



国际大电网会议绿色丛书

开断设备

SWITCHING EQUIPMENT

International Council on Large
Electric Systems(CIGRE)

Study Committee A3:High Voltage
Equipment

CIGRE SC A3 研究委员会编著

西安高压电器研究院有限责任公司
中国电工技术学会输变电设备专委会
中国电器工业协会高压开关分会

内部资料
注意保存

开 断 设 备

SWITCHING EQUIPMENT

(CIGRE SC A3 研究委员会编著)

总 编：元复兴

主 编：张晋波

副 主 编：周小中 袁 妮

责任编辑：马铜德

翻 译：耿西京

校 译：牟京卫 闫 静 王 平

颜莉萍 赵力楠 马 慧

刘思远 李品德 王玉平

张万荣

西安高压电器研究院有限责任公司

中国电工技术学会输变电设备专委会

中国电器工业协会高压开关分会

2020 年 12 月

目 录

推荐序

原书序

第1章 国际大电网会议 SC A3 研究委员会的活动	1
1.1 前言、主要任务和工作范围	1
1.2 工作组	2
1.3 断路器发展简史	2
1.4 总结	7
第2章 电力系统中的设备	9
2.1 引言	9
2.2 术语定义	11
2.3 缩略语	13
2.4 发电	14
2.5 电网结构	15
2.6 变电站	15
2.7 保护	16
2.8 架空线、地下电缆和气体绝缘线路/母线	18
2.9 电力变压器	19
2.10 并联电抗器	19
2.11 电容器组	20
2.12 断路器	21
2.12.1 油断路器	22
2.12.2 压缩空气断路器	23
2.12.3 SF ₆ 断路器	24
2.12.4 真空断路器	25
2.12.5 发电机断路器	26
2.13 避雷器	27
2.14 配电等级开关设备	28
2.15 熔断器	32
2.16 总结	33
第3章 高压断路器的开断现象	34
3.1 引言	34

3.2	术语定义	34
3.3	缩略语	36
3.4	油和空气中的基本开断现象	36
3.5	气体断路器中的开断现象	36
3.6	真空中的开断现象	39
3.7	不同灭弧介质的绝缘耐受比较	41
3.8	总结	42
第4章 电力系统中的开合现象		43
4.1	引言	43
4.2	术语定义	43
4.3	缩略语	46
4.4	基本开合现象	46
4.5	母线端子故障开断	47
4.6	近区故障开断	51
4.7	容性电流开合	55
4.8	小电感电流开合	57
4.9	变压器限制故障开断	62
4.10	失步电流开合	67
4.11	电力系统稳定性的机械模型	70
4.11.1	野田佳彦模型介绍	70
4.11.2	输电系统的机械模拟	71
4.11.3	柔性交流输电系统对电力稳定性的影响	72
4.12	50 Hz 与 60 Hz 之间开合现象的差异	72
4.12.1	工频	72
4.12.2	热开断能力	72
4.12.3	绝缘开断能力	73
4.12.4	容性开合能力	73
4.12.5	感性开合能力	73
4.12.6	载流能力	74
4.12.7	连续载流能力	74
4.13	特高压输电中的开合要求	74
4.14	总结	82
第5章 断路器的发展史		84
5.1	引言	84
5.2	术语定义	85
5.3	缩略语	87
5.4	断路器	87

5.5	断路器的发展历史	91
5.6	油断路器(OCB)	91
5.7	空气断路器	95
5.8	SF ₆ 断路器	96
5.9	真空断路器(VCB)	100
5.10	总结	103
第6章	SF₆断路器	105
6.1	引言	105
6.2	术语定义	105
6.3	缩略语	106
6.4	SF ₆ 气体的特点	106
6.4.1	SF ₆ 的开断功能	106
6.4.2	气体密度及其成分	107
6.4.3	热导率和电导率	107
6.4.4	比热	107
6.4.5	SF ₆ 与气体断路器的开断过程	108
6.5	不同类型气体断路器的灭弧原理	110
6.6	双压式	111
6.7	单压压气式	111
6.8	热辅助压气式	112
6.9	断路器外壳	115
6.10	断路器操动机构	117
6.10.1	断路器操动机构	117
6.10.2	断路器操动机构的控制装置	118
6.10.3	弹簧操动机构	118
6.10.4	扭杆弹簧操动机构	119
6.10.5	液压操动机构	120
6.10.6	分闸操作用机械能量减少的变化曲线	120
6.11	断路器控制装置	120
6.12	总结	123
第7章	真空断路器	125
7.1	引言	125
7.2	术语定义	126
7.3	缩略语	127
7.4	真空断路器的基本特性	128
7.4.1	简介	128
7.4.2	通过磁场的真空电弧控制	129

7.5 真空灭弧室的触头材料	131
7.5.1 要求	131
7.5.2 纯金属	132
7.5.3 合金	132
7.6 真空开关设备的可靠性	133
7.6.1 电气寿命	133
7.6.2 机械寿命	133
7.7 开断容量	133
7.7.1 开断能力	133
7.7.2 绝缘耐受能力	134
7.7.3 载流能力	134
7.8 真空度	134
7.9 高压系统用真空开关设备	135
7.9.1 简介	135
7.9.2 高压真空断路器的开发	136
7.9.3 高压真空断路器的实际应用	136
7.9.4 X 射线发射	137
7.9.5 高压真空断路器与高压 SF ₆ 断路器的比较	137
7.10 总结	139
第 8 章 发电机断路器	143
8.1 引言	143
8.2 术语定义	144
8.3 缩略语	145
8.4 对发电机断路器的要求	146
8.4.1 操作方式	146
8.4.2 连续载流能力	147
8.4.3 负荷电流开合能力	147
8.4.4 短路能力	147
8.5 试验要求	150
8.5.1 短路关合和开断试验	150
8.5.2 温升试验	151
8.6 发电机断路器的发展史	152
8.7 发电机断路器的结构	152
8.7.1 基本形态	152
8.7.2 灭弧室	152
8.7.3 冷却技术	153
8.8 总结	154

第9章 隔离开关和接地开关	156
9.1 引言	156
9.2 术语定义	156
9.3 缩略语	157
9.4 技术要求	157
9.4.1 简介	157
9.4.2 绝缘要求	158
9.4.3 额定电流和温升	159
9.5 利用空气断口隔离开关进行的电流开断	160
9.5.1 概述和常见应用	160
9.5.2 空载变压器开合	161
9.5.3 容性电流开断	161
9.5.4 环流开合	162
9.6 隔离开关类型和辅助设备	163
9.6.1 简介	163
9.6.2 垂直断口隔离开关	164
9.6.3 中心断口隔离开关	164
9.6.4 双断口隔离开关	164
9.6.5 单臂水平折叠式隔离开关	164
9.6.6 剪刀式隔离开关	165
9.6.7 辅助开断装置	165
9.7 接地开关	166
9.8 型式试验	167
9.9 总结	168
第10章 绝缘耐压性能试验	170
10.1 引言	170
10.2 术语定义	170
10.3 缩略语	171
10.4 标准耐压试验	171
10.4.1 外部绝缘的绝缘耐压性能试验的大气校正	173
10.5 工频电压试验	173
10.6 局部放电测量	174
10.7 雷电冲击电压试验和操作冲击电压试验	174
10.8 作为状态检查的电压(耐压)试验	174
10.9 固体绝缘元件的开发试验	175
10.10 例行试验	176
10.11 安装后的现场试验	177

10.12 总结	178
第 11 章 短路性能试验	179
11.1 引言	179
11.2 术语定义	180
11.3 缩略语	181
11.4 大容量试验	181
11.5 直接试验	184
11.5.1 直接三相试验	184
11.5.2 直接单相试验	184
11.5.3 单元试验方法	186
11.5.4 两部分或多部分试验方法	186
11.6 合成试验	186
11.6.1 合成试验方法的类型	189
11.6.2 电流引入法	189
11.6.3 电压引入法	191
11.6.4 三相合成试验方法	191
11.6.5 金属铠装封闭式断路器的合成试验	192
11.6.6 特高压断路器的合成试验	194
11.6.7 关合试验的合成试验	194
11.6.8 延弧	195
11.6.9 电流源回路的电压	196
11.7 总结	196
第 12 章 作为开关设备设计和性能评价验证工具的模拟	198
12.1 引言	198
12.2 术语定义	199
12.3 缩略语	199
12.4 仿真和建模	199
12.5 模拟工具和试验回顾	200
12.6 开关设备模拟示例	201
12.6.1 电场分析	201
12.6.2 热分析	204
12.6.3 内部电弧	206
12.7 总结	208
第 13 章 故障限流(FCL)装置和技术	210
13.1 引言	210
13.2 术语定义	211

