



变压器直流偏磁及其治理

蒋 伟 著

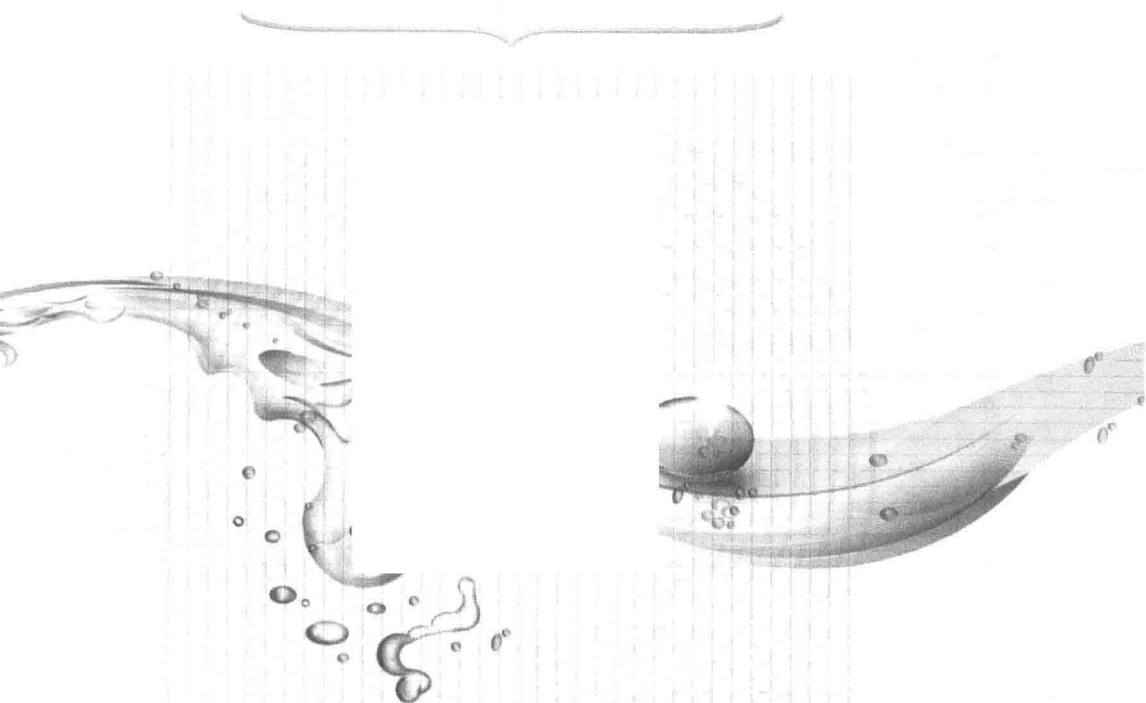


西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



变压器直流偏磁及其治理

蒋 伟 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

变压器直流偏磁及其治理/蒋伟著. —西安:西安交通大学出版社, 2016, 10
ISBN 978-7-5605-9134-6

I. ①变… II. ①蒋… III. ①变压器-直流输电-研究
IV. ①TM4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 268612 号

书 名 变压器直流偏磁及其治理
著 者 蒋 伟
责任编辑 李 佳

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 720mm×1000mm 1/16 印张 17.25 字数 328 千字
版次印次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-9134-6
定 价 198.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82669097 QQ:8377981
读者信箱:lg_book@163.com

版权所有 侵权必究

前 言

特高压直流工程具有“大容量、远距离”输电的优点,能有效缓解我国能源与负荷中心分布不均衡的矛盾,促进实现“西电东送、南北互供、全国联网”的电力发展战略。但是,特高压直流输电单极运行时产生的地电流会导致变压器出现直流偏磁现象,此时变压器铁芯半周磁饱和,漏磁增加,引起变压器振动加剧、噪声增大、局部过热等不良反应,影响变压器运行的稳定性和可靠性。本书以西南水电特高压直流外送为背景,围绕直流偏磁电流的产生、变压器直流偏磁的机理及影响、直流偏磁治理措施、变压器接小电阻抑制直流偏磁、直流偏磁电流的检测与在线监测展开论述,结合四川电网变压器受直流偏磁影响的现状,提出了治理建议。

本书对变压器直流偏磁问题进行了深入的理论研究,具有广泛的应用价值,力求将概念、理论分析、现场检测及案例剖析融为一体。本书可加强读者对变压器直流偏磁现象的认识,为偏磁电流的治理提供理论支持。本书适合于电力系统运维人员、电气工程专业学生、变压器设计制造技术人员等。

感谢国网四川电科院副院长张星海对本书的指导。本书还得到了西南交通大学教授吴广宁的指导和大力帮助;本书的前期研究得到了国网公司处长黄震、国网山西电科院副院长续建国的支持;书中直流偏磁电流的检测工作得到了国网四川省电力公司运检部处长王红梅、吴晓晖、李成鑫,以及国网四川电科院设备状态评价中心和电网技术中心同事们的支持,在此一并感谢。

