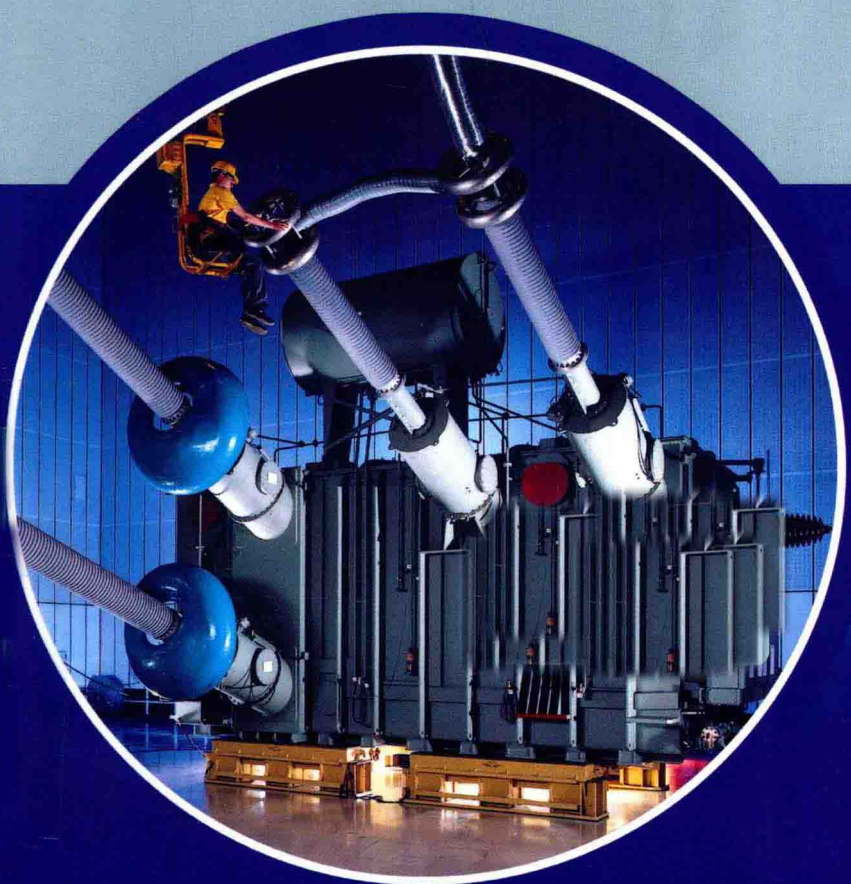


研究生教材

变压器直流偏磁 电容治理技术

王 博 闫振华 杨超平
黎 炜 艾绍贵 袁铁江 等 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

研究生教材

变压器直流偏磁 电容治理技术

王 博 闫振华 杨超平
黎 炜 艾绍贵 袁铁江 等 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 简 介

随着特高压直流输电工程建设与投运,直流偏磁问题越来越严重,同时轨道交通供电、地磁暴等,也导致电力系统中直流偏磁危害加剧,对变压器乃至整个系统安全运行造成极大威胁。本书基于作者对直流偏磁的治理研究成果及实践经验,系统地介绍了直流偏磁对变压器的影响及治理问题。主要内容包括直流偏磁电流形成机理、三相三柱式变压器直流偏磁建模与仿真、三相五柱式变压器直流偏磁建模与仿真、单相和自耦变压器直流偏磁建模与仿真、有源型电容直流偏磁治理技术、无源型电容直流偏磁治理技术及其他直流偏磁治理技术,并在最后对本书内容做了整体总结。

本书内容翔实,所有实例均来自生产实践,可作为普通高等院校电气工程类专业本科生及研究生教材,也可以供做直流偏磁治理研究的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变压器直流偏磁电容治理技术/王博等著. —北京:中国电力出版社, 2016. 12

研究生教材

ISBN 978-7-5198-0211-0

I. ①变… II. ①王… III. ①变压器—直流输电—研究生—教材 IV. ①TM4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 320658 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>)

