



中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 20996.1—2007/IEC/TR 60919-1:1988

高压直流系统的性能 第1部分：稳态

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

(IEC/TR 60919-1:1988, IDT)



2007-06-21 发布



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

中 华 人 民 共 和 国
国家标准化指导性技术文件
高压直流系统的性能
第 1 部分:稳态

GB/Z 20996.1—2007/IEC/TR 60919-1:1988

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街 16 号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 3.25 字数 93 千字
2007 年 11 月第一版 2007 年 11 月第一次印刷

*

书号: 155066 • 1-30059 定价 34.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68533533



GB/Z 20996.1-2007

前 言

GB/Z 20996《高压直流系统的性能》是国家标准化指导性技术文件,共包括以下 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。

本部分为第 1 部分,等同采用 IEC/TR 60919-1:1988《高压直流系统的性能 第 1 部分:稳态》,有关技术内容和要求的规定完全相同。由于该 IEC 文件出版已有近 20 年时间,所以编写格式与现行的我国国家标准有较大差异。本部分按我国 GB/T 1.1—2000 规定的格式编写。例如在原 IEC/TR 60919-1:1988 的规范性引用文件中,所引用的大量文件基本都未在正文中被引用。按我国国家标准规定,这部分文件就不能被视为规范性引用文件。因此,在本部分的规范性引用文件中,将未在正文中引用的全部文件删除。另外,对 IEC/TR 60919-1:1998 所作出的修改及差异,在正文 11.1 和 16.3 中以条文脚注的方式标出。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国电力电子学标准化技术委员会(SAC/TC 60)归口。

本部分负责起草单位:中国电力科学研究院、西安电力电子技术研究所。

本部分参加起草单位:西安高压电器研究所、北京网联直流输电工程技术有限公司、西安西电电力整流器有限公司、南方电网技术研究中心、机械工业北京电工技术经济研究所。

本部分主要起草人:赵畹君、陆剑秋、郑军、马为民、李斌、黎小林、曾南超、周观允、张万荣、方晓燕、陶瑜、王明新、刘宁、蔚红旗。

本部分为首次发布。

本部分由全国电力电子学标准化技术委员会负责解释。

引 言

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

- (1)《高压直流系统的性能 第一部分 稳态》
- (2)《高压直流系统的性能 第二部分 故障与操作》
- (3)《高压直流系统的性能 第三部分 动态》
- (4)《高压直流换流站绝缘配合程序》
- (5)《高压直流换流站损耗的确定》
- (6)《变流变压器 第二部分 高压直流输电用换流变压器》
- (7)《高压直流输电用油浸式换流变压器技术参数和要求》
- (8)《高压直流输电用油浸式平波电抗器》
- (9)《高压直流输电用油浸式平波电抗器技术参数和要求》
- (10)《高压直流换流站无间隙金属氧化物避雷器导则》
- (11)《高压直流输电用并联电容器及交流滤波电容器》
- (12)《高压直流输电用直流滤波电容器》
- (13)《高压直流输电用普通晶闸管的一般要求》
- (14)《输配电系统的电力电子技术静止无功补偿装置用晶闸管阀的试验》
- (15)《高压直流输电系统控制与保护设备》
- (16)《高压直流换流站噪音》
- (17)《高压直流套管技术性能和试验方法》
- (18)《高压直流输电用光控晶闸管的一般要求》
- (19)《直流系统研究和设备成套导则》

