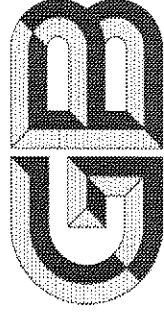


ICS 29.080
K 40



中华人民共和国国家标准

GB/T 311.3—2007

绝缘配合 第3部分：高压直流换流站绝缘配合程序

Insulation co-ordination—Part 3: Procedures for high-voltage direct current (HVDC)
converter stations

(IEC/TS 60071-5:2002, MOD)

2007-12-03 发布

2008-05-20 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	V
引言	VI
1 概述	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩写	4
5 绝缘配合原理	7
5.1 交流和直流系统绝缘配合的主要差别	7
5.2 绝缘配合程序	8
6 运行中的电压和过电压	9
6.1 避雷器的布置	9
6.2 换流站不同位置的持续运行电压	10
6.3 阀和避雷器上的持续运行电压最大峰值(PCOV)和持续运行电压峰值(CCOV)	10
6.4 过电压类型和来源	11
6.5 避雷器的过电压限制特性	13
6.6 阀的保护策略	13
6.7 研究过电压和避雷器特性的方法和工具	14
6.8 必要的系统情况	15
7 绝缘配合的设计目标	17
7.1 避雷器的要求	17
7.2 绝缘特性	19
7.3 代表性过电压	19
7.4 要求耐受电压的确定	21
7.5 额定耐受电压的确定	22
7.6 爬电距离	22
7.7 空气净距	22
8 爬电距离和空气净距	22
8.1 直流电压下户外绝缘的爬电距离	23
8.2 直流电压下户内绝缘的爬电距离	23
8.3 交流绝缘子外绝缘爬电距离	23
8.4 空气净距	23
9 避雷器要求	24
9.1 避雷器规范	24
9.2 交流母线避雷器(A)	24
9.3 交流滤波器避雷器(FA)	24
9.4 阀避雷器(V)	24
9.5 桥避雷器(B)	26
9.6 换流器单元避雷器(C)	26

9.7 中点直流母线避雷器(MO)	26
9.8 换流器单元直流母线避雷器(CB)	26
9.9 直流母线和直流线路/电缆避雷器(DB和DL)	27
9.10 中性母线避雷器(E)	27
9.11 直流平波电抗器避雷器(DR)	27
9.12 直流滤波器避雷器(FD)	28
9.13 接地极引线避雷器(EL)	28
附录 A (资料性附录) 普通型高压直流换流站绝缘配合的例子	29
A.1 引言	29
A.2 避雷器保护方案	29
A.3 避雷器的负载、保护水平和绝缘水平的确定	29
A.4 换流变(阀侧)耐受电压的确定	32
A.5 空气绝缘的平波电抗器耐受电压的确定	32
A.6 计算结果表	34
附录 B (资料性附录) 可控串联电抗换流器(CSCC)和电容换相换流器(CCC)绝缘配合的例子	38
B.1 引言	38
B.2 避雷器保护方案	38
B.3 避雷器承受的负载、保护水平和绝缘水平的确定	38
B.4 换流变阀侧耐受电压的确定	42
B.5 空气绝缘的平波电抗器耐受电压的确定	43
B.6 计算结果表	43
附录 C (资料性附录) 一些特殊型换流器绝缘配合的确定	51
C.1 背靠背型高压直流系统的绝缘配合程序	51
C.2 并联阀组的绝缘配合程序	51
C.3 使用串联阀组更新原有换流站的绝缘配合程序	52
C.4 交流滤波器连接在换流变的第三个绕组上的绝缘配合程序	53
C.5 高压直流耦合到交流线路上对交流系统过电压的影响	54
C.6 气体绝缘开关对高压直流换流站绝缘配合的影响	54
图 1 典型的两组 12 脉动串联换流器单线图	6
图 2 典型的具有换相电容器的两组 12 脉动串联换流器(CCC)单线图	6
图 3 典型的具有可控串补极的两组 12 脉动串联换流器(CSCC)单线图	7
图 4 高压直流换流站 12 脉动换流器图	9
图 5 换流站不同点的持续运行电压(位置见图 4)	10
图 6 整流运行时阀避雷器上的运行电压	11
图 7 高压直流换流站的一极	16
图 A.1 交流和直流避雷器(普通型高压直流换流站)	35
图 A.2 来自交流侧(普通型高压直流换流站)缓波前过电压对阀避雷器作用的简化电路—缓波前过电压(施加的电压)的图解说明	35
图 A.3 从交流侧来的缓波前过电压在阀避雷器 V2 上的作用(普通型高压直流换流器)	36
图 A.4 换流变压器高压套管(普通型高压直流换流站)接地故障在阀避雷器上作用的电路图	36
图 A.5 换流变(普通型高压直流换流站)高压套管接地故障期间在阀避雷器 V1 上的作用	37

图 B.1a) 交流、直流避雷器(CCC 换流器)	44
图 B.1b) 交流、直流避雷器(CSCC 换流器)	45
图 B.2a) 交流侧来的缓波前过电压对阀避雷器作用的简化电路图(CCC 换流器)	46
图 B.2b) 交流侧来的缓波前过电压对阀避雷器作用的高化电路图(CSCC 换流器)	46
图 B.3a) 交流侧传来的缓波前过电压在阀避雷器(V2)上的作用(CCC 换流器)	47
图 B.3b) 来自交流侧的缓波前过电压在阀避雷器(V2)上的作用(CSCC 换流器)	47
图 B.4a) 换流变的高压套管接地故障在阀避雷器上的作用电路图(CCC 换流器)	48
图 B.4b) 换流变的高压套管接地故障在阀避雷器上作用的电路图(CSCC 换流器)	48
图 B.5a) 换流变高压套管接地故障期间对阀避雷器 V1 上的曲线图(CCC 换流器)	49
图 B.5b) 换流变高压套管接地故障期间在阀避雷器 V1 上作用的曲线图(CSCC 换流器)	49
图 B.6a) 换流变高压套管接地故障期间在 CCC 电容器避雷器 CC 上的作用(CCC 换流器)	50
图 B.6b) 换流变的高压套管的接地故障期间的 CSCC 电容器避雷器 CSC 上的作用 (CSCC 换流器)	50
图 C.1 非联网扩展高压直流换流站	51
图 C.2 使用串联阀组改进原有的高压直流换流器	53
表 1 符号说明	7
表 2 三相交流设备与高压直流换流站设备耐受电压选择的比较	8
表 3 作用于各类避雷器上的主要事例	13
表 4 不同事例对避雷器的作用	15
表 5 过电压源和相应的频率范围	16
表 6 避雷器要求	18
表 7 高压直流换流站直流侧避雷器保护	19
表 8 代表性过电压水平和要求耐受电压水平	20
表 9 要求冲击耐受电压与冲击保护水平的比值	22

前 言

本部分是根据 IEC/TS 60071-5:2002《绝缘配合 第 5 部分：高压直流(HVDC)换流站的绝缘配合程序》(第 1, 英文版)首次制定的。本部分修改采用 IEC/TS 60071-5:2002。

本部分的编排和表述与 IEC/TS 60071-5:2002 基本一致,并符合 GB/T 1.1 和 GB/T 20000.2 的规定。

本部分与 IEC/TS 60071-5:2002 的主要差异在以下几方面:

- a) 本部分在 3.8 中增加了“注:电压水平和功耗可采用计算方法或通过特殊试验确定。”;
- b) 本部分的表 7 删除了 IEC/TS 60071-5:2002 表 7 的最后两行;并在上部换流变-换流器底部的避雷器种类的(2)中增加“和阀避雷器(V)”;
- c) 本部分在 9.10 的第 3 自然段中加入了“中性母线电容器”;并在 9.10 的最后增加了一段“另一种设计方案是在金属回线不接地的另一端和接地极线各安装一组高能耗避雷器(EM 和 EL),分别用于吸收金属回线运行方式和其他运行方式下的操作冲击能耗。中性母线其他位置的避雷器的雷电波保护水平高于 EM 和 EL,确保在操作过电压下不动作,仅用于雷电波保护。EM 和 EL 在制造和出厂试验时可保证多柱并联的特性一致性并宁愿多并联一个备用避雷器,有利于更换及制造备用避雷器。”;
- d) 删除了 IEC/TS 60071-5:2002 的附录 A 的 A6 计算结果表中的与我国电网无关的电压 420 kV 的表注及其内容;
- e) 将目录中的 B.4 和 B.5 的标题与正文进行了统一;
- f) 在附录 B 中,统一了 CCC 和 CSCC 电容器避雷器(CC/CSCC)。本部分的附录 A、附录 B、附录 C 为资料性附录。本部分由中国电器工业协会提出。本部分由全国高压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会(SAC/TC 163)归口。本部分由全国高压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会解释。本部分负责起草单位:西安高压电器研究所、武汉高压研究所。本部分参加起草单位:北京网联直流工程技术有限公司、南方电网技术研究中心、西安交通大学、中国电力科学研究院、西安电瓷研究所、机械工业北京电工技术经济研究所。本部分主要起草人:苟毅锋、周神洪、袁定珍、赵杰、冯建强、吕怀发、李国富、王琨。

引 言

高压直流输电在我国电网建设中,对于长距离送电和大区联网有着非常广阔的发展前景,是目前作为解决高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段。根据我国直流输电工程实际需要和高压直流输电技术发展趋势开展项目,在引进技术的消化吸收、国内直流输电工程建设经验和设备自主研发的基础上,研究制定高压直流输电设备国家标准体系。内容包括基础标准、主设备标准和控制保护设备标准。项目已完成或正在进行制定共19项国家标准:

- (1) 高压直流系统的性能 第一部分:稳态性能
- (2) 高压直流系统的性能 第二部分:故障与操作
- (3) 高压直流系统的性能 第三部分:动态性能
- (4) 绝缘配合 第一部分:高压直流换流站绝缘配合程序
- (5) 高压直流换流站损耗的确定
- (6) 交流变压器 第二部分:高压直流输电用换流变压器
- (7) 高压直流输电用油浸式换流变压器技术参数和要求
- (8) 高压直流输电用油浸式平波电抗器
- (9) 高压直流输电用油浸式平波电抗器技术参数和要求
- (10) 高压直流换流站无间隙金属氧化物避雷器导则
- (11) 高压直流输电系统用并联电容器及交流滤波电容器
- (12) 高压直流输电系统用直流滤波器
- (13) 高压直流输电系统用普通晶闸管的导则要求
- (14) 输电系统的电力电子技术防止无功补偿装置用晶闸管阀的试验
- (15) 高压直流输电系统控制与保护装置
- (16) 高压直流输电噪声
- (17) 高压直流输电管架技术性能测试方法
- (18) 高压直流输电管架控制晶闸管的导则要求
- (19) 直流系统研究用设备成套导则

绝缘配合

第3部分：高压直流换流站绝缘配合程序

1 概述

1.1 范围

本部分给出了无标准绝缘水平规定的高压直流换流站的绝缘配合程序的导则。

本部分仅适用于高压交流电力系统中的高压直流部分,而不适用于工业用的换流设备。所给定的原理及规则仅适用绝缘配合目的。本部分不涉及对人身安全的要求。

1.2 背景描述

在高压直流换流站中,由于换流器采用晶闸管串联或并联组成,并且换流过程采用特有的控制和保护方式,使高压直流换流站与交流变电站相比,对保护及被保护设备的过电压有其特殊的要求。本部分对于承受交直流电压、谐波电压、冲击电压作用的换流站设备给出了计算过电压的指导大纲。提出了确定串并联避雷器的保护水平及最优保护方案。

本部分描述了换流站与常规交流系统绝缘配合不同部分的基本原理和设计目标。

关于避雷器保护,本部分仅涉及现在用于高压直流换流站的无间隙金属氧化物避雷器。给出了对避雷器基本特性要求及运行中最大过电压作用的计算过程,提出了典型的避雷器保护方案、避雷器参数以及所受作用的确定方法。

本部分包括了换流站交流母线(交流滤波器、换流变压器、断路器)和平波电抗器的直流线路侧之间设备的绝缘配合。同时也涵盖了架空线和电缆对换流站设备绝缘配合的影响。

尽管本部分用于普通高压直流系统(换相电压来自交流滤波器母线),但是绝缘配合主要原则也适用于附录中电容换相(CCC)换流器和可控串补换流器(CSCC)及附录中一些特殊的换流器结构。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成协议的各项研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

- GB 311.1—1997 高压输电设备的绝缘配合(neq IEC 60071-1:1993)
 - GB/T 311.2—2002 绝缘配合 第2部分:高压输电设备的绝缘配合使用导则(eqv IEC 60071-2:1996)
 - GB 11032—2000 交流系统无间隙金属氧化物避雷器(eqv IEC 60099-4:1991)
 - GB/T 13498 高压直流(HVDC)输电术语(GB/T 13498—2007, IEC 60633:1998, IDT)
 - GB/T 16927.1—1997 高电压试验技术 第一部分:一般试验要求(eqv IEC 60060-1:1989)
 - JB/T 5895—1991 污秽地区绝缘子使用导则(neq IEC 60815:1986)
 - IEC 60071-1:1993 绝缘配合 第1部分:原理、定义和规则
 - IEC 60700-1:1998 高压直流(HVDC)输电系统晶闸管阀 第1部分:电气试验
- #### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本部分,且许多术语和定义参照绝缘配合的实际概念或避雷器的实际参数。需要得到更多相关信息,请查阅相应 GB 311.1—1997、GB 11032—2000 或 GB/T 13498。

3.1

直流系统电压 d. c. system voltage

最高的对地平均电压或平均运行电压,不包括暂波和换相过冲(IEC 60123 高压直流绝缘子污秽试验)。

3.2

持续运行电压最大峰值(PCOV) peak value of continuous operating voltage
在换流站直流侧设备上持续运行电压的最高峰值,包括换相过冲(见图6)。

3.3

持续运行电压峰值(CCOV) crest value of continuous operating voltage
在换流站直流侧设备上持续运行电压的最高峰值,但不包括换相过冲(见图6)。

3.4

过电压 overvoltages

单相导体对地或相—相导体之间超过交流系统最高运行电压的峰值或直流换流站直流侧的持续运行电压最大峰值(PCOV)的电压。

3.4.1

暂时过电压(TOV) temporary overvoltage

持续时间相对较长的工频过电压。

注:在某些工况下该电压的频率可能比工频高或低几倍。

3.4.2

缓波前过电压 slow-front overvoltage

瞬态过电压,通常是单极性的,到峰值的时间为 $20\ \mu\text{s} < T_r < 5\ 000\ \mu\text{s}$,半峰值时间 $T_f < 50\ \text{ms}$ 。

注:在绝缘配合中,缓波前过电压是根据波形来分类,与来源无关。尽管实际系统中产生的波形与标准波形有很大的偏差,但在多数情况下,本部分以此过电压分类和峰值来描述是足够的。

3.4.3

快波前过电压 fast-front overvoltage

由于雷电放电或其他原因在系统中特定位置引起的过电压,在绝缘配合中按类似于雷电冲击试验标准波形来考虑。

瞬态过电压,通常是单极性的。波前时间为 $0.1\ \mu\text{s} < T_r < 20\ \mu\text{s}$,半峰值时间 $T_f < 300\ \mu\text{s}$ (GB 311.1—1997)。

注:在绝缘配合中,缓波前和快波前过电压是根据波形分类,与来源无关。尽管实际系统中产生的波形与标准波形有很大的偏差,但在多数情况下,本部分以此过电压类别分类和峰值来描述是足够的。

3.4.4

极快波前过电压 very fast-front overvoltage

瞬态过电压,通常是单极性的,波前时间为 $T_r < 0.1\ \mu\text{s}$,总持续时间 $< 3\ \text{ms}$,其叠加振荡频率为 $30\ \text{kHz} < f < 100\ \text{MHz}$ 。

3.4.5

陡波前过电压 steep-front overvoltage

瞬态过电压,属于快波前过电压,到峰值时间为 $3\ \text{ns} < T_r < 1.2\ \mu\text{s}$ 。用于试验的陡波前冲击电压定义如 IEC 60700-1:1998 的图1。

注:波前时间由系统研究决定。

3.4.6

联合过电压(暂时、缓波前、快波前、极快波前) combined overvoltage

由同时施加于相间(或纵)绝缘的两个端子和地之间的两个电压分量组成的过电压。以峰值较高者来确定过电压类型。

- 3.5 代表性过电压 **representative overvoltages**
该过电压对绝缘电介质效应等同于系统在运行时由于不同原因产生的某一给定类型的过电压。
注：在本部分中，一般的代表性过电压都是通过假定或实测的最大值来表征。
- 3.5.1 代表性缓波前过电压 (**RSLO**) **representative slow-front overvoltage**
设备端子间具有标准的操作冲击波形的电压。
- 3.5.2 代表性快波前过电压 (**RFAO**) **representative fast-front overvoltage**
设备端子间具有标准的雷电冲击波形的电压。
- 3.5.3 代表性陡波前过电压 (**RSTO**) **representative steep-front overvoltage**
波前时间小于标准雷电冲击而大于极快波前过电压的电压。
注：用于试验的陡波前冲击电压如 IEC 60700-1 中图 1 所示。波前时间是由系统研究决定。
- 3.6 避雷器的持续运行电压 **continuous operating voltage of an arrester**
 U_c
根据 GB 11032—2000 允许持久地施加在避雷器端子间的工频电压有效值。
- 3.7 包括谐波的避雷器持续运行电压 **continuous operating voltage of an arrester including harmonics**
 U_{ch}
持久地施加在避雷器两端的工频和谐波电压组合的电压有效值。
- 3.8 避雷器等效持续运行电压 (**ECOV**) **equivalent continuous operating voltage of an arrester**
是指等同于避雷器在实际运行电压下产生相同功耗的电压值。
注：电压水平和功耗可采用计算方法或通过特殊试验确定。
- 3.9 避雷器的残压 **residual voltage of an arrester**
放电电流通过避雷器时其端子间的最大电压峰值。
- 3.10 避雷器配合电流 **co-ordination currents of an arrester**
对给定系统中每一种类型的过电压进行研究时，确定代表性过电压时通过避雷器的电流。
GB 11032—2000 中给出了陡波前、雷电和操作冲击电流标准波形。
注：配合电流由系统研究决定。
- 3.11 直接保护的设备 **directly protected equipment**
与避雷器直接并联的设备，它们之间的距离可以忽略。且任何代表性过电压等于相应的避雷器的保护水平。
- 3.12 避雷器保护水平 **protective levels of an arrester**
对于每一种类别的电压，相应于配合电流下的避雷器两端的残压。
下述 3.12.1 到 3.12.3 定义通用高压直流换流站设备。

3.12.1

操作冲击保护水平(SIPL) switching impulse protective level
当避雷器通过操作冲击配合电流时,出现在避雷器上的残压。

3.12.2

雷电冲击保护水平(LIPL) lightning impulse protective level
当避雷器通过雷电冲击配合电流时,出现在避雷器上的残压。

3.12.3

陡波前冲击保护水平(SIPL) steep-front impulse protective level
当避雷器通过陡波前冲击配合电流时,出现在避雷器上的残压。

3.13

配合耐受电压 co-ordination withstand voltage
在实际运行条件下,绝缘结构满足性能指标的每类电压的耐受电压值。

3.14

要求耐受电压 required withstand voltage
在标准耐受试验中确保绝缘耐受满足实际系统运行的配合耐受电压的试验电压值。

3.15

额定耐受电压 specified withstand voltage
经过适当选择的高于或等于要求耐受电压的试验电压(见 3.14)。
注 1: 对于交流设备、额定耐受电压标准值见 GB 311.1—1997。对于高压直流设备,额定耐受电压没有标准值,而是取到方便的可行值。
注 2: 设备耐受试验的标准波形及试验程序在 GB/T 15927.1—1997 和 GB 311.1—1997 中规定,但对一些直流设备(如晶闸管阀),为了能够更为真实的反映实际运行情况,其标准冲击波形可以修正。

3.15.1

额定操作冲击耐受电压(SSIWV) specified switching impulse withstand voltage
标准操作冲击波形的绝缘耐受电压。

3.15.2

额定雷电冲击耐受电压(SLIWV) specified lightning impulse withstand voltage
标准雷电冲击波形的绝缘耐受电压。

3.15.3

额定陡波前冲击耐受电压(SSFIWV) specified steep-front impulse withstand voltage
IEC 60700-1:1998 中规定波形的绝缘耐受电压。

3.16

晶闸管阀保护触发(PT) thyristor valve protective firing
在预先设定的电压下触发晶闸管,保护晶闸管免受正向过电压的方法。

4 符号和缩写

本章仅涵盖了最为常用的符号和缩写,其中一些已经在图 1 单线图 and 表 1 中说明。在高压直流换流站及绝缘配合中采用的更完整的符号,详见规范性引用文件和参考文献。

4.1 下脚标

0(zero)	空载
d	直流电流或电压
i	理想的
max	最大的

与 n 次谐波分量有关的量

4.2 字母符号

K_1	大气校正因数
K_2	配合因数
K_3	安全因数
U_{1n}	包括谐波的避雷器持续运行电压
U_{dc}	理想空载直流电压
U_{lim}	考虑交流电压的测量容差和换流变分接头一级电压偏差的 U_{lim} 最大值
U_1	交流系统的最高电压
U_{ca}	换流变压器阀侧相对空载电压(不包括谐波电压)
α	延迟角,本部分也用作触发电角
β	超前角
γ	关断角(熄弧角)
μ	换相角(重叠角)

4.3 缩写

CCC	电容换相换流器
CSCC	可控串联补偿换流器
CCOV	持续运行电压峰值
ECOV	等效持续运行电压
L IPL	雷电冲击保护水平
PCOV	持续运行电压最大峰值
PF	触发电保护
RFAO	代表性快波前过电压(最大电压值)
RSLO	代表性缓波前过电压(最大电压值)
RSTO	代表性陡波前过电压(最大电压值)
RLI WV	要求雷电冲击耐受电压
RSI WV	要求操作冲击耐受电压
RSFI WV	要求陡波前冲击耐受电压
S IPL	操作冲击保护水平
STI PL	陡波前冲击保护水平
SLI WV	额定雷电冲击耐受电压
SSI WV	额定操作冲击耐受电压
SSFI WV	额定陡波前冲击耐受电压
TOV	暂时过电压

4.4 典型高压直流换流站布置图和相应图形符号

图 1、图 2 和图 3 给出了典型的两组 12 脉动换流桥串联的高压直流换流站的单线图。三个方案的主要差别是在高压直流换流站的交流侧是否有换相电容器(图 2)或可控串联电容器(图 3)。