北京教图印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 261 千字

定价 38.00 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

编写委员会

主要编写人员 王 博 闫振华 杨超平 黎 炜
艾绍贵 袁铁江 吴伟丽 张 军
樊益平 丁 培 刘 勇

参与编写人员（按照姓氏笔画顺序）

马 波 马 奎 马飞越 文习山
王海龙 王译平 王 亮 李秀广
朱文炜 刘世涛 刘 俊 刘海波
何宁辉 柴 毅 潘卓洪

前 言

特高压直流输电线路是“西电东送”及西北清洁能源大规模外送的重要输电通道，是我国“十三五”优化能源结构、实现全国能源资源优化配置、转变能源发展方式的关键，对于推动能源生产和消费革命、拉动经济增长、促进能源供给侧结构性改革，具有重要意义。

宁夏地区已经投运了 $\pm 660\text{kV}$ 宁夏宁东至山东青岛直流输电工程，随着 $\pm 800\text{kV}$ 宁夏灵州至浙江绍兴特高压直流输电工程的投运， $\pm 800\text{kV}$ 内蒙古上海庙至山东临沂特高压直流工程的建设，宁夏电网中的直流偏磁问题逐渐突出，严重影响电力系统中变压器的安全运行。国家电网公司（简称国网）宁夏电力公司电力科学研究院在直流偏磁方面进行了多年的研究。为满足广大电力工作者的需要，本书作者将研究成果总结整理，编写了本书。本书基于多年来国网宁夏电力公司对直流偏磁的治理研究成果及实践经验，系统地介绍了直流偏磁对变压器的影响及治理方法。

本书第1章对直流偏磁的危害、变压器容许的偏磁电流限值和目前研究与应用的直流偏磁治理技术做了简要的介绍，根据工程应用需求提出了直流偏磁治理装置的要求。第2章系统地介绍了直流输电、轨道交通和地磁暴等成因下直流偏磁电流的形成过程和机理，读者可以更深刻地了解变压器直流偏磁的相关背景。第3章针对三相三柱式变压器介绍了变压器的直流偏磁模型与仿真方法，对直流偏磁下变压器的谐波、无功损耗和温升等效效应进行了分析。第4章针对三相五柱式变压器，介绍了变压器直流偏磁仿真建模方法和步骤，提出了偏磁条件下 BH 曲线模拟的思路，并利用MATLAB和PSCAD/EMTDC仿真工具，说明了电力系统直流偏磁及治理的仿真建模方法。第5章针对单相变压器和自耦变压器，分析了变压器直流偏磁的磁路和电路模型，介绍了采用MATLAB和PSCAD软件对单相变压器和自耦变压器直流偏磁仿真建模的方法和步骤，仿真模拟了不同方式下的直流偏磁治理效果。第3~第5章的内容有助于读者建立针对变压器中性点进行直流偏磁治理技术的正确认识，为治理直流偏磁提供技术支撑。第6章介绍了有源型电容直流偏磁治理技术的原理、装置及应用情况，并通过工程实例说明了治理装置在直流偏磁治理与防御上的应用情况与治理效果。第7章介绍了目前新研发的治理技术——无源型电容直流偏磁治理技术的原理、装置使用环境和运行维护的要求及安装条件等内容。第8章介绍了反向电流注入法、电位补偿法和阻容隔直法等直流偏磁治

理技术、原理和适用条件等内容。第9章总结了全书，并指出了直流偏磁治理技术应用中存在的问题和未来的研究方向。本书中的仿真模型为了与仿真软件一致，未按国家标准修改，敬请读者注意。

通过阅读本书，读者能够系统地了解直流偏磁对变压器的影响及治理技术的新发展，能够清楚地了解这些理论及技术成果在灵绍直流等工程中的应用经验。希望本书能够对电力系统工程师、电气工程设计人员和电气工程专业的师生在相关领域的理论学习和工程实践提供一定的参考。

