

HUANLIUZHAN ZHUSHEBEI
ZHUANGTAI JIANCE YU PEIZHI

换流站主设备 状态监测与配置

中国南方电网超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

HUANLIUZHAN ZHUSHEBEI
ZHUANGTAI JIANCE YU PEIZHI

换流站主设备 状态监测与配置

中国南方电网超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书针对目前换流站直流主设备状态检修工作中存在的实际问题,介绍了“换流站直流主设备状态监测关键参数与评价体系”研究思路,构建更加合理、完善的换流站直流主设备状态监测关键参数和评价体系,形成设备状态参数评估权重设置、评估结果反馈修正的科学方法和机制,同时结合目前技术发展水平给出了换流站直流主设备状态监测装置参考配置方案。

本书共5章,分别为导论、换流站直流主设备状态监测基础参数体系、换流站直流主设备状态监测关键参数体系、换流站直流主设备状态评价体系、换流站直流主设备状态监测装置配置方案。

本书可为从事换流站直流主设备状态监测工作的相关技术和管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

换流站主设备状态监测与配置/中国南方电网超高压输电公司组编. —北京:中国电力出版社,2016.8

ISBN 978-7-5123-9232-8

I. ①换… II. ①中… III. ①换流站-设备状态监测-配置 ②换流站-设备-配置 IV. ①TM63

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第085080号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016年8月第一版 2016年8月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 12印张 203千字

印数0001—1000册 定价49.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《换流站主设备状态监测与配置》

编写委员会

主 编 赵建宁

副主编 吕金壮 王 奇 邓 军 钱 海

编写组 常 安 张 晗 宋云海 王海军

王剑坤 胡 军 李妍红 陈翔宇

前言

我国状态监测与故障诊断技术起源于二十世纪七十年代末，主要是在化工领域针对机组故障开展一定的状态监测与诊断研究，八十年代，逐步在交通、石化等领域引入状态监测的概念，九十年代开始，电力行业开始在大中型汽轮发电机组引入在线状态监测与故障诊断技术。2009年前后，随着国家电网公司推出智能电网概念，输变电设备的状态监测与故障诊断开始在国内电力行业得到重视和推广。

随着状态在线监测和故障诊断技术的应用，使得状态检修，尤其是基于在线监测设备的状态检修方案，已稳步发展并成为电力系统的重要研究领域之一。但是目前换流站直流主设备状态检修在实际实施过程中还存在一系列尚未解决的问题，主要包括设备状态监测参数选取不合理、参数评估权重设置不合适、不同地域环境设备的状态监测与评估方案无差异、评估结果准确与否没有相应的校验和反馈修正机制等。

本书分为六部分：第一部分，主要介绍直流及新能源主设备状态监测与评价现状和某区域电网直流主设备缺陷记录统计分析；第二部分，按照静态参数、动态参数及准动态参数分类整理交直流及新能源共22种设备的基础参数体系；第三部分，依据换流站直流主设备状态基础参数体系，结合技术监督的关注度、参数的重要性、设备状态监测理论研究成果建立换流站直流主设备状态监测关键参数体系；第四部分，介绍直流系统

主设备状态量、基本扣分制、权重系数及扣分依据，给出 13 种直流系统主设备状态评价导则；第五部分，介绍设备状态监测装置的配置原则，形成换流站直流主设备状态监测装置配置方案；第六部分，作为本书的附录部分，介绍直流主设备关键监测评估方法。

由于时间仓促，不足之处在所难免。如有任何批评意见，请及时来信至 epwangqi@qq.com 提出您的宝贵建议，谢谢！

编 者

2016 年 7 月

目录

前言

第 1 章 导论	1
1.1 换流站直流主设备状态监测与评价现状	2
1.2 换流站直流主设备缺陷统计分析	5
1.3 本章小结	8
第 2 章 换流站直流主设备状态监测基础参数体系	9
2.1 基础参数体系总体设计思路	9
2.2 油浸式换流变压器基础参数体系	11
2.3 换流阀及冷却系统基础参数体系	30
2.4 干式平波电抗器基础参数体系	40
2.5 直流穿墙套管基础参数体系	44
2.6 直流电流测量装置	50
2.7 直流电压测量装置	54
2.8 交/直流滤波器电容器、直流耦合电容器、 交流 PLC 耦合电容器基础参数体系	59
2.9 金属回路转换断路器 (MRTB) 基础参数体系	64
2.10 直流接地极基础参数体系	74
2.11 直流系统用避雷器 (MOA) 基础参数体系	78
2.12 本章小结	83
第 3 章 换流站直流主设备状态监测关键参数体系	84
3.1 关键参数体系构建思路	84
3.2 关键参数体系构建模型及方法	85
3.3 换流站直流主设备关键参数体系	88