由于时间紧迫,书中不妥之处欢迎广大读者批评指正。

作 者

2016年7月16日

目 录

前 言

第 1 章 绪论	(1)
1.1 直流接地极电流对变压器的影响	(1)
1.1.1 我国直流输电的发展	(1)
1.1.2 我国特高压直流输电的规划	(6)
1.1.3 变压器直流偏磁现象	(7)
1.2 国内外对直流偏磁的研究及治理现状	(15)
1.2.1 地表电位和地电流分布的研究	(15)
1.2.2 变压器直流偏磁的分析方法	(16)
1.2.3 变压器直流偏磁内部特性的研究	(18)
1.2.4 直流偏磁抑制措施的研究	(20)
1.2.5 我国直流偏磁的治理现状	(21)
1.3 本书主要内容	(29)
第 2 章 直流输电单极运行时的地表电位和地电流	(30)
2.1 高压直流输电系统构成及直流接地极电流的影响	(30)
2.1.1 两端直流输电系统	(30)
2.1.2 多端直流输电系统	(33)
2.1.3 直流接地极介绍	(34)
2.1.4 直流接地极电流的影响	(36)
2.2 直流接地极周边的地表电位分布	(40)
2.2.1 水平分层土壤的地表电位	(40)
2.2.2 垂直分层土壤的地表电位	(50)
2.3 直流接地极周边的地电流分布	(56)
2.3.1 交流电网中变压器直流量的计算模型	(56)
2.3.2 直流电流分布的实例分析	(58)
2.4 直流偏磁电流影响站点预测方法	(62)
2.4.1 预测方法原理	(63)
2.4.2 地表电位计算模型参数修正依据	(64)
2.4.3 直流偏磁电流在线监测	(64)
2.4.4 直流偏磁电流仿真模型修正	(65)

2.4.5 基于修正后仿真模型的直流偏磁影响站点预测	(67)
2.5 本章小结	(69)
第3章 变压器直流偏磁内部特性	(71)
3.1 变压器直流偏磁的机理	(72)
3.1.1 变压器的铁芯	(72)
3.1.2 直流偏磁下的励磁电流	(73)
3.1.3 直流偏磁下的磁致伸缩效应	(78)
3.2 变压器直流偏磁的有限元仿真分析	(79)
3.2.1 有限元法及 ANSYS 简介	(79)
3.2.2 仿真模型信息	(85)
3.2.3 模型建立以及加载	(87)
3.2.4 仿真结果分析	(93)
3.3 典型变压器铁芯直流偏磁时的内部特性	(99)
3.3.1 组式变压器直流偏磁时的内部特性	(99)
3.3.2 三相三柱变压器直流偏磁时的内部特性	(105)
3.3.3 三相五柱变压器直流偏磁时的内部特性	(111)
3.4 变压器铁芯直径变化对直流偏磁的影响	(116)
3.4.1 变压器铁芯直径选择的主要因素	(117)
3.4.2 铁芯直径变化对直流偏磁的影响	(117)
3.5 变压器油箱与直流偏磁的关系	(121)
3.6 本章小结	(124)
第4章 变压器直流偏磁治理措施	(126)
4.1 电阻限流法	(126)
4.1.1 电阻限流装置介绍	(126)
4.1.2 电阻限流装置的优点	(126)
4.1.3 电阻限流装置的不足	(127)
4.1.4 应用实例	(127)
4.2 电容隔直法	(130)
4.2.1 电容隔直装置介绍	(130)
4.2.2 电容隔直装置的优点	(131)
4.2.3 电容隔直装置的不足	(131)
4.3 直流电流反向注入法	(131)
4.3.1 直流电流反向注入法介绍	(131)
4.3.2 直流电流反向注入法的优点	(132)