在写作过程中，作者得到包括安徽正广电电力技术有限公司、武汉大学、新疆大学、国家电网公司新疆电力公司、国家电网公司甘肃电力公司等单位的大力支持，也得到了业界专家、学者们的无私帮助，在此一并表示感谢。最后，还要感谢书中引注和未曾引注的所有参考文献作者的辛勤工作，正是站在前人的研究基础上，才有本书正式出版的机会。

本书的理论与应用研究有待于进一步探索和完善，限于作者的知识水平和经验，书中的观点和结论难免有不妥之处，望读者原谅和批评指正。

作 者

2016年10月

目 录

前言

1 概述	1
1.1 引言	1
1.2 直流偏磁治理技术	1
1.3 直流偏磁的危害	4
1.4 变压器容许直流电流限值	11
1.5 直流偏磁治理装置要求与注意问题	12
2 直流偏磁电流形成机理	14
2.1 引言	14
2.2 直流输电与直流偏磁	15
2.3 轨道交通与直流偏磁	17
2.4 地磁暴与直流偏磁	21
2.5 电力系统不对称运行与直流偏磁	24
2.6 本章小结	26
3 三相三柱式变压器直流偏磁建模与仿真	27
3.1 引言	27
3.2 变压器直流偏磁分析	27
3.3 三相三柱式变压器直流偏磁仿真	29
3.4 变压器直流偏磁治理建模与仿真	43
3.5 案例分析	44
3.6 本章小结	46
4 三相五柱式变压器直流偏磁建模与仿真	48
4.1 引言	48
4.2 三相五柱式变压器直流偏磁仿真建模方法	48
4.3 基于 MATLAB 平台的变压器直流偏磁仿真	51
4.4 基于 PSCAD/EMTDC 变压器直流偏磁治理及建模仿真	54
4.5 案例分析	57
4.6 本章小结	58
5 单相和自耦变压器直流偏磁建模与仿真	59
5.1 引言	59

5.2	单相变压器和自耦变压器	59
5.3	单相与自耦变压器直流偏磁仿真及治理建模	63
5.4	案例分析	71
5.5	三种变压器抗偏磁电流能力分析	77
5.6	本章小结	77
6	有源型电容直流偏磁治理技术	79
6.1	引言	79
6.2	电容隔容装置直流偏磁治理原理	79
6.3	有源型电容隔直装置的结构与功能	81
6.4	有源型电容隔直装置在系统中的应用	86
6.5	有源型电容隔直装置的性能指标	88
6.6	中性点电容隔直装置对电力系统的影响	90
6.7	有源型电容隔直装置	92
6.8	本章小结	115
7	无源型电容直流偏磁治理技术	116
7.1	引言	116
7.2	无源型电容隔直装置的结构与功能	116
7.3	无源型电容隔直装置在系统中的应用	118
7.4	氧化锌和真空触发间隙旁路无源型电容隔直装置	118
7.5	工程应用	123
7.6	本章小结	131
8	其他直流偏磁治理技术	132
8.1	引言	132
8.2	基于反向电流注入法的直流偏磁治理技术	132
8.3	基于电位补偿法的直流偏磁治理技术	142
8.4	基于阻容隔直法的直流偏磁治理技术	147
8.5	基于变压器内设补偿绕组的直流偏磁治理技术	150
8.6	电阻限流直流偏磁治理技术	153
8.7	其他方法	156
8.8	本章小结	157
9	结束语	158
	参考文献	159

1 概 述

1.1 引 言

直流偏磁是现代电力系统发展面临的新问题。一方面，太阳风暴在地球大地中感应出地电场，地电场作为外施电压源，在具有低电阻输电线路、单相变压器和远距离输送电能等特点的超高压、特高压输电系统中产生地磁感应电流（Geo-magnetically Induced Currents, GIC），引起变压器直流偏磁，造成变压器本体损伤，继电保护装置动作失灵，甚至电网大面积停电的恶性事故；另一方面，随着直流输电工程的建设，直流接地极会导致周边大地存在电位梯度，使不同接地点的变压器中性点存在电位差，这种电位差通过大地、输电线路、接地变压器所形成的回路产生直流电流，引起变压器直流偏磁，造成变压器振动、噪声、谐波和无功损耗增多，引发电力系统运行稳定和安全等一系列问题。随着更多的直流输电工程投入运行，直流偏磁现象将越来越严重。此外，地铁轨道交通的人地杂散电流也造成了周边电力变压器的直流偏磁。

