电感、电阻、断路器和电力电子装置等。固态故障电流限制器是由半导体器件组成，如 GTO、IGBT 或 IGCT^[13]。在峰值电流达到之前，利用电力电子器件快速性在电流上升阶段限

制故障电流。

1. 固态限流器

参考文献 [14] 介绍了基于 GTO 的固态限流器, 如图 1-1 所示, 它由双向半导体开关 GTO 组成, 并联一个限流电抗器。当故障电流被检测到之后, 正常导通的半导体开关被关断。故障电流转移到限制电感上, 而限制了故障电流。半导体器件并联了氧化锌避雷器和缓冲电路, 限制了半导体两端的电压幅值及其上升率。GTO 的通流量有限, 关断短路电流会引起过电压。所以该装置也只能应用于中低压配电网。

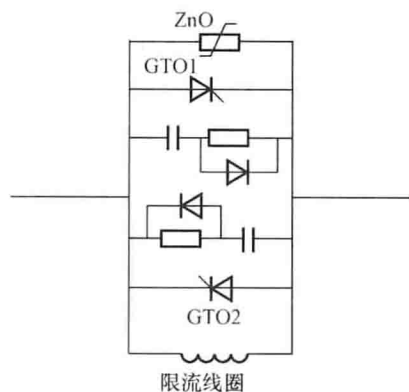


图 1-1 基于 GTO 的固态限流器

参考文献 [15-17] 介绍的一种中压配电网应用的单相桥式限流器, 如图 1-2 所示。正常工况下 S1、S2 控制电流 i 在正负半波导通。直流电源 V 为限流电感 L 辅助充磁电源。调节直流电源使电流 $i_r > i$, 正常工作时装置呈现

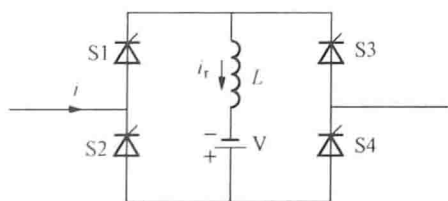


图 1-2 单相桥式限流器

零阻抗。当负载侧发生短路, 电流 i 跳至 i_r 值时, 电感 L 串入电路限制短路电流; 关断时只要封锁一组晶闸管, 电流过零时晶闸管自动关断, 短路电流被切断。该限流器结构简单, 无过电压产生, 可适应自动重合闸; 不足之处是器件容量有限, 并有直流损耗。

2. 复合式限流器

复合式故障限流器由不同的模块组合而成, 每一个模块在设备的运行期间完成某个特定任务。图 1-3 显示了由三个并联路径实现的复合故障电流限制器^[18]。短路电流检测单元检测电流, 并在故障时触发设备。一个超快速机械触头 (转移开关) 通过电动斥力驱动在几百微秒之内打开, 使得还上升的电流转移到换向支路。换向支路由一个半导体器件 IGCT 的配置和串联的快速开关 (充当隔离开关) 组成。IGCT 为转移开关提供了一个时间延迟

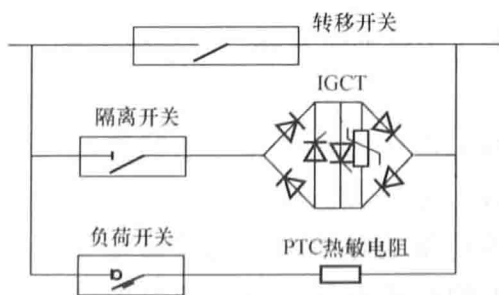


图 1-3 基于 IGCT 的 PTC 限流器

去恢复其一定的耐受电压，然后顺序关断，强迫电流转移到限流支路。限流支路由低感非线性 PTC 电阻组成。在电阻明显加热之前，隔离开关打开，以免半导体承受很高的电压上升。最后，负荷开关在第一个电流过零点中断故障电流。在故障检测和电流限制之间的时间延迟小于 1ms。此类复合式故障限流器具有外触发、电流中断、自恢复等特点，但同固态限流器一样，为电力电子器件和 PTC 热敏电阻容量所限，只能应用于配电网中。

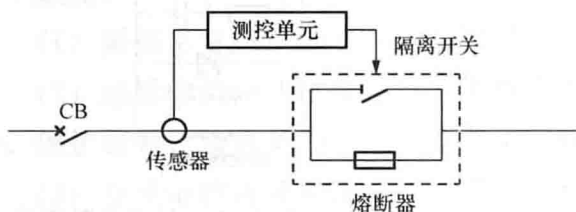


图 1-4 Is-limiter 原理图

3. 高压限流熔断器

高压限流熔断器有一种形式是 Is-limiter，其原理图如图 1-4 所示。Is-limiter 基于极端快速开关原理，能够承受较大电流，但没有故障电流限制能力，因此并