3.4 本章小结	136
第4章 换流站直流主设备状态评价体系	137
4.1 主设备状态评价模型总体思路	137
4.2 换流站直流主设备状态评价模型	138
4.3 换流站直流主设备状态评价体系	142
4.4 设备评价实例	143
4.5 本章小结	152
第5章 换流站直流主设备状态监测装置配置方案	153
5.1 换流站直流主设备状态监测装置配置策略	153
5.2 换流站直流主设备状态监测装置配置方案	157
5.3 本章小结	161
附录A 直流主设备主要监测方法	162
参考文献	181

第1章



导 论

随着国民经济对电力需求的持续增长以及电网规模的不断扩大,电网系统的智能化逐渐提上日程并成为当前电网建设的重要工作。大电网变电主设备的安全可靠是保证电网良好运行的必要条件,变电主设备的智能化是电网智能化建设的重要组成部分。

输变电设备的智能运行主要体现在如何准确评价设备运行状况、诊断运行故障上。目前在实际电力系统的应用中,电气设备维修主要采用计划维修方式,存在维修过剩、盲目,耗费大量人力物力的缺点。另一方面,随着状态监测和故障诊断技术的应用,使得状态检修,尤其是基于在线监测设备的状态检修,已稳步发展并成为电力系统研究的重要研究领域之一。设备状态检修以设备当前实际工作状况为依据,通过先进的状态监测手段、可靠的评价手段和准确的寿命预测手段来判断设备运行的状态。可以预见,状态检修取代传统检修方式是电力系统发展的必然趋势。

尽管设备状态检修是学术界和工业界公认的未来发展方向,但是目前设备状态检修在实际实施过程中还存在一系列尚未解决完善的问题,导致实施效果不佳,部分运行单位甚至从设备状态检修倒退回到计划检修的方式。就实际运行经验来看,设备状态检修存在的主要问题包括:设备状态监测参数选取不合理、参数评估权重设置不合适、不同地域环境设备的状态监测与评估方案无差异、评估结果准确与否没有相应的校验和反馈修正机制等。

电网主设备状态检修,其核心就是如何获取电力设备的“状态”,从目前的实际应用情况来看,状态数据的主要获取方式有人工巡视、离线试验、带电检测和在线监测。其中,在线监测可以在设备带电运行时,随时对包括绝缘情况在内的状态进行监测,并实时通过计算机引入测量数据,对测量过程实现自

动化,从而能够最有效体现设备当前运行情况。因此,在线监测是状态检修中非常重要的技术,甚至有学者认为是实施状态检修唯一可行的技术手段。

为此,本书主要针对当前换流站直流主设备状态检修工作中存在的实际问题,介绍换流站直流主设备状态监测关键参数与评价体系的研究思路,构建更加合理、完善的换流站直流主设备状态监测关键参数和评价体系,形成具备设备状态参数评估权重设置、评估结果反馈修正的科学的状态评价方法和机制,同时结合目前技术发展水平给出了换流站直流主设备状态监测装置参考配置方案。

1.1 换流站直流主设备状态监测与评价现状

目前来看,对于状态监测中状态量来说,直流设备的在线监测装置都是独立完成特定的功能,不具备整体系统性,而且数量和质量离开展状态检修还有很大差距。目前从在线监测所获得的数据远不能成为状态检修及决策的主要依赖。

根据南方电网有限责任公司(简称南方电网公司)的统计数据可知,直流换流站与交流变电站相比,配备了更高覆盖度的在线监测。2009年,交流设备在线监测总体覆盖比率为6.4%,但换流变压器、平波电抗器等直流设备在线监测的覆盖比率为93.7%。虽然数据显示直流设备的在线监测覆盖看似非常良好,但深入了解可以发现,这主要是生产厂家生产成套设备时配备的一些非常基础的监测,属工程本身自带的功能,而且不少都不是电气量的监测。