13.3	缩略语	214
13.4	电力系统中降低短路电流水平的方法	215
13.4.1	母线分裂	215
13.4.2	分裂成子电网	215
13.4.3	断路器顺序跳闸	216
13.4.4	限流电抗器 (CLRs) 和高阻抗变压器	216
13.4.5	阻抗接地	218
13.4.6	微爆式限流器	218
13.4.7	固态限流器	220
13.4.8	超导限流器	222
13.4.9	饱和铁心式限流器	222
13.5	故障电流管理	223
13.6	限流器和保护系统	223
13.7	故障电流限制器和电力质量	224
13.8	限流器的可靠性和适用性	224
13.9	维护	224
13.10	环境优势	224
13.11	需要、要求、规范和选择标准	225
13.11.1	系统的基本特性	225
13.11.2	系统绝缘配合的基本数据	225
13.11.3	系统的中性点接地	225
13.11.4	系统的结构	225
13.12	总结	226
第 14 章	相控操作	228
14.1	引言	228
14.2	术语定义	229
14.3	缩略语	230
14.4	相控操作的原理	231
14.5	断路器的特性	233
14.5.1	断路器的机械操作特性	233
14.5.2	断路器的电气特性	235
14.6	相控操作基本策略	238
14.6.1	容性操作应用	238
14.6.2	电抗器操作应用	239
14.6.3	空载变压器带电	240
14.6.4	非补偿和补偿线路操作	244
14.7	相控操作的现场经验	247
14.7.1	电容器相控操作的现场经验	247

14.7.2	电抗器相控操作的现场经验	247
14.7.3	变压器操作的现场经验	249
14.8	总结	251
第 15 章	避雷器	253
15.1	引言	253
15.2	术语定义	254
15.3	缩略语	254
15.4	避雷器的历史	255
15.5	金属氧化物避雷器的结构	256
15.6	金属氧化物避雷器的绝缘配合	256
15.7	国际大电网会议对金属氧化物避雷器调查的介绍	258
15.8	总结	262
第 16 章	高压直流开关设备	263
16.1	引言	263
16.2	术语定义	264
16.3	缩略语	264
16.4	具有不同电流过零生成方案的直流断路器	265
16.4.1	电弧电压电流限流方案	265
16.4.2	无源谐振电流过零生成方案	265
16.4.3	有源谐振电流过零生成方案(有源电流引入方案)	265
16.4.4	混合式机械和电力电子开关	266
16.5	直流断路器在直流电流开断期间的电压和电流特性	266
16.6	在不同应用场合使用的直流断路器	267
16.7	无源电流生成方案的基本特性	269
16.8	采用有源电流生成方案的高压直流断路器的开发	271
16.9	混合式机械和电力电子开关的工作原理	273
16.10	对多端辐射状高压直流电网用直流断路器的要求	274
16.11	金属回线转换断路器的现场经验	277
16.12	高压直流隔离开关	278
16.13	总结	280
第 17 章	设备的寿命管理	282
17.1	引言	282
17.2	术语定义	282
17.3	缩略语	283
17.4	设备的寿命管理	283
17.5	设备的老化现象	287

17.5.1 简介	287
17.5.2 断路器	288
17.5.3 隔离开关和接地开关	288
17.5.4 互感器	289
17.5.5 避雷器	289
17.5.6 结论	290
17.6 设备的可靠性调查	290
17.6.1 简介	290
17.6.2 国际大电网会议对设备可靠性的调查	290
17.6.3 故障定义	291
17.6.4 国际大电网会议进行的可靠性调查:断路器	291
17.6.5 断路器的故障频率和特性	291
17.6.6 隔离开关和接地开关的可靠性	293
17.6.7 国际大电网会议可靠性调查:隔离开关和接地开关系列	295
17.6.8 隔离开关和接地开关的故障频次和特性	295
17.6.9 对隔离开关和接地开关可靠性调查的总结	296
17.6.10 对控制系统的可靠性评价	297
17.6.11 可靠性调查总结	298
17.7 总结	298
第 18 章 未来发展趋势	300
18.1 引言	300
18.2 术语定义	301
18.3 缩略语	302
18.4 可再生能源的作用	302
18.5 分散式或分布式发电	302
18.6 电流开断的未来发展趋势	304
18.6.1 采用 SF ₆ 替代气体的断路器的应用	304
18.6.2 SF ₆ 替代性气体和混合物的特性	305
18.6.3 SF ₆ 替代气体和混合气体的开断性能	306
18.6.4 未来的开断技术	307
18.7 总结	307

第13章 故障限流(FCL)装置和技术

Jay Prigmeore, Nenad Uzelac

关键词:故障电路限制器;电力系统保护;短路电流;电弧光缓解;过电流

13.1 引言

故障电流限制器(简称限流器或 FCLs)是一类特殊的电气装置,用于将大的短路电流减少并降低到像断路器(CBs)这样的现有保护设备更容易管理的水平。通常安装限流器的目的是,在断路器开始其分闸操作之前便可将现有故障电流降低到断路器能够安全开断的水平。限流器将故障电流限制到预先设定的水平,这个预设值基于特定的系统结构和系统条件而定。在过去,面对增加的短路电流对系统带来的威胁,工程师必须升级现有设备(如果这个升级可安全开断新的短路水平),或者必须寻找到降低短路额定值的办法,比如母线分裂运行或增加变压器阻抗等。限流器允许工程师采用选定的技术,避免对断路器之类的保护设备进行全面而系统的升级,因为升级的费用可能相当高。

国际大电网会议(CIGRE)就电力系统中的限流器技术进行了一些调查。例如,CIGRE WG A3.10 工作组,“在电气介质和高压系统中的故障电流限制器”研究了功能规范和试验要求(CIGRE WG A3.10 工作组 2003)。A3.16 工作组“故障限流限制器装置对保护系统影响导则”研究了电力系统中限流器技术与不同保护系统之间的相互影响(CIGRE WG A3.16 工作组 2008)。CIGRE WG A3.23 工作组,“故障电流限制器在电力系统中的应用和可行性”总结了限流器的现场经验,显示出面对日益增强的电力系统和日益增加的短路水平,降低故障电流幅值的可能性(CIGRE WG A3.23 工作组 2012)。

对于短路额定值,在中压和高压设备中超过断路器的最大开断能力(kA,有效值,对称)并不少见。在较高的短路电流水平(63 kA 或以上),降低高量值故障电流的选项非常少。在这种情况下,从广义上讲,寻找满足如下条件的解决方案非常重要:①可有效限制或缓解短路电流水平;②可靠的;③成本低的。在本章节中列出了用于缓解高量值故障电流的方法,且这些方法不仅仅局限于应对 63 kA 以上的故障电流。这些方法通常可用于任何故障电流水平下的系统保护,即使短路电流未超过该系统的断路器额定值。某些缓解技术可降低故障期间的允通能量并保护人员和设备。故障能量的降低也可延长现有设备的寿命。

新电源接入电网有可能造成在以前长期规划预测中没有考虑到的短路水平的增加,可能改变电力潮流或引起电压稳定性问题。在此背景下,对于现有高压电网和中压/低压电网,需要越来越多的短路电流限制方面的技术知识。面对故障电流水平增加,最常见的解决方案是增加开关设备和其它设备的额定值、电网分裂运行、采用更高等级的电压连接(交流或直流)、采用高阻抗变压器和串联电抗器,或使用像按顺序电网跳闸那样的复杂策略。然而,这些替代方法可能产生其它问题,例如降低电力系统安全性和可靠性,成本增加和功率损耗增加。由于一些强制性规则和可用的物理空间的原因,上述方法可能也不太现实。对于直流应用来说,直流电抗器在短路事件期间会降低电流上升率,并可有效缓解对断路器的要求。

在电力系统的几个位置,有必要采用某种限流措施以避免昂贵的系统升级。如果可以降低故障电流水平,电力系统将会得到额外的益处。目前实际中的常规方法在某种程度上是有效的,但有其局限性,且仍有提升性能的需要。

基于新技术的故障电流限制器(FCLs),例如固体材料和超导材料,在理论上是富有效率和效益的。然而,这些限流器仍处于不同的发展阶段,大部分技术还不够成熟,还不具备电网使用条件(尽管在迅速接近)。一旦条件具备,预计下一代限流器将在全世界的输配电系统中得到广泛应用。事实上,已有许多

