

大容量短路电流

抑制与开断技术现状及展望

主 编 王 勇 莫文雄 苏海博 刘俊翔

Darongliang Duanlu Dianliu

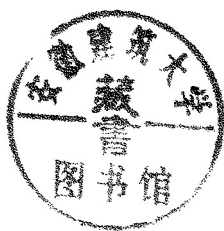
Yizhi Yu Kaiduan Jishu Xianzhuang Ji Zhanwang



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

大容量短路电流抑制 与开断技术现状及展望

主 编 王 勇 莫文雄 苏海博 刘俊翔



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

大容量短路电流抑制与开断技术现状及展望/王勇等主编. —广州:
华南理工大学出版社, 2018. 4

ISBN 978 - 7 - 5623 - 5586 - 1

I. ①大… II. ①王… III. ①短路电流 - 分断能力 - 研究
IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 061520 号

Darongliang Duanlu Dianliu Yizhi Yu Kaiduan Jishu Xianzhuang Ji Zhanwang

大容量短路电流抑制与开断技术现状及展望

王勇 莫文雄 苏海博 刘俊翔 主编

出 版 人: 卢家明

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail: scute13@scut.edu.cn

营销部电话: 020 - 87113487 87111048 (传真)

策划编辑: 赖淑华

责任编辑: 骆 婷 赖淑华

印 刷 者: 虎彩印艺股份有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 5.5 字数: 88 千

版 次: 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 28.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

编辑委员会

主 编：王 勇 莫文雄 苏海博 刘俊翔

副主编：李兴文 袁 召 李广凯 顾 乐

许 中 黄慧红 伍 衡 吴 杰

曲德宇 朱 璐 乔胜亚 谭子健

前 言

随着社会经济迅速发展，电网规模持续扩大，互联程度增加，大型电站不断接入，我国电网短路电流水平已逐渐接近现有断路器遮断容量上限。特别是三大负荷中心“京津唐、长江三角洲、珠江三角洲”的电网短路电流水平增加尤为突出，部分地区的系统短路电流已超过了断路器遮断容量，多个变电站短路电流严重超标，已成为威胁电网安全稳定运行的重大隐患。鉴于这一严峻的现实状况，高压、大容量短路电流抑制与开断技术研发已成为大型电网企业必须面对和完成的重大技术课题。

为限制短路电流，近年来，国内外科研单位和电网企业在大容量短路电流开断装置以及故障电流限制装置的研究、应用上投入了大量的人力物力，相关技术发展十分迅速，不但传统的限流装置如高阻抗变压器、变压器中性点小电抗器等得到较多应用，而且出现了超导型、串/并联谐振型、高耦合分裂电抗型、磁饱和开关型等多种新型故障电流限制器，并在电力系统中得到应用。

半个世纪以来，限流器的研究、设计、开发虽然取得重大进展，部分样机已进入试验示范阶段，但总体而言，限流器的商业化应用却举步维艰。国际大电网会议 WG A3-10 工作组的评估报告指出：40 多年来，尽管各国对限流器的研究表现出浓厚兴趣，但绝大多数面向市场的限流器产品研发进展缓慢，要广泛实现限流器的商业化应用，还需要解决一系列挑战性的难题。

此外，短路电流限制装置虽然可以有效降低电网短路电流水平，但也会不同程度地削弱电网运行的可靠性和灵活性，其自身的安全可靠运行也可能影响电网的安全裕度和供电可靠性，甚至威胁电网的安全稳定

运行。因此，电网企业迫切需要详细了解各类大容量短路电流抑制与开断装置研究的现状、优缺点及发展方向，以指导企业开展该方面的研究与应用工作。

本书在总结国内外多家科研机构、大专院校、电网企业开展大容量短路电流开断装置研究与应用工作的基础上，对大容量短路电流抑制与开断装置的研究现状进行了阐述，分析了各类开断装置、限流装置的技术特点，总结了已有装置可能的优缺点及现场运行情况，以期与电网企业同仁共勉，开展这方面的交流。