目 次

前言	III
引言	IV
1 总则	1
2 高压直流系统稳态性能规范概述	2
3 高压直流系统的类型	2
4 环境条件	5
5 额定功率、额定电压和额定电流	7
6 过负荷和设备容量	7
7 最小输送功率和空载备用状态	9
8 交流系统	10
9 无功功率	11
10 直流输电线路、接地极线路和接地极	13
11 可靠性	14
12 控制和测量	16
13 远动通信	19
14 辅助电源	21
15 可听噪声	23
16 交流侧谐波干扰	24
17 直流侧谐波干扰	26
18 电力线载波(PLC)干扰	30
19 无线电干扰	30
20 损耗	32
21 直流输电系统扩建的准备	33
图 1 12 脉波换流器	34
图 2 背靠背直流系统举例	34
图 3 单极大地回路	35
图 4 两个 12 脉波换流器串联	35
图 5 两个 12 脉波换流器并联	36
图 6 单极金属回路系统	36
图 7 双极系统	37
图 8 双极系统中非故障极的金属回路运行	37
图 9 双极金属回路系统	38
图 10 直流线路对换流器极的切换	38
图 11 换流器极直流侧切换	39
图 12 直流架空线路和电缆的切换	39
图 13 两个双极换流器和两个双极线路的切换	40
图 14 直流线路中间的切换	41

图 15	直流输电换流器无功功率 Q 随有功功率 P 的变化关系	41
图 16	控制系统分层结构	42
图 17	换流器电压-电流特性	43
图 18	双极 HVDC 系统交流滤波器连接方式举例	43
图 19	不同类型的滤波器接线	44
图 20	直流线路上典型的换流器噪声水平	44
图 21	换流桥的扩建方式	45
表 1	每一个高压直流换流站应提供的环境条件资料	5
表 2	话音通信线路的性能要求(用户线路和主干线路)	27

高压直流系统的性能

第 1 部分: 稳态

1 总则

1.1 范围

GB/Z 20996 的本部分对高压直流系统的稳态性能要求提供通用的指导。本部分所涉及的是采用两个三相换流桥组成的 12 脉波(脉动)换流器(见图 1)的两端高压直流系统的稳态性能,它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,并具有双向输送功率的能力。本部分不考虑采用二极管换流阀的情况。

GB/Z 20996 由三个部分组成。第 1 部分稳态,第 2 部分故障和操作,第 3 部分动态。在制定与编写过程中,已经尽量避免了三部分内容重复。因此,当使用者准备编制两端高压直流系统规范时,应参考三个部分的全部内容。

对系统中的各个部件,应注意系统性能规范与设备设计规范之间的差别。本部分没有规定设备技术条件和试验要求,而是着重于那些影响系统性能的技术要求。本部分也没有包括详细的地震性能要求。另外,不同的高压直流系统可能存在许多不同之处,本部分也没有对此详细讨论,因此,本部分不应直接用作某个具体工程项目的技术规范。但是,可以以此为基础为具体的输电系统编制出满足实际系统要求的技术规范。本部分涉及的内容没有区分用户和制造厂的责任。

通常,对于一个具体工程的两端高压直流换流站,其性能规范应作为一个整体来编写。高压直流系统的一些部分也可以单独地编写规范和采购,在此情况下,必须适当地考虑每一部分与整个高压直流系统性能目标的配合,并应该明确地规定每一部分和系统之间的接口。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) 远动通信系统;
- c) 阀厅,基础和其他的土建工程;
- d) 无功补偿设备,包括交流并联电容器组、并联电抗器、同步调相机和静止无功补偿器;
- e) 交流滤波器;
- f) 直流滤波器;
- g) 辅助系统;
- h) 交流开关设备;
- i) 直流开关设备;
- j) 直流电抗器;
- k) 换流变压器;
- l) 避雷器;
- m) 换流阀及其辅助设备;
- n) 控制和保护系统。

注:实际上最后两项分开有一定的难度。

1.2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过 GB/Z 20996 的本部分的引用而成为本部分的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本部分,然而,鼓励根据本部分达成

协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本部分。

GB/T 6113.2—1998 无线电骚扰和抗扰度测量方法 (eqv CISPR 16-2:1996)