联一个电流切断能力很强的熔丝。当主导体分断时，电流流过并联熔丝，这个过程限制在 0.5ms 以内，熔丝在一个电压过零点分断。

自从 Is-limiter 在 1955 年被发明，几千套这样的设备被成功用于电力系统中。它具有外触发，电流分断能力和无恢复功能等特点。Is-limiter 优点是响应速度快，可以达到 5ms；装置功耗低，体积小，安装维护费用低。目前 ABB 公司生产的 Is-limiter 可以一次性开断短路电流 200kA，但对于线路重合闸无能为力，因此具有一定局限性，一般应用于配电网中^[22]。

限流电抗器是超高压电网实用的限流技术，在国内外有许多工程应用，如华东电网在上海 500kV 环网上采用了串联电抗限制短路电流。串联电抗器参数值一般不能太大，而且系统加入串抗后对断路器和系统稳定性有一定影响。串联谐振型限流器圆满地解决了这些问题。

4. 串联谐振型限流器

串联谐振型限流器（Series Resonance Fault Current Limiter, SRFCL）的原理示意如图 1-5 所示。它是在常规限流电抗器的基础上串联一个与电抗器谐振于工频的电容器，同时在电容器的两端又并联一个快速旁路电路。

在正常运行工况下，快速旁路电路处于高阻抗状态，由于限流电抗器和电容器工作在工频谐振，电抗器的压降被抵消；而在系统故障的情况下，通过检测流过限流电抗器上的故障电流或电容器上的故障电压，快速旁路电路快速开通，谐振状态被打破。这样相当于在故



图 1-5 串联谐振型限流器原理示意图

障时将限流电抗器接入系统，从而起到限制故障电流的作用^[23-27]。串联谐振限流器的关键技术即为电容器快速旁路技术。电容器旁路技术在串联补偿器和可控串联补偿器中都有工程应用，如固定串联补偿器采用火花间隙作为电容器保护器件。

表 1-3 为非超导型限流器国内外实际工程调研结果。从应用电压等级上看，固态限流器、复合式限流器 and 高压限流熔断器由于器件的容量有限，只能应用于配电网中。而且大部分限流器均处于试验阶段，应用于实际工程前还有许多问题需要解决。超高压电网对限流器提出苛刻的要求，如流经限流器电流短路电流达到 20kA。串联谐振型工作原理简单，工程上有限流电抗和电容器旁路技术应用背景。相比较其他类型限流器而言，串联谐振型经济合理，技术可靠，具备在 500kV 超高压电网应用的条件。因此华东电网公司限流器示范工程中采用串联谐振型限流器作为超高压电网应用首例。下面将对串联谐振型限流器关键技术研究现状展开详细介绍。

表 1-3 非超导型限流器国内外实际工程状况

研究单位	限流器类型	工程参数	时间
美国电科院	固态型	13.8kV/675A	1993
美国 Los Alamos 国家实验室	单相桥式	13.7kV/3.1kA	1998
浙江大学	单相桥式	10kV/500A	2005
ABB 公司	限流熔断器	35kV/2kA	1990
国家电网公司华东电网公司	限流电抗	500kV/14Ω/50kA	2002
巴西电网	限流电抗	362kV/7.5Ω/25kA	1998

1.3 串联谐振型限流器研究现状

1.3.1 快速旁路电路

快速旁路电路的高速闭合对限流器装置的绝缘配合、过电压保护和旁通电路通流水平的降低都十分有利。如果闭合速度慢于四分之一周波（5ms），谐振电容就会产生明显的过电压。依据旁路器件划分，旁路电路有间隙旁路型、避雷器旁路型、可变电感旁路型、快速开关旁路型、晶闸管阀旁路型五种类型，如图 1-6 所示。

1. 间隙旁路型

间隙旁路型原理如图 1-6（a）所示。间隙是一种电压敏感型设备，经常

应用于电容器的过电压保护，其动作速度很快，但间隙的一个重要问题是对环境（如温度、湿度等）因素敏感，可靠性较低，且动作电压精确度差，难以作为电容器过电压的主保护设备，一般作为电容器过电压的后备保护设备^[28]。