目前我国对直流输电工程造成的电力系统直流偏磁的研究，大多集中在接地极附近地电位算法、偏磁电流的计算和直流偏磁治理等方面。我国虽然对直流偏磁治理的研究起步相对较晚，但发展较快，国内学者提出了多种治理方法和措施，目前投入使用的治理装置类型也较为丰富。总结起来，根据直流偏磁治理装置的安装位置，直流偏磁治理可以分为中性点治理、输电线路治理和变压器本身直流偏磁治理等类型；根据治理装置的原理，直流偏磁治理可以分为基于电容隔直原理、基于电阻抑制原理和基于电位补偿原理等类型。

目前，我国直流偏磁的治理工程中，以采用电容型直流偏磁治理技术居多。

1.2 直流偏磁治理技术

1.2.1 直流偏磁治理方法

消除变压器直流偏磁，主要是阻止直流电流在交流电力变压器绕组和输电线路中的流动。对于直流输电单极大地运行和地磁扰动所引起的变压器偏磁，当变压器中性点与接地点间的直流电流被阻隔时，直流电流将不会对电力变压器造成有害影响。削弱变压器的直流偏磁，允许变压器中性线和三相传输线中有直流电流存在，但是它们的数值应限制在某限值范围内，不能危及电力系统和电力变压器的安全、稳定运行。

直流输电工程、轨道交通和地磁暴等都可能引起电力系统的直流偏磁，但不管是哪种原因形成的偏磁电流，中性点和输电线路都是构成直流电流回路的主要路径，因此可以在这两处装设直流隔断或阻碍的治理装置。常采用的方法有以下几种。

1. 针对变压器中性点进行偏磁电流的抑制

接地变压器的中性点是直流电流进入电力系统的必要途径，故增大中性点支路直流电阻或者是隔断直流通路，是抑制直流电流进入电网最有效的手段。目前国内外常用的变压器中性点直流电流抑制方法有：

(1) 在变压器中性点装设串联电容，阻隔直流电流。这种方法是在接地点与中性点间加装电容隔直装置，彻底切断流入变压器绕组的直流电流，但在投切装置时会存在暂态过电压现象，且会改变电力系统的接地性能，因此还需要装设旁路装置：一方面保证系统正常运行时的接地性能和消除过电压；另一方面用来削弱或降低对变压器保护装置的不利影响。

(2) 在变压器中性点装设电阻，抑制直流电流。这种方法是在接地点与中性点间加装串联电阻隔直装置，可以将直流电流减小到限值以下，结构简单、易于实现，但需要提前计算好治理的偏磁电流大小，才能确定电阻参数，因此电力系统运行方式改变或新直流输电工程投入运行时，还需调整治理装置的参数。

(3) 在变压器中性点加装补偿电源，抵消直流电流。这种方法又称反向电流注入法，是一种有源的直流偏磁抑制方法。通过电源监控器，计算并向中性点注入一个大小相同的反向直流来抵消偏磁直流，且输出电流可改变大小和方向。

(4) 在变压器中性点与接地网之间串联一个电位补偿元件，全额或部分补偿地中电流引起的各变电站接地网之间的电位差，使交流电网中各变压器中性点电位相同或相近，以有效抑制变压器中性点直流电流。

(5) 中性点串联阻容装置。阻容装置是由电阻器、电容器、旁路开关和控制检测系统构成的直流偏磁治理装置。采用降低阻容装置工频交流阻抗的方法，可以将电容隔直法应用到 220kV 交流系统。这种方法可以省略复杂的晶闸管旁路保护系统，同时兼顾隔直装置的工频阻抗、耐压水平、体积及费用等几个方面，是一种安全、高效的直流偏磁电流抑制方法。