各直流变电主设备状态监测相关研究现状如下:

(1) 换流变压器。相对其他直流设备,直流输电系统换流站和逆变站中换流变压器的状态监测开展的基础相对较好,以已投入运行的换流站为例,通过监测换流变压器而获得的状态量包括绕组温度、在线气体含量等。另外,通过人工巡视或使用仪器开展现场带电检测,可以采集到的状态量有油色谱分析、绝缘油介电强度、油介质损耗因数、本体和套管温度等。

(2) 干式平波电抗器。由于平波电抗器的结构中没有绝缘油介质等信息载体,因此,对电抗器的电气量进行监测也许可以最直接反映某故障情况。但实际上,电力系统运行方式一旦变化,将会对电气量产生较大影响,再加上平波电抗器的自感特性,包括电流、电压和阻抗在内的一些电气量,正常运行和异常方式下的变化值并不十分明显,所以仅仅对电气量进行监测,试图达到预警的目的并不可行。如果要对干式平波电抗器进行状态检修,需要结合更多的非

电气量,如温度。在交流系统中,对于干式平波电抗器的研究主要是基于烟雾传感的监测方法和基于温度传感的监测方法进行平波电抗器温度的监测。而实际上,由于电流分配方式的不同,直流下的监测与交流有很大区别。如若将交流干式电抗器搬入直流系统,将会出现里侧和外侧数层绕组温升偏低、而中间层绕组温升偏高的现象。因此,在温升监测方面,不能简单地将交流的方法移植到直流中来。

(3) 换流阀。换流阀监测与保护系统,旨在当换流阀中非正常状态下的可控硅数目达到警戒限值时,发出告警信号或跳开交流开关。其方法主要是在可控硅阻断期间,系统应能通过自动检测,检测到阻断电压,如果没有,则可判断其阻断能力失效。一些换流站的运行资料显示,此时换流器已过热甚至起火,因此,这方面监测也需加强研究。

(4) 高压套管。在直流系统中,对高压套管开展基于在线监测方式的状态检修方式并不成熟。直流系统的电磁环境非常复杂,换流变压器阀侧更是十分典型,由于施加在其绕组上的电压,实质上是一个由直流电压以及大量谐波存在的交流电压共同叠加而成的复合电压,其中既包括交、直流也饱含极性反转电压,有些情况下,阀侧绕组还需要承受各种冲击以及过电压等(见图1-1)。

目前国内对于网侧套管的绝缘监测有一定基础,主要是针对套管电容量和介质损耗的监测,而其他针对直流系统换流站复杂电磁环境下的高压套管在线监测的研究并不是很多,而且在实际中,对绝缘介质、温升和绝缘性能状态量获取应用也并不完善。

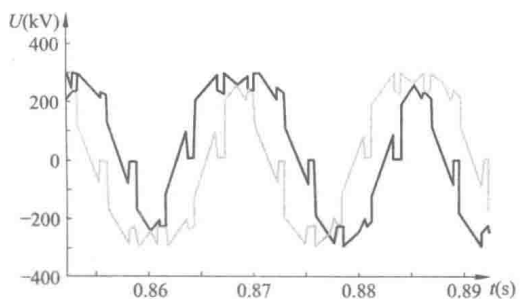


图1-1 换流变压器阀侧出线端电压波形

(5) 直流接地极。目前,用来反映直流接地极状态的状态量采集工作基本靠电力从业人员手动完成,而整个采集方式的智能化程度并不高。

对于直流接地极的在线监测,国内还处于空白状态。

接地极常见问题有引线发生断路及接地极水位、电流、温度异常等,而直流接地极的监测方式只能采用人工现场检测,此检测不能获得直流接地极实时的运行数据,且一月一次,人工费用较高。

(6) 直流滤波器。在直流滤波器中,其电容器是比较容易出现故障的部

件。根据葛洲坝—南桥线的运行统计分析，故障绝大部分是 C1 电容器损坏。南桥换流站的资料显示，由于直流滤波器的 C1 电容器故障，而最终导致直流系统 FASOF (FastSwitch - OffSequence) 停运的情况，占到了总停运次数 18%。其故障时的主要表现为电容量增大，由此可以表明电容器内部有元件出现损坏情况，以及电容器端部连接线太松引起发热，造成电容器漏油。电容器故障造成停运的统计见表 1-1。