4.3.3 直流电流反向注入法的不足	(132)
4.4 电位补偿法	(132)
4.4.1 电位补偿法介绍	(132)
4.4.2 电位补偿法的优点	(133)
4.4.3 电位补偿法的不足	(133)
4.5 直流偏磁治理措施对比	(133)
4.6 本章小结	(135)
第5章 变压器接电阻治理直流偏磁	(136)
5.1 中性点接电阻抑制变压器直流偏磁的原理	(136)
5.2 变压器接小电阻的过电压分析	(139)
5.2.1 变压器中性点的绝缘水平	(139)
5.2.2 部分接地方式变压器接小电阻后的影响	(139)
5.3 交直流系统接地电阻对直流偏磁电流的影响	(150)
5.3.1 直流偏磁电流的等效电路	(150)
5.3.2 直流偏磁电流的计算	(152)
5.3.3 各电阻对直流偏磁电流的影响	(152)
5.4 变压器中性点接阻抗装置的多用途直流偏磁防护方法	(157)
5.4.1 阻抗装置的结构	(158)
5.4.2 装置的工作原理	(158)
5.4.3 阻抗装置的性能要求	(164)
5.5 本章小结	(165)
第6章 变压器接电阻治理直流偏磁的网络优化配置	(166)
6.1 直流接地极电流分布变化问题	(166)
6.1.1 浙江电网直流接地极电流分布变化简介	(166)
6.1.2 新疆电网直流接地极电流分布变化简介	(169)
6.1.3 四川电网直流接地极电流分布变化简介	(169)
6.2 变压器接入小电阻网络配置的数学模型	(170)
6.2.1 目标函数	(170)
6.2.2 约束方程	(171)
6.3 TOPSO 算法的原理	(171)
6.3.1 双目标优化问题	(172)
6.3.2 标准 PSO 算法	(173)
6.3.3 双目标 PSO 算法	(174)
6.4 实例分析	(176)

6.5 本章小结	(178)
第7章 变压器直流偏磁电流现场检测及在线监测	(180)
7.1 直流偏磁现场检测	(180)
7.1.1 检测条件	(180)
7.1.2 检测方法	(182)
7.1.3 检测数据分析与记录	(182)
7.2 检测实例	(183)
7.3 直流偏磁电流在线监测	(186)
7.3.1 工作原理	(186)
7.3.2 主要器件	(187)
7.3.3 装置的时间同步及数据传输	(188)
7.3.4 设计及封装	(190)
7.3.5 监测系统结构	(198)
7.3.6 后台监测主要功能	(199)
7.3.7 软件系统	(202)
7.4 本章小结	(210)
第8章 四川电网变压器直流偏磁现状及治理建议	(211)
8.1 四川电网变压器直流偏磁现状	(211)
8.1.1 直流接地极电流对四川变压器影响简介	(211)
8.1.2 直流偏磁对 220 kV 幸福站主变的影响	(214)
8.1.3 直流偏磁对 220 kV 榆林站主变的影响	(220)
8.1.4 宾金特高压直流联调期间偏磁测试	(223)
8.1.5 方山电厂主变故障分析及直流偏磁情况	(226)
8.2 四川电网变压器直流偏磁治理建议	(236)
8.2.1 治理站点选择	(236)
8.2.2 变压器加装直流在线监测装置	(238)
8.2.3 变压器中性点加装电阻装置	(238)
8.2.4 直流偏磁防护建议	(241)
8.3 本章小结	(242)
结 论	(243)
附录 A: 宾金特高压直流联调期间四川偏磁检测结果	(246)
附录 B: 宜宾和泸州地区电网变电站分布	(266)
参考文献	(267)

第1章 绪 论

直流输电尤其是特高压直流输电具有输送距离长、容量大、控制灵活、调度方便、损耗低、输电走廊占地少等诸多优点,在我国得到推广应用。截止2016年9月,我国已经投运了格尔木-拉萨 ± 400 kV 直流输电工程,葛洲坝-南桥、天生桥-广州、三峡-常州、三峡-广州、贵州-广州、德阳-宝鸡、宁夏东-天津、呼伦贝尔-辽宁等 ± 500 kV 直流输电工程,宁东-山东 ± 660 kV 直流输电工程,向家坝-上海、锦屏-苏南、溪洛渡-浙江、云南-广东、哈密-郑州等 ± 800 kV 特高压直流输电工程。为进一步提高“西电东送”的输电能力,促进“南北互联、全国联网”,我国还规划或正建设一系列特高压直流输电工程,其中包括酒泉-湖南、灵宝-绍兴、上海庙-山东、晋北-南京等多条 ± 800 kV 特高压直流输电工程和准东-皖南 ± 1100 kV 特高压直流输电工程。多条超/特高压直流输电的投运,有效地缓解了我国能源与负荷分布不均衡的问题,满足了我国京津唐、长三角、珠三角等负荷中心经济快速发展的需求,促进我国建设以特高压电网为骨干网架的坚强电网。但是,超/特高压直流输电仍存在一些亟待解决的问题,如直流接地极电流对金属管线的腐蚀、接地极线路过电压与绝缘配合、变压器直流偏磁、特高压交直流混联电网稳定性等。本书针对直流输电导致的变压器直流偏磁问题,从直流接地极周边地表电位和地电流分布规律、变压器直流偏磁机理展开论述,在直流偏磁电流的现场检测、在线监测和防护措施等方面为变压器直流偏磁预警及治理提供技术支撑。

