

JIAOZHILIU HULIANSHOUDUAN DIANWANG
GUZHANG TEZHENG BIANYIFENXI

主 编 张文峰
副主编 黄明辉 刘之尧 陈志光

交直流互联受端电网 故障特征变异分析



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

JIAOZHILIU HULIANSHOUDUAN DIANWANG
GUZHANG TEZHENG BIANYIFENXI

交直流互联受端电网 故障特征变异分析

主 编 张文峰
副主编 黄明辉 刘之尧 陈志光



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书基于交直流互联电网这一全新的电网运行环境,从机理层面系统地挖掘交直流系统相互作用的本质,深入研究交直流混合系统的故障电气特征变异,并提出其对传统继电保护影响的解决方案。本书内容源于作者在电网运行方面的经验积累和承担的广东电网科技项目等有关的最新研究成果。

全书共9章,针对直流系统引发交直流互联受端电网的电气特征变异这一特殊问题,从故障特征变异机理、分析方法、实际工程实践等方面开展全方位梳理和研究。主要内容包括:交直流相互影响途径与机理分析、故障特征变异机理及其对交流保护的影响分析、暂态功率倒向研究、直流偏磁问题和电压稳定问题。

本书密切结合国内交直流互联系统实际,力求理论与应用并重,可供电力系统相关专业的技术人员和高校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

交直流互联受端电网故障特征变异分析/张文峰主编. —北京:
中国电力出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-5123-5964-2

I. ①交… II. ①张… III. ①电力系统-故障-研究 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 116573 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年2月第一版 2015年2月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 13印张 228千字

印数 0001—2000册 定价 56.00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

编 委 会

主 编 张文峰

副 主 编 黄明辉 刘之尧 陈志光

编写人员 李晓华 蔡泽祥 曾耿辉

张 弛 李一泉

前言

高压直流输电由于其技术和经济上的独特优势,在我国远距离大容量输电和大区联网两方面得到了广泛的应用。预计到2020年,我国建设的直流输电工程将达50项左右,其中包括30多项特高压工程。随着“西电东送”和全国联网的全面实施,交直流互联电力系统的格局已在我国的华南、华东、华北电网中出现,我国已进入超(特)高压交直流混合大电网运行时代,其输送容量之大、落点之密集、运行调控之复杂均属世界罕见。世界范围内,北美、巴西、印度等电网也呈现交直流互联大电网的发展趋势。这种交直流并重的交直流互联电网运行模式,是一种全新的电力系统形态,目前尚缺乏完善的理论支撑与经验积累,因此给电力系统的安全运行带来了严峻挑战。

交直流互联系统的出现,给电力系统故障暂态过程与继电保护带来了一系列新的问题。由于直流及其控制系统特有的大电流、非线性快速响应特性,交直流互联系统故障暂态过程的作用机理、故障特征、动态特性等与传统交流电力系统或例如背靠背联网的交直流互联电网有很大差异,它突破了传统电力系统继电保护架构体系的认识框架。近年来,我国交直流互联系统出现的一系列交/直流继电保护不正确动作事故,正说明了这一问题的严重性,亟待建立新的方法理论与分析手段。交直流互联系统故障分析与继电保护动态行为的相关研究工作与工程实践是国内外的热点领域,主要研究成果比较零散地分布于学术论文和研究报告,尚未形成完整的系统论述和专著。

本书正是在这样的背景下完成的,是国内外首先系统论述交直流互联系统故障暂态分析与继电保护动态行为的理论与应用的专著。本书继承了我国在传统电网继电保护的研究与运行方面的体系与经验积累,在充分研究国内外交直流互联系统继电保护主流技术的基础上,从相互作用途径、故障变异机理、分析方法、继电保护原理、实际工程实践等方面开展全方位梳理和研究。

全书分为9章:第1章为概述,第2章为交直流互联受端电网的特性,第3章为交直流互联电网相互影响途径与机理分析,第4章为交直流互联电网故障特征变异机理分析,第5章为交直流互联电网故障特征变异对交流保护的影响分析,第6章为交直流互联受端电网故障暂态功率倒向研究,第7章为交直流互联受端电网的直流偏磁问题,第8章为变压器直流偏磁机理及其对继电保护的影响,第9章为交直流互联受端电网电压稳定问题。李晓华负责全书的统

