

绝缘配合 第 12 部分：高压直流换流站 (LCC) 绝缘配合应用导则

目 录

| | |
|--|-----|
| 前 言 | II |
| 引 言 | III |
| 1 范围 | 1 |
| 2 规范性引用文件 | 1 |
| 3 术语、定义、符号和缩略语 | 1 |
| 4 典型高压直流换流站布置图 | 3 |
| 5 运行中的电压和过电压 | 5 |
| 5.1 换流站不同位置的持续运行电压 | 5 |
| 5.2 最大峰值持续运行电压 (PCOV) 和峰值持续运行电压 (CCOV) | 8 |
| 5.3 过电压来源和类型 | 10 |
| 5.4 暂时和谐振过电压 | 11 |
| 5.5 缓波前过电压 | 12 |
| 5.6 快波前、特快波前和陡波前过电压 | 15 |
| 6 避雷器特性和应力 | 15 |
| 6.1 避雷器特性 | 15 |
| 6.2 避雷器规范 | 16 |
| 6.3 避雷器应力 | 18 |
| 6.4 保护策略 | 28 |
| 6.5 故障事件及避雷器应力汇总 | 31 |
| 7 绝缘配合计算程序 | 33 |
| 7.1 概述 | 33 |
| 7.2 避雷器要求 | 33 |
| 7.3 代表性过电压 (U_{Tp}) | 33 |
| 7.4 配合耐受电压 (U_{cw}) 的确定 | 33 |
| 7.5 要求耐受电压 (U_{rw}) 的确定 | 33 |
| 7.6 规定耐受电压 (U_w) 的确定 | 33 |
| 7.7 换流变阀侧绕组 SIWV/LIWV 的比值 | 33 |
| 8 研究工具和系统模型 | 37 |
| 8.1 概述 | 37 |
| 8.2 研究方法及工具 | 37 |
| 8.3 系统模型 | 38 |
| 附录 A | 42 |
| 附录 B | 43 |
| 附录 C | 59 |
| 参考文献 | 69 |

引 言

GB/T 311《绝缘配合》旨在确立高压交流和高压直流绝缘配合的原则和导则。由于交流绝缘配合和直流绝缘配合有明显的差别，需分为交流绝缘配合和直流绝缘配合两个方面，拟由以下部分构成。

——第 1 部分：定义、原则和规则。目的在于确立绝缘配合定义、原则和规则。

——第 2 部分：使用导则。目的在于对正确执行第 1 部分提供使用指导。

——第 3 部分：高压直流换流站绝缘配合程序。目的在于对高压直流换流站的绝缘配合提供指导。

——第 4 部分：电网绝缘配合及其模拟的计算导则。目的在于确定绝缘配合数字化计算的导则。

——第 11 部分：高压直流系统绝缘配合定义、原则和规则。目的在于确立直流系统绝缘配合的定义、原则和规则。

——第 12 部分：高压直流换流站（LCC）绝缘配合应用导则。目的在于对以 LCC 为换流器的高压直流换流站的绝缘配合提供指导。

——第 13 部分：高压直流换流站（VSC）绝缘配合应用导则。目的在于对以 VSC 为换流器的高压直流换流站的绝缘配合提供指导。

——第 14 部分：高压直流系统 AC/DC 滤波器绝缘配合。目的在于确定高压直流系统中交流和直流滤波器的绝缘配合。

——第 15 部分：直流输电线路绝缘配合。目的在于确定直流输电线路及接地极线路的绝缘配合。

本文件是GB/T 311《绝缘配合》的第 12 部分。我国直流工程建设和运行经验日益丰富，亟需对直流系统绝缘配合统一规范，为我国直流工程建设提供指导性技术文件。本文件给出了采用电网换相的 HVDC 换流站（LCC）绝缘配合应用导则及应用示例，并根据我国 LCC 直流输电工程实际应用的情况对相关内容进行调整，以适应我国的技术条件和工程需求。

一旦本文件与GB/T 311.11 发布后，GB/T 311.3 将被废止。

绝缘配合 第 12 部分：高压直流换流站（LCC）绝缘配合应用导则

1 范围

本导则用于高压直流（HVDC）输电工程电网换相换流站（LCC）的绝缘配合，其目的是评估换流站设备在承受直流电压、工频电压、谐波电压和冲击电压下的过电压应力，并确定设备的额定耐受电压水平。

本文件仅涉及当前用于高压直流换流站过电压保护的无间隙金属氧化物避雷器。本文还介绍了避雷器串联或并联组合的保护水平的确定方法。同时给出了典型的避雷器配置方案和避雷器的应力。

基于正文所述内容及基本分析技术，附录给出了LCC HVDC 换流站的绝缘配合示例。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 311.1-2012 绝缘配合第 1 部分：定义、原则和规则(IEC 60071-1:2006，MOD)

GB/T 311.11 绝缘配合第 11 部分：高压直流系统绝缘配合定义、原则和规则(IEC 60071-11:2022，MOD)

GB/T 11032-2020 交流系统无间隙金属氧化物避雷器(IEC 60099-4:2014，MOD)

GB/T 13498-2017 高压直流输电术语(IEC 60633:2015，MOD)

GB/T 22389-2023 高压直流换流站无间隙金属氧化物避雷器

GB/T 25083-2010 ±800kV 直流系统用金属氧化物避雷器

GB/Z 24842-2018 1000 kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合

GB/T 50064-2014 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范

3 术语、定义、符号和缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 311.11 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

持续运行电压峰值 crest value of continuous operating voltage

换流站直流侧设备上出现的不包括换相过冲的最高持续运行电压峰值。

3.1.2

持续运行电压最大峰值 peak value of continuous operating voltage

换流站直流侧设备上出现的包括换相过冲的持续运行电压最大峰值。

3.1.3

阀保护触发 valve protective firing

通过触发晶闸管导通，保护晶闸管免受正向过电压、反向恢复期间过电压和陡波过电压的影响。

3.2 符号和缩略语

3.2.1 概述

仅涵盖了最为常用的符号和缩略语，其中一些已经在图 1 和图 2 的单线图中说明。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（第 2 章）和参考文献。