2. 针对输电线路进行偏磁电流的抑制

输电线路为偏磁电流提供了流通过程，通过输电线路，偏磁电流从一个变电站流到另一个变电站，使受影响变压器的范围扩大。因此，在输电线路上加装串联电容能够有效地切断偏磁电流到变压器中性点的流通过程，从而阻隔流入交流电力系统的直流电流。尤其是现代电力系统中采用自耦变压器时，必须在交流系统所有出线端加装串联电容器，才能有效阻隔流过相关变压器中性点的直流电流。输电线路串联电容的优点是能有效隔离交流系统中可能流过的直流电流，并能提高线路输送能力、增强交流系统暂态稳定性；缺点是对串联电容器自身的要求较高，且当电网中存在自耦变压器时，需要安装的电容器个数较多，同时串联电容器对系统的影响比较复杂，成本较高。

3. 改进变压器内部结构或材料，提高变压器抗直流偏磁能力

(1) 更换变压器类型。研究表明，不同类型和结构的变压器承受直流偏磁的能力不同，对相同大小的偏磁电流反应情况也不同。例如，不同结构类型的变压器对 GIC 的

敏感程度，从大到小依次为：单相壳式或芯式变压器、三相五柱式变压器和三相三柱式变压器。

三相三柱式变压器之所以对 GIC 最不敏感，是由于三相三柱式变压器直流磁通在铁芯中无通道，需经过其他结构件和油从油箱返回，而油的磁阻较大，所以直流磁通很小，可允许中性点通过较大的直流电流；而直流磁通在三相五柱式变压器中须经过旁轭返回，磁通返回通道的截面积较小，从而在较低的磁感应强度下就可能出现铁芯饱和，直流电流的影响较为明显，在接地线中允许通过的直流电流比三相三柱式变压器小；组式变压器，特别是由单相自耦变压器构成的组式变压器，由于各相铁芯都为直流提供低磁阻通路，且链绕直流的匝数多、铁芯截面积小，直流偏磁影响严重，因此对允许通过的直流电流需要严格限制。

(2) 改造变压器内部结构，增加变压器直流偏磁的补偿功能，提高变压器抗直流偏磁的能力。通过控制材料的剩磁，实现材料自身不同磁状态的有效转换，定向减弱或消除变压器偏磁磁通，以此提高变压器抗直流偏磁能力，减小直流偏磁对变压器产生的危害。

4. 其他直流偏磁治理方法

除上述几种方法外，直流偏磁治理还可以采用直流电流补偿法，或称地电位补偿法。

直流电流补偿法通过向接地网注入电流来升高或降低接地网电位，以减小两变电站接地网间的电位差。注入电流时要注意接地网、避雷线及变电站其他设备的分流影响，对补偿容量的合理控制是该方法的难点。该补偿法适用于直流电流较小的场合，它的补偿过程比较复杂，应避免出现过补偿。通过加强对流过相关变压器中性点直流电流的监测，来对直流偏磁进行预防及有效治理，针对直流电流尚未超过限值、但极有可能在将来电力系统运行或建设中形成偏磁电流的情况来说，不失为一个有效的治理方法。另外，降低电力变压器的运行工作点也可以作为一种直流偏磁治理措施。

1.2.2 直流偏磁治理注意事项

不同成因下偏磁电流的特性不同，在确定治理装置的安装地点和整定参数时，需注意以下几点：

(1) 直流输电工程引起的偏磁电流会因为接地极电流的存在而持续，影响范围也会随接地极电流的大小而变化，一般是电力系统电流的一部分；地磁暴引起的偏磁电流波动大，且影响范围往往是整个电网，持续时间为几分钟到几个月不等，超级地磁暴极易引发大的电力系统事故。前者的治理装置安装地点可以根据偏磁电流的计算结果和电力系统的参数确定，而后者的治理则需要面向全网进行治理装置的分布优化。