本书在编写过程中，中国电力科学研究院、中国科学院电工研究所、华中科技大学、西安交通大学、西安高压电器研究院有限责任公司、西安西电电气研究院有限责任公司、西安西电变压器有限责任公司、中国南方电网电力科学研究院有限责任公司、中国南方电网生产技术部、广东电网公司电力科学研究院、广州供电局生产技术处等相关部门、单位协助提供了部分资料，编写时还参考了相关书籍，引用了有关文献及研究报告等材料，在此，对相关单位、作者及技术人员表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者
2018 年 1 月 31 日

目 录

第 1 章 短路电流抑制与开断技术需求	1
1.1 短路电流超标问题现状	1
1.2 短路电流抑制与开断技术需求	8
第 2 章 大容量短路电流开断装置研发进展	13
2.1 国内外大容量短路电流开断方法研究	13
2.2 单断口大容量断路器	17
2.3 基于高耦合分裂电抗器的并联断路器	31
2.4 混合断路器	36
第 3 章 故障电流限制器研发现状	40
3.1 超导限流技术	40
3.2 常规限流技术	51
3.3 电力电子开断及限流技术	61
第 4 章 大容量短路电流抑制与开断技术应用案例	66
4.1 国外应用案例	66
4.2 国内应用案例	69
第 5 章 总结与展望	74
参考文献	77

第1章 短路电流抑制与开断技术需求

1.1 短路电流超标问题现状

近年来,随着我国电力建设的不断发展、用电负荷的不断增加、低阻抗大容量变压器的应用、发电厂及发电机单机容量的不断增大以及大规模电网的互联等,电力系统中的短路电流水平不断提高,特别是我国三大负荷中心“京津唐、长江三角洲、珠江三角洲”成为短路电流超标问题最为突出的地区,已有大批变电站短路电流达到甚至超过断路器遮断容量,严重威胁到系统的安全运行。

1. 南方电网公司短路电流超标问题现状

为满足南方电网五省区电力负荷快速增长的需要,南方电网装机容量和各电压等级网架建设高速发展,系统容量不断增大,电网结构日趋紧密。在满足负荷快速增长和可靠稳定供电需求的同时,南方电网的短路电流水平也迅速提高。以广州电网为例,广州电网位于南方电网西电东送受端负荷中心,是天广直流、云广直流落脚点。近年来,随着电网规模的不断扩大和网架结构的不断完善,广州电网的供电能力及供电可靠性逐步提高。同时,受电源不断投产、网络结构进一步密集、负荷水平持续增长等因素的综合影响,广州电网的短路电流水平呈持续增长的趋势,短路电流超标问题已成为影响广州电网安全稳定运行的主要问题之一。

以广州为例,按照2014—2020年规划网架,在不采取措施的情况下,短路电流分布情况的计算结果见表1-1~表1-4。

表 1-1 2013 年广州电网 500kV 变电站母线短路电流

单位: kA

变电站名称	500kV 母线		220kV 母线	
	三相短路电流	单相短路电流	三相短路电流	单相短路电流
北郊站	63.1	60.1	33.8	39.7
增城站	62.0	63.3	64.6	57.7
狮洋站	30.8	26.1	42.3	36.0
花都站	57.8	53.4	42.5	37.5
木棉站	27.6	21.4	63.1	53.0
广南站 1M2M	43.8	39.3	50.8	41.7
广南站 5M6M	—	—	61.1	45.9

表 1-2 2014 年广州电网 500kV 变电站母线短路电流

单位: kA

变电站名称	500kV 母线		220kV 母线	
	三相短路电流	单相短路电流	三相短路电流	单相短路电流
北郊站	63.6	60.3	34.2	41.5
增城站	61.0	62.2	70.1	60.5
狮洋站	60.7	51.9	46.5	38.4
花都站	59.1	53.4	46.5	39.1
木棉站	33.0	28.8	69.3	71.2
广南站 1M2M	48.9	41.2	54.5	44.9
广南站 5M6M	—	—	61.2	47.6

表 1-3 2015 年广州电网 500kV 变电站母线短路电流

单位: kA

变电站名称	500kV 母线		220kV 母线	
	三相短路电流	单相短路电流	三相短路电流	单相短路电流
北郊站	66.4	61.0	54.0	51.7
狮洋站	65.7	54.0	47.4	34.6
花都站	60.7	55.3	39.3	31.4
木棉站	33.5	28.4	80.0	72.6
广南站 1M2M	51.3	43.0	56.0	44.2
增城站 1M2M	62.0	60.0	65.0	54.0
穗东站 1M2M	55.8	50.2	24.1	22.6