3.2.2 下脚标

下列下脚标适用于本文件。

| | |
|-----|-----------|
| 0 | 空载 |
| d | 直流电流或电压 |
| i | 理想 |
| max | 最大值 |
| n | 与n次谐波有关的量 |

3.2.3 符号

下列符号适用于本文件。

| | |
|--------------|--|
| K_a | 海拔修正因数 |
| K_c | 配合因数 |
| K_s | 安全因数 |
| U_c | 避雷器安装处的持续运行电压 |
| U_{ch} | 包括谐波的避雷器安装处的持续运行电压 |
| U_{ccov} | 持续运行电压峰值 |
| U_{SIPL} | 操作冲击保护水平 |
| U_{di0} | 理想空载直流电压 |
| U_{di0max} | 考虑交流电压测量误差、换流变分接开关单独调节一档等因素计算的 U_{di0} 最大值 |
| U_s | 交流系统的最高电压 |
| U_m | 设备最高电压 |
| U_{v0} | 换流变压器阀侧相对相空载电压（不包括谐波电压）。 |
| U_{rp} | 代表性过电压 |
| U_{cw} | 配合耐受电压 |
| U_{rw} | 要求耐受电压 |
| U_w | 规定耐受电压 |
| α | （触发）延迟角，本部分也用作触发角。 |
| β | （触发）超前角 |
| γ | 关断角（熄弧角） |
| μ | 换相角（重叠角） |

3.2.4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

| | |
|-------|---|
| LCC: | 电网换相换流器（Line Commutated Converter） |
| VSC: | 电压源换流器（Voltage Sourced Converter） |
| HVDC: | 高压直流（High Voltage Direct Current） |
| HV: | 高压（High Voltage） |
| LV: | 低压（Low Voltage） |
| CCOV: | 持续运行电压峰值（Crest value of Continuous Operating Voltage） |

| | |
|---------|---|
| GIS: | 气体绝缘开关设备 (Gas-Insulated Switchgear) |
| PCOV: | 最大峰值持续运行电压 (Peak Continuous Operating Voltage) |
| ECOV: | 等效持续运行电压 (Equivalent Continuous Operating Voltage) |
| RSFO: | 代表性缓波前过电压 (最大电压值) [Representative Slow-front Overvoltage (the maximum voltage stress value)] |
| RFFO: | 代表性快波前过电压 (最大电压值) [Representative Fast-front Overvoltage (the maximum voltage stress value)] |
| RSTO: | 代表性陡波前过电压 (最大电压值) [Representative Steep-front Overvoltage (the maximum voltage stress value)] |
| RSIWV: | 要求操作冲击耐受电压 (Required Switching Impulse Withstand Voltage) |
| RLIWV: | 要求雷电冲击耐受电压 (Required Lightning Impulse Withstand Voltage) |
| RSTIWV: | 要求陡波前冲击耐受电压 (Required Steep-front Impulse Withstand Voltage) |
| SIPL: | 操作冲击保护水平 (Switching Impulse Protective Level) |
| LIPL: | 雷电冲击保护水平 (Lightning Impulse Protective Level) |
| STIPL: | 陡波前冲击保护水平 (Steep-front Impulse Protective Level) |
| SIWV: | 操作冲击耐受电压 (Switching Impulse Withstand Voltage) |
| LIWV: | 雷电冲击耐受电压 (Lightning Impulse Withstand Voltage) |
| STIWV: | 陡波前冲击耐受电压 (Steep-front Impulse Withstand Voltage) |
| BP: | 双极运行 (Bipolar) |
| GR: | 单极大地回线 (Ground Return) |
| MR: | 单极金属回线 (Metallic Return) |
| p.u. : | 标么值 (per unit) |

4 典型高压直流换流站布置图

图 1 给出了典型的单极采用双 12 脉动换流器单元串联结构可能的避雷器布置图，该接线方式已广泛应用于 ±800kV 等级特高压直流工程中。值得注意的是，图 1 涵盖了可能布置的避雷器。根据具体的设计，布置会有所变化，可能会省去或增加某种类型的避雷器。

