



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 20996.1—2020/IEC TR 60919-1:2020  
代替 GB/Z 20996.1—2007

---

## 采用电网换相换流器的 高压直流系统的性能 第1部分:稳态

Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with  
line-commutated converters—Part 1: Steady-state conditions

(IEC TR 60919-1:2020, IDT)

2020-12-14 发布

2021-07-01 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会

中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
采用电网换相换流器的  
高压直流系统的性能 第 1 部分：稳态  
GB/T 20996.1—2020/IEC TR 60919-1:2020

\*

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)  
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址: [www.spc.org.cn](http://www.spc.org.cn)

服务热线: 400-168-0010

2020 年 12 月第一版

\*

书号: 155066 · 1-66712

版权专有 侵权必究



## 目 次

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 前言 .....                   | V    |
| 引言 .....                   | VIII |
| 1 范围 .....                 | 1    |
| 2 规范性引用文件 .....            | 1    |
| 3 术语和定义 .....              | 2    |
| 4 高压直流系统的类型 .....          | 2    |
| 4.1 概述 .....               | 2    |
| 4.2 背靠背高压直流系统 .....        | 2    |
| 4.3 单极大地回路高压直流系统 .....     | 2    |
| 4.4 单极金属回路高压直流系统 .....     | 5    |
| 4.5 双极大地回路高压直流系统 .....     | 5    |
| 4.6 双极金属回路高压直流系统 .....     | 8    |
| 4.7 每极两个 12 脉波(动)换流器 ..... | 8    |
| 4.8 换流变压器的布置 .....         | 10   |
| 4.9 直流开关场接线方式 .....        | 11   |
| 4.10 串联电容补偿的高压直流系统 .....   | 13   |
| 4.11 LCC/VSC 混合双极系统 .....  | 15   |
| 5 环境信息 .....               | 16   |
| 6 额定功率、额定电流和额定电压 .....     | 18   |
| 6.1 额定功率 .....             | 18   |
| 6.2 额定电流 .....             | 19   |
| 6.3 额定电压 .....             | 19   |
| 7 过负荷和设备容量 .....           | 19   |
| 7.1 过负荷 .....              | 19   |
| 7.2 设备容量 .....             | 20   |
| 8 最小输送功率和空载备用状态 .....      | 21   |
| 8.1 概述 .....               | 21   |
| 8.2 最小电流 .....             | 21   |
| 8.3 降低直流电压运行 .....         | 22   |
| 8.4 空载备用状态 .....           | 22   |
| 9 交流系统 .....               | 23   |
| 9.1 概述 .....               | 23   |
| 9.2 交流电压 .....             | 23   |

|      |                           |    |
|------|---------------------------|----|
| 9.3  | 频率 .....                  | 24 |
| 9.4  | 系统工频阻抗 .....              | 24 |
| 9.5  | 系统谐波阻抗 .....              | 24 |
| 9.6  | 正序和零序波阻抗 .....            | 25 |
| 9.7  | 其他谐波源 .....               | 25 |
| 9.8  | 次同步谐振(SSTI) .....         | 25 |
| 10   | 无功功率 .....                | 25 |
| 10.1 | 概述 .....                  | 25 |
| 10.2 | 常规高压直流系统 .....            | 25 |
| 10.3 | 串联电容补偿的 HVDC 设计 .....     | 26 |
| 10.4 | 换流器消耗的无功功率 .....          | 26 |
| 10.5 | 与交流系统的无功功率平衡 .....        | 27 |
| 10.6 | 无功功率源 .....               | 27 |
| 10.7 | 可投切无功功率组的最大容量 .....       | 27 |
| 11   | HVDC 输电线路、接地极线路和接地极 ..... | 27 |
| 11.1 | 概述 .....                  | 27 |
| 11.2 | 架空线路 .....                | 28 |
| 11.3 | 电缆线路 .....                | 28 |
| 11.4 | 接地极线路 .....               | 29 |
| 11.5 | 接地极 .....                 | 29 |
| 12   | 可靠性 .....                 | 29 |
| 12.1 | 概述 .....                  | 29 |
| 12.2 | 停运 .....                  | 29 |
| 12.3 | 容量 .....                  | 30 |
| 12.4 | 停运时间术语 .....              | 30 |
| 12.5 | 能量不可用率(EU) .....          | 31 |
| 12.6 | 能量可用率(EA) .....           | 31 |
| 12.7 | 最大允许强迫停运次数 .....          | 32 |
| 12.8 | 停运概率 .....                | 32 |
| 13   | HVDC 控制 .....             | 32 |
| 13.1 | 控制目的 .....                | 32 |
| 13.2 | 控制结构 .....                | 32 |
| 13.3 | 控制指令设置 .....              | 36 |
| 13.4 | 电流限制值 .....               | 37 |
| 13.5 | 控制回路冗余 .....              | 37 |
| 13.6 | 保护系统 .....                | 37 |
| 13.7 | 测量 .....                  | 37 |

|      |                      |    |
|------|----------------------|----|
| 14   | 远动通信 .....           | 38 |
| 14.1 | 通信系统的类型 .....        | 38 |
| 14.2 | 电话 .....             | 38 |
| 14.3 | 电力线载波(PLC) .....     | 38 |
| 14.4 | 微波 .....             | 38 |
| 14.5 | 无线电系统 .....          | 39 |
| 14.6 | 光纤通信 .....           | 39 |
| 14.7 | 传输数据的分类 .....        | 39 |
| 14.8 | 快速响应的通信 .....        | 40 |
| 14.9 | 可靠性 .....            | 40 |
| 15   | 辅助电源 .....           | 40 |
| 15.1 | 概述 .....             | 40 |
| 15.2 | 可靠性和负荷分类 .....       | 40 |
| 15.3 | 交流辅助电源 .....         | 41 |
| 15.4 | 蓄电池和不间断电源(UPS) ..... | 41 |
| 15.5 | 应急电源 .....           | 42 |
| 16   | 可听噪声 .....           | 42 |
| 16.1 | 概述 .....             | 42 |
| 16.2 | 公害 .....             | 42 |
| 16.3 | 工作区内的噪声 .....        | 43 |
| 17   | 交流侧谐波干扰 .....        | 43 |
| 17.1 | 交流侧谐波的产生 .....       | 43 |
| 17.2 | 滤波器 .....            | 44 |
| 17.3 | 谐波干扰判据 .....         | 46 |
| 17.4 | 谐波干扰水平 .....         | 47 |
| 17.5 | 滤波器性能 .....          | 47 |
| 18   | 直流侧谐波干扰 .....        | 48 |
| 18.1 | 直流侧干扰 .....          | 48 |
| 18.2 | 直流滤波器性能 .....        | 49 |
| 18.3 | 规范要求 .....           | 50 |
| 19   | 电力线载波(PLC)干扰 .....   | 52 |
| 19.1 | 概述 .....             | 52 |
| 19.2 | 性能规范 .....           | 52 |
| 20   | 无线电频率干扰 .....        | 53 |
| 20.1 | 概述 .....             | 53 |
| 20.2 | 高压直流系统的无线电频率干扰 ..... | 53 |
| 20.3 | 无线电频率干扰性能规范 .....    | 54 |

21 功率损耗 ..... 56

    21.1 概述 ..... 56

    21.2 主要损耗来源 ..... 56

22 高压直流系统扩建的准备 ..... 57

    22.1 概述 ..... 57

    22.2 扩建的规范 ..... 57

附录 A(资料性附录) 影响换流站可靠性和可用性的因素 ..... 59

参考文献 ..... 65

## 前 言

GB/T 20996《采用电网换相换流器的高压直流系统的性能》分为 3 个部分：

- 第 1 部分：稳态；
- 第 2 部分：故障和操作；
- 第 3 部分：动态。

本部分为 GB/T 20996 的第 1 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/Z 20996.1—2007《高压直流系统的性能 第 1 部分：稳态》，与 GB/Z 20996.1—2007 相比主要技术变化如下：

- 将“总则”和“高压直流系统稳态性能规范概述”更改为“范围”、“规范性引用文件”（见第 1 章、第 2 章，2007 年版的第 1 章和第 2 章）；
- “范围”中增加了“本部分仅包括电网换相换流器，包含电容换相电路结构的换流器。不考虑在 IEC 60146-1-1，IEC TR 60146-1-2 和 IEC 60146-1-3 中给出的电压源换流器的电网换相半导体换流器的一般要求。”（见第 1 章）；
- 增加了“术语和定义”（见第 3 章）；
- 增加了单极金属回路高压直流系统的采用情形和故障电流对附近变电站变压器影响的表述（见 4.4）；
- 增加了对固定双极高压直流系统接线方式的规定，修改了图 8（见 4.5）；
- 增加了关于双极金属回路高压直流系统中故障电流对附近变电站变压器影响的表述（见 4.6）；
- 修改了每极两个 12 脉波（动）换流器的规定，增加了图 10、图 11（见 4.7，2007 年版的 3.7）；
- 增加了“换流变压器的布置”中关于直流开关、平波电抗器和具有第三绕组的换流变压器的表述（见 4.8）；
- 增加了“串联电容补偿的高压直流系统”和“LCC/VSC 混合双极系统”的规定（见 4.10、4.11）；
- 将 2007 年版的 5.1、6.2、7.4、11.2、11.5、12.2、15.2、20.2 中的悬置段改为“概述”，其后面的条的编号顺延（见 6.1、7.2、8.4、12.2、12.5、13.2、16.2、21.2，2007 年版的 5.1、6.2、7.4、11.2、11.5、12.2、15.2、20.2）；
- 增加了“过负荷”中无功功率与过负荷的关系说明（见 7.1 第 5 段）；
- 修改了“有效值”为“方均根值”[见 9.2.1、式（9）、式（14）、18.2.3 和 18.3.4，2007 年版的 8.2.1、16.3、17.2.3 和 17.3.4]；
- 增加了交流稳态电压范围中的“短时电压变化范围”和“紧急情况下的电压变化”（见 9.2.2.2 和 9.2.2.3）；
- 增加了“串联电容补偿的 HVDC 设计”及相关内容（见 10.3）；
- 将频率“取到 100 kHz”修改为“取到基频的 49 次谐波”[见 11.2.2 的 1)、3)，2007 年版的 10.2.2) 的 a)、c)]；
- 修改了“可靠性”的“概述”（见 12.1，2007 年版的 11.1）；
- 修改了“可靠性”中关于“停运”的规定（见 12.2，2007 年版的 11.2）；
- 增加了“容量”及其相关内容（见 12.3）；
- 增加了“停运时间术语”，将“周期小时数”纳入该条（见 12.4，2007 年版的 11.3）；
- 删除了“基本功率水平”相关内容（见 2007 年版的 11.4）；

- 修改了“能量不可用率”中的计算公式(见 12.5,2007 年版的 11.5);
- 修改了高压直流系统控制结构的解释,并修改了图 20(见 13.2.1,2007 年版 12.2 和图 16);
- 修改了“换流器触发控制”的功能要求(见 13.2.2,2007 年版的 12.2.1);
- 增加了“极控制”的基本控制功能的表述和图 21c)及其相关内容(见 13.2.3,2007 年版的 12.2.3 和图 17);
- 增加了高压直流系统“保护系统”(见 13.6);
- 修改了“微波”的内容(见 14.4,2007 年版的 13.4);
- 将全文中的“直流电抗器”修改为“平波电抗器”,图 1~图 26 中增加了图说明;
- 增加了对换流站光纤通信系统要求及特点的表述(见 14.6);
- 增加了信号传输格式的内容(见 14.7);
- 增加了“e)高压直流输电线路保护;f)电力系统安全控制。”和“通信系统的性能要求将取决于高压直流控制系统、远程控制设施等设置的具体要求。由于这些在不同的高压直流输电方案之间差别很大,应通过对特定的高压直流输电系统的详细分析,确定通信系统规范。”(见 14.8);
- 增加了将多种通信通道结合的表述(见 14.9);
- 增加了蓄电池组需要考虑和规定“温度条件”和“通风要求”的内容,删除了不间断电源宜规定电压允差的内容(见 15.4,2007 年版的 14.4);
- 增加了干式平波电抗器设计安装降噪装置的内容(见 16.2.4);
- 修改了“交流滤波电抗器”的内容(见 16.2.5,2007 年版的 15.2.4);
- 增加了“接于双极高压直流系统交流馈线上交流谐波滤波器”的示例图(见图 22,2007 年版的图 18);
- 增加了对采用有源滤波器的原因及特点的表述以及不同类型滤波器电路图(见 17.2 和图 23,2007 年版的 16.2 和图 19);
- 增加了“直流滤波器”中的直流线路路径选择的相关内容(见 18.1.7);
- 修改了谐波干扰电流计算公式(见 18.3.4,2007 年版的 17.3.4);
- 修改了电力线载波干扰和无线电频率干扰中“噪声”为“干扰”(见第 19 章、第 20 章,2007 年版的第 18 章、第 19 章);
- 增加了“宜考虑宽带 PLC 滤波器的成本显著高于窄带 PLC 滤波器的成本。特别是,20 kHz~50 kHz 较低频率的滤波器的成本显著高于较高频率的 PLC 滤波器。”(见 19.2);
- 增加了“无线电频率干扰”的“概述”作为一条(见 20.1);
- 增加了换流站交流高压开关场的交流电晕及直流电晕影响因素分析(见 20.2.1);
- 修改了“无线电干扰传播”的内容(见 20.2.2,2007 年版的 19.1.2);
- 增加了“RFI 特征”及相关内容(见 20.2.3);
- 修改了“无线电频率干扰性能规范”的内容(见 20.3,2007 年版的 19.2);
- 删除了“高压直流系统扩建方式”的部分图示(见图 26,2007 年版的图 21);
- 增加了附录 A 和参考文献。

本部分使用翻译法等同采用 IEC TR 60919-1:2020《采用电网换相换流器的高压直流系统的性能 第 1 部分:稳态》。

与本部分中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下:

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

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国电力电子系统和设备标准化技术委员会(SAC/TC 60)归口。

本部分起草单位:中国电力科学研究院有限公司、南方电网科学研究院有限责任公司、西安高压电

器研究院有限责任公司、西安电力电子技术研究所、清华大学、全球能源互联网研究院有限公司、西安西电电力系统有限公司、南京南瑞继保电气有限公司、国网经济技术研究院有限公司、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司、许继电气股份有限公司、西安端怡科技有限公司、平高集团有限公司。

本部分主要起草人：谢国平、邱伟、周会高、蔚红旗、刘琳、余占清、傅闯、杨晓辉、王薇薇、王高勇、任军辉、王明新、赵彪、韩从达、王俊生、李亚男、严喜林、王永平、李婧靓、申笑林、李媛、洪波、吴战锋、王向克、高子健、许韦华、董添华、朱艺颖。

本部分所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB/Z 20996.1—2007。

## 引 言

要意识到系统性能规范和系统中单个元件的设备设计规范之间的差异。通常,对于一个具体工程的两个高压直流换流站,其性能规范作为一个整体编写。高压直流系统的一些部分也能单独规定和采购,在此情况下,充分考虑每一部分与整个高压直流系统性能目标的配合,并明确规定每一部分与系统之间的接口。比较容易划分并明确接口的典型部分有:

- a) 直流输电线路、接地极线路和接地极;
- b) 远距离通信系统;
- c) 阀厅、基础和其他土建工程;
- d) 无功功率源,包括交流并联电容器组、并联电抗器、同步和静止无功补偿装置;
- e) 交流开关设备;
- f) 直流开关设备;
- g) 辅助系统;
- h) 交流滤波器;
- i) 直流滤波器;
- j) 平波电抗器;
- k) 换流变压器;
- l) 避雷器;
- m) 串联换相电容器;
- n) 换流阀及其辅助设备;
- o) 控制和保护系统。

注:后四项很难分开。实际上,分开这四项是不可取的。

本部分第4章~第22章全面论述了高压直流系统的稳态性能。

由于设备通常是单独规定和采购的,考虑到对高压直流系统性能的影响,本部分仅包括高压直流输电线路、接地极线路和接地极(见第11章)。

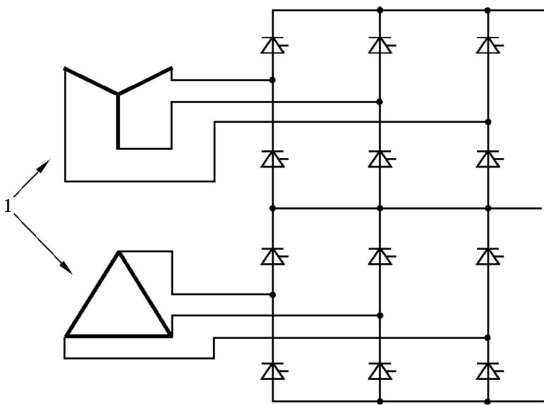
本部分假定高压直流换流站包含一个或多个安装在单一位置的换流器单元及其配套的建筑物、电抗器、滤波器、无功功率源、控制、保护、监视、测量和辅助设备。本部分没有讨论交流开关设备,但包括交流滤波器和无功功率源,尽管它们能连接至独立于高压直流换流站的交流母线(见第17章)。



# 采用电网换相换流器的 高压直流系统的性能 第 1 部分：稳态

## 1 范围

GB/T 20996 的本部分给出了高压直流系统稳态性能的综合导则，涉及使用三相桥式（双路）联结构成 12 脉波（动）换流器单元（见图 1）的两端高压直流系统的稳态性能，但不包括多端高压直流输电系统。两端换流站均考虑采用晶闸管阀作为半导体换流阀，具有双向功率输送能力。本部分未考虑二极管阀。



说明：  
1——变压器阀侧绕组。

图 1 12 脉波（动）换流器单元

本部分仅涵盖电网换相换流器，包括电容换相电路结构的换流器。在 IEC 60146-1-1、IEC TR 60146-1-2 和 IEC 60146-1-3<sup>1)</sup> 中给出了电网换相半导体变流器的一般方面。本部分不考虑电压源换流器。

系统性能规范与系统中单个部件的设备设计规范之间存在差异。本部分没有规定设备规范和试验要求，也没有包括详细的抗震性能要求。另外，不同的高压直流系统可能存在许多不同之处，本部分未考虑这些细节。因此，本部分不宜直接用作具体工程项目的技术规范。但是，可以此为基础用作具体的输电系统编制满足实际系统要求的技术规范。

本部分涵盖稳态性能，IEC TR 60919-2 故障和操作以及 IEC TR 60919-3 动态性能另有单独的文件。编制两端高压直流系统规范时，三个部分一并考虑。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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。

IEC 60633 高压直流输电术语 [high-voltage direct current (HVDC) transmission—Vocabulary]

1) IEC 60146-1-3 已废止，被 IEC 61378 系列和 IEC/IEEE 60076-57-129 覆盖。

CIGRÉ 技术手册(TB)NO.391:2009 高压和中压变电站无线电频率干扰测量指南。干扰传播、干扰源特性、测量技术、转换方法和限值(Guide for measurement of radio frequency interference from HV and MV substations. Disturbance propagation, characteristics of disturbance sources, measurement techniques, conversion methodologies and limits)

### 3 术语和定义

为便于使用,IEC 60633 给出了术语和定义。

下列网址是 ISO 和 IEC 用于标准化的术语数据库:

- IEC 电气百科:<http://www.electropedia.org/>
- ISO 在线浏览平台:<http://www.iso.org/obp>

### 4 高压直流系统的类型

#### 4.1 概述

本部分宜包括以下基本内容:

- a) 高压直流工程的目的和换流站站址的一般情况;
- b) 所需要的系统类型,包括简单的单线图;
- c) 12 脉波(动)换流器个数;
- d) 本章所提到的相关资料。

一般来说,在本部分所讨论的工程类型研究中,经济上宜考虑投资、损耗费用和其他预期的年运行费用。

就系统类型而言,电容换相换流器(CCC)和可控串联电容换流器(CSCC)可能是常规高压直流系统的合适替代方案。这将在 4.10 介绍。

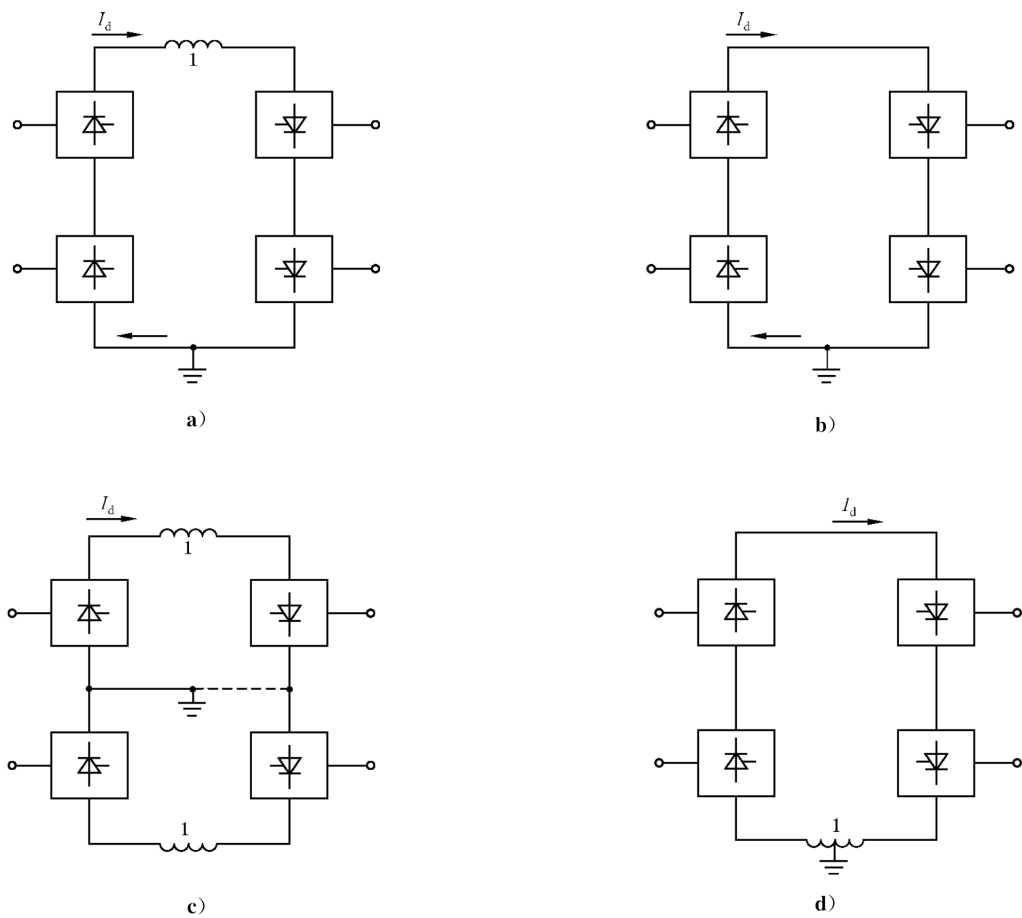
#### 4.2 背靠背高压直流系统

在背靠背系统中,没有直流输电线路,两个换流器均放在同一地点。两个换流器的换流阀可放在一个阀厅内甚至在一个集成的结构中,或者单独作为户外阀。同样,两个换流器的许多其他设备(如控制系统、冷却设备、辅助系统等)也可放在一个区域内甚至集中布置在一起,供两个换流器共同使用。电路的结构可有所不同,图 2 给出了一些示例。这些回路接线的性能和经济性不同,宜进行评估。背靠背系统不需要直流滤波器。

对于一个给定的额定功率,为了得到最低的换流器造价,其中包括对损耗成本的评估,宜对额定电压和电流进行优化选择。通常,用户不需要规定直流电压和电流的额定值,除非有特殊的原因,例如:为了适应已有的变电站,或为便于进一步扩建或有别的原因。从经济性方面考虑,每个换流器通常是一个 12 脉波(动)换流器;有的运行准则要求,失去一个换流器不导致中断全部输送能力;因此,一些大的高压直流换流站,可由两个或者多个背靠背系统组成。为此,一些背靠背系统的设备,由于经济上的原因而安装在一个区域,甚至集成在一起。但是,所有背靠背系统要求的可能导致设备故障的事件,需要仔细考虑并采取适当的预防措施。

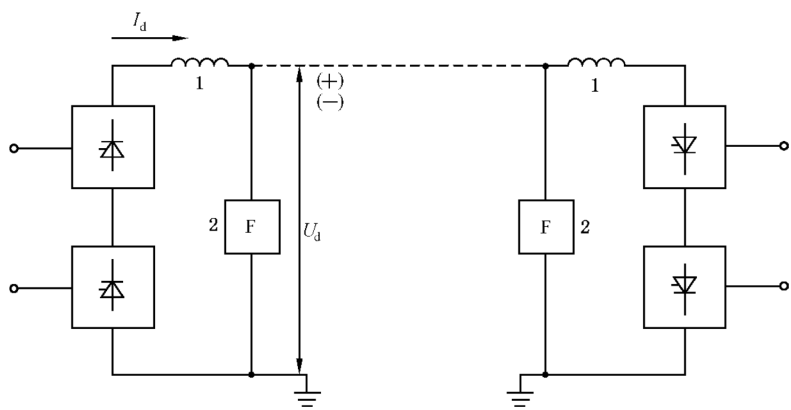
#### 4.3 单极大地回路高压直流系统

选择单极大地回路高压直流系统(图 3)往往是从经济上考虑,特别是对于昂贵的电缆输电来说更是如此。



说明：  
1——平波电抗器。

图 2 背靠背直流系统示例



说明：  
1——平波电抗器；  
2——直流滤波器。

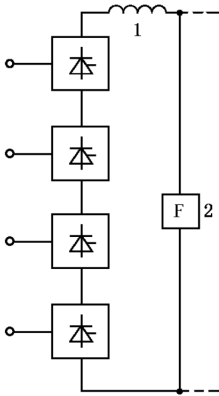
图 3 单极大地回路高压直流系统

单极大地回路方式也可能是双极直流工程的第一期。在高压直流换流站中,单极的布置可是一个 12 脉波(动)换流器,或者是多个 12 脉波(动)换流器串联或并联(图 4 和图 5)。在以下情况下能采用多个 12 脉波(动)换流器:

- a) 当一个换流器停运时,保证有部分输送容量;
- b) 工程建设分期进行;
- c) 由于换流变压器运输的限制。

单极大地回路方式要求在架空线或电缆的每一端有一个或多个平波电抗器,通常这些电抗器放在高压侧。

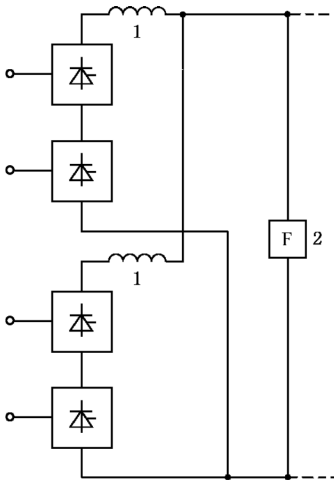
对于架空线路,每一端可能均需装设直流滤波器(见第 18 章)。输电线路的两端需要设置接地极线路和可连续运行的接地极,并考虑接地极的腐蚀和磁场效应等问题。



说明:

- 1——平波电抗器;
- 2——直流滤波器。

图 4 两个 12 脉波(动)换流器串联



说明:

- 1——平波电抗器;
- 2——直流滤波器。

图 5 两个 12 脉波(动)换流器并联

4.4 单极金属回路高压直流系统

如图 6 所示,这种方式通常在以下情况采用:

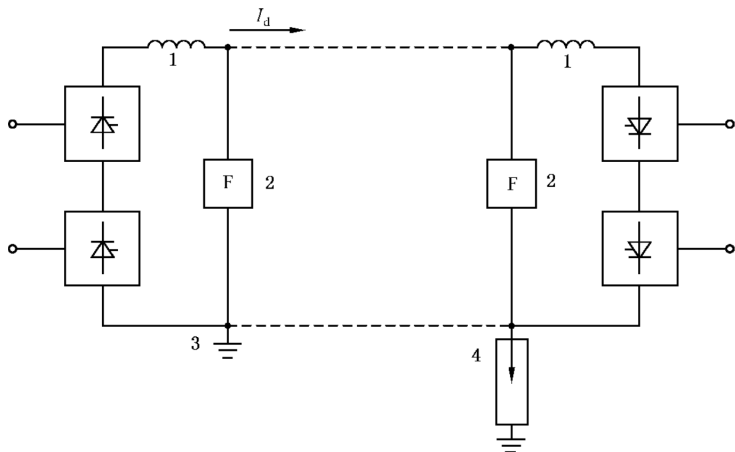
- a) 作为双极系统分期建设的第一期,并且在过渡期间地电流不允许长期运行时;
- b) 假定输电线路太短,以至于建设接地极线路和接地极不经济和不需要时;
- c) 如果地电阻率很高,会引起不可接受的经济损失时;
- d) 由于环境 and 安全需求问题导致无法接受长期的入地电流时。

接线方式上使用一条高压导线和一条低压导线。两个高压直流换流站中有一个换流站的中性点在换流站接地或者接在相应的接地极上,另一个换流站中性点通过电容器或避雷器接地或通过二者接地。

高压导线的两端均需装设平波电抗器,如果其最终性能是可接受的,平波电抗器也可装在接地侧。如果性能可接受,平波电抗器可分成两部分,分别安置于高压侧和接地侧,特别是对于大容量特高压直流换流器的布置。如果是架空线路,可能还需要装设直流滤波器。

如果这种方式是双极系统的第一期,则其中性线导线的绝缘能承受在该阶段的高电压。

对于金属回路方案,直流故障电流将流入交流系统并通过换流站变压器的中性点返回。此故障电流可导致附近变电站的继电保护装置误动作,该误动作是由于直流电流引起的铁芯饱和。为了避免此类误动作,可考虑在换流站变压器中性点安装接地电阻器(小电阻值)。



说明:

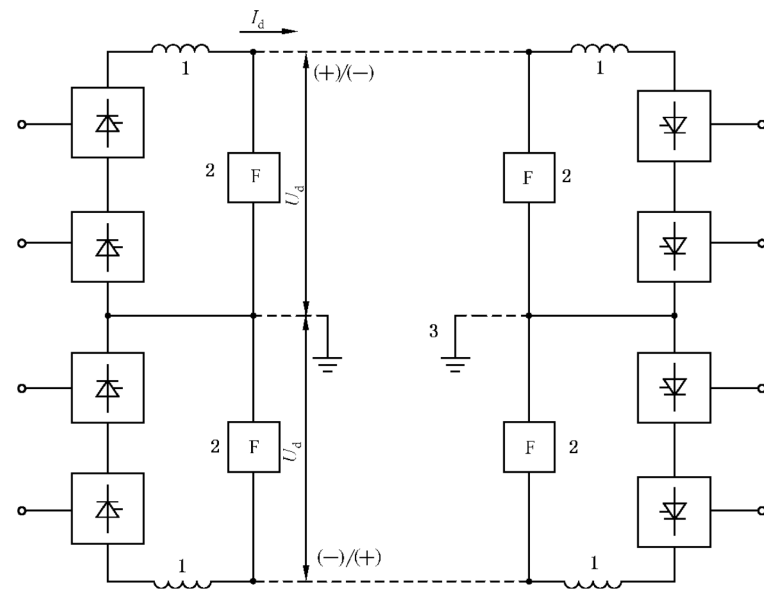
- 1——平波电抗器;
- 2——直流滤波器;
- 3——站地网;
- 4——避雷器。

图 6 采用金属回路的单极 HVDC 系统

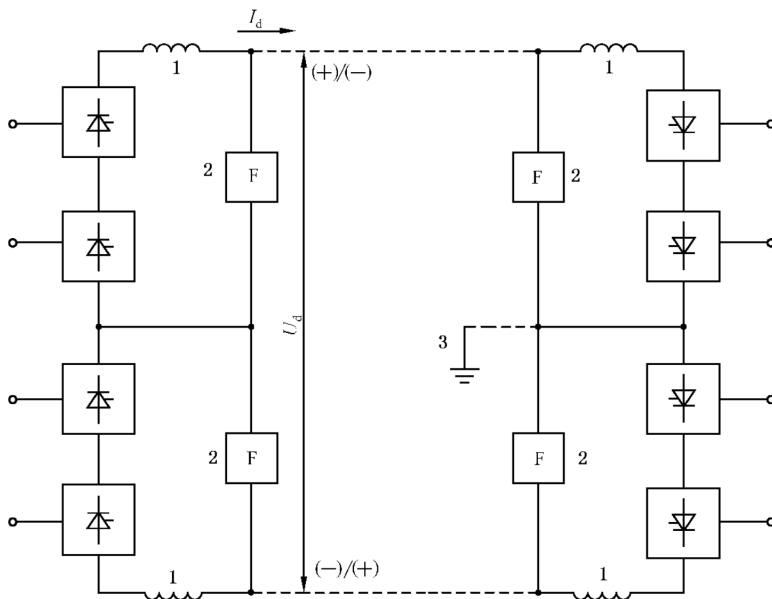
4.5 双极大回路高压直流系统

图 7 a)是直流输电线路与两个高压直流换流站连接时最常用的方式,它相当于一个双回线交流输电系统。同单极运行相比,它降低谐波干扰并且保持流入地中的电流为低值。两个单极大回路方式能联合组成一个双极方式。

对于某一方向的输电潮流,一个极对地是正极性,另一个极则是负极性。如果潮流向另一方向输送,则两个极均改变其极性。当双极运行时,流过大地回路的不平衡电流能保持很小的数值。



a) 双极大地回路系统



b) 固定的双极系统

说明：

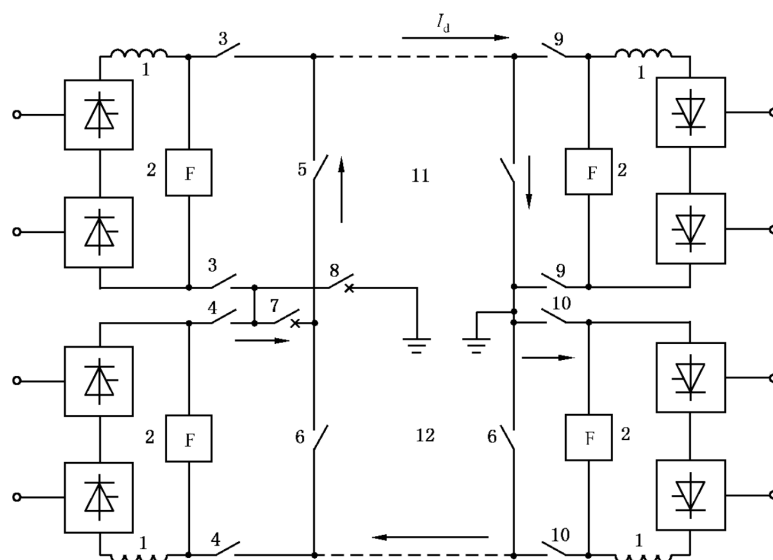
- 1——平波电抗器；
- 2——直流滤波器；
- 3——接地极。

图 7 双极系统

这种类型的输电系统提供一系列的应急运行方式，因此在规范中宜考虑以下 a)～f) 要求：

- a) 当图 8 中高压直流输电系统一个极 11 停运时(整流侧直流开关 3 和逆变侧直流开关 9 断开)，另一个极 12 的换流设备宜通过大地回路连续运行[整流侧直流开关 4, 逆变侧直流开关 10, 大地回路转换开关(ERTS)7 和金属回路转换开关(MRTB)8 闭合]。
- b) 如果不希望出现长时间的地电流,故障极线路仍能保持一定的低电压绝缘能力,双极系统宜能

运行在单极金属回路方式(图 8)。向这种应急运行方式转换的操作是首先通过闭合极对中性线开关 5 将被切除的故障极 11 导线和大地回路并联,然后再断开大地回路,从而通过断开 MRTB8 将电流转换到金属回路(停运极的导线)中。这种不中断输电的负荷转移要求在高压直流系统的一个换流站中有一个金属回路转换开关(MRTB)。如果允许短时间中断输送功率,不需要 MRTB。高压直流输电系统中接有 MRTB 端的换流站中性点设备,其绝缘水平宜高于输电系统另一端中性点设备的绝缘水平。图 8 中,直流开关 3 和直流开关 4(命名为 ERTS 和 MRTB)通常在整流站配置,对于逆变站 MRTB 不是必要的。



说明:

- |                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| 1 —— 平波电抗器;     | 7 —— 大地回路转换开关(ERTS); |
| 2 —— 直流滤波器;     | 8 —— 金属回路转换开关(MRTB); |
| 3,4 —— 整流侧直流开关; | 9,10 —— 逆变侧直流开关;     |
| 5,6 —— 极对中性线开关; | 11,12 —— 高压直流输电极。    |

图 8 双极系统中非故障极的金属回路运行

- c) 当接地极或接地极线路进行检修时,如果流入大地的两极间的不平衡电流保持在很小的数值,双极系统宜能将高压直流系统的一端或两端换流站的中性点接在换流站的接地网上运行。不平衡电流保持在很小的值是为了避免由于部分不平衡电流流过变压器中性点,而使换流变压器饱和。在这种运行方式下,当一极的输电线路或换流站的一个极停运时,两个极宜自动闭锁。
- d) 在两端换流站均采用接地极的双极运行方式下,高压直流系统两极的每极宜能在大的差流下运行。这可以避免由于冷却系统丢失或其他异常情况导致一极全电流运行。
- e) 假如由于恶劣天气状况或线路绝缘有部分损坏,要求系统能连续运行,换流器宜设计为能降压连续运行,以便使两个极降压运行(见 8.3)。
- f) 当失去一个极的输电线路时,换流站能通过一个极极性反接的相应倒闸操作,实现换流站两个极并联,以单极大地回路方式运行。但是,为此要求每个 12 脉波(动)换流器的直流端子均需按全电压进行绝缘,并且线路和接地极从发热角度考虑,均应在比额定电流大的电流下运行。

在每个极中,系统的每一端均需要一个或多个平波电抗器,这些平波电抗器通常位于高压侧。如果高压直流系统是架空线路,大部分情况下还需要有直流滤波器。最常用的是每极一个 12 脉波(动)换流器。但是,对于大容量系统或者是分期扩建的系统,可要求 12 脉波(动)换流器串联或并联(图 4 和图 5)。

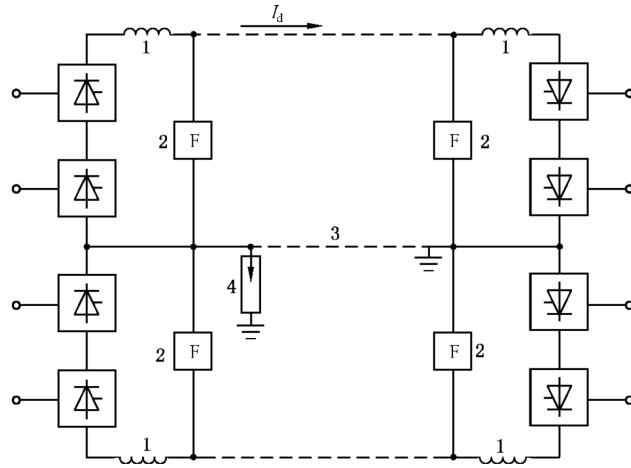
多数高压直流系统利用接地极线路或金属回路导线(电缆)作为直流电流的回路。但是,对于总是保持双极平衡运行的系统,可取消这些设备。这种方案称为固定双极高压直流系统接线方式,如图 7 b)所示。这种方案能减少造价,但是运行方式受限。

#### 4.6 双极金属回路高压直流系统

如果大地电流不能容忍[如 4.4 中的 d)所述],或者高压直流两端之间的距离很近,或者是由于大地电阻率很高而不可能选到接地极时,则输电线路可建设成具有第三条导线的双极金属回路高压直流系统(见图 9)。在双极运行方式下,第三条导线流过不平衡电流。当一个输电线路的一个极退出运行时,第三条导线成为返回线。第三条导线仅要求低电压绝缘,并且如果线路是架空线路,它还可作为避雷线使用。但是,如果它是全绝缘的,能作为一条备用的导线,这种情况需要一条单独的避雷线。

两个高压直流换流站之一的中性点直接接地,而输电系统另一端的中性点则浮动,或通过避雷器或电容器或两者与换流站接地网连接。

对于第三条导线是全绝缘的输电系统,在这条导线不能工作时,它还能运行在双极方式。此时两个换流站的中性点均需要接到换流站的接地网上,并且注意保持不平衡电流为很小的值。在这种运行方式下,一个极停运则要求另一个极也停运,再进行开关操作,使高压直流输电系统中完好的部分运行。



说明:

- 1——平波电抗器;
- 2——直流滤波器;
- 3——金属中性线;
- 4——避雷器。

图 9 双极金属回路高压直流系统

如果一个极不能运行,直流输电系统能用换流站的另一个极以单极金属回路方式运行。这种接线方式也称为金属回路模式(MRM)。

对于金属回路方案,直流故障电流将流入交流系统并通过换流站变压器的中性点返回。此故障电流可导致附近变电站的继电保护装置误动作,该误动作是由于直流电流引起的铁芯饱和。为了避免这类误动作,可考虑在换流站变压器中性点安装接地电阻器(小电阻值)。

#### 4.7 每极两个 12 脉波(动)换流器

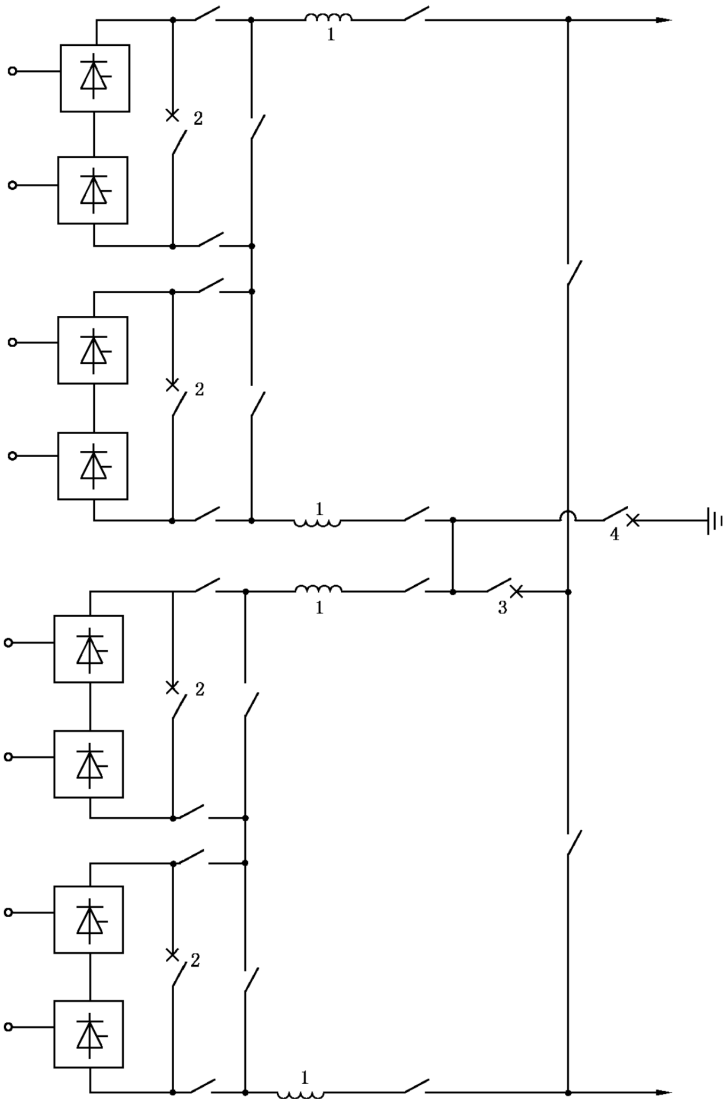
对于特高压大容量双极系统,每极由两个 12 脉波(动)换流器串联可能是达到要求值的较好的解决方案。因为,如果每站极仅使用一个 12 脉波(动)换流器,换流设备(特别是换流变压器)的尺寸和重量



将变得太大。

两个 12 脉波(动)换流器能串联连接(图 10)或并联连接(图 11),换流器布置的选择取决于工程的特定要求。如果工程要求降压运行(例如由于偶尔的盐污染),可优先选择串联连接。

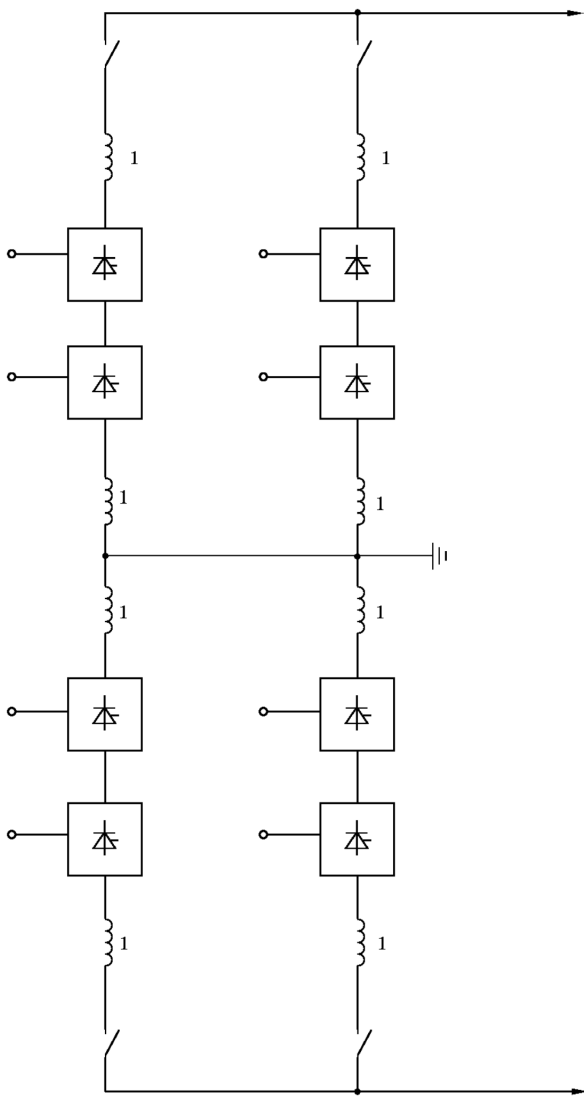
当一个 12 脉波(动)换流器发生强迫停运或计划停运时,串联与并联方式的功率损失没有差别。两种工况下,只损失 25% 的输送功率,假设所有换流器具有相同的额定功率。如果具有充足的过负荷能力,可恢复到满容量或接近满容量。对于串联方式,当一个 12 脉波(动)换流器发生强迫停运或计划停运后,两个极仍然能用平衡的电流(没有大地电流)运行。注意每个串联选项中的 12 脉波(动)换流器需要旁路开关。对于并联方式,当发生一个 12 脉波(动)换流器强迫停运或计划停运时,两个极仍能用不平衡电流运行,同时有大的电流流过大地。



- 说明:
- 1——平波电抗器;
  - 2——旁路开关;
  - 3——大地回路转换开关;
  - 4——金属回路转换开关。

图 10 每极两个 12 脉波(动)换流器串联的双极系统

与同样容量的每极一个 12 脉波(动)换流器相比,每极两个 12 脉波(动)换流器的接线方式会使得造价增加,且控制系统将更复杂。



说明:

1——平波电抗器。

图 11 每极两个 12 脉波(动)换流器并联的双极系统

4.8 换流变压器的布置

每个 12 脉波(动)换流器的三相变压器需要两个阀侧绕组,一组为星形接线而另一组为三角形接线。这由以下方式其中之一构成:

- a) 一台带两个阀侧绕组的三相变压器;
- b) 两台三相变压器,一台接成星/星,另一台接成星/三角;
- c) 三台单相变压器,每台有两个阀侧绕组,一个绕组为星形接线,另一个为三角形接线;
- d) 六台单相变压器,接成两个三相组,一个为星/星接线,另一个为星/三角接线。

根据高压直流系统可用率的要求,在一端换流站或两端换流站需要设置备用变压器。如果采用一

台三相带两个阀侧绕组的变压器,只需要一台备用变压器。由于星形和三角形接线的三相变压器的设计不同,因此考虑对每种设计有一台备用。对于单相双阀侧绕组的变压器,只需要一台备用,因为三台单相变压器完全一样。对于上面所提到的其他选项的变压器,建议用两台备用,一台作为阀侧绕组星形接线单相变压器的备用,另一台作为三角形接线单相变压器的备用。

如果不用备用变压器,当一台变压器退出运行时,上述方案 b) 和 d) 允许按 6 脉波(动)方式在一半容量运行(假定设计的直流系统允许在这种方式下运行且交流和直流谐波是可接受的),但是这种运行方式对于方案 a) 和 c) 则不行。

平波电抗器并不总是需要分置,特别是对并联的接线方式,平波电抗器的数量和布置取决于系统研究和设计的结果。

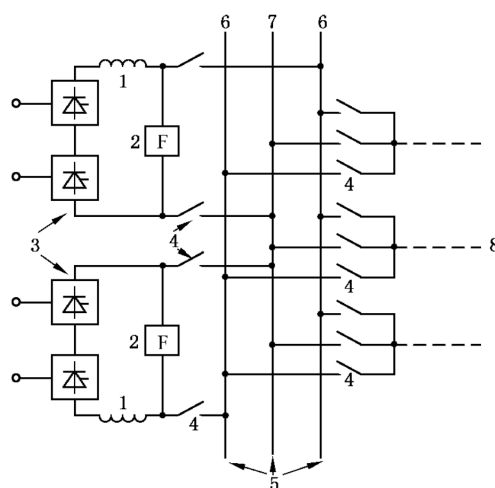
对于连接无功功率和交流谐波滤波器设备,也可使用带第三绕组的换流变压器。

#### 4.9 直流开关场接线方式

直流开关场有许多接线方式提高高压直流系统的可用率。

双极系统的单极金属回路运行方式已在 4.5 中描述。

对于双极系统来说,直流开关场的接线方式可使换流器的任一端换接在任一导线上或中性点上(图 12)。这种方式对于具有全绝缘备用电缆的电缆工程或并联电缆的工程是有益的。如果换流站的一个极退出工作,电缆能并联运行从而降低线路损耗。一般来说,若换流器与两条极母线和中性母线的连接是固定的,换流站的两个极不可能并联连接。

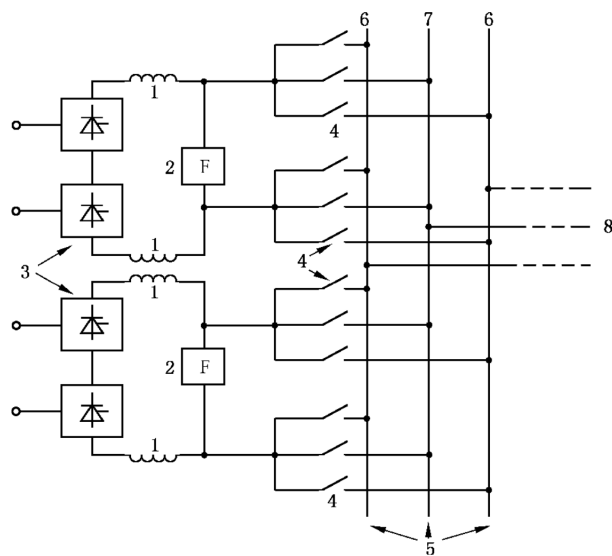


说明:

- 1——平波电抗器;
- 2——直流滤波器;
- 3——两个极换流器;
- 4——直流开关;
- 5——直流母线;
- 6——极;
- 7——中性点;
- 8——直流线路/电缆。

图 12 线路导线的直流切换

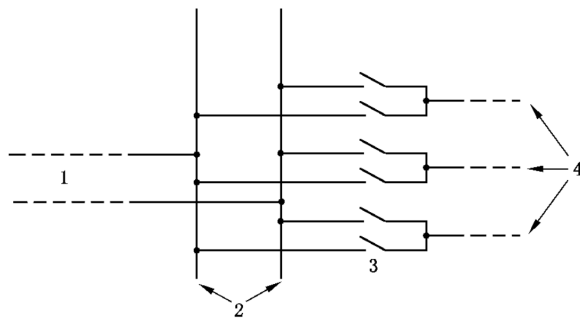
但是,如果需要换流站两个极并联连接的灵活性时,则至少换流站的一个极能进行极性反接,并且这个极的中性端要求达到全电压绝缘水平。图 13 给出了一种可能的接线方式。



- 说明：
- 1——平波电抗器；
  - 2——直流滤波器；
  - 3——两个极换流器；
  - 4——直流开关；
  - 5——直流母线；
  - 6——极；
  - 7——中性点；
  - 8——直流线路/电缆。

图 13 换流器极的直流切换

当直流输电系统包括有架空线路和电缆时,可用图 14 所示的在架空线和电缆连接处的直流换接方式。



- 说明：
- 1——双极架空线；
  - 2——直流母线；
  - 3——直流开关；
  - 4——直流电缆(两个极,一个备用)。

图 14 架空线至电缆的直流切换

对于多回双极线路的情况,可考虑换流站极的并联连接,这是为了在一回输电线路停运时恢复输电能力(见图 15)。

对于远距离多回双极线路并联运行的情况,可采用图 16 所示的中间换接方式。

#### 4.10 串联电容补偿的高压直流系统

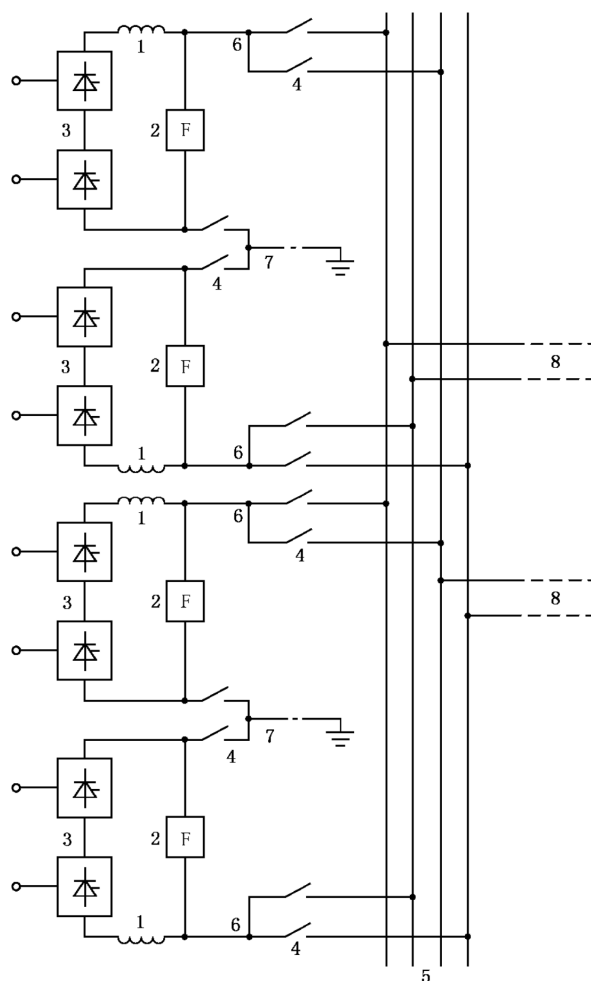
虽然常规的电网换相换流器(LCC)技术趋于成熟,这种换流器仍然有两个缺点:

- a) 存在大量的无功功率消耗,大约占有功功率的 50%;
- b) 对交流侧扰动敏感,通常表现为换相失败。

为了克服这些缺点,已经对串联电容补偿装置进行了更为深入的开发。

实际上,目前有以下两种类型的串联电容补偿的 HVDC 方案:

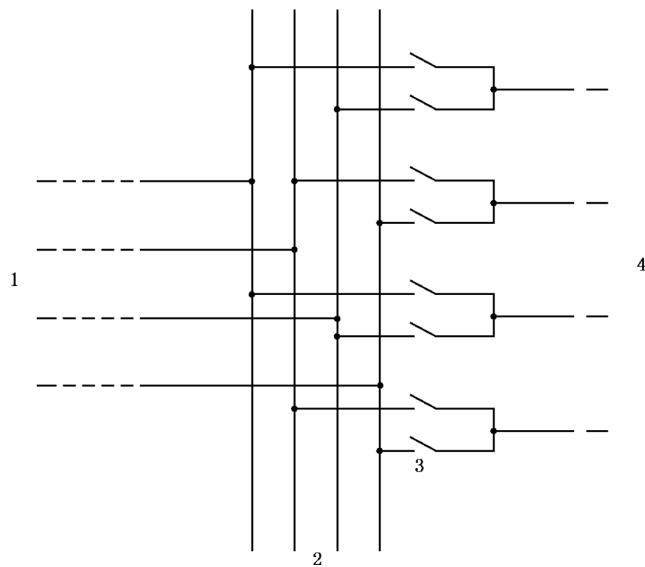
- 电容换相换流器(CCC),电容器串联在换流变压器与换流阀之间;
- 可控电容换相换流器(CSCC)。在这个方案中,这种换流器的基本拓扑结构与传统的拓扑结构相同;无论怎样,串联电容器安装在交流滤波器母线和交流网络之间。通过用控制串联补偿量消除 CSCC 引起的铁磁谐振。



说明:

- 1——平波电抗器;
- 2——直流滤波器;
- 3——两个极换流器;
- 4——直流开关;
- 5——直流母线;
- 6——极;
- 7——中性点;
- 8——直流线路/电缆。

图 15 两个双极换流器和线路直流切换



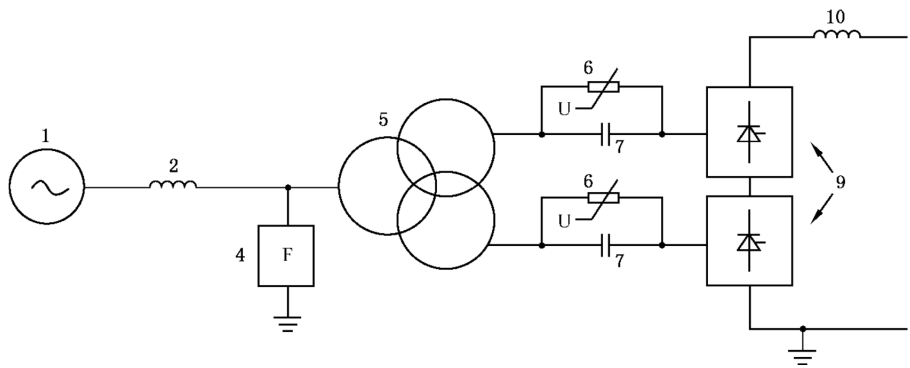
说明：  
1——两个双极线路 1；  
2——直流母线；  
3——直流开关；  
4——两个双极线路 2。

图 16 线路中间直流切换

图 17 a)所示 CCC 电路,是基于在换流变压器与换流阀之间串联电容器拓扑结构的。图 17 b)所示 CSCC 电路,是嵌入在滤波器母线到交流系统连接中的串联电容器。性能与 CCC 拓扑结构类似,此外还可控制与交流电网交换的无功功率。

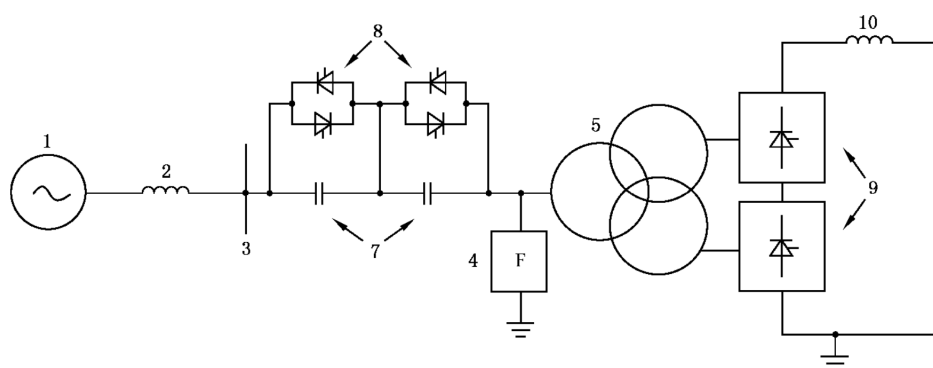
这两种方案在提高防止换相失败的能力、降低甩负荷产生的过电压和提高功率控制模式下稳定裕度上均优于常规高压直流输电方案。因此,它们在长电缆系统的逆变站,或在连接到弱交流系统的背靠背系统中是合适的选择。对于稳态以及瞬态运行,两者的性能是非常相似的。

CSCC 接线方式的最大阀电压和交流电流谐波低于 CCC 接线方式。另一方面,整流运行的 CCC 具有较小的阀短路电流。先前在 CSCC 中发现的铁磁谐振问题通过可控串联电容器的应用消除。



a) 电容换相换流器(CCC)

图 17 电容换相换流器结构



b) 可控串联电容换相换流器(CSCC)

说明:

- |               |            |
|---------------|------------|
| 1——交流系统等效发电机； | 6——过电压限制器； |
| 2——交流系统等效阻抗；  | 7——电容器；    |
| 3——交流系统母线；    | 8——晶闸管；    |
| 4——交流滤波器；     | 9——换流器；    |
| 5——换流变压器；     | 10——平波电抗器。 |

图 17 (续)

CCC 与传统的换流器相比,其优点可总结如下:

- 与大幅调谐滤波器支路组合,能显著减少无功功率消耗,并减少在功率变化时滤波器和并联电容器组的投切;
- 在交流侧扰动期间避免换相失败,有利于长线或电缆送电的弱交流电网;
- 在较低的短路容量系统中稳定运行;
- 在某些情况下,由于取消了在与弱交流网络连接的相关应用中的可投切换滤波器和并联电容器组或同步补偿装置,降低了整体安装成本;
- 换流器桥臂短路故障电流较低;
- 扰动过程中无功功率变化较小,改善电能质量,减少甩负载。

其不足之处是：

- 增加了谐波电流；
- 换流器损耗略有增加；
- 需要详细研究设备上的瞬时应力；
- 由于电容器与换流器串联，降低了固有的过负荷能力；
- 需要在阀绕组、电容器和阀之间屏蔽雷电和无线电干扰；
- 阀电压应力略有增加。

当考虑 CCC 或 CSCC 作为一个特定工程的 HVDC 拓扑时,宜强调最佳系统额定值的选择与常规的 HVDC 不同。因此,在常规的 HVDC 方案与这些方案之间进行选择时,考虑到损耗、安装费用等,要求对经济和技术性能进行详细的分析。

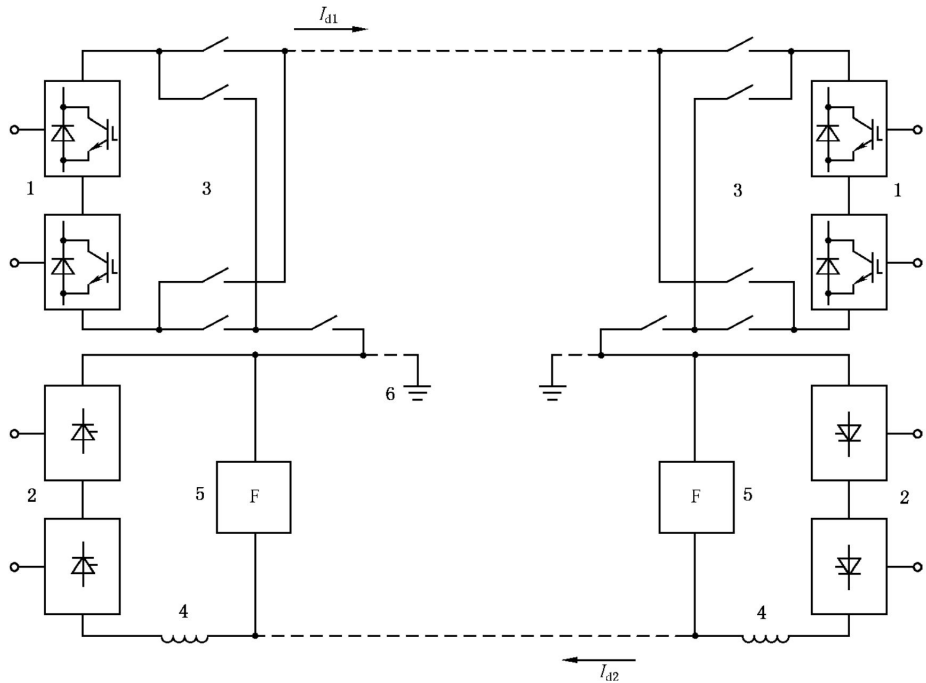
#### 4.11 LCC/VSC 混合双极系统

假如一极是电网换相换流器,另一极是电压源换流器,将会形成一个混合双极系统。对于电网换相换流器/电压源换流器(LCC/VSC)混合双极系统,由于功率反转时,电压源换流器(VSC)系统要求电流方向反转,而电网换相换流器(LCC)只是改变电压极性,因此混合双极系统宜特殊考虑。两个系统的混合运行将导致过大的电流在接地极线路上或一个功率方向的返回线路上。为了防止这种问题,极性反

转的开关宜安装在 VSC 换流器上,如图 18 所示。

LCC/VSC 混合系统另一个可能工况是一端是 LCC,另一端是 VSC。这种拓扑结构能用在向弱交流系统输电的直流系统。

采用 VSC 的混合系统宜是不对称的单极接线方式。



- 说明:
- 1——电压源换流器;
  - 2——电网换相换流器;
  - 3——极性反转开关;
  - 4——平波电抗器;
  - 5——直流滤波器;
  - 6——接地极。

图 18 LCC/VSC 混合双极系统

5 环境信息

对于每一个高压直流换流站,宜提供表 1 所示环境条件资料。

表 1 每一个高压直流换流站提供的资料

| 参数     | 单位 | 应用实例和注释  |
|--------|----|--|
| 海拔     | m  | 用于空气冷却系统的设计及空气间隙的设计  |
| 户外空气温度 | ℃  | 给出最高温度,是为了计算额定功率的需要。最低温度是为了计算过负荷能力的需要。如果用户想要设备能过负荷运行并且允许相应的缩短预计寿命,这些均宜加以说明并提供所需的资料 |



表 1 (续)

| 参数   | 单位   |         | 应用实例和注释   |
|--|--|---------|---|
|  | 对低温性能  | 对额定功率能力 |   |
|  |  |         | 宜给出以月为基础的一年中温度的变化曲线   |
| 最高干球温度   | ℃  | ℃       | 阀冷却,变压器和电抗器设计;交流和直流滤波器设计  |
| 最高湿球温度   | ℃  | ℃       | 蒸发冷却系统设计及阀厅相对湿度   |
| 24 h 最高平均干球温度  | ℃  | ℃       | 油绝缘变压器和电抗器设计  |
| 24 h 最低平均干球温度  | ℃  | —       | 变压器、电抗器和隔离开关设计以及建筑物取暖需要   |
| 最低干球温度   | ℃  | —       | 变压器、电抗器和隔离开关设计以及建筑物取暖需要,交流和直流滤波器设计  |
| 最高和最低户内空气温度和相对湿度   | ℃<br>%   | ℃<br>%  | 通常阀厅由阀设计者确定,控制室由控制设计者确定   |
| 维修期间和停运后最大过渡时期内的室内空气温度和相对湿度  | ℃<br>%   | ℃<br>%  | 如果户内温度对维修人员来说非常高时需要规定   |
| 最大入射太阳辐射:<br>——水平面;<br>——垂直面。  | W/m <sup>2</sup><br>W/m <sup>2</sup>                   |         | 建筑物冷却,变压器、电抗器、母线等的额定值等  |
| 风力条件:<br>——最大连续风速;<br>——最大阵风速;<br>——在最低温度(℃)下的最大风速                               | m/s<br>m/s<br>m/s                                      |         | 建筑物和设备支柱设计<br>建筑物和设备支柱设计<br>导线、张力绝缘子和杆塔设计                                 |
| 冰雪覆盖载荷:<br>——无风时的最大冰厚;<br>——最大风速(m/s)时的最大冰厚;<br>——最大雪荷;<br>——最大雪深                | mm<br>mm<br>N/m <sup>2</sup><br>mm                     |         | 设备和结构设计,例如隔离开关/开关、导线等<br>设备和结构设计,例如隔离开关/开关、导线等<br>建筑物设计<br>为了安全,设备在雪上面的高度 |
| 降雨量:<br>——年平均;<br>——1 h 最大量;<br>——5 min 最大量                                      | mm<br>mm<br>mm   |         | 建筑物和现场排水  |
| 雾和污秽:<br>——绝缘子冲洗和涂敷用户规程  |  |         | 决定绝缘和空冷系统过滤器设计的要求。对于绝缘子设计宜规定一个估计的等值盐密水平                                   |
| 换流站和线路距站 5 km ~ 10 km 内的雷击水平   | 雷击次数/km <sup>2</sup> /a<br>(换流站)<br>雷击次数/100 km/a      |         | 换流站防雷设计   |
| 地震条件:<br>——最大水平加速度;<br>——水平振动的频率范围;<br>——最大垂直加速度;<br>——垂直振荡的频率范围;<br>——发生地震的持续时间 | m/s <sup>2</sup><br>Hz<br>m/s <sup>2</sup><br>Hz<br>周期 |         | 设备、结构和基础设计  |

表 1 (续)

| 参数  | 单位                                   |                   | 应用实例和注释   |
|---|--------------------------------------|-------------------|---|
| 现场冷却水的供应能力(如果使用二次冷却时)   |                                      |                   | 二次冷却水可用于补充及冷却蒸发式冷却器,或用于直排冷却。蒸发式冷却塔对绝缘子可能是高湿度来源,宜特别注意其安放位置   |
| 水源  |                                      |                   | 水库、水井等<br>最好可给出以月为基础的这些参数在一年中的变化曲线  |
|   | 对低温性能                                | 对额定功率能力           |   |
| 最大连续流量  | m <sup>3</sup> /s                    | m <sup>3</sup> /s | 冷却系统设计需要  |
| 24 h 最大流量   | m <sup>3</sup> /s                    | m <sup>3</sup> /s | 冷却系统设计需要  |
| 最小连续流量  | m <sup>3</sup> /s                    | m <sup>3</sup> /s | 冷却系统设计需要  |
| 24 h 最小流量   | m <sup>3</sup> /s                    | m <sup>3</sup> /s | 冷却系统设计需要  |
| 最高水温  | —                                    | ℃                 | 冷却系统设计需要  |
| 最低水温  | ℃                                    | —                 | 冷却系统设计需要  |
| 允许的最高回水温度   | ℃                                    | ℃                 | 冷却系统设计需要  |
| pH 水平   |                                      |                   | 水处理站设计  |
| 水的电导率   | μS/m                                 |                   | 参数仅适用于蒸发冷却的井水   |
| 可溶固体的种类   |                                      |                   | 水处理站设计  |
| 可溶固体量   | g/m <sup>3</sup>                     |                   | 水处理站设计  |
| 不可溶固体的种类  |                                      |                   | 水处理站设计  |
| 不可溶固体量  | g/m <sup>3</sup>                     |                   | 水处理站设计  |
| 高压直流换流站最大地电阻率:<br>—— 地下水位深度;<br>—— 现场土壤条件;<br><br>—— 现场交通状况;<br>—— 运输重量及尺寸的限制;<br>—— 设备和建筑物局部轮廓限制;<br>—— 环境考虑 | Ω • m<br><br>m<br><br><br><br>kg • m |                   | 站接地设计<br>基础设计<br>钻孔资料(如岩石)和特殊的条件,如最大冻结深度、基础设计<br>决定安装和运输费用<br>设备设计—— 特别是变压器和平波电抗器<br>对设备、母线和建筑物设计的影响<br>可听噪声限值,审美要求—— 建筑的处理、环境美化等 |
| 宜给出上面未列出的特殊条件,例如影响系统性能的相关规定。  |                                      |                   |   |

## 6 额定功率、额定电流和额定电压

### 6.1 额定功率

#### 6.1.1 概述

额定功率是高压直流系统在所规定的环境条件范围内应连续输送的有功功率。此时,除冗余设备

外,所有设备均投入运行;交流系统频率、直流系统电压以及换流器的触发角和关断角均在其稳态范围内。

因为高压直流系统通常包括两个高压直流换流站和输电线路三部分,每一部分均产生损耗,因此宜规定额定功率的测量点。

### 6.1.2 高压直流输电系统的额定功率

高压直流输电系统的额定功率,以每个极为基础,定义为额定直流电压和额定直流电流的乘积。

对于给定的一个直流电流值,输电线路损耗随环境条件而变化,且沿线的损耗可能不均匀。因此,通常规定额定功率在整流器的直流母线上测量。如果要求在一些其他位置定义输电能力,如送端交流母线、受端交流母线或者直流线路上的某处,则宜当先确定额定直流电压,再通过高压直流系统的优化设计选择额定直流电流。

逆变站直流母线的额定功率和额定电压是整流器的参数和线路损耗的推算值。而线路损耗通常基于明确的导线参数和假定沿线的导线温度相同得到的。

长距离高压直流输电系统可为单极或双极,其额定功率宜以极数和每个极功率为基础确定。

### 6.1.3 HVDC 背靠背系统的额定功率

背靠背系统没有输电线路,因此,其额定直流电压和额定直流电流通过对高压直流系统的设计优化选择。此外,整流器和逆变器在直流侧固定连接在一起,如同一个设备在运行。对于这种系统的额定功率,规定为额定直流电压和额定直流电流的乘积。

### 6.1.4 功率方向

如果每个方向上的额定功率是相同,例如作为交换功率的系统联络线,那么宜作出明确规定。

如果功率潮流主要是向一个方向输送,例如从远方电站向系统送电的情况,则额定功率宜按一个方向确定,从而降低逆变站的造价。此时,在反方向上只具有较低的功率输送能力。

## 6.2 额定电流

额定电流是高压直流系统直流电流的平均值。高压直流系统宜能在所有规定的环境条件下以额定直流电流连续运行,没有时间的限制。对于背靠背系统的额定电流,如 4.2 所述,不需要作出规定,除非有特殊原因。

## 6.3 额定电压

额定电压是在额定直流电流下,输送额定直流功率所要求的直流电压的平均值。额定直流电压的测量点规定在换流站平波电抗器线路侧的直流高压母线和换流站直流侧低压母线之间,接地极线路除外。额定电压是在额定交流系统电压和换流器额定触发角,并运行在额定直流电流的条件下确定。

对于远距离高压直流输电系统,规定额定电压在送端。如果直流输电线路的电压承受能力比额定电压高,则应予以说明。对于背靠背系统的额定电压,如 6.1.3 所述,不需要作出规定,除非有特殊原因。

## 7 过负荷和设备容量

### 7.1 过负荷

高压直流换流站的过负荷通常是指直流电流高于额定值。为此,需要考虑设备预期寿命缩短多少

是可接受的(如由于热老化),以及考虑利用冗余设备和低的环境温度等。

过负荷可用功率规定,包括变压器在内的换流器的电压调节,通常在过负荷时降低直流电压使得电流的增加比功率的增加多一些。如果在过负荷条件下要保持额定电压,则可采取以下措施,但要增加投资:

- a) 换流器宜设计得具有较高的空载电压,如果在交流母线电压的全部变化范围内均要求过负荷,这将引起换流器的额定容量增大。

注:如果只在稳态交流系统电压较高范围内要求过负荷,则不需要增大容量。

- b) 基于变压器空载电压的换流阀的电压额定值宜升高。
- c) 假如换流器触发角需要保持在额定值,则宜增加有载分接开关调节范围。或者,把换流器设计为能在额定功率下以大一些的额定触发角运行,这将增加无功补偿、谐波和损耗,同时换流阀部件的内部应力也将增加。

因此,如果在过负荷条件下保持额定直流电压,则需要加大设备的容量。

为了更经济地设计,可规定一个过电流额定值,与直流电压调节无关。用基本的换流器方程式确定最大电流,超过此范围再增加过负荷能力,用额外的电压调节解决。

当换流器过负荷运行时,它将吸收更多的无功功率。除非这个增加的无功功率能从滤波器、并联电容器,例如从另一个极得到补偿,那么交流母线电压将下降。当交流系统短路水平低,这种影响可限制可达到的过负荷。