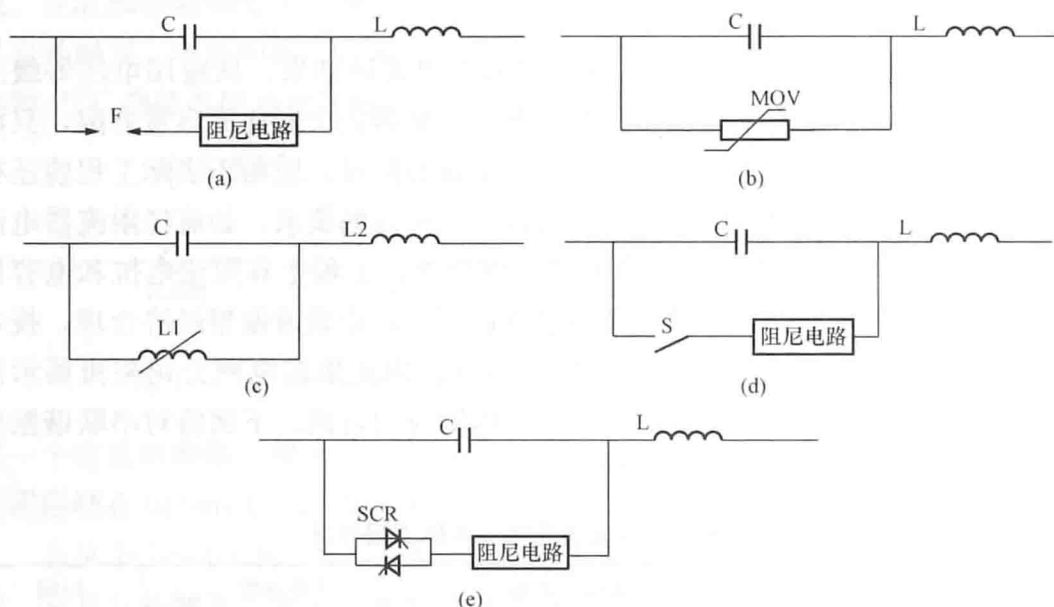


图 1-6 快速旁路电路拓扑类型

(a) 间隙旁路型；(b) 避雷器旁路型；(c) 可变电感旁路型；
(d) 快速开关旁路型；(e) 晶闸管阀旁路型

2. 避雷器旁路型

避雷器旁路型原理如图 1-6 (b) 所示，其原理与其他保护类型有所不同。实际应用中利用带并联间隙的氧化锌变阻器（Metal Oxygen Variable, MOV）的非线性伏安特性。当系统正常运行时，系统负荷电流流过 L-C 串联支路，MOV 中只有毫安级以下的微小电流；当短路故障到来时电容两端电压迅速上升，合理配置 MOV，能将电容电压限制在允许的范围内，并且电容只流过大约 2 倍额定电流，大部分短路电流，特别是直流分量部分将流过 MOV 支路，这种情况下相当于从正常工作时的 L-C 串联谐振过渡到电感限流状态^{[29],[30],[31]}。

避雷器型动作速度极快，且不受环境的影响，但动作后存在发热问题，冷却时间较长，抵抗连续冲击的能力较差，难以满足系统重合闸的要求。如果将其作为限流器的电容主保护设备设计，将造成其热容量设计极高，装置成本会非常高。由于以上两项缺陷，MOV 不适合作为限流器中电容器的主保护设备，只能作为电容器的后备或辅助保护手段^[32]。



3. 可变电感旁路型

基于可变电感原理的限流器有多种电路类型,其典型电路如图 1-6 (c) 所示。系统正常运行时,由于电容电压较低,电感处于不饱和状态,呈现较高电抗值,C、L1 和 L2 组成的电路处于谐振状态;系统发生故障后,故障电流使得电容电压上升,流过可变电感 L1 的电流增大,其饱和程度迅速变化,打破原有的串联谐振状态。合理配置电路参数能使该组合电路在电流超过正常值时开始呈现一定数值的感抗,并且随着故障电流的增大该感抗值也随之增加^[33]。

基于这种原理的限流器具有自动调节良好特性,短路电流从起始阶段就得到限制,限流峰值较低,与其他类型限流器相比具有限流曲线平滑、对电网设备冲击小等优点。可变电感旁路型限流器最大的难点在于这种可变电感的设计较为困难,在中、低压系统中这种设计方案已经得到了一定的应用,但在超高压系统中,可变电感的容量急剧上升,造价非常昂贵,并不实用。可变电感还存在电磁噪声较大等缺点,限制了其应用范围的扩展^[34]。

4. 快速开关旁路型

快速开关旁路型的原理如图 1-6 (d) 所示。当系统处于正常运行阶段,快速开关处于分闸状态,电容 C 和电感 L 谐振;当系统故障时,若检测到故障电流后,向快速开关发出闭合指令,快速开关迅速闭合,限流器的谐振状态被打破,限流电抗器迅速投入系统,起到限制故障电流的效果。

该方案关键问题在快速开关的快速性和可靠性。而现有开关技术,在 10kV 以下,其闭合的最快时间也要 5ms 左右,随着限流器容量的上升,快速开关的断口电压要求越来越高,其闭合时间已经难以满足系统对快速开关的要求。另外,快速开关的分合闸的分散性较大,难以满足闭合速度的要求。综合以上因素,快速开关作为电容器过电压的主保护设备并不适合,但如果对其闭合时间要求放宽至几十毫秒以上,则这种开关的可靠性是可以保证的,其最大优点在于其热容量大,能够承受较长时间的故障电流,这是其他各类非线性旁路设备,如晶闸管阀、避雷器、可变电感等所无法比拟的^[35-37]。

5. 晶闸管阀旁路型

晶闸管阀旁路型的原理如图 1-6 (e) 所示。系统正常运行时,晶闸管阀截止,电容器和电抗器处于谐振状态,不对系统运行产生不利影响;故障发生时,检测到系统故障电流或电容器上的过电压后,向晶闸管阀发出触发命令,晶闸管阀快速导通,使电容器被旁路,电抗器单独接入系统,起到限制故障电流的目的。