1.1 直流接地极电流对变压器的影响

1.1.1 我国直流输电的发展

1.1.1.1 我国能源与负荷的分布现状

我国的能源与负荷中心具有东西部分布不均衡的特点。尽管作为世界上水能资源最丰富的国家,可开发装机容量达3.78亿千瓦,年发电量为1.92万亿千瓦·时,但我国的水能资源分布极不均匀,90%的可开发装机容量集中在西南、中南和西北地区,特别是长江中上游干支流和西南地区河流。由于水电资源分布与用电负荷分布不平衡,客观上制约了水电的开发和利用。截至2008年底,全国水电装

机容量为 1.72 亿千瓦,年发电量达到 5633 亿千瓦时,分别占全国电力装机容量和年发电量的 21.6% 和 16.4%。我国煤炭资源也十分丰富,煤炭资源探保有储量为 1 万亿吨,居世界第二位,是世界上煤炭产量最多的国家,但煤炭资源主要集中在山西、陕西和内蒙古西部,占煤炭资源总量的 2/3 以上,火电开发集中在西北部地区。我国的东部沿海地区经济发达,仅北京、广东、上海等东部七省市的电力消费就占到全国的 40% 以上,但东部地区的能源资源非常短缺,只能从外地运煤建火电厂,一方面会造成大气污染严重,另外也会使交通运输压力增大。因此,我国电能的跨区域大规模流转是必然趋势。

水电具有可再生、清洁无污染、发电成本低等优点。我国计划在 2011~2020 年十年间共计新投产水电 14750 万千瓦,2021~2030 年十年间共计新投产水电 935 万千瓦(见图 1-1)。大力开发西部能源,建设直流输电尤其是特高压直流输电工程,向东部用电负荷中心送电,有利于缓解我国能源与负荷分布不均衡的矛盾,促进经济快速发展。

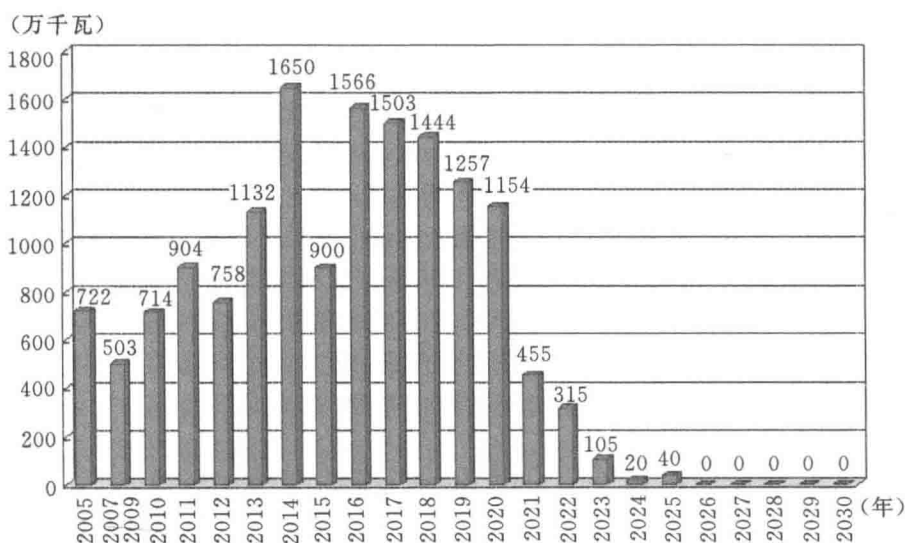


图 1-1 我国水电规划图

开发贵州、云南、广西、四川、内蒙古、山西、陕西等西部省区的电力资源,将其输送到电力紧缺的珠江三角洲、沪宁杭和京津唐工业基地是我国电力发展战略。“西电东送”将形成三大通道:一是将贵州乌江、云南澜沧江和桂、滇、黔三省区交界处的南盘江、北盘江、红水河的水电资源,以及黔、滇两省坑口火电厂的电能开发出来送往广东,形成南部通道;二是将三峡和金沙江干支流水电送往华东地区,形成

中部通道；三是将黄河上游水电和山西、内蒙古坑口火电送往京津唐地区，形成北部通道。

中国西部的水电资源丰富，仅四川、云南两省的水电可开发容量近 200 000 兆瓦。按照我国能源开发战略，近期将重点开发西南水电，采用特高压直流将电能输送到沿海经济发达地区（西南水电分布见图 1-2）。位于四川、云南接壤的金沙江水能资源可开发装机容量就达到 90 000 兆瓦，年发电量约 0.5 万亿千瓦时。金沙江下游溪洛渡、向家坝、白鹤滩和乌东德 4 个大型水电站，总装机容量达 39 600 兆瓦，一期工程开发 2 个电站，溪洛渡、向家坝电站分别于 2005 年底和 2006 年正式动工兴建，两座电站的装机容量合计 18 600 兆瓦，首批机组发电时间分别为 2012 年和 2013 年，所发电量主要送往华中、华东，送电距离约 1000~2000 km。向家坝电站的电能采用“直流±800 kV, 6400 MW”的特高压直流输送方式，溪洛渡电站的电能采用“直流±800 kV, 8000 MW”的特高压直流输送方式。