(2) 已建成并运行的直流输电工程引起的直流电流虽然会有波动，但波动范围一般是可以确定的，规划的直流输电工程也可通过仿真计算来预测直流电流，因此加装治理装置的参数能够提前整定；而地磁暴的发生具有一定的概率，后果严重程度很难预测，

治理由其引起的直流偏磁时，需要先在历史地磁暴数据的基础上进行参数估计，再根据大地电参数及结构、电力设备类型和电力系统的结构与参数估测偏磁电流的大小与分布，最后才能确定治理装置的参数。

(3) 地磁暴造成的直流偏磁往往是跨区域、跨省甚至跨洲的，因此采用在变压器中性点加装电容器隔直装置或改进变压器内部结构的措施，可以提高变压器抗直流偏磁能力，并且具有较高的直流偏磁治理效率；同时大范围安装治理装置不现实，在个别地点加装治理装置时，还需考虑因 GIC 流通引起相邻线路中的 GIC 增大。此时治理直流偏磁，需要依据电网参数、运行水平、安全性能和经济性要求等条件，先计算偏磁电流的大小与分布，再选取合适的治理方法和装置。

(4) 由于地磁暴作用下的感应地电场具有一定的方向，在极光带、亚极光带，地电场方向一般为东西走向较大、南北走向较小；中低纬度地区的地电场与空中电离层电流分布和大地的结构有关，也具有一定的方向性，并与土壤电阻率关系密切。治理地磁暴造成的直流偏磁时，需要考虑输电线路的长度和走向等因素。

1.3 直流偏磁的危害

1.3.1 变压器直流偏磁效应

1. 噪声增大

当变压器绕组中有直流电流流过时，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 10dB；若达到 4 倍的额定励磁电流，噪声则增大 20dB。此外，变压器中增加了谐波成分，会使变压器噪声频率发生变化，可能会因某一频率与变压器结构部件发生共振导致噪声更大。自 2002 年 12 月三峡 500kV 直流输电工程（湖北龙泉—江苏政平）开始调试和试运行以来，常州武南两组 500kV 主变压器均出现噪声大幅度上升。而在贵广直流线路中，2004 年 5 月监测记录表明，贵广 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，噪声达 93.9dB。

变电站的噪声主要是由变压器发出的，直流偏磁时变压器噪声分贝可以达到正常运行时的几倍甚至几十倍。噪声过大会引起人们神经系统的疲劳和与此有关的疼痛，因此国家对噪声强度有严格的标准规定，变压器在出厂时都要进行噪声水平测试。直流偏磁导致的变压器噪声增大，会使变压器噪声超过规定值，不符合环境保护的要求。

2. 振动加剧

变压器本体的振动主要是硅钢片磁致伸缩引起的铁芯振动。磁致伸缩使铁芯随励磁电流的变化出现周期性的振动。直流偏磁下的变压器铁芯处于半周磁饱和状态，磁通偏移，同时励磁电流出现畸变，磁致伸缩加剧，导致铁芯的振动也随之加剧，硅钢片接缝处和叠片间存在由漏磁引起的电磁吸引力，磁饱和时漏磁增大引起电磁吸力增大，从而也加剧了铁芯的振动。

变压器振动加剧的问题远比噪声增大严重。强烈的变压器振动会导致变压器相关零部件松动,引起发热、放电或者零部件脱落,对变压器的安全运行构成严重的威胁,进而危及电网的安全运行。

3. 局部过热和温升

心式变压器铁芯的拉板或壳式变压器铁芯的支撑板通常采用磁性材料,以获得足够的机械强度。位于铁芯表面的铁芯拉板(或支撑板),与铁芯硅钢片的磁场强度相同,其厚度比硅钢片又厚得多,大的涡流损耗导致了拉板(或支撑板)温度升高。试验研究铁芯拉板(或支撑板)温升与其磁场强度的关系发现,不论是心式铁芯的拉板,还是壳式铁芯的支撑板,在同样的磁场强度下,交流过励磁的温升比直流偏磁的温升高约1倍。这是因为直流偏磁时,仅半个周波存在较强的磁场。此外,试验还表明,如果铁芯的拉板(或支撑板)采用非磁性材料,温升可大大降低。