2 高压直流系统稳态性能规范概述

本部分从第3章到第21章全面论述了高压直流系统的稳态性能。

尽管各类设备通常是单独编写规范和采购,本部分仍然包括直流输电线路、接地极线路和接地极(见第10章),目的是为了考虑其对高压直流系统性能的影响。

本部分假定一个高压直流换流站,由一个或多个安装在同一地点的换流器单元组成,同时要考虑与其配套的厂房建筑物、直流电抗器、滤波器、无功补偿设备、控制、保护、监视、测量和辅助设备。在本部分中没有讨论交流开关站的问题,但包括了交流滤波器和无功功率补偿设备,如第16章所述,这些设备可以和高压直流换流站分开,单独接在交流母线上。

3 高压直流系统的类型

3.1 概述

规范的这一部分应包括以下基本内容:

- 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(脉动)换流器组数;
- d) 本章所提到的相应资料。

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

3.2 背靠背高压直流系统(图2)

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以放在一个阀厅内,甚至在一个集成的结构中。同样,两个换流器的其他设备,如控制系统、冷却设备、辅助系统等,也可放在一个区域内,甚至可以集中布置在一起,供两个换流器共同使用。电路结构可能不同,图2给出了一些例子。这些不同回路接线的性能和经济性,必须进行评估。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,应对额定电压和电流进行优化选择。背靠背直流工程与具有架空线路和电缆的直流工程相比,由于无线路损耗,可降低额定电压值,提高额定电流值。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(脉动)换流单元。有的运行准则要求,失去一个换流器不应导致中断全部输送能力;因此,一些大的高压直流换流站,可以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。

3.3 单极大地回路高压直流系统(图3)

决定采用单极大地回路方式,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。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,单极的布置可以是一个12脉波(脉动)换流器,或者是多个12脉波(脉动)换流器串联或并联(图4、图5)。在以下情况下可能采用多个12脉波(脉动)换流器:

- a) 当一个换流器停运时,仍可保证有部分输送容量;
- b) 工程建设要分期进行;
- 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直流电抗器,通常这些电抗器放在

高压侧。如果最终性能可以接受,直流电抗器也可以放在接地侧。对于架空线路,每一端可能均需装设直流滤波器(见第 17 章)。输电线路的两端需要设置接地极线路,可以连续运行的接地极,并需要考虑接地极的腐蚀和磁场效应等问题。

3.4 单极金属回路高压直流系统(图 6)

这种方式通常在以下情况采用:

- 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;
- 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;
- 如果地电阻率很高,会引起不可接受的经济损失时。

可以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,或者通过二者接地。

高压导线的两端均需装设直流电抗器,如果其最终性能可以接受,直流电抗器也可以装在接地侧。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工程,则其中性线导线的绝缘应能承受在该工程阶段的高电压。

3.5 双极高压直流系统(图 7 和图 8)

这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,它可以降低谐波干扰并且可以保持流入地中的电流值最小。两个单极大地回路方式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,流过地回路的不平衡电流能保持很小的数值。

这种类型的输电系统可以提供一系列的应急运行方式,因此,在规范中应考虑以下要求:

- 当高压直流输电系统一个极停运时,另一个极的换流设备应能通过大地回路连续运行。
- 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,则双极系统应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将被切除的故障极导线和大地回路并联,然后再断开大地回路,从而将电流转换到金属回路(停运极的导线)中去。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断路器(MRTB)。如果允许短时间中断输送功率,则不需要 MRTB。在高压直流输电系统中接有 MRTB 端的换流站中性点设备,其绝缘水平应高于输电系统另一端中性点设备的绝缘水平。
- 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,则双极系统应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。把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,则两个极必须自动闭锁。
- 在两端换流站均接地极的双极运行方式下,高压直流系统两个极的运行电流可以不相同。当一个极的冷却系统有问题,或者由于其他不正常的条件使其不能运行在全电流时,则会出现这种运行工况。
- 假如线路绝缘有部分损坏时,要求系统还能连续运行,则换流器应设计为能降压连续运行,以便使两个极能降压运行(参见 7.3)。
- 当失去一个极的输电线路时,换流站可通过一个极极性反接的相应倒闸操作,来实现换流站两个极并联,可单极大地回路方式运行。但是,为此要求每个 12 脉波(脉动)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,应均能在比额定电流大的电流下运行。