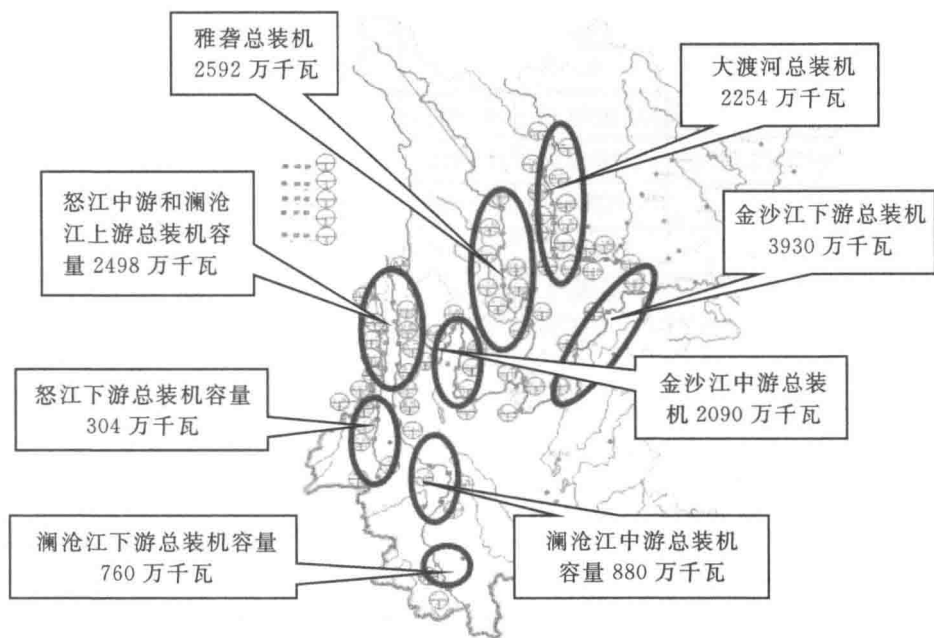


图 1-2 西南水电资源分布

1.1.1.2 我国直流输电的发展历程

直流输电具有“大容量、远距离”输电等优点，我国能源与负荷中心分布不均衡的特点促进了直流输电的快速发展。中国的直流输电是在 1958 年考虑长江三峡水利资源开发以及三峡电站电力外送问题时提出的。1987 年建成我国自行设计，全部采用国产设备的舟山直流输电工程（单极，-100 kV, 50 MW, 54 km）。舟山

变压器直流偏磁及其治理

直流输电工程拉开我国直流输电工程序幕后,多条直流输电工程已经建成并投入运行。

表 1-1 我国已经建成的直流输电工程

工程名 (直流输电工程)	输送容量 /MW	电压 /kV	电流 /A	距离/km	
				架空线	电缆
舟山	50	-100	500	42	12
葛洲坝—南桥	1200	±500	1200	1045	无
天生桥—广州	1800	±500	1800	960	无
嵊泗直流	60	±50	600	6.5	59.7
三峡—常州	3000	±500	3000	860	无
三峡—广东	3000	±500	3000	960	无
贵州—广东	3000	±500	3000	882	无
灵宝背靠背	360	120	3000	无	无
三峡—上海	3000	±500	3000	1048.6	无
贵州—广东二回	3000	±500	3000	1193	无
高岭背靠背	1500	±125	3000	无	无
云南—广东	5000	±800	2580	1412	无
向家坝—上海	6400	±800	4000	2150	无
锦屏—苏州	6400	±800	4000	2471	无
溪洛渡—浙江	8000	±800	5000	2164	无
哈密—郑州	8000	±800	5000	2210.2	无

1.1.1.3 直流输电工程的特点

1. 直流输电的优点

与交流输电相比较,直流输电具有下列优点。

(1) 输送相同功率时,线路造价低

对于架空线路,交流输电通常采用 3 根导线,而直流只需 1 根(单极)或 2 根(双极)导线。输送相同功率时,直流输电所用线材仅为交流输电的 $2/3 \sim 1/2$ 。另外,直流输电在线路走廊、铁塔高度、占地面积等方面,比交流输电优越。

对于电缆线路,直流电缆与交流电缆相比,其投资费用和运行费用都更为经济,这就是越来越多的大城市供电采用地下直流电缆的原因。

(2) 线路损耗小

由于直流架空线路仅用 1 根或 2 根导线,所以导线上的有功损耗较小。同时,

由于直流线路没有感抗和容抗,在线路上也就没有无功损耗。另外,直流架空线路具有“空间电荷”效应,其电晕损耗和无线电干扰均比交流架空线路要小,直流输电没有集肤效应,导线的截面利用充分。这样,直流架空线路的年运行费用也比交流架空线路少。