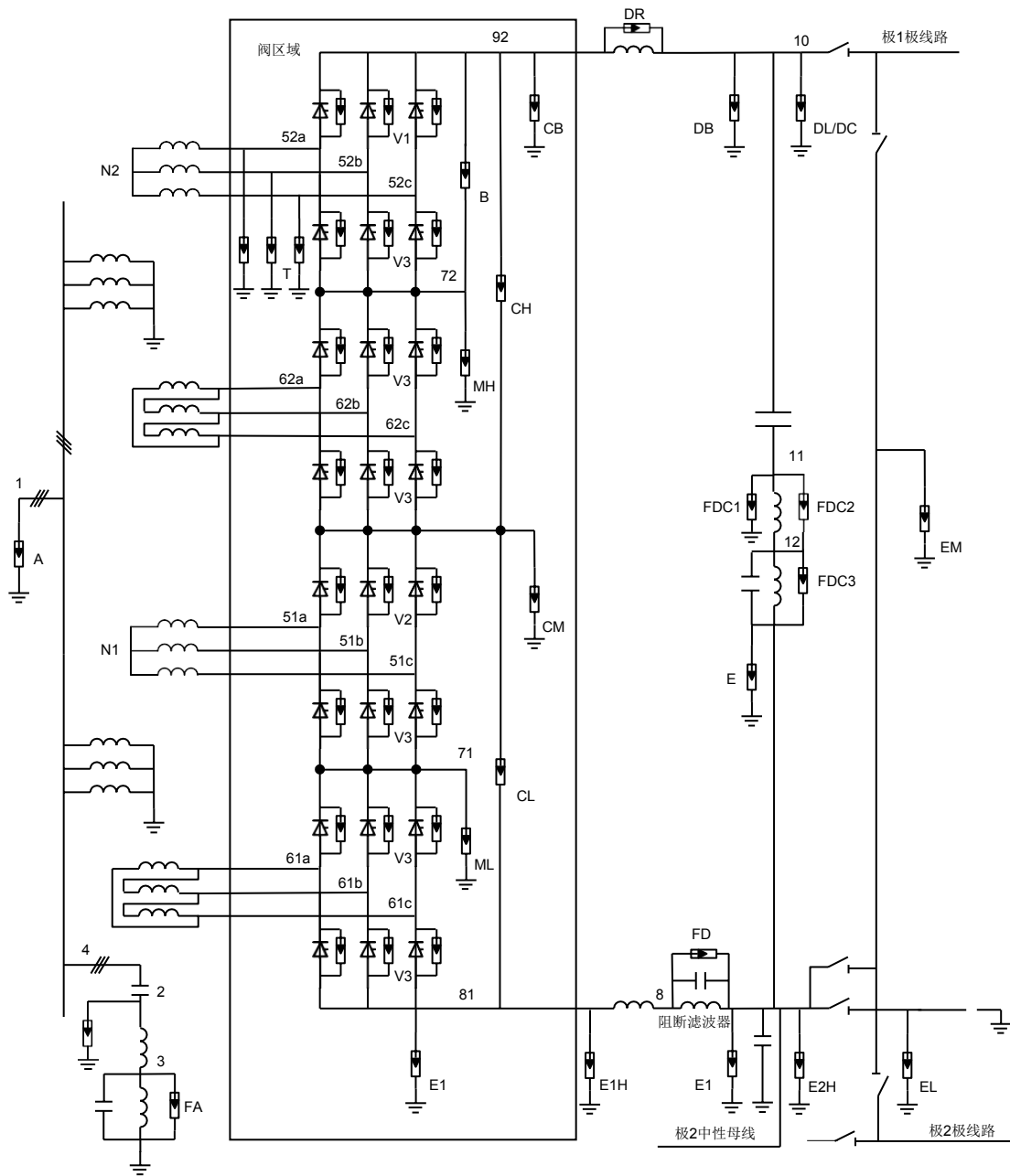
图 2 给出了一个背靠背换流站中可能的避雷器布置图。换流站不同的接地方式，例如在两组 6 脉动桥之间的中间点接地，会改变避雷器的布置。平波电抗器的布置位置也应根据实际情况做相应改变。

交流和直流滤波器结构会比图中所示的情况复杂。表 1 符号说明给出了本标准中所用的图形符号。对电压敏感的晶闸管阀需要严格的过电压保护，可由阀两端并联的避雷器保护。

在一般情况下，不单独配置变压器阀侧绕组相-相和相-地避雷器，而是由阀避雷器串联其它对地避雷器以提供过电压保护。对于 800kV 及以上的直流工程，可考虑在与极顶部阀组连接的换流变阀侧配置一组相对地避雷器直接保护，以降低其绝缘水平。