注:图 1、图 2 和图 3 涵盖了在换流站可能使用的所有避雷器,在具体设计中可能会有所变化,会省去一些避雷器。

表 1 列出了图 1、图 2 和图 3 及部分定义的一些具体图形符号。有关避雷器的名称,设计细则和功能的第 9 章描述。

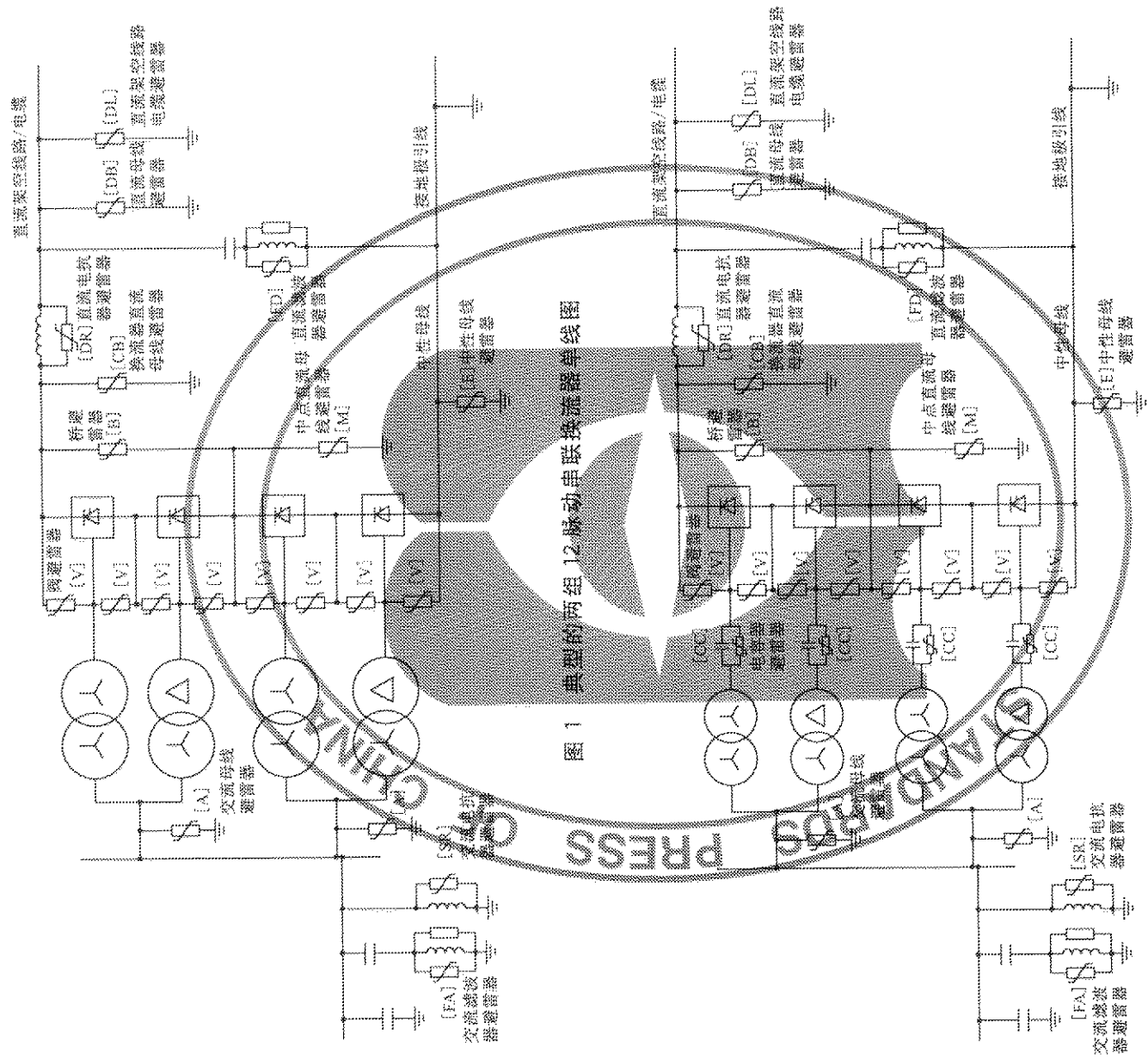


图 2 典型的具有换相电容器的两组 12 脉动串联换流器 (CCC) 单线图

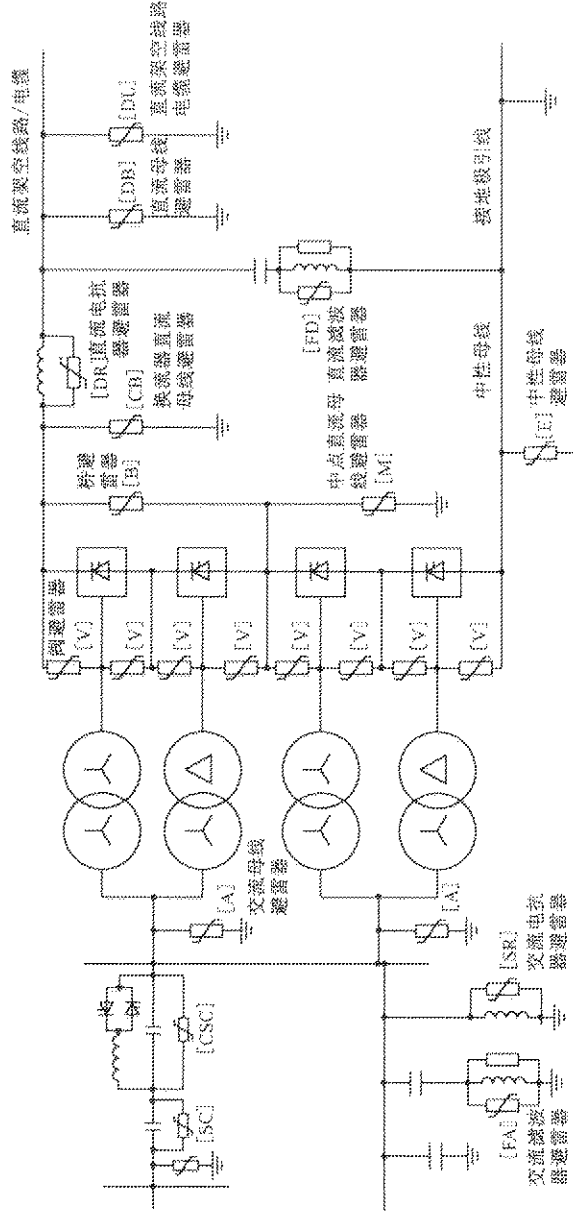


图 3 典型的具有可控串补的两组 12 脉动串联换流器 (CSCC) 单线图

表 1 符号说明

符号	说明
	阀 (换相组)
	阀 (一个臂)
	避雷器
	电阻器
	电抗器
	电容器
	双绕组变压器
	接地

5 绝缘配合原理

绝缘配合的基本目标是：

- 确定系统中不同设备实际可能承受的最大稳态、瞬态和暂时过电压水平。
- 选择设备的绝缘强度和特性，包括保护装置的特性，以保证设备在上述过电压下能够安全、经济和可靠的运行。

5.1 交流和直流系统绝缘配合的主要差别

根据绝缘配合目标，高压直流换流站的绝缘配合与交流变电站具有相同的基本原理；然而，在进行高压直流换流站的绝缘配合时，某些方面与交流变电站相比有一定差别。例如，需要考虑下列情况：

- 并联有避雷器的单个阀串联构成的阀组和远离地电位的端子之间的要求，使直流换流站不同的部位有不同的绝缘水平；
- 由于换流器回路两端换流变压器和平波电抗器的电感，使换流器回路不直接承受外部过电压的作用(见 9.4.3)；
- 在交流和直流两侧均有无功功率源和谐波滤波器；
- 当阀不导通时，换流变阀侧的两个主要绕组对地电位是悬浮的，而阀导通时将会有直流分量电流流过绕组；

- 换流阀的特性及它们的控制；
- 控制和保护对降低过电压的影响；
- 在同一环境下，直流和交流相比，由于直流恒定的电压极性使直流绝缘吸附更多的污秽，导致最严重的污秽和更坏的网絡特性，要求采用更大的爬距和绝缘间隙；
- 长架空线和电缆中间没有加装开关站分段；
- 交流和直流系统之间相互作用，特别是对于相对较弱的交流系统；
- 包括有直流电压，基频电压，谐波电压及高频电压合成的持续运行电压；
- 换流器不同运行方式，例如，单极、双极、并联或多端运行。

5.2 绝缘配合程序

表 2 列出了交流系统(见 IEC 60071-1:1993 的图 1)和高压直流换流站绝缘配合流程之间的比较。高压直流换流站绝缘配合设计的一般方法基本与交流站相同。

其步骤为：

- a) 分析评估高压直流换流站和系统的特性；
 - b) 评估每台设备的绝缘性能；
 - c) 不同种类的电压比过电压的确定；
 - d) 考虑过电压保护方式和作用于避雷器的电流和能量，并确定它们的布置。
- 但是，在进行绝缘配合时，应特别注意交流和直流系统的绝缘特性和电压分布是不同的。

表 2 三相交流设备与高压直流换流站设备耐受电压选择的比较

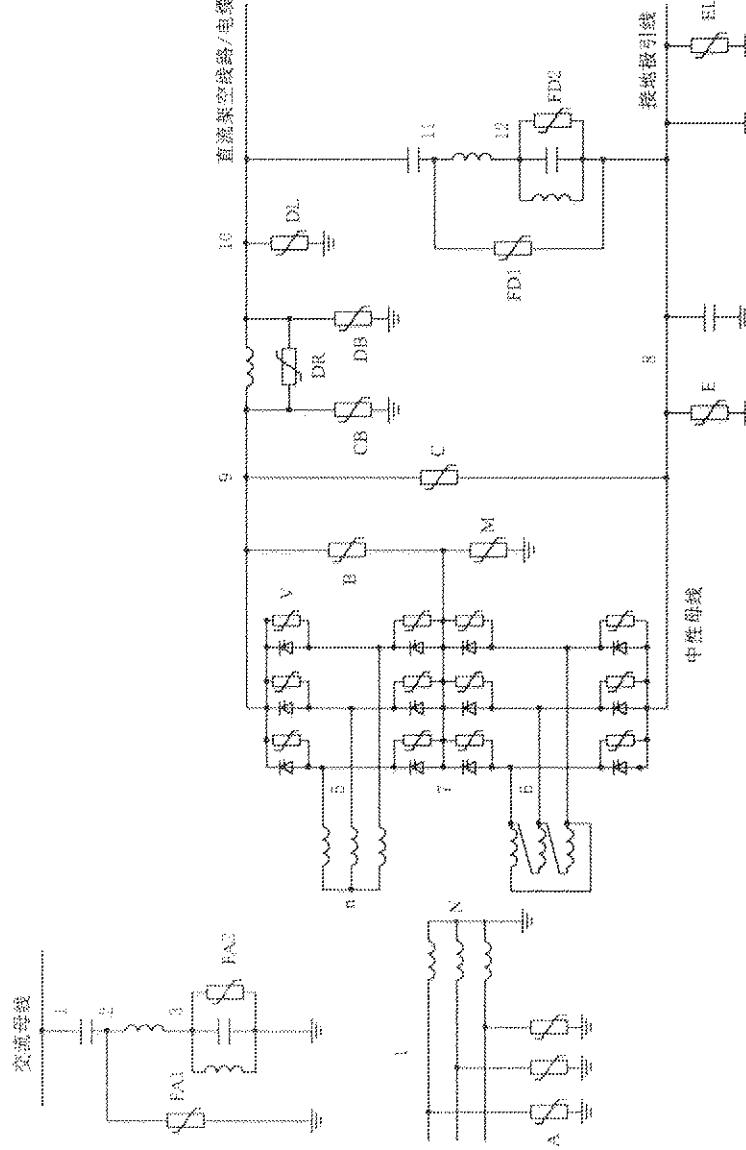
IEC 60071-1:1993 中确定三相交流系统设备耐受电压的选择与 IEC 60071-1:1993 中确定直流系统设备耐受电压的选择与 IEC 60071-1:1993 的差异	
系统分析 ↓ 代表性电压和过电压 ↓ 配合耐受电压	系统分析 (与交流方法相同) ↓ 代表性电压和过电压 (与交流方法相同) ↓ 配合耐受电压
根据标准选择性能指标的绝缘	根据标准选择性能指标的绝缘 (与交流方法相同)
校正因数	考虑型式试验条件和实际运行条件的差别，选择校正因数 (方法与交流相同)
要求耐受电压	要求耐受电压 (方法与交流相同)
选择标准耐受电压	选择交流侧设备标准耐受电压。对于直流设备由于没有标准耐受电压水平因而跳过这一步
额定值或标准绝缘水平，一组标准耐受电压	交流侧设备的一组标准耐受电压。对于直流设备，额定绝缘水平应调整到方便的经验值

6 运行中的电压和过电压

6.1 避雷器的布置

自从 20 世纪 70 年代后期,高压直流换流站的过电压保护就全部以金属氧化物避雷器为主。这很大程度上是由于它们在系统中串联或相互并联的可靠性能和有间隙 SiC 避雷器相比有其优良的保护特性。避雷器的实际布置取决于高压直流换流站的布置结构和输电回路的方式。基本原则是每个电压等级和接于该等级的设备应得到足够的保护,其成本要与设备所期望的可靠性以及设备耐受能力相匹配。

对于一个双极每极 12 脉动的高压直流回路方案,换流桥交流侧和直流输电回路之间典型的避雷器布置如图 4 所示。在某些情况下,根据连接在这一位置上的设备的过电压耐受能力及其他避雷器串联组合对该处提供的过电压保护情况,可省去某些避雷器。例如,桥避雷器(B)和上下桥之间中点避雷器(N)串联组合对直流母线提供保护,代替换流器单元直流母线避雷器(CB)。



注：图中涵盖换流站使用的所有避雷器,但在具体设计中有所不同。

图 4 高压直流换流站 12 脉动换流器图

每极两个 12 脉动换流器和背靠背站可以使用类似的保护布置。在背靠背情况下,由于运行电压远低于架空线路或电缆输电方式,所以在换流器和直流场中通常仅需要阀避雷器(V)。当然,有时包括中点避雷器(N)和桥避雷器(B)。

对于直接连接到直流电缆的高压直流换流站,因为极线不可能直接承受快波前过电压作用,直流线路或电缆避雷器(DB 和 DL)也可能被省掉。

在高压直流换流站的交流侧,相对地避雷器(A)对换流器交流母线和交流滤波器母线进行保护。

在交、直流滤波器中,滤波器电抗器的保护避雷器一般并接在电抗器的两端或从电抗器的高压端到地,如图 4 所示。

在直流电缆和架空线路组合系统中,电缆端部可能安装有避雷器限制来自架空线路的过电压。

对避雷器的要求及需要在第 9 章中更为详细地讨论。

选择避雷器布置的基本原则如下:

- 交流侧产生的过电压,应主要由交流母线避雷器(A)限制;
- 直流场或接地引线产生的过电压,由直流线路/电缆避雷器(DB和DL),换流器母线避雷器(CB),中性母线避雷器(E)来限制;
- 对于高压直流换流站内的过电压,关键设备元件应直接由可靠连接的避雷器保护。例如:阀避雷器(V)保护晶闸管阀;交流母线避雷器(A)保护换流变的网侧绕组;换流变阀侧绕组由桥避雷器(B)、中点避雷器(M)和一个阀避雷器(V)串联组合提供保护。然而,当直流换流站的换流变与换流桥断开时,对换流变阀绕组应采取保护措施。

6.2 换流站不同位置的持续运行电压

图5给出了图4换流站典型结构中不同点对地(G)或对另一点不包括换相过冲的持续运行电压的典型波形。

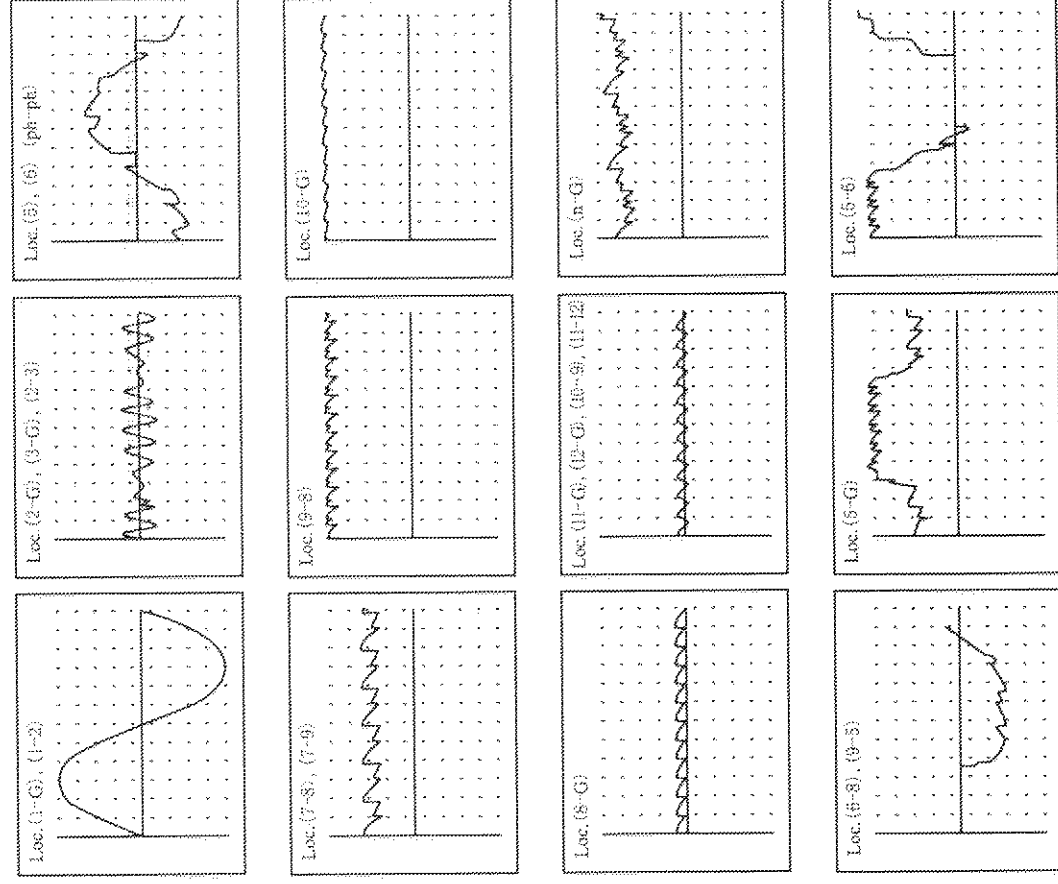


图5 换流站不同点的持续运行电压(位置见图4)

6.3 阀和避雷器上的持续运行电压最大峰值(PCOV)和持续运行电压峰值(CCOV)

高压直流避雷器承受的持续运行电压不同于交流避雷器,它不只是单一的工频电压而是直流电压,基频电压,谐波电压和高频瞬态电压的合成。

阀的开通与关断产生的转换瞬态电压叠加在换相电压上,特别是在阀关断时,换相过冲增加了换流变阀侧绕组的电压,并作用在阀和避雷器上。换相过冲的幅值由以下因素决定:

- 晶闸管的面有特性(特别是反向恢复电荷);

- 阀中串联连接晶闸管的反向恢复电荷分布;
- 单个晶闸管级的阻尼电阻和电容器;
- 在阀和换流回路中的各种电容和电感;
- 触发角与换相角;
- 阀关断时刻的换相电压。

应该特别注意阀避雷器和直流侧其他避雷器对于换相过冲的能量吸收。

图 6 表示了阀和阀避雷器(V)的持续运行电压波形。持续运行电压峰值(CCOV)正比于电压 U_{lim} , 由下式给出:

$$CCOV = \frac{\pi}{3} \times U_{lim} = \sqrt{2} \times U_{vo}$$

U_{lim} 和 U_{vo} 的定义参见 4.2。

应特别注意, 当阀以大的延迟角 α 运行时, 将会增大换相过冲, 有可能使避雷器过载。

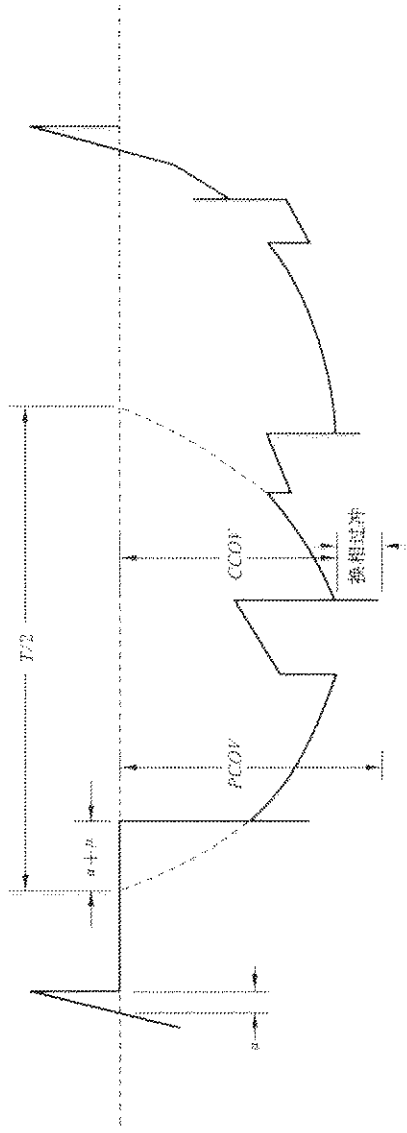


图 6 整流运行时阀避雷器上的运行电压

6.4 过电压类型和来源

交流侧的过电压来源于操作、故障、甩负荷或雷电。交流网络的动态特性、阻抗及对主要瞬态振荡频率的有效阻尼, 换流变压器的模型, 静态、同步补偿和滤波器组件的模型, 对过电压的计算都很重要。如果交流场有较长的母线, 在计算过电压和确定避雷器位置时还应考虑距离的影响。

直流侧的过电压来源于交流系统或直流线路和/或电缆, 站内的闪络及其他故障事件。

在评估过电压时, 交流和直流系统的结构、阀和控制的动态性能、最苛刻工况组合在 6.8 中讨论, 对避雷器要求的影响在第 9 章中讨论。

6.4.1 交流侧的缓波前和暂时尚过电压

发生在交流侧的缓波前和暂时尚过电压对研究避雷器应用是极为重要的, 它与交流最高运行电压一起确定了高压直流换流站交流侧的过电压保护和绝缘水平。同时也影响到阀的绝缘配合。

高压直流站交流母线上的缓波前过电压, 可能由操作连接在换流站交流母线上的变压器、电抗器、静态无功补偿, 交流滤波器和电容器组, 故障初始和清除以及线路合闸和重合闸操作等引起。缓波前过电压仅在瞬态的前半个周期具有高幅值, 随后几个周期幅值明显降低。远离高压直流换流站的交流网络上产生的缓波前过电压通常低于发生在换流站母线附近的过电压。

在设备的运行寿命期间, 换流站交流母线上的设备可能出现多次操作。常规的开断操作引起的过电压一般比故障引起的缓波前过电压要低。但是在极少的情况下断路器开断时会产生重燃现象而使过电压升高。

在选择高压直流换流站的交流避雷器时, 应考虑到交流网络上原有的避雷器与换流站避雷器的并联。避免原有避雷器在缓波前和暂时尚过电压下过载。

6.4.1.1 运行操作引起的过电压

在正常的运行操作中,因断路器频繁操作,一般不希望保护设备的避雷器吸收相当大的操作过电压能量。因此,为了限制断路器在日常操作时产生的过电压,在断路器上装有合闸电阻、同步合闸器和选相合闸装置或在断路器的断口上并联避雷器,高压直流控制系统也能有效的阻尼一定的过电压,如暂态过电压。

由于磁饱和效应,变压器的励磁会引起涌流,包括二次和其他低次谐波的分量。如果有一个或多个谐波电流满足谐振条件,在低阻抗网络中将产生高的谐波电压并导致过电压,因为高压直流换流站有交流滤波器和电容器组,所以谐振情况更严重。特别是这些电容降低了谐振频率,可能会引起二次、三次谐波,该谐振过电压持续时间会达到数秒,例如暂态过电压。