高压直流换流站过负荷要求的时间,通常取决于交流系统的需要,特别是在交流系统或者直流系统发生偶发故障后。

但是,宜注意到,高压直流换流站的设备过负荷能力是有限度的。如 7.2 所述,设备的热时间常数的范围在 1 s 到数小时之间。因此,高幅值长时期过负荷要求可显著增加设备的额定值,从而提高造价或降低预期寿命。在对过负荷进行规范时,对上述因素宜在系统利益上全面权衡。

示例:1 h 过负荷的实际值能是 1.2 p.u.,不会降低油冷变压器和电抗器的预期寿命,但在设计晶闸管换流阀时则是可能的。针对具体的设计,如果使用冗余冷却,1 h 过负荷可能转变成连续过负荷。另一些例子,包括频率低于 1 Hz 以下,持续时间为数秒的振荡性过负荷,如功率振荡阻尼和 5 s 过负荷,用于抑制暂时过电压或频率变化。

宜对这种类型的过负荷频率及时间间隔作出规定。

## 7.2 设备容量

### 7.2.1 概述

设备容量定义为高压直流换流站的设备在不降低设备预期寿命的条件下,允许输送比额定功率大的能力。设备容量与各单台设备的运行条件及设计准则有关,设计准则实际上与过负荷规范的关系将在下面各条中讨论。

环境温度是一个重要的因素。电力设备设计成能在最不利的环境条件下,以额定负荷运行。但是,这些条件通常只在有限的时间内发生。在低环境温度下,如果 7.2.4 中所列的限制能克服,一些裕度可用于提高系统容量。这个裕度与所选择的特定设备设计有关,并且对于不同的高压直流换流站设备是不同的。输送容量与环境温度的关系曲线能结合交流系统条件规定。曲线宜采用湿球和干球环境温度。

### 7.2.2 换流阀容量

在晶闸管阀中,晶闸管与散热器组合的热时间常数比较小(数秒到数分钟)。当在额定电流和最高环境温度下连续运行后发生过负荷时,晶闸管的结温将升高。在规定换流阀的故障抑制能力时宜考虑

到这点。因此,晶闸管阀的冷却系统设计成,即使在规定的过负荷运行条件下,也不超过其安全运行的温度。

在换流阀冷却回路中通常设有备用,换流阀的设计能在最不利的环境条件下,并且失去阀的冗余冷却设备时,仍满足所规定的额定容量的要求。如需要在无备用冷却时加大容量,则宜做出明确规定。

另一方面,当全部冗余冷却设备投入运行时,则具有额外的散热能力。超过额定电流的能力取决于阀和冷却系统的散热设计。

据此,换流器的过负荷规范,宜规定过负荷的幅值和持续时间、用于调制目的的振荡型过负荷的频率以及最高环境温度下所假定的冷却设备状态。

### 7.2.3 油冷变压器和电抗器的容量

变压器或电抗器绕组的热时间常数约为 15 min,而其油回路(如有)大约在 1 h 至数小时的范围内,这取决于设计。

因此,对于 5 s 范围内的短时过负荷,在高压直流换流站过负荷方面,油冷设备不是限制因素。对持续超过 1 h 的过负荷,宜规定是否允许缩短预期寿命。此外,预计发生这种过负荷的频度也宜作出规定。

### 7.2.4 交流滤波器及无功补偿装置的容量

高压直流换流站过负荷运行时,通常将增大产生的谐波电流,这将加大滤波器的谐波负荷和损耗,以及谐波干扰的水平。宜在规范中规定在过负荷条件下,是否也宜满足像在额定条件下那样的干扰水平,或者允许性能降低到何种程度。

同样,由于过负荷增加了换流器吸收的无功功率,规范中宜规定在设计滤波器和无功补偿装置时如何对此进行考虑。如果在高压直流换流站过负荷条件下,所增加的无功功率从交流系统中吸收,则可能发生交流母线电压大范围变化和随之而来的功率下降。因此,宜对过负荷条件下所预期的交流母线电压作出规定。空心设备如空心电抗器宜特别规定其过负荷能力。

### 7.2.5 开关设备和母线的容量

开关设备和母线通常不会限制高压直流换流站的过负荷能力,除非换流器按计划并联运行。但是,宜特别注意电流互感器和套管的过负荷能力。

## 8 最小输送功率和空载备用状态

### 8.1 概述

高压直流换流站存在一个最小稳态电流的限制。这是由于在电流小到一定程度时将产生电流断续。这也是最小输送容量限制的原则依据。

### 8.2 最小电流

由于高压直流换流站的直流输出电压是由交流母线正弦电压的许多部分所组成,因而直流电流本身不是一个平滑的或恒定的量。更确切地说,主要是由于与换流器串联的平波电抗器而使直流电流连续。对于某一恒定的直流平均电压,在低功率时,直流电流是否发生断续,这取决于换流器的换相电抗和平波电抗器的电感。当多换流器串联时还取决于串联数、换流器触发角以及交流系统电压的负序分

量。在稳态运行时宜避免出现电流断续,除非换流设备是针对这种运行方式设计。

因为平波电抗器的电感通常由其他准则所决定,而且换流器的触发角是变化的,故能规定一个最小电流限制值。一般来说最小电流取额定电流的5%~10%。这个最小电流值能用选择较大的平波电抗器电感值的方法进一步降低。

### 8.3 降低直流电压运行

在污秽条件下,如果同时伴随最不利的气候条件,直流架空线路有时不能在额定电压下运行。但是,高压直流换流站控制系统提供了各种方法实现在降低输电电压下继续输送功率。

一种可行的方法是改变换流变压器的分接开关位置,使加到换流阀上的交流电压最低。要进一步降低直流电压,能通过加大触发角运行达到。

这种要求意味着要对换流阀进行特殊设计,并且会引起换流阀造价升高。此外,由于在大触发角下运行,会引起谐波和无功消耗的增加,如果滤波和无功补偿装置的额定值不是在这些条件下确定的,降压运行则需要减小直流电流。

另一些可能的方法是加大换流变压器分接开关的调节范围,或者当高压直流系统由孤立的电厂供电时,还能考虑降低交流母线电压。

降低直流电压运行的电压值一般为额定电压的70%~80%,或许会同时要求降低直流电流。当使用备用冷却装置时,如果稍高的谐波干扰水平可接受,在75%的额定电压下的连续运行能力大约可达到额定电流值,并且还取决于这种运行方式的预期频度和持续时间。

在一个极中采用两个12脉波(动)换流器串联的场合,一个换流器可能退出运行,将使直流电压降低50%,此时不必加大换流器的触发角和降低直流电流。

为了得到设备的经济设计,对于预期的直流运行电压,宜规定对应的交流电压水平。

### 8.4 空载备用状态

#### 8.4.1 概述

这种状态下是指高压直流换流站已做好立即带负荷的准备,而不再需要很多的起动步骤。如果计划要空载备用状态运行,则宜对各种设备的状态作出规定,以便确定高压直流换流站的空载损耗。

#### 8.4.2 换流变压器的空载备用状态

换流变压器可带电或不带电,这取决于用户对待损耗的策略。当带电时需考虑励磁涌流衰减的时间。油泵和冷却器宜运行在变压器设计要求的最低水平。

#### 8.4.3 换流阀的空载备用状态

换流阀宜在闭锁状态。如果换流变压器在带电状态,在阀的均压回路中将有少量的损耗。为满足立即带负荷的要求,一次冷却系统、二次冷却系统和阀厅冷却系统宜运行在足够的水平。

#### 8.4.4 交流滤波器和无功补偿装置的空载备用状态

交流滤波器和无功补偿装置可接入或不接入,这取决于交流系统的无功功率控制策略。但为了确定空载损耗,还是宜考虑不接入。

#### 8.4.5 平波电抗器和直流滤波器的空载备用状态

宜接入平波电抗器和直流滤波器。平波电抗器(如已安装)的油泵和冷却器宜运行在电抗器设计要

求的最低水平。

#### 8.4.6 辅助电源系统的空载备用状态

辅助电源系统宜全部运行并准备好能带额定负荷,即全部站用电变压器需带电,蓄电池充电装置也宜投入运行。

#### 8.4.7 控制和保护的空载备用状态

所有控制和保护回路宜处在运行状态。

### 9 交流系统

#### 9.1 概述

对两端的交流系统的每个发展阶段以及所预期的变化情况,第9章中均宜作出规定。对性能和额定值可规定不同的值。

对换流器单元和滤波器所连接的交流开关场包括交流出线的布置宜作出说明,这样的布置说明也宜用于交流开关场运行方案规划。

宜提供附近发电机的详细参数,特别是当发电机的大部分负荷是通过直流输电送出时更是如此。通常,与潮流和短路研究有关的全部数据也是需要的。

#### 9.2 交流电压

##### 9.2.1 额定交流电压

额定交流电压是所设计系统的基波线电压的方均根值,且交流设备的一些特性与其有关,如:交流开关、交流滤波器、无功补偿装置、换流变压器的一次绕组等。

额定电压可用于定义这些交流设备的额定功率。

##### 9.2.2 稳态电压范围

###### 9.2.2.1 概述

稳态电压范围是指在该电压范围内高压直流系统宜能传送额定功率并且满足所有的性能要求,除非另有规定。

对超出稳态范围限值的任何特殊性能要求,宜作出规定。这可影响主要设备的设计,如换流变压器、交流滤波器和辅助设备。

###### 9.2.2.2 短时电压变化范围

当交流电压超过其正常稳态运行范围时,高压直流输电系统可能需要保持运行。此时,高压直流系统设计宜保证所有设备不存在损坏风险,但系统的性能限值可能降低(谐波、损耗等)。

因性能的降低将对设备的额定值产生影响,宜规定可接受的性能降低限值。

在适当情况下,HVDC控制系统可协助电压恢复到正常的运行范围(通过HVDC控制作用或投切滤波器和电抗器)。

###### 9.2.2.3 紧急情况下的电压变化

动态过电压可用于确定额定值和保护策略。

在极端的情况下,交流电压甚至可能超过短时电压变化范围,此时可考虑 HVDC 系统退出运行以便保护设备。也可要求 HVDC 换流设备在这种情况下仍继续运行,其代价是设备造价提高和性能的降低。

在适当情况下,HVDC 控制系统可协助电压恢复到正常的运行范围(通过 HVDC 控制作用或投切滤波器和电抗器)。

### 9.2.3 负序电压

采用对称分量法计算的交流电压的负序分量,是一组相序与正序电压相反的三相平衡电压,通常以额定电压的百分比表示。

虽然得到这个参数的实际值比较困难,但是,宜规定其最大值,用来确定交流侧非特征谐波电流和直流侧非特征谐波电压。这些谐波电流和谐波电压值分别用于交流滤波器、直流滤波器和平波电抗器设计(见第 17 章、第 18 章和第 21 章)。

## 9.3 频率

### 9.3.1 额定频率

宜明确交流系统的频率,因为它是换流变压器等交流设备额定值的设计基础,同时也是换流器和控制系统设计的基础。

直流滤波器的设计也受交流系统频率的影响。

### 9.3.2 稳态频率范围

当交流系统频率在稳态频率范围内且交流电压在稳态电压范围内时,直流输电可传输额定直流功率并能满足所有性能要求。

### 9.3.3 短时频率偏差

宜规定直流系统能保持其性能的短期频率偏差的限值和持续时间。对于交流滤波器和直流滤波器的设计来说,这是一个敏感的参数。可对在此频率变化范围内的滤波性能作出规定。

### 9.3.4 紧急情况下的频率变化

在紧急情况下,交流系统的频率可在有限的时间内达到极限值。宜对这种极端的频率值及其所允许的持续时间作出规定。在此情况下,设备宜保持运行而不被损坏,但不要求满足所规定的运行性能。当频率超出所规定的运行频率限值时,可允许设备自动切除。

## 9.4 系统工频阻抗

为了对换流器的换相条件进行分析,宜明确系统的工频阻抗。此时,需要在不考虑任何滤波器和无功补偿装置的条件下,给出换流站交流母线的次暂态阻抗的最大值和最小值。

次暂态阻抗是交流系统的正序阻抗,它由同步发电机的次暂态电抗、感应电动机的漏抗和系统连接线的正序阻抗确定。

另外,为了优化直流控制,宜明确详细的交流系统的阻抗或合适的等值系统。

## 9.5 系统谐波阻抗

为了进行交流滤波器的设计和性能计算,需要提供 2 次~50 次谐波频率的系统阻抗。



当高压直流换流站母线少于 5 条~8 条时,谐波阻抗可用线路、变压器和发电机参数进行计算。但是,考虑到系统不同的建设时期和负荷条件,谐波阻抗是变化的。因此,更方便的方法是用一个  $R-X$  谐波阻抗图,画出所预期的系统条件下的谐波阻抗轨迹的包络线。图上宜包括最小电阻值( $R_{\min}$ )和最小电抗值( $X_{\min}$ )。

实际上,这个阻抗图可有不同的形式,例如用  $R/X$  比值为常数所限定的圆图,或者对每一个频率用一系列多边形定义其谐波阻抗范围。在 IEC TR 62001(所有部分)中找到进一步的指导。

## 9.6 正序和零序波阻抗

为了对载波频带内来自换流器的干扰进行评估,以及设计相应的滤波器,需要所有进入换流站交流线路的正序和零序波阻抗。

## 9.7 其他谐波源

宜明确电气上距高压直流换流站较近的其他谐波源。在确定交流滤波器和电容器组的定值时,宜考虑这些谐波源的影响。对于接在换流站母线上或附近交流变电站的静止无功补偿装置来说,宜对其所产生的谐波电流作出规定。

## 9.8 次同步谐振(SSTI)

如果预计存在次同步谐振问题,宜提供有关研究的所有相关资料(见 13.2.4)。

# 10 无功功率

## 10.1 概述

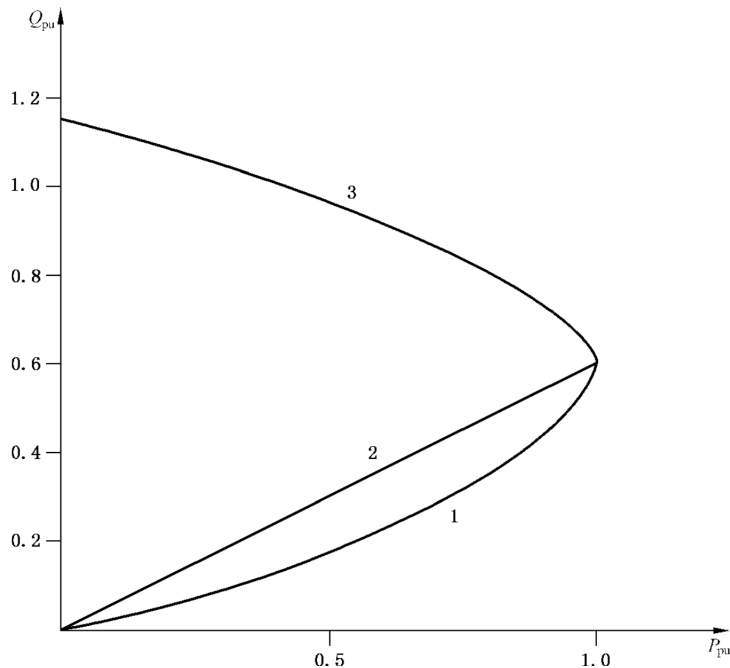
本章确定了与无功功率相关的注意事项。

## 10.2 常规高压直流系统

高压直流系统使用的电网换相换流器,不管是作为整流器还是逆变器运行,均需消耗一定的无功功率。对于一般所用的换流变压器漏抗值和换流器的触发角或关断角来说,在满负荷时所消耗的无功功率约为额定功率的 50%~60%。

在某一部分负荷时,通过相应的控制策略,能使换流器消耗的无功功率根据交流系统的要求而变化。控制策略经常利用调节换流变压器的分接开关保持整流器的触发角  $\alpha$  或逆变器的关断角  $\gamma$  在一个很小的范围内变化。在这个策略下,图 19 给出无功功率随有功功率的变化曲线。曲线 1 为恒定直流电压和恒定关断角时,无功功率随有功功率的变化关系;当负荷下降时,采用增加整流器的触发角  $\alpha$  和逆变器的关断角  $\gamma$  的方法,保持定空载直流电压( $U_{d0}$ ),可得到如曲线 2 所示的线性变化关系。

如果保持直流电流恒定,用加大触发角而降低直流电压的方法来减小负荷,则如图 19 曲线 3 所示,低负荷时所消耗的无功功率将增大。能得到曲线 1 和曲线 3 确定区域范围内任意特性以满足交流系统的特定需要。



说明：

- 1——恒定直流电压—恒定  $\gamma$ ；
- 2——恒定直流电压—恒定  $U_{d0}$ ；
- 3——恒定直流电流。

图 19 HVDC 换流器的无功功率  $Q$  随有功功率  $P$  的变化

高压直流换流站所需无功功率的控制,可采用换流阀触发角控制和换流变压器有载分接开关控制的配合实现。但是,由于这种方法要求加大触发角,从而增大了所产生的谐波电流和电压,并且也增加了换流阀阻尼回路的损耗。

从另一方面看,交流电流通过谐波滤波器进行滤波,滤波器也会产生无功功率。但是,按照满负荷条件下交流侧滤波的要求确定的滤波器,所产生的基波无功功率一般来说比换流器所消耗的无功功率要小一些。因此,通常增加电容器组提供满足换流器所需的全部无功功率。

必要时通过投切滤波器组和电容器组,可把换流器消耗的和滤波器产生的无功功率差值控制在一定限度内,且同时满足滤波要求。

为确定一个合适的无功功率控制策略,10.4~10.7 对此作出了相应规定。

### 10.3 串联电容补偿的 HVDC 设计

常规高压直流输电设计的无功功率要求是通过增加例如并联电容器和滤波器的并联装置解决。

而 CCC 和 CSCC 二者无功补偿方式与此不同,CCC 插入在变压器和阀之间,或 CSCC 插入在变压器和交流电网之间。通过这些结构,串联电容器电压加到换相电压上,导致触发角( $\alpha$ )和关断角( $\gamma$ )有很宽的范围。这将导致换相角( $\mu$ )减小和无功功率消耗降低。交流滤波器仅要求消除谐波,而不是支持无功功率,这将导致滤波器的额定容量降到相当小的值。与常规直流不同,无论是 CCC 或 CSCC 配置,均不需要在满负载运行变化范围内投切滤波器组。

### 10.4 换流器消耗的无功功率

整流器和逆变器消耗的无功功率,宜在低负荷、满负荷和过负荷等不同运行条件下予以确定。对计

算方法和在计算中所用的参数均宜作出规定。

需要考虑的运行条件包括潮流方向、单极大地回路、单极金属回路、双极运行以及在所规定的交流母线稳态电压范围内降低直流电压运行。

在带有最小交流滤波器组的最小运行功率方式下,能通过利用换流器增大触发角/关断角的能力减小流入交流系统的无功功率。

### 10.5 与交流系统的无功功率平衡

为确定装设的无功功率源,应明确总的无功功率平衡需求。可能需要进行确定适当的无功功率平衡负载流量的研究。除了换流器所需的无功功率外,还宜考虑以下的因素:

- 在所有的运行条件下,交流线路所保持的功率因数范围;
- 交流系统峰值负荷和轻负荷时的运行电压范围;
- 附近发电机能提供的无功功率;
- 裕度的要求。

当整流器直接与一个发电厂相连时,还宜考虑以下各点:

- 发电机超过最大和最小允许运行电压范围的运行能力;
- 升压变压器的分接开关变化范围和每个发展阶段所用的分接档位;
- 其他负荷的无功功率需要;
- 发电机所允许的最小有功功率;
- 发电机的自励磁限制;
- 所连接发电机的最少台数。

### 10.6 无功功率源

满足一系列要求的无功功率源,宜采用包括满足性能要求的交流滤波器、并联电容器、并联电抗器、同步调相机和静止无功补偿装置的最经济的组合。大部分无功功率由满足谐波性能的滤波器提供。在轻负荷条件下,尽管连接的滤波器已经最少,仍可能出现多余的无功功率,从而产生过高的稳态电压。这可能需要装设并联电抗器或者利用换流器吸收更多无功功率。

并联电容器组在提供无功功率方面是最经济的无功功率源。同步调相机和静止无功补偿装置只有在动态电压或稳定有问题时才采用(见第9章)。此外,还可能有一些涉及相邻交流系统的附加要求。

### 10.7 可投切无功功率组的最大容量

滤波器和电容器可分成较小的可投切组。每组容量与以下因素有关:

- a) 从空载到满负荷以及过负荷的全部运行范围内电压控制的要求;
- b) 每次投切可接受的调节幅度(宜注意,投切无功功率组的调节作用能与换流器控制相配合);
- c) 投切的频度。

当考虑滤波器和并联电容器与同步调相机联合使用时,为避免同步调相机发生自励磁,滤波器和电容器组的容量宜受到一定的限制。

## 11 HVDC 输电线路、接地极线路和接地极

### 11.1 概述

本章讨论与换流器稳态规范有关的 HVDC 输电线路、接地极和接地极线路的性能,其中包括电力线载波性能及设计要求,但不涉及 HVDC 输电线路、接地极和接地极线路本身的设计规范。

HVDC 输电线路、接地极和接地极线路的关键性能规格参数宜预先作出规定。

## 11.2 架空线路

### 11.2.1 概述

宜给出线路的总长度,以及每一段架空线路或电缆线路的详细情况,合用线路走廊的详细情况。为了能评价可能存在的电气影响和干扰,需要给出所有的线路交叉和平行走线的详细情况。在不知道准确的线路长度时,宜给出一个预计的线路长度范围。

对于两极和多极线路,需要给出沿全线的极间和两极间的距离。

### 11.2.2 电气参数

电气参数如下:

- 1) 电阻:在最小电流、额定电流、最大过负荷电流下的最大正序、零序直流电阻值,并且要考虑环境条件(温度、日照、风速等)。在额定电流下的频率特性曲线(取到基频的 49 次谐波)。
- 2) 电容:正序和零序电容( $C_1$  和  $C_0$ )。
- 3) 电感:正序和零序电感( $L_1$  和  $L_0$ ),以及与频率的关系曲线(取到基频的 49 次谐波)。

如果 1)~3) 没有可用的参数,作为一种替代方案,给出能计算出这些参数所需的数据。这些数据有:

- a) 导线的型号、尺寸、空间位置(包括避雷线);
- b) 铁塔外形尺寸、间隔及弧垂的情况;
- c) 沿线的土壤电阻率;
- d) 铁塔的接地电阻;
- e) 如果采用电力线载波,为计算电晕效应,应给出在最不利情况下的最大导线表面电场强度;
- f) 绝缘的临界冲击闪络水平。

特别强调,高压直流换流站 10 km 以内的直流输电线路对直击雷有足够的屏蔽,且直流线路铁塔的接地电阻足够低,例如小于  $10\ \Omega \sim 25\ \Omega$ 。

作为第三种方案,这些参数也可用导线和地之间的互阻抗和自阻抗的形式给出,以替代序分量的参数。

## 11.3 电缆线路

### 11.3.1 概述

宜适当说明线路各分段长度或总长度。宜说明电缆供应商对使用条件有何限制。

这种限制的示例可能包括:

- a) 极性反转的限制;
- b) 放电速率的限制;
- c) 电压和电流纹波水平的限制;
- d) 过电压和过电流的限制。

### 11.3.2 电气参数

电气参数如下:

- a) 芯线的直流电阻值,包括在额定电流和最大过负荷电流下的最大值,在最小电流下的最小值;
- b) 芯线的电阻值,频率 5 kHz 以下;
- c) 电缆铅皮的电阻值,频率 5 kHz 以下;
- d) 电感,频率 20 kHz 以下;

- e) 电缆线芯对铅皮的电容；
- f) 电缆绝缘层对地(铠装)电容；
- g) 电缆线芯对铅皮的波阻抗；
- h) 衰耗特性,频率 50 kHz 以下。

#### 11.4 接地极线路

流经换流站接地系统和变压器接地中性点的直流电流,可能引起变压器饱和,为了对此进行评估,宜给出接地极线路的长度。如果接地极线路有一段在直流线路铁塔上的话,宜给出其长度。

宜给出接地极线路的电阻值(在设定环境温度下的最大值)。

#### 11.5 接地极

宜给出接地极对无穷远地点的最大电阻值。宜注意,这个电阻值可随时间、环境条件和/或负荷条件而增大。

### 12 可靠性

#### 12.1 概述

高压直流系统的可靠性是指在所规定的系统条件 and 环境条件下,在规定的时间内传输规定能量的能力。

本章的范围和目的是为了编写功能规范和评价可靠性。本章规定高压直流系统在验收期间的可靠性计算方法。更多信息请参阅附录 A。其参照 IEC TR 62762,论述了编写高压直流系统在运行中特定的故障和整体可用性的报告步骤,尽管 IEC TR 62762 范围与本部分有所不同,但使用的基本术语及定义在两个文件中是通用的。

下面给出适用于高压直流系统可靠性的术语和定义。

#### 12.2 停运

##### 12.2.1 概述

高压直流系统的停运是指当输送能力下降到低于最大额定功率水平的事件。事件发生的起因,可能是部分设备或元件的缺陷、人员的失误、设备维护和检修而退出工作;或保护装置动作产生的停运;或外部故障引起的停运等(见 12.3.3)。在定义时宜考虑哪些情况宜包括在可用率计算中,哪些情况宜包括在年强迫停运次数计算中。一次停运要么算在计划停运之中,要么算在强迫停运之中(分别为 12.2.2 和 12.2.3)。