表 1-1 电容器故障造成停运统计

年份	南桥				葛洲坝			
	=BD12	=BD22	=BD13	=BD23	=BD12	=BD22	=BD13	=BD23
1990						1		
1991	1	1				1		
1992	1					1		
1993	5	1						1
1994	3	2		1	2	2		
1995	3				4	1	1	
1996	1	1			3		1	
1997					1			7
1998		2						
1999								2
2000							1	1
2001		1						
2002								
2003		1						
2004	1							

发生故障时，除了直流极线或中性线上两端的电流出现差值，故障滤波器极线端与中性端的电流也会出现差值；通过滤波器的电流也会增大。电容故障判断依据为：非对称性故障通过测量其不平衡电流判断；对称性故障检测流过滤波器的几种特征谐波电流。但目前尚未有效利用其特点开发出可靠的监测装置。

(7) 金属氧化物避雷器。运行中的金属氧化物避雷器均长期承受工频电压、冲击电压，再加上内部受潮等因素的作用，极易引起阀片的老化、避雷器阻性泄漏电流的增加和功率损耗的剧增，最终将可能导致避雷器内部阀片温度升高甚至热崩溃，更甚者直至避雷器爆炸。高压直流换流站中避雷器种类多，

各种避雷器之间的差异很大主要体现在避雷器承受的持续运行电压的性质不同,且避雷器在高压直流换流站故障工况下承受的过电压及能量应力差别很大。无论直流还是交流,避雷器在线监测系统和状态监测方案运行时间都不长,运行经验不足,可靠性差,因此亟需加强研究。

(8) 光电式直流电流互感器 (OTC)。光电式直流电流互感器在直流系统中,对于直流滤波器差动保护以及直流滤波器电容器不平衡保护中起到重要作用,其动作的正确性直接关系到直流滤波器的运行稳定。在宜(湖北宜昌)华(上海华新)直流输电系统的运行过程中,光电式直流电流互感器测量系统多次出现了故障,有些故障直接导致了直流系统的单极闭锁。目前,针对光电式直流电流互感器更全面、更可靠的在线监测装置和检修方式仍需进一步研究。

(9) 光电式直流电压互感器 (OVT)。与光电式电流互感器相比,光电式电压互感器的研发和应用相对滞后。相应的状态检修体系也更为不完善。国内目前的电力系统中,尚无在线监测装置安装于 OVT 上,也没有对 OVT 开展状态检修的实例。

(10) 金属回路转换断路器 (MRTB)。在直流输电系统中,当需要与运行方式的转换,或者电力系统故障时的异常电流清除时,都依赖于高压直流断路器。由于直流电没有自然过零点,这就导致 MRTB 不能自动熄弧。所以目前的高压直流断路器几乎都是使用叠加一个振荡电流,使之与断路器电流叠加产生过零点的方法。

由于高压直流断路器能否有效开断电流与振荡回路的参数有着直接关系。为了保证高压直流断路器的安全有效运行,及时开断电流,对振荡回路的 RLC 参数进行实时监测很有必要,国内也确实出现了相关监测的方案方法。另外,对于高压直流断路器中 SF_6 气体的监测已比较成熟。

1.2 换流站直流主设备缺陷统计分析

通过对南方电网公司近 13 年直流主设备主要故障缺陷记录进行整理,得到直流主设备运行缺陷故障的情况分析结果如下。

本章中统计分析的缺陷记录,主要是针对换流站直流主设备,包括油浸式换流变压器、换流阀、干式平波电抗器、OTC、交/直流滤波器电容器、直流耦合电容器、交流 PLC 耦合电容器、OVT、MRTB、直流接地极、直流系统用避雷器等一次设备。

在所统计的上万条缺陷记录中，通过深入的数据挖掘，共得到近 2500 条有效的大电网直流主设备典型缺陷记录。

从图 1-2 可以看到，对于直流主设备，缺陷记录中最多的设备是换流变压器，占比 44.46%；排名第二的设备为交流滤波器电容器，其占比 32.23%；换流阀位列第三位，占比超过 15.75%。换流变压器和换流阀作为直流系统中最昂贵的两种关键设备，应引起换流站运行维护人员的重点关注。接下来记录次数较多的设备有直流滤波器电容器、平波电抗器等。