6.4.1.2 接地故障引起的过电压

当交流网络发生非对称故障时,由于零序网络的影响,在健全相上就会产生暂态和瞬态过电压。高压直流换流站与中性点直接接地的交流系统连接情况下,瞬态过电压(相对地)通常在 $1.4 p.u$ 到 $1.7 p.u$ 的范围内,暂态过电压在 $1.2 p.u$ 到 $1.4 p.u$ 之间。

高压直流换流站母线附近发生的单相或三相故障清除后,变压器的饱和取决于故障时刻和故障清除时刻。因此在研究这些现象时必须改变一些故障条件。有关这些故障工况在第9章进一步讨论。

最高的暂态过电压通常发生在三相突然短路并完全无负荷时,如果此时换流器因故障闭锁而滤波器件又没有及时退出。滤波器和电容器组与交流系统可能形成低频谐振。从故障引起的过电压及对避雷器能耗观点讲,此种暂态过电压更为苛刻。滤波器调谐或二次到五次谐波频率下的阻尼,通常能有效减少电压的畸变和降低对避雷器的能耗,但是成本很高。而采用交流有源滤波器能达到此目的。

6.4.2 直流侧缓波前和暂态过电压

除了通过换流变从交流侧传递到直流侧的过电压之外,直流侧缓波前和暂态过电压绝缘配合主要由直流侧的故障和产生在直流侧的缓波前过电压确定。

需考虑的故障事件有:直流线路接地故障、直流侧操作、接地极引线开路、由于换流器控制故障(例如,完全丢失触发脉冲)误触发、换相失败、换相失败、换流器单元内部接地故障和短路,将交流电压叠加到直流电压。这些偶然事件在第9章较详细地讨论。

如果整流侧没有采取任何措施防止逆变侧开路,需考虑逆变侧开路时,整流侧全电压起动的情况。

在换流桥单元串联的换流站中,应考虑某些事件。例如一个换流桥投入旁通对,而另一个换流桥正在运行的情况,尤其是在逆变运行时。特别注意换流桥单元并联的绝缘配合。有关这些和其他特殊的换流器结构的更多情况见附录C。

6.4.3 快波前,极快波前和陡波前过电压

高压直流换流站的不同区域应该使用不同的方法评估快波前和陡波前过电压。这些区域包括:

- 从交流线路到换流变网侧端的交流开关场区域;
- 从直流线路到平波电抗器线路端的直流场区域;
- 从换流变的阀侧到平波电抗器的阀侧端的换流器区域。

换流器区域由串联电抗与其他两区域隔开,即:一端为平波电抗器电抗,另一端为换流变漏抗。对于雷击在换流变交流侧和平波电抗器外的直流侧引起的行波,由于串联电抗和对地电容共同作用将会衰减,波形类似于缓波前过电压(也可能经电容传递,如9.4.3中讨论)。因此,它们作为换流器部分缓波前过电压进行考虑。

交、直流开关场区域的波阻抗相对架空线路波阻抗较低,与多数普通交流场的差别是存在交流滤波器、直流滤波器及大容量并联电容器组。这些都会对侵入的过电压有衰减作用。

在高压直流换流站及阀厅内的接地故障引起的陡波前过电压对绝缘配合是非常重要的,尤其是阀侧接地故障。这些代表性过电压的波前时间一般为 $0.5 \mu s$ 到 $1.0 \mu s$,持续时间达 $10 \mu s$ 。陡波前过电压幅值和波形通过数字仿真研究确定。而峰值和电压上升到峰值的变化率则更为重要。

在交流场区域,气体绝缘开关设备(GIS)中的隔离开关或断路器的操作或许能够产生波前时间为5 ns到150 ns的极快波前过电压。有关GIS设备中的更进一步信息在C.6中给出。

6.5 避雷器的过电压限制特性

在新建的高压直流换流站和对已运行直流换流站的避雷器更换时广泛使用无间隙金属氧化物避雷器来作为保护设备。由于它们低的动态阻抗和高的能量吸收能力,使其与有间隙SiC避雷器相比成为更好的过电压保护设备。如果选择特性很匹配的金属氧化物避雷器并联时,避雷器就能吸收期望的能量。金属氧化物阀片可以在一个避雷器单元中几路并联,也可几个避雷器单元并联来达到设计的能量要求。在需要时也可以采用金属氧化物阀片并联降低避雷器残压。

对于金属氧化物避雷器,电压 U 与电流 I 的关系式为:

$$I = k \times U^\alpha;$$

k 是一个常数, α 是金属氧化物非线性系数。在避雷器的运行范围内,氧化锌的这个系数很高,典型的范围为30~50,而有间隙碳化硅避雷器的典型值为3。

避雷器的保护特性是用避雷器在运行中通过最大的陡波、雷电和操作冲击电流时的残压来确定的。定义避雷器保护水平典型电流波形是:雷电冲击保护水平(LIPL)为8/20 μ s,操作冲击保护水平(SIPL)为30/60 μ s。陡波前冲击保护水平(STIPL)常用波前时间为1 μ s的冲击电流来确定。由于避雷器阀片高的非线性系数,不同的代表性电流将会导致避雷器上有不同的电压波形。保护水平规定的电流幅值(称作配合电流)依据避雷器的安装位置 and 不同类型的电流波形有不同的选择。有关配合电流在最后设计阶段详细研究确定(见6.7)。

在交流侧使用的避雷器额定电压和持续运行电压的具体确定与交流系统相同。避雷器额定电压就是施加到避雷器端子间的最大允许工频电压有效值。按照此电压设计的避雷器,能在所规定的动作负载试验中确定的暂时过电压下正确工作。最大持续运行电压是表明避雷器运行特性规范的一个参考参数。

对于高压直流换流站的直流侧避雷器,没有定义额定电压。持续运行电压的定义不同于交流系统。因为在许多情况下连续出现在避雷器两端电压的波形是直流上叠加有基频和谐波分量,在一些情况下还有换相过冲。

直流避雷器以持续运行电压最大峰值(PCOV)、持续运行电压峰值(CCOV)和等效持续运行电压(ECOV)定义其参数(定义见第3章)。这就意味着对特殊应用的避雷器的试验应作调整,其具体试验不同于交流避雷器常规的标准试验。避雷器的能量要求应该考虑波形及幅值、持续时间和放电次数。

对于滤波器避雷器还应考虑谐波引起的较高损耗。

6.6 阀的保护策略

阀避雷器(V)的主要目的是限制晶闸管阀上出现过高的过电压。避雷器和晶闸管正向保护触发阀的过电压保护。由于阀的成本和阀的损耗近似似的正比于阀的绝缘水平,所以应选取尽可能低的避雷器保护水平保证阀的绝缘水平。

阀避雷器保护水平与保护触发水平的配合有两种不同方案。第一种方案,阀避雷器限制阀正向及反向出现的过电压,设置阀保护性触发水平高于避雷器保护水平。在这种情况下,保护性触发的作用是出现快速瞬态电压或陡波电压在阀内部引起的严重的非线性电压分布的情况下对单个晶闸管进行过电压保护。第二种方案,避雷器限制阀反向过电压,保护触发水平设置为阀避雷器保护水平的90%~95%作为主要的正向过电压保护。因此,第二种方案仅用于晶闸管的反向耐受电压高于晶闸管正向耐受电压的情况。这样通常使阀的晶闸管级的个数少于第一种方案,带来成本的降低和换流器效率的提高。保护触发水平临界值应设置到足够高,确保在最高的暂时过电压(考虑换相瞬时和电压不平衡)或是频繁事件(例如开关操作)时保护触发不启动,以此减少功率传输中断,并且发生接地故障时保持运行,故障后有利于加速恢复。

6.7 研究过电压和避雷器特性的方法和工具

这里讨论确定换流站过电压特性以及所需避雷器特性的总体研究方法和工具。研究的目标如下(详见第7章):

- 确定高压直流换流站中避雷器的保护水平和负载;
- 形成高压直流换流站中绝缘配合的基础;
- 确定所有避雷器的规范。

6.7.1 总的依据、研究方法和研究工具

为了进行研究,需要以下信息,更详细的情况见6.8:

- 高压直流换流站的布置结构,以及交流和直流系统数据;
- 连接在交流侧和直流侧的设备数据(例如,变压器、线路等);
- 避雷器特性;
- 换流器控制和阀保护,包括阀保护触发回路的响应和延迟;
- 运行条件;
- 阀保护策略(阀保护触发的响应)。

过电压的研究方面由下面步骤组成。

第1步:初步确定避雷器的结构和参数,如 U_1 、 U_2 、PCOV和/或CCOV;

第2步:研究产生最大电流和能量的工况。在这个过程中,确定避雷器的最小柱数和额定参数,考虑避雷器的负载及其他偶然事件;

第3步:使用暂态和陡波前过电压验证在第1步和第2步确定的避雷器布置,确保高压直流(HVDC)换流站有足够的保护,应考虑距离效应也可能增加一些额外避雷器;

第4步:基于初步结果确定避雷器作用(配合电流/电压/能量)并确定避雷器的规范(见7.1和9.1);

第5步:确定避雷器布置的最大过电压和耐受电压(见7.8)。

研究避雷器的动作负载的一般原则是,确定避雷器能量吸收选用避雷器的最小(CV-D)保护特性,确定保护水平选用最大(CV-D)保护特性。

尽管有许多工具可用于计算过电压和避雷器动作,但每一种研究工具的关键是所使用的模型能否正确的模拟电力系统事件和获得模型必要的特性。为了得到正确的结果,需要对系统组件在研究的频率范围内正确模拟。使用数字瞬态分析方法的数字计算机程序可用于这些计算。用于高压直流模拟设置的TNA也是一种可行的研究工具。

实时数字仿真器是一种有效的研究工具,但是在目前条件下,这些工具由于时间步长限制,可能不适用于高频过电压的研究。

6.7.2 研究的事件

6.2至6.4描述了高压直流换流站避雷器可能受到的持续、暂时、缓波前、快波前和陡波前过电压的作用。这些事件和作用见表3和表4中的描述。

表3是作用于各类避雷器上的事例。表4是不同事例对避雷器的作用,涉及到不同避雷器所承受过电压的类型,以及特殊故障事件对避雷器电流和能量是否有显著影响。在详细研究中,这些信息常用来决定相关的系统模型。

换流器的偶然事故(如换相失败或逆变器闭锁时没有投旁通对)对确定高压直流换流站避雷器的保护水平和能量要求并不是关键。然而,当逆变器闭锁时电流中断对避雷器的能量要求是至关重要的,某些换相失败的情况可能很严重(如:激发谐振或直流返回回路为高阻抗与低保护水平中性母线避雷器(E)相结合的事故)。

表3 作用于各类避雷器上的主要事例

事例	避雷器(避雷器布置见图4)											
	FA1	A	V	M	CB	E	DR	DB	FD1	FD2		
直流母线接地故障	FA2				C							
从直流线路侵入的雷电冲击						X	X	X	X	X		
从直流线路侵入的缓波前过电压						X	X	X	X	X		
从接地引线侵入的雷电冲击						X						
阀交流侧相接地故障			X	X		X	X					
三脉动换流组电流中断			X									
六脉动桥电流中断			X	X								
单极运行时失去直流返回路径或换相失败						X						
交流侧接地故障和运行操作	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
从交流侧侵入雷电冲击	X	X										
站的屏蔽失效(如果适用)			X	X	X							

注:一些事例的发生概率太低而不必考虑。

表4 不同事例对避雷器的作用

偶然故障	快波前和陡波前过电压作用		缓波前和暂态过电压作用	
	电流	能量	电流	能量
直流级接地故障	E,FD1,FD2	E,FD1,FD2	DB,DL,DR,E	E
从直流线路侵入的雷电冲击	DB,DL,FD1,FD2,DR,E			
从直流线路侵入的缓波前过电压			DB,DL,E,FD1,FD2	
从接地电极引线侵入的雷电冲击	E			
桥的交流相接地故障	V,B		DR,V,B,E,M	V,B,E,M
三脉动换流组电流中断			V,B	V,B
六脉动换流组电流中断			M,V,B	M,V,B
单极运行时失去直流返回路径和/或换相失败			E	E
交流侧接地故障和开关操作	FA1,FA2	FA1,FA2	V,M,CB,A,FA1,FA2,E,FD1,FD2,DR,C,B	V,B,A,E,FD1,FD2
从交流系统侵入的雷电冲击	A,FA1,FA2			
站的屏蔽失效(如果适用)	V,M,CB,C,B			

6.8 必要的系统情况

6.8.1 模型和系统总的描述

为了绝缘配合的研究,网络组件模型的有效频率范围尽可能从直流到 50 MHz。然而使所有网络器件模型在全频范围内有效是很难达到的。在关注的频率范围内,不同参数将对元件的正确表示有不同的影响。

当模型不完整时,如果设计的模型经实践证明是满意的也可以使用。如变压器模型的准确性就有限。从一个稳态过渡到另一个稳态的期间将出现瞬态现象。在系统中这种干扰的主要原因是分合断路器或操作其他设备、短路、接地故障或雷电冲击。随后发生的电磁现象是线路上、电缆或母线段上的行波和系统中电感和电容之间产生的振荡。振荡频率由连接线路的波阻抗和传输时间来确定。

表 5 给出了这些瞬态过程的各种起因以及频率范围的概况。建模时需要这些频率范围。

表 5 过电压源和相应的频率范围

组	典型的频率范围	主要的代表过电压	过电压产生的源
I	0.1 Hz~3 kHz	暂时过电压	<ul style="list-style-type: none"> 变压器励磁(铁磁谐振) 甩负荷 接地故障发生和清除,线路自激
II	50 Hz~20 kHz	缓波前过电压	<ul style="list-style-type: none"> 出线端接地故障 近区故障 合闸/重合闸
III	10 kHz~3 MHz	快波前过电压	<ul style="list-style-type: none"> 快波前过电压 断路器重击穿 线内故障
IV	1 MHz~50 MHz	陡波前过电压	<ul style="list-style-type: none"> 隔离开关操作 变电站 GIS 内的故障 网络

图 7 是整个系统结构图。从绝缘配合的观点讲,可将整个高压直流换流站,包括交直流线路,按过电压来源分为不同的区域。这些区域或子系统包括:

- 交流网络;
- 高压直流换流站交流部分,包括交流滤波器和其他无功源,断路器,断路器和换流变网侧;
- 换流桥,换流变网侧,直流平波电抗器,直流滤波器和中性母线;
- 直流线路和接地极线路/电缆。

在确定研究模型时,应考虑这些部分或子系统,在不失去研究结果有效性的前提下,其模型可以详细也可适当简化。

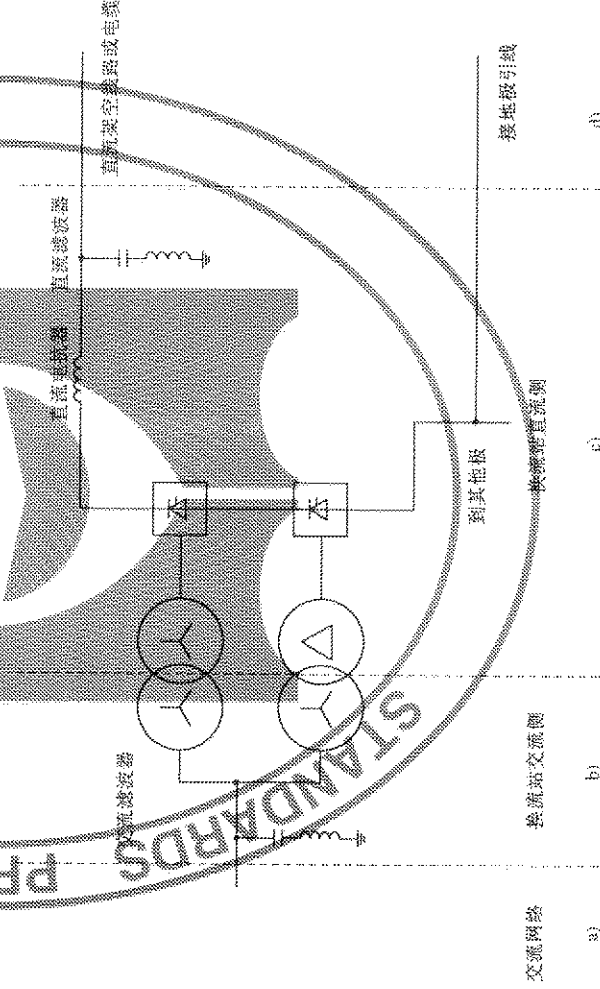


图 7 高压直流换流站的一极

6.8.2 交流网络和高压直流换流站的交流侧

6.8.2.1 缓波前和暂时过电压

- 高压直流换流站附近的交流网络采用详细的三相模型或合适的等值模型;包括换流站出线、临近的变压器(包括它们的饱和特性)以及电气上接近的换流器。从高压直流换流站望出的等值网络作为模拟交流系统的主要部分,但也应考虑在各谐波频率上可产生阻尼的负荷的影响;
- 安装在高压直流换流站交流侧的设备,包括任何无功电流和换流变压器。换流变模型的饱和特性是一个关键参数;

c) 在几百 Hz 频率范围内模拟交流母线和滤波器避雷器特性。

6.8.2.2 快波前和陡波前过电压

- a) 交流线路和母线等使用高频率参数模型；
- b) 包括杂散电感和电容的交流滤波器元件；
- c) 波在交流线路上传播时间超过所研究事件的整个计算时间时，交流线路可用波阻抗表示；
- d) 带有绕组设备的所有杂散电容，用对地和跨越在设备两端的集中电容表示；
- e) 在表 5 给出的合适的频率范围内考虑避雷器特性；
- f) 接地系统、接地连接和闪络电弧应使用合适的模型。

6.8.3 直流架空线路/电缆和接地极引线

6.8.3.1 缓波前和暂态过电压

- a) 根据表 5 从直流到 20 kHz 频率范围模拟直流线路及接地极引线；
- b) 在几百 Hz 频率范围内，模拟直流和中性母线避雷器特性。

6.8.3.2 快波前和陡波前过电压

- a) 直流线路、接地极引线及母线应使用足够高的高频参数模型。若波在短线路传播中从远端反射回来，不与所研究的事件波过程相交，短的线路可用波阻抗模拟。线路绝缘于 50% 闪络电压水平决定了此类过电压的幅值；
- b) 以表 5 中的频率范围确定直流和中性母线避雷器特性；
- c) 对接地连接和闪络电弧也应考虑使用合适的模型。

6.8.4 高压直流换流站的直流侧

6.8.4.1 缓波前和暂态过电压

- a) 直流换流站内直流侧设备（直流通抗器、阀、直流滤波器、中性母线避雷器和电容器等）需要模拟；
- b) 在几百 Hz 频率范围内模拟直流侧避雷器特性；
- c) 控制和保护对过电压作用也应予以考虑，特别是计算暂态过电压时。

6.8.4.2 快波前和陡波前过电压

- a) 直流侧设备（直流通抗器，直流滤波器，阀等）的模拟应包括杂散电感和电容；
- b) 带有绕组设备的所有杂散电容，用对地和跨越在设备两端的集中电容表示；
- c) 在适当频率范围内模拟避雷器特性；
- d) 由于控制和保护对这些快速瞬态电压来不及响应，所以对快波前和陡波前过电压的作用不需考虑。

7 绝缘配合的设计目标

5.1 已经讨论了交流和直流系统进行绝缘配合时的一些差异。本章将具体定义绝缘配合达到的设计目标。本条款在某种程度上适用于高压直流换流站的交流侧，特别是数个阀组串联，而更大程度上适用于直流侧。必须安装合适的避雷器（见图 4）保护与地隔离的阀和其他设备。

第一个设计目标就是根据 6.8 讨论的所有有用的或是收集到的必要的系统资料确定避雷器安装位置。这些避雷器不仅是直流换流器本身的，而且也包括交流网络、直流极线、接地极引线、电缆和换流站交流侧。第二个重要的设计目标是根据 7.1 对避雷器的要求而进行的设计与研究。这些研究总体上（但并非必须）基于 6.7 讨论的方法和工具计算和评价各种瞬时事件对各类型避雷器的作用。

主要目标是确定达到期望可靠性所必需和规定的耐受电压。

以下条款给出了设计目标的项目和提供设计结果的方法。

7.1 避雷器的要求

表 6 对每一类避雷器（参考图 4）在绝缘配合设计中的目标提出了不同的要求。建议的避雷器组和单个项目以明确的表格形式给出。

表 6 避雷器要求

避雷器类型 ^{a)} (见图 4)	U _{10kV} kV (有效值)		CCOV kV (幅值)		PCOV kV (峰值)		ECOV kV (有效值)		SIPL kA (峰值)		LITL kA (峰值)		STPL ^{b)} kA (峰值)		ID
	在相应于配合电流下的避雷器保护水平 ^{c)}														
持续运行电压 ^{d)}															
I 交流部分															
A															
FA1, FA2															
II 直流回路															
VI	N.A.														
V2	N.A.														
B	N.A.														
M	N.A.														
CB	N.A.														
DB	N.A.														
III 直流部分															
DL	N.A.														
E	N.A.														
DR															
FDI, FD2	N.A.														
EL	N.A.														