##### 12.2.2 计划停运

计划停运是指当输送能力降低到额定功率水平以下时,为了设备检修或预定的维护周期,预先计划允许部分或全部的高压直流输电系统退出服务的停运。

##### 12.2.3 强迫停运

强迫停运是自动保护设备动作或通过运行人员干预开始的非计划停运(即:在持续运行可能会对人员或设备造成损害的情况下,决定停运全部或部分的高压直流输电系统,是一种不能推迟到下一个计划检修期的停运)。

12.3 容量

12.3.1 概述

下面定义的容量术语通常是在 HVDC 系统的一个点定义的(例如送端的交流端口、受端的交流端口或送端的直流端口)。如果每个换流站都有各自的所有权,可分别定义每个站的额定值。

12.3.2 最大连续容量  $P_m$

这是为高压直流输电系统额定连续运行定义的最大功率值(MW),不包括任何通过冗余设备提供的额外可用容量。

12.3.3 停运容量  $P_o$

在停运期间,最大额定值与可用功率的差值(MW)被称为停运容量。

12.3.4 停运降额系数(ODF)

停运的降额系数是定义为,停运容量  $P_o$  与最大容量  $P_m$  的比见式(1):

$$\text{ODF} = \frac{P_o}{P_m} \dots\dots\dots (1)$$

12.4 停运时间术语

12.4.1 实际停运时间(AOD)

实际停运持续时间被定义为在停运开始到结束之间所经过的十进制小时时间。停运通常开始于发生中断的主电路的潮流或触发下降到停运功率水平的一个转换事件。停运通常结束于转换事件发生时,以将设备恢复到准备运行的状态,尽管不必投入运行,即该设备可用于运行服务。

实际的停运时间可分为强迫的和计划的,因此,每个停运的 AOD 值是实际强迫停运时间(AFOD)或实际计划停用时间(ASOD)。

12.4.2 等效停运时间(EOD)

考虑到容量的部分损失,等效停运时间规定为实际停运时间乘以停运降额系数见式(2):

$$\text{EOD} = \text{AOD} \times \text{ODF} \dots\dots\dots (2)$$

类似于强迫的和计划的实际停运时间的确定,等效停运时间可分为强迫的和计划的,即等效强迫停运时间(EFOD)和等效计划停运时间(ESOD)。

12.4.3 周期小时数(PH)

在分析所覆盖周期内的全部日历小时数即为周期小时数,通常一年 8760 h。

12.4.4 实际停运小时数(AOH)

实际停运小时数为分析期间内,各个的实际停运时间的总和见式(3):

$$\text{AOH} = \sum \text{AOD} \dots\dots\dots (3)$$

可将该 AOH 值细分成强迫的和计划的停运小时数,通过 AFOD 和 ASOD 值求和,代替求 AOD 值的总和。

### 12.4.5 等效停运小时数(EOH)

这个规定为在分析期间内,各个的等效停运时间之和见式(4):

$$EOH = \sum EOD \quad \dots\dots\dots (4)$$

可将该 EOH 值细分成强迫的和计划的停运小时数,通过 EFOD 和 ESOD 值求和,代替求 EOD 值的总和。

## 12.5 能量不可用率(EU)

### 12.5.1 概述

能量不可用率是指因停运而未传输的能量的量度。

能量不可用率由如下的等效停运小时确定见式(5):

$$EU = \left( \frac{EOH}{PH} \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

它通常用百分数表示。

对可靠性研究来说,主要是要区别单极输电系统线路故障的影响和多极(双极)输电系统线路故障的影响。

在单极系统中,线路故障使输电系统全部停运。在双极系统中,大部分情况下线路故障只影响输电系统的一个极,因此线路故障一般来说只降低 50% 的输送能量。但是,如果剩下的一个极的输电线路设计有一定的过电流能力,并且高压直流换流站的换流器能并联连接,则通过换流器并联连接,输电系统可输送大于 50% 的能量。

当换流器单元发生故障时,故障的换流器需要退出工作,损失的输送容量的百分比取决于退出工作的换流器个数与总的换流器数的比例。

还可能有其他事故情况,如失去部分滤波器、接地极线路故障等。对于这些故障对可用率的影响也宜作出规定。

### 12.5.2 强迫能量不可用率(FEU)

强迫能量不可用率是指因强迫停运而未传输的能量的量度见式(6):

$$FEU = \left( \frac{EFOH}{PH} \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

EFOH——等效强迫停运小时数。

### 12.5.3 计划能量不可用率(SEU)

计划能量不可用率是指因计划停运而未传输的能量量度见式(7):

$$SEU = \left( \frac{ESOH}{PH} \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

ESOH——等效计划停运小时数。

## 12.6 能量可用率(EA)

能量可用率是指高压直流系统能输送的能量的量度见式(8):

$$EA = 100\% - EU \quad \dots\dots\dots (8)$$

## 12.7 最大允许强迫停运次数

并非所有强迫停运都需要计算在内。在所考虑的周期小时(PH)内,对这种强迫停运的最大允许次数宜作出规定。

## 12.8 停运概率

### 12.8.1 元件故障

除整个系统的可用率外,一些单个元件的可靠性也可考虑。

系统中每个元件能用它的故障率( $\lambda$ )表征。宜对统计性故障(随机停运)和元件因寿终而失效(例如:发光二极管因老化而失效)的故障加以区别。因为所有元件在达到寿命周期时均需要更换,区分好这两种类型的故障,对备品的储备十分有益。

### 12.8.2 外部故障

对高压直流系统性能有不利影响的交流系统故障的预计次数及其持续时间,宜作出规定。在确定高压直流系统允许的强迫停运次数时,宜考虑这种故障产生的概率。

## 13 HVDC 控制

### 13.1 控制目的

高压直流系统的优越性,在很大程度上与其能充分发挥对不同系统要求的最大灵活性、可靠性和适应性的控制性能有关。

在规定的交流电压和频率范围内,控制系统宜能保持换流器稳定运行和高压直流系统正常的功率输送。高压直流控制系统的目的是在保持每个极的最大独立性和不危及设备安全的条件下,对功率方向、功率大小和变化速度提供有效和最灵活地控制。该控制系统宜具有高速控制性能,它能对交流系统和直流系统的扰动作出很好的响应。对于远距离直流输电,为了最有效地运行,需要一个快速的远动通信系统。但是,高压直流系统宜能在无远动通信情况下运行,并最大限度地保持其性能。

控制系统宜适用于:

- 1) 与交流系统交换的无功功率控制,包括无功功率消耗的增加或减小;
- 2) 交流电压控制;
- 3) 频率控制;
- 4) 有功功率调制;
- 5) 有功功率和无功功率联合调制;
- 6) 次同步扭振相互作用阻尼;
- 7) 远程控制;
- 8) 换流器两端协调控制。

### 13.2 控制结构

#### 13.2.1 概述

高压直流换流站的各种控制回路通常为分层结构。主要控制功能尽可能分到较低层级,以提高系统的可靠性和可用性。正常情况下它们全都自动运行。对于远距离高压直流输电系统,为了整流站和逆变站之间的相互配合,需要一个通信系统。以下从最低的层次开始对各控制层次进行说明(见图20)。



### 13.2.2 换流器触发控制

换流器触发控制主要是开环控制。对于一个 12 脉波(动)换流器,其控制的输出是对每个换流阀的触发脉冲。这些触发脉冲与交流系统电压同步。它的输入是由高一级的控制层所提供的触发角( $\alpha$ )或触发超前角( $\beta$ )。

高压直流输电所用的换流器触发控制原理,主要有两类:

- 等触发角控制;
- 等距触发控制。

等触发角控制是换流阀脉冲的一种方法,它主要保持换流器内各换流阀的触发角基本相等,而不考虑交流电压是否不平衡。

等距触发控制是换流阀控制脉冲的另一种方法,它使这些控制脉冲在时间上是等距的,而不考虑交流系统电压是否畸变或不平衡。

换流器触发控制的功能要求是:

- a) 当交流电网的短路容量和直流传输功率之比很低时(例如:小于 3)也能运行;
- b) 等距触发允许的偏差宜为  $\pm \Delta^\circ$ ,即在所规定的条件下,每次触发应产生于前次触发之后的  $(30 \pm \Delta^\circ)$  时刻[对 12 脉波(动)换流器单元]。对于不同的换流器运行方式,如运行在最小  $\alpha$  控制、定电流控制或定关断角控制下,宜指出对  $\Delta^\circ$  值的要求是不同的。

由等距触发偏差引起的非特征谐波会传送到交流电网以及高压直流输电线路。假设交流系统电压和阻抗是平衡的,典型的  $\Delta^\circ$  允许最大值是  $0.2^\circ$ 。

### 13.2.3 极控制

极控制给每个极的所有串联换流器(如果有的话)提供参考值。

极控制是闭环控制,它包括使高压直流系统稳定运行所要求的基本控制功能。如电流控制、电压控制、关断角控制、功率控制和分接开关控制。所有这些控制功能都具有参考值和实际值。这些参考值的一部分能由极控制提供(例如,电流的参考值,它是由要求的传输功率计算出的),其他能由运行人员提供(例如直流电压、直流功率等)。

通常每个换流站极均需配备一个极控制(见图 20),它控制由换流阀触发时刻所决定的换流器的直流输出电压。极控制测量实际值和整定值的差别,并且相应地调整换流器的直流输出电压。如果整流器的电流整定值比实际电流值大,触发控制则减小触发角,使直流电压升高从而增大直流电流,直到电流实际值和其整定值相等时为止,或者直到触发角已经调到最小(能正确触发换流阀所需的、加在阀端子间的最小电压),即直流电压已经达到最大值时为止。另一方面,如果电流实测值比其整定值大,则相应地减小直流电压。当换流器由整流工况转为逆变工况运行时,触发角由最小允许关断角(保证换流阀安全换相)所决定,这种降低是有限的。

整流器和逆变器典型的电压-电流特性曲线分别示于图 21 a)和图 21 b)。

通常逆变器的最大电压限制值比整流器的低,并且电流是由整流器控制的。也就是说,由逆变器保持电压,整流器则调整其电压,直到电流等于其整定值,从而确立一个稳态工作点 A[见图 21 a)]。

如果逆变器的最大电压限制值比整流器的高,由逆变器控制电流,整流器保持最大电压,图 21 a)和图 21 b)所示的是一个简化形式的控制特性,更详细的特性典型例子如图 21 c)所示。

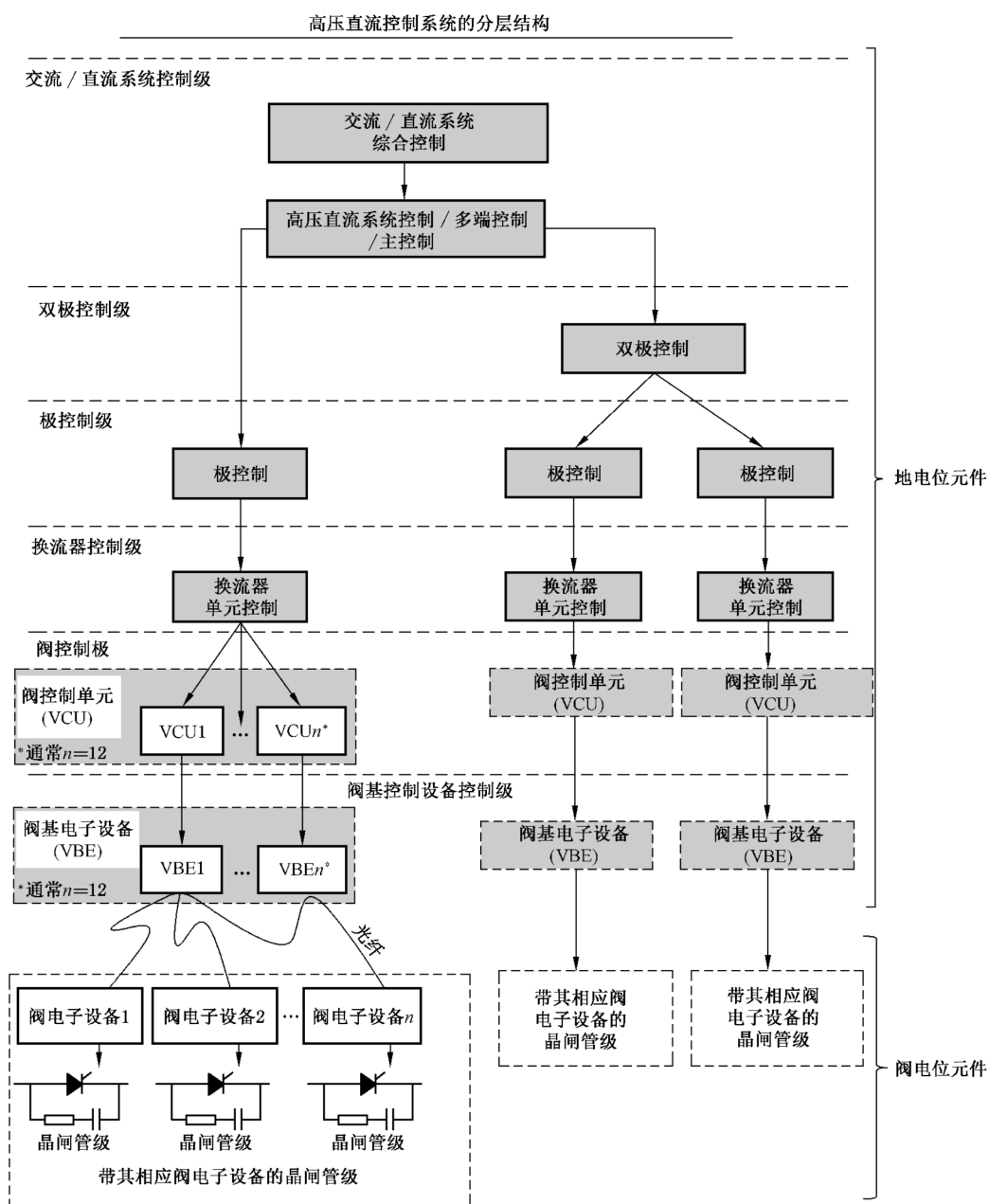


图 20 高压直流系统/特高压直流系统控制分层

如上所述,通常由整流器控制电流,逆变器确定电压。逆变器的电流整定值等于整流器的电流整定值减去一个“电流裕度”( $\Delta I = I_R - I_I$ ) [见图 21 a)]。为了保持换相裕度为  $\gamma_{\min}$  不变,在相应的最小触发超前角  $\beta$  下强制触发逆变器,从而由逆变器确定直流线路电压。

对于远距离输电,通常通过适当控制逆变侧换流变压器分接开关保持直流电压恒定。或者通过控制逆变器熄弧角来建立恒定的直流电压。

对串联的换流器,阀组宜采用电压平衡控制。

在其他系统中,逆变器的控制方式是保持直流输电线路电压恒定。在这种情况下,换流变压器分接开关用于将关断角  $\gamma$  维持在一定的范围内。

通过调整换流变压器分接开关,把整流器的触发角保持在一个很窄的范围内(额定  $\alpha \pm \Delta\alpha$ )。由触发角变化  $\Delta\alpha$  所引起的直流电压变化一般和由一级分接开关调压所引起的变化相当。另一种方案则是用分接开关调节保持换流器的理想空载直流电压恒定。

有时可能需要降低直流电压运行,例如,当直流输电线路承受电压的能力降低时。这能由调整整流器和逆变器中的换流变压器分接开关、调节触发角或切除一个串联的换流器(如果有)实现。

13.2.4 高压直流换流站控制

高压直流换流站控制通常是一个闭环控制系统。HVDC 系统的主要设计标准通常是尽可能减少站级设备,以便减少站极设备故障情况影响双极。参考站级功能,这些功能也可在极级硬件中实现,且可包括:

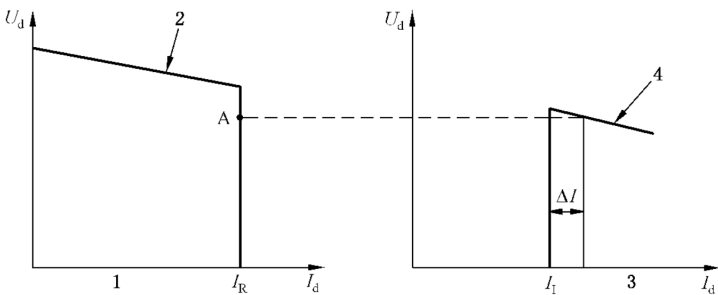
- a) 通过远动通信系统进行两端换流站电流整定值的配合,通常以极为基础进行;
- b) 功率控制;
- c) 高压直流换流站极之间的配合(如果是多极时);
- d) 附加控制,如频率控制、提升/回降控制、功率振荡阻尼等;
- e) 更高层的控制策略。

下面举例说明更高层的控制策略。

高压直流换流站消耗的无功功率取决于直流电流和触发角。因此,直流输电能用来进行无功功率控制或者交流系统的电压控制。

高压直流换流站控制能和高压直流站外部控制相配合,例如与发电厂的调速器配合。高压直流换流站还能提供避免汽轮机轴系次同步谐振的控制。

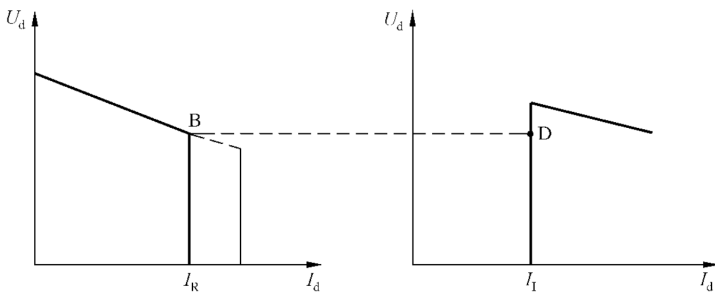
极平衡控制能使地电流最小(在双极高压直流输电系统中,地电流等于两极之间的不平衡电流),从而避免由于地电流通过地下设施而产生的腐蚀问题。在没有极平衡控制的双极系统中,两极之间典型的不平衡电流极限可达额定电流的 3%。



说明:

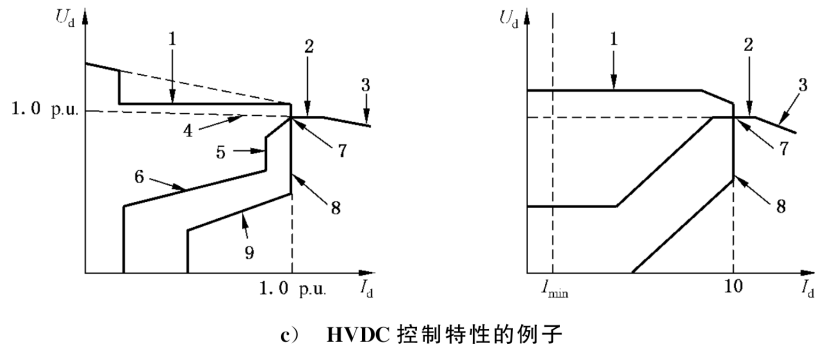
- 1——整流器;
- 2——整流器在  $\alpha = \alpha_{\min}$  触发;
- 3——逆变器;
- 4——逆变器在  $\gamma = \gamma_{\min}$  触发。

a) 额定运行,整流器控制电流



b) 逆变器控制电流

图 21 换流器的电压-电流特性



说明:

- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| 1——整流器 $U_d$ 控制;        | 6——逆变器 VDCL(取决于电压的电流限制); |
| 2——逆变器 $U_d$ 控制(电压整定值); | 7——额定运行点;                |
| 3——逆变器 $\gamma$ 控制;     | 8——整流器 $I_d$ 控制;         |
| 4——直流线路压降;              | 9——整流器 VDCL(取决于电压的电流限制); |
| 5——逆变器 $I_d$ 控制;        | 10——电流整定值。               |

图 21 (续)

准备采用哪些控制策略,以及在不同的运行条件及交流系统条件下,这些控制策略的优先级别等都应该作出规定。

功率控制的精度取决于分压器、电流传感器的精度以及功率整定值的分辨率。在额定功率下典型的精度约为 1.5%。

### 13.2.5 主控制

主控制通常集成在高压直流换流站控制内。但是,如果两个以上的高压直流换流站连接在同一条交流母线上,则主控制将是独立于站控之上的控制级别,并且它包含更高层的控制策略。主控制需要和交流系统联系并需和本站配合。主控制也能设在远方,如在调度中心。在这种情况下,从调度中心到高压直流换流站应有运动通信系统。

### 13.3 控制指令设置

通常高压直流系统的两个换流站装设相同的控制设备,因为大部分高压直流系统都设计为双向输送功率。

在同一时间只有一个地点的换流站控制能起主导作用的。通常站控制指令的整定值和变化率是由主导站手动给出的。在其他换流站,改变指令是通过通信实现的。主控站设置整定值的权力也能转到远方地点处,例如调度中心。

如果通过电话通信可进行两站之间的配合联系,在电流控制方式下,能在两站中手动进行电流指令的整定。电流控制也能从远方进行,例如从调度中心。

从功率控制方式向电流控制方式的切换,可在运动通信通道故障之后自动进行,或者由换流站控制发出命令进行。

功率控制定值的分辨率可做出规定(在 1 000 MW 额定功率时,常用 10 MW),也可对它的变化率做出规定(例如:在 1 MW/min 和 99 MW/min 之间,步长为 1 MW/min)。

通常功率方向的改变由主控站发出信号进行,但是当需要紧急功率反转时,例如在一侧交流系统中产生扰动之后,也可自动进行。

### 13.4 电流限制值

在电流指令上能加各种限制,其主要目的是根据主回路设备和冷却系统的条件优化允许的电流值。例如有以下限制:

- a) 限时过负荷:在每 24 h 周期内,在一个固定的持续时间内允许的过负荷,例如,考虑到变压器温升的限制;
- b) 冬季过负荷:在环境温度较低的时期,当阀的冷却条件有利时,允许的过负荷;
- c) 动态过负荷:按照晶闸管元件和其散热器的暂态热性能所允许的短时间过负荷;
- d) 其他的电流限制:由于连接到整流站的发电机,或降压运行,或其他系统动态性能要求的负荷限制;
- e) 最小电流限制:通常取 0.05 p.u.~0.1 p.u.。

经过限制的电流指令,能在两个换流站之间传送,并有同步装置保证在任何时刻两个站得到的电流指令都是相同的。

### 13.5 控制回路冗余

用户要求的高压直流输电系统的可用性可构成规定控制系统可靠性的基础。通常,实现最小可能的双极性故障率,控制系统采用冗余或主备子系统。

### 13.6 保护系统

高压直流控制和保护系统宜在策略和参数等方面相互协调。

高压直流保护系统用于检测和清除故障,隔离故障设备以恢复系统的稳定状态(如果可能),IEC TR 60919-2 给出了保护区域。

高压直流保护系统基于完全冗余的概念,配置在重叠的保护区内,并快速准确的动作。

若需要清除故障,高压直流保护系统向控制系统发出指令,产生跳闸信号给换流侧交流断路器或者直接跳开换流侧交流断路器。此外,高压直流保护系统宜根据故障严重程度向控制系统发出指令,如:

- 闭锁换流器(触发);
- 强迫移相;
- 闭锁旁通对触发;
- 换流器/极隔离;
- 直流线路故障清除时序;
- 电流限值;
- 极电流平衡。

### 13.7 测量

高压直流系统所关注的测量项目如下:

- 直流电流;
- 直流电压及极性;
- 换流器所消耗的无功功率;
- 包括无功补偿装置和滤波器在内的总无功功率;
- 交流电流;
- 交流电压;
- 交流功率;
- 能量;

- 入地电流；
- 触发角；
- 关断角；
- 分接开关位置。

宜决定这些项目中哪些需要进行测量,是否以每极为基础进行,以及测量精度是多少。

根据功能(控制、保护、计量、显示、记录等)的不同,测量值的准确度或允差要求将不同。例如,设定电流指令与实际电流之间的偏差是依赖于电流控制系统和电流传感器的允差的。在这种情况下,一个典型的允差要求是在额定电流时小于1%。

## 14 远动通信

### 14.1 通信系统的类型

当高压直流系统的两端地点相离一个相当大距离,两端之间需要有通信系统交换信息。最基本的交换信息是有关在启动和停止时序中两端的配合信息。两端之间的快速通信能用于增强高压直流系统的性能。

能供高压直流输电系统运行和控制选用的通信类型有:

- a) 电话;
- b) 电力线载波(PLC);
- c) 微波;
- d) 无线电系统;
- e) 光纤通信。

可采用多种类型的通信系统。

### 14.2 电话

公用电话网络是高压直流输电系统控制的一种能选择的通信方式。主要是在两个换流站之间需要有一个话音通信通道,当改变运行方式时,借以在两个站得到正确的动作时间配合。但是,对于由调度中心控制的无人值班的高压直流换流站,当要利用控制系统对输送功率固有的快速控制响应特性时,需要有一个性能良好的远动通信系统。

### 14.3 电力线载波(PLC)

PLC 是高压直流架空线路所采用的一种通信方式,但性能可能不能很好地满足快速调制控制的要求。

对于高压直流电缆系统,当电缆距离长时,PLC 的传输能力将降低。对于双工 PLC 载波通道,其电缆长度的限制大约为 150 km。

为直流线路 PLC 分配载波频率时,为避免干扰,宜考虑与交流互联网络中其他 PLC 系统的频率配合。

直流线路上的 PLC 能在高压直流换流站附近采用较高的载波频率,以得到对可能的换流器干扰的满意的信噪比。在离换流站一定距离以后,可采用较低的载波频率,因为较低的频率衰减较慢。对交直流线路交叉处可能产生的干扰,也宜给以注意。