表 1-4 2016 年广州电网 500kV 变电站母线短路电流

单位: kA

变电站名称	500kV 母线		220kV 母线	
	三相短路电流	单相短路电流	三相短路电流	单相短路电流
北郊站	68.58	58.357	74.00	69.51
狮洋站	27.533	54.0	51.15	51.15
花都站	60.06	51.365	64.33	64.33
木棉站	30.198	25.505	86.96	85.82
增城站 1M2M	67.266	63.127	74.62	62.19

由以上 4 表可见,受电源不断投产、网络结构进一步加强、负荷水平持续增长等因素的综合影响,广州电网短路电流超标问题突出。为限制短路电流,广东电网已采取 23 回 220kV 线路开环运行、多站分母、500kV 主变加装中性点小电抗等措施。其中 500kV 广南站和增城站被迫长期分母运行,供电可靠性和事故处理灵活性下降;220kV 罗涌站长期分母运行,存在线路 N-2 导致 2 个 220kV 失压风险,降低了电网的安全裕度和供电可靠性。即使采取 500kV 线路停运、跳通或 220kV 分区供电等措施限制短路电流后,增城站、广南站 220kV 短路电流仍接近开关额定遮断容量,若因设备老化或其他异常导致开关实际遮断能力降低,一旦电网发生故障而开关拒动,将导致多回直流持续换相失败甚至闭锁引发南方电网失稳的严重后果。

作为我国“西电东送”工程重要组成部分的南方电网具有以下特点:电源相对集中,结构日益紧密,送电规模和距离增大,强直弱交且落点集中。随着广东 500kV 内外双回路环网的形成,环网上变电站间的距离将缩短至 30km 左右,部分厂站 500kV 电网短路电流也将超过 63kA。广东电网在 220kV 及以上电网保持全接线运行方式下,北郊站、深圳站、江门站 500kV 母线三相短路电流均超过开关额定遮断电流,刚完成开关增容改造的东莞站、罗洞站 500kV 母线三相短路电流也升至 60kA 及以上。珠江三角洲地区绝大部分 500kV 变电站 220kV 母线短路电流超过开关额定遮断电流,其中个别变电站短路电流高达 99kA。

随着“十二五”期间新建变电站和电源的大量接入,南方电网网架

结构愈发紧密,短路电流超标问题愈加严重,成为影响南方电网安全稳定运行的重要因素。为限制短路电流,调度运行部门不得不采取断线、跳通等方式以限制 500kV 侧短路电流,采取断线、切主变、母线分列等方式限制 220kV 侧短路电流。但是以上方式显著降低了电网的安全裕度和供电可靠性,降低了资产的利用效率,甚至威胁电网安全稳定运行。如,为确保西电可靠消纳,广东电网罗北双线开断一回运行等限制短路电流措施无法采用;为限制短路电流,广东沙荆双线、荆鹏双线、鹏深双线、安鹏双线均被迫单回运行,不但网架削弱严重,抵御严重故障能力降低,同时还将导致部分地区限电,等等。

2. 国家电网公司短路电流超标问题现状

与南方电网公司一样,国家电网公司的系统也存在突出的短路电流超标问题。华东电网 500kV 枢纽变电站母线短路电流超标问题是近十余年来困扰华东电网运行的主要因素之一。2006 年,华东电网统调装机容量为 13889 万 kW。华东电网公司调查了 2000—2005 年华东 500kV 电网短路电流情况,分析了系统时间常数、短路电流幅值、故障性质等因素。调查结果显示 85.7% 的故障电流不到 20kA,实际上发生的最大短路电流幅值为 50.86kA,说明在当时的运行方式下可以将短路电流控制在 63kA 水平以下,持续时间也满足系统要求。