示范设备得到安装,正处于试运行和设计验证阶段。图 13.1 为一种具有故障电流限制及电流开断双重功能的限流器。

限流器应用的基本物理效应是与线路串联的阻抗的增加。因此,当采用限流器时,必须考虑电网的影响和相互作用。如图 13.2 所示,一般来说,限流器的影响可分为两组。

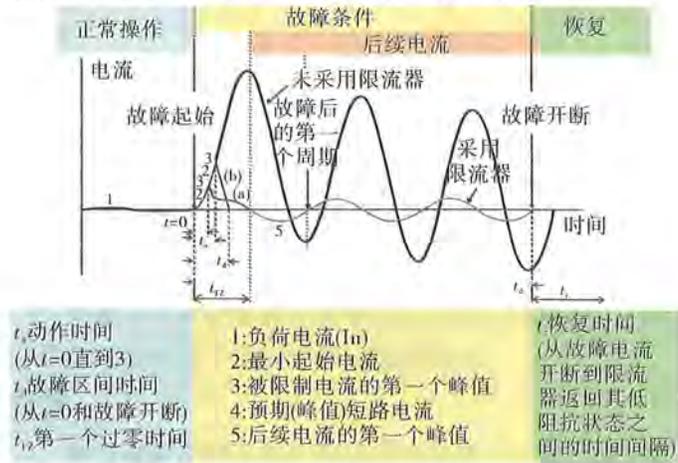


图 13.1 普通的故障电流限制和故障电流开断波形 (ABB Calor Emag 2016)



图 13.2 限流器对系统的影响

电力工程行业的共识是,新的或扩建的输电和/或配电系统特定的电压等级的选择主要由需要提供给负荷的额定功率决定。目的在于使额定电流水平和短路水平保持在商用设备(特别是断路器)的标准额定值内。对于任何规定电压等级下的短路功率,这些额定值通常都可提供足够的裕度。然而,根据应用约束(例如电网密度、附近的发电厂),短路电流可能超过现有设备的额定值。这可能需要基于设备的短路容量来选择更高的电压等级,或可能涉及选择后面列出的限流方法。在设计新系统时,必须考虑所有这些因素。

对于一个现有系统来说,提升电压等级对于中压水平更可能是一个可行的选项,因为在相同或相近的空间约束下,仅通过安装更现代的和实际上更紧凑的设备就可满足系统电压的提升。然而,限流器对于解决中压系统中过高的短路额定值仍是一个可行的解决方案。在高压系统中,提升电压等级往往涉及重大投资,因而在许多情况下并不是优先选项。因此,限流器是一个工具,工程师用它来解决过高的短路电流问题,在允许容量扩大的同时可以保护和限制对现有设备的损坏。

13.2 术语定义

这组术语并不是为了全面,而是为了尽量帮助读者结合这个主题(限流器装置)了解和认识所使用的术语及其含义。

有功功率

有功功率这个术语也称为实际功率,表示在一个周波交流波形内传递的净功率。它常用来限定通用的功率术语,以便区别于无功功率。

交流电流

一种电流,其方向根据以相同频率变化的电压而周期性反转,通常缩写成 AC 或 ac。

电容器

一种存储电荷的装置,通常是采用一层薄的绝缘介质材料将导电板或导电箔隔开。该装置的有效性或其电容采用法拉第(F)计量。

CCL - 电流转移式限流器或微爆式限流器的缩写。

断路器

通过手动或自动操作,用于电路的分闸和合闸(电流的关合或开断)的装置。与常规开关相反,断路器设计用于开断故障电流。与继电保护或触发单元相结合,当电流超过预定值时可命令断路器分闸,使断路器可以提供过流保护。

电流转移式限流器

见可触发的限流器。

导体

通常是具有很小的电阻且能承载电流的金属物质。室温下最好的导体是金,其次是银,但最常用的导体则是铜。后来发现的被称为超导的某些其它物质在极低的温度下具有零电阻(通常低于 77K,这是氮的液化温度)。

连续负荷

3 小时或以上的持续负荷电流。

低温学

针对极低温度的科学研究。

限流电抗器

一种与相导体串联连接的电抗器,用于限制在短路条件下可在电路中流动的电流。

电流互感器

通过电磁感应测量时变电流的装置。

故障

相间、相对中性点或相对地阻抗的偶然降低,通常会导致随后的大电流流动。

故障电流限制器

故障电流限制器是一种装置,可在正常导电模式与限流模式之间提供基于电阻和/或无功阻抗的增加的条件,以便将交流电力系统中的故障电流预期峰值和/或有效值限制到或低于需要值。电阻和/或无功阻抗的变化是缘于设备的电导率或磁导率的变化或两者的组合。

馈线

在运行设备与最后下游分支电路过电流保护装置之间的电路导线。

频率

用赫兹计量的每秒时间内交流电流的完整变化次数或循环次数。额定频率的标准值在欧洲和亚洲通常是 50 Hz,在美国和许多其它国家主要是 60 Hz。

电网

在电气领域,用于特指电力公司输配电网络的术语。

谐波

频率为基波频率整数倍的正弦振荡。例如,60 Hz 系统的三次谐波在 180 Hz 频率下振荡。某些类型的电气设备产生谐波,对连接到相同系统的其它装置的正常功能产生干扰。

阻抗

电气回路中阻碍电流通过的总效应。在交流系统中,阻抗由电阻(耗散的实际功率)和电抗(由电感

和电容引起的)组成的。阻抗以欧姆(Ω)为单位进行量化。

电感

电气回路中磁通变化率与感应电压之间的比例。通常,磁通的变化是由回路本身中(自感)或附近回路中(互感)电流的变化引起的。电感用亨利单位(H)计量。

负荷

消耗电能并连接到电源的装置。

中性点

通常具有最小对地电压的电力系统导线。在三相系统中,它承载相间的不平衡相电流。一点导体接地的系统利用中性点来达到上述目的。

过电流

超过导体或设备的连续额定电流的任何电流。这可以是在过载情况下略微高于额定值的电流,也可以是在短路情况下远高于额定值的电流。

过载

电力设备在超过其正常满载额定值以上运行或导体在其额定容量以上运行。过载工况将最终造成危险的过热和破坏。

功率

进行工作或传递能量的比率。电功率用瓦特(W)来计量。746 W 的功率等效于 1 马力。

微爆式限制器

见触发式限流器。

额定电流

限流器能够永久承载的电流(有效值)。

电阻

在电路中通过消耗有功功率阻止电流流动的材料特性。电阻以欧姆(Ω)为单位进行量化。

有效值或 RMS

“均方根”的缩写,是计算随时间变化的电气信号有效值的一种方法。基础是将交流量的有效值施加到一个直流电路中,可消耗相同量值的有功功率。例如,在一个周期内,1 安培有效值的交流电流在给定电阻中产生的热量与在相同电阻中 1 安培的直流电流产生的热量相同。

短路

在电气回路正常隔离点之间形成了的低阻连接,这可能产生较大的、远高于正常水平的电流。

单相

由通过单一交流电压供电的一对导体组成的交流电力系统或负荷。这种类型的系统比三相更简单,但当必须传输大量电力时则有很大的不足。

三相

由通过相差三分之一周波相角的交流电压供电的三个导体组成的交流电力系统或负荷。这种类型的系统较单相有更多的优势,包括能够使用同样的载流导体提供更大的功率,以及在每个周期提供恒定的功率,而不是像单相系统那样的脉动功率。大功率设备都是三相的。

晶闸管

具有四层交替 N 和 P 掺杂半导体材料的固态半导体器件。晶闸管起单向开关的作用,当其门极接收

到电流脉冲时导通,并可在正向偏置下持续导通。

触发式限流器

一种限流器,在遇到超过控制系统预设阈值的过电流时,其主导电回路被物理性微爆切断,并将电流转移到并联的熔断器内。

电压降

由电源与负荷之间的阻抗引起的电压降落。这些阻抗是由接线和变压器引起的,且通常应尽可能最小。

13.3 缩略语

AC	交流电流
CB	断路器
CCL	转移式限流器
CRL	限流电抗器
CT	电流互感器
DC	直流电流
ETO	射极关断晶闸管
FCL	故障电流限制器
FMEA	失效模式及影响分析
GTO	门极关断晶闸管
HTS	高温超导体
HV	高压
Hz	赫兹
IEC	国际电工委员会
IEEE	电气与电子工程师学会
IGBT	绝缘栅双极性晶体管
IGCT	集成门极换流晶闸管
KA	千安
kV	千伏
MOV	金属氧化物压敏电阻器
MV	中压
P	实际功率
PWM	脉宽调制
Q	无功功率
R	电阻
RMS	有效值
SiC	碳化硅
SIL	安全完整性等级
SFCL	超导限流器
SCFCL	饱和铁心限流器
SSCB	固态断路器
SSFCL	固态限流器
Sym	对称

- TCL 触发式限流器
- TRV 瞬态恢复电压
- UPS 不间断电源
- X 电抗
- YBCO 钇钡铜氧

13.4 电力系统中降低短路电流水平的方法

故障条件造成电流冲击通过电力系统,会对电网设备造成严重损坏。在变电站内采用开关设备,如断路器,用于保护相关设备。故障水平的增加,特别是对于高电压系统,与此对应的是开关设备、断路器和隔离开关等设备的额定值以及故障能量的相应增大,这会增加电气危害的风险和严重性。