### 14.4 微波

微波通信对直流输电控制虽然不一定是必要的,但对于需要快速传送大量信息以实现更复杂的高压直流系统的控制保护来说,采用微波通信是一种正确的选择。

然而,微波通信的信号水平受天气条件的影响,如暴雨和雾,因为它们吸收或散射微波信号。

正确选择微波通道路径是可靠和经济的安装所必需的。由于其视线传播的特点,该系统根据地理位置需要几个反射塔,并为中间信号升压,以弥补这一衰减的中继站。

卫星通信可是非常长距离的高压直流输电系统的另一种选择,虽然它不可避免地存在通信延迟。

#### 14.5 无线电系统

无线电通信在远距离跨海高压直流电缆输电工程中可考虑采用,因为在这种情况下,电力线载波不能提供足够的速度。

#### 14.6 光纤通信

高压直流系统的控制保护可采用光纤远动通信系统。光纤远动通信是一种可快速传送大量信息并且抗干扰性能好的通信方式。

光纤通信系统是非常快速(与微波系统比较)和可靠的。因此,除了对高压直流输电系统运行的基本要求外,还需要存在足够的附加带宽以便增强控制和保护系统的性能。此外,信息容量足够高,各种详细的运行数据能几乎即时传输。为了保证光纤系统的高效利用,数据通道通常包括多路复用技术。

光纤能跨海铺设,但是它们容易被机械应力损坏,因此仔细选择路径是很重要的。使用复合直流电力电缆(包含光纤)是另一种选择。如果使用这些电缆,在相同机械应力条件下,光纤通信的可靠性能与传统的电力电缆一致,能降低总铺设成本。使用 OPGW(光缆地线)作为屏蔽线,是另一个典型的布置,能用于多种架空线路方案中。

#### 14.7 传输数据的分类

下面列出在高压直流换流站之间,不同类型传送信息的分类清单。宜区别各类信息的要求,如速度、分辨率和可靠性等:

- a) 连续控制的指令信号:
  - 功率指令;
  - 电流指令;
  - 频率控制;
  - 阻尼控制。
- b) 操作命令:
  - 运行控制方式的改变;
  - 保护联锁;
  - 开关操作;
  - 闭锁/解锁;
  - 电力系统安全控制。
- c) 状态指示:
  - 开关位置;
  - 运行的换流器数量。
- d) 测量数据。
- e) 报警信号。
- f) 语音通信。
- g) 直流线路故障定位信息。

通常,这些信号按照一定的数据格式传输,如循环数字遥测数据格式。每个数据项被分配给按数据格式大小的一组位。在某些情况下,如果检测到一个错误重发旧数据可能是不可取的;例如,在摇摆阻

尼期间,发送功率指令。

#### 14.8 快速响应的通信

以下类型的控制需要快速通信,如微波通信或光纤通道(大于 1 200 bps 的通道,例如 64 kbps):

- a) 交流系统的阻尼控制;
- b) 交流系统的频率控制;
- c) 交流和直流系统的快速功率控制;
- d) 高压直流输电线路故障定位;
- e) 高压直流输电线路保护;
- f) 电力系统安全控制。

通信系统的性能要求将取决于高压直流控制系统、远程控制设施等设置的具体要求。由于这些在不同的高压直流输电方案之间差别很大,应通过对特定的高压直流输电系统的详细分析,确定通信系统规范。

#### 14.9 可靠性

通常远动通信系统均具有自动的自检系统。

如果有备用远动通信系统,则应具有自动切换功能,从而保持高压直流系统的全部控制功能。如果没有备用远动通信系统,则在失去通信以后,高压直流系统宜在所规定的不需远动通信的控制策略下继续运行。

对于微波通道,信号衰减是不可避免的。然而,典型的通信通道的中断周期约为 10 ms。在中断期间,高压直流输电系统可保持控制信号的数据。因此,它宜能恢复,而不中断功率潮流。

如果将上面提到的几种通信通道结合起来,能实现更高的可靠性。例如,微波和光纤通信通道的组合实现不间断、更可靠的通信和这些设施灵活的维护。同时,两套微波系统的移位设置(空间分集方案)能减轻跨海信号衰落问题。

### 15 辅助电源

#### 15.1 概述

通常辅助电源总容量占高压直流换流站容量的 0.2%~1%,它用于冷却泵、风机、控制、保护、隔离开关的电动机驱动等,以及满足一般站用电需要。为保证有足够的安全性和避免供电中断,一般是由换流站的高压交流电网直接供电。

在具有独立配电网络供电的地方,这种电源宜用作后备,提供中压和低压开关设备及供电变压器事故的补充保护。

#### 15.2 可靠性和负荷分类

辅助电源的短时断电(例如小于 5 s)不宜干扰高压直流输送的功率。当交流母线被保护切除后,高压直流换流站能在控制作用下安全停运(尽管可能需要保护,以防止由于滤波器或无功补偿装置造成的假性换相;但是,高压直流换流器是电网换相方式,如果失去了交流电源,就不能持续输电)。

即使是非常短的供电中断,控制保护和数据记录系统一般都不能承受。所以,它们由站蓄电池供电;如果需要交流供电的话,则由不间断电源系统(UPS)供电。不一定需要双重化的蓄电池组,但为了满足所要求的可靠性准则,可能需要完全双重化的蓄电池充电机及不间断电源。对事故后安全停运所有重要的断路器和隔离开关,都宜用存储的能量进行操作,即用压缩空气或蓄电池组进行操作。

不同的考虑适用于隔离开关操作和断路器合闸操作,以在事故导致停运(可能在较小的容量下)后



恢复输电能力。如果预计可能要求从全停电母线上重新起动,且又没有容量足够大的蓄电池组,则可能需要有一台柴油发电机。

由于晶闸管阀的热时间常数小,对阀的冷却风机和泵来说,只允许短时的断电。最好在两个独立供电电源之间进行自动切换;但应认识到,如果一路电源取自配电网,这样的电源可靠性相当低,切换到一次系统电源上的操作宜是自动的,并且尽可能快速完成。

因为高压直流输电只有在交流系统母线带电时才能运行,故在交流系统发生扰动或换流器断开的时间内,失去辅助电源并不会导致可用率的进一步降低,除非站用电负荷重新起动延误导致。

对于那些停电时不会直接危及输送功率的一般站用电设备,其供电可靠性能低些。即使如此,与独立的备用电源之间的切换还是需要的,但不一定要自动切换。

即使在高压直流换流站和交流系统断开的情况下,也可能需要应急电源。一般用柴油发电机作为紧急电源,除了给一般设备供电外,还可用于给蓄电池充电机供电,特别是在预见到停电有可能延长时更需要有应急电源。

### 15.3 交流辅助电源

首先宜预计出高压直流换流站的全部站用电负荷容量和 30 kW 以上的电动机的数量和容量,大致确定站用电母线的总负荷;然后,详细确定可能的电源和容量、故障水平及与换流器和交流电网连接点之间的关系,以单线图表示。根据这些数据可能规定供电可靠性、清除故障所需停电时间、畸变、电压与频率的限制等。对任何设计方案,都宜进行电压稳定性分析,以保证替代电源间的切换时间及相位差、电动机起动时的电压降及故障清除时间都在可接受的范围之内。

感应电动机可能对负序电压幅值、低电压或频率的大范围变化特别敏感。最后,需要有精确的数据用于计算损耗保证值。

### 15.4 蓄电池和不间断电源(UPS)

为了限制相互干扰,至少对于下列设备,通常采用单独的蓄电池组供电:

- 高压直流系统每一极的控制;
- 换流站其他控制和保护;
- 远动通信设备。

这些蓄电池组一般有不同的额定电压。对每个蓄电池组在充电设备或其电源故障时仍能在额定电压范围内给提供额定负荷的时间宜予规定。典型的时间是 6 h。还宜规定蓄电池组提供额定负荷时的再充电时间及允许的纹波电压。典型的充电时间是 10 h,以达到蓄电池不低于 90% 的最低充电状态。此外,应考虑可接受的叠加纹波电流。宜为蓄电池和充电机设置一个房间,对于现代化的设备来说,并没有相关证据说明需把这两个设备分开。

对于蓄电池组需要考虑和规定:

- 额定电压;
- 负荷曲线和/或额定容量;
- 从充电(当加速是必要时)到放电的电压范围;
- 电池的类型;
- 温度条件;
- 通风要求。

充电系统宜满足蓄电池和负荷的要求。

交流负荷的不间断电源能采用专用的设备或利用高压直流换流站的公用系统。一般首选后者,因为用这种方法更易得到充足的备用。通常不间断电源包括其自身的专用电池。

对于不间断电源宜规定如下:

- 额定电压、相数和允许的畸变；
- 电压频率和允差；
- 额定负荷和最大负荷；
- 负荷类型；
- UPS 最长供电时间。

对于后三项宜给予特殊考虑。对于过负荷及感应电动机、大储能电容器或其他型式的带有明显非线性负荷的突然投入,UPS 往往很敏感。对很多 UPS 来说,只能对限制条件之内的设备连续供电,并且一般来说不是绝对意义上的不间断。因此,宜依据系统要求,正确制定 UPS 的规范。

UPS 的可靠性也应仔细评估。许多商业性 UPS 系统只适用于提高配电系统供电质量,如果用于换流站,实际上还可能降低换流站辅助电源的安全性。换流站辅助电源如直接从高压系统供电,是非常安全的,但它不是不间断的。

## 15.5 应急电源

如需要柴油发电机,则在准备其规范时宜考虑以下各项:

- 需要供电的全部站用电负荷；
- 是否需要自动起动、切换和/或停运；
- 如果是自动投切,宜注意保证不能发生频繁起动,否则用于起动的蓄电池能量可能全部被放光；
- 在现场需要储备的燃料。

为保证紧急情况下运行可靠,需要周期性地起动发电机,并带上负荷,达到其正常的运行工况。辅助电源系统的设计宜能满足上述要求,通过正确的切换,宜避免让输电因辅助电源设备故障而受到影响。

## 16 可听噪声

### 16.1 概述

来自高压直流换流站的噪声可能引起纠纷,还可能按规定受到相应的处罚。换流站一旦建成,这些问题将很难解决。因此,在工程开始时,宜考虑各种适用的规章或实际的法规要求,制定限制噪声的规范。噪声的影响一般被当作高压直流换流站周边的公害并影响工作环境。虽然后者重要,但对公害的限值往往更难详细规定。

### 16.2 公害

#### 16.2.1 概述

高压直流换流站的噪声对换流站边界外的公众影响,不管怎样,都被视为有害。其影响程度与噪声水平、背景噪声水平、周围地区自然环境以及与居民区的远近有关。

首先,应在考虑各有关因素后,规定换流站边界可接受的噪声水平。ISO 1996-1 给出了确定可接受水平的方法。其次,宜确定来自各主要噪声源的预期噪声水平与频谱。然后将这些加在一起来确定总噪声是否能接受。设备位置到换流站产权边界线的距离特别重要。可能需要采用专门的减噪措施,以使总噪声水平达到可接受的数值。

如果在同一区域还安装有产生噪声的其他设备,也宜一并考虑,如交流变压器和无功补偿装置。下面讨论典型的高压直流换流站中最易产生明显噪声的设备。

### 16.2.2 阀和阀的冷却器

户内阀产生的噪声不予考虑,因为大多数情况下,阀厅造成的衰减已使噪声得到充分抑制。主要的噪声源可能来自户外冷却器的风机。它们一般是封闭循环蒸发型冷却器或强制风冷冷却器,是标准系列产品。所以,冷却设备制造厂宜提供噪声频谱和噪声水平的数据。蒸发型冷却器通常噪声较低。这两种冷却器的噪声水平能通过采用较大尺寸的低速风机降低。采用屏蔽墙将噪声转向上方的方法能使噪声明显降低。

### 16.2.3 换流变压器

由于谐波电流的作用,特别是在换流变压器阀侧绕组中的5次、7次、11次、13次谐波及直流偏磁电流的作用,在实际运行中其噪声频谱不同于交流系统变压器,并且,可能比工厂交流试验中测得的水平高出10 dB。如果需要,油箱和冷却器的噪声水平还能用传统的方法降低,例如加围墙。

### 16.2.4 平波电抗器

油浸平波电抗器的噪声来自其铁芯、构架和冷却器。预计铁芯和构架的噪声在6次和12次谐波相关的纹波频率上达到峰值。在工厂对平波电抗器的噪声进行有效的试验可能是不实际的。如果需要,采用与变压器相同的措施(例如外壳)能降低噪声水平。

对于干式平波电抗器,以及需要低噪声水平的地方,宜考虑采用特殊设计安装额外的降噪装置。

### 16.2.5 交流滤波电抗器

滤波器电抗器一般是空心的,采用现代制造方法可减少产生的噪声。可采取其他措施以减少噪声传播的量,例如考虑调整在换流站内的位置设立隔音屏障墙或者将设备设置在建筑物内。

## 16.3 工作区内的噪声

对于在高压直流换流站范围内工作人员可承受的噪声水平,宜从安全、听觉损伤和噪声可能影响工作效率等方面考虑。

许多国家已建立了法规和法令,以期保护暴露在高噪声水平下的人们的听力,这些都宜在编制规范时予以考虑。这类问题在高压直流换流站并不严重,除非在空冷阀冷却用的某种风机附近进行检修。在大多数情况下,如果维修人员根据要求带上护耳,就可能满足法规的要求。

建筑物内的总噪声水平主要决定于阀及其冷却系统的户内部分、各种旋转机械、部分或全部在户内的电抗器(和变压器)。在需要精神集中的场合,如在控制室内,宜规定较低的噪声水平。

## 17 交流侧谐波干扰

### 17.1 交流侧谐波的产生

所有形式的换流器系统都是谐波电压源和谐波电流源。对交流网络来说,高压直流换流站可视为谐波电流源。谐波电流流经交流系统阻抗后,使谐波电压畸变升高。此外,谐波电流还可能通过交流系统传播,导致局部谐振或电话干扰。

如果换流器由一个三相平衡的电压源供电,三相阻抗相等并假定换流器的触发角一致,则产生的交流特征谐波的次数为 $k p \pm 1$ ,取决于换流器的脉波(动)数 $p$ ,其中 $k$ 是整数。在理想情况产生的特征谐波的幅值和相位与基波分量的关系,只与触发角( $\alpha$ 或 $\beta$ )和换相角 $\mu$ 有关。

与高压直流换流器相连的交流系统,并非在电压和相位上都完全平衡,导致负序电压一般是正序电压的0.25%~1%范围内。其他不平衡来源,包括换流变压器换相电抗的差异(一般是 $\pm 2\%$ ~ $\pm 5\%$ )和

触发角的不平衡(对现代高压直流控制系统,稳态下一般为  $0.1^{\circ}\sim 0.25^{\circ}$ )。这些不平衡会产生非特征谐波,从而增大由换流器引起的谐波干扰。

### 17.2 滤波器

高压直流换流站一般都安装交流滤波器,用以吸收换流器产生的谐波,此外,还用于补偿无功功率(见第 10 章)。图 22 所示是接于双极高压直流系统交流馈线上交流谐波滤波器的例子。

为了在失去任一组滤波器时都不影响系统满负荷运行,可规定每一型式的滤波器有两组,各滤波器组可独立地投切。在确定可投切的单个滤波器组的大小时宜考虑:

- 无功功率和电压控制的要求;
- 降低负荷或低负荷的条件;
- 在各种投切方案下,可能引起的滤波器和交流电网阻抗之间的谐振;
- 可靠性准则;
- 经济上的约束。

在高压直流系统中,通常使用 RLC 串联谐振型滤波器或高通阻尼型滤波器。最常用的滤波器类型的示例见图 23。

为了优化谐波滤波器设计,宜知道在所关心的频率范围及各次谐波频率下的系统阻抗。高压直流换流站的交流系统阻抗可由从基波到 50 次谐波频率范围内的阻抗( $R/X$ )图确定。

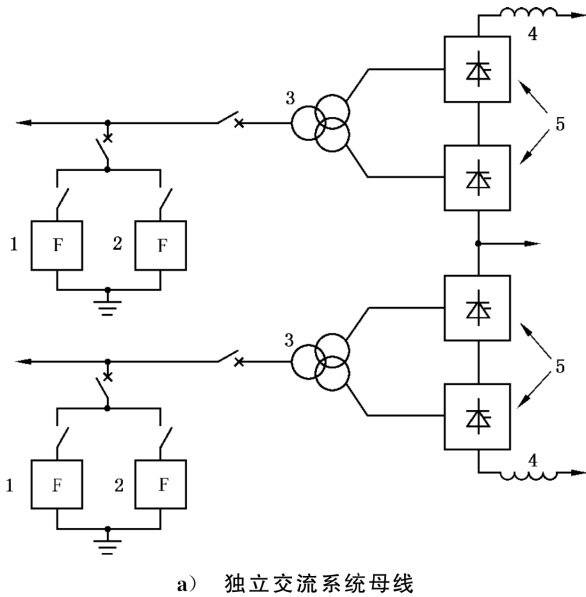
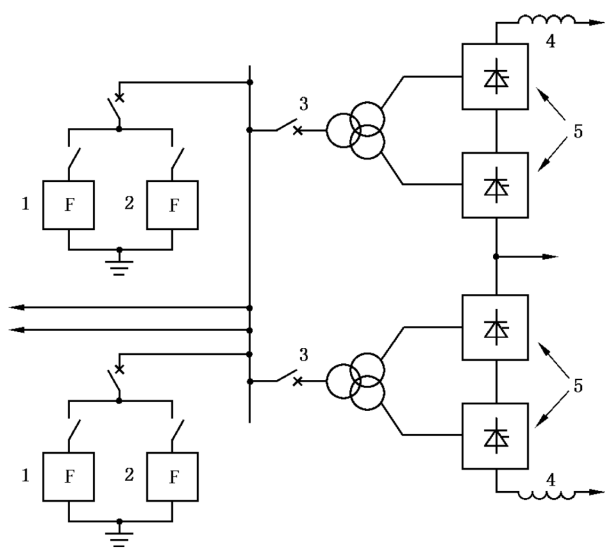


图 22 双极高压直流系统连接的交流侧滤波器示例



b) 公共交流系统母线

说明：  
1——11 和 13 次滤波器；  
2——高通滤波器；  
3——换流变压器；  
4——平波电抗器；  
5——换流器。

图 22 (续)

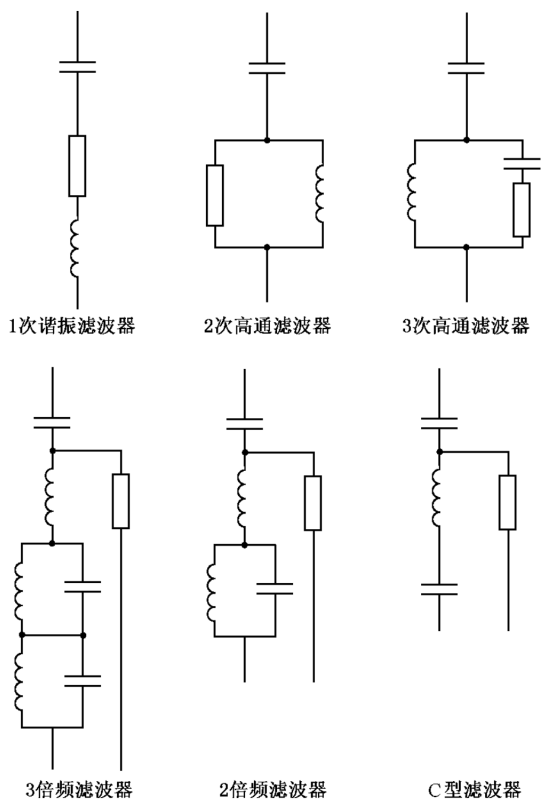


图 23 不同类型的滤波器电路图

另外,系统也可由线路及发电机等的谐波阻抗详细地表达,通常如第 9 章所述,由高压直流换流站扩展到 5 条~8 条母线。交流谐波滤波器设计,还宜考虑可能由其他谐波源流入滤波器的任何谐波电流。

如果严格规定了交流谐波性能要求,或采用了 CCC/CSCC 高压直流拓扑结构,有源交流滤波器是一个合适的措施。每个有源交流滤波器由一个传统的无源滤波器与有源电压源串联。有源部分通常设计成在多个频率下降低谐波电压,以便提高无源部分的谐波性能。另外,有源部分能降低流过连接到换流站交流线路的谐波电流。

交流滤波方面包括:交流侧谐波的产生、交流滤波器的设计、干扰标准和水平、滤波器的性能和技术规范,以及监控问题,在 IEC TR 62001(所有部分)中进行了更详细地描述和讨论。

### 17.3 谐波干扰判据

谐波干扰的性能是按照单次谐波畸变率  $D_n$ 、总有效谐波畸变率  $D_{\text{eff}}$ 、电话干扰系数 TIF、电话谐波波形系数 THFF 和加权  $IT$  积各项决定。对电话干扰采用了两种加权规则,两种规则考虑了电话设备的响应和人耳的灵敏度,即:国际电报电话咨询委员会(CCITT)推荐的噪声计加权,以及由贝尔电话系统(BTS)和爱迪生电气研究所(EED)开发的信息加权“C”。上述各项指标的定义如下:

根据 CCITT 或 BTS 推荐,单次谐波畸变率见式(9):

$$D_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$U_1$ ——基波额定电压方均根值;

$U_n$ —— $n$  次谐波电压方均根值。

总有效谐波畸变率见式(10):

$$D_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=2}^N D_n^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$N$ ——考虑到的最大谐波阶数。

电话谐波波形系数(CCITT 系统中的 THFF)和电话干扰系数(BTS 系统中的 TIF)二者都用以描述输电线路对电话线路的干扰影响并作为确定干扰性能的指标。确定 THFF 和 TIF 的方法除加权系数外均相同见式(11)和式(12):

$$\text{TIF} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} \left( \frac{U_n \times F_n}{U_1} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$F_n$ ——对  $n$  次谐波的加权系数,参照 IEC/TR 62001(所有部分)。

$$\text{THFF} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} \left( K_f \times P_f \times \frac{U_n}{U_1} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$K_f = f/800$ ;

$f$  ——谐波频率;

$P_f$  ——噪声加权系数 1/1 000;

对于实际应用,最高的谐波次数建议采用 50。

TIF 和 THFF 间的大致比值见式(13):

$$\frac{\text{TIF}}{\text{THFF}} = 4\ 000 \quad \dots\dots\dots (13)$$

也就是说,例如 TIF 等于 40,则 THFF 约为 1%。

电力输电线的谐波电流按照所采用系统的相应系数,把每次谐波电流加权而得到。

加权电流积(IT)按式(14)计算:

$$IT = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (F_n \times I_n)^2} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

$I_n$ —— $n$  次谐波电流方均根值;

$F_n$ —— $n$  次谐波的加权系数。

计算在单条线路上的加权电流积(IT),要求知道连到换流器交流母线上的各条线路的谐波阻抗,以便使其在确定高压直流装置的干扰性能时有意义。宜确定各条线路的 IT,但只有连在高压直流换流站母线上的所有线路的谐波阻抗都已确定的情况下才能计算。

如果  $D_n$ 、TIF 和 IT 值不得不反映各次注入谐波对感性耦合的实际影响,同时规定它们的性能限制可能是不现实的。如果要确定网状系统的 IT,同时满足上述两个要求更不现实。 $D_n$ 、TIF 和 IT 数值在各站母线和沿线路都是变化的;因此,线路参数、沿输电线的土壤电阻率、几何耦合系数等都确切知道时,才能设计出可接受的性能。

#### 17.4 谐波干扰水平

高压直流换流站所规定的谐波干扰系数的典型最高水平的例子如下(这些不是推荐的规范值,并且在没有对该系统做专门研究前不宜作为限制值):

- a) 单次畸变率  $D_n$ ,在任一次谐波下为 1%;
- b) 有效谐波畸变率  $D_{\text{eff}}$  等于 2%~5%;
- c) 电话干扰系数 TIF 等于 25~50,THFF 在 0.6%~1.25% 范围内;
- d) 加权电流积 IT,每条线路 25 000~50 000。

如果发电机接在高压直流换流站附近,则在高压直流换流站设计规范中宜考虑对流入任何发电机的 5 次负序及 7 次正序非特征谐波电流之和。

#### 17.5 滤波器性能

在规定交流滤波器的性能要求时,宜考虑的高压直流系统运行条件包括:

- 直流电流变化范围(从最小负荷值到所规定的过负荷值)。
- 在降压运行所要求的直流电流变化范围内降低直流电压运行。
- 按照所规定的吸收无功的要求,在大于正常角度下运行。
- 运行在任一滤波器或无功功率源退出的情况下,滤波器理解为一组能由开关设备操作而退出运行的滤波器元件。该情况仅适用于高压直流输电系统正常运行方式。
- 交流系统频率与电压的稳态变化范围。
- 损坏的电容器单元达到引起第一级报警的程度。
- 极端的环境温度加上滤波器最大负荷。
- 滤波器的初始失谐。
- 系统接线的任何改变。

在下述条件下,不宜要求滤波器满足滤波性能限制,但滤波器宜能运行而不发生损坏;