但是截至 2013 年底,华东全网统调装机容量已增至 22489 万 kW。华东电网 2014 年度分析报告显示,2014 年,上海、浙北、江苏等局部地区短路电流超标问题严重。为了限制短路电流,2014 年夏季,上海出串和拉停线路数量与 2013 年底一致,江苏电网比 2013 年底新增拉停一回线路,浙江电网采取“三出串、两拉停”的控制措施。上海 500kV、江苏 500kV、浙江 500kV、浙江 220kV、安徽 220kV、福建 220kV 电网在 2014 年夏季高峰、冬季高峰全部采用了拉停限电的短路电流抑制措施。这一系列措施导致电网的可靠性降低,并且增加了电网运行的复杂程度,尤其是发生重要线路故障跳闸或设备检修时,电网的调整难度非常大,输电能力下降,影响了系统的抗风险能力。2014 年华东电网 500kV 枢纽变电站短路电流水平如表 1-5 所示。

表 1-5 2014 年华东电网 500kV 枢纽变电站短路电流水平分析

单位: kA

地点	采取措施		不采取措施		开关遮断容量
	年中	年底	年中	年底	
黄渡	49.58	53.89	72.25	69.60	63
徐行	61.44	58.48	76.37	68.86	63
石二厂	45.37	38.21	52.01	44.86	50
杨行	59.30	45.59	72.08	58.36	63
外二	57.99	50.54	69.74	54.98	63
杨高	51.73	51.55	58.96	54.97	63
顾路	61.26	56.26	73.50	63.57	63
远东	59.37	58.19	64.44	60.50	63
泰兴	61.47	61.35	62.92	62.90	63
石牌	61.32	61.68	76.48	75.19	63
瓶窑	62.34	60.69	78.69	80.38	63
仁和	60.71	60.71	63.54	71.35	63
乔司	61.61	61.18	69.31	75.60	63
由拳	49.12	48.92	63.38	65.74	63
王店	57.80	61.29	80.14	82.34	63
兰亭	56.28	54.45	65.97	66.92	63
风仪	58.97	53.10	61.98	64.30	63

注: 当 500kV 母线单相短路电流水平大于三相时, 上表列出较大值。

2014 年冬季, 随着浙福交流 1000kV 特高压交流输电工程和方家山核电第二台机组的投运, 浙北短路电流进一步攀升。特别是近年来, 华东区域将构建特高压交直流混联电网, 以 1000kV 特高压交流输电线路联结上海、江苏、浙江、安徽和福建电网, 并通过多回特高压直流与华中电网相联, 电网结构的调整和新的电源接入将引起华东电网短路电流控制策略的变化。

华北电网、华中电网等国家电网同样存在短路电流超标以及断路器容量不足的问题。

华北电网方面,2009 年北京的安定变电站 500kV 侧三相短路电流就已达到 55.57kA,而其开断装置的额定容量才 50kA。随着电网规模的不断扩大,京津及冀北 500kV 电网短路电流超标问题更为突出。2015 年京津及冀北电网 500kV 厂站最大短路电流越限(63kA)的有安定、霸州、滨海、吴庄等变电站,为控制短路电流,正常运行方式下需要断开多条 500kV 线路,一定程度上影响了系统运行方式的灵活性,削弱了电网抵御严重故障冲击的能力。

“十三五”期间,特高压变电站的接入对周边 500kV 变电站短路电流影响显著,京津及冀北电网 500kV 三相短路电流水平较高的问题也愈加凸显。经计算,顺义、通州等多站点短路电流接近或超过 63kA。

华中地区,例如湖北电网,“十一五”期间,随着三峡工程 26 台机组全部投产和特高压试验示范工程正式投运,短路电流水平日益攀升。根据湖北电网 2015 年网架结构规划,考虑“三华”联网,采用中国电力科学研究院电力系统分析综合程序 psasp 6.28 软件对全网各母线节点的短路电流进行仿真计算分析,主要 220kV 母线节点短路电流见表 1-6,主要 500kV 母线节点短路电流见表 1-7。

表 1-6 2015 年湖北电网主要站点 220kV 母线短路电流

母线名称	短路电流/kA
光谷 220kV	62.56
木兰 220kV	55.83
玉贤 220kV	53.10
李家墩 220kV	50.48
磁湖 220kV	53.88
樊城 220kV	52.51
孝感 220kV	52.41