换流器上对应的每 6 脉动直流电压水平的元件可由单个避雷器或串联（或并联）的其他避雷器组合提供过电压保护。

有关避雷器的名称、设计细则和具体作用见第 6 章描述。

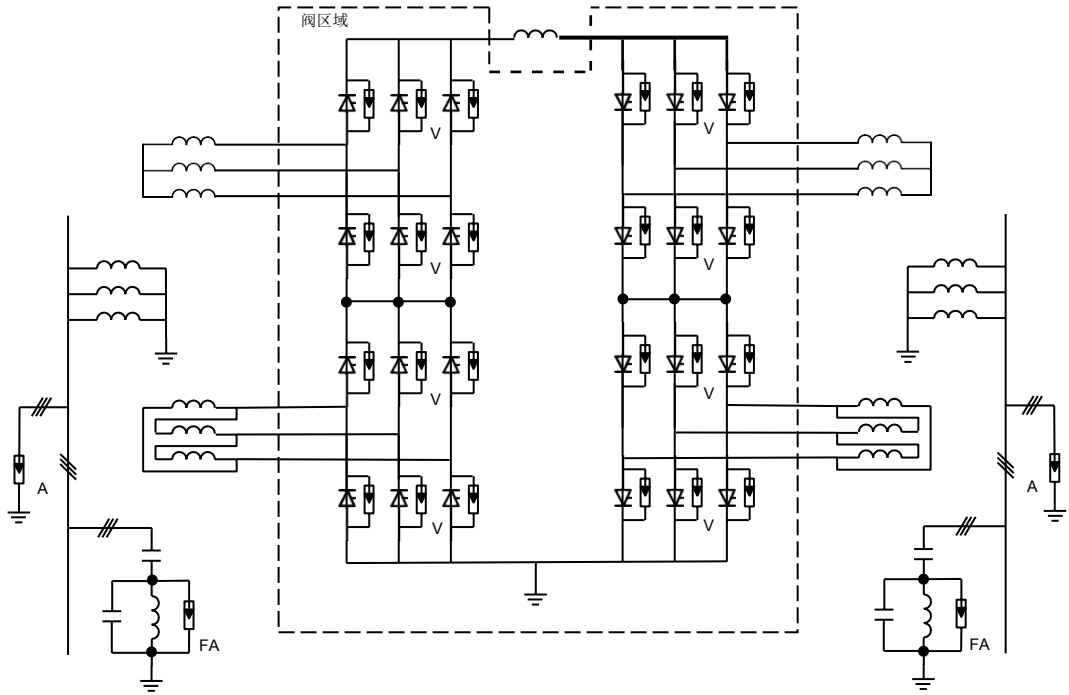


标引序号说明：

- A ——交流母线避雷器； E1H ——中性母线阀侧高能量避雷器；
- FD ——直流滤波器避雷器； E2H ——装在公共中性母线高能量避雷器；
- E1 ——直流中性母线避雷器； E ——中性母线避雷器；
- EB ——中性母线平抗阀侧避雷器； E1 ——中性母线阀侧避雷器；
- V ——阀避雷器； EM ——金属回线避雷器；
- T ——高端YY换流变阀侧避雷器； B ——桥避雷器（6脉动）；
- DR ——平波电抗器避雷器； CB ——直流极顶母线避雷器；
- DL ——直流线路避雷器； DB ——直流极母线避雷器；
- CL ——低端换流器单元避雷器； DL/DC——直流线路入口或电缆终端避雷器；
- CH ——高端换流器单元避雷器； CM ——高、低端换流器之间中点直流母线避雷器； FA ——交流滤波器避雷器； MH ——高端12脉动桥中点直流母线避雷器（HV桥）；

EL ——接地极线路入口避雷器； ML ——低端12脉动桥中点直流母线避雷器（LV桥）； FD ——阻断滤波器避雷器。

图 1 单极采用双 12 脉动换流单元串联结构可能的避雷器布置



标引序号说明：

A ——交流母线避雷器；

FA ——交流滤波器避雷器；

V ——阀避雷器。

图 2 背靠背换流站中可能的避雷器布置

表1 符号说明

| 符号 | 说明 |
|----|-------|
| | 单个阀桥臂 |
| | 避雷器 |
| | 电抗器 |
| | 电容器 |
| | 接地 |

5 运行中的电压和过电压

5.1 换流站不同位置的持续运行电压

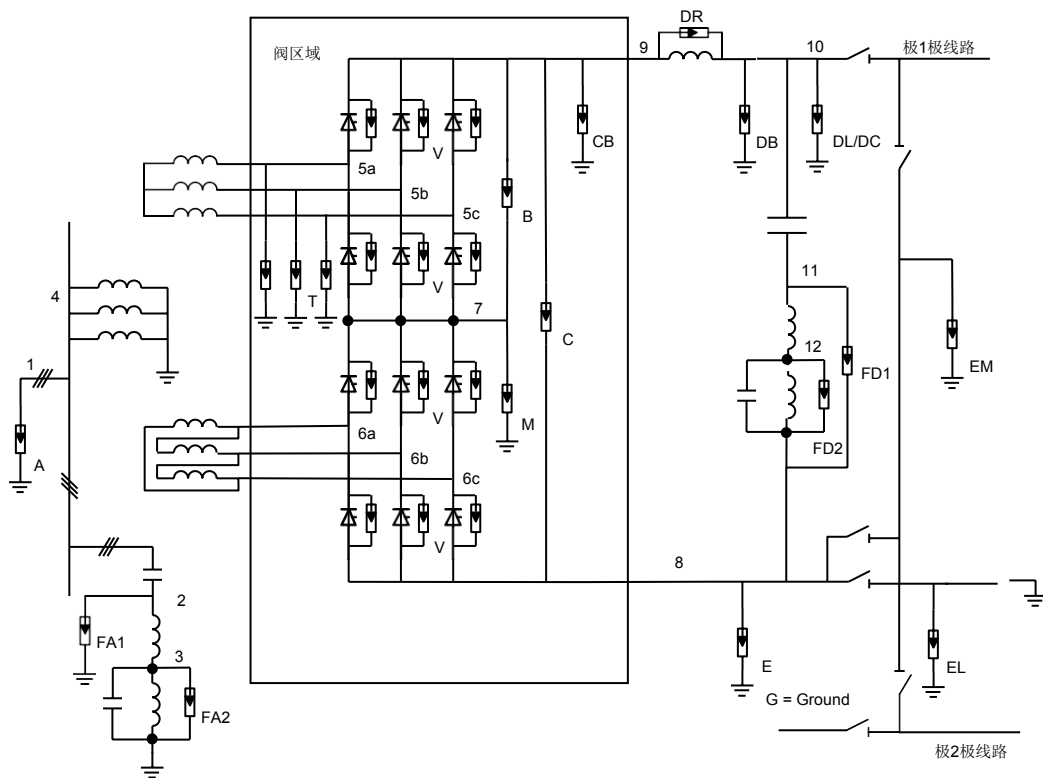
与交流系统不同，高压直流换流站不同位置的持续运行电压，不是单纯的基频电压，而是直流电压、基频电压、谐波电压及高频暂态电压的相互叠加，不同位置的持续运行电压波形不同。

国内 660 kV 直流输电工程和多个 800 kV 及以上的直流输电工程采用了图 1 所示的单极双 12 脉动换流单元串联结构的高压直流换流站的接线方式。

图 3 所示为每极具有单 12 脉动换流单元的高压直流换流站的单线图。通常 600 kV 及以下的高压直流工程不需要在高电位换流变压器阀侧装相对地避雷器(T)。

图 4 所示为图 3 中每极具有单 12 脉动换流单元的 HVDC 换流站各节点持续运行电压的典型波形，它不包括各节点对地或两节点之间波形上叠加的换相过冲。图 3 中的数字和字母名称分别标识了该节点的编号和接入该节点的避雷器名称。这些波形是在考虑典型直流参数后仿真计算得到的。