稿工作，朱林、张哲、刘强、周冠波、晏寒婷在编写过程中提供了大量帮助，在此表示衷心的感谢。

本书内容源于广东电网调度控制中心电网运行经验及其与华南理工大学、南京南瑞继保电气有限公司等单位长期合作研究的工作积累。本书密切结合国内外交直流互联系统实际，力求理论与应用并重，可供电力系统相关专业的技术人员和高校师生阅读参考。

本书在编著过程中，得到了许多专家和领导的鼓励和支持，参阅了大量参考文献。在此，谨对所有支持和参与本书编写、出版的专家、领导表示衷心的感谢。由于本书涉及内容广泛，著者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者不吝批评指正。

编 者

2015 年 1 月

目 录

前言

第 1 章	概述	1
第 2 章	交直流互联受端电网的特性	4
2.1	直流输电系统特性	4
2.2	受端电网特点	10
第 3 章	交直流互联电网相互影响途径与机理分析	13
3.1	交直流互联电网相互影响途径	13
3.2	交直流互联电网相互影响主要形式评价	14
3.3	直流特性分析	43
3.4	同时计及交流系统故障与直流控制响应的分析方法	50
3.5	交直流互联电网对交流继电保护的挑战	52
第 4 章	交直流互联电网故障特征变异机理分析	59
4.1	故障特征变异的概念	59
4.2	基于竞争的故障特征变异机理分析	60
4.3	扰动下直流系统动态特性分析	62
第 5 章	交直流互联电网故障特征变异对交流保护的影响分析	66
5.1	变化量方向元件	66
5.2	零序元件	69
5.3	负序元件	76
5.4	距离元件	82
5.5	差动元件	86
第 6 章	交直流互联受端电网故障暂态功率倒向研究	91
6.1	暂态快速功率倒向机理研究	91
6.2	理论分析的故障实例验证	96
6.3	影响保护动作的因素分析	101
6.4	保护运行环境对保护动作行为影响及建议	104
6.5	暂态快速功率倒向影响范围评估	109

第7章 交直流互联受端电网的直流偏磁问题	125
7.1 直流偏磁的物理现象及来源	125
7.2 直流偏磁对电力系统的危害	129
7.3 国内外对直流偏磁的研究动态	134
7.4 广东电网直流偏磁分析	138
第8章 变压器直流偏磁机理及其对继电保护的影响	143
8.1 变压器直流偏磁机理	143
8.2 变压器直流偏磁的影响因素	148
8.3 变压器允许的直流电流大小	150
8.4 变压器直流偏磁对继电保护的影响	152
8.5 变压器直流偏磁的抑制措施	154
8.6 直流偏磁抑制措施比较及其对继电保护的影响	161
第9章 交直流互联受端电网的电压稳定问题	168
9.1 概述	168
9.2 受端电网的电压稳定性的影响因素分析	169
9.3 受端电网电压稳定的分析方法	185
9.4 直流闭锁故障对受端电网的电压稳定性的影响	189
9.5 提高交直流互联电网电压稳定性的措施	191
参考文献	197

概 述

我国发电能源资源和用电负荷的分布极不均衡使得超远距离、超大容量的电力传输成为必然。高压直流输电,由于其技术和经济上的独特优势,在我国远距离大容量输电和大区域联网中得到了广泛的应用,是我国跨区电网的重要骨架。随着“西电东送”和全国联网的全面实施,交直流互联电力系统的格局已在我国的华南、华东、华北电网中出现。世界范围内,北美、巴西、印度等国外电网也呈现交直流互联大电网的发展趋势。我国的这种交直流并重的交直流互联电网模式,输送容量之大、落点之密集、运行调控之复杂均属世界罕见。

多馈入交直流输电系统是交直流联合输电方式的必然产物,即一个系统中存在多条直流输电线路,且其中若干换流站的交流母线间的电气距离较近。一般可将多馈入交直流输电系统分为 3 种类型:①只和整流站密切关联(即送端系统);②只和逆变站密切关联(即受端系统);③同时和整流站和逆变站关联。其中以第二种类型系统的稳定问题最为严峻,因为这类系统严重依赖系统外的电源,系统本身往往缺乏电源和动态无功支撑,事故时的调压、调频能力差,通常属于“受端弱系统”。