每个极的每一端均需一个直流电抗器。同时,如果高压直流系统是架空线路,则大部分情况下还需

要有直流滤波器。最常用的是每极一组 12 脉波(脉动)换流器。但是,对于大容量的系统或者是分期扩建的系统,则可能要求进行 12 脉波(脉动)换流器组的串联或并联(图 4 和图 5)。

3.6 双极金属中性线系统(图 9)

如果地电流不能容忍,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,则输电线可以建设成具有第三条导线的双极金属中性线系统。第三条导线在双极运行时,可流过不平衡电流。当输电线路的一个极退出运行时,第三条导线则成为返回线。第三条导线只要求低电压绝缘,并且如果是架空线路,它还可以作为避雷线使用。但是,如果它是全绝缘,则可作为一条备用的导线,在这种情况下,则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应该接地,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,在一条导线不能工作时,它还可以运行在双极方式。此时两个换流站的中性点均需要接到换流站的接地网上,并且应特别注意要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。

如果换流站的一个极不能运行,直流输电系统可以用换流站的另一个极以单极金属回路方式运行。

3.7 每极两组 12 脉波(脉动)换流器

对于大容量双极系统,可以考虑每极两个 12 脉波(脉动)换流器串联。这就是说,当一组 12 脉波(脉动)换流器发生强迫停运或计划停运时,只损失 25% 的输送功率,并且还可以按双极平衡电流方式运行(无地电流)。如果输电系统有足够的过负荷能力,则可以保持满负荷或接近满负荷运行。需要装设直流开关,对任何一组运行的 12 脉波(脉动)换流器进行旁路和退出。与同样容量的每极一组 12 脉波(脉动)换流器的输电系统相比,采用每极两组时其造价会增加。

3.8 换流变压器的组合方式

每组 12 脉波(脉动)换流器的三相变压器需要两组阀侧绕组,一组为星形接线而另一组为三角形接线。这可以由以下方式构成:

- a) 1 台带两组阀侧绕组的三相变压器;
- b) 2 台三相变压器,一台接成星/星,另一台接成星/三角;
- c) 3 台单相变压器,每台有 2 个阀侧绕组,一个绕组为星形接线,另一个为三角形接线;
- d) 6 台单相变压器,接成 2 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组阀侧绕组的变压器,只需要 1 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,因此应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 1 台备用,因为 3 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 2 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 1 台变压器退出运行时,上述方案 b) 和 d) 可以按 6 脉波(脉动)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),但是这种运行方式对于方案 a) 和 c) 则不行。

3.9 直流开关场接线方式

直流开关场有许多接线方式可以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 3.5 讨论。

对于双极系统来说,直流开关场的接线方式可以使换流器的任一端换接在任一导线上或中性点上(图 10)。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,则电缆可以并联运行,还可降低线路损耗。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,则换流站的两个极不可能并联连接。

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应可以进行极性反接,并且,这个极的中性端必须达到全电压绝缘水平。图 11 给出了一种可能的接线方式。

当直流输电系统包括架空线路和电缆时,可用图 12 所示的在架空线和电缆连接处的直流换接方式。

对于多回双极线路的情况,可以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可以恢复输电能力(图 13)。