表 1-7 2015 年湖北电网主要站点 500kV 母线短路电流

母线名称	短路电流/kA
荆门 550kV	70.48
斗笠 550kV	66.55
江陵 550kV	64.09
团林 550kV	61.90
武汉 550kV	64.72
道观河 550kV	66.93

随着“十二五”期间湖北电网规划建设项目的逐步建成投产，部分站点 220kV 短路电流持续增加。通过计算，2015 年湖北电网短路电流超标的 220kV 母线有 7 条，分别是光谷 220kV、木兰 220kV、玉贤 220kV、李家墩 220kV、磁湖 220kV、樊城 220kV、孝感 220kV。

西北电网方面，2012 年底宁夏 330kV 系统中，三相短路电流最大的母线为银川东变电站 330kV 母线，其短路电流为 55.51kA；单相短路电流最大的母线为银川东变电站 330kV 母线，其短路电流为 64.53kA，达到断路器遮断容量的 102.4%。根据宁夏电网“十二五”主网架规划，2015—2020 年宁夏电网形成 750kV 双环网结构，建成宁东—浙江 ±800kV 特高压直流输电、陕西—宁夏 750kV 联网等工程，大规模的外送及内用电源接入宁夏电网，宁夏电网短路电流水平大幅提高，具体见表 1-8。

表 1-8 2015 年 750kV 变电站母线最大短路电流

站名	母线电压/kV	开关容量/kA	短路电流/kA	
			三相	单相
银川东	750	50	45.6	46.9
	330	63	64.0	74.0
黄河	750	50	47.4	43.6
	330	63	49.2	54.4
贺兰山	750	50	28.1	28.5
	220	63	42.9	50.7

续表 1-8

站名	母线电压/kV	开关容量/kA	短路电流/kA	
			三相	单相
沙湖	750	50	24.8	21.3
	220	63	56.4	60.7
太阳山	750	50	28.7	25.7
	330	63	49.3	58.0

由此可见,随着电网容量不断增加,网络结构越来越复杂,负荷越来越集中,电网枢纽点的故障短路容量不断提升,这是我国电网公司普遍存在的问题。随着电网规模的持续扩大,上述问题有加剧的趋势。

3. 国际上短路电流超标问题现状

国外也有部分国家,如亚洲的日本、印度,欧洲的瑞典、丹麦等国家的电网短路电流超标。瑞典、丹麦、挪威等已经用上了 80kA 的断路器,如瑞典继续发展 400kV 电网,短路容量已经达到 60kA。南方电网公司关于印度北部 2012 年 7 月 30 日大停电事故的报告指出,印度当前各大区电网的短路水平已较突出,将来会更高,ER(东部)最大达 100kA, NR(北部)和 SR(南部)达 87kA, WR(西部)达 80kA,将对电网构成威胁。但是也有些国家相对我国来说问题比较轻,例如,英国一年才几条到十几条母线出现短路电流超标的问题。

1.2 短路电流抑制与开断技术需求

1. 短路电流超标问题的危害及常见应对措施

电力工业是保证国民经济发展的基础产业,电力系统的安全稳定运行,是国民经济持续发展的根本保证。然而,因为各种意外情况,电网常会发生短路故障。短路电流过大,不但会使电力企业经济效益受损,而且对电力用户和全社会都将造成严重的影响。短路电流的大小关系到短路故障对电力系统破坏的严重程度。如 2003 年 8 月 14 日美国加州用电高峰期间,因高压电线下垂,触到树枝而短路;随后,俄亥俄州的一家发电厂因此下线,伴随的连锁故障导致大面积停电,其影响波及 240 万平方千米、5000 万人口的用电,造成了每天 300 亿美元的巨大经

济损失。

目前电网短路电流超标日趋严重的问题,给电网安全运行带来了不可控的影响。发生短路时,系统阻抗迅速减小,流过短路点的电流迅速增加,开关、刀闸、电流互感器、母线等电气设备需要承受较大的短路电流冲击,短路电流产生的热效应会破坏电气设备的热稳定;而暂态过程中的短路冲击电流将在电气设备上产生一个超过设备耐受极限的电动力,从而破坏电气设备的动稳定。短路电流增加会造成设备温度升高,接线端子过热,加剧设备的绝缘老化,降低设备使用寿命。