世界各地的电力公司都正面临着对中、高压系统故障电流限制的日益增长的需求。故障电流限制措施的简要回顾见下图。

“无源”措施是在所有工况下都使用更高的阻抗,而“有源”措施仅在故障条件下才引入较高的阻抗。这些措施也可分类为“拓扑”措施和“设备”措施。根据所使用的技术,某些措施也可以认为是“新颖”的(图 13.3)。

13.4.1 母线分裂

母线分裂需要通过使常闭的母联分闸或使现有母线分裂,以此剥离可能给故障点馈送能量的电源。它有效降低了可以给故障点馈送能量的电源数量,但也减少了在正常或意外操作条件期间提供负荷电流的电源数量。这影响了电力系统的可靠性和安全性,在操作理念和控制方法特别是保护整定和配合方面,可能需要作出改变。

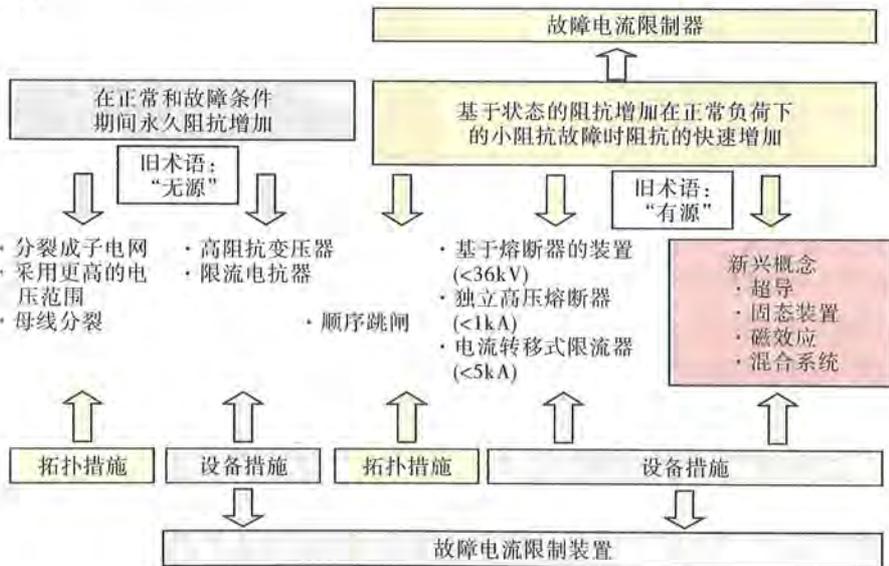


图 13.3 限流器的系统定义(美国超导公司 2016)

13.4.2 分裂成子电网

这个术语指的是使用到电网(具有相同的电压等级)上的一种措施,即将原来的系统分成更小的部分,并分别由下一个更高的电压等级独立供电。这种分裂将每个子电网中的故障电流水平降低到允许的水平。将系统分裂成子电网将影响电力系统的可靠性和安全性,在操作理念和控制方法上可能需要作出改变。将系统分裂成子电网与母线分裂技术相类似。

13.4.3 断路器顺序跳闸

断路器顺序跳闸是在变电站中偶尔使用的一种特殊措施,以便无需更换某些或所有断路器就可处理较高的故障电流。顺序跳闸方案防止断路器开断过量的故障电流。如果检测到故障,故障电流上游电源的断路器首先跳闸。这就降低了故障位置保护区域内断路器中的故障电流。用这种方式操作的保护系统与距故障最近的断路器首先跳闸的大多数设计相反。超负荷工作的断路器然后便可安全分闸。顺序跳闸方案的不足在于在最终故障开断之前增加了一个断路器的操作延迟。如果超负荷工作的断路器在等待上游断路器分闸时不能耐受它承受的 I^2t ,那么此断路器可能出现灾难性失效,或可能使其即将分离的触头融焊在一起。还有,分闸故障上游的断路器将影响到原本没有受到故障影响的保护区域。在图 13.4 是断路器的顺序跳闸的一个示例。

13.4.4 限流电抗器(CLRs)和高阻抗变压器

限流电抗器(CLR)本质上是安装在电力系统中的一个电感器,通过添加一个感性阻抗来增加故障期间其端子间的电压降从而减小短路电流。然而,限流电抗器在正常运行条件下也有电压降,并由铜质线圈绕组而产生恒定的损耗源。限流电抗器可能有也可能没有磁心。对一次输电网络中采用限流电抗器进行短路电流限制的评估应包括这些方面,如输电系统在稳态和瞬态条件下的性能;设备实际尺寸的定义;电气特性规范和特殊注意事项,以防止限流电抗器产生的磁通对人类生命可能造成的危害,无论是直接的还是通过与附近的金属构件接触造成的;与替换超负荷设备、设施以及现场施工的费用相比,这个短路水平限制的的经济效益。限流电抗器属于被动型限流器,安装于电网内后,只需要一个固定且方便的设置来确定保护的重新定义。

13.4.4.1 在变电站母线的位置

限流电抗器在高压电力系统中的典型应用是串联于进线/出线或串联于母线联络/耦合位置。另一方面,尽管存在不利条件,但面对设备替代或更换时,限流电抗器的优势是在经济上更有吸引力。为了满足技术需要和最大化成本效益分配,应该针对每个具体情况分析限流电抗器在变电站母线上的位置。在图 13.5 中显示了限流电抗器在变电站母线可能的安装位置。

对于电抗型限流器的其它可能位置(变电站进线或出线)来说,变电站母线的空心电抗器可产生更好的电压稳定和最小的损耗。考虑到安装限流电抗器的方案将使变电站母线分裂,线路和变压器回路应在两个分段母线之间进行合理的重新分配,以便在正常运行条件下更好地分摊负荷。通过在这种母线联络组态中限流电抗器两侧均匀分配负荷,流经限流电抗器的电流将会最小,从而使限流电抗器的常态损耗最小化,并且使限流电抗器成为一种更具经济吸引力的解决方案。

电路中出现的集中电感会导致断路器(CB)触头上的瞬态恢复电压(TRV)的苛刻性有所增加。TRV 的增加会影响断路器的开断能力,增加开断失败的可能性,从而增加了设备灾难性风险的可能性。例如,当空心干式串联电抗器(CLR)插入到回路中以限制短路电流对称有效值时,瞬态恢复电压上升速率由于非常大的浪涌阻抗(至少是数千欧姆)往往会急剧增加。幸运的是,在电抗器两端安装适当的电容器可能很容易解决这个问题。在某些情况下,也可能需要在限流电抗器的每侧安装对地电容器。通常情况下,可通过深入的计算机工程分析来确定在增加限流电抗器情况下是否会超过断路器的这个特性。

与电抗型限流器其它可能的安装位置相比,如果平衡均匀,那么在变电站母线位置的电抗器将产生更好的电压稳定,并使流经母线间的电流最小从而使其损耗最小化。当限流电抗器方案使变电站母线分裂时,为了在正常运行条件更好地分摊负荷,在变电站两段母线之间应合理地重新分配变压器回路、发电机回路和负荷回路。在图 13.6 和 13.7 中给出了限流电抗器的安装示例。

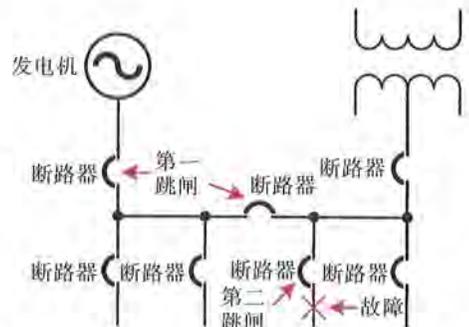


图 13.4 顺序跳闸示例

限流电抗器会与其它系统元件相互作用并造成不稳定,导致瞬态恢复电压(TRV)增加,正如前面提到的那样,因为在电路中由限流电抗器带来的集中电感会导致与回路电流开断相关的断路器触头间瞬态恢复电压(TRV)苛刻性的增加。这可能导致对断路器 TRV 指标要求的增加。当条件满足时,空心限流电抗器对于较高的故障电流会是一个经济的解决方案。