对于远距离多回双极线路并联运行的情况,可以采用像图 14 所示的中间换接方式。

4 环境条件

对于每一个高压直流换流站,应该提供表 1 所示环境条件资料。

表 1 每一个高压直流换流站应提供的环境条件资料

参 数	单 位		应用实例和注释
● 海拔高度	m		用于空冷系统设计和空气净距
● 户外温度	℃		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,这些均应加以说明并提供所需的资料
	对低温 容量	对额定 容量	最好能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
● 最高湿球温度	℃	℃	蒸发冷却系统设计和阀厅相对湿度设计
● 24 h 最高平均干球温度	℃	℃	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
● 最高和最低户内空气温度和相对湿度	℃ %	℃ %	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	℃ %	℃ %	如果户内温度对维修人员来说非常高时需要规定
● 最大日照入射功率 水平面 垂直面	W/m ² W/m ²		建筑物冷却,变压器、电抗器、母线等的额定值等
● 风力条件 ——最大连续风速 ——最大阵风速 ——在最低温度(℃)下的最大风速	m/s m/s m/s		建筑物和设备支柱设计 建筑物和设备支柱设计 导线、张力绝缘子和杆塔设计
● 冰雪负荷 ——无风时的最大冰厚 ——最大风速(m/s)时的最大冰厚 ——最大雪荷 ——最大雪深	mm mm N/m ² mm		设备和结构设计,例如隔离开关/开关、导线等 设备和结构设计,例如隔离开关/开关、导线等 建筑物设计 为了安全,设备在雪上面的高度

表 1 (续)

参 数	单 位	应用实例和注释
● 降雨量 ——年平均 ——1 h 最大量 ——5 min 最大量	mm mm mm	建筑物和现场排水
● 雾和污秽 绝缘子冲洗和涂敷规程		决定绝缘和空冷系统过滤器设计的要求。对于绝缘子设计应该规定一个估计的等值盐密水平
● 换流站和线路两侧 5 km~10 km 的雷击水平	雷击次数/km ² /年 (换流站) 雷击次数/ 100 km/年(线路)	换流站防雷设计
● 地震条件 ——最大水平加速度 ——水平振动的频率范围 ——最大垂直加速度 ——垂直振动的频率范围 ——发生地震的持续时间	m/s ² Hz m/s ² Hz 周期	设备、结构和基础设计
● 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,应特别注意其安放位置
● 水源		水库、水井等
	对低温 容量 对额定 容量	最好能给出以月为基础的这些参数在一年中的变化曲线
● 最大连续流量 ● 24 h 最大流量 ● 最小连续流量 ● 24 h 最小流量	m ³ /s m ³ /s m ³ /s m ³ /s	冷却系统设计需要 冷却系统设计需要 冷却系统设计需要 冷却系统设计需要
● 最高水温 ● 最低水温 ● 允许的最高回水温度	— ℃ ℃	冷却系统设计需要 冷却系统设计需要 冷却系统设计需要
● PH 水平 ● 水的电导率 ● 可溶固体的种类 ● 可溶固体量 ● 不可溶固体的种类 ● 不可溶固体量	μS/m g/m ³ g/m ³	水处理站设计 水处理站设计 水处理站设计 水处理站设计 水处理站设计 水处理站设计
● 高压直流换流站最高地电阻率 ● 地下水位深度 ● 现场土壤条件 ● 现场交通状况 ● 运输重量及尺寸的限制 ● 设备和建筑物布置的限制 ● 环境条件	Ωm m	站接地设计 基础设计 钻孔资料(如岩石)和特殊的条件如最大结冰深度;基础设计 决定安装和运输费用 设备设计——特别是变压器和直流电抗器 影响设备、母线和建筑物设计 可听噪声限制,审美要求——建筑的处理、环境美化等
上面未列出的特殊条件,例如影响系统性能的有关规程等均应列出		

5 额定功率、额定电压和额定电流

5.1 额定功率

额定功率是高压直流系统能够在所规定环境条件范围内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,因此需要规定额定功率的测量点。

5.1.1 以极为基础的高压直流输电系统的额定功率

以极为基础的高压直流输电系统的额定功率定义为额定直流电压和直流电流的乘积。

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,额定功率通常规定在整流器的直流母线上测量。如果要求把额定功率定在其他的地方,如送端交流母线、受端交流母线或者直流线路上的某处,则应当先确定额定直流电压,再通过高压直流系统的优化设计来选择额定直流电流。