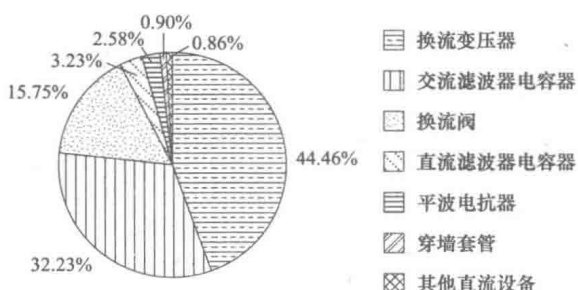


图 1-2 某电网公司直流主设备典型缺陷情况

按照设备缺陷管理的相关规定，缺陷按缺陷严重程度分为紧急缺陷、重大缺陷和一般缺陷三类。紧急缺陷指线路或设备发生了直接威胁安全运行并需立即处理的缺陷，否则随时可能造成设备损坏、人身伤亡、大面积停电或火灾事故；重大缺陷指对人身或设备有严重威胁，暂时尚能坚持运行但需尽快处理的缺陷；一般缺陷指紧急缺陷、重大缺陷以外的性质一般，情况较轻，对安全运行影响不大的缺陷，多以铭牌脱落、数字表无显示、呼吸器硅胶变色、轻微渗漏油、计数器损坏等缺陷最为常见。

直流主设备紧急缺陷统计情况如图 1-3 所示，交流滤波器电容器引起的

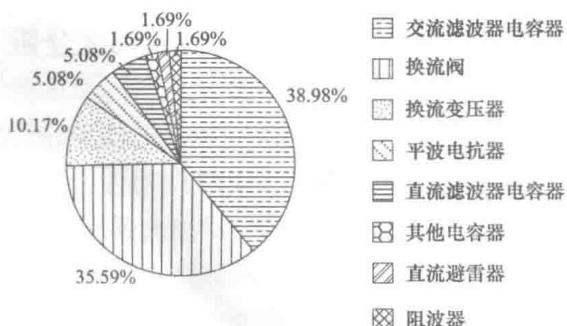


图 1-3 某电网公司直流主设备紧急缺陷情况

紧急缺陷占比最大, 达到了 38.98%; 紧随其后的是换流阀和换流变压器, 分别占 35.59%、10.17%。通过了解上述主要设备数量, 可以得出以上缺陷记录统计涉及的几种主要交流设备的数量统计情况, 如表 1-2 所示。

表 1-2 缺陷记录统计涉及几种主要设备的数量统计

设备名称	数量 (约数)	设备名称	数量 (约数)
MRTB	65	电容器	450
油浸式换流变压器	225	换流阀	40
直流避雷器	300		

在了解缺陷记录数量基础上, 结合各设备的数量进行进一步分析。上述各设备的缺陷记录数量除以设备台数, 即可得到归一化的设备缺陷数, 定义其为单台设备缺陷数, 结果如图 1-4 所示。

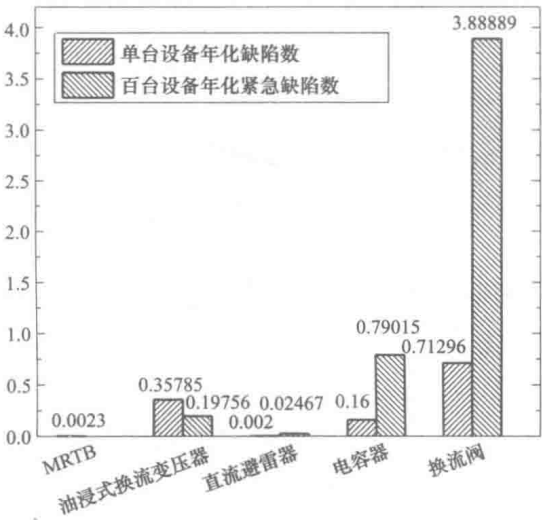


图 1-4 归一化缺陷记录数情况

单台设备缺陷数前两名的设备为换流阀和油浸式换流变压器, 对于百台设备缺陷数, 换流阀、电容器以及油浸式换流变压器分别前三名。综合缺陷记录数统计情况和紧急缺陷数统计情况, 可见换流阀和换流变压器由于其结构异常复杂, 状态量众多, 因此单台设备缺陷数较多。