在我国南方电网中,目前已运行有天生桥至广州 $\pm 500\text{kV}$ 直流工程(天广直流)、三峡至广州 $\pm 500\text{kV}$ 直流工程(三广直流)、安顺高坡至肇庆 $\pm 500\text{kV}$ 直流工程(高肇直流)和兴仁至深圳宝安 $\pm 500\text{kV}$ 直流工程(兴安直流)。南方电网是世界上目前最复杂的交直流互联电网,且所有直流线路落点分布在珠江三角洲 100km 的范围内,这使得受端的广东电网成为交直流系统相互影响作用最集中、最复杂的多馈入交直流混合(受端)系统。

直流输电技术被广泛应用及带来巨大经济利益的同时,也产生了一定的技术和管理上的新问题,给交直流电力系统运行带来了新的挑战。在这种新的运行方式下,一些特殊问题需要关注,例如,在换流站交流母线间电气联系较强的情况下,交直流系统之间、直流与直流系统之间的相互作用很强,若系统中出现扰动,交直流的相互竞争可能会导致系统总体性能的明显下降,甚至威胁

到系统的安全稳定运行。因而,无论从理论上还是从工程上,都有必要加强对多馈入交直流电力系统运行中所引发的特有问题的研究。

与传统交流系统相比,直流输电系统除了表现出与交流系统迥异的电气特征,直流系统的运行工况还会对传统交流系统的运行造成一定的影响。多年来交直流互联电网运行经验表明,尽管在大部分情况下,直流系统的接入对原交流系统二次设备,尤其是继电保护设备的影响可忽略不计,但在特定工况下,直流系统的接入,却会引发交流系统的电气特征变异,进而影响继电保护等二次设备的动作行为,严重情况下还会导致继电保护装置的误动作。理论分析和实践经验表明,直流输电系统中的逆变器对受端交流系统的故障相当敏感,与逆变站在物理距离很远的交流故障都有可能引起直流系统的换相失败。由于直流控制系统非线性的快速响应,在换相失败及其恢复过程中直流输电系统电气量的快速变化给交流系统带来巨大冲击,完全突破了纯交流系统中继电保护设计时所考虑的工况和时序配合,因此继电保护的安全运行面临重大挑战。

迄今为止,我国电网中已出现多起在故障工况下因交直流系统的相互作用而导致交流继电保护误动的事故。以南方电网为例,2005年12月发生的横东甲乙线保护误动事故和2003年6月发生的北涌乙线保护误动事故,均是因交流事故引起直流系统换相失败,交流输电线路的功率出现快速倒方向,即“暂态功率倒向”,引发保护误动而导致重要线路不必要的跳闸,使原交流事故扩大,对交直流电力系统的安全稳定构成重大威胁。这些事故充分暴露出交直流互联系统在工作机理、运行方式、电气特征等方面与传统交流系统有很大差异,已成为影响交流侧继电保护判据并导致保护误动的不可忽视的重要因素。这一问题不仅表征在某个特定换流站、变电站或某次事故中,更是在新的电网运行环境下出现的新问题。

值得注意的是,几次典型“暂态功率倒向”引起保护误动事故,无论电网结构、故障类型、故障位置还是电网潮流分布等因素都不同。在交直流互联电网下,直流系统对交流故障的响应完全突破了纯交流故障模式,在短暂的电磁暂态过程中由于直流系统的巨大扰动性,从电气特征来看直流系统可表现为另一个故障点。从大量的电网运行统计数据和研究来看,这种特殊形式的复故障大多表现为交流电网故障后的一种常态模式,交流继电保护的误动仅在某一特定条件下才会激发。由于交直流互联电网运行方式复杂多变,在故障的电磁暂态过程中电气量表征出复杂的非线性特征,因此判断直流输电系统是否对继电保护的動作行为造成影响,是一项极具难度的研究内容。