逆变器直流母线的额定功率和额定电压根据整流器的参数推算出,假定沿线的导线温度相同,线路损耗在所规定的导线参数下得到。

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

5.1.2 背靠背直流系统

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来选择。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,可以规定为额定直流电压和额定直流电流的乘积。

5.1.3 功率方向

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

如果功率潮流主要是向一个方向输送,像从远方电站向系统送电的情况,则额定功率可只按一个方向来确定,这样可降低逆变站的造价。此时,在反方向上,则只具有较低的功率输送能力。

5.2 额定电流

额定电流是高压直流系统直流电流的平均值。高压直流系统应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 5.1.2 所述,不需要作出规定,除非有特殊原因。

5.3 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。额定电压的测量点规定在换流站直流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 5.1.2 所述,不需要作出规定,除非有特殊原因。

6 过负荷和设备容量

6.1 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以接受的(如由于热老化),以及考虑利用冗余设备和低的环境温度等。

过负荷可以用功率来规定。包括变压器在内的换流器的电压调节,通常使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,则可以采取以下措施,但要增加投资。

- a) 换流器应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电压额定值应升高;
- c) 假如换流器触发角需要保持在额定值,则应增加有载分接头调节范围。或者,把换流器设计为能够在额定功率下以大一些的额定触发角运行,这将增加无功消耗、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,可以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可以决定最大电流,超过此范围再增加过负荷能力,可用额外的电压调节来解决。

高压直流换流站过负荷时间的要求,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故障后。

但是,应当看到,高压直流换流站的设备过负荷能力是有限度的。如 6.2 所述,设备的热时间常数的范围在 1 秒至数小时之间。因此,高幅值长时期过负荷要求可能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,对上述因素应在系统利益上全面权衡。

注:例如,1 h 过负荷的实际值可以是 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需要考虑。针对具体的设计,如果使用冗余冷却,1 h 过负荷可以转变成连续过负荷。

另一些例子,包括频率在 1 Hz 以下、持续时间为数秒的振荡性过负荷和 5 s 过负荷,可抑制暂时过电压或频率变化。应该对这种类型的过负荷频率及时间间隔作出规定。

6.2 设备容量

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款中讨论。

环境温度是一个重要的因素。电力设备应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 6.2.3 中所列的限制可以克服,一些裕度可用来提高系统容量。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包络线应结合交流系统条件规定。包络线应采用湿球和干球环境温度。

6.2.1 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(数秒至数分钟)。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应考虑到这点。因此,晶闸管阀的冷却系统应设计成,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,换流阀的设计应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,则必须做出明确规定。

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。根据阀的散热和冷却系统设计,可以确定超过额定电流的能力。

按照上述观点,换流器的过负荷规范,应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。

6.2.2 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大约为 15 min,而其油回路大约在 1 小时至数小时的范围内,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,应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应作出规定。

6.2.3 交流滤波器及无功补偿设备的容量

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。应在规范中规定在过负荷条件下,是否也应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,规范中应规定在设计滤波器和无功补偿设备时应如何对此进行考虑。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,应对过负荷条件下所预期的交流母线电压作出规定。

6.2.4 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,应特别注意电流互感器和套管的过负荷能力。

7 最小输送功率和空载备用状态

7.1 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主要依据。

7.2 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,因而直流电流不是一个平滑的或恒定的常数,更确切地说,是由于与换流器串联的直流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,这取决于直流电抗器电感值的大小,当换流桥串联时还取决于串联数,另外还取决于换流器触发角的大小。在稳态运行时应该避免出现电流断续,除非换流设备是针对这种运行方式设计。

因为直流电抗器的电感值通常由另外的设计准则所决定,而且换流器的触发角是变化的,故应该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%。这个最小电流值可以用选择较大的直流电抗器电感值的方法来进行进一步降低。

7.3 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,通过高压直流换流站控制系统的各种控制方式,可使直流输电系统在降低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,可通过加大触发角运行来达到。