- 规定的事情况下的频率变化;
- 包括故障后恢复或甩负荷后的铁磁谐振在内的动态过电压;
- 短时过负荷。

当对高压直流换流站规定谐波干扰限值时,某些数据(如在第 9 章中所述)宜包括在规范中,以便能

适当优化交流滤波器的设计。

## 18 直流侧谐波干扰

### 18.1 直流侧干扰

#### 18.1.1 高压直流输电线路的谐波电流

在高压直流换流站中,换流设备的运行在换流站的直流侧产生谐波电压,从而产生流入高压直流输电线路的谐波电流。当输电线路是由架空线和电缆混合组成时,通常电缆对谐波电流起到滤波作用,因此只有少量的谐波电流流入电缆远方的线路。对于这种输电系统,仍需要对架空线路部分的沿线进行干扰评估。地下和海底直流电缆均屏蔽得很好,通常在直流侧不存在噪声问题。

#### 18.1.2 特征和非特征谐波

现代换流单元的设计,通常采用 12 脉波(动)换流单元,产生了  $12k$  次( $k$  为整数)的特征谐波。除了这些在理想条件下产生的特征谐波外,还有其他次的非特征谐波。由换流器运行产生的特征谐波电压与以下因素有关:直流电压、直流电流、换相电抗和触发角。非特征谐波电压的产生与以下因素有关:触发角之间的差别、换相电抗的不平衡以及与换流器相连的交流网络电压的不对称(负序电压分量)。

计算谐波电流时应考虑换流变压器的对地电容。尤其涉及非特征谐波电流计算时,宜使用三脉波(动)谐波电压模型。

#### 18.1.3 谐波组

宜考虑两组谐波:造成电话干扰的较高次谐波组(7 次~48 次)和可能引起其他干扰问题的低次谐波组(1 次~6 次)。可引起的其他干扰问题有:

- a) 由于感应电压产生的对设备和人身的安全问题;
- b) 对数据传输和铁路信号回路的影响;
- c) 在语音通信线路中除话音干扰以外的其他影响;
- d) 二次感应效应;
- e) 可能激发高压直流输电线路与接地极线路之间的谐振条件;
- f) 在换流变压器中不可接受的直流电流。

#### 18.1.4 谐波电流的计算

在高压直流输电极线和架空避雷地线中环流的谐波电流,当回路不对称时,能用长线计算和模型分析的常用式计算。如果直流输电线和明线电话线路之间的距离比较近(小于 200 m),计算极线和避雷线中电流的影响需要分开进行,并考虑它们各自的耦合系数。

当计算加在电话通信回路中的纵向噪声电压时,谐波电流要乘一个加权系数(噪声评价系数或信息加权系数“C”),以考虑人的听觉对不同频率的响应。

#### 18.1.5 感应电压的计算

纵向 C 信息加权系数或每公里明线电话线上所感应的噪声评价电压  $V_g(x)$  的计算,需要考虑从直流线路两端流进的电流、离直流线路一端的某一位置(相距  $x$  km 处)、加权系数、通信回路的屏蔽系数、直流线路和通信线路之间的互阻抗。横向电压由  $k_b V_g$  给出,其中  $k_b$  是所考虑的通信设备的平衡系数。

#### 18.1.6 人身安全

当考虑人身安全时,计算的电压值是所感应的对地各次谐波电压的平方和的平方根值(r.s.s.),且加



权系数相同。对于在非语音通信回路中的其他干扰问题,没有标准的计算方法,需各方共同参与和商定。

### 18.1.7 直流滤波器

采用直流滤波器减小流过高压直流输电线路中的谐波电流,从而避免产生不能接受的干扰。是否需要直流滤波器,与以下因素有关:

- a) 高压直流输电线路的特性,是架空线还是架空线和电缆;
- b) 大地电阻率;
- c) 高压直流输电线路附近电话线及铁路信号回路的类型,距离的远近以及密度等情况。

当需要确定是否需要滤波器方案时,宜考虑其他可行的能满足噪声标准且花钱少的措施。宜对改建通信回路和改进高压直流换流站进行评估,例如:

- 是否考虑由于其他原因的需要已经装设的平波电抗器对滤波水平的降低;
- 在接地极线路和地之间所接的电容器与接地极线路的电感是否有形成谐振回路的可能;
- 单极运行时允许两个极的滤波器并联的开关。

这些对换流站运行以及整个性能的影响,在决定直流侧谐波需要限制的程度之前,均宜给予考虑。

在选择直流线路路径时,宜评估是否能避免或减少与其他线路平行,因为这将是避免/限制干扰最有效的方法。在可能的情况下,也宜考虑在 90°交叉线路以及相/极线换位。

## 18.2 直流滤波器性能

### 18.2.1 对语音通信线路的要求

为得到解决干扰问题的最佳方案,有必要了解通信和铁路公司的要求。表 2 给出由国际电报电话咨询委员会 CCITT、美国电话和电报公司(AT&T)和美国农业电气化部(REA)所规定的对语音通信线路的要求。

### 18.2.2 干扰的水平

当确定滤波器性能时,宜规定高压直流系统各种运行方式的干扰水平。从干扰的观点来看,正、负极电压相等的双极运行方式,是对滤波要求较低的运行方式。在相同的直流滤波器方案下,单极运行,大地回路或金属回路方式,比双极运行产生的噪声电压更高,但是在这些方式下运行,一般所占的时间百分比小。单极金属回路运行比单极大回路运行产生的干扰要小。

除以上所讨论的高压直流基本运行方式以外,规范宜指出输电系统最终可能运行的其他方式或工况。滤波器的额定参数宜考虑所有这些工况。但是,在这几种运行方式或工况下,干扰水平宜处于正常双极平衡运行方式和最不利的单极运行方式之间。在规范中也可给出在紧急运行情况下的系统性能。

### 18.2.3 安全性

对人身安全,由谐波引起的危险感应电压还没有专门的限制。对于基波频率(50 Hz 或 60 Hz),CCITT 和 AT&T 分别规定为 60 V 交流方均根值(r.m.s)和 50 V 交流方均根值(r.m.s)。为了保证人身和设备安全,这些限值宜考虑在低次谐波(1 次~6 次)所感应的纵向谐波电压最大值的平方和的平方根值(r.s.s)。此外,电流非常大的较高次谐波也宜包含在平方和的平方根值(r.s.s)的计算中。

表 2 语音通信线路的性能参数(用户线路和主干线路)

|  | CCITT   | AT&T <sup>a</sup>                        | REA  |
|--|---|--|--|
| 1.平衡电缆线路<br>明线   | 50 dB~60 dB<br>46 dB~56 dB                      | 60 dB <sup>f</sup><br>50 dB <sup>f</sup> | 50 dB~60 dB <sup>c</sup><br>50 dB <sup>b</sup> |
| 2.横向(金属)<br>噪声限制<br>26 dBrnC   | 26 dBrnC<br>26 dBrnC<br>(20 dBrnC) <sup>d</sup> | 20 dBrnC <sup>d</sup>                    | 31 dBrnC <sup>e</sup>                          |
| <p><sup>a</sup> 北美(AT&amp;T)实行对主干线路,特征阻抗采用 600 Ω,对用户线路采用 900 Ω,对于主干线路和用户线路 CCITT 和 REA 均采用 600 Ω。</p> <p><sup>b</sup> 从 BTS 得到的信息,最小平衡宜是 60 dB。</p> <p><sup>c</sup> 美国农业电气化部对平衡规定有另外的数值,该数值对应于平衡度较好的线路。</p> <p><sup>d</sup> 该值是总噪声。从单一干扰源(例如,高压直流线路)来的最大值是 17 dBrnC。0 dBrnC 对应于在 1000 Hz 下 <math>10^{-12}</math> W(1 pW)。</p> <p><sup>e</sup> 此值是对主干线路的。</p> <p><sup>f</sup> 括号内的数值是设计用的,其他为可接受的最大值。实际上,对于双极系统,直流滤波器方案的性能要求主要基于双极运行方式。在单极运行期间,在语音通信上接受较高的干扰水平;例如,双极平衡运行期间允许水平的 2 倍或 3 倍。</p> |   |  |  |

### 18.3 规范要求

#### 18.3.1 滤波的经济水平

决定能满足干扰性能要求的经济滤波方案时,比较好的方法是进行感应配合研究,并考虑前述各点的影响以及通信线路改建的造价,对滤波器造价进行优化。从这一研究出发,理想的滤波器规范将能得出沿线最大干扰电流的分布图,按 18.3.4 中定义,所要求保持的干扰水平低于规定值。

通常在制定规范阶段,不太可能进行上述研究工作。因此,可采用下面三种方法之一:

- 在离双极运行的高压直流线路 1 km 远的平行试验线路中,规定一个最大纵向感应噪声电平,并且对单极运行方式规定一个较高的数值,其单位为 mV/km。使用此近似方法时宜注意,因为它只考虑了在电话线中引起的干扰,并且沿线的谐波电流采用的是最大值。因此,可通过一些附加要求进行修正,这些附加要求为:低次谐波感应的纵向电压的平方和的平方根值(r.s.s)和沿直流回线感应的不同电压值,土壤电阻率的变化、电话线的密度、类型和性质,以及沿线扰动电流的变化等。
- 在直流输电线路端,以各次谐波电流(以极为基础)不同时发生的最大值为基础,确定直流滤波器的造价,然后在完成感应配合研究之后,选择最合适的设计。这个方法有些前一种方法的缺点,并且由于在 18.3.3 中所讨论的其他考虑,一系列谐波电压的确定比较复杂。
- 第三种方法按下列步骤进行:
  - 在直流输电线路影响范围内(例如在离线路走廊中心线 10 km 之内),取得现有的或计划中的通信线路和铁路的有关特性(屏蔽系数和平衡系数、长度、路径等)信息。
  - 在直流输电线路影响范围内,取得典型的土壤样品进行试验,以便确定在感应配合研究中所考虑的大地电阻率的不同数值。

根据所取得的信息及所考虑的系统正常运行方式(双极),可能确定以下两个干扰电流分布图和两个最大允许低次谐波电流幅值的限制值:

- 第一个要求,不需要通信线路进行任何改建;
- 第二个要求,例如,位于所影响范围内的通信线路有可能 25% 需要改建。

最终,根据滤波器造价和通信线路改建的造价情况,在滤波器系统和通信线路改建之间进行反复地优化选择。

### 18.3.2 一般准则

此外,为了按照上述方案之一规定滤波水平,一般宜遵循以下准则:

- 谐波电流滤波水平宜在高压直流系统所规定的标称条件和双极平衡运行方式下确定。对于任何其他运行方式或规定的条件,其噪声水平不能高于最不利的单极运行时所产生的噪声水平,但无滤波器投运的非正常偶发性情况除外。
- 规范还宜对单极运行时可接受的沿线干扰电流分布图的最大值作出规定。
- 除上述要求外,低次谐波电流(1次~6次)的最大值也宜作出规定。
- 用户还宜对系统运行条件的限制作出规定。在这些运行条件下,滤波器性能都宜满足高压直流系统各种运行方式、各个发展阶段的要求,例如:
  - 1) 直流电压和直流电流的变化范围;
  - 2) 交流母线电压正常运行的范围;
  - 3) 交流电压工频负序分量;
  - 4) 在一定时间内或超过 1 min 的最大交流频率偏差;
  - 5) 预计的最大温度变化;
  - 6) 在切除滤波器之前,允许出故障的电容器元件或电容器组的最大数目;
  - 7) 初始失谐达到设计的极限值。

### 18.3.3 计算考虑的因素:

性能计算宜考虑以下:

- 为确定与所规定的性能要求是否相符而进行的谐波电流分布计算宜考虑:交流系统之间的相角关系;触发角最苛刻的组合;直流电流的大小;换流变压器的对地漏电容;6 脉波(动)桥中各相之间、12 脉波(动)换流器中的两个六脉波(动)换流变压器之间、一个极中的 12 脉波(动)换流器之间、或者是双极中各极之间的换相电抗的差值;这些将引起谐波电压源的最不利组合。这种谐波组合包括同时产生的谐波电压及其产生的沿线最高的干扰电流噪声分布或信息加权  $C$  的最大值,而对所规定的低次谐波电流水平也存在同样问题。  
对于 18.3.1 b) 中所指出的方法,所考虑的谐波电压源是不同时产生的最高谐波电压。
- 宜考虑在规范中所给出的直流线路、接地极线路及两者端部与频率有关的各种参数以及接地极的特性。
- 在确定流入直流线路的谐波电流时,宜考虑平波电抗器的电阻和电感随负荷和频率而变化的关系。

### 18.3.4 电流计算

为了满足所规定的性能规范要求,在直流线路沿线任一点,各种频率下电流的大小宜视为从直流线路送端和受端注入该点的电流方均根值(r.m.s)的合成。对于所考虑的频率,由式(15)计算:

$$I_{eq} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (H_n \times C_n \times I_n)^2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

$I_n$  ——  $n$  次谐波的有效干扰电流(一般对应于残留模电流);

$N$  ——所考虑的最大谐波次数；

$C_n$  —— $C$  信息加权系数；

$H_n$  ——参考频率(1 000 Hz)的标准化加权系数。在  $n$  次谐波时考虑基于频率的相互耦合、屏蔽和通信回路平衡。

如果平衡模式下谐波电流会对感应噪声产生明显的影响,则应计入等效干扰电流  $I_{eq}$  的计算中。有效干扰电流由式(16)计算:

$$I_n = \sqrt{(I_{rn})^2 + (K_b \times I_{bn})^2} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

$I_{rn}$  —— $n$  次谐波时总残留模式电流;

$I_{bn}$  —— $n$  次谐波下平衡模式电流;

$K_b$  ——参考频率下平衡模式耦合和残余模式耦合的系数。

正常运行时,等效干扰电流的典型值范围是从 100 mA~6 000 mA。

## 19 电力线载波(PLC)干扰

### 19.1 概述

对电力线载波来自高压直流换流站的干扰,产生于换流阀的开通和关断过程,其主要成分产生于换流阀开通过程中的电压突降期间。这些暂态过程是由高压直流换流站的杂散电容和电感元件(如变压器、电抗器、套管等)形成的局部谐振回路所引起。干扰的能量与换流阀开通和关断时的电压跃变值以及回路参数有关。换流器的干扰与电流额定值的关系不大,但与触发角的关系很大。

可影响载波的干扰包括:传导过来的换流器产生的干扰和交流线路或直流线路的电晕干扰。传导的干扰与频率密切相关,最大干扰水平产生在载波频谱的低端。

现场经验指出,晶闸管换流阀产生的导通干扰比汞弧阀低大约 10 dB~15 dB。

测量结果说明,对于同样的导线表面最大电场强度,高压直流输电线路的电晕比交流线路低 10 dB~20 dB。典型的电晕干扰水平变化范围是-40 dBm~-30 dBm,并且对直流线路的全线来说,在载波频谱中(20 kHz~500 kHz)基本上是不变的。

RF 滤波器能规定用于降低高压直流换流站交流侧和直流侧所产生的载波干扰。

滤波器的串联电感元件和并联电容元件的额定值,宜分别按全电流和额定电压考虑。因此,对于在现有载波通道要求的基础上设计滤波器干扰水平、与其他载波系统的相互干扰、最终的通道要求以及载波频谱较低端通道移动的可能性等,都宜从经济上给予考虑。

### 19.2 性能规范

对高压直流系统性能进行规范时,重点考虑以下载波干扰。

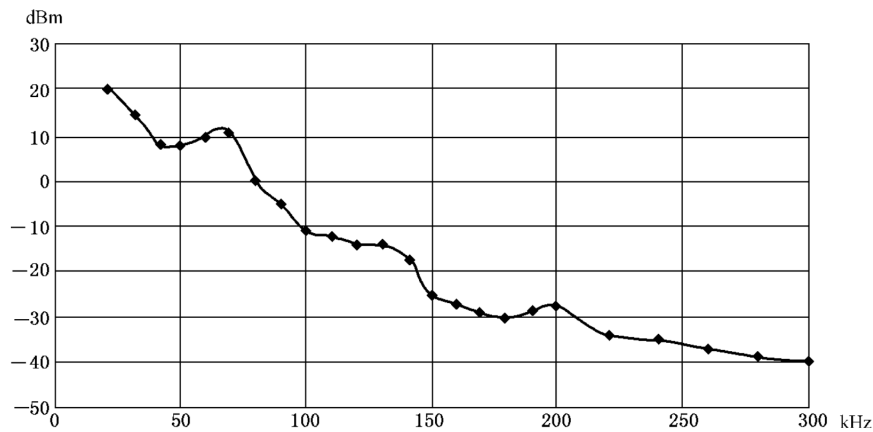
如果用户希望完全自由地使用所配置的全部通信频谱,那么高压直流干扰的规范所包括的频率宜低到 20 kHz。

注:许多电力系统所用的载波频谱越来越密集。

图 24 所示是固态换流器在高压直流线路上产生的典型载波干扰频率曲线。

为了设计载波滤波器,规范宜考虑把高压直流换流站对电力线载波频谱的干扰水平限制到小于或等于-20 dBm,以防止对高压直流换流站连接的高压输电线路电力线载波的有害干扰。测量以标称的 3 kHz 带宽进行,均匀加权。

此处 dBm 定义为一种度量干扰的方法,其中 0 dB 定义为 1 mW,相当于线对线波阻抗 600  $\Omega$  时的极对极干扰电压 0.775 V。在 50  $\Omega$  电缆低压侧,0 dBm 和 1.0 mW 相当于 0.224 V。



注：换流器干扰水平校正和归一化到 3 kHz 带宽，0 dBm=1.0 mW，相当于在极对极阻抗 600 Ω 时 0.775 V。

图 24 RY COM 干扰测量结果平均值——直流侧典型换流器干扰水平

如果现有的或计划中的载波频率范围是 20 kHz~100 kHz，可能需要滤波器。对降低干扰用的滤波器的经济性当然也宜进行评估。宜考虑宽带 PLC 滤波器的成本显著高于窄带 PLC 滤波器的成本。特别是，20 kHz~50 kHz 较低频率的滤波器的成本显著高于较高频率的 PLC 滤波器。

测量载波干扰所用的仪器设备，宜对其带宽(BW)和型号作出恰当规定。

用已知的换流器所产生的干扰水平，能对给定载波系统所预期的性能做一个合理的推算。

对于任何给定的载波系统性能的重要测量，主要是受该载波系统接收点上的信噪比(SNR)限制。

## 20 无线电频率干扰

### 20.1 概述

历史上，来自高压电气设备的无线电频率干扰(RFI)与高压交流线路电晕对调幅(AM)广播分布干扰相关。因此，这方面很好地反映在相关的文献和标准中，如 CISPR 18 系列。实际变电站的 RFI 很少受到关注，所以几乎没有文献记录关于高压和中压变电站 RFI 的相关信息。然而，国际大电网会议 CIGRÉ 技术手册 391 号提供了变电站 RFI 的相关方面的深入分析，包括高压直流换流站。该分析是基于理论和测试结果。

在技术手册(TB)中，一个重要的方面是处理 RFI 随距离的衰减，包括如何基于频率衰减。

RFI 涉及较宽的频率范围。根据 CISPR 11，9 kHz 和 400 GHz 之间的频率可用于无线通信，因此被国际电信联盟(ITU)当前的国际频率分配表覆盖。因此，在这个频率范围内的电磁干扰定义为无线电频率干扰(RFI)。然而，低于 150 kHz 的频率现在很少使用，1 GHz 以上频率的标准正在制定中。

### 20.2 高压直流系统的无线电频率干扰

#### 20.2.1 无线电频率干扰的源

高压直流换流站无线电干扰的能量来自换流阀导通和关断过程以及从高压开关设备和线路上的电晕和从开关场中的火花和间隙放电产生。

换流阀运行带来的噪声，主要是由导通时的快速电压降落而产生。这些暂态过程由高压直流换流站内诸如母线结构、套管、电抗器以及换流变压器中的电感元件和杂散电容等而形成的局部谐振回路所引起。

换流站交流高压开关场的交流电晕产生的无线电干扰会随着天气条件显著变化，在恶劣的天气中

最高。电晕放电所产生的无线电干扰在正极性导线附近最高,并随导线的径向距离增加而衰减。直流电晕不随天气条件的变化而变化很多,在晴天稍高。

最近的测量表明,可能有来自变电站交流部分的明显高频 RFI,特别是老旧变电站在干燥的天气条件下更为明显。这种高频 RFI 噪声考虑是由间隙放电和/或火花作用产生的。更多信息参考 CIGRÉ 技术手册 391 号。

### 20.2.2 无线电干扰传播

高压直流换流站产生的 RFI 传播具有以下特点:

- a) 导波沿着高压直流输电线路传播;
- b) 导波沿着交流输电线路传播;
- c) 从高压直流换流站直接辐射。

该 RFI 随频率与距离变化的衰减如下。

对于沿线路传播的 RFI,高频 RFI 会在干扰几千米后消失,尤其是起重要作用的线对地部分。然而,低频 RFI 将传播很长距离,特别是线对线部分。

变电站几百米内,直接辐射波 RFI 能有一个很宽的频率范围。然而,当应用于正常设计,RFI 要减少到 0.5 km~1 km 后的背景 RFI 水平。

详细信息可参考 CIGRÉ 技术手册 391 号。

### 20.2.3 RFI 特征

从高压直流输电换流站来的 RFI,无论是由换相过程、电晕,火花或间隙放电产生的干扰的一般特征都是重复的瞬变。由于来自不同的源,从换流站来的宽带 RFI 的频率特征可能是相当复杂的和非常不规则的。某种程度上,这对任何高压变电站是一样的。

由高压直流换流器换流过程产生的 RFI 具有以下特点。

- a) 干扰能量是与阀顺序导通时所产生的电压幅度成正比,并且与电路参数有关;由于导通时的上升时间短于关断时的上升时间,在关断时电压跳变的影响较小。
- b) 由于换流器换相过程的 RFI 取决于电路的共振频率,其频谱是相当不规则的。
- c) 由于为导通电压跳变定义了上升时间,由于换相过程产生的 RFI 频率在 1 MHz 以上,因此可忽略不计超过 10 MHz 的频率。
- d) 如果阀厅设计为对无线电频率有良好屏蔽作用,从阀厅出来的噪声主要通过穿墙套管和变压器套管传导。
- e) 干扰水平基本上与运行的电流无关。
- f) 换流器数量对噪声水平有轻微的影响。

变电站中产生 RFI 的主导模式是线对地模式。

## 20.3 无线电频率干扰性能规范

### 20.3.1 RFI 风险评估

规范的制定过程宜开始于 RFI 风险评估,与任何当地条件要求的具体预防相关的 RFI 措施有关。宜注意的是,干扰的风险是附近的无线电接收器,而不是附近的无线电发射机。附近的机场可能意味着飞机接近机场着陆时的一个额外的 RFI 风险。

特别关注非定向信标相关的干扰,因为非定向信标的工作频率与换流器 RFI 辐射频率范围重合。

在风险评估中也宜考虑具有双重通信的本地通信中心,如消防队等。

重要的因素是:使用的频率、带宽、信号电平、噪声对信号的要求和与无线电接收机天线位置的

距离。

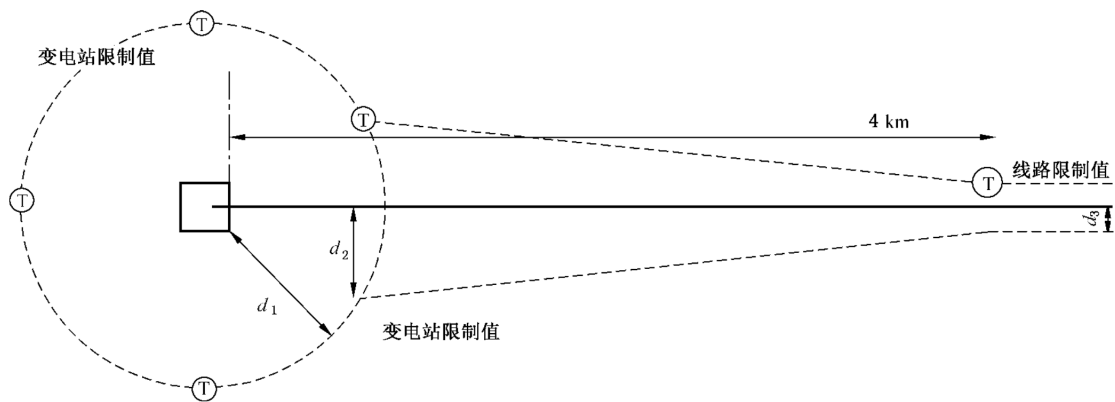
20.3.2 规范的 RFI 限值和验证

规定的 RFI 要求宜包括相关传送的所有来源。规范应规定满足标准的所有稳定状态运行方式、条件以及天气条件。

基本上,在设计的触发角范围内以及所有建议的天气条件下,应规定单一的基本准则以适用于所有稳定状态的运行方式,包括满负荷额定值在内的任何负载。性能指标宜包括正常的交流和直流运行电压范围。在晴朗的天气条件下,宜通过测量验证 RFI 性能。

规范的要求宜作为一个最大电场[用 dB( $\mu$ V/m)表示]与频率的关系图,整个频带 150 kHz~1 GHz。应有一个图用于变电站限值,一个图用于线路的限制值。在正常情况下的适用的限制值和理由,在 CIGRÉ 技术手册 391 号给出,用于校正。由于频带 9 kHz~150 kHz 很少使用,如果在换流站或线路附近有通信应用,宜提供要求说明。在这个低频带不必要的应用要求将引起需要大滤波器的额外代价。

测量验证的推荐步骤如图 25 所示。具体的建议详见 CIGRÉ 技术手册 391 号。



说明:

- $d_1$ ——变电站的测量距离,高压直流换流站通常为 200 m;
- $d_2$ ——为  $d_1$  的 1/3;
- $d_3$ ——线路的测量距离是,交流 600 kV 以下 30 m,以上 50 m;
- T ——测量最相关的位置。