近年来,国内外学术界和工程界围绕交直流电力系统的安全稳定运行方面展开了一系列高水平的研究,对交直流系统相互作用和影响的研究重点集中在

机电暂态及更长的时间框架内，而在故障工况下的电磁暂态过程中对直流输电系统的非线性特性，特别是直流系统对交流故障特征和继电保护的影响方面的研究国外基本为空白，我国则处于起步阶段。因此从机理层面系统地挖掘交直流系统相互作用的本质，深入研究交直流混合系统的故障电气特征变异，并提出其对传统继电保护影响的解决方案，已经成为直流输电快速健康发展的重要前提。

本书基于交直流互联电网这一全新的电网运行环境，深入研究交直流系统相互作用机理和影响；针对电网的结构特点，研究运行方式、故障类型和扰动地点对各逆变站的影响，寻找可能引发逆变站换相失败或对交流系统产生新影响的事故类型；在此基础上分析这些影响给交流系统继电保护带来的负面效应，并制订相应的对策，以确保电网安全运行。

交直流互联受端电网的特性

我国南方电网是一个典型的多馈入直流输电系统（多条直流馈入广东电网），交直流混合运行。目前南方电网有 10 条“西电东送”大通道，其中天广直流、高肇直流、兴安直流与 6 条 500kV 交流通道并联运行；另加三广直流共 4 条直流同时馈入广东 500kV 主网架。换流站间电气距离较近，其多馈入直流特性对广东电网安全稳定性的影响一直备受关注。随着特高压交直流输电项目的启动，“十一五”期间，规划建设了额定输电容量为 500 万 kW 的云南—广东第一回±800kV 直流输电工程，在 2009 年 6 月实现单极投运、2010 年 6 月实现双极投运。“十二五”期间南方电网还将建成糯扎渡—广东±800kV 直流输电通道，规划输电容量为 500 万~600 万 kW。这些直流线路与多回长距离交流线路同时向珠江三角洲地区送电，对于整个广东电网的规划和运行都是严峻的考验。

2.1 直流输电系统特性

2.1.1 运行特殊性

1. 传输容量巨大，对无功功率需求大

直流输电不存在同步稳定性问题，因此更适合大功率远距离输电。500kV 交流线路的自然功率为 1000MW，通常区域内 500kV 交流线路输送的功率小于此值。广东电网内直流输电的额定容量超过单回 500kV 线路的容量：天广直流容量为 1800MW；三广直流容量为 3000MW；高肇直流容量为 3000MW；兴安直流容量为 3000MW。故障后直流停运或功率大幅波动可能会引发交流线路严重过载。

正常运行直流需要的无功功率为其输送有功功率的 50%~60%。

2. 正常运行对交流系统容量有要求

交流系统的强度由它的系统阻抗及机械惯量来表征，其系统阻抗的大小由发电机、变压器、输电线和负荷等因素决定。交流系统越弱，其系统阻抗越

大,电压产生波动的可能性也越大。对于交流输电系统,限制其输送能力的主要因素是功角稳定和动态无功支持。对于直流输电系统,不存在功角稳定问题,但对其输送能力却是有限制的,决定性因素是所联交流系统的强度。阻抗较大,机械惯性较小的交流系统为弱交流系统。

高压直流输电系统换流器处交流系统的强弱直接影响系统的动态性能,对于弱交流系统的系统特性的研究可追溯至最早的直流输电工程。近年来,国际大电网会议(CIGRE)也专门成立联合小组对直流系统所联交流系统强弱对系统动态性能的影响开展了研究,并提出了划分系统所联交流系统强弱的准则。单一直流时,交流系统的强度可以通过母线的短路比(SCR)来表示,即用交流系统在直流节点处的短路容量与直流的额定功率传输值之比来表示交流系统相对直流系统的强弱。该值与交流系统的等值系统导纳的标幺值相对应。

从换相的角度,SCR实质上给出了在直流额定功率下,直流电流与交流系统提供的换相电流之间的比例关系。交流系统越强,SCR越大,正常时换相过程越短,其发生换相失败的可能性越小。交流系统的强弱是相对于直流系统的输送能力而言的,弱交流可以理解为所联交流系统本身强度较弱或者交流系统发生故障时其强度变得很弱,更为实际的考虑是交流系统发生故障时其强度变弱的情况。