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设备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,还可以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,在75%的额定电压下,如果稍高的谐波干扰水平可以接受,那么连续运行的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频度和持续时间。

在采用两个12脉波(脉动)换流器串联的场合,一个换流器可退出运行,将使直流电压降低50%,此时可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,应规定对应的交流电压水平。

7.4 空载备用状态

这种状态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,则需要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。

7.4.1 换流变压器的空载备用状态

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

7.4.2 换流阀的空载备用状态

换流阀应在闭锁状态。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内冷却系统应运行在足够的水平。

7.4.3 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以接入或不接入,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,还是应考虑不接入。

7.4.4 直流电抗器和直流滤波器的空载备用状态

应接入直流电抗器和直流滤波器。直流电抗器的油泵和冷却器应运行在电抗器设计要求的最低水平。

7.4.5 辅助电源系统的空载备用状态

辅助电源系统应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,蓄电池充电装置等也应投入运行。

7.4.6 控制和保护的备用状态

所有控制和保护回路应处在运行状态。

8 交流系统

8.1 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,均应作出规定。

对于换流器和滤波器所连接交流开关场的布置,包括交流出线在内,应作出说明。此外,还应完成所设计的交流开关场的运行方案。

需要有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输出时更是如此。通常,关于潮流和短路研究的全部数据也是需要的。

8.2 交流电压

8.2.1 额定交流电压

额定交流电压是所设计系统的相间基波电压的有效值,且交流设备的一些特性与该系统有关,如:交流开关、交流滤波器、无功补偿设备、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。

8.2.2 稳态电压范围

稳态电压范围是高压直流系统能传送额定功率的电压变化范围,并且应能满足所有的性能要求,另有规定时除外。

对超出稳态范围限值的任何特殊性能要求,均需作出规定,这些性能可能影响主要设备的设计,如换流变压器、交流滤波器、辅助设备等。

8.2.3 负序电压

按照对称分量法计算的交流电压的负序分量,是一组三相平衡电压,它的各相最大值出现的顺序与正序电压分量相反。通常是用额定电压的百分比来表示其大小。

虽然要得到这个参数的实际值比较困难,但是,应规定其最大值,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设计交流滤波器和直流滤波器(见第16章和第17章)

8.3 频率

8.3.1 额定频率

应规定交流系统的频率,因为它是换流变压器等交流设备额定值的设计基础,同时也是换流桥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。

8.3.2 稳态频率范围

稳态频率范围的定义是:在此频率范围内并在交流稳态电压范围内,能够传送额定直流功率并能满足所有性能要求。

8.3.3 短期频率偏差

应对能保持系统性能的短期频率偏差的限值和持续时间作出规定。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。

8.3.4 紧急情况下的频率变化

在紧急情况下,交流系统的频率可能在有限的时间内变化很大。应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,设备应能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,可以允许设备自动切除。

8.4 系统工频阻抗

为了对换流器的换相条件进行分析,必须对系统的工频阻抗作出说明。对于进行这样的分析,需要在不考虑任何滤波器和无功补偿设备的条件下,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。

8.5 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2次~50次谐波频率的系统阻抗。

对于高压直流换流站母线少于5~8时,谐波阻抗可以用线路、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,通常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。图上应包括最小电阻值($R_{\min}$)和最小电抗值($X_{\min}$)。

实际上,这个阻抗图可以有不同的形式,例如用 R/X 比值为常数限定的圆图,或者是二者结合限定的阻抗图。

8.6 正序和零序波阻抗

为了对来自换流站载波频带内的干扰进行评估,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。

8.7 其他谐波源

应该查明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容量时,应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器来说,应对其所产生的谐波电流作出规定。

8.8 次同步谐振

如果预计存在次同步谐振问题,则需要提供有关研究的所有相关资料(见第9章)。

9 无功功率

9.1 概述

高压直流系统使用电网换相换流桥,不管是作为整流器或逆变器运行,均需消耗一定量的无功功