传统的限流措施主要从电网结构、系统运行方式以及设备三方面着手,归纳起来有以下几类方法:

(1) 发展高电压等级的电力系统,将低电压等级电力系统解列分片运行。发展高电压等级电网能够限制短路电流,在一些国家也有相关使用经历,但是其造成了电网供电可靠性和运行灵活性的降低,同时投资较大。如果将珠江三角洲主网改造成为特高压电网,估算投资将超过数百亿元。此外采用更高电压等级电网还会造成环境问题,电磁污染即是一个不容忽视的问题。高一级电压发展之后将低压电网分片运行,尽管也可得到明显的限流效果,但是系统的安全裕度却大大下降,另外运行操作及事故处理的灵活性也受到了限制。

(2) 采用多母线运行或母线分段运行。该措施对制约短路电流增加也比较有效,但是有两大缺点:一是使得系统设备承受的潮流不均;二是母线在分裂运行及恢复并联运行前后,周边电网的继电保护值可能会受到影响或干扰,从而影响继电保护动作的正确性。

(3) 尽量减少互联网络的紧密性,如采用直流联网等。直流背靠背技术是将已有的交流系统适当分片,将电网分成几个相对独立的交流系统,避免系统间相互的短路电流。不过在直流输电联网时,其两端换流设备的投资很大。例如,要将广东电网解列,通过直流互联,估算投资需要40亿~50亿元。

(4) 安装串联电抗器、分裂电抗器、高阻抗变压器等。串联电抗器技术不适用于较高电压系统,在系统正常运行时,电抗器上会存在电压降落及一定损耗,不但限制了线路的传输容量,也使得电能质量受到影响。此外,限流电抗器的具体取值也受到相应约束,导致短路电流的抑

制效果不会太明显。高阻抗变压器是通过增加系统阻抗的方式来实现限流目的的，但是在提高变压器阻抗的同时，需要对绕组的漏磁、导线损耗及温升均进行严格控制，而该装置的引入也会导致电压降落并产生无功损耗。

(5) 采用熔断式保护器。熔断器具有结构简单、使用方便、价格低廉等优点，在低压配电系统中被广泛应用。但是熔断器的反应速度较慢，动作时间较长，不能迅速地切断电源，而且保护功能单一，故障熔断后必须更换熔断体，不利于电网的维护。

(6) 开发大容量断路器。采用更大容量的断路器也是解决短路电流超标问题的可行方案之一。据测算，开断电流 80kA 断路器的应用可较好地解决广东电网短路电流超标的问题，通过提升短路电流水平可恢复部分片区解除运行的联络线，提高电网的可靠性；同时还能够替代限流线圈，减少限流器本身造成的电能损耗，降低运行维护的复杂性。而且，提升短路容量也为电网的进一步发展预留了足够的容量。目前，ABB 公司已开发出 80kA 断路器，包括瓷柱式断路器和罐式断路器两个类型。两个系列均有 252kV 和 550 kV 等多个电压等级的产品，动稳定电流均为 200kA(216 kA)，能够满足一段时间电网的发展需求。

但是，采用更高容量断路器牵涉到变电站诸多设备更换，隔离刀闸与接地开关、互感器、避雷器、母线等配套设备，均应换为动稳定电流为 200kA 的设备；另外，接地短路电流的增大，还有可能需要对接地网进行升级改造，费用将比较昂贵。此外，单纯地依靠提高断路器的遮断能力来解决问题是不切实际的，一是从技术和经济角度来看，遮断容量不可能一直提高；二是提高遮断容量的同时也意味着设备造价的上升，如 80kA 的断路器造价约为 63kA 断路器的 1.8 倍，另外还将涉及改造或更换现有的开关设备，总的投入资金将会比较大。

(7) 采用故障电流限制器(Fault Current Limiter, FCL)。故障电流限制器的概念于 20 世纪 70 年代被首先提出，其基本思想为：快速检测即将出现的短路电流峰值，并提前采取措施将其限定在较低水平，以满足已有断路器在不超过其切断能力的前提下切断短路故障。FCL 是一种串联接在系统中的电气设备，在系统正常运行时它呈现出较低阻抗，在故障运行时转而呈现高阻抗以进行限流操作。