^{a)} 缩写见第 4 章, 定义见第 3 章;
^{b)} 图 4 是普通型的高压直流换流站避雷器布置, 依据具体情况可增加避雷器;
^{c)} 避雷器的 STPL;
^{d)} 对避雷器的保护水平的定义和缩写见第 3 章、第 4 章、6.5 中给出相应冲击电流波形的一般信息。
 注: N.A. = 不适用。

7.2 绝缘特性

如同交流变电站,高压直流换流站也有两种类型绝缘,自恢复型绝缘(如空气)和非自恢复型绝缘(如油和纸)。但是,气体可用作两种绝缘类型。在直流应用中应该考虑直流、交流和冲击(包括正负极性)电压共同作用下的绝缘特性。绝缘的单一特性不包含在本部分的范围内。

7.3 代表性过电压

GB 311.1:1997 中定义的代表性过电压,是被证实的每种类型过电压中的最大过电压。这种一般的概念适用于交流和直流系统。但在直流系统中,代表性过电压是等于直接保护设备的避雷器的保护水平。

7.3.1 避雷器布置和绝缘结构的影响

7.3.1.1 单个避雷器直接保护的绝缘

单个避雷器直接保护点之间的最大过电压(如图 4 中 5 点到 9 点的阀避雷器 V)是由避雷器特性和流过避雷器的配合电流确定的。

7.3.1.2 多个避雷器串联保护的绝缘

对于不是由一个避雷器直接保护的绝缘,其保护方式如表 7 所示,通过一定数目的避雷器串联实现。在这种情况下,被保护两点之间的最大过电压等于故障时流过每一个避雷器电流产生的最大过电压之和。

7.3.1.3 换流变阀侧中性点的绝缘

中性点的最大缓波前过电压和暂时过电压与表 7 中确定的相应的交流相对地电压相同。

7.3.1.4 换流变阀侧及网侧相间绝缘

换流变阀侧及网侧相间可能出现缓波前过电压,且作用于开关场两个导体之间的空气间距上。这对于低电压系统不是问题,但在高压交流系统和许多阀桥串联的情况下,应考虑最大电压并且要相应地设计开关场的两个导体空气间距。

换流变内部根据结构的不同,在内部绕组不同点有不同的电压作用(两绕组或三绕组,单相或三相变压器)。

7.3.1.5 综述表

表 7 是基于图 4 的一个例子,在实际应用中,应根据设计规范要求建立一个表格。

表 7 高压直流换流站直流侧避雷器保护

保护项目	避雷器种类	说 明
阀的端子之间	阀避雷器(V)	
换流器端子之间	(1) 换流单元避雷器(C) (2) 直流母线中点避雷器(M)和中性 母线避雷器(E)	对于下部换流器可能有不同的选择
直流母线中点	中点直流母线避雷器(M)	
平波电抗器阀侧直流母线	(1) 直流母线避雷器(CB) (2) 换流单元避雷器(C)和直流母线 中点避雷器(M)	(1) 可以给出较低水平保护 (2) 可以给出较低的避雷器作用
中性母线	中性母线避雷器(E)	
平波电抗器线路侧直流母线	直流线路避雷器(DL)	
平波电抗器端子之间	平波电抗器避雷器(DR)	可省略
网交流侧相对地		
下部换流变—换流器底部	阀避雷器(V)和中性母线避雷器(E)	

表 7(续)

保护项目	避雷器种类	说 明
上部换流变—换流器底部	(1) 两个阀避雷器(2V)和中性母线避雷器(E)	(1) 换流器解锁
	(2) 中点直流母线避雷器(M)和阀避雷器(V)	(2) 换流器闭锁

7.3.2 代表性过电压的汇总

确定表 8 中代表性过电压是通过考虑相关的故障检验计算结果以及求得代表性过电压,即缓波前、快波前或陡波前过电压。当过电压类型确定后,通过如 GB/T 311.2—2002 第 2 章的波形和持续时间调整过电压波形的峰值。也可以通过 7.4 中的避雷器保护水平使用配合因数调整。

表 8 代表性过电压水平和要求耐受电压水平

绝缘位置	与保护水平相对应的代表性过电压水平				要求耐受电压水平 (U_{50} 如 GB 311.1—1997)	
	SIPL RSLO kV	LIPL RFAO kV	STIPL ^a RSTO ^b kV	操作波 kV	雷电波 kV	陡波前波 kV
I 交流开关场部分						
交流母线和常规设备,1						
滤波电容器						
a) 高压侧,1-2						
b) 低压侧或中性侧,3						
滤波电抗器						
a) 高压侧,2						
b) 低压侧或中性侧,3						
c) 电抗器两端,2,3,3						
II 换流站户内设备						
阀两侧,5-9,7-5,6-7,6-8						
下六脉动桥两端,7-8						
上六脉动桥两端,9-7						
一相阀对另一相阀,5 相—相和 6 相—相						
直流中点母线对地,7						
每一个换流器单元的高压侧,5						
每一个换流器单元的低压侧,8						
高压直流母线(户内),9						
直流中性母线,8						
III 直流侧设备						
平波电抗器两端,10-9						
滤波器电容						
a) 高压侧,10-11						
b) 低压侧或中性母线侧,12-8						

表 8 (续)

绝缘位置 除非特别指出从一个端子到另一个端子,否则都是端子对地 图 4 和图 7 及表 7 给出参考说明	与保护水平相对应的代表性过电压水平				要求耐受电压水平 (U_{cw} 如 GB 311.1—1997)	
	SIPL	L IPL	STIPL ^a	操作波	雷电波	陡波前波
	RSL0 kV	RFAO kV	RSTO ^a kV	kV	kV	kV
滤波器电抗器						
a) 高压侧, 11						
b) 低压侧或中性侧, 12						
c) 电抗器两端, 11-12, 12-8						
直流母线(户外), 10						
直流线路, 10						
接地电极引线, 8						
其他设备如变压器、阀、绕组(在油中)						
星形绕组						
a) 相对中性点, 5-n						
b) 相对另一相, 5 相—相						
c) 中性点对地, n						
d) 相对地, 5						
三角绕组						
a) 相对地, 6						
b) 相对相, 6 相—相						
星形绕组对三角绕组, 5-6						

^a 阀避雷器的 STIPL 和 RSTO。

7.4 要求耐受电压的确定

和交流系统一样,设备按 GB 311.1—1997 分为自恢复绝缘设备和非自恢复绝缘设备。自恢复绝缘主要为空气间隙和瓷外绝缘,而非自恢复绝缘主要是用于变压器和电抗器的油和纤维电介质材料。在某些情况下晶闸管阀的绝缘也是自恢复的。在阀的维护周期内,为了保证晶闸管级在随机事故下也能满足要求耐受电压,阀中提供有冗余晶闸管级。

避雷器作为保护设备绝缘的设备,其不一定直接与地相连,也可直接连接到高于地电位设备的两端。对于晶闸管避雷器,为了减少距离效应避雷器应尽量靠近阀。

绝缘在交流和直流下应用时其本质差别是高压直流应用中绝缘需要承受交流、直流和冲击电压的联合作用。联合电压作用在绝缘体上时需要考虑电阻和电容的电压分布,这些会导致很高的电压,因此,在设备的设计和试验时都要考虑这些高电压的作用。

将最大过电压与相应的合适因数相乘确定操作、雷电和陡波前过电压的耐受电压。依据耐受电压按设备各自的标准确定每个设备的试验电压。在交流实际应用中,标准电压水平作为设备的耐受电压。然而在直流应用中,没有规定标准耐受电压水平。

在 GB 311.1—1997 中推荐使用的绝缘配合因数(K_{iw})乘以代表性过电压 U_{op} 获得相应的耐受电压 (U_{cw}),即 $U_{cw} = K_{iw} \times U_{op}$ (见 GB 311.1—1997 的 4.3)。对于在直流侧设备的实际计算方法中(见 GB/T 311.2—2002 的 3.3)用绝缘配合确定性因数 K_{id} (见 GB/T 311.2—2002 的 3.3.2.1)代替 K_{iw} 。这个因数 K_{id} 考虑了以下因素:

——计算过电压数据及模型的局限性和避雷器大的非线性对配合电流的影响；
 ——过电压波形和持续时间允差。
 参考 GB 311.1—1997 图 1，要求耐受电压 U_w 是通过配合耐受电压，外绝缘大气校正因数 K_1 和取决于内部及外部绝缘类型的安全因数 K_2 确定的。安全因数 K_2 考虑了下列因素：

- 绝缘寿命；
- 避雷器特性的变化；
- 产品质量的分散性。

绝缘配合确定法可用于换流站，根据经验对于海拔低于 1 000 m 的高压直流换流站，由避雷器保护水平乘以一个因数获得设备的要求耐受电压，这个因数考虑了在本章开始讨论的所有因数。如果用户或者相关的设备委员会没有具体规定，表 9 提供了用作设计目的的相应因数。在表 9 中，所有设备都认为是由避雷器的避雷器直接保护。如果不是这样，例如，对于交流侧的一些设备，在快波前和极快波前瞬态过电压下应考虑距离影响，并且在结果中应说明增加的比率（见 GB 311.1—1997 和 GB/T 311.2—2002 给出的配合因数和配合耐受电压）。

要求冲击耐受电压与冲击保护水平的比值

设备类别	RSTWV/SIPL	RELEV/LEPL	RSFIWV/STIPL ^a
交流开关场母线、户外绝缘子和其他常规设备	1.20	1.25	1.25
交流滤波器元件	1.15	1.25	1.25
换流变(油中)	1.20	1.25	1.25
网侧	1.15	1.20	1.25
阀侧	1.15	1.15	1.20
直流阀厅设备	1.15	1.15	1.25
直流开关场设备(户外)和直流滤波器 和直流电抗器)	1.15	1.20	1.25

^a 用于一般设计的比雷击后的比值(提高或减小)根据具体的性能指标确定。
^b 避雷雷器的 STIPL
^c 以避雷器直接保护设备为基准的比值。

7.5 额定耐受电压的确定

额定耐受电压等于或高于要求耐受电压。对于交流设备，额定耐受电压在 GB 311.1—1997 中有相应的标准值。对于高压直流设备，没有标准耐受值，额定耐受电压可取到方便的可行值。

7.6 爬电距离

设计的目标是确定和规定绝缘在使用地的最小爬电距离，具体在第 8 章描述。一般以持续运行电压(交流或直流)为基础。

7.7 空气净距

对于所有使用在空气中(户外、户内)的绝缘，必须确定其最小空气净距离(见第 8 章)。一般基于要求的操作冲击耐受电压。

8 爬电距离和空气净距

绝缘子的爬电距离是表明绝缘在持续运行电压(交流或直流)下外绝缘特性的一个因数。绝缘子上的污秽将降低其承受运行电压的能力，特别在潮湿条件下。此时，绝缘子部分表面的污秽会被湿润，污

秽分布不均匀及泄露电流的增加引起的干燥区导致整个电压分布不均匀,最终形成闪络。雨、雪、凝露和雾等天气条件下可诱发这种情况。绝缘子的伞外型、伞型倾角和绝缘子的直径都影响着绝缘子的污秽耐受能力。在这种情况下,套管、直流电流测量装置、直流电压分压器和其他类似设备的内部芯子结构都影响内部和外部电压分布。在确定使用绝缘子的类型和形状时需要考虑所有这些因素。

在不同的直流运行方式下,沉积在套管上的污秽,由于凝露、雾和雨天受到轻微湿润,引起一些套管闪络。除此之外,外绝缘子不均匀的湿润也会引起套管的闪络,例如,水平安装套管,尽管这种闪络现象与爬电距离无关。

用于规定爬电距离的基准电压如下:

- 换流器交流侧绝缘(交流设备):以相对相最高运行电压的有效值表示;
- 换流器直流侧绝缘(直流设备):对于对地绝缘按 3.1 定义的直流系统电压,或者对于两个带电部件之间的绝缘是跨接在绝缘体两端的电压平均值。

8.1 直流电压下户外绝缘的爬电距离

在高压直流数年工业应用中,趋势是使用大的额定爬电距离。例如,高压直流系统中使用爬电比距为 60 mm/kV。然而,增加到如此之高的爬电距离并不能安全消除外绝缘闪络。应该强调的是:由于污秽和不均匀湿润,在 500 kV 高压直流系统中依靠增加户外绝缘的额定爬电距离,并不能消除外绝缘的闪络。

注:由于确定爬电距离时使用的基准电压不同,所以认为相对地绝缘近似相同作用的条件下,直流系统 60 mm/kV 的爬电距离相应于交流系统的 35 mm/kV。

数种改善绝缘子防污性能的技术已经用于现有的高压直流系统。在绝缘子表面涂覆硅脂或室温固化橡胶成功的防止了绝缘污闪。重涂硅脂涂层的周期取决于使用位置的污秽情况。工业上建议是 16 个月到 3 年的时间重涂。加装附加的绝缘伞裙也能成功的避免闪络。

近来,对套管和其他设备绝缘应用复合外套,即使较小的爬电距离,也使高压直流换流站成功的避免了污秽闪络。

8.2 直流电压下户内绝缘的爬电距离

对于干净的户内环境,厂址选用大约 14 mm/kV(以适当直流电压为基础)的最小爬电比距也没有发生任何闪络。在任何情况下,以爬电路径确定换流阀内部绝缘可能不是特别合适的参数,而以干弧距离可能更为合适。

8.3 交流绝缘子外绝缘爬电距离

为了标准化的目的,在 GB/T 311.2—2002 表 1 中给出了 4 个污秽等级,JB/T 5895—1991 规定了交流架空线路绝缘子污秽试验严酷度和最小爬电距离;在系统最高电压下绝缘子应该耐受的污秽水平。配合耐受电压等于系统的最大电压(U_m)并且推荐以 mm/kV(相对相)确定的最小爬电比距。典型值在 (16~31)mm/kV 的范围之间。

8.4 空气净距

GB/T 311.2—2002 中给出了用于交流系统绝缘满足额定冲击电压要求的空气净距,其附录 A 中给出了冲击耐受电压和最小空气距离的关系。在直流应用中要考虑交流、直流和冲击电压的联合作用情况。

确定与直流电压水平相应的空气间隙时,操作冲击是比雷电冲击重要的决定因素。对于一个标准的间隙,正的雷电冲击击穿电压至少要比正的操作冲击击穿电压高 30%。

一般情况下,直流正极性电压和冲击电压正极性耐受电压要比负极性耐受电压低。缓波前和直流电压组合可以用单一操作波试验的结果代替。操作波幅值等于直流电压和缓波前电压最大幅值的和。选择合适的地电极形状可以给出正极性缓波前电压叠加正极性直流电压时高压直流换流站净距的保守的值,该间隙的选择与相应的避雷器保护水平有关。这种实际的间隙特性类似于棒板间隙。

9 避雷器要求

9.1 避雷器规范

避雷器残压就是当避雷器通过放电电流时,在避雷器两端出现的电压峰值。规定与避雷器保护水平相对应的电流叫作配合电流,见表 6。

配合电流值通常由供货商在进行系统研究中确定。研究过程包括考虑避雷器的能量,并取避雷器的柱数和每个避雷器的峰值电流。最后选择的避雷器峰值电流就是与残压相对应的配合电流,同时也确定了直接保护设备的代表性过电压。对于避雷器的幅值和设计,高压直流换流设备耐受电压要求和设计之间平衡处理基于配合电流的选择。用于避雷器试验和保护水平评价的操作波,雷电波和陡波的相关配合电流见 GB 11032—2000。

对于暴露在大气过电压的高压直流换流站部分,确定避雷器雷电冲击的配合电流应考虑屏蔽的设计(尤其对户外的阀),确定雷电过电压时的最大电流。

在各种故障期间避雷器放电电流持续时间可能变化。因此,在确定避雷器能量时,必须考虑放电电流的幅值和持续时间,包括因相关操作顺序导致避雷器重复动作。出现在基频好几个周期中重复放电电流脉冲可被视为单次放电,该单次放电的累积能量等于重复放电脉冲的欲际能量累积。从稳定观点讲,重复电流脉冲应按长周期考虑。当确定等效能量时,应考虑短脉冲持续时间产生的能量降低避雷器能量耐受能力。

在确定避雷器能量时,研究计算避雷器能量值应考虑一个合理的安全因数。这个安全因数的范围为 0%~20%,该安全因数依赖于输入数据和所用模型的安全以及由出现高于选用工频能量的关键故障工况的概率。避雷器的安全因数由以下三个因数决定:

- a) 冲击电流幅值;
- b) 冲击电流陡度;
- c) 冲击电流周期。

9.2 交流母线避雷器(A)

高压直流换流站直流侧是由换流变网侧避雷器和换流站结构有关的其他位置的避雷器保护(见图 4)。这些避雷器的设计应考虑对交流系统应用标准及对称流变网侧、网侧过电压的限制要求,同时考虑从换流变网侧传到网侧的缓波前过电压。避雷器的设计要针对接地故障清除后系统恢复这种最苛刻工况,其中包括变压器饱和、电压和负荷产生的过电压以及断路器分闸时重燃过电压。

9.3 交流滤波器避雷器(F)

交流滤波器避雷器持续运行电压由工频电压和滤波器支路谐振频率的谐波电压叠加组成。避雷器的额定值通常由瞬态事件确定。由于谐波电压导致相对较高的能量损耗,所以避雷器的额定值应考虑谐波电压。

滤波器避雷器应考虑交流母线的缓波前过电压加暂时过电压和滤波器母线接地故障期间的滤波器电容放电。后者确定 *SIPL* 的要求,而前者确定 *LTPLE* 和放电能量要求。在某些情况时,低频谐振或交流系统接地故障期间非对称低次非特征谐波均可导致该避雷器高的放电能量。

9.4 阀避雷器(V)

9.4.1 持续运行电压

阀避雷器持续运行电压是由带有换相过冲和换相缺口的若干正弦波段组成,如图 6 中所示。不考虑换相过冲的持续运行电压峰值(CCOV)和 U_{dm} 的关系如 6.3 的公式:

$$CCOV = \frac{2}{3} \times U_{dm} = \sqrt{2} \times U_{\alpha}$$

确定避雷器的参考电压时,应考虑包括换相过冲持续运行电压最大峰值(PCOV)。换相过冲大小取决于触发角 α ,应特别注意换流器以大的触发角运行时的过冲量。

9.4.2 暂时和缓波前过电压

通常在靠近高压直流换流站的接地故障清除及随后的交流侧甩负荷期间就会产生最大的暂时过电压传递到阀侧。然而此故障过程只有在当阀解锁或部分解锁情况下,阀避雷器不能泄放能量才会出现。能够显著的引起阀避雷器泄放操作波电流的事件如下:

- a) 在换流变与最高电位换相组之间接地故障;
- b) 清除一个靠近高压直流换流站的交流接地故障;
- c) 仅一个换相组中的电流熄灭(如果适用)。

处在最高直流电位的一个桥的换流变阀侧相对地短路故障,将使处在最高直流电位换相组的阀避雷器承受很大负载。通过这些避雷器的放电电流主要由两个电流峰值构成。第一,换流器的杂散电容和阻尼电容放电使故障相的阀承受陡波前过电压(见9.4.3)。第二,直流极和线路/电缆的电容通过平波电抗器和换流变压器漏抗放电产生缓波前过电压(约1.5倍达到峰值)。后者的放电会使另一相的避雷器泄放最大放电电流和能量。故障瞬间的直流电压、直流电抗器电感、变压器漏抗和线路/电缆等参数决定了处在最高电位的避雷器的最大负载。对于换流器并联运行的直流系统,当在保护还没有闭锁换流器时,无故障的避雷器仍向接地故障提供电流,将增加避雷器额外负载。对上桥三个避雷器的能量和电流设计取决于直流系统额定电流、控制系统的动态特性、平波电抗器的电感和保护方案的。在上述的相位故障工况中,计算的故障电流主要取决于直流母线线间电压值。推荐选用可持续数秒的最大直流电压。应注意,这个工况可能要求避雷器具有很大的通流能力。最后还应该考虑出现最高运行电压与接地故障同时发生的概率。

当交流网络故障清除后,如果换流器闭锁,在交流侧就会产生极高的过电压。如果换流器继续运行,过电压将被抑制,并且总的放电能量将减小很多。通常,当换流器旁通对永久闭锁时,才对避雷器产生最大的能量。这种闭锁可能持续到换流变断路器打开后几个周期。在这期间,当故障被清除后,避雷器不会受到任何的运行电压作用。当计算从阀侧传递过来的过电压时,换流变压器分接头应放在与潮流相符合的位置。在不利的系统条件下可能导致交流快速波器/并联电抗器和交流网络阻抗,换流变之间的铁芯谐振。为了涵盖变压器磁链的变化范围,在研究过程中应该变化故障的起始时刻和故障消除时刻。

当一个换相组中的阀电流熄灭,而与换相组并联的阀仍维持导通,可能是确定避雷器能量最关键的工况。这个电流波强度将转换到与不导通阀共长的避雷器。如果这个电流不能快速降到零,那么避雷器上的能量消耗将相当高。

导致仅在一个换相组中电流偶然关断事件如下:

- 由于阀控制单元内部故障引起某阀触发失败;
- 换流器所有阀闭锁时旁通对没有解锁。在某些暂态条件下串联连接的换相组中的一个换相组电流熄灭及可能使换流器电流接近于零。这种情况常常出现在逆变运行情况下。

组电流熄灭及可能使换流器电流接近于零,这种情况可排除在外。电流熄灭与否很大程度上依赖于冗余度及控制和保护系统的形式。

9.4.3 快波前和陡波前过电压

换流区域的阀和阀避雷器与交流侧直流场通过大的串联电感而分隔开,即换流变和平波电抗器。雷击在换流变的交流侧或平波电抗器外的直流线路侧产生的行波被串入的电感和对地电容衰减到较小幅值,波形如同缓波前过电压。然而,在大变比变压器器的情况下(如背靠背站)电容耦合的作用需要考考虑。阀和阀避雷器一般仅能承受换流区接地故障和反击时的快波前和陡波前过电压。如果雷电穿过屏蔽系统,绕击就应予以考虑。但是由于高压直流换流站具有很强的屏蔽和接地系统,绕击和反击常常不予以考虑。

产生最严重的陡波前过电压通常是处于最高直流电位桥和换流变的阀侧接地故障。在研究这种工况时,回路模型应详细的表示杂散电容和母线电感。

在晶闸管阀的设计中,应考虑这样一个偶然事件,阀在正向过电压时被触发,通过避雷器的电流转换到了阀上。需要强调的是此时电流不作为阀避雷器的配合电流,一般是在反向过电压时确定避雷器的配合电流。在阀正向过电压时,阀保护触发水平对应的阀避雷器操作配合电流是满足要求的。当最终评估阀避雷器的配合电流时还应考虑避雷器特性和冗余晶闸管的裕量。如果选择阀的保护触发水平高于阀避雷器的 SIPL,在 9.4.4 选择的保护触发水平的过电压对应的避雷器电流能够被用于定义这种情况下下的实际电流。

9.4.4 阀保护触发 (PF)

晶闸管阀保护触发是通过触发晶闸管导通限制阀的正向过电压,保护触发水平应与在不同的运行条件下的过电压相配合。如果保护触发的水平大于阀避雷器的保护水平,就应予以明确说明。当直流极仍保持运行特别是在逆变运行时,外部发生故障期间,需要考虑保护触发对输电性能的不利影响。

在交流网络的瞬态期间,整流运行的保护触发不能引起任何显著的系统扰动。另一方面,在逆变运行期间,保护触发使某一个阀过早触发,导致换相失败和清除故障后的输电恢复时间增加。为了不影响系统的恢复,作为逆变运行的换流器如果没有永久闭锁,在出现最高过电压时保护触发不应该动作。

9.5 桥避雷器 (B)

桥避雷器可以连接在一个六脉动桥的直流端子之间。

最大持续运行电压同 9.4 所述的阀避雷器。以下情况可对桥避雷器产生操作放电电流:

- 清除靠近高压直流换流站的一个交流故障;
- 六脉动桥的电流熄灭(见 9.4.2)。

由于桥避雷器与阀避雷器并联,所以从交流侧传递的操作过电压通常在桥避雷器上引起一个很小的放电电流。

9.6 换流器单元避雷器 (C)

换流器单元避雷器是跨接在一个 12 脉动桥的直流端子之间的避雷器,如图 4 中的避雷器 C。

最大运行电压是由最大直流电压加上一个换流单元 12 脉动电压。电压 CCOV 不包括换相过冲,通常表示为

$$CCOV = 2 \times U_{\text{am}} \times \frac{\pi}{3} \times \cos^{\circ}(15^{\circ})$$

对于小的触发角和重叠角,理论上最大运行电压表示如下:

$$CCOV = 2 \times \cos(15^{\circ}) \times \frac{\pi}{3} \times U_{\text{am}}$$

规定该避雷器的最大运行电压与阀避雷器方法相同,应考虑换相过冲。

换流器单元避雷器一般不会遭受到大的操作特性放电电流的作用。但是,当换流器串联时,旁通开关在运行期间闭合,将会对该避雷器产生操作放电作用。尽管电作用不是决定该避雷器参数的关键,但当雷电作用传播到阀区时,该避雷器对雷电也起到一定的限制作用。

9.7 中点直流母线避雷器 (M)

中点直流母线避雷器有时被用于降低换流变阀侧的绝缘水平。中点避雷器可以跨接在 6 脉动桥端或串联连接的 12 脉动桥端,如图 1 中的避雷器 (M)。

运行电压类似于桥避雷器或换流器单元避雷器运行电压加上接地极引线上的压降。

当使用这个避雷器时(见 9.4.2),底部六脉动换流桥电流熄灭将会对该避雷器产生一个操作电流的作用。另外,如果换流单元串联,旁通对操作运行时同样也对该避雷器产生操作负载。当换流站屏蔽失败,避雷器 (M) 也会限制雷电过电压。

9.8 换流器单元直流母线避雷器 (CB)