2.1.2 控制的快速性和灵活性

直流输电(HVDC)的优点之一就是可以通过换流器触发相位的控制来实现快速和多种方式的调节。

1. 基本控制

直流输电的运行方式取决于整流侧和逆变侧换流器的控制方式。具体地,HVDC控制的基本方式有定电流控制、定电压控制、定延迟角 α 控制、定超前角 β 控制、定熄弧角 γ 控制和定功率控制等。整流侧常用定电流 I_d 或者定功率 P_d 控制方式;逆变侧常用恒定熄弧角 γ 或者恒定整流侧电压 V_{dy} 控制。在有些情况下,整流侧变为最小触发角 $\alpha_{\min}$ 控制,逆变侧变为恒定电流 $I_d - I_m$ 控制。以上这些控制是通过调节整流器的触发延迟角 α 或逆变器的触发超前角 β (或熄弧角 γ)实现的,即调节加到换流阀控制极或栅极的触发脉冲相位,快速而大范围地控制直流线路的电流、电压和功率,所需时间为1~10ms,也称为栅/门极控制或控制极调节。

2. 高级控制

直流输电控制,除了上述基本控制策略外,还具有多种为满足交直流系统动态性能要求的控制策略,主要有以下几种:

(1) 降低和避免交流系统对直流系统造成的扰动。

(2) 降低和避免直流系统对交流系统造成的扰动。

(3) 提高应对通信故障的系统动态性能。

3. 特殊控制

(1) 启停控制。直流架空线路的短路故障大多是瞬时性的，因此在紧急停止之后，还可以进行自动再启动，重新恢复送电。这相当于交流线路发生故障后交流断路器跳闸和自动重合闸的控制，但其引起的扰动小。再启动与正常启动相似，但比后者快得多，通常再启动时间为 $0.2 \sim 0.3s$ 。

(2) 潮流反转。换流站的直流电压实际上可以通过电子控制进行确切的设定，而且没有任何延迟，即可以通过高压直流系统对负荷潮流进行任意控制，因此，可以使电力潮流保持恒定，不受两个相联交流系统的瞬时功率平衡的影响，一个系统的机电振荡不会影响电能的传输，也不会对与之相联的另一个交流系统产生任何影响。如果需要，可以使潮流迅速停止，或使其反转方向。

2.1.3 特殊问题

1. 控制特性约束电气特性

直流输电系统正常运行及各种扰动下的电气特性与其控制特性密切相关，具有很强的非线性。

交直流输电系统中交直流间的相互作用十分复杂，当交流系统较弱或交流系统负荷较重时，系统的运行便可能产生一系列问题，如逆变器发生换相失败、直流系统在扰动后难以快速恢复、产生交流过电压，还可能引起谐波不稳定等问题。此外，直流输电系统对交流系统中发生的故障相当敏感，当逆变站交流母线电压下降 $10\% \sim 15\%$ 时，就将不可避免地导致逆变器换相失败，这意味着直流系统功率输送的短时中断，因此要求这时的直流系统能快速进行自我恢复以缓解交流系统内功率的不平衡。

例如，作为一种频率不敏感负荷，相应于交流系统中的某个扰动，直流系统本身并不为发电机提供同步功率，相反，它还会对发电机提供负的阻尼转矩。又如，当交流电压下降时，以定熄弧角工作的逆变器的功率因数会下降，继而引起交流电压的下降，并有可能导致交流系统的电压失去稳定；另外，为换流器提供无功补偿的电容器和滤波器也会对交流电压的恢复产生不利影响。

2. 换相失败

高压直流系统中的换流单元采用三相桥式整流电路。这种电路通过在不同的时刻触发特定的一组阀实现交流和直流间的转换。换流器从某一组阀导通状态转变为另一组阀导通状态的过程称为换相过程，实际上是电流从某一组阀到另一组阀的转移过程。由于在换相期间回路存在电感，因此电流转移不可能瞬时完成，需要一个过程，可以用电角度表示为换相角 μ 。它的大小与直流电