需要指出，图 1、图 2 和图 3 所示为可能的避雷器布置方案，根据具体工程有些避雷器可酌情增减。



标引序号说明：

- | | |
|----------------------|----------------------|
| A —— 交流母线避雷器； | CB —— 直流极顶母线避雷器； |
| M —— 中点直流母线避雷器； | EM —— 金属回线避雷器； |
| E —— 直流中性母线避雷器； | EL —— 接地极线路入口避雷器； |
| V —— 阀避雷器； | B —— 6 脉动桥避雷器； |
| T —— 换流变压器阀侧绕组避雷器； | C —— 换流单元避雷器； |
| DR —— 平波电抗器避雷器； | DB —— 直流极母线避雷器； |
| DL —— 直流线路避雷器； | DC —— 直流电缆避雷器； |
| FA1, FA2 —— 交流滤波避雷器； | FD1, FD2 —— 直流滤波避雷器。 |

图 3 每极具有单 12 脉动换流单元的 HVDC 换流站

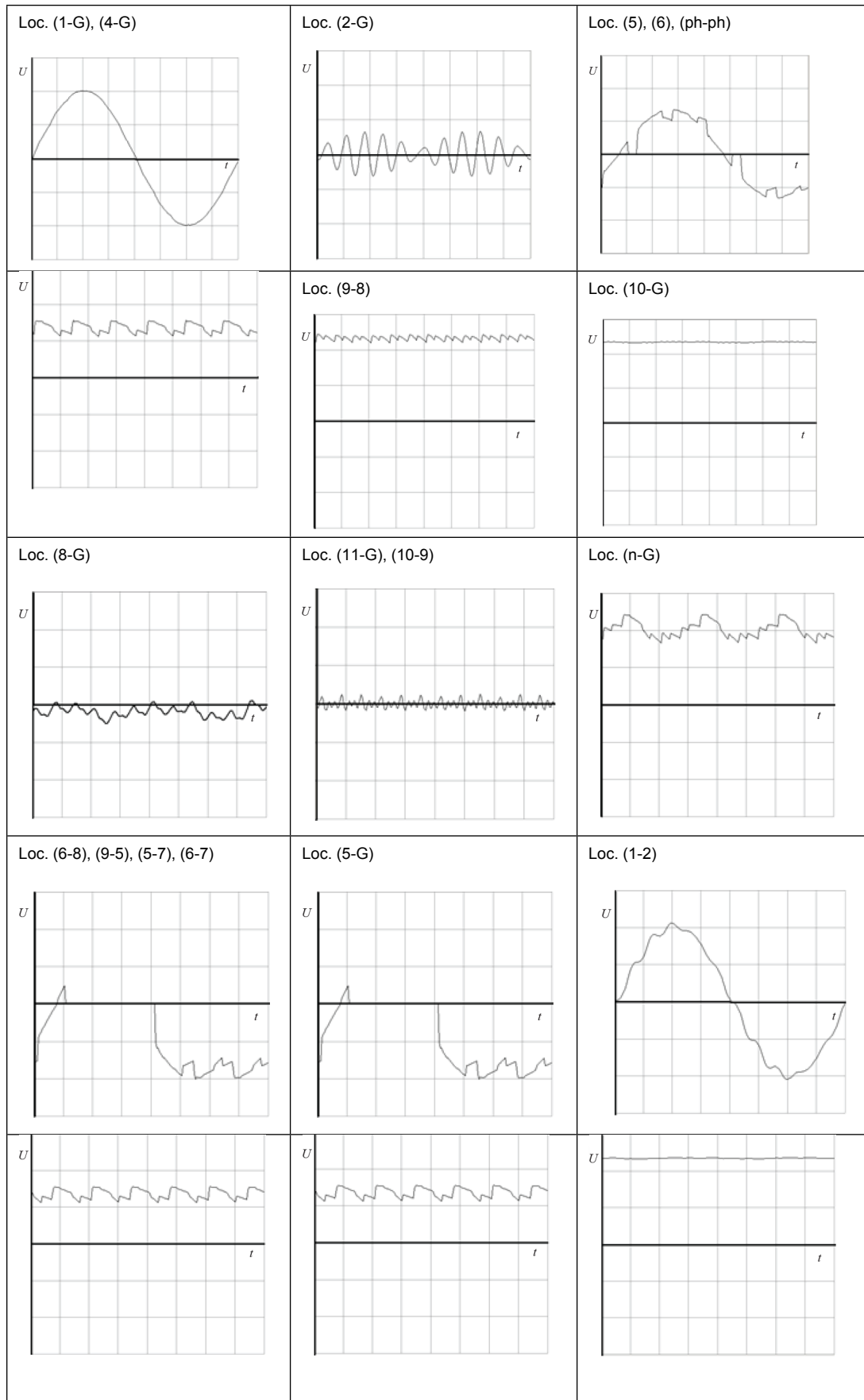


图 4 不同位置（按照图 3 标识的位置）的持续运行电压波形

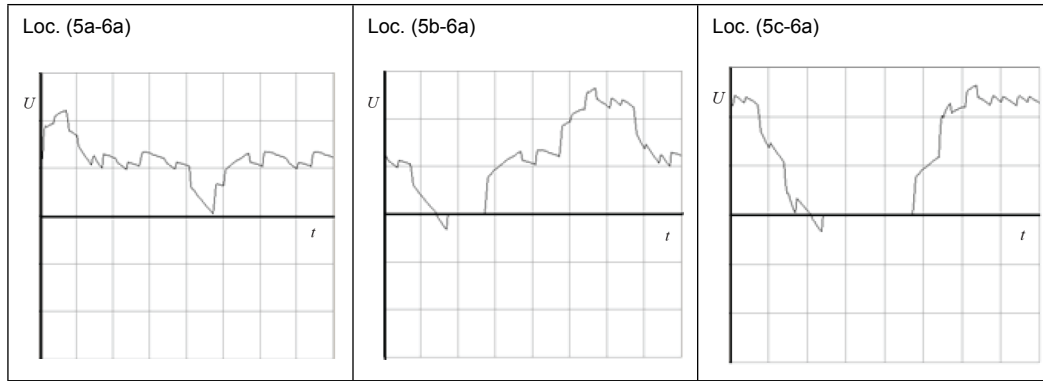


图 4 不同位置（按照图 3 标识的位置）的持续运行电压波形（续）

因交流侧装有交流滤波器进行滤波，(1-G)和(4-G)处的电压可视为无谐波的基频正弦波。

(1-2)处的电压波形为基频正弦波叠加谐波。谐波分量大小取决于滤波器的结构、调谐频率以及换流器的运行工况。一般情况下，总谐波分量不到基频的30%。

6脉动桥（位置7-8和位置9-7）两端的直流电压由交流线电压的 60° 弧度(持续时间为 $60^\circ-\mu$)和二分之一线电压(持续时间为 μ)两段组成。