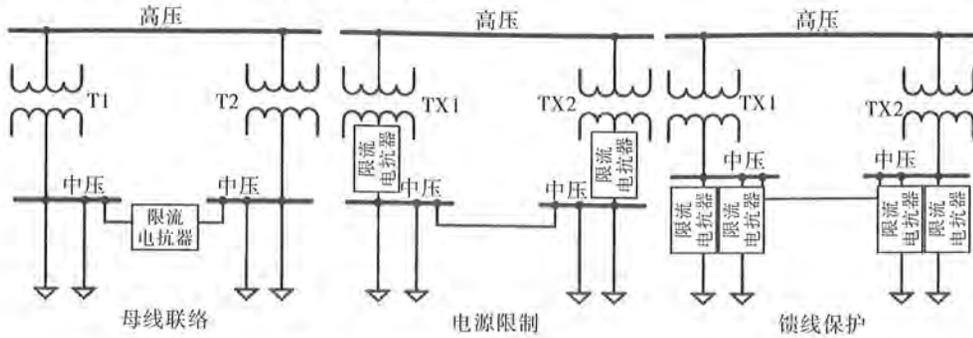


图 13.5 限流电抗器可能的安装位置



图 13.6 限流电抗器安装示例



图 13.7 空心电抗器(CLR)安装实例

作为一个示例,这里介绍了在巴西伊泰普发电厂输电系统 345 kV 等级变电站分裂母线的限流电抗器的实际安装情况。由于下一步可以预见的电网扩建,短路电流将接近甚至超过提加科-普瑞托变电站 345 kV 设备 50 kA 的额定值。为这个实例选择的解决方案是在提加科-普瑞托变电站 345 kV 母线母联位置安装两组 345 kV/15Ω 的空心电抗器,以便把短路水平从 54 kA 降低到 45 kA。因此,这个解决方案将避免用短路参数更高的新设备更换 37 台(运行电压等级是 345 kV)断路器和相关的设备。值得一提的是,提出的限流电抗器解决方案的成本与单台 345 kV 断路器的成本相当。

使用此类装置的经验已经证明,就故障电流限制电抗器其它可能的安装位置(变电站的进线或出线馈线)来说,在选定的变电站母线位置安装空心电抗器可产生更好的电压稳定和最小的损耗。为了在正常运行条件下更好地分摊负荷,在 345 kV 变电站母线两个分段中应适当重新分配线路回路和变压器回路。

如图 13.8 左图中所示,由于安装了建议的两台限流电抗器,必须进行多个评估研究,以便在有母线联络电抗型限流器情况下,针对提加科-普瑞托变电站断路器确定出新的 TRV 要求。这里值得一提的是,两个电抗型限流器中只有一个将全时运行。另一个只是备用装置,以便需要时(比如,对于维修目的)随时替代运行中的那台。

正如在图 13.8 右图中看到的那样,当电抗型限流器运行时,新的 TRV 需求将增加对上述断路器的对

应参数峰值的要求。与以前的情况(在提加科-普瑞托变电站没有任何故障限制装置)相比,新的 TRV 要求缘于在短路期间电抗型限流器引起的行波的不同传播和反射。此类电磁瞬态研究的结果表明,关于断路器 TRV 要求,IEC 标准给出的常规额定值仍适用于这个新的情形。

因而,为限制短路电流而提出的解决方案将可能实施,且对提加科-普瑞托变电站的断路器无任何新的特殊要求。经过这些全面分析后,无论是从经济和还是从技术方面看,对于这个故障电流限制问题,这都被证明是非常有吸引力的解决方案,避免了更换那些将会超负荷的开关设备。

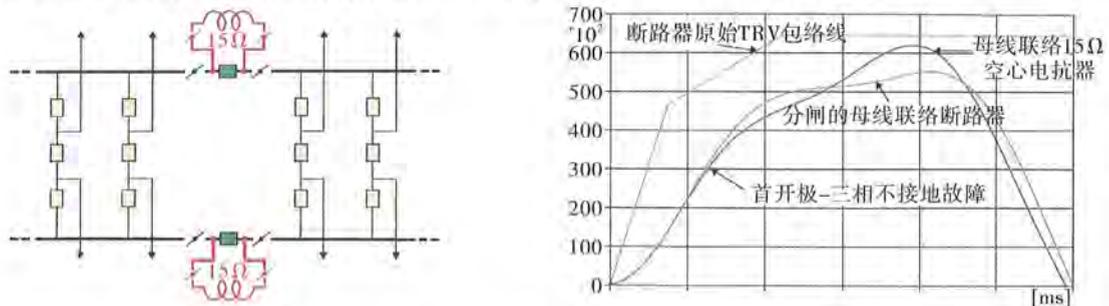


图 13.8 限流电抗器安装示例与相关的 TRV

13.4.5 阻抗接地

当高故障电流为接地故障电流时,固定接地系统可转换成阻抗接地系统,比如低阻或高阻接地、电感接地等。阻抗接地系统的引入可降低现有的接地故障电流。

13.4.6 微爆式限流器

13.4.6.1 技术概况

微爆式故障电流限制器,也称为触发式电流限流器(TCL)或电流转移式限流器(CCL),由主导电母线通路和并联安装的限流熔断器组成。这些装置是电子控制和可感应的,当测量的电流值达到并超过其触发判据时,触发微爆炸药,切断主导电通路并将电流分流到并联的限流熔断器中。熔断器随即熔化并(在第一个峰值出现前)以限流方式开断电流。根据短路不对称的程度,开断并使流过装置的故障电流下降到零的时间范围在1/4周期与1/2周期之间。从电气上来说,这些装置由一个可单次分闸的快速开关组成,此开关带有一组并联安装的限流熔断器。在正常运行条件下,电流流经主母线通路,但在短路时,插入限流熔断器来开断短路电流,保护电力系统或设备。图 3.19 中给出了在图纸中常用的一些电气原理图符号。

微爆式故障电流限制器的触发逻辑需要感知电流瞬时值或电流上升率(di/dt)和电流瞬时值的组合。一旦一个或两个条件超过了基于具体设备保护需要的预先设定值,逻辑系统发出跳闸信号,启动主导电通路中的微爆炸药,并开启限流熔断器插入过程来开断电路。在动作后,必须修理或更换主导电通路和限流熔断器。最终用户通常会有一组位于附近的备件,以便快速更换并恢复供电。逻辑系统和所有支持结构不需要更换。这些装置实际上开断流过它的短路电流而不是将预期短路电流“限制”到具体的百分数,然后依赖于断路器来断开回路。虽然其它限流技术可能只能减少 50% 的短路电流,这可能导致其应用受到局限,但微爆式限流器仍可能是一个可行的解决方案,因为它在动作后可将流过它的短路电流降低到零(100%降低)。在微爆式限流器动作后系统必须仍能安全地开断残余的短路电流。在图 13.10 中给出了商用微爆式限流器示例。

这些类限流器的额定值从低压(750 Vac)到中压(40.5 kV ac),连续电流达到 5 000 A,开断额定值达到对称有效值 210 kA。尽管还没有正式的额定值,但这些限流器曾经在 15.7 kV 开断电流达到对称有效值 300 kA 以上。这些设备可在户内或户外直接使用,无外壳,无需更换部件,额定使用寿命达 20 年。它

们设计的变化包括为增加电流额定值而采用多个并联主导电通路,以及为增加额定开断电流和跳闸定值而采用多个并联的限流熔断器。

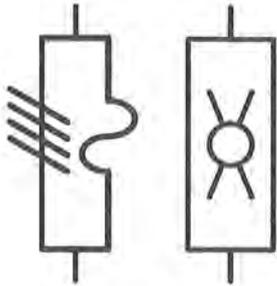


图 13.9 微爆式限流器的电气原理符号



图 13.10 微爆式限流器示例(ABB Calor Emag 2016; G&W 电气公司 2016)

它们的并联限流熔断器与主母线通路相比,具有较低的额定电流,这可以使其在限流范围工作而与跳闸定值无关。在编写本章节时还没有正式的直流额定值,如果这些限流器在开断期间可产生足够的电压,那么它们有潜力开断直流电流。

此外,当电力系统在其极限以内运行时,微爆式限流器的触发逻辑可以禁止(关闭),以避免不必要的动作,或者这些逻辑全时使能(开启)以帮助尽量减少损坏。通常,当系统达到现有断路器额定值的 90%–95% 或更高时,微爆式限流器被激活和使能。然而,这只是一个指导方针,实际的设定值取决于应用需要。单相或两相短路时,这些限流器可以三相全部跳闸,也可以不三相全部跳闸,但对于三相短路则应三相全部跳闸。它们也能够几个正弦周波内提供一个远方动作信号,提醒串联的断路器跳闸断开三相电路,以防止仅单相或两相动作时出现单相运行和铁磁谐振情况。微爆式限流器的普通应用包括母线联络、损坏限制、电源限制、电抗器旁路、分布式发电和电弧光缓解。