图 25 用测量点的定义推荐的测量步骤

按照 CIGRÉ 技术手册 391:2009 表 D.2 中对于变电站的限制值适合于围绕变电站有效部分的轮廓和沿着线路最接近部分的轮廓。在超过 4 km 的距离后,则按照 CIGRÉ 技术手册 391:2009 表 D.3 中供给的对线路的限制值。

由于频率特性可能是不规则的,执行的测量应作为频率扫描覆盖整个 RFI 频率范围。仅在 0.5 MHz 测量 RFI 水平是不够的,而交流线路电晕经常在 0.5 MHz 测量 RFI 水平。

20.3.3 设计方面

阀厅建筑设计中宜考虑必要的屏蔽满足 RFI 要求,而没有任何外部开关场辐射。宜特别注意,减少通过阀和变压器套管传导高频瞬变环节的触角面积。

规范中宜要求对提出的限制 RFI 在规定限制值内方法的说明。这也宜在设计阶段通过计算在整个频率范围内对预期的 RFI 水平估计的说明。这个估计应涵盖如图 25 中定义的源于变电站和线路的 RFI。户外交流场/变电站应采用最有效地减少电晕的方式实现按无电晕的技术可能来设计和建设。

进一步而言,高压设备在工厂进行无线频率干扰试验时,遵从可靠的方法和标准。

## 21 功率损耗

### 21.1 概述

正常的做法是确定高压直流换流站在额定功率(第6章)和空载(8.4)运行条件下的损耗数值,以便对损耗进行经济评估。此外,在最小负荷(8.2)或其他中间负荷水平的损耗,也可使用适当的加权因子进行评估。

高压直流系统的损耗能由其主要组成部分损耗的总和确定。损耗的数值通常是基于计算、工厂试验和现场试验的综合考虑而确定,这是因为由于测量精度不够,单独用现场试验确定总损耗是不现实的。

对有关的环境条件和计算方法宜作出规定,需确定所有损耗测量的误差。

如果高压直流系统是分期建设的,则对每一期的损耗值均需作出规定。对于在规定的单极、双极运行条件下的总效率值宜进行检验。

高压直流换流站损耗的确定详细描述见 IEC 61803。

### 21.2 主要损耗来源

#### 21.2.1 概述

对大部分高压直流设备来说,谐波电流对设备总损耗有一定影响,对这些谐波损耗的计算基础需要作出规定,并宜给出确定损耗的温度。

#### 21.2.2 交流滤波器和无功补偿装置

交流滤波器和无功补偿装置的损耗由计算得到。其中的谐波损耗与负荷有很大关系。损耗的数值宜包括换流器所产生的所有谐波的影响。在这些计算中,除非另有规定,从交流系统流进的谐波不宜考虑在内。计算空载损耗时,假定所有滤波器和无功补偿装置都不接入。对于额定负荷的损耗,假定用来保证规定功率因数的全部滤波器和无功补偿设备均接入,并且全部谐波只流进滤波器。对于中等的负荷水平的损耗,宜说明运行条件。对静止无功补偿装置和调相机,其运行条件也需作出规定。

#### 21.2.3 换流器

换流器的损耗能在工厂中对桥的每个单独部件进行损耗测量的基础上计算。损耗的数值包括换流器的所有部件,例如:换流阀、阻尼回路、电抗器等。假定触发角和换相角均为在规定的负荷条件下所要求的数值。在空载时,假定换流阀均接入,但处于闭锁状态。对于规定的负荷条件所需要的阀的冷却设备的损耗宜全部包括在内。

#### 21.2.4 换流变压器

换流变压器的基波损耗能用在工厂所测量的空载损耗和短路损耗得到,谐波损耗则通过适当计算得出。在规定的负荷条件下,冷却设备产生的所有损耗宜包括在内。

#### 21.2.5 平波电抗器

平波电抗器的直流电流损耗能在工厂中进行测量,并折算到规定的环境温度。它的谐波损耗需要进行计算。在规定的负荷条件下,需要投入运行的所有冷却设备产生的损耗宜包括在内。



### 21.2.6 直流滤波器

直流滤波器的损耗通过计算求出,计算时要考虑在规定负荷条件下实际流入滤波器的谐波电流,以及在此条件下所对应的触发角和换相角。假定换流器产生的全部谐波电流均流入直流滤波器。

### 21.2.7 辅助设备

这些设备包括高压直流换流站的冷却设备(换流变压器、平波电抗器和换流桥的冷却设备除外)、控制、采暖、照明以及站用电变压器。辅助设备的损耗能由测量的和计算的所有这些部分的损耗的总和决定。只有对指定的运行点,为满足规范的所有要求而需要投入的设备,在计算损耗时才需要考虑。

### 21.2.8 其他设备

其他设备的损耗,如电压互感器、电流互感器、无线电干扰滤波器等的损耗,宜在规定条件下(负荷水平、环境温度等)予以确定。

## 22 高压直流系统扩建的准备

### 22.1 概述

如果高压直流系统计划或规划将来的扩建按不同的规范进行,那么在扩建后可能遇到的各种情况宜提前进行考虑,否则将可能在经济上和技术上出现不利情况。因此,需要对适用于第4章~第20章的每一扩建阶段的条件尽可能作出规定。在扩建的每个阶段,对设备装设范围和性能规范、现场工作的复杂性、尽量减少现场工作和现场试验对已有系统运行的影响、节省先前投资,以及每个阶段的系统性能要求等方面,均宜仔细地考虑。宜尽可能对下面的内容作出详细的规定,以便包括在扩建范围的陈述中。

### 22.2 扩建的规范

扩建的规格包括以下:

- a) 在每个扩建阶段的额定功率、额定电压和额定电流。
- b) 换流器扩建的形式(图26):

- 1) 串联;
- 2) 并联;
- 3) 单极到双极;
- 4) 多端、串联或并联;

对将来计划采用的任何特殊的运行方式,例如在第4章中所讨论的,当一极直流线路停运时,是否考虑把换流站的两个极由串联方式切换为并联方式运行。

- c) 每个扩建阶段后的交流系统参数:
  - 1) 增加的交流线路;
  - 2) 稳态交流电压的额定值 and 变化范围;
  - 3) 增加的发电机组;
  - 4) 增加的短路容量。
- d) 每个扩建阶段后的无功功率平衡:
  - 1) 在高压直流换流站所装的无功功率设备;
  - 2) 交流系统提供的无功功率。
- e) 扩建后高压直流输电线路的回路结构和线路特性。

- f) 扩建后控制和保护方式的变化(计划中如果有的话);  
控制保护方面的扩建工作,可能使现有设备的运行在一段长时期内受到限制。因此,宜对每一阶段安装的控制保护设备的范围进行研究。
- g) 扩建的每个阶段,对允许的可听噪声水平,载波干扰水平和谐波干扰水平也宜作出规定,包括整个扩建完成之后,它们的最终水平。
- h) 交流滤波器和直流滤波器扩建的次序。

当扩建引起直流电压改变时,直流滤波器的设计可能有不同的考虑,这取决于是否从一开始就用最终直流线路电压来设计滤波器,或电容器组按串联扩建方式设计。因此,对于这一点需要明确说明。

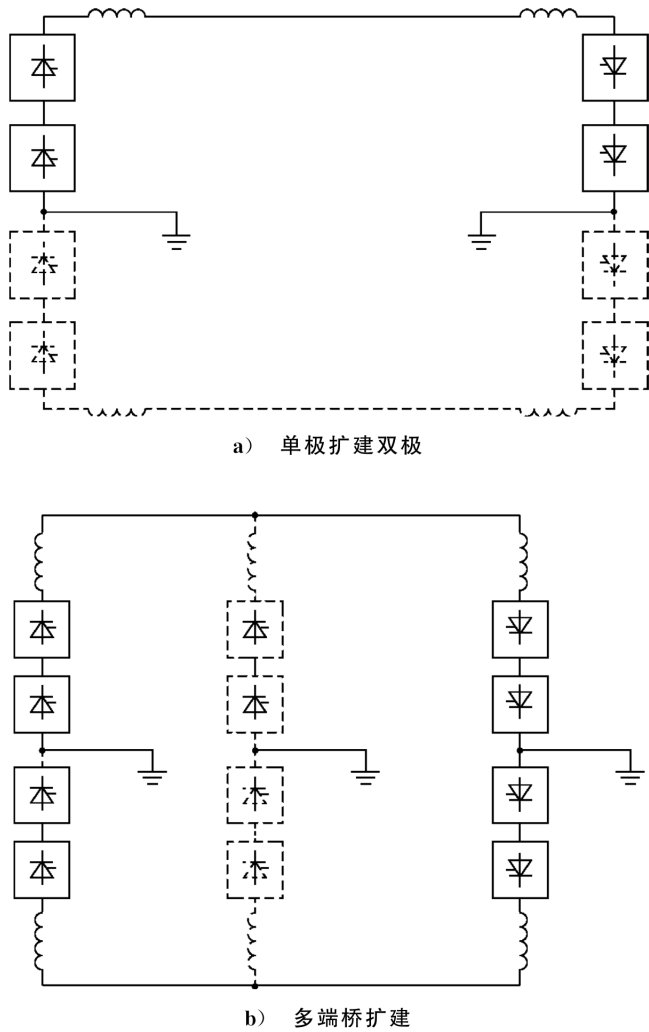


图 26 高压直流系统扩建方式

## 附录 A

## (资料性附录)

## 影响换流站可靠性和可用性的因素

## A.1 设计和文件

## A.1.1 概述

本附录阐述了高压直流换流站自身的影响可靠性和可用性的各种因素,而不是可靠性和可用性的评价。需指出,所有的可能因素不适用于每一个高压直流换流站和/或高压直流用户。

业主/用户宜指定具体的可靠性和可用性要求,如何适用于高压直流工程。在供应商/制造商与业主/用户之间没有共同的具体协议;本附件仅用于资料和指导。

下面的各条是一个建议的已被以前高压直流换流站工程规定的,受可靠性和可维护性影响的设计原则汇编。用户可考虑这些按照运行任务、周围的电力系统,以及工程的经济性,对未来的换流站的设计/规范是否合适。

## A.1.2 通用设计原则

通用设计原则包括如下:

- a) 对于双极型换流器,设计人员宜特别注意避免双极性强迫停运,并保持这样的持续时间到最低限度。这方面需要强调的子系统 and 系统试验、保护的配合、适当设置保护、备件,以及两个极子系统分别设置和冗余。
- b) 除了用户希望的更严格的设计要求,在额定运行条件下,单一设备故障不应导致超过一个极强迫停运,并且一个高压直流换流器极中的连续设备故障不宜导致超出该极的强迫停运。需注意,在某些运行结构(如用站接地双极性平衡运行),这可能是不可避免的。
- c) 服从用户的运行策略,任何定期维护任务的前提是,一次断电不超过一个极。此外,高压直流换流站的设计宜要求,对于设备的任何个别部分的日常维护,不超过一个年度计划的停运。
- d) 换流器宜尽可能设计成,防止由于设备故障、功能障碍或操作失误造成的错误功率反转。
- e) 所有的控制和保护系统宜设计成,使这些系统中任何单一的故障,不会导致减少额定的高压直流输电能力。
- f) 控制和保护设备已设计为每年每极引起的不连续暂态扰动不超过规定的数量(由用户定义的最小持续时间);但不包括高压直流控制和保护依据设计要求对相邻交流系统引起的问题的响应时发生的瞬态干扰。
- g) 在高压直流换流电站整个设计中,特别是阀厅,宜注意识别和防止可能的着火原因,例如使用阻燃材料。在发生火灾的可能性不能完全消除的情况下,宜规定下列条件。
  - 火灾监测与报警;
  - 如果适用的话,进行人工验证,以避免误跳闸和不必要的启动控制措施。
- h) 用户可指定要求辅助设备(包括其相关的控制和保护)的设计和安置是这样的,单一的设备故障不降低额定高压直流输电能力。冗余的冷却泵、冷却风机和热交换器是满足这一要求的一种方法。

## A.1.3 更详细的设计原则

在设计控制、保护以及类似结构的设备时,以下特征将提高性能:

- a) 能执行所需功能最简单的设计；
- b) 在各自额定值范围内使用并已在使用中证明的部件，或在调试前已进行过适当加速寿命应力试验的部件；
- c) 部件预老化（在阀组中和控制和保护设备中的所有电子部件，在其装配更大的成套设备前，宜进行老化）；
- d) 使用通用组件的电路（以减少专用备件的数量）；
- e) 使敏感部件和电路免受外部电缆和屏柜布线中感应电压和电流的损坏和干扰的设计实践（如浪涌保护、滤波、和接口缓冲器）；
- f) 故障安全和自我诊断设计；
- g) 冗余的设备和控制电缆，适当时配置自动转换装置；
- h) 物理隔离的冗余电缆和电路，以尽量减少火灾、洪水和其他危害的影响；
- i) 设计成在部件故障的情况下，转移到不太复杂的运行方式；
- j) 可在换流站进行维护、维修和操作的设备，无需特殊的操作和维护环境、测试设备、专用工具或复杂的操作流程；
- k) 模块化结构，允许快速更换元件或组件故障的模块；
- l) 识别和分离每个换流器和相关设备的控制开关，以最大限度地减少操作者错误；
- m) 不依赖于操作者能立即采取行动以避免设备损坏的设计。

#### A.1.4 软件设计原则

通常情况下，高压直流换流站所有的控制和保护功能是由软件执行的。该软件的质量直接影响到高压直流输电系统的整体可靠性：

- a) 与硬件一样，软件设计和应用宜采用通用的质量保证方法、原则和组织，如 ISO 9000 族，特别是 ISO/IEC/IEEE 90003:2018 中定义的组织方法、审核和认证在这里适用。
- b) A.1.2 提到的大部分通用设计的原则和 A.1.3 所列的大部分具体原则，也适用于软件。例如，最小复杂度原则宜研究减少错误的可能性，并减少保养和维修。推荐使用经过验证的标准功能块（用于控制、逻辑和通信）。这些被验证的标准功能块配置（即参数化和组合）后以需要提供的高压直流控制和保护功能。为了不以危害性能为代价实现鲁棒性，这种“功能块”的方式只能由训练有素、经验丰富的人员，使用足够的硬件和软件成熟的设计。
- c) 软件提供了超过硬件的重要的与可靠性相关的优点。这些优点宜在所有的高压直流换流器应用中使用。例如，要慎重地应用自我监视、自我诊断和故障安全软件。图表、试验报告和手册宜使用自动文档功能。所有主要的控制和保护功能，宜包括在为整体的控制和保护系统设计使用的仿真工具中。然后，相同的软件组合作为实际的控制和保护设备的一部分进行实施和测试。
- d) 对软件相关的特定的问题和风险的认识也是必要的。潜在的计算机故障，辅助断电，未经授权的访问风险，病毒的脆弱性，以及不可避免的存在（隐藏的）软件故障都宜考虑在内。需要采取的补救措施包括使用经过验证的可靠计算机、处理器和接口硬件、不间断电源、有限的访问、安全存储的备份软件等。

#### A.1.5 可靠性、可用率和维护(RAM)记录

在调试之前，用户宜建立一个程序记录所有与 RAM 相关的事件。每一个事件，无论是预期还是非预期的，对 RAM 性能有影响及其相关原因的所有数据进行记录。

## A.2 运行

### A.2.1 培训

#### A.2.1.1 培训在高压直流换流站 RAM 中的作用

受过训练的人员对高压直流换流站总的可靠性/可用性有重要作用。在最早的阶段(招标和合同编制准备),对站内人员的需求宜做好编制。

#### A.2.1.2 培训课程

一般情况下,如果可能的话,在开始控制和保护系统工厂验收试验之前,宜开始对运行和维护人员给予培训。

培训计划可从教室培训开始,然后完成于设备预调试开始的时候。培训课程可分为如下四个部分:

- a) 关于系统和设备采用适当文本的综合讲座:它们的用途、功能、使用方法、控制和保护原则。
- b) 即使由同一人员参加,关于操作和维护的具体讲座要单独进行。所有设备,无论是特殊的还是常规的,都宜包括在这两个课程中。
- c) 在这些讲座之后,宜吸收从参加安装、测试、预调试和调试获得的经验。如果可能的话,对换流阀和控制的测试宜由一些学员见证。

在这里,视频记录是非常可取的,特别是对于比较少见的事件,如更换换流变压器、平波电抗器或晶闸管。

- d) 实践练习,以确保学员能安全和有效的方式运行换流站。

### A.2.2 影响可靠性的维修方案

#### A.2.2.1 基本部分

维修计划的目标是达到计划停运的总费用与强迫停运的频率之间最佳的平衡。维修可如下:

- a) 预防:维持或提高设备运行能力;
- b) 防测:避免被认为迫在眉睫的强迫停运危险;
- c) 纠正:清除强迫停运。

维护任务间隔不到一年,可是在线任务,特别是当系统设计包括冗余时。这些任务可是计划的和作为一年中在线维护执行的。

大多数但不是所有的维护任务具有时间间隔等于或超过一年的(子系统或部件)离线任务。根据是否存在冗余子系统或部件,并且是否在线时可访问,它的维护是由部分(系统)在线维护或由申报的(系统)离线任务进行。这些离线的任务是在年度基础上分组的,并在年度计划停运期间执行。

#### A.2.2.2 优化可维护性的设计系统和具体的设备

一个预测的可靠性和可维护性计算宜在其他目标之内,包括相关维修的设计目标。由于设计和维修计划的进展,可靠性和可维护性的计算可能不得不重复。

#### A.2.2.3 计划的维修程序

维修计划可基于可靠性为中心的维修(RCM)方法。

RCM 关注任务的优先次序,按照它们认为的必要性,而不是只根据工作执行,例如,生产厂家的维修手册。作为一个典型的结果,相同的组件在不同的位置可能有不同的维修计划,考虑的原则如下:

——在此系统内的功能作为一个整体;

- 故障的概率,也考虑了应力情况;
- 早期故障预警的可用性;
- 故障对系统性能的影响[故障模式与影响分析(FMEA)经常被用来分析这种影响];
- 冗余;
- 可测量的设备老化和磨损;
- 确定哪些维修任务是必不可少的;
- 确定哪些进一步的维修活动,将减少突发故障,延缓其发生,促进它们的检测等,提高可靠性;
- 可用的 RCM 教程,报告和其他类型的文献。

RCM 分析后,高压直流用户宜考虑以便完善整体维修计划的进一步因素。这些因素如下:

- 供应商保修要求;
- 适用的标准要求;
- 其他合同要求;
- 责任和保险要求;
- 经济性。

高压直流双极系统的特征是每个极能传输 50%(或更多)的能量,双极的能量 100%,在两极,一极可经历计划停运,同时另一极运行(提供的设备布局和电网允许运行方式)。在这种情况下,用户可将年度计划停运分为三个部分:每个极的单极停运、计划的双极停运(对于两极公共的任何设备,不考虑 A.1.2 的设计目标)。

最后,在年度基础上规划离线维护,并不意味着所有年度计划的停运的计划是相同的,即使设备清单保持不变,由于以下两个主要原因:

- a) 按规定的间隔时间等于或超过两年的任务不每年执行;
- b) 虽然假设了常规元件的故障率,但故障率往往是随时间变化的“浴盆曲线”,也是一个元件承受机械和/或电应力的函数。

### A.2.3 备件

#### A.2.3.1 备件的类型

##### A.2.3.1.1 消耗品

耗材连续不断的使用,所以保持在手边的数量很小,或者在计划的检修期之前订购。它们容易被替换,来源丰富,它们通常不包括在原始的合同清单中。

##### A.2.3.1.2 长期的备件

换流站的整个寿命需要的长期备件。它们可分为如下的两组:

- a) 仅在长时间间隔(例如,五年一次)需要的部件。用户宜经常检查这些部件的可用性,如果它们变得难以获得,可能不得不被列入在换流站的库存中。
  - b) 从强迫停运中恢复需要应急部件。在故障发生时,无法保证更换部件的故障率或可用性。
- 在达到工程的寿命前,用户需要从相对较少的来源中,识别长期的可获得的部件。

##### A.2.3.2 估价

在已知更换率时,消耗的和维修的部件不是大的问题。库存备件中的实际问题是应急部件。要有每种可能需要的应急部件,在库存中就需要有一个几乎完整换流站的备用。在一般情况下,在换流站的库存中保持的备件数量与站的停运时间成本成正比,并根据类似设备或仪器的现场经验。因此,用户宜决定哪些部件需要保存在手上和哪些可由制造商提供,考虑如下:

- a) 预计故障率高的部件；
- b) 长时间更换的部件；
- c) 换流站运行关键的部件；
- d) 不容易从制造商获得或不再生产的部件；
- e) 采购和仓储成本。

冗余在效果上是一个“在运”的备件，也影响备件策略。

### A.2.3.3 典型的备件列表

此列表的目的是给用户一些现有的其他高压直流工程的通用的例子。这个表的每项单独合同应在供应商和采购商之间具体约定。

可包括以下部件：

- a) 换流变压器，特别是当使用单相变压器：
  - 换流变压器部件；
  - 套管；
  - 带电机的泵；
  - 带电机的风机。
- b) 电抗器：
  - 平波电抗器(如果平波电抗器是充油的，那么就可能需要类似于变压器的部件)；
  - 并联(功率因数/无功补偿)电抗器(如果并联电抗器是充油的，那么可能需要类似于变压器的部件)；
  - 空心平波电抗器和滤波器电抗器(当一个电抗器由多个线圈组成，一个线圈可满足)；
  - 接地极线路电抗器。
- c) 换流阀：
  - 晶闸管；
  - 阻尼电路和电压分压器的元件(如电容器、电阻器)；
  - 阀电抗器；
  - 阀电子、阀基电子或阀控单元的电路板；
  - 光纤电缆。
- d) 直流穿墙套管：
  - 交流和直流避雷器(一些多柱避雷器中可能有带电的备用柱，而不是完整的备用避雷器)。
- e) 交流断路器和负荷开关配件：
  - 闭合和跳闸线圈；
  - 闭合和跳闸机构；
  - 控制棒；
  - 弧触头(跳闸和闭合)。
- f) 电压和电流测量装置：
  - 电容式电压互感器；
  - 直流电压分压器；
  - 电压互感器；
  - 电流互感器；
  - 直流电流传感器。
- g) 功率因数(无功补偿)组和谐波滤波器设备(除电抗器)：
  - 并联电容器(电容器单元和支撑绝缘子，不是完整组)；

- 电阻器(当一个电阻器由多个模块组成,一个模块可满足)。
- h) 其他直流侧设备:
  - 直流开关;
  - 中性母线电容器(电容器单元和支撑绝缘子,不是完整的组);
  - 接地电极线路电容器(电容器单元和支撑绝缘子,不是完整的组)。
- i) 控制、保护和计量设备:
  - 阀控(电子板);
  - 直流控制(电子板);
  - 故障监测。
- j) 站服务及辅助电力设备:
  - 低压断路器和转换开关;
  - 保险;
  - 低压避雷器;
  - 电池充电器配件;
  - 不间断电源配件。
- k) 阀冷却设备:
  - 带电机的风机;
  - 带电机的泵;
  - 机械阀门;
  - 冷却介质过滤器。



## 参 考 文 献

- [1] IEC 60146-1-1 Semiconductor converters—General requirements and line commutated converters—Part 1-1: Specifications of basic requirements
- [2] IEC TR 60146-1-2 Semiconductor converters—General requirements and line commutated converters—Part 1-2: Application guide
- [3] IEC 60146-1-3 Semiconductor converters—General requirements and line commutated converters—Part 1-3: Transformers and reactors
- [4] IEC 60146-2 Semiconductor converters—Part 2: Self-commutated semiconductor converters including direct DC converters
- [5] IEC TR 60146-6 Semiconductor converters—Part 6: Application guide for the protection of semiconductor converters against overcurrent by fuses
- [6] IEC 60700-1 Thyristor valves for high-voltage direct current (HVDC) power transmission—Part 1: Electrical testing
- [7] IEC TR 60919-2 Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters—Part 2: Faults and switching
- [8] IEC TR 60919-3 Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters—Part 3: Dynamic conditions
- [9] IEC 61148 Terminal markings for valve device stacks and assemblies and for power conversion equipment
- [10] IEC 61803 Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations with line-commutated converters
- [11] IEC TR 62001 (all parts) High-voltage direct current (HVDC) systems—Guidance to the specification and design evaluation of A.C. filters
- [12] IEC TR 62672 Reliability and availability evaluation of HVDC systems
- [13] CISPR 11 Industrial, scientific and medical equipment—Radio-frequency disturbance characteristics—Limits and methods of measurement
- [14] CISPR 16 (all parts) Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods
- [15] CISPR 18 (all parts) Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment
- [16] ISO/IEC TS 30103:2015 Software and Systems Engineering—Lifecycle Processes—Framework for Product Quality Achievement
- [17] ISO/IEC/IEEE 90003:2018 Software Engineering—guidelines for the application of ISO 9001:2015 to computer software
- [18] ISO 1996-1 Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental noise—Part 1: Basic quantities and assessment procedures
- [19] ISO 9001:2015 Quality management systems—requirements

[20] ISO 10006 Quality management—guidelines for quality management in projects  
[21] ISO/IEC 301010:2009 Risk management—Risk assessment techniques  
[22] ISO 50001:2018 Energy management systems—requirements with guidance for use  
[23] EEI Publication 60-68 The telephone influence factor of supply system voltages and currents

---