流、换相电压、换相电抗以及触发角 α 等因素有关。

在交流电压下降、直流电流增大、触发角 α 过大等情况下，换相角 μ 将增大。在两个桥臂之间换相结束后，如果 β 太小或 μ 太大，就会出现刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内未能阻断，或者在反向电压期间换相过程一直未能进行完毕的情况，这两种情况在阀电压转变为正向时，被换相的阀都将向原来预定退出导通的阀倒换相，即换相失败。

整流器在电流关断后的较长时间内处于反向电压下，有足够时间完成载流子的复合过程，恢复阻断能力。所以仅当触发电路发生故障时，整流器才会发生换相失败。而逆变器桥阀在关断期内大部分时间承受着正向电压，因此，直流输电系统中大部分换相失败都发生在逆变器。

在常规的直流输电系统中，逆变器必须在受端交流系统提供的换相电压支持下才能正常工作。受端交流系统发生的故障，包括三相短路、两相短路、两相对地短路、单相对地短路以及断线等会使逆变站交流母线电压的幅值、相位和波形发生变化，这些变化将可能引起逆变器的换相失败。换相失败是逆变器常见的故障，会导致直流电压降低、直流电流增大、交流侧短时开路等后果。若换相失败后控制不当，还可能会导致最终的直流传输功率中断。

逆变侧交流系统故障对直流系统的影响比整流侧严重，主要表现在故障期间由于换相电压的降低，使直流输送功率也相应降低；当换相电压发生瞬间迅速下降和相位变化时，破坏了逆变器的正常换相，造成逆变器的直流电压阶段性的短接为零。在逆变器电压为零期间，一方面其交流侧输出功率也降低，即直流系统向受端交流系统输送的功率降低；另一方面当逆变器的直流电压为零时，相当于直流线路末端短路，造成直流回路中电流上升。

在换相失败期间，无功潮流发生显著变化。当逆变器发生换相失败瞬间，逆变器的直流电压为零时，相当于直流线路末端短路，造成直流回路中电流上升，此时整流器将消耗更多的无功功率，使得换相电压下降，整流侧电流控制器增大触发角以限制直流电流。换相失败后逆变侧直流电压为零，直流功率下降甚至降到零，换流器的无功消耗下降，结果使滤波器和电容器组发出的无功功率流入交流系统，这会导致在弱系统中出现过电压。

3. 直流偏磁

交直流电网共同运行时，尤其是高压直流输电在发生事故或者检修时常以大地作为回路运行，接地极巨大的直流电流以大地构成回路，使得各个接地点之间存在一定的电位差（如图 2-1 所示）。这个电位差会使一定的直流电流从变压器一次侧的中性线向变压器注入。侵入到交流系统的直流电流的大小除了与换流站和变电站的距离、交流电网的构成及参数因素有关外，还与电流流经

的土壤电阻率密切相关。电阻率高的地方更容易形成高的电位差，相应地入侵到交流系统的直流电流也就越大。

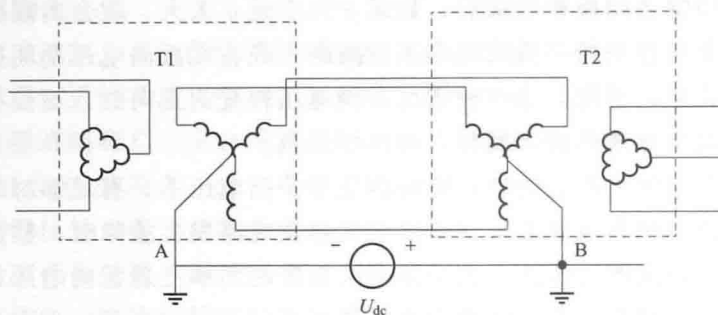


图 2-1 具有接地中性点的变压器供电系统

偏磁直流电流越大，电流畸变越严重，畸变励磁电流中直流分量增长越快。由此可以得出一个重要结论：外部强制流入变压器绕组的直流电流仅一部分成为偏磁电流，另一部分转换为励磁电流畸变后的直流分量（也可理解为被励磁电流畸变后的直流分量所抵消）。变压器的这一特性一定程度上有利于减缓外部直流电流的影响。