变压器直流偏磁引起的温升对变压器运行产生了不利的影响,总结起来主要表现在以下几个方面:

(1) 引发变压器内部故障。变压器绕组导线、油箱壁、铁芯拉板(或支撑板)等结构件都由金属材料构成,金属材料温度过高,其刚性强度会降低,甚至导致金属材料结构变形,从而引发变压器内部故障。比如,绕组温升过大,会引起绕组导线变形,甚至导致绕组导线连接处熔化,从而导致变压器出现绕组短路故障,并有可能烧毁变压器;同时,变压器局部温度过高,还有可能导致绝缘纸或绝缘板损坏,引发变压器内部故障。

(2) 加速变压器的绝缘老化,缩短变压器使用寿命。绝缘老化是指绝缘材料受到热或者其他物理、化学作用而逐渐失去其机械强度和电气强度的过程。变压器的绝缘老化主要是由于温度、湿度、氧化和油分解的劣化物质影响所致,老化速度主要由温度决定。变压器的使用寿命由绝缘材料的使用寿命决定。在油浸式变压器中,主要绝缘材料是变压器油和绝缘纸、纸板等。GIC作用下,变压器绕组、变压器油和铁芯拉板等结构件温升增大,导致与其接触的绝缘材料(绝缘纸、纸板)工作温度升高,加快了化学反应(主要是氧化作用)进行的速度,从而加快了变压器绝缘老化的速度,缩短了变压器的使用寿命。

(3) 导致变压器油中气体含量增加。变压器正常运行时,由于绝缘老化,变压器油和固体有机绝缘材料会分解出少量的烃、一氧化碳和二氧化碳,这些气体大部分溶解在变压器油中。GIC作用下,随着变压器油和绝缘材料温度的升高,变压器油分解出的烃和固体有机绝缘材料分解出的一氧化碳、二氧化碳含量会明显增加,当气体达到一定数量时,便会有一部分气体进入到变压器气体继电器中,引起气体保护动作。

4. 电压波形的畸变

在我国,110kV及以上变压器一般采用YN,d联结,超高压、大容量变压器,特别是自耦变压器一般采用YN,d,yn联结。对于YN,d和YN,d,yn联结的三相变压器,虽然当直流接地极电流流过YN绕组时,励磁谐波电流会增加,但由于一次和二

次绕组都可以为三倍频谐波电流提供通道，直接为变压器提供所需的三倍频谐波电流，导致主磁通接近正弦波，电动势波形也接近正弦波。

当铁芯工作在深度饱和区时，励磁电流发生畸变，漏磁通增加，主磁通呈尖顶波形，在一定程度上造成了电压波形畸变。电压波形畸变就会产生谐波，直流偏磁引起的变压器谐波增加对电网及电网设备的安全运行构成了严重的威胁。主要表现在以下几个方面：

(1) 导致继电保护装置误动作。GIC 导致变压器向系统中注入大量谐波电流，而系统中部分继电保护装置对谐波电流较为敏感。例如，一些数字继电保护装置通过测量电流的峰值来计算电流的有效值，谐波电流会造成电流有效值计算错误，从而引起这类继电保护装置误动作；系统中大多数接地并联电容器组安装中性点过电流继电保护装置，以监测相间电流或电压是否平衡。对于没有滤波支路的中性点过电流保护装置，由于电容器组对谐波来说相当于低阻抗装置，因此电容器组中性点流过的电流会增加，从而导致这类继电保护装置误动作。