13.4.6.2 母线联络的应用

对于母线联络应用来说,微爆式限流器安装母联位置,其一侧串联一台联络断路器,另一侧串联一组隔离开关或第二态联络断路器,以便在限流器动作后更换备件时提供物理隔离。面对任一侧的负荷变化,限流器必须能够操作和保护系统,且跳闸定值必须考虑到每段母线不平衡负荷的百分比。行业通常的不平衡负荷可能是一段母线占 25%,另一段母线占 75%;然而,这个百分比可以在两段母线完全平衡(每段母线各占 50%)与一段母线负担全部负荷之间变化。两段母线均衡负荷通常允许最高可能的跳闸定值。母线联络应用方式如下图所示。微爆式限流器限制了电流从一段母线流向另一段母线。这些装置是双向的,但可以配置成仅在电流流动的一个方向动作(比如,仅在下游与上游),同时防止在电流流动的另外方向动作。在许多情况下,一台微爆式限流器可保护多台断路器或整个变电站,且无需升级每台超负荷设备。图 13.11 中给出了一个母线联络应用的示例。

13.4.6.3 损坏限制的应用

损坏限制的应用是电力公司和具有昂贵设备的工业场所中比较普遍的。使用微爆式限流器保护系统中的关键馈线,不仅可以允许选用额定值较低的设备,而且可以减小设备承受的能量(损坏),潜在延长了寿命预期。在电力公司的应用中,微爆式限流器可帮助缓解电网变压器的故障,防止人孔盖崩落。对于工业系统来说,它可以减少损坏,使得一台昂贵的设备在当天便可完成维修并投运,而不需要更换。在图 13.12 和 13.13 中给出了典型损坏限制的应用及其设备损坏降低的示例。

电源限制和分布式发电的应用彼此非常相似,因为微爆式限流器开断来自特定变压器或发电机的贡

献。当现有系统增加额外电源,使所有现有设备超负荷运行时,在变压器 / 发电机上串联安装一台微爆式限流器,可使短路电流保持在现有系统额定值内,无需更换设备。它实质上切断了额外贡献,使残余短路电流保持在现有额定值内。图 13.14 给出了一个安装示例。

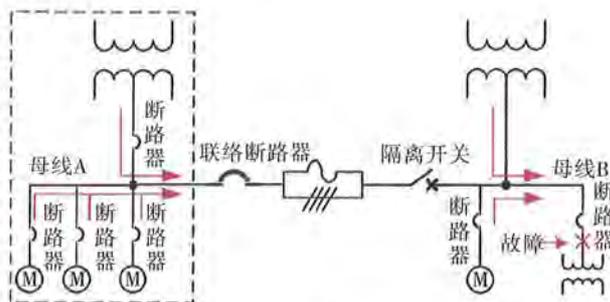


图 13.11 采用微爆式限流器开断从母线 A 流向母线 B 的短路电流的应用示例

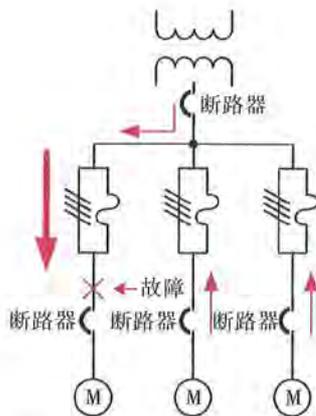


图 13.12 损坏限制设备的示例

13.4.6.4 电抗器旁路的应用

电抗器旁路的应用是与限流电抗器并联安装,以“旁接”电抗器的电压降和可观的 I^2R 损耗,这取决于电抗器的阻抗和系统的额定电流。对于不能中断的关键工序,或者如果中断,不仅在废料方面,而且在停工时间方面都是一个巨大的成本,这种情况通常在限流电抗器上并联安装微爆式限流器。电抗器旁路的应用允许系统“穿越故障”,因为微爆式限流器不开断短路电流;它仅将电流转移到电抗器,通过电抗器来进行限制。一些系统在采用了电抗器旁路的应用后,产量提高达 25%,并节省了大量资金。微爆式限流器需要两台开关与其串联,然后再与电抗器并联,以便在动作后为更换部件提供物理隔离。其中一台开关应至少是可开断负荷电流的电机驱动开关,推荐采用断路器。图 13.15 中给出了一个安装示例。

13.4.6.5 电弧光和弧爆的应用

微爆式限流器一个越来越多的应用是用于电弧光和弧爆缓解。由于这个特殊限流器的高速度(1/4 周波到 1/2 周波),在某些应用中微爆式限流器不仅对降低事故能量非常有效,而且可以降低电弧光危害水平和人员必需的个人防护装备。通常情况下,对于低压设备来说,许多应用可降低到低于 4 cal/cm^2 ,相当于级别 1 或 0。对于中压设备来说,通常(但不保证)可将危险级别减少 2 级(例如从 4 级变成 2 级)。图 13.16 以单线图方式给出了触发式限流器在系统中的一个安装示例。



图 13.13 采用微爆式限流器实现损坏限制, 25 kA rms, 对称故障(Deal 2009)

13.4.7 固态限流器

电力用户和工业实体正在考虑故障电流缓解方法,并正在考虑采用新兴技术(固态、超导等)作为对现有方法的重要替代,前提这些技术被证明是故障电流管理的最有效手段,或者它们可以提高运行灵活性以证明这项额外成本的合理性。最近,研发活动大幅度增加,目的是开发出技术和经济上均可行的技术,以设计一系列用于输配电故障电流限制的中压和高压装置(Prigmore 2013)。

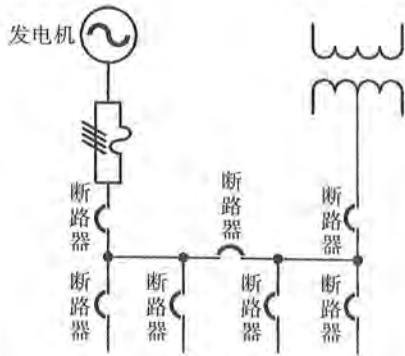


图 3.14 电源限制的应用示例

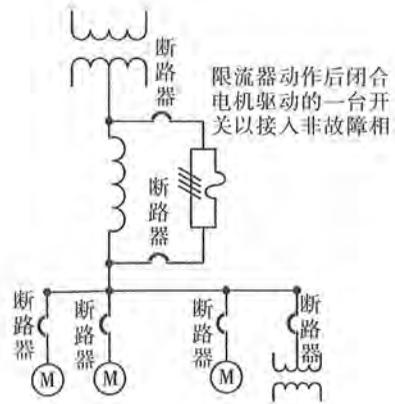


图 13.15 电抗器旁路的应用示例

固态限流器(SSFCL)可提供反复切换模式的优势,采用了“控制”故障电流而不只是将故障电流“限制”到一定百分比的操作理念(Prigmore 2013)。固态限流器使用半导体开关,比如绝缘栅门极双极性晶体管(IGBT)、发射器关断晶闸管(ETO)、门关断晶闸管(GTO)、集成门极换流晶闸管(IGCT)以及其他各种器件。固态限流器在正常工作时通过半导体开关导通电流,出现短路时,半导体被“关断”并迫使故障电流进入并联支路的阻抗中。并联阻抗将故障电流限制到系统可以应对的水平,随后由断路器开断故障。限流器通常的设计要求是在断路器动作前能够将故障电流限制 60 秒的时间。图 13.17 中给出了固态限流器的一个示例。

固态限流器允许用户设置一个需要的故障电流水平或区间,以尽量减小现有保护的定值。例如,固态限流器可以使用脉宽调制(PWM)的概念来改变半导体开关的占空比,使系统承受用户设定的故障电流水平。可以设定最大故障电流水平和最小故障电流水平。图 13.18 给出了固态限流器器的一个示例。

固态限流器的应用与在本章节中介绍的其它装置的应用相类似。如果半导体装置的额定值足够高,可能允许固态限流器作为一台固态断路器(SSCB)来操作并开断电流,而不只是限制电流(Prigmore 2013)。

固态限流器设计的忧虑包括过电压,超过半导体开关的电压和电流的上升率额定值(dv/dv 和 di/dt)、导电损耗、高压侧门极驱动器,在关断期间吸收系统中电感的能量、温升和关断后耐受整个系统电压。通常,使用金属氧化物压敏电阻(MOV),也被称为避雷器,来对开关进行过电压保护(Vodyakho 等 2011)。尽管对每种应用有许多设计考虑,但固态限流器的优势可以证明其使用是合理的,且固态限流器是未来电网最有前途的技术之一。随着采用碳化硅(SiC)作为半导体开关选择的材料,其功率额定值只会随着这项技术的成熟而增大,从而使固态限流器更具吸引力。