(3)适宜海底输电

海底输电必须采用电缆。电缆线路的电容比架空线路大得多,较长的海底电缆交流输电很难实现,而采用直流电缆线路就比较容易。并且电缆的绝缘在直流电压和交流电压作用下的电位分布、电场强度和击穿强度都不相同。

(4)没有系统稳定问题

交流输电系统中,所有连接在电力系统中的同步发电机必须保持同步运行。系统稳定是指在系统受到扰动后所有互联的同步发电机具有保持同步运行的能力。由于交流系统具有电抗,输送的功率有一定的极限,当系统受到某种扰动时,有可能使线路上的输送功率超过它的极限。此时,送端的发电机和受端的发电机可能失去同步而造成系统的解列。

如果采用直流线路连接两个交流系统,由于直流线路没有电抗,所以不存在上述的同步运行稳定问题,即直流输电不受输电距离的限制。另外,由于直流输电与系统频率、系统相位差无关,所以直流线路可以连接两个频率不相同的交流系统。

(5)能限制系统的短路电流

用交流输电线路连接两个交流系统时,系统容量增加,将使短路电流增大,有可能超过原有断路器的通断容量,这就要求更换大量设备,增加大量的投资。而用直流输电线路连接两个交流系统时,直流系统的“定电流控制”将快速把短路电流限制在额定功率附近,短路容量不因互联而增大,有利于实现交流系统的互联。

(6)调节速度快、运行可靠

直流输电通过晶闸管换流器能够方便、快速地调节有功功率和实现潮流翻转。不仅在正常运行时保证稳定地输出功率,而且在出现事故情况下,可通过正常的交流系统一侧由直流线路对另一侧事故系统进行支援,从而提高系统运行的可靠性。

(7)实现交流系统的异步连接

频率不同或相同的交流系统可以通过直流输电或“交流—直流—交流”的“背靠背”换流站实现异步联网运行,既得到联网运行的经济效益,又避免交流联网在发生事故时的相互影响。

(8)直流输电可方便地进行分期建设和增容扩建,有利于发挥投资效益

双极直流输电工程可按极分期建设,即先建成一极后单极运行,然后再建另一个极。也可以每极选择两组基本换流单元(串联接线或并联接线),第一期先建一组(为输送容量的 $1/4$)单极运行;第二期再建一组(为输送容量的 $1/2$)双极运行;第三期再增加一组,可双极不对称运行(为输送容量的 $3/4$),当两组换流单元为串

联接线时,两极的电压不对称,为并联接线时候,则两极的电流不对称;第四期则整个双极工程完全建成。

2. 直流输电的缺点

直流输电与交流输电相比,有如下缺点:

①换流站的设备较昂贵。

②换流装置要消耗大量的无功功率。直流输电换流器需要消耗一定的无功功率,一般情况下,约为直流输送功率的 $50\% \sim 60\%$,因此,换流站的交流侧需要安装一定数量的无功补偿设备,一般为具有电容性的交流滤波器。

③产生谐波影响。换流器运行时在交流侧和直流侧都将产生谐波电流和电压,使电容器和发电机过热,换流器控制不稳定,对通信系统产生干扰。一般在交流侧安装滤波器限制谐波影响。

④换流装置几乎没有过载能力,所以对直流系统的运行不利。

⑤缺乏高压直流开关。由于直流输电不存在零点,以致灭弧较困难,目前尚无适用的高压直流开关。现在是把换流器控制脉冲信号闭锁,起到部分开关的作用。但在多端供电式,就不能单独切断事故线路,而要切断整个线路。近年来,采用新型可关断半导体器件进行换流时,直流断路器的功能将由换流器来承担。

⑥直流输电利用大地(或海水)为回路会带来的一些技术问题。接地极附近地下(或海水中)的直流电流对金属构件、管道、电缆等埋设物有腐蚀作用;地中直流电流通过中性点流入绕组导致变压器出现直流偏磁现象,引起变压器局部过热、振动加剧、噪声增大;以海水作为回路时,会对通信系统和航海磁性罗盘产生干扰。

⑦直流输电线路难于引出分支线路,绝大部分只用于端对端送电。

根据以上优缺点,直流输电适用于以下场合:

①远距离大功率输电;

②海底电缆送电;

③不同频率或同频率非周期运行的交流系统之间的联络;

④用地下电缆向大城市供电;

⑤交流系统互联或配电网增容时,作为限制短路电流的措施之一;