换流器单元直流母线避雷器是连接在母线与地之间如图 4 中的 CB 避雷器。

运行电压类似于换流器单元避雷器运行电压加上接地电极线路压降。

因为其保护水平很高,通常该避雷器在缓波前过电压下不会发生动作。当换流站屏蔽失败时对雷电产生一定的限制作用。

9.9 直流母线/直流线路/电抗避雷器(DB和DL)

该避雷器最大的运行电压几乎是纯的直流电压,电压的幅值取决于换流器、分接头控制器和一定的测量误差。

这些避雷器主要限制雷电侵入波过电压。适当的选择主回路的参数常常可以避免产生缓波前过电压,同样可以避免谐振过电压。在双极架空线运行中一极接地故障,在完好极上将产生一个感应过电压。过电压的幅值取决于故障的位置、线路长度和线路的终端阻抗。通常,这些类型的过电压并不是决定两端设备绝缘的关键因素。

当高压直流线路由架空线和电缆组成时,应在来空线与电缆连接处安装避雷器,防止因行波反射引起电缆上出现极高过电压。在高压直流系统中使用非常长的电缆时,电缆避雷器的额定能量应由在偶然事件下达到最高电压的电感放电电流决定,这种事件通常情况下放电电流较小。偶然事件是指,阀误触发或一个站内触头动作时完全丢失。同时,电缆低的波阻抗也会减小雷电电流对避雷器的作用。

9.10 中性母线避雷器

中性母线避雷器的运行电压通常比额定值低。在双极平衡运行时,它几乎为零。在单极运行时,运行电压由接地线路上的短路或金属回路直流电压跌落决定。

该避雷器用于限制下列偶然事件出现在中性母线设备上的快波前过电压并泄放大的放电能量。

- 直流母线接地故障;
- 在阀和换流器之间的接地故障;
- 单极运行时直流失去返回线。

直流母线接地故障时将引起直流滤波器通过中性母线避雷器放电,产生一个非常高而短的电流感值。在研究这种故障时假定直流滤波器在最大直流运行电压下,发生突然放电并伴随着换流器较慢的故障电流。直流电流的上升率受直流平波电抗器的限制。故障电流由接地极引线/中性母线电容器和中性母线避雷器分担。在金属回路运行的情况下,与避雷器并联的阻抗是整条直流线路阻抗。

在阀与换流器之间的一个相对地发生接地故障,交流驱动电压将由换流器阻抗和接地极线路阻抗分担。最严重的上例出现在换流站有最长接地极线路的一端或在金属回路运行方式下换流站不接地端。因为直流电压降低,换流器以整流方式运行的情况是最严重的。

金属回路运行对中性母线避雷器提出了更高的要求。在金属回路运行时,选择不接地站的避雷器参数高于接地换流站附近避雷器参数。对长的接地极引线(通常大于50km)也适用。

在近期的方案设计中,应消除谐波和限制中性母线过电压的要求,在中性母线上加装了电容器。这将会影响中性母线避雷器的负载,在研究模型中应予以考虑。当然中性母线避雷器的负载也取决于换流器的控制和故障时的保护措施。但采用设计值低于实际对中性母线避雷器能量要求时,可使用一只自牺牲性避雷器,特别是更换自牺牲性避雷器不显著影响停运时间,则是一个较佳设计。在双极运行情况下,自牺牲性避雷器应安装于避免双极停运的位置。

另一种设计方案是在金属回路不接地的一端和接地极线各安装一组高能耗避雷器(EM和EL),分别用于吸收金属回路运行方式和其他运行方式下的操作冲击能。中性母线其他位置的避雷器的雷电波保护水平高于EM和EL,确保在操作过电压下不动作,仅用于雷电波保护。EM和EL在制造和出厂试验时可保证多柱并联特性的一致性并多并联一个备用避雷器,有利于更换及制造备用避雷器。

9.11 直流平波电抗器避雷器(DR)

直流平波电抗器避雷器的运行电压仅包括一个从换流器来的12脉动纹波电压。这个避雷器承受换流器母线运行电压和反极性雷电过电压(直流母线电压或许减去雷电过电压)作用。同时也要考虑雷电通过这个避雷器耦合到晶闸管阀。

在许多设计方案中,当直流平波电抗器的绝缘水平能够满足是直流线路避雷器残压叠加最大直流电

行电压的要求时,该避雷器可以去掉。

9.12 直流滤波电容器避雷器(FD)

直流滤波器电抗器侧避雷器通常的运行电压是比较低的,通常包含与滤波器组谐波频率相应的一个或多个谐波电压。由于谐波电压可导致避雷器相对高的功率损耗,所以在确定避雷器的额定值时应予以考虑。

直流极接地故障时滤波器电容器瞬态放电确定对该避雷器的主要要求。

9.13 接地极引线避雷器(EL)

对于接地极设备,例如配电开关,电缆和测量设备,需要防止从接地极引线侵入的过电压。避雷器通常安装在线路的进口处。持续运行电压是不重要的。避雷器参数由通过架空线进入的雷电波作用确定。当接地极引线较短时,在不对称故障和瞬态时,在不考虑接地极引线避雷器的作用。

附录 A
(资料性附录)
普通型高压直流换流站绝缘配合的例子

A.1 引言

本附录给出了以直流电缆为极线和大地作为回线的普通型高压直流换流站的绝缘配合和计算方法。这个例子是一个非常简略的知识性指导。主要讲述了基于正文中的程序,选定避雷器的额定值和规定的绝缘水平的步骤。

在本附录中给出的结果是基于同第 9 章及 6.7.1 中描述的程序和研究方法。因为对于直流没有标准耐受电压,把 SSIWV、SLIWV 和 SSFIWV 的计算值近似取舍为方便可行值。

A.2 避雷器保护方案

图 A.1 表明了高压直流换流站的避雷器保护方案。所有避雷器采用无间隙氧化锌避雷器。

A.3 避雷器的负载、保护水平和绝缘水平的确定

下面的主要数据是用于高压直流换流站绝缘配合的基本设计。

交流侧:强交流系统网

直流侧:

直流电压	kV	500	(整流侧)
直流电流	A	1 500	
平波电抗器	mH	225	
触发电角	(°)	15/17	(整流/逆变)
换流变压器:			
额定值(三相,6脉动)	MVA	459	
短路阻抗	pu	0.12	
二次侧电压(阀侧)	kV(r. m. s)	204	
分接头范围		±5%	
每相电感(阀侧)	mH	35	
交流母线避雷器(A)			

高压直流换流器的技术数据:

参 数	单 位	母 线 I(A)
系统标称电压	kV(r. m. s)	400
系统最高电压	kV(r. m. s)	420
持续运行电压,相对地	kV(r. m. s)	243
SIPL(在 1.5 kA 下)	kV	632
LIPL(在 10 kA 下)	kV	713
传递到阀侧的最大续波前过电压(相—相)	kV	549
避雷器并联柱数	—	2
避雷器能量	MJ	3.2

避雷器类型(V1)和(V2)

下面的数值对于两个换流站都有效。

CCOV	kV	$208 \times \sqrt{2}$	
并联的柱数		8	避雷器 V1
		2	避雷器 V2
避雷器能量	MJ	16.2	避雷器 V1
	MJ	2.6	避雷器 V2

阀避雷器参数是对以下工况进行计算确定的。

A.3.1 从交流侧传递的缓波前过电压

当从交流侧传递过来的缓波前过电压出现在仅有一个阀导通时两相(如R和S)之间(见图A.2),此时对避雷器有最大的作用。缓波前过电压幅值取决于换流变网侧交流母线避雷器A的最大保护水平。

图A.3给出了仅在回路中有一个避雷器导通的高压直流换流站的结果。这个故障工况是设计下半桥避雷器(V2)的关键。

结果(对于阀避雷器V2有效)

阀避雷器(V2)的操作冲击保护水平(SIPL)为:

$$SIPL = 500 \text{ kV} \quad \text{在 } 1\,027 \text{ A (见图 A.3)}$$

$$RSIWV = 1.15 \times 500 \text{ kV} = 575 \text{ kV} \quad \Rightarrow \quad \boxed{SSIWV = 575 \text{ kV}}$$

A.3.2 换流变的高压套管和阀之间的接地故障

这个故障对最高电位的三脉动换流组的阀避雷器施加最大负载。这种工况的等值电路在图A.4中给出。对高电位阀避雷器的作用也依赖于故障起始的时刻。为了确定最大作用,故障接入的时刻应从0到360电角度变化。

最大作用的结果在图A.5中给出。

如果缓波前过电压(工况a)对所有上半桥避雷器上没引起最高负载,那么这个故障工况决定了上半桥阀避雷器(V1)的设计。

结果(用于阀避雷器V1)

阀避雷器(V1)的操作冲击保护水平(SIPL)为:

$$SIPL = 499.8 \text{ kV}, \quad \text{在 } 4\,230 \text{ A (见图 A.5)}$$

$$RSIWV = 1.15 \times 499.8 \text{ kV} = 575 \text{ kV}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{SSIWV = 575 \text{ kV}}$$

换流器单元避雷器(C)

下列数值对两个换流站均有效:

$$CCOV: \quad 558 \text{ kV}$$

并联的柱数

1

能量: 2.5 MJ

使用仿真研究从交流侧传递到直流侧的缓波前过电压,确定对换流器单元避雷器的作用。假设在正常运行时四个晶体管阀导通,在相之间传递一个缓波前过电压,此时传递过来的缓波前过电压是阀避雷器给定值的两倍。

换流器单元避雷器(C)设计,对应于配合电流选择下列值。

$$SIPL = 930 \text{ kV} \quad \text{在 } 0.5 \text{ kV}$$

$$LIPL = 1\,048 \text{ kV} \quad \text{在 } 2.5 \text{ kV}$$

$$RSIWV = 1.15 \times 930 \text{ kV} = 1\,070 \text{ kV}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{SSIWV = 1\,175 \text{ kV}}$$

$RLJWV=1.20 \times 1.048 \text{ kV}=1.258 \text{ kV}$ \Rightarrow $SLJWV=1.300 \text{ kV}$

直流母线避雷器(DB)

下列数值对两个换流站均有效:

CCOV 515 kV

并联柱数 1

能量 2.2 MJ

直流母线避雷器(DB)的设计, 对应于配合电流选择下列值:

S IPL = 868 kV 在 1 kV

L IPL = 977 kV 在 5 kV

RSJWV = 1.15 × 868 kV = 996 kV

$RLJWV=1.20 \times 977 \text{ kV}=1.173 \text{ kV}$ \Rightarrow $SSJWV=1.050 \text{ kV}$

$SLJWV=1.300 \text{ kV}$

直流线路/电缆避雷器(DL)

对于直流线路/电缆末端避雷器要求以下值:

CCOV 515 kV

并联柱数 8

能量 17.0 MJ

直流线路/电缆避雷器(DL)的设计, 对应于配合电流选择下列值:

S IPL = 807 kV 在 1 kV

L IPL = 872 kV 在 5 kV

RSJWV = 1.15 × 807 kV = 928 kV

$SSJWV=950 \text{ kV}$

$RLJWV=1.20 \times 872 \text{ kV}=1.046 \text{ kV}$ \Rightarrow $SLJWV=1.050 \text{ kV}$

中性母线避雷器(E)

换流站的所有中性母线避雷器要求以下值:

CCOV 30 kV

并联柱数 12

能量 2.4 MJ

所有中性母线避雷器设计选择以下值:

S IPL = 78 kV 在 2 kV

L IPL = 88 kV 在 10 kV

RSJWV = 1.15 × 78 kV = 90 kV

$SSJWV=125 \text{ kV}$

$RLJWV=1.20 \times 88 \text{ kV}=106 \text{ kV}$ \Rightarrow $SLJWV=125 \text{ kV}$

$SLJWV=125 \text{ kV}$

交流滤波器避雷器(FA)

避雷器的运行电压包括基频和谐波电压。

避雷器的额定值是由交流母线接地故障随后的恢复过电压的作用确定。

交流滤波器避雷器(FAI)

U_n 60 kV

并联柱数 2

能量 1.0 MJ

在避雷器(FAI)设计中选择与配合电流相对应的下列值:

S IPL = 158 kV 在 2 kV

L IPL = 192 kV 在 40 kV

RSJWV=1.15×158 kV=182 kV ⇨ SSIWV=200 kV

RLJWV=1.20×192 kV=230 kV ⇨ SLJWV=250 kV

交流滤波器避雷器(FA2)

U_a 30 kV

并联柱数 2

能量 0.5 MJ

在避雷器(FA2)设计中选择与配合电流相对应的下列值:

SIPL=104 kV 在 2 kV

LJPL=120 kV 在 10 kV

RSJWV=1.15×104 kV=120 kV ⇨ SSIWV=150 kV

RLJWV=1.20×120 kV=144 kV ⇨ SLJWV=150 kV

直流滤波器避雷器(FD)

避雷器的运行电压主要由潜波电压组成。

当缓波前过电压传递到直流感,直流母线发生接地故障,此时对该避雷器产生的作用将确定避雷器的额定值。

直流滤波器避雷器(FD1)

U_a 5 kV

并联柱数 2

能量 0.8 MJ

在避雷器(FD1)的设计中选择与配合电流相对应的下列值:

SIPL=136 kV 在 2 kV

LJPL=154 kV 在 40 kV

RSJWV=1.15×136 kV=156 kV ⇨ SSIWV=200 kV

RLJWV=1.20×184 kV=221 kV ⇨ SLJWV=250 kV

直流滤波器避雷器(FD2)

U_a 5 kV

并联柱数 2

能量 0.5 MJ

在避雷器(FD2)的设计中选择与配合电流相对应的下列值:

SIPL=104 kV 在 2 kV

LJPL=120 kV 在 10 kV

RSJWV=1.15×104 kV=120 kV ⇨ SSIWV=150 kV

RLJWV=1.20×120 kV=144 kV ⇨ SLJWV=150 kV

A.4 换流变(阀侧)耐受电压的确定

A.4.1 相对相

由于换流变阀侧绕组不能直接由单一避雷器保护,就需要考虑下面两个工况:

-----当阀导通时,换流变的阀侧的相对相绝缘由一个阀避雷器(V)保护;

-----当阀闭锁时,在相间是两个避雷器(V)串联。在这种情况下,缓波前过电压全部传递过来决定最大缓波前过电压。

$SIPL = 550 \text{ kV}$

$RSIWL = 1.15 \times SIPL$

选择额定雷电耐受电压是：

$SSIWV = 600 \text{ kV}$

$SLIWV = 750 \text{ kV}$

如果两相是分离的变压器单元(单相,三绕组变压器),并且假定电压不是相等的分布,对于星形绕组选择的具体绝缘水平是:

$SSIWV = 550 \text{ kV}$

$SLIWV = 650 \text{ kV}$

A. 4.2 上部换流变压器相对地(星形)

在导通期间,变压器和换流器的相对地绝缘是由施加于换流变相间的缓波前过电压确定。这些缓波前过电压来源于交流侧并且被换流变网侧的避雷器 A 限制。这叠加的方式不可能在晶体管阀非导通状态出现。因此仅需要避雷器导通状态。

$SIPL = 1\ 000 \text{ kV}$; $SIPL$ 在避雷器(V2)在 $1\ 025\text{-A}$ 假设在中性母线避雷器中无电流)

$RSIEV = 1.15 \times SIPL$

选择额定雷电耐受电压是:

$SSIWV = 1\ 175 \text{ kV}$

$SLIWV = 1\ 300 \text{ kV}$

A. 4.3 下部换流变压器的相对地(三角形)

假设中性母线避雷器中无电流过流情况下,该绝缘水平相同。

$SSIWV = 650 \text{ kV}$

$SLIWV = 750 \text{ kV}$

选择额定雷电耐受电压是:

A. 5 空气绝缘水平波电抗器耐受电压的确定

A. 5.1 端对端的缓波前过电压

平波电抗器两端之间负载最严重工况是经过避雷器(DL)直流侧缓波前乘压加上运行的直流电压。假定操作波与直流电压极性相反,则有:

避雷器(DL)的 $SIPL$ 为:

966 kV

最大直流电压:

500 kV

两个电压的和:

1 366 kV

平波电抗器:

225 mH

变压器电感(四相):

140 mH(4×35 mH)

总的电感:

365 mH

两端子之间:

1 366 kV×(225 mH/365 mH) = 842 kV

$SIPL = 842 \text{ kV}$

$RSIWV = 1.15 \times 842 \text{ kV} = 968 \text{ kV}$

⇒

$SSIWV = 1\ 175 \text{ kV}$

端子之间的最大快波前过电压由电抗器端子之间的电容与电抗器阀侧对地电容的相对比值确定。

规定的雷电耐受电压是:

$SLIWV = 1\ 300 \text{ kV}$

A. 5.2 端子对地

绝缘水平同避雷器(C)或(DL)一样

$SSIWV = 1\ 175 \text{ kV}$

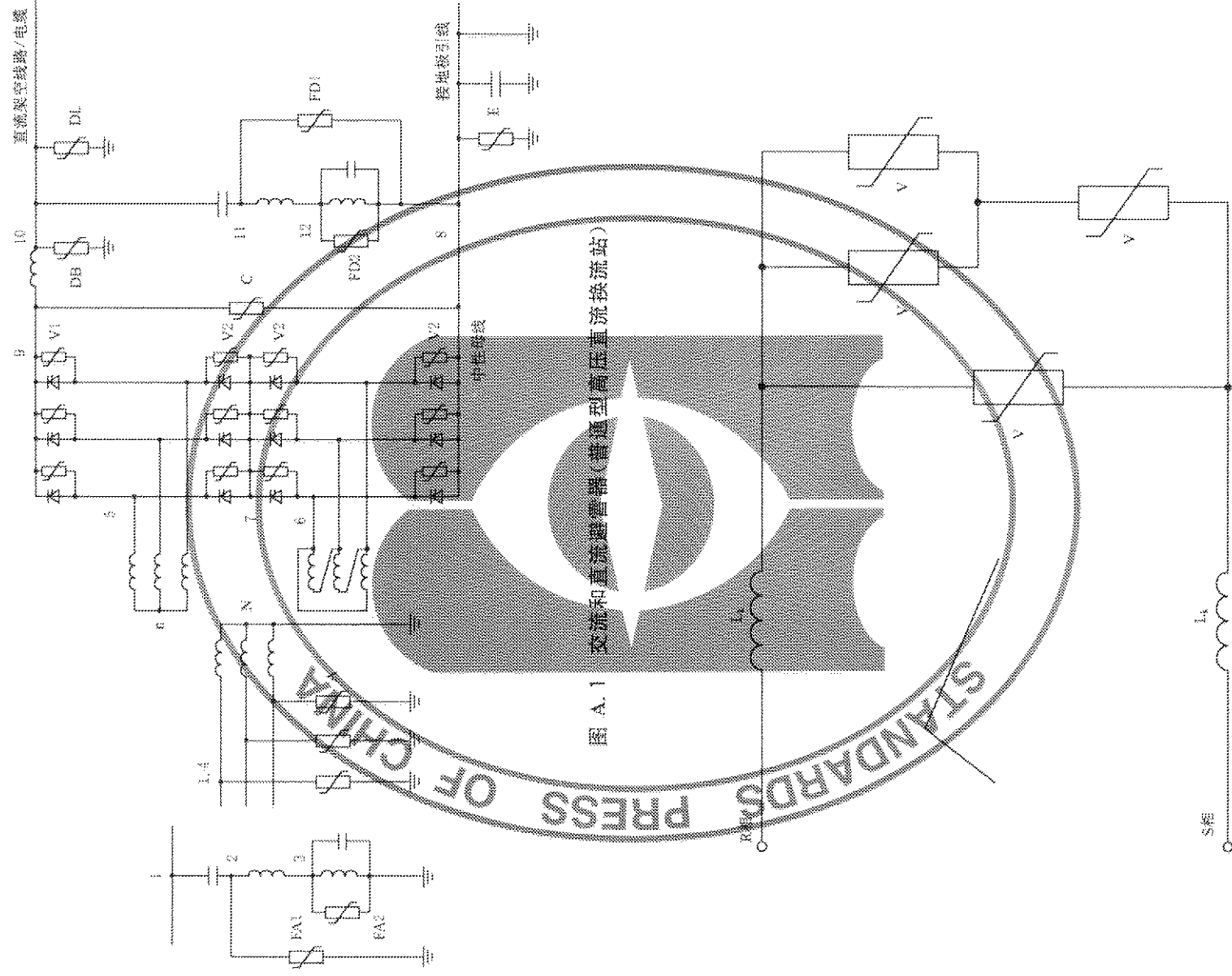
$SLIWV = 1\ 300 \text{ kV}$

A.6 计算结果表

避雷器类型	A	V1	V2	C	DB	DL	E	FDI	FDZ	FAJ	FAZ
U_s 或CCOV	243 r.m.s	294 peak	294 peak	558 d.c.	615 d.c.	615 d.c.	30 d.c.	5 d.c.	5 d.c.	60 r.m.s	30 r.m.s
雷电: .....保护水平.....电流	713 10	..... .....	..... .....	1 048 2.6	977 5	872 5	88 10	184 40	120 10	192 40	120 10
操作: .....保护水平.....电流	632 1.5	499.8 4.23	500 1.025	930 0.5	868 1.0	807 1.0	78 6.0	136 2.0	104 2.0	158 2.0	104 2.0
柱数 能量	2 9.2	8 10.4	2 2.6	1 2.5	1 2.2	8 17.0	2 0.4	2 0.8	2 0.5	2 1.0	2 0.5

保护位置	1	2	3	4	6	6	7	8	9	10	11	12
U_m /kV	243	60	50	243	558	294	294	30	558	515	15	15
$L IPL = RFAO$ /kV	713	192	120	713	.....	.....	.....	88	1 048	977	184	120
$S IPL = RSLO$ /kV	632	158	104	632	1 000	550	530	78	930	868	158	104
$SL IWV$ /kV	1 425	250	150	1 425	1 300	750	750	125	1 300	1 300	250	150
$SSI WV$ /kV	1 050	200	150	1 050	1 175	650	650	125	1 175	1 175	200	150

保护位置	1—2	2—3	5和6 相对相	5—6	8—9	9—10	10—11	11—12	阀 V1 和 V2
$L IPL = RFAO$ /kV	825	192	.....	.....	1 048	.....	977	184	.....
$S IPL = RSLO$ /kV	747	158	650	1 000	930	842	868	158	560
$SL IWV$ /kV	1 300	250	750	1 300	1 300	1 300	1 300	250	.....
$SSI WV$ /kV	1 050	200	650	1 175	1 175	1 175	1 175	200	576



注：图中未标明影响设计的杂散电容。

图 A.2 来自交流侧(普通型高压直流换流站)缓波前过电压对阀避雷器作用的简化电路——缓波前过电压(施加的电压)的图解说明

避雷器上的作用值:

$U_{\max} = 500 \text{ kV}$ $I_{\max} = 1.03 \text{ kA}$ 能量 = 698 kJ

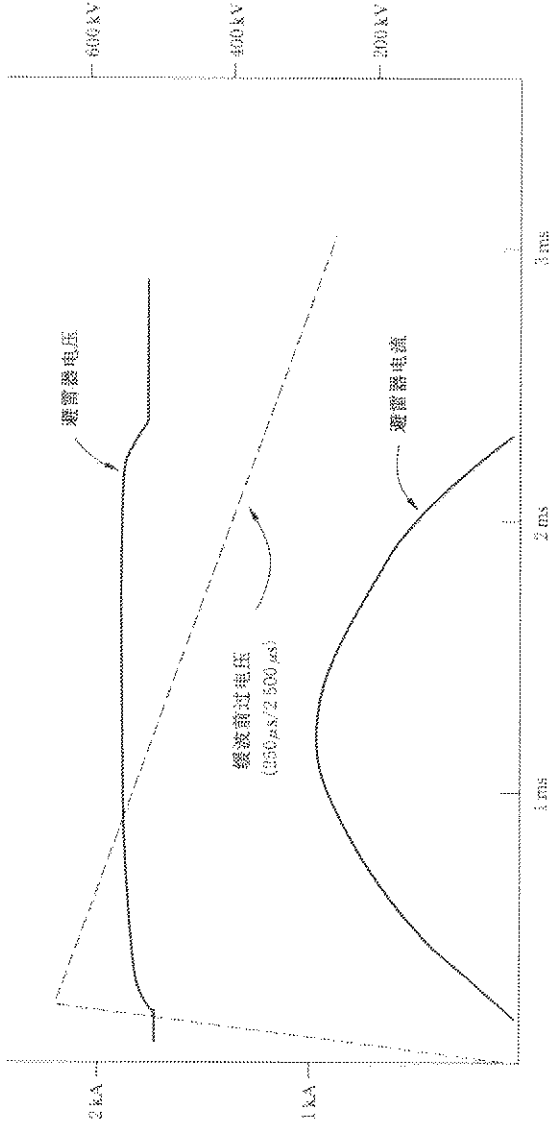
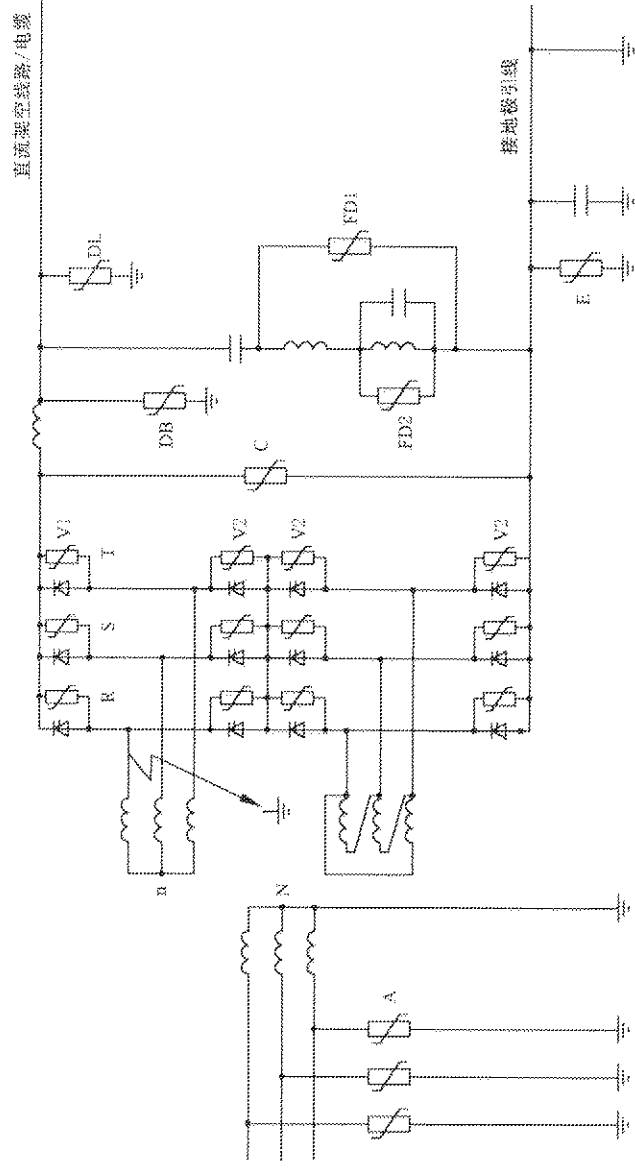


图 A.3 从交流侧来的缓波前过电压在阀避雷器 V2 上的作用(普通型高压直流换流器)



注: 图中未标明影响设计的杂散电容。

图 A.4 换流变压器高压套管(普通型高压直流换流站)接地故障在阀避雷器上作用的电路图

避雷器上的作用值:

$U_{\max} = 500 \text{ kV}$ $I_{\max} = 4.2 \text{ kA}$ 能量 = 16 189 kJ

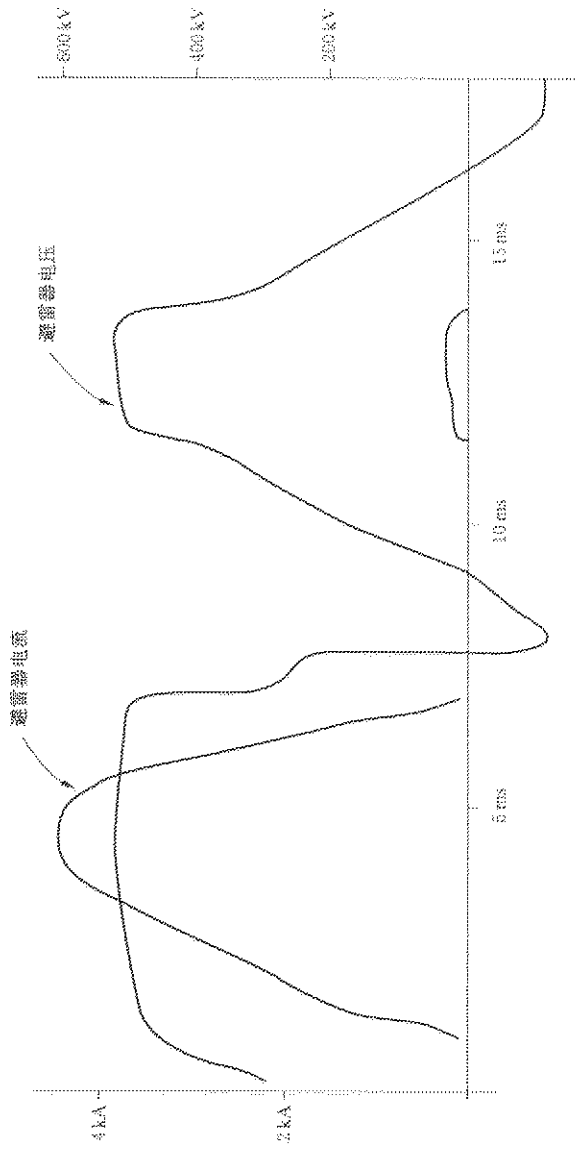


图 A.5 换流变(普通型高压直流换流站)高压套管接地故障期间在阀避雷器 V1 上的作用

附录 B
(资料性附录)
可控串联电容换流器(CSCC)和电容换相换流器(CCC)绝缘配合的例子

B.1 引言

本附录给出了以直流电缆作为极线和大轴作为回线的 CSCC 和 CCC 换流站的绝缘配合的计算方法和详细说明。这个例子是一个非常简略的知识性的指导。主要讲述了基于正文中的程序选择避雷器的额定值和额定绝缘水平的步骤。

在本附录中给出的结果是基于同第 9 章,及 6.7.1 中描述的程序和研究方法。因为对于直流没有标准耐受电压,把 SSIWV、SLJWV 和 SSFIWV 的计算值近似的取为可行值。

B.2 避雷器保护方案

图 B.1a 和 B.1b 表明了 CSCC 和 CCC 换流站的避雷器保护方案。所有避雷器采用无间隙氧化锌避雷器。

B.3 避雷器承受的负载、保护水平和绝缘水平的确定

下列主要数据用于换流站绝缘配合设计:

交流侧:强交流系统网

直流侧:

直流电压	500	kV(整流侧)
直流电流	1 590	A
平波电抗器	225	mH
触发角	15/17	deg(整流/逆变)

CCC/CSCC-电容器	CCC 换流器	CSCC 换流器
电容量	μF	43
U_{rms}	kV(r. m. s)	136
换流变压器		
容量(三相,六脉动)	MVA	459
短路阻抗	pu	0.12
二次电压(阀侧)	kV	204
分接头范围	r. m. s	$\pm 5\%$
每相电感(阀侧)	mH	35

交流母线避雷器(A1)和(A4)
CCC和CSCC换流器数据

参数	单位	CCC/CSCC 母线1(A1)	CSCC 母线4(A4)
系统标称电压	kV(r, m, s)	400	400
系统最高电压(U_s)	kV(r, m, s)	420	420
持续运行电压, 相对地	kV(r, m, s)	243	256
S IPL(在 1.5 kA)	kV	632	690
L IPL(在 10 kA)	kV	713	790
传递到阀侧(两相之间)的最大缓波前过电压	kV	612/560	N. A.
并联柱数	—	2	2
避雷器能量	MJ	3.2	3.4

避雷器(V1)和(V2)

下列数据适用于两端换流站

	CCC	CSCC
CCOV	$218 \times \sqrt{2}$	$208 \times \sqrt{2}$
并联柱数	4	4
	2	2
能量	5.4	5.2
	2.7	2.6

避雷器 V1
避雷器 V2
避雷器 V1
避雷器 V2

在阀避雷器上的作用由下面的研究工况确定。

B.3.1 从交流侧传递到阀侧的缓波前过电压

当单阀导通时从交流侧传递的缓波前过电压出现在两相之间时,将对避雷器产生最大的作用(见图 B.2a)和图 B.2b)。缓波前过电压的幅值取决于换流变网侧交流母线避雷器(A)的最大保护水平。

图 B.3a)和图 B.3b)表明了回路中仅一个避雷器导通时,对于 CCC 和 CSCC 换流器,缓波前过电压对阀避雷器作用,这种故障是底部阀避雷器(V2)设计的关键工况。

阀避雷器(V2)的结果:

阀避雷器(V2)的操作冲击保护水平(SIPL)为:

$$SIPL = 488.1 \text{ kV} \quad \text{在 } 40 \text{ A (见图 B.3a)CCC换流器}$$

$$480.8 \text{ kV} \quad \text{在 } 466 \text{ A (见图 B.3a)CSCC换流器}$$

$$RSIWV = 1.15 \times 488.1 \text{ kV} = 561.3 \text{ kV} \quad \Rightarrow \quad \boxed{SSIWV = 605 \text{ kV}}$$

$$= 1.15 \times 480.8 \text{ kV} = 553 \text{ kV}$$

上述值适用于 CCC 和 CSCC 换流器。

B.3.2 阀和换流变压器高压套管之间的接地故障

这个故障工况使保护最高位的三脉动换流组的阀避雷器承受最大负载。图 B.4a)和图 B.4b)中给出了该工况的等效电路图。高电上位上半桥阀避雷器的负载取决于故障起始的时刻。为了确定最大作用,故障接入时刻应从 0 到 360 电角度变化。

CCC 和 CSCC 换流器阀避雷器的负载结果见图 B.5a)和图 B.5b)。

如果缓波前过电压下(工况 a)最高电上位上半桥阀避雷器的最大负载没有该故障下高,那么,这个工况下对阀避雷器(V1)的作用就是决定设计的关键。

结果(对于阀避雷器(V1)):

阀避雷器的操作冲击保护水平(SIPL)为:

SIPL = 523.6 kV 在 1 776 A (见图 B.5a) CCC 换流器)

= 498.9 kV 在 2 244 A (见图 B.5b) CSCC 换流器)

RSIWV = 1.15 × 523.6 kV = 602.1 kV ⇒ SSIWV = 605 kV

= 1.15 × 498.9 kV = 574 kV

上述值对于 CCC 和 CSCC 换流器都适用。

CCC 和 CSCC 电容器避雷器(CC/CSC)

	CCC 换流站	CSCC 换流站
CCOV	kV 45	136
并联柱数	8	6
能量*	MJ 4.0	4.0
SIPL	kV 149	207
相应配合电流	kA 7.8	8.8
LIPL	kV 172	250
相应配合电流	kA 10	10
RSIWV = 1.15 × SIPL	kV 200	250
RLIWV = 1.20 × LIPL	kV 250	300

(图 B.6a)) (图 B.6b))

换流器单元避雷器(C)

下面给出的值适用于两个换流站

CCOV	558 kV
并联柱数	1
能量	2.5 MJ

计算研究来自交流侧的缓波前过电压,确定该组避雷器承受的负载。研究中设定换流器正常运行时四个晶闸管导通,缓波前过电压在两相间传递。传递的缓波前过电压幅值为阀避雷器电压的两倍。

设计换流器单元避雷器时,选择下列配合电流及其对应的值:

SIPL = 930 kV 在 0.5 kA
LIPL = 1 048 kV 在 2.5 kA

RSIWV = 1.15 × 930 kV = 1 070 kV ⇒ SSIWV = 1 175 kV

RLIWV = 1.20 × 1 048 kV = 1 258 kV ⇒ SLIWV = 1 300 kV

直流母线避雷器(DB)

对两边换流站都应用下面的值:

CCOV	515 kV
并联柱数	1
能量	2.2 MJ

对直流母线避雷器(DB)设计,选择下列配合电流及其对应的值:

SIPL = 866 kV 在 1 kA
LIPL = 977 kV 在 5 kA

RSIWV = 1.15 × 866 kV = 966 kV ⇒ SSIWV = 1 050 kV

RLIWV = 1.20 × 977 kV = 1 173 kV ⇒ SLIWV = 1 300 kV

* 是基于换流变的高压套管接地故障。

直流线路/电缆避雷器(DL)

对直流线路/电缆末端都应用下面的值:

CCOV 515 kV

并联柱数 8

能量 17.0 MJ

设计直流线路/电缆避雷器(DL)时,选择下列配合电流及其对应的值:

S IPL=897 kV 在 1 kA

L IPL=872 kV 在 5 kA

R SIWV=1.15×807 kV=928 kV

⇨ SSIWV=950 kV

R LIWV=1.20×872 kV=1 046 kV

⇨ S LIWV=1 050 kV

中性母线避雷器(E)

下面给出两个选项,即中性母线避雷器的值:

CCOV 30 kV

并联柱数 2

能量 2.4 MJ

设计所有中性母线避雷器(E)时,选择下列配合电流及其对应的值:

S IPL=78 kV 在 2 kA

L IPL=88 kV 在 10 kA

R SIWV=1.15×78 kV=90 kV

⇨ SSIWV=25 kV

R LIWV=1.20×88 kV=106 kV

⇨ S LIWV=25 kV

交流滤波器避雷器(FA)

避雷器运行电压包括基波和暂态电压。

在交流母线上,接地故障之后的恢复过电压期间确定避雷器的额定值。

交流滤波器避雷器(FA1)

U_{ch} 60 kV

并联柱数 2

能量 1.0 MJ

设计避雷器(FA1)时,选择下面配合电流及其对应的值:

S IPL=158 kV 在 10 kA

L IPL=192 kV 在 20 kA

R SIWV=1.15×158 kV=182 kV

⇨ SSIWV=200 kV

R LIWV=1.20×192 kV=230 kV

⇨ S LIWV=250 kV

交流滤波器避雷器(FA2)

U_{ch} 30 kV

并联柱数 2

能量 0.5 MJ

设计避雷器(FA2)时,选择下面配合电流及其对应的值:

S IPL=104 kV 在 2 kA

L IPL=120 kV 在 10 kA

R SIWV=1.15×104 kV=120 kV

⇨ SSIWV=150 kV

$$RLJWV=1.20 \times 120 \text{ kV} = 144 \text{ kV} \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{SLJWV=150 \text{ kV}}$$

直流滤波器避雷器(FD)

避雷器运行电压主要由谐波电压组成。

当缓波前过电压传递到直流侧时,直流母线发生接地故障。此时对该避雷器产生的作用将确定避雷器的额定值。

直流滤波器(FD1)

U_{50} 5 kV

并联柱数 2

能量 0.8 MJ

设计避雷器(FD1)时,选择下面配合电流及其对应的值:

SIPL=136 kV 在 2 kA

LJPL=184 kV 在 40 kA

RSJWV=1.15×136 kV=156 kV

$$\Leftrightarrow \quad \boxed{SSJWV=200 \text{ kV}}$$

RLJWV=1.20×184 kV=221 kV

$$\Leftrightarrow \quad \boxed{SLJWV=250 \text{ kV}}$$

直流滤波器避雷器(FD2)

U_{50} 5 kV

并联柱数 2

能量 0.5 MJ

设计避雷器(FD2)时,选择下面配合电流及其对应的值:

SIPL=104 kV 在 2 kA

LJPL=120 kV 在 10 kA

RSJWV=1.15×104 kV=120 kV

$$\Leftrightarrow \quad \boxed{SSJWV=150 \text{ kV}}$$

RLJWV=1.20×120 kV=144 kV

$$\Leftrightarrow \quad \boxed{SLJWV=150 \text{ kV}}$$

B.4 换流变阀侧耐受电压的确定

B.4.1 相对相

由于换流变的阀侧绕组没有被一个避雷器直接保护,就需要考虑下面两个工况。

——当阀导通时,换流变阀侧的相对相绝缘由一个阀避雷器(V)保护;

——当阀闭锁时,两个避雷器(V)串联在相对相之间,在这种情况下,传输的缓波前过电压决定了避雷器最大缓波前过电压。

SIPL=512 kV (对 CCC 的传递缓波前过电压)

560 kV (对 CSCC 的传递缓波前过电压)

RSJWL=1.15×SIPL

$$\boxed{SSJWV=650 \text{ kV}}$$

$$\boxed{SLJWV=750 \text{ kV}}$$

如果两相分属独立的变压器单元(单相、三绕组变压器)并且假设承受电压不同,对星形绕组相对相额定的绝缘水平选择如下:

$$\boxed{SSJWV=550 \text{ kV}}$$

$$\boxed{SLJWV=650 \text{ kV}}$$

B.4.2 上部换流变压器相对地(星形)

在阀导通状态期间,换流变压器相间施加的缓波前过电压决定了变压器和换流器的相对地绝缘。

来源于交流侧的缓波前过电压受到换流变网侧避雷器(A)的限制。这种出现过电压的方式不可能在晶闸管阀非导通状态发生。因此,仅需考虑导通状态。

SIPL=976 kV 对于 CCC(避雷器(V2)的 $2 \times SIPL$, 见图 B. 3a) 假设在中性母线避雷器中没有电流)
962 kV 对于 CSCC(避雷器(V2)的 $2 \times SIPL$, 见图 B. 3b) 假设在中性母线避雷器中没有电流)

$$RSI WV = 1.15 \times SIPL \quad \Rightarrow \quad SSI WV = 1\ 175\ kV$$

$$SLI WV = 1\ 300\ kV$$

B. 4. 3 下部换流变压器相对地(三角形)

假设在中性母线避雷器无电流流过, 相对地额定绝缘水平同于相间。

$$SSI WV = 650\ kV$$

$$SLI WV = 750\ kV$$

B. 5 空气绝缘的平波电抗器耐受电压的确定

缓波前过电压下的端对端

平波电抗器两端最为严重的工作是经过避雷器(DL)限制过的缓波前过电压叠加直流电压, 其总的电压是:

避雷器(DL) SIPL:

最大直流电压:

两个电压之和:

平波电抗器(三相):

变压器电感(三相):

总电感:

一个 225 mH 平波电抗器

端子之间电压:

$$SIPL = 842\ kV \quad \Rightarrow \quad SSI WV = 1\ 175\ kV$$

$$RSI WV = 1.15 \times SIPL = 968\ kV$$

在端子之间的最大快波前过电压是电抗器端子之间电抗器阀侧对地电容和电抗器阀侧对地电容对比值决

定。具体雷电耐受电压是

端子对地

$$SLI WV = 1\ 300\ kV$$

$$SSI WV = 1\ 175\ kV$$

$$SLI WV = 1\ 300\ kV$$

B. 6 计算结果表

避雷器类型		A	V1	V2	C	DB	DL	E	FD1	FD2	FA1	FA2	CC
U_{50} 或 CCOV	kV	243	308	308	538	515	515	30	5	5	60	30	60
	r. m. s	peak	peak	peak	d. c.	d. c.	d. c.	d. c.	d. c.	d. c.	r. m. s	r. m. s	peak
雷电:													
——保护水平	kV	713	—	—	1 048	977	872	88	184	120	192	120	172
——电流	kA	10	—	—	2.5	5	5	10	40	10	20	10	10
操作:													
——保护水平	kV	632	523	488	930	866	807	78	136	104	158	104	149
——电流	kA	1.5	1.8	0.1	0.5	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	7.6
柱数		2	4	2	1	1	8	2	2	2	2	2	8
能量	MJ	9.2	5.2	2.6	2.5	2.2	17.0	0.4	0.8	0.5	1.0	0.5	4.0

保护位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U_m/kV	243	60	30	243	558	308	308	30	558	515	15	15
$L1PL=REAO/kV$	713	192	120	713	—	—	—	88	1 048	977	184	120
$S1PL=RSLO/kV$	632	158	104	632	976	523	523	78	936	866	136	104
$SL1WV/kV$	1 425	250	150	1 425	1 300	750	750	150	1 300	1 300	250	150
$SS1WV/kV$	1 050	200	150	1 050	1 175	650	650	150	1 175	1 175	200	150

保护位置	1—2	2—3	5-5a CC	5和6 相对相	5—6	8—9	9—10	10—11	11—12	耦合V1和 V2
$L1PL=FFMO/kV$	825	192	172	—	—	1 048	—	977	184	—
$S1PL=RSLO/kV$	747	158	149	523	976	930	842	866	136	523
$SL1WV/kV$	1 300	250	250	750	1 300	1 300	1 300	1 300	250	—
$SS1WV/kV$	1 050	200	200	650	1 175	1 175	1 175	1 175	200	605

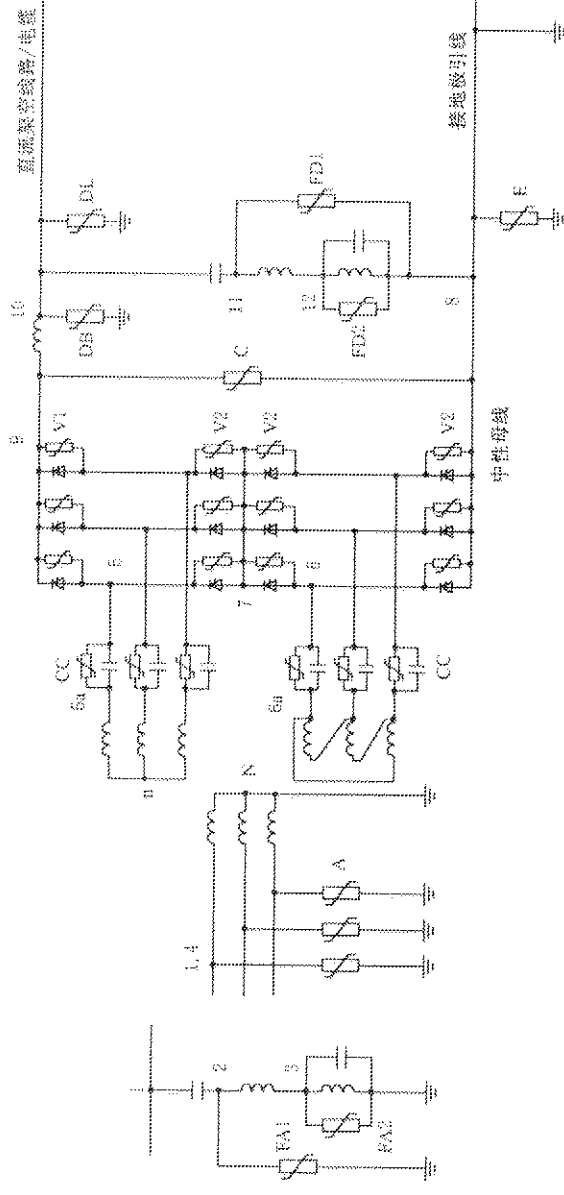


图 B.1a) 交流、直流避雷器(CCC换流器)