图 1-5 所示为各个设备的紧急缺陷率, 即某个设备的紧急缺陷占全部缺陷数的比例。直流系统用避雷器紧急缺陷率最高, 金属氧化物避雷器较易发生绝缘击穿, 而一旦发生绝缘方面缺陷, 将有更大的可能是紧急缺陷。换流阀以

及电容器的紧急缺陷概率较高，因此也应加强对该设备的关注。

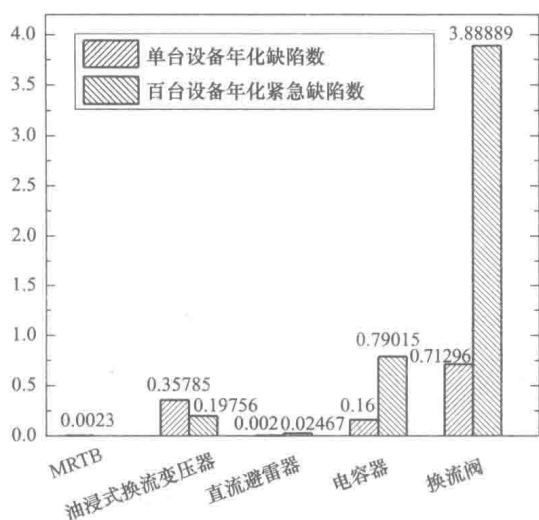


图 1-5 设备紧急缺陷概率

由于源数据质量、统计方式等数值并不十分精确，因此上述分析只能做参考使用，结果的具体数值意义并不大，而其相对的大小更具说明价值；除此之外，缺陷记录数极小的设备（如 MRTB）由于可能存在较大的误差，其参考分析意义亦不大。

综上所述，对设备缺陷的统计可以对设备及设备参量的重要度起到参考作用，进而实现依据状态参量重要度决定其报送途径和呈现范围的目的。

1.3 本章小结

本章主要对以下几个方面的内容作了概要介绍与说明，主要包括：

（1）直流换流站主设备状态监测与评价现状。主要对国内外当前直流主设备的状态监测与评价方法进行归纳总结，分别就直流换流变压器、直流干式平波电抗器、换流阀、穿墙套管、直流接地极等 13 类直流主设备状态监测与评价方法的研究现状进行了介绍。

（2）直流主设备缺陷记录统计分析。主要对南方电网公司近 13 年直流系统的直流主设备运行情况和缺陷记录进行了整理统计，使读者对于直流主设备运行中的缺陷情况和缺陷类型有了较为总体的把握。

第2章



换流站直流主设备状态监测基础参数体系

完备全面的设备状态基础参数体系是换流站直流主设备状态监测关键参数体系建立的基础。本章在对现有的换流站直流主设备可获得的适用于设备健康状态及风险评估的各种资料、数据、记录等内容进行详细归纳与总结的基础上,提取出能反映主设备状态的状态参量或相关参数,并按照静态参数、动态参数、准动态参数三类进行整理,由此建立起的换流站直流主设备状态监测基础参数体系,以便能从中进一步提取出反映换流站直流主设备状态的关键参数体系。

2.1 基础参数体系总体设计思路

设备状态基础参数体系是换流站直流主设备状态监测关键参数体系的建立的基础。本书通过梳理现有换流站直流主设备的电网运行参数、停电预防性试验参数、在线监测参数、人工巡视数据及带电测试数据,结合设备台账信息、出厂试验信息等参数,提取了能全面反映主设备状态的基础参数体系,按照静态参数、动态参数、准动态参数进行数据整理,为反映换流站直流主设备状态的关键参数体系提供数据源,总体结构如图 2-1 所示。

2.1.1 静态参数

静态参数主要包括:

- (1) 设备台账参数。包括设备名称、生产厂家、型号、出厂日期、投运日期、设备详细参数等。
- (2) 投运前试验参数。包括型式试验、出厂试验、交接试验、启动调试、