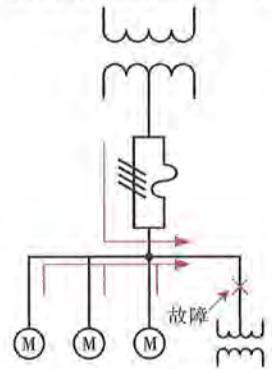


图 13.16 电弧光缓解装置的示例

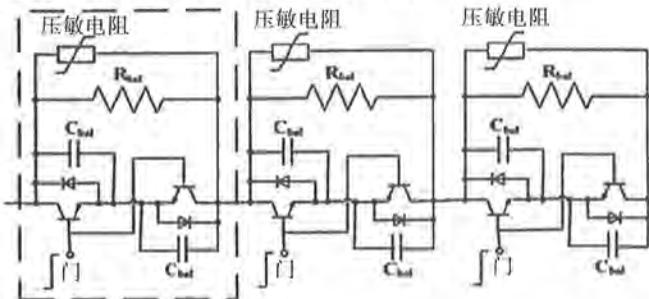


图 13.17 用于限流器的典型半导体开关设计(Vodyakho 等 2011)



图 13.18 固态限流器模块设计(Sundaram 和 Gandhi, 2008)

13.4.8 超导限流器

13.4.8.1 技术概况

超导故障电流限制器(SFCL)利用了超导材料的内在特性。当超导材料被冷却到刚好低于其居里温度时,在正常工作状态下其超导特性可提供较低的损耗($<1\%$)。居里温度是超导材料冷却到这个温度以下转变成超导体的临界温度。如果超导材料的温度高于其居里温度,则它不再具有超导材料的表现。超导限流器利用这一特性,通过液氮循环将超导材料(在写这本书的时候,YBCO 是最常用的)冷却到刚好低于其居里温度。在正常工作时,超导限流器的温度将低于居里温度。在短路状态下,由于超额电流流过该装置,超导材料的温度会升高。温度的增加将超过材料的居里温度,从而导致从超导状态到非超导状态的二阶相变。在非超导状态时,超导限流器具有较大阻抗,可以是阻性或感性阻抗。阻性超导限流器是最常见的。短路消失之后,超导限流器冷却到其居里温度以下并重新进入超导状态,对系统而言表现出“不可见”。一个担忧的问题是其动作后重新进入超导状态需要的时间,这个时间可能从数秒到最大 10 或 15 分钟变化。一旦不在超导状态,系统将承受增加的损耗。

采用液氮的高温超导体(HTS)的最新发展重新激发了人们对超导限流器的兴趣。与以前使用液氮系统相比,使用液氮系统构建和操作低温设备要便宜和简单得多。超导限流器可大致划分成失超型和非失超型。在正常条件下,失超型限流器因其处于超导状态可提供有效的零阻抗。故障可触发超导体失超,阻抗的增加将提供所需的限流。对于非失超型限流器,例如饱和铁心式限流器,其超导体总是处于超导状态,由于交流故障电流引起磁饱和度的变化,从而产生限流。

13.4.8.2 应用

这种类型的限流器可用于将现有的故障电流降低到更低和更安全的水平,以便现有开关设备仍可保护电网。采用高温超导体(HTS)的限流器在故障条件期间可提供必要的限流阻抗,但在电网正常运行期间基本上具有零阻抗。因此,高温超导限流器对整个系统性能的影响微不足道,这与其它常规的限流装置(比如产生恒定电压降和能量损耗的限流电抗器)有所不同。

必要的短路电流限制程度(动态限流与时间的函数关系)将从网络分析中推导出来,同时要考虑到限流器的相关特性。基于这些计算的结果,制造厂将获得限流器必要的设计准则,比如通过限流器的最大受限电流和限流器开始触发/脱扣时的最小起始电流(i_{min})。图 13.19 中给出了超导限流器的一个示例。

13.4.8.3 电力输送应用

超导体的另一个应用是用于电力传输。对于相同截面积的导体来说,超导体能够比非超导体承载更大的电流。因此,超导体在其物理尺寸下能够承载大量的电能。虽然这不是用于故障电流限制,但它仍是可行且有前途的应用。相对于使用非超导电缆,超导电缆可以传输 10 倍甚至更多的电能(美国超导体公司 2016)。世界范围内已经有了一些设备,由于这个应用仍在概念验证阶段,目前还没有广泛推广。图 13.20 给出了一个安装示例。

13.4.9 饱和铁心式限流器

饱和铁心式限流器(SCFCL)由磁性上反向缠绕的两个磁心(见下图)和缠绕在公共部分(中间支柱)上的直流偏差系统组成,以便在正常工作时这些磁心都保持在饱和状态。当磁心饱和时,它们呈现出低损耗($<1\% - 2\%$)(Vodykaho 等 2011)。其中一个磁心在交流正弦波的正半部分处于饱和状态,而另一个磁心在交流正弦波的负半部分处于饱和状态。在出现短路电流时,对于每个半波来说,磁心进入和退出饱和取决于电流是在交流正弦波的正半波还是负半波。图 13.21 所示为饱和铁心式限流器内部结构的简化视图。

磁滞与饱和是磁心的常见现象,当设计饱和铁心式限流器时必须予以考虑(Moriconi 等 2010)。在拟用磁心限制故障的那个半波期间,饱和铁心式限流器承受的故障电流不会使其磁心进入饱和。否则,饱和铁心式限流器将会提供低阻抗,对系统而言似乎表现为不可见,不能限流。不同的磁性材料具有不同的磁

滞曲线和饱和点。图 13.22 给出了磁滞曲线的一个示例。



图 13.19 12 kV/800A 超导限流器



图 13.20 在德国用作电力传输的高温超导电缆设备

许多饱和铁心式限流器在世界各地的中压和高压设施中都有试验性安装,并且其使用正在开始增加,特别是在高压装置中,它们现在比中压更加经济可行。在本章节中列出的某些替代技术从经济上比饱和铁心式限流器更具优势。

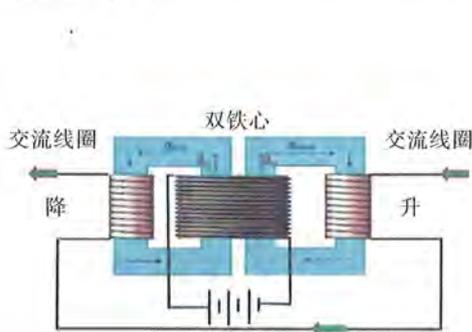


图 13.21 饱和磁心式限流磁路设计示例

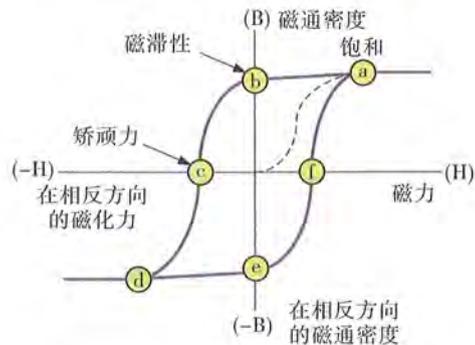


图 13.22 磁心的磁滞曲线和临界点

13.5 故障电流管理

故障电流管理表示限流器应用的主要预期影响。影响管理包括限流器应用的物理影响或现场影响。这些“副产品”是有意或无意的。另一方面,它们在电网运行方面是优势也是劣势。因此建议对这些“副产品”进行详细研究。影响和相互作用的主要议题可分为如下几类:

- ① 暂态稳定性(转子角度稳定性);
- ② 对保护系统的影响;
- ③ 系统和限流器的暂态响应(TRV);
- ④ 电能质量(电压降、故障恢复、谐波、铁磁谐振);
- ⑤ 热损耗;
- ⑥ 操作次数;
- ⑦ 维护。

13.6 限流器和保护系统

系统保护是电力系统的关键部分。必须研究和了解限流器与保护系统之间可能的相互作用。由于相互作用的多种可能性,不同类型的限流器、保护功能和电网组态导致这项研究相当复杂。如果安装了限流器,设备制造商也许能够帮助确定对系统的一些影响。需要提到的是,安装限流器通常会超过电力系统其它任何潜在的负面影响。

13.7 故障电流限制器和电力质量

结合故障电流限流器的使用,下面三个方面的电力质量非常重要:

- ①电压降(电压稳定);
- ②谐波;
- ③铁磁谐振。

必须弄清在正常运行期间(即,无限流行为)和限流过程中电能质量的差别。每种类型的限流器可能有不同的特性且对电能质量的影响可能与其它的有所不同。可能需要进行研究,以确定如果安装了一台特定的限流器是否会产生不利影响。某些类型的限流器的影响可能比其它的更大。

13.8 限流器的可靠性和适用性

从可靠性和适用性方面看,限流器大致分为两类;需要控制信号才能工作的和不需要控制信号的。例如,固态限流器通常需要一组电流传感器和处理电路来确定何时相电流超过阈值(成为故障),以便关闭电力半导体开关来限制故障电流。相比之下,超导限流器不需要控制信号来触发,限流是该项技术的固有属性。