避雷器类型	A	V1	V2	C	DB	DL	E	FDI	FD2	FA1	FA2	CSC	A4
U_m 或COV	kV	243	294	558	515	515	30	5	5	60	30	95	256
雷电:			peak	d.c.	d.c.	d.c.	d.c.	d.c.	d.c.	r. m. s.	r. m. s.	r. m. s.	r. m. s.
——保护水平	kV	713	—	—	977	872	88	184	120	192	120	250	790
——电流	kA	10	—	—	5	5	10	40	10	20	10	10	10
操作:													
——保护水平	kV	632	499	—	866	807	78	136	104	158	104	207	690
——电流	kA	1.5	2.2	0.5	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	8.8	1.5
柱数	—	2	4	2	1	8	2	2	2	2	2	6	2
能量	MJ	9.2	5.2	2.6	2.5	17.0	0.4	0.8	0.5	1.0	0.5	4.0	3.4

保护位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U_{m}/kV	243	60	30	258	558	294	294	30	558	515	15	15
$L1PL=RF\text{AO}/\text{kV}$	713	192	120	790	—	—	—	68	1 048	977	184	120
$S1PL=RSLO/\text{kV}$	632	158	104	690	962	499	499	78	930	866	136	104
$SL1WV/\text{kV}$	1 425	250	150	1 425	1 300	750	750	150	1 300	1 300	250	150
$SS1WV/\text{kV}$	1 050	200	150	1 050	1 175	650	650	160	1 175	1 175	200	150

保护位置	1—2	2—3	1—4 CSC	5和6 相对称	5—6	8—9	9—10	10—11	11—12	调 V1 和 V2
$L1PL=RF\text{AO}/\text{kV}$	825	192	250	—	—	1 048	—	977	184	—
$S1PL=RSLO/\text{kV}$	747	158	207	523	982	930	842	866	136	523
$SL1WV/\text{kV}$	1 300	250	300	750	1 300	1 300	1 300	1 300	250	—
$SS1WV/\text{kV}$	1 050	200	250	650	1 175	1 175	1 175	1 175	200	605

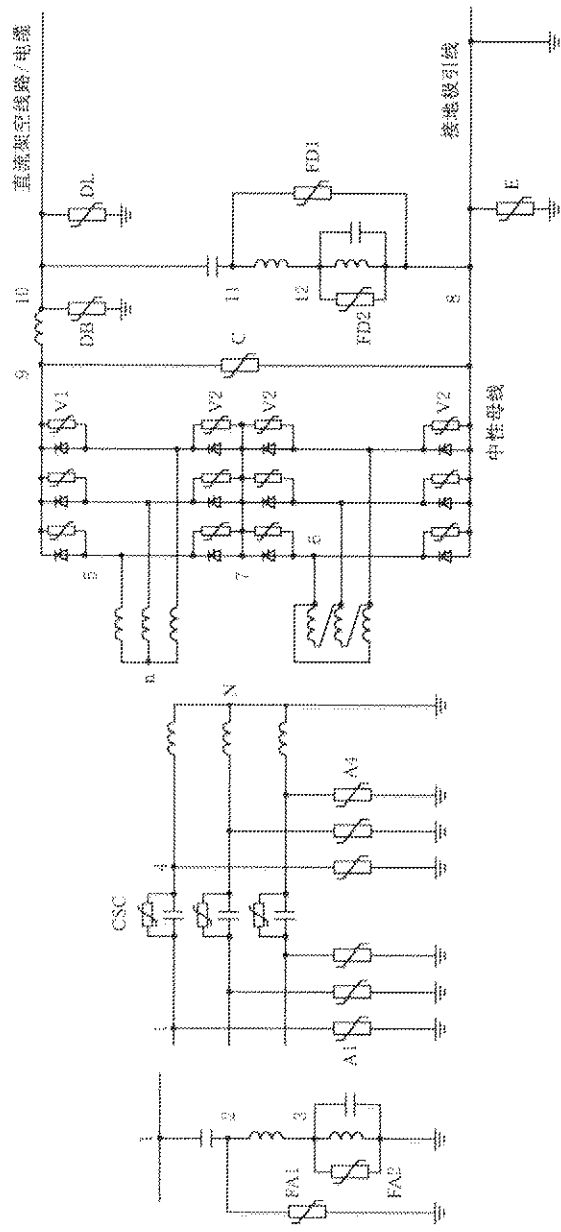


图 B. 1b) 交流, 直流避雷器 (CSC 换流器)

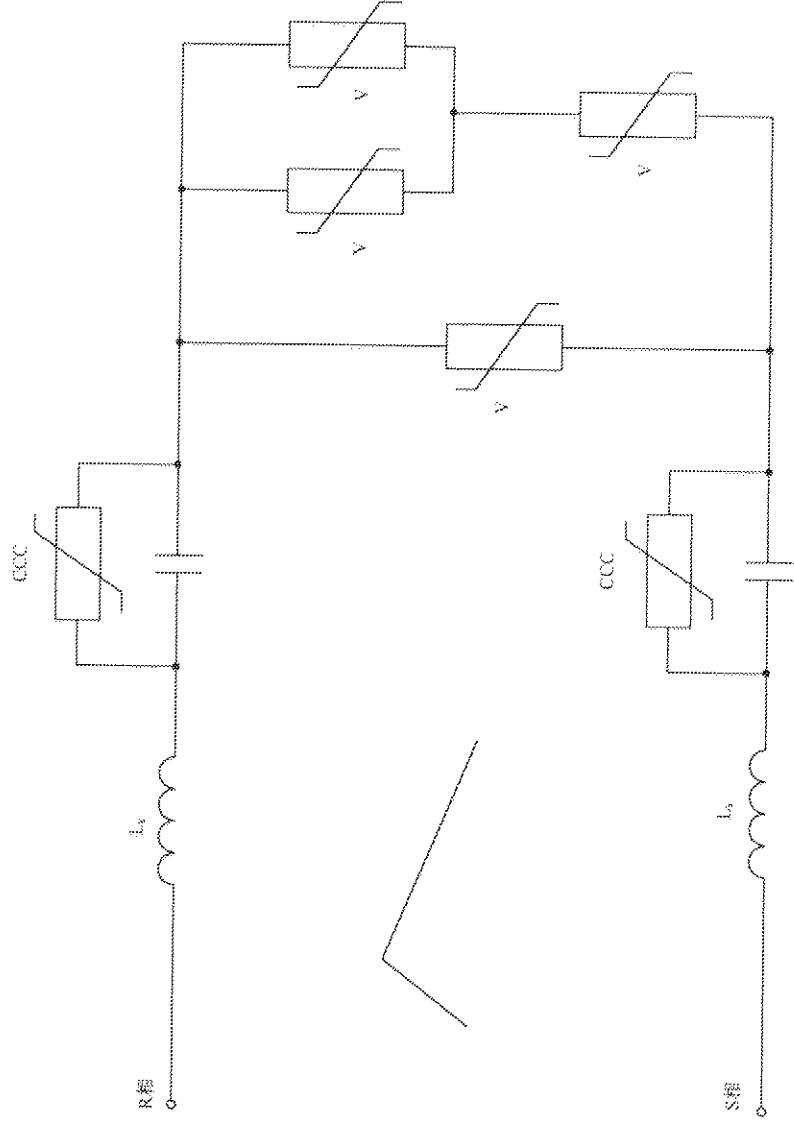


图 B.2a) 交流侧来的缓波前过电压对阀避雷器作用的简化电路(CCC换流器)

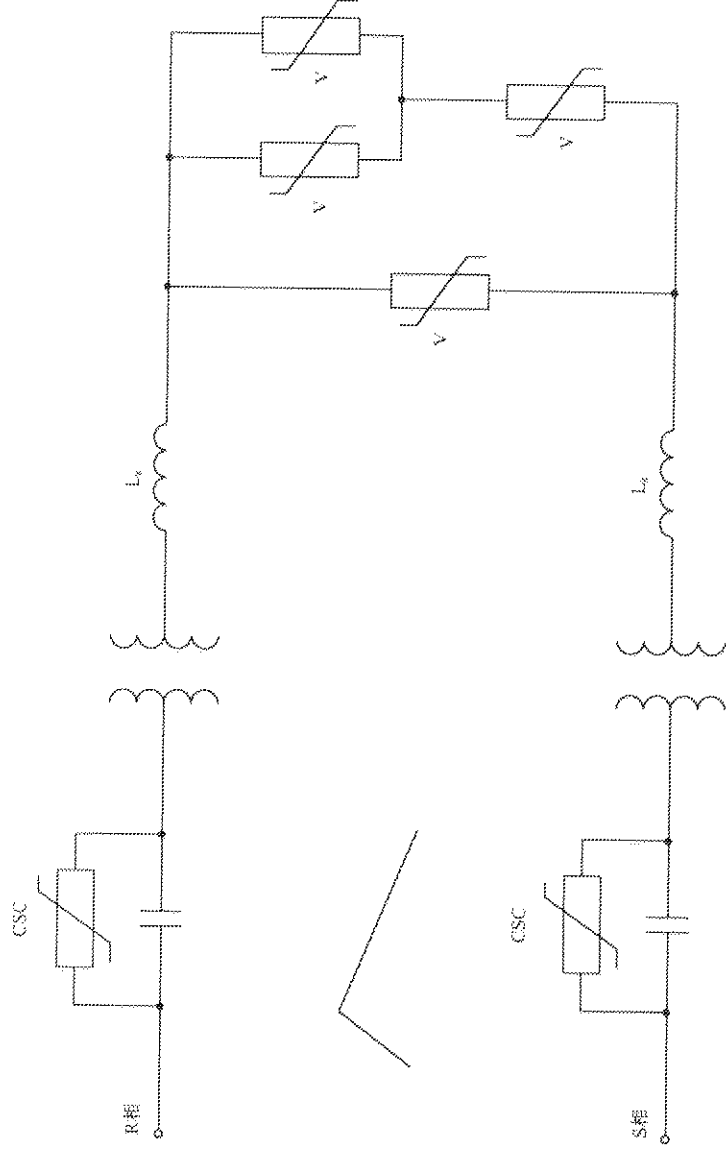


图 B.2b) 交流侧来的缓波前过电压对阀避雷器作用的简化电路(CSC换流器)

避雷器承受的作用值:

$U_{max} = 488 \text{ kV}$ $I_{max} = 0.04 \text{ kA}$ 能量 = 1.9 kJ

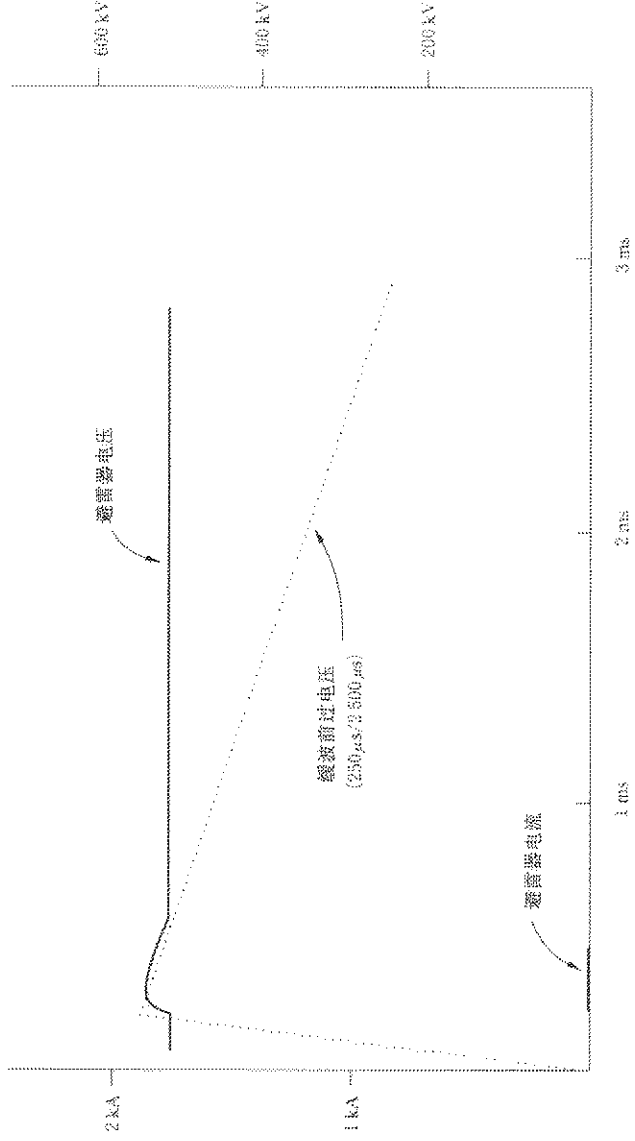


图 B.3a) 交流侧传来的缓波前过电压在阀避雷器(V2)上的作用(CCC 换流器)

避雷器承受的作用值:

$U_{max} = 481 \text{ kV}$ $I_{max} = 0.47 \text{ kA}$ 能量 = 223 kJ

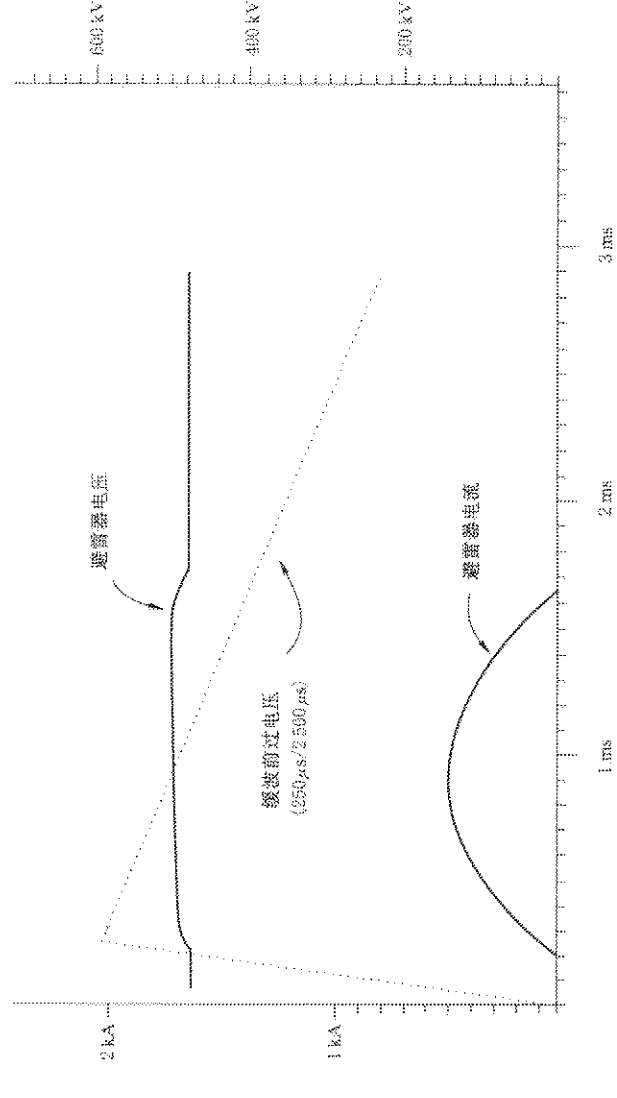
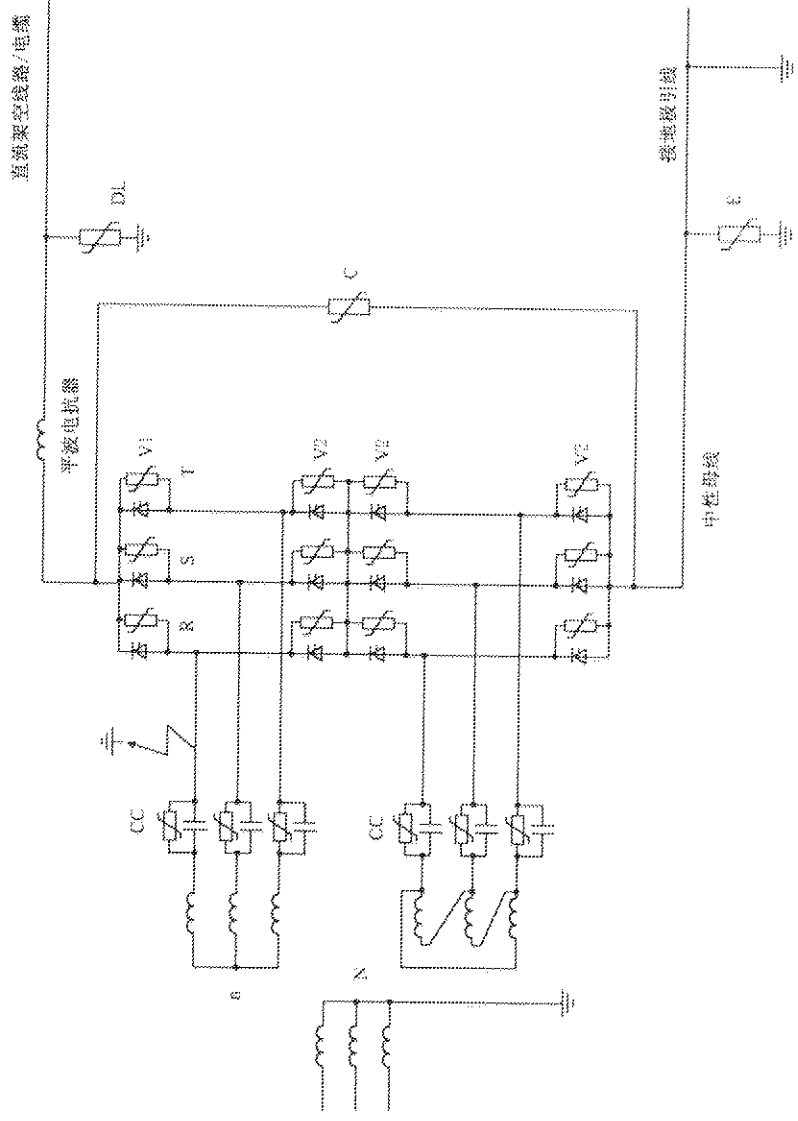
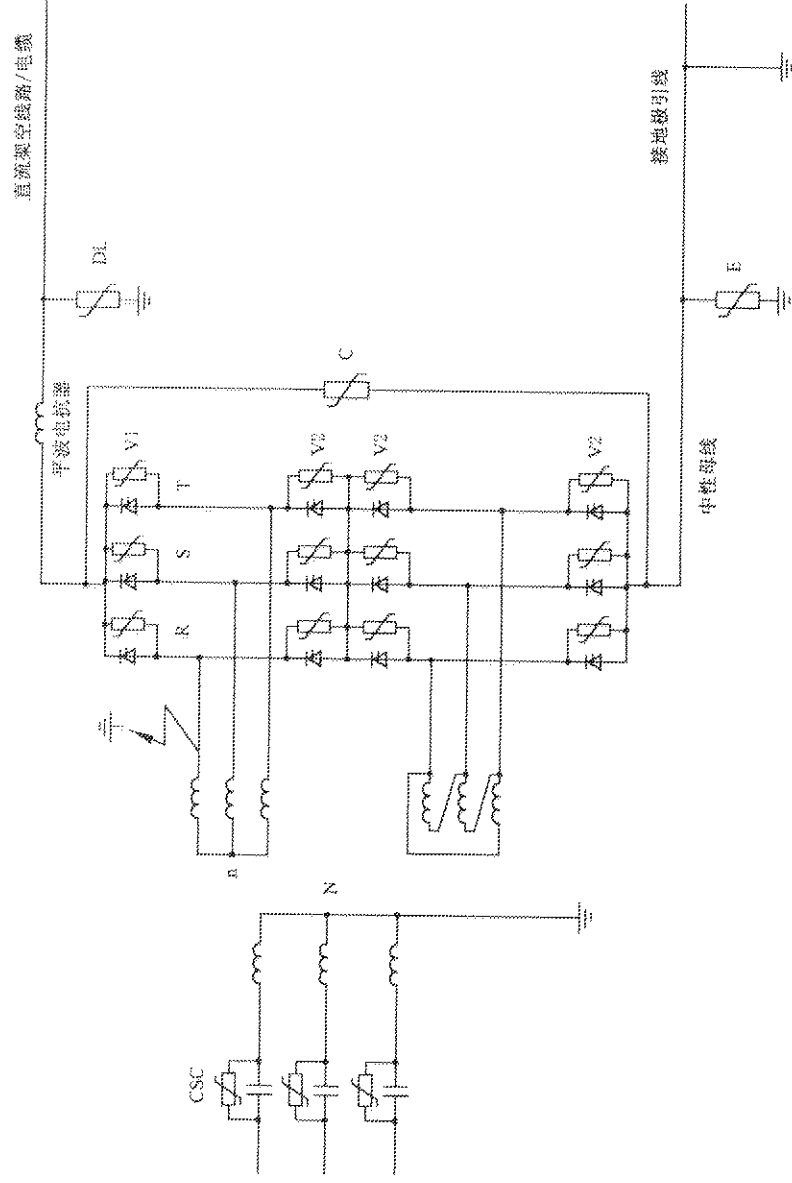


图 B.3b) 来自交流侧的缓波前过电压在阀避雷器(V2)上的作用(CSCC 换流器)



注：图中未标明影响设计的杂散电容。

图 B.4a) 换流变的高压套管接地故障在阀避雷器上的作用电路图(CCC换流器)



注：图中未标明影响设计的杂散电容。

图 B.4b) 换流变的高压套管接地故障在阀避雷器上的作用电路图(CSC换流器)

避雷器承受的作用值:

$U_{\max} = 524 \text{ kV}$ $I_{\max} = 1.78 \text{ kA}$ 能量 = 3 690 kJ

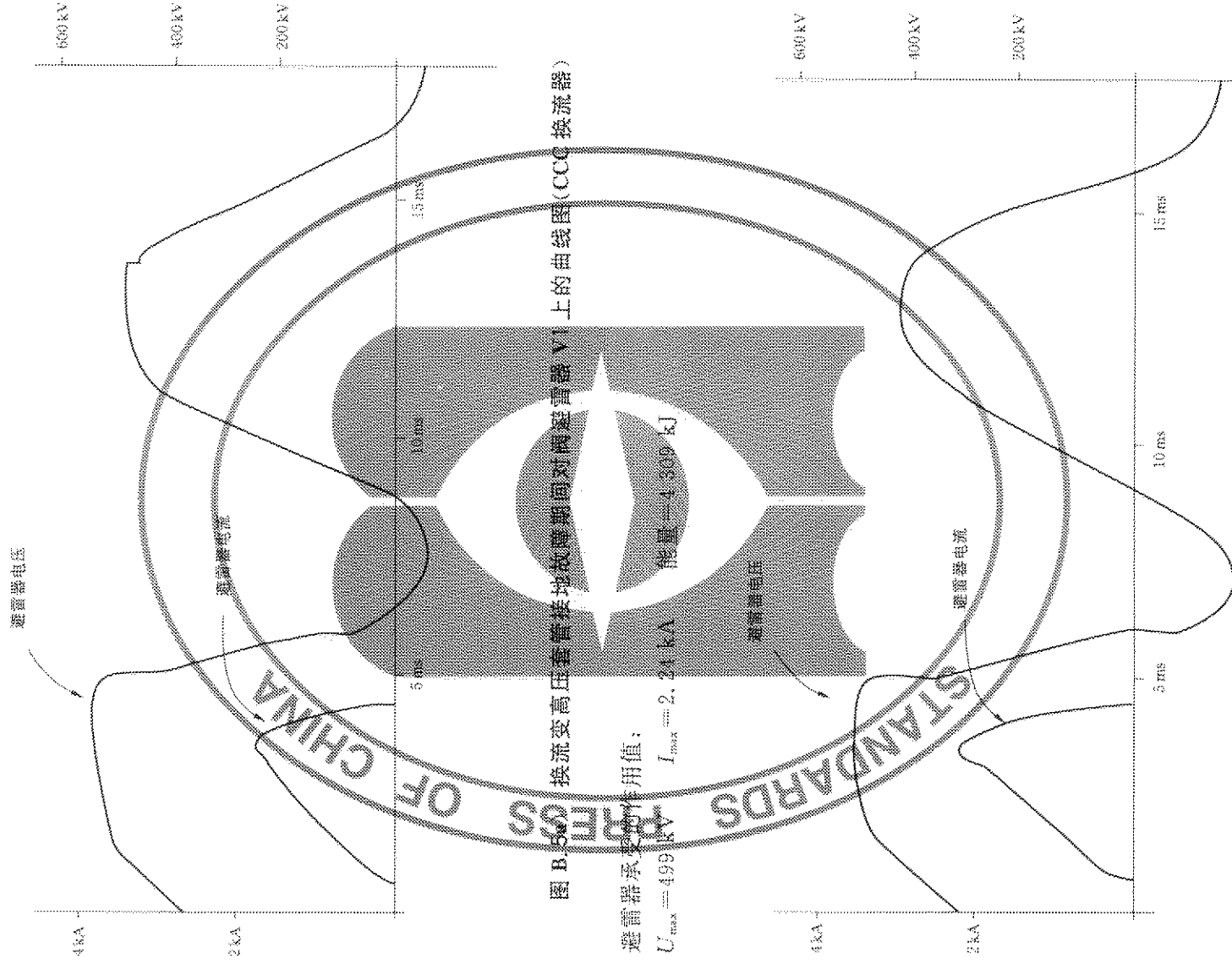


图 B.5b) 换流变高压套管接地故障期间在阀避雷器 V1 上作用的曲线图(CSCC 换流器)

避雷器承受的作用值:

$U_{\max} = 149 \text{ kV}$ $I_{\max} = 7.81 \text{ kA}$ 能量 = 3 687 kJ

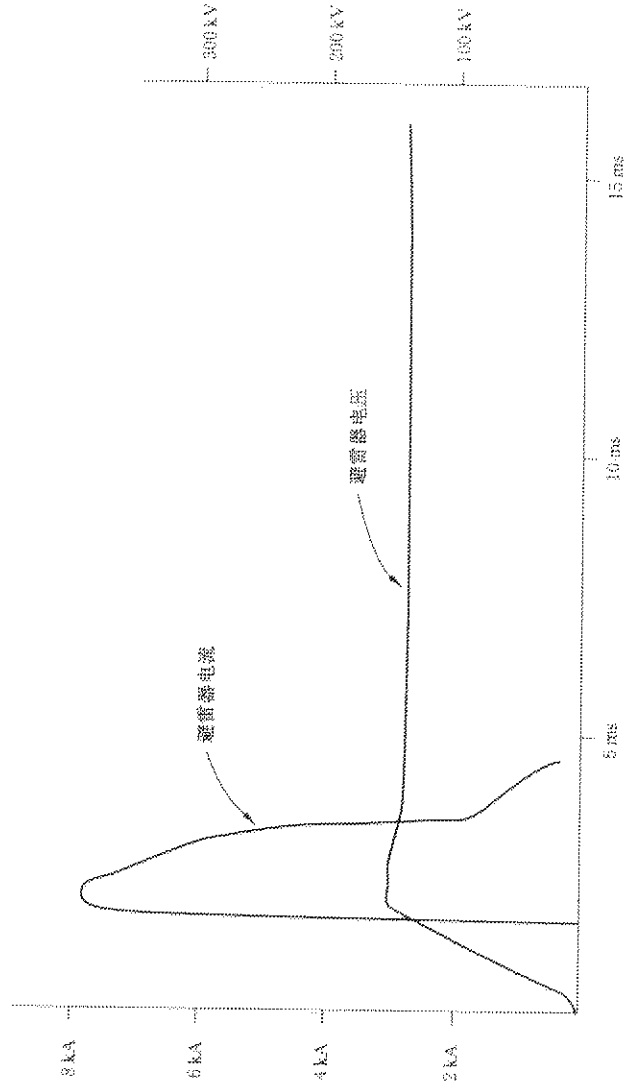


图 B.6a) 换流变高压套管接地故障期间在 CCC 电容器避雷器 CC 上的作用 (CCC 换流器)

避雷器承受的作用值:

$U_{\max} = 207 \text{ kV}$ $I_{\max} = 8.84 \text{ kA}$ 能量 = 8 866 kJ

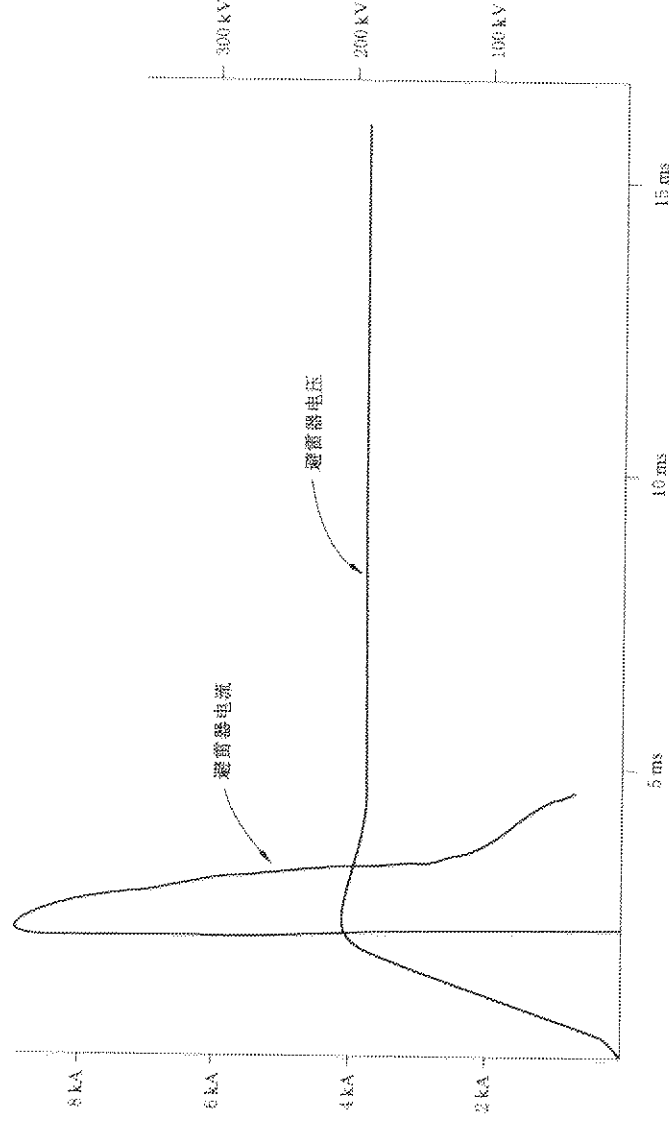


图 B.6b) 换流变的高压套管的接地故障期间的 CSCC 电容器避雷器 CSC 上的作用 (CSCC 换流器)

附录 C (资料性附录) 一些特殊型换流器绝缘配合的确定

C.1 背靠背型高压直流系统的绝缘配合程序

背靠背直流系统的两个换流器(整流和逆变)位于同一个站内,所有的阀在同一个建筑中。其直流系统的绝缘配合程序类似于有直流线路或电缆的绝缘配合设计。分析评估避雷器的要求、不同故障(第9章)的过电压和其他方面时,应考虑到换流器端子之间的相互影响。为此在建立研究模型时必须考虑两端之间的部分。

在研究中,应考虑陡波前过电压和陡波前过电压从一端传到另一端的影响。如果存在平波电抗器,应考虑平波电抗器的电感电容。由于在阀回路的影响中包括了换流变压器电感和电容的影响,所以无论平波电抗器是否存在,在背靠背设计中这一影响都非常小的。

C.2 并联阀组的绝缘配合程序

当设计一个新的换流站或扩展一个现有的换流站可能会出现阀组并联的情况。这种换流站(图 C.1)的绝缘配合程序不同于普通型单阀组站如第9章的解释方法。

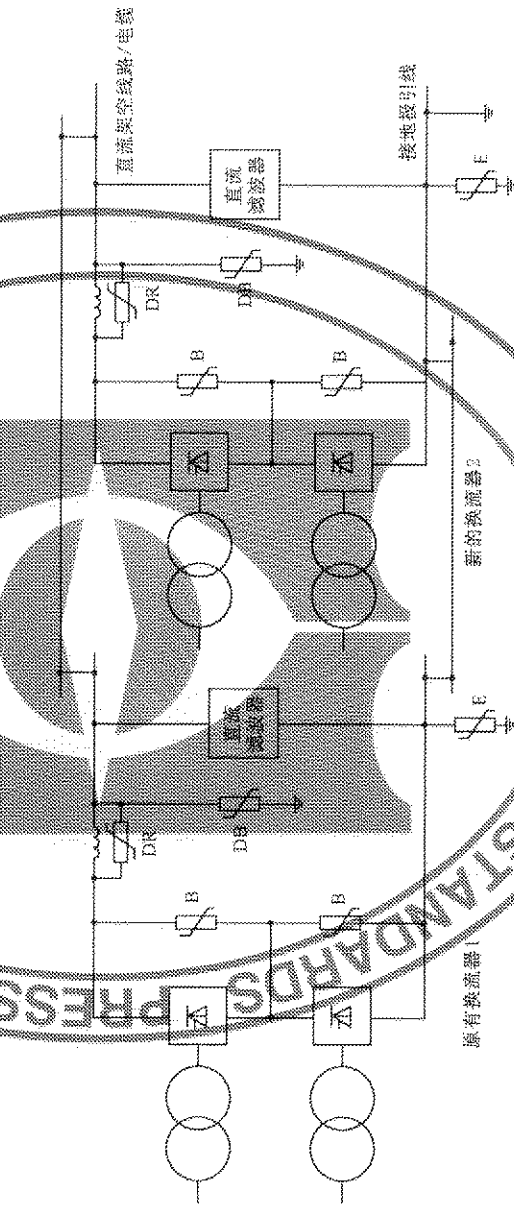


图 C.1 并联阀组扩展高压直流换流站

所有避雷器(包括可能跨接在平波电抗器上的避雷器)都应该与换流器2的避雷器相配合。当一个原有换流站并联换流器2扩容时,对不同避雷器的不同方面要求在下列条款中描述。

交流母线避雷器(A)

扩展的交流母线避雷器的保护水平应该低于原有的避雷器保护水平,并有足够的裕度。在这种情况下,原有的交流母线避雷器将不会有过载。然而新的交流母线避雷器应该设计到满足最苛刻的工况:交流故障清除后出现饱和恢复过电压和甩负荷引起的过电压。在某些情况下,为了更好的使扩展和现有的避雷器能量分配均等,最好的技术方案是重新考虑避雷器的保护作用更替现存避雷器。

交流滤波器避雷器(FA)

在并联运行期间的低次谐波具有较大的幅值将使原有的低次谐波滤波器避雷器可能过载。因此这些避雷器需要更换,除非并联运行后对原有避雷器没有影响。

阀避雷器(V)

在并联运行期间最苛刻的工况是在最高直流电位桥的换流变阀侧发生接地故障。在这种情况下,完好换流器提供的电流将会增加对阀避雷器的作用。保护动作以避免阀避雷器过载,这仅对最高直流电位的三脉动换相组的阀避雷器有效。所有其他阀避雷器可以根据 9.4 中的规定设计。

桥避雷器(B)和换流单元避雷器(C)

在原有换流器接地故障期间这些避雷器可能过载。因此,这些避雷器需要更换。

中点直流母线避雷器(M)

阀组在旁通运行期间,中点避雷器可能过载。此情况下中点避雷器需要更换。

换流器单元直流母线避雷器(CB)

已存在的避雷器不受并联运行的影响。

直流母线和直流线路/电缆避雷器(DB和DL)

已存在的避雷器不受并联运行的影响。

中性母线避雷器(E)

新加的中性母线避雷器应比原有的避雷器保护水平低。这样原有避雷器不会过载。同时,新的避雷器在较低的保护水平下设计都应满足 9.10 中所有工况的要求。

直流平波电抗器避雷器(DR)

如果使用,接地故障期间大的故障电流将影响到电抗器避雷器。然而,这个将仅影响原有避雷器的保护水平而不是能量。这个增加或许在电抗器的保护裕度范围之内。

直流滤波器避雷器(FD)

当原有的直流滤波器仍然保留时,必须对原有的直流滤波器的绝缘配合进行校核,特别是在直流滤波器组内的接地故障。这个新的直流滤波器可以按 9.12 来设计。带有并联阀组的新的换流组站

上述考虑也适用于原有换流站安装的有间隙的避雷器,并且包括并联新的金属氧化物避雷器。

如果设计两个新的换流站,这样的设计同样适用。

C.3 使用串联阀组更新原有换流站的绝缘配合程序

两个 12 脉动的换流阀串联连接的换流站绝缘配合的一般程序见第 9 章中对普通型单 12 脉动阀的说明。然而,逆变电站旁通阀的使用,应采取特别的措施(见 6.4.2)。

对附加一个串联阀组的原有换流站(见图 C.2)的改进的绝缘配合大纲如下:

所有新的换流器的避雷器应该与原有的换流器的避雷器相配合。在下列条款中对新的避雷器及对原有避雷器的影响的不同方面进行了论述。如果原有极的任何设备都保留,那么就要对它们的绝缘进行充分的评估。

交流母线避雷器(A)

新的交流母线避雷器的保护水平应比原有的避雷器保护水平低,并有足够的安全裕度。在这种情况下,原有交流母线避雷器将不会过载。而且在设计新的避雷器时必须考虑最苛刻的故障;故障清除后饱和恢复过电压及甩负荷引起的过电压对避雷器的作用。在某些情况下,为了使新的和原有的避雷器具有均等能量吸收能力最好的技术方案是更换原有交流母线避雷器。

交流滤波器避雷器(FA)

由于在阀组串联中低次谐波电流具有较大的幅值将会使原有低次谐波避雷器产生过载,所以这些避雷器需要更换,除非不会对原有避雷器有影响。

阀避雷器(V)

预计对原有避雷器没有影响,新的阀避雷器设计可按 9.4。

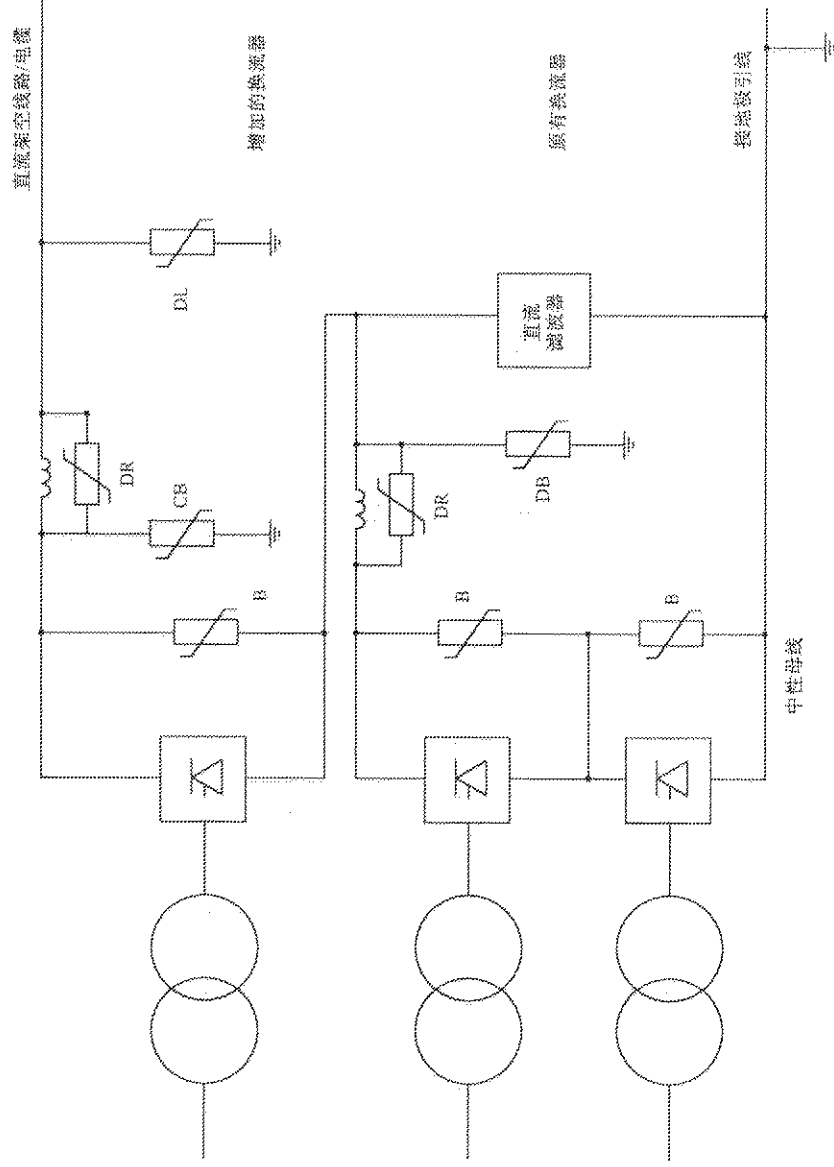


图 C.2 使用串联阀改进原有的高压直流换流器

桥避雷器(B)和换流单元避雷器(C)

在原有换流器极接地故障期间,这些避雷器可能过载,在此情况下,这些避雷器就需要更换。

中点直流母线避雷器(M)

当阀组旁通运行期间,这些避雷器上可能过载。在此情况下,这些避雷器需要更换。

换流器单元直流母线避雷器(CB),直流母线和直流线路/电缆避雷器(DB和DL)

在新的换流器单元的旁通运行期间原有避雷器可能过载。在此情况下,原有避雷器应予以更换。更新母线避雷器设计应根据 9.8 和 9.9。

中性母线避雷器(E)

更新时在原有避雷器上或许会引起过载,因而需要更换。新的避雷器应按 9.10 的所给的故障工况设计。

直流平波电抗器避雷器(DR)

如果使用,接地故障期间大的故障电流将影响电抗器避雷器。然而,这些仅影响原有避雷器的保护水平而不是能量。其保护水平的增加值可能在电抗器的保护裕度内。

直流滤波器避雷器(FD)

当原有直流滤波器保留时,必须重新校验直流滤波器的绝缘配合,特别是在直流滤波器内的接地故障时。新直流滤波器避雷器根据 9.12 设计。

C.4 交流滤波器连接在换流变的第三个绕组上的绝缘配合程序

在一些设计中,特别是背靠背直流工程,为了减少投资,交流侧滤波器的所有设备断路器,开关都连接在换流变压器的第三个低压绕组上。这种连接方式与滤波器连在换流变网侧的绝缘配合程序比较没有什么不同。系统研究应具有一个合适的饱和变压器模型,同时,研究也要包括第三绕组上的避雷器和

故障情况。当第三绕组为三角形连接,在设计中应综合考虑相对相之间和相对地之间连接的避雷器,其研究和选择的程序同于交流网侧滤波器。在某些设计中,滤波器被断开前,避雷器可能用于限制完全或部分甩负荷后引起的暂时过电压,而且避雷器额定值的确定是基于系统研究。

C.5 高压直流耦合到交流线路上对交流系统过电压的影响

当多条直流馈入同一个交流站中或换流器端有两条不同的直流线路连接到附近 20 km 或 30 km 的交流站时,将会出现耦合现象。

一个直流回路的干扰,包括全部或部分甩负荷,引起过电压而影响另一个直流回路的换流站。在这种情况下,交流系统故障能够在两站(即使相同的交流系统条件)产生的过电压比在一条直流回路运行产生的过电压更为严重。在接近换流器端的交流线路侧避雷器的保护水平和相应配合电流要紧密配合,使它们分担适当责任。两个换流站交流母线连接的所有变压器的饱和特性和参数及交流网络的最小短路容量,都应建立能够充分表示最苛刻工况的模型。绝缘配合的详细程序与单回直流方案相同。

C.6 气体绝缘开关对高压直流换流站绝缘配合的影响

对于某些直流海缆连接的位于海岸的高压直流站,应特别注意考虑盐污秽的防范措施。且需要考虑风暴和台风引起盐污染的程度和速度;对于一些难于获得足够空间安装变电站设备的高压直流换流站;使用气体绝缘设备能够有效帮助解决污秽问题,同时使设备结构紧凑,减少换流站面积。

GIS 能被用到换流站的交流侧和/或直流侧。在交流侧的 GIS 象普通交流变电站一样固定在一起。交流 GIS 常包括断路器、隔离开关、交流母线避雷器和电压传感器、电流传感器。

典型的直流侧的 GIS 由主母线的隔离开关,主母线旁通回路断路器和金属中性母线保护的直流母线避雷器、电压传感器和电流传感器组成。对于直流 GIS,由直流电场引起的内表面悬浮导电颗粒和积累在绝缘体表面的电荷干扰常常都要考虑。

在装有 GIS 的高压直流站中,产生的过电压的波形、峰值和持续时间,常常与装有空气绝缘的开关设备的换流站相同。一般不必要特别考虑 GIS 对绝缘配合的影响。

在装有 GIS 设备的高压直流站中,当气体绝缘隔离开关合闸时,将从 GIS 中产生一个几百 kHz 到几 MHz 的高频振荡电压。特别是这个振荡电压经过很小的阻尼直接传到换流器。这类型的电压峰值低,在某种程度不能称作“过电压”。然而,由于它的 dv/dt 值超过了晶闸管阀的允许值,应予以特别考虑。典型的解决措施是为隔离开关提供一个电阻,并且在隔离开关合闸前插入这个电阻。

在 GIS 中的避雷器的电压和电流特性通常与空气中的避雷器相同。在 SF₆ 中避雷器的特性不会有什么变化,不象安装在空气中的避雷器,套管表面的污秽可能影响其特性。

为了确定直流 GIS(DC-GIS)的试验电压,要考虑在 SF₆ 气体中电介质绝缘材料对不同类型过电压的影响。在空气中耐受电压峰值与达到峰值时间的特性,在雷电冲击时间范围内有一个负 dv/dt 的陡度。但在 SF₆ 气体中二者特性关系在所有时间范围内是相对平缓的。能用相同的研究工具获得直流 GIS 内的过电压,如数字暂态分析程序。对于直流 GIS,直流过电压,反极性直流过电压,伏波前,缓波前和其他过电压都应予以考虑。

中华人民共和国
国家标准
绝缘配合

第3部分：高压直流换流站绝缘配合程序
GB/T 311.3—2007

*

中国标准出版社发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码：100045

网址 www.spc.net.cn
电话：68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

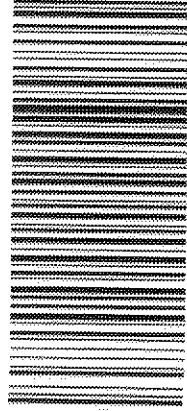
开本 880×1230 1/16 印张 4 字数 114千字
2008年4月第一版 2008年4月第一次印刷

*

书号：155066·1-30921 定价 40.00元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究

举报电话：(010)68533533



GB/T 311.3-2007