如果6脉动换流器底部直接在站内接地，或者底部经接地极线路接地，但双极电流平衡运行时，6脉动桥的对地（位置7-G）电压可以与位置(7-8)的电压完全相同。然而，在双极电流非对称运行或单极运行时6脉动桥的底部会叠加一个接地极线路压降产生的直流偏置电压。

12脉动桥两端（位置9-8）的电压包含受（触发）延迟角和换相角大小影响的交流线电压 30° 弧度。

12脉动桥的对地（位置9-G）电压可以和位置（9-8）的电压完全相同，或因与以上位置（7-G）描述的原因叠加一个接地极线路压降产生的直流偏置电压。

位置（5b-6a）和（5c-6a）电压波形是两个6脉动换流单元的两个不同相之间的电压。该波形只在三相三绕组换流变结构下出现。

如果有平波电抗器和直流滤波器的滤波作用，位置（10-G）的电压为平滑直流电压。

位置（6-8）和（9-5）的电压波形是整流方式下阀两端的电压波形，由两段波形组成。一段为6脉动桥中阀自身导通电压波形，另一段为非导通时的反向电压叠加其他层的晶闸管换相过程产生的电压波形。

变压器阀绕组相间的电压波形如位置（5），（6）（相间）所示。零电压段显示连接到相应两相的阀的换相过程，而缺口显示连接到其中一相的阀正在换相。

在双极和单极大地运行方式下，中性母线电压（位置8-G）为接地极线路压降。在单极金属回线方式运行时整流站中性母线电压为运行电流在作为金属回线运行的直流极导线电阻上产生的直流压降。

位置（n-G）的电压由一个幅值等于 $3/4$ 极电压（位置10-G）的直流分量叠加下6脉动桥的纹波幅值和二分之一上6脉动桥的纹波幅值。

5.2 最大峰值持续运行电压（PCOV）和峰值持续运行电压（CCOV）

5.2.1 最大理想空载电压（ U_{di0max} ）

U_{di0max} 是指直流系统在不同运行模式下长期稳定运行的最大理想空载电压，最大理想空载电压应考虑以下因素的影响：1）角度控制变化范围及测量偏差；2）换流变分接开关1档调节范围及短路阻抗制造偏差；3）交直流电压、直流电流等测量偏差。 U_{di0max} 是选择阀厅内直流避雷器的CCOV和PCOV的基础参数（见5.2.2和5.2.4），依据 U_{di0max} 所选择的避雷器在直流系统各稳态运行方式下具有一定的裕度。

5.2.2 阀的 CCOV 和 PCOV

阀的导通和关断产生一个高频的转换瞬态电压叠加在换相电压上。特别是关断时产生的（反向阻断）换相过冲提高了换流变阀侧绕组的运行电压，并作用在阀和阀避雷器上。换相过冲的幅值由以下因素决定：

- a) 晶闸管的固有特性（特别是反向恢复电荷）；
- b) 阀中串联连接晶闸管的反向恢复电荷分布；
- c) 单个晶闸管级的阻尼电阻和电容参数；
- d) 在阀和换相回路中的各种电容和电感参数；
- e) （触发）延迟角与换相角；
- f) 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它避雷器对于换相过冲的能量吸收。

图5为整流方式运行时，阀（位置6-8和9-5）和阀避雷器（V）的持续运行电压波形。CCOV正比于电压 U_{di0max} ，由下式给出：

$$U_{ccov} = \frac{\pi}{3} \cdot U_{di0max} = \sqrt{2} \cdot U_{v0} \dots \dots \dots (1)$$

U_{di0max} 和 U_{v0} 的定义参见3.2.3，CCOV与直流分量之比一般为2.2~3.3。

根据工程经验阀的PCOV典型值取CCOV的1.15~1.17倍。可根据换相过冲幅值的影响因素采用高频模型计算确定。应特别注意当阀以大的（触发）延迟角 α 运行时，将会增大换相过冲，有可能使阀避雷器过载。

5.2.3 6 脉动换流器两端CCOV 和 PCOV

6脉动桥两端（图3中节点7与节点8之间）的CCOV与阀的CCOV相同。6脉动桥两端的PCOV与CCOV的比值可根据工程经验选择，也可如阀一样，考虑换相回路中的各种电容和电感参数建立高频模型计算确定。CCOV与直流电压分量之比一般为1.1~1.2。

图6给出了中点直流母线避雷器（M）（位置7-G）的CCOV和PCOV波形。在换流器空载时（无接地极线路压降），理论上M避雷器的波形与6脉动桥两端波形相同。

5.2.4 12 脉动换流器两端 CCOV 和 PCOV

12脉动换流器两端（图3中节点9与节点8之间）的CCOV是由换流器单元直流电压叠加12脉动电压组成。当触发延迟角 α 和换相重叠角 μ 为零时，CCOV理论最大值由下式给出：

$$U_{ccov} = 2 \cdot U_{di0max} \cdot \frac{\pi}{3} \cdot \cos(15^\circ) \dots \dots \dots (2)$$