“有源”与“无源”是划分限流器的另一种方法。有源型限流器,即需要一个控制信号来执行其功能的,应深入研究,以确定在控制信号路径中出现单点故障的可能性是否大到足以需要冗余的程度。例如,如果电流传感器和相关的控制电路已集成在限流器中,且安装前其功能在工厂得到了验证,那么也许不需要冗余。即便如此,还是应进行系统级测试,以确保其它因素不干扰控制装置的正确运行。例如,如果故障引起的电压骤降造成给控制装置供电的电源崩溃,使得控制装置不能响应故障,那么就需要冗余(备用)控制电源。如果限流器的控制系统采用外部电源供电,则它应来自可靠的电源,例如 UPS 或站用 DC 电池组。用于使系统断路器跳闸的电源通常是给限流器控制系统供电的最佳电源。

再回到原来的示例,如果主动型限流器需要一个位于变电站其它地方的外部电流互感器(CT)作为其控制系统的电流传感器,现在单点故障的可能性大大增加,因为更多的运行电缆、连接点、测试开关等将出现在其控制信号的流通过程中。为了将故障可能性降低到可接受的水平,可能需要在第二个位置放置第二组电流互感器并用第二根电缆连接,且沿着第二条空间分离的路径返回到限流器控制电路。对于主动型限流器来说,推荐使用失效模式及影响分析(FMEA)来识别来源,并评估控制路径中单点故障的可能性。也可使用安全完整性等级(SIL)来确定限流器控制系统的整体可靠性。

13.9 维护

如前所述,如果失效可被自动检测并可通告采取纠正措施,那么通过冗余可实现限流器系统的高适用性。在设计阶段,可使用像 FMEA 等工具来确定哪些设备需要冗余,可使用数据采集和远方监控来预测何时安排预防性维护。例行维护通常由制造商规定,甚至可能由制造商或承包商实施。

13.10 环境优势

由于电力系统中故障电流限制器有许多不同的安装位置和具体应用,其对环境的影响必须逐案研究。一般来说,使用故障电流限制器可获得以下好处:

- 降低损耗;
- 减小占地;
- 保护资源;
- 使用液氮。

13.11 需要、要求、规范和选择标准

在下面列出了一组详细问题,系统规划者/操作者必须全面答复,以便提供有关限流器应用的必要信息。这个信息将是潜在制造商能够做出限流器充分设计的基础。如果用户不想暴露它们的系统特性和未来的规划战略,因为这可能会影响到竞争力,那么这个信息的传递可以通过用户与制造商之间的保密协议加以限制。

13.11.1 系统的基本特性

额定频率: $f_{\text{额定}}$

系统的标称电压(有效值): $V_{\text{标称}}$

额定连续电流(A): $I_{\text{标称}}$

断路器的额定关合/开断容量

断路器的峰值/瞬时额定值

在两个方向流过的短路电流

13.11.2 系统绝缘配合的基本数据

请根据 IEC 60071 或 IEEE 1313.1 列出绝缘配合的基本情况:

系统的最高电压(有效值): V_m

设备的最高电压(有效值): V_m

BIL(基本绝缘水平):雷电冲击耐受电压

工频耐受电压

最大操作过电压(暂态过电压)

13.11.3 系统的中性点接地

了解接地系统的知识是必要的,这样才能就系统中可能出现的故障类型做出判定,并选择正确的线对地绝缘水平。

对计划安装限流器的电网,相关的中性点接地方式可能是:

隔离的中性点(不接地);

固定接地;

阻抗接地(标明接地阻抗, R 和 X);

谐振接地。

13.11.4 系统的结构

为了进行系统研究(例如电力潮流和短路电流计算),呈现限流措施的必要性和效果,必需建立详细的系统模拟。为此,应提供系统的主接线图,至少显示系统中需要限流的相关部分,以及可能受限流措施影响的相关部分。并应提供能显示在所有位置故障电流方向的主接线图。主接线图应包括次暂态电流、暂态电流和稳态电流值。电流值通常应该表示为有效值、对称,以及峰值,可能包括有效值、非对称。制造商需要知道主接线图中给他们提供的是什么电流值。

如果系统拓扑结构根据运行条件有所变化,则需要不同的主接线图。

主接线图应提供下列信息:

标明在主接线图中显示的所有无源系统元件的工频阻抗,比如变压器(包括零序阻抗)、电缆、架空线、限流电抗器等;

标明中性点接地位置(这会随运行条件变化吗?);

标明供电系统的等效网络阻抗(工频阻抗)(松弛节点);

- 标明节点的负荷(P 和 Q)；
- 提供实际值并指出未来的预期变化；
- 是否有表现出瞬态或脉动特性的负荷？比如，电机启动、电弧炉、焊接设备？如果是，应给出一些关于它们位置、过载系数和持续时间的指示；
- 在你们的系统中可能导致短路电流增加的预期变化有哪些？
- 新线路的连接、额外发电机组的连接、母线联络；
- 哪些元件要求故障电流限制？
- 母线、断路器、隔离开关、变压器、线路、接地系统等。标明它们允许的短路电流： $(I_p, I_{\text{开断}})$ ；
- 需要限制故障电流的原因是什么？
- 动态机械强度、耐热、开断容量；
- 在主接线图上标明相关的子系统、变电站或设备；
- 你知道故障电流限制器应该安装在电网的那个位置吗？如果是，请在主接线图中标明位置。就你的选择给出简短的理由；
- 标明没有任何限制功能时分支中的短路电流 $(I_p, I_{\text{开断}})$ ；
- 限流器被旁路时的预期短路电流；
- 如果相关的话，标明系统中不同运行条件的最小值和最大值；
- 为了保持现有的保护配合（包括备用保护），在不同位置对故障电流及其持续时间的最低要求是多少？
- 如果可能，提供实际保护方案；
- 你们有自动重合闸吗？如果有，请提供详细资料，如重合闸的尝试次数和相关的无电流间隔时间。

13.12 总结

由于电力系统的短路电流持续上升，限流器会是电力工程师将现有故障电流降低到现有系统额定值内的可行选项，这样现有的保护系统（如断路器）可按预期的方式运行（即，在其额定值内）。随着不同技术的成熟并进入市场，提供限流器产品有多种选项和选择的供应商。每一台限流器设备都应该在制造商提供的技术支持下精心设计。本章节重点介绍了多种不同类型的限流器技术，不仅涉及技术层面，而且涉及市场层面的成熟度。

参考文献

- [1] ABB Calor Emag: Is-limiter: The world fastest limiting and switching device. Retrieved from <http://new.abbl.com/medium-voltage/apparatus/current-limiter> (2016).
- [2] AMSC, AC superconducting cables. Retrieved 1 Jan 2016, from http://www.amsc.com/gridtec/supercconductor_cable_systems.html (2016).
- [3] CIGRE WGA3. 10: Fault current limiters in electrical medium and high voltage systems. CIGRE Technical Brochure 239 (2003).
- [4] CIGRE WG A3. 16: Guideline on the impact of FCL devices on protection system. CIGRE Technical Brochure 339 (2008).
- [5] CIGRE WG A3. 23: Applications and feasibility of fault current limiters in power systems. CIGRE Technical Brochure 497 (2012).
- [6] Deal, B. : Improving urban safety by installation of current limiting fuses on network feeders. In: Southeast Electrical Exchange Conference Paper and Industry Excellence Award (2009).
- [7] G&W Electric Company: Current Limiting Protector (CLiP). Retrieved from <http://www.gwelcc.com/documents/pdfs/clip.pdf> (2016).

- [8] Moriconi F. , De La Rosa F. , Singh A. , Chen B. , Levitskaya M. , Nelson, A. ; An innovative compact saturable-core HTS Fault Current Limiter-development, testing and application to transmission class networks. In: Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, pp. 1 – 8 (2010).
- [9] Noe M. , Steurer, M. , Eckroad, S. , Adapa R. ; Progress on the R&D of fault current limiters for utility applications. In: Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, pp. 1 – 4 (2008).
- [10] Prigmore, J. R. ; A neodymium based hybrid fault current limiter. Arizona State University. Retrieved from https://repository.asu.edu/attachments/110242/content/Prigmore_asu_0010E_12565.pdf (2013).
- [11] Sundaram, A. , Gandhi, M. ; Solid – state fault current limiters (SSFCL). (2008).
- [12] Vodyakho, O. , Widener, C. , Steurer, M. , Neumayr, D. , Edrington, C. , Bhattacharya, S. , Mirzaee, H. ; Development of solid-state fault isolation devices for future power electronics – based distribution systems. In: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 2011 Twenty Sixth Annual IEEE, pp. 113 – 118 (2011).

耿西京 翻译

李品德 校译