⑥配合新能源的输电。

1.1.2 我国特高压直流输电的规划

随着电力工业的快速发展,为了满足西电东送、大容量输电的要求,我国已经投运了葛南、天广、三常、三广、贵广、德宝、宁夏东—天津、呼伦贝尔—辽宁等 ± 500 kV直流输电线路,我国自行设计建设的灵宝背靠背直流工程也已顺利投运。同时,为进一步提高“西电东送”的输电能力,促进“南北互联、全国联网”,我国规划了一系列高压直流输电工程,其中包括多条 ± 800 kV特高压直流输电工程。

西南水电资源十分丰富,仅金沙江水能资源可开发装机容量就达到 90 000 兆瓦,年发电量约 0.5 万亿千瓦时。金沙江下游一期工程包括溪洛渡、向家坝两个梯级水电站,总装机容量达 18 600 兆瓦,比三峡工程还要多 400 兆瓦,将电能送至华中、华东地区(见图 1-3)。为了解决大规模水电送出问题,节约设备投资,并为金沙江和其他西部水电未来发展预留输电走廊资源,通过对特高压直流输电电压等级的研究和论证,我国已经确定了 ± 800 kV 为特高压直流输电的标准电压,主要用于大水电基地和大煤电基地的超远距离、超大容量送出工程,以及在线路中部缺乏电源支撑的长距离输电工程。

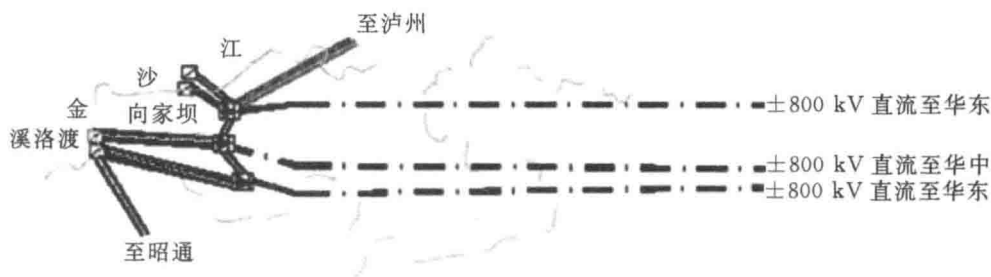


图 1-3 溪洛渡、向家坝水电站的电力外送

南方电网建设的“云南—广东” ± 800 kV 直流输电项目,已于 2010 年双极投运,把云南小湾、金安桥水电站的电力送到广东。同时,金沙江一期溪洛渡、向家坝电站送电华中、华东和锦屏一、二级电站送电华东项目也将采用 ± 800 kV、4000 A 特高压直流外送,每回特高压直流的输送容量为 6 400 兆瓦,总输电容量 25 600 兆瓦。其中“向家坝—上海”、“锦屏—苏州”、“溪洛渡—浙江”、“哈密—郑州” ± 800 kV 直流输电工程已投入运行。

1.1.3 变压器直流偏磁现象

直流偏磁是指在变压器励磁电流中出现了直流分量,导致变压器铁芯半周磁饱和,以及由此引起的一系列电磁效应。铁芯的高度饱和会使漏磁增加,引起金属结构件和油箱过热,破坏绝缘,影响变压器的寿命。这种变压器的非正常工作状态还会产生大量谐波,增加变压器的无功消耗,并可能影响继电保护。同时,直流偏磁还会导致变压器铁芯磁致伸缩更加严重,从而使变压器振动加剧、噪声加大,影响变压器的正常运行。

1.1.3.1 变压器直流偏磁的原因

产生变压器直流偏磁的原因主要有两种。

1. 太阳等离子风的动态变化与地磁场相互作用产生的“地磁风暴”

地磁场的变化导致地球表面出现电位梯度。当发生严重地磁风暴时,地面电导率较小地区的电位梯度可达每公里几伏至上百伏,持续时间为几分钟到几小时,这一低频且具有一定持续时间的电场作用于电网的中性点接地的变压器时,会在变压器绕组中产生地磁感应电流(GIC),其频率在 $0.001 \sim 1 \text{ Hz}$ 之间,可近似看作直流,地磁感应电流值可达 $80 \sim 100 \text{ A}$ 。尽管地磁风暴影响电力系统的现象早在 1940 年就已经引起美国学者的注意,但并未得到足够的重视,直到 1989 年 3 月 13 日,严重的地磁风暴影响了北美的电力和通信系统,这才引起人们的重视。这次磁暴引起的直流偏磁使变压器铁芯严重饱和,谐波大增,导致继电保护误动作,大量电容器退出运行,系统电压崩溃,造成加拿大魁北克水力发电中断;美国东海岸的大型升压变压器两个低压绕组导线的铜接头烧毁;有 8 台自耦变压器出现不同程度的过热,其中一台因严重的油箱过热而损坏。从 1990 年至 1993 年,美国 IEEE 输配电委员会每年召开专题研讨会,成立了“地磁干扰及其对电力系统的影响”研究小组,研究地磁风暴对变压器的影响及其抑制方法。