上述公式计及换相重叠角 μ 后，计算出的CCOV理论值由下式给出，其值小于上述公式计算值，可用于工程设计。

$$U_{ccov} = 2 \cdot U_{di0max} \cdot \frac{\pi}{3} \cdot \cos^2(15^\circ) \dots \dots \dots (3)$$

12脉动桥两端的PCOV与CCOV的比值可根据工程经验选择,也可如6脉动桥一样建立高频模型计算确定。CCOV 与直流分量之比的典型值为 1.07。

换流器直流极顶母线避雷器（CB）（位置9-G）的持续运行电压CCOV和PCOV波形见图7。在换流器空载时，理论上CB避雷器的波形与12脉动桥两端波形相同。

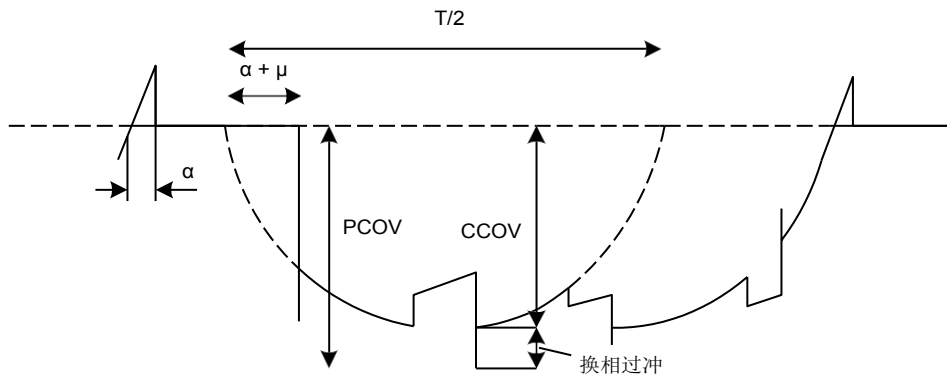


图 5 整流方式运行时阀和阀避雷器 (V) 上的运行电压

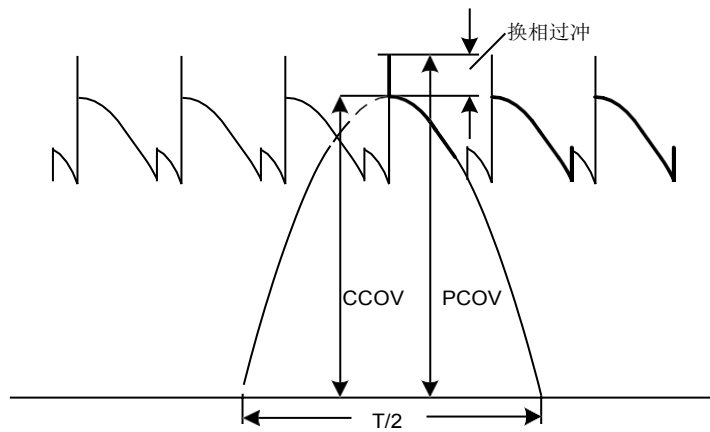


图 6 整流方式运行时中点直流母线避雷器 (M) 的运行电压

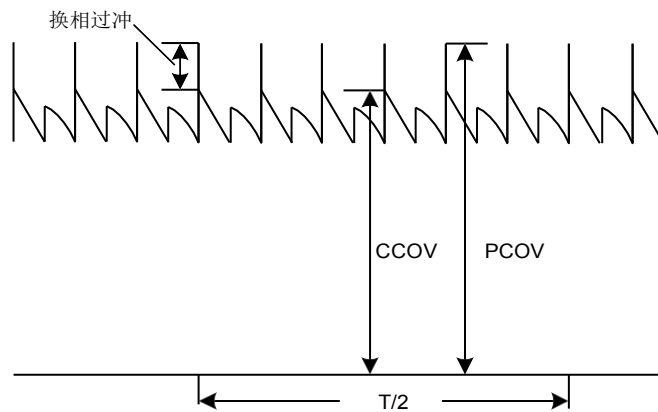


图 7 整流方式运行时换流器直流极顶母线避雷器 (CB) 的运行电压

1.1 过电压来源和类型

交流侧的过电压主要来源于操作、接地故障、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、静补、同步调相机和滤波器模型对过电压的计算都很

重要。在计算雷电过电压（快波前过电压）并确定避雷器的位置时需考虑避雷器保护的距離效应，尤其当交流场的母线长度较长时。

直流侧的过电压来源于交流系统或直流线路和/或电缆闪络、站内闪络及其它故障事件。

在研究过电压时，需考虑交流和直流系统的结构，换流器控制的动态性能和保护策略以及在第6章和第8章中讨论的最严苛故障工况的组合。

对避雷器的要求在第6章中讨论。

如上所述，虽然过电压起因不同（如操作、接地故障和雷电）但是根据过电压的波形和持续时间可分成以下几类：

——暂时过电压；

——瞬态过电压。

瞬态过电压又可进一步分为：

——缓波前过电压；

——快波前过电压；

——特快波前过电压；

——陡波前过电压。

5.3 暂时和谐振过电压

5.3.1 概述

暂时过电压被定义为相对较长持续时间的振荡过电压，无阻尼或只有弱阻尼。暂时过电压可以来源于交流侧或直流侧。谐振过电压是指交直流系统在操作或故障时形成振荡回路，导致某些元件出现严重的过电压。

5.3.2 交流侧暂时过电压

交流侧暂时过电压通常是由断路器操作和接地故障产生。最高暂时过电压通常发生在由交流系统或直流系统故障导致的直流单、双极突然甩负荷，而交流侧滤波器和电容器仍然运行的情况下。如果连接的滤波器和电容器与交流系统阻抗存在着谐振条件，从过电压的幅值和避雷器的功耗来看，这种暂时过电压最为严重。