当变压器绕组中有直流电流流过时励磁电流会明显增大，这会对设备运行产生如下影响。

(1) 噪声增大。CIGRE 导则认为，对于单相变压器，当直流电流达到额定励磁电流时，噪声增大 10dB；若达到 4 倍的额定励磁电流，噪声增大 20dB。例如，高肇直流 750MW 单极大地回路运行方式下，春城站主变压器中性点直流电流为 34.5A，噪声为 93.9dB，谐波电压总畸变率达 2.1%。

在直流偏磁下，变压器励磁电流不仅含有奇次谐波，而且还含有偶次谐波分量。因此，在直流偏磁下，变压器的噪声频谱既有奇次波分量（450、550、650Hz 等），也有偶次波分量（500 和 600Hz 等）。此外，变压器中增加的谐波成分会使变压器噪声频率发生变化，还可能会因某一个频率与变压器结构部件发生共振，从而使噪声增大。

(2) 局部过热。直流偏磁引起严重的磁饱和，会使正常情况下在铁芯中闭合的磁通部分离开铁芯，使变压器金属结构件损耗增加，导致局部过热现象，破坏绝缘，损坏变压器或降低使用寿命。由于用于发电厂的变压器总是处于满负荷运行，很难保存余量去吸收由直流引起的额外发热，因此最易受损。

(3) 无功需求急剧增大。在变压器中，由于励磁电流滞后于系统 90° ，因此系统中将会产生无功功率的损耗（通常情况下此损耗很小）。变压器的直流

偏磁使变压器铁芯急剧饱和，无功需求急剧增大。

1989年3月13日，磁暴引起的偏磁电流导致了加拿大魁北克电网的大停电，起因是偏磁电流使变压器铁芯急剧饱和，谐波大增，使电网静止无功补偿装置（SVC）的继电保护误动作，大量电容器退出运行，系统电压崩溃，最终失去9500MW负荷，电网解列近9h。

4. 谐波

直流系统运行特性是通过整流逆变方式实现交→直→交的转变，这就决定了它是一个谐波源，在整流侧表征为谐波电压源，在逆变侧表征为谐波电流源。

在理想化的条件下对于脉动的换流器，电网侧的线电流中只含有 $12k \pm 1$ ($k=1, 2, 3, \dots$) 次的谐波分量，而5、7、17等次谐波仅在换流变压器的阀侧绕组中环流，而在网侧绕组中相互抵消。 $12k \pm 1$ 次的谐波分量称为脉动换流器交流侧的特征谐波；而在脉动换流器的直流侧电压中，只含有 $12k$ (k 为自然数) 次的谐波电压，将其称为12脉动换流器直流侧的特征谐波。

由于交流系统中存在一些负荷或元件参数的不完全对称、换流变压器三相的换相电感可能不完全相同、换流阀的触发脉冲间隔不完全相等、换流器直流侧连接的平波电抗器的电感值为有限值等原因，换流器的交流侧和直流侧不仅存在着特征谐波，而且还会产生其他次数的谐波分量，这些谐波分量称为非特征谐波。

文献通过对在单极和双极系统调试期间，在肇庆换流站（逆变站）交流出线处录得的谐波数据进行比较分析，得到以下几个结论：

- (1) 在直流系统稳态运行时各次特征谐波电流的最大值，一般发生在降压运行方式时。
- (2) 各种工况下偶次谐波电流值通常远低于奇次谐波电流值。
- (3) 大地回线方式产生的谐波分量比金属回线方式产生的谐波分量大。
- (4) 由于受到逆变站交流母线的电压限制，交流滤波器在小负荷工况下性能难以完全满足要求，但综合性能可以满足。

此外，还分析了各种暂态过程中的谐波规律，其中包括运行方式转换、线路接地故障、换相失败丢失脉冲等暂态过程对换流变压器网侧谐波分布的影响。其中换相失败丢失脉冲可能是由于交流扰动或由于换流器控制功能紊乱引起，由系统扰动引起的换相失败会在直流电压和电流中产生二次谐波电压振荡，阀的控制故障会引起基频振荡。换相失败会造成谐波电流的总畸变率超标，但程度并不严重。与直流系统稳态运行时相比，直流系统的各种暂态过程有以下几个特点：