2. 直流输电单极大地回路方式运行

对于远距离输电的双端直流系统,通常是以双极运行方式。但当单极线路检修时往往会采用单极大地回路方式运行,或者在直流输电系统建设初期,为了提高经济效益,往往建好一极后即投入运行,这种直流输电单极运行方式往往是以大地作为回流电路,即大地充当了直流输电线路的另一根导线,流经大地的电流是直流输电工程的工作电流(如图 1-4),此时高达几千安培的电流从直流接地极注入大地,±800 kV 特高压直流输电接地极注入大地的电流甚至更大(可达 5 kA)。

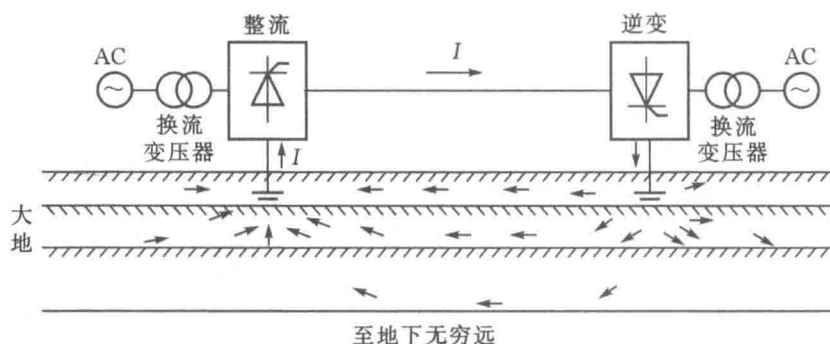


图 1-4 直流输电单极大地回路方式

我国直流输电工程的运行情况表明,直流偏磁现象在实际运行的变压器中多次出现。如:在 500 kV 直流输电单极对地调试和试运行期间,武南两组 500 kV 主变压都出现噪声大幅度上升的问题(噪声上升幅度达 20 dB),现场测试表明,武南

变电站及周边 500 kV、220 kV 变电站中性点接地的变压器都出现了不同大小的直流电流。其中武南 500 kV 变压器中性点直流量达到 12.8 A, 受到的影响最大。这是由于直流输电线路采用单极大地回路运行式时, 直流电流经变压器中性点的接地线进入交流电网所致。单极运行期间直流感地极的入地电流主要带来以下问题: 导致中性点接地变压器直流偏磁; 对交流输电线、通信线的干扰; 地中直流对地下金属物及管线的腐蚀; 接地极附近电位梯度对人畜有影响等。

另外, 相控交流负载、相控整流器、单相整流器等电压电流关系曲线不对称的负载也能产生直流分量, 导致变压器直流偏磁, 它们对铁芯磁饱和的影响与直流输电单极大地回路运行时相同。

1.1.3.2 直流偏磁对变压器的影响

当变压器绕组中无直流电流时, 励磁电流工作在铁芯磁化曲线的直线段; 当变压器绕组中有直流流过时, 由于直流偏磁的影响, 励磁电流工作点偏移到铁芯磁化曲线的饱和区, 导致铁芯半周磁饱和, 即变压器处于直流偏磁状态。直流偏磁对变压器的影响主要有以下几个方面(如图 1-5)。

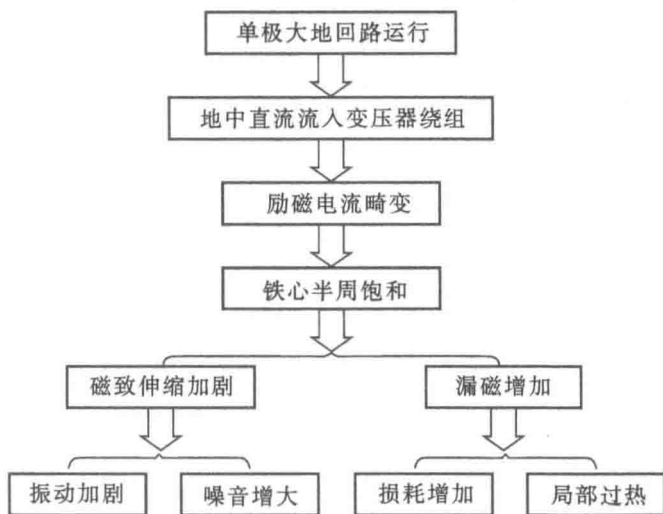


图 1-5 直流偏磁对变压器影响原理示意图

1. 噪声增大

当变压器发生直流偏磁时, 励磁电流会明显增大。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 10 dB, 若达到 4 倍的额定励磁电流, 噪声增大 20 dB; 变压器直流偏磁会产生谐波, 使变压器噪声频率发生变化, 可能会因某一频率与变压