交流母线避雷器（A）额定电压值由暂时过电压和最高运行电压（ U_s ）确定。

选择阀避雷器（V）参数时，应考虑阀（触发）延迟角和关断角较大时伴随出现的暂时过电压。

由交流侧接地故障引起的暂时过电压会导致交流电压的不对称和波形畸变，会在直流侧产生二次谐波电压，同时又会在交流侧产生三次谐波电压，并施加到交流滤波器低压侧避雷器（FA）上。当换流器闭锁而投入旁通对时，交流相间暂时过电压将施加在与非导通阀并联的阀避雷器上。

限制暂时过电压的措施包括妥善设计换流站的交流暂时过电压控制策略，避免交流侧避雷器过载。当工频过电压不超过典型设定值1.3 p.u.时，控制策略应按照最少投切滤波器原则分时段先切除小组电容器，后切除小组滤波器，控制工频过电压尽快地降低到设定的限值以下，其持续时间小于指定的时间以利于交直流系统的故障恢复，并满足切除滤波器组后的谐波限值要求。直流控制系统在交流接地故障期间不闭锁，维持较小的直流电流，在故障切除后立即解锁也是控制交流暂时过电压的策略之一。当工频过电压达到1.3 p.u.时，应切除全部小组滤波器或大组滤波器。在孤岛方式下工频过电压超过典型设定值1.4 p.u.以上时，可采用先切除大组滤波器，延迟解除换流变的策略，利用换流变饱和和特性限制工频过电压幅值。其他限制措施有在交流场装静止无功补偿器、调相机和静止同步补偿器（STATCOM）。

5.3.3 直流侧暂时过电压

直流侧暂时过电压通常是由换流器在特定工况下操作产生。当逆变站闭锁而整流站以最小触发角解锁（全电压启动），尤其是采用直流电缆传输时，会产生很高的操作过电压以及随后的直流暂时过电压。该故障只有在直流系统的站控、极控、阀控和通讯系统同时发生故障时才有可能发生。另一种工况是在大电流下逆变器闭锁而旁通对未解锁，会导致工频电压通过逆变器窜入到直流线路上，若直流回路的谐振频率接近基频，会导致直流母线避雷器（CB）泄放很大的能量。

交流暂时过电压传递到直流侧的暂时过电压会受到直流控制系统的快速调节而抑制到正常运行电压，可不考虑此工况。

5.3.4 交流侧谐振过电压

交流侧的大容量交流滤波器、电容器及其它无功补偿设备在低频段呈现容性阻抗，这些设备随着输送功率的变化经常投切，同时系统电抗也随运行方式而改变，因此系统电抗与交流滤波器可能形成各种频率的串联或并联谐振回路。而滤波器和换流变的投切操作以及系统单相或三相接地故障及清除会激发谐振过电压。特别是换流变在保持有剩磁通时合闸或接地故障清除时发生偏磁性饱和，饱和励磁涌流含有高幅值的低次谐波，更易激发谐振过电压。

换流站接到最小短路比大于3的强电网时，计入滤波器和电容器组的影响，谐振频率比3次谐波高得多，预期的谐振过电压一般不危险。然而，当接入弱交流电网时，谐振频率可能在2~3次范围内，应对该电网结构下谐振过电压工况作详细的研究。

5.3.5 直流侧谐振过电压

直流系统在不同运行模式下主要的串联谐振频率与基波频率和二次谐波频率的距离不宜小于（5~15）Hz。应校核直流平波电抗器、直流滤波器与直流极线回路的谐振频率以及中性母线平波电抗器和中性母线冲击电容器与金属回线或与接地极线的谐振频率。

换流阀的任何连续不正常工作时，例如交流侧单相接地故障和相间短路故障等，有可能在输电线路或接地极线路产生二次谐波的谐振过电压。极线路在阀连续丢失触发脉冲和逆变站闭锁而旁通对未解锁故障时有可能出现工频谐振过电压。金属回线或接地极线在最低电位换流变低压套管闪络时有可能出现工频谐振过电压。同廊道架设的交流线路会在直流线路感应工频纵向电势并由直流线路和换流站端部平波电抗器和直流滤波器形成的L、C并联回路放大，可导致换流变产生直流偏磁电流，换流站50 Hz分量保护误动，严重时产生工频谐振过电压和过电流。整流器快速启动和直流线路短路工况可能将阶跃或者接近阶跃的电压扰动加在直流线路上，激发谐波产生谐振过电压。

直流滤波器与高、低端换流变阀侧对地电容可能构成24次谐波谐振回路，当高低端阀组不对称运行时，有可能产生谐振过电压。运行时应对高低端阀组不对称程度进行限制，减小激励，抑制谐振过电压的水平。

应根据DB和DL避雷器在直流侧谐振过电压的幅值和持续时间下的泄放能量和换流站50 Hz和100 Hz保护发生误动的概率，确定是否需要采取限制措施。可采用在中性母线上串联50 Hz或100 Hz阻断滤波器或在直流滤波器上并联100Hz谐振支路的措施，抑制直流极线的基波和二次谐波谐振过电压。但在激发50 Hz和100 Hz谐波产生谐振过电压的故障期间，阻断滤波器和直流滤波器的元件上都会出现较高的谐振过电压，应在这些元件的两端装避雷器给予过电压保护，如图1中的FD避雷器。另外对直流回路所产生的谐振过电压，控制系统应能提供正阻尼以抑制过电压的水平和持续时间。

5.4 缓波前过电压

5.4.1 概述

发生在交流侧的缓波前和暂时过电压对于避雷器的选择极为重要。它与交流运行最高电压（ U_s ）共同决定了HVDC换流站交流侧的过电压保护和绝缘水平，也影响了阀的绝缘配合。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/746022143054010155>