(2) 导致电容器组和静止无功补偿装置 (SVC) 过载。电容器组和 SVC 主要向系统提供无功功率，是确保系统稳定运行的重要设备。电容器组和 SVC 对谐波来说相当于低阻抗设备，地磁暴发生时会有大量的谐波电流流过这些设备而导致其过载，并可能引起过电流保护装置动作，将其从系统切除。电容器组和 SVC 退出运行后，系统无功功率不足的情况进一步加剧，进而引起系统电压波动甚至系统解列等。魁北克大停电，就是因为 GIC 引起的谐波引起系统中 SVC 过载，并相继跳闸，使系统失去了无功功率支持，并最终导致整个系统的崩溃。

(3) 导致发电机局部过热和机械振动。虽然 Δ/Y 联结的发电机升压变压器阻止了 GIC 在发电机定子绕组中的流通，但是 GIC 却间接地对发电机构成了威胁。GIC 引起谐波中的正序和负序谐波电流会在发电机定子绕组中流动，可能导致发电机转子局部过热和机械振动。

(4) 导致高压直流输电换流站末端交流滤波器过载。GIC 会导致高压直流输电系统换流站末端的换流变压器直流偏磁，产生的大量谐波会造成交流滤波器过载。

5. 变压器损耗增加

变压器的损耗包括磁芯损耗（铁损耗）和绕组损耗（铜损耗）。变压器铜损耗包括基本铜损耗和附加铜损耗。在直流电流的作用下，变压器励磁电流可能会大幅度增加，导致变压器铜损耗急剧增加。但由于主磁通仍为正弦波，且磁感应强度变化相对不大，所以直流偏磁电流对附加铜损耗产生的影响相对较小，主要影响基本铜损耗。变压器铁损耗包括基本铁损耗（磁滞和涡流损耗）和附加铁损耗（漏磁损耗）。基本铁损耗与铁芯磁感应强度的平方成正比，与频率成正比。对于采用 YN, d 接线的变压器，尽管励磁电流包含谐波分量，但由于主磁通仍然维持着正弦波，变压器绕组中的直流电流不会对基本铁损耗产生太大的影响。然而若励磁电流进入了磁化曲线的饱和区，铁芯和空气的磁导率接近，变压器的漏磁就会大大增加。变压器漏磁通会穿过压板、夹件、油箱等

构件，并在其中产生涡流损耗，即附加铁损耗。附加铁损耗会随着铁芯磁感应强度的增加而显著增加。即使在无直流电流的情况下，大型变压器的附加铁损耗与基本铁损耗相当甚至更大，这意味着随着变压器绕组中直流电流的增加，变压器的附加铁损耗会增加。

当系统中多台变压器同时遭受直流偏磁时，变压器集群无功损耗增加，会造成系统总的无功需求大幅增加。由于系统电压缺少了无功支持，系统电压可能会出现严重波动，从而威胁系统的稳定运行。

变压器直流偏磁的损耗增加还会降低变压器的效率。GIC 作用下，变压器本身的损耗大大增加，此时变压器输出相同的有功功率，则需要输入更多的有功功率，从而降低了变压器的效率。

1.3.2 电力系统直流偏磁事件

【事件 1】2003 年 10 月底至 11 月中旬，发生多次中、强磁暴。2003 年 11 月 17 日，Lethabo 发电厂内一台主变压器重气体保护跳闸。接下来的 11 月 20 日发生了一次更严重的磁暴，11 月 23 日 Matimaba 发电厂 3 号主变压器重气体保护跳闸。在这次磁暴期间，南非 Tutuka 发电厂和 Matimaba 发电厂的多台 400kV 升压变压器，以及 Lethabo 发电厂的多台 275kV 升压变压器中油气体含量快速增加；Matimaba 发电厂 4 号变压器高压绕组绝缘纸损坏，如图 1-1 所示；Lethabo 发电厂 6 号变压器的高压绕组绝缘纸损坏，如图 1-2 所示；随后的 2004 年 6 月，Matimaba 发电厂的 5 号和 6 号变压器由于变压器油气体含量过高而退出运行；2004 年 11 月 Lethabo 发电厂的一台变压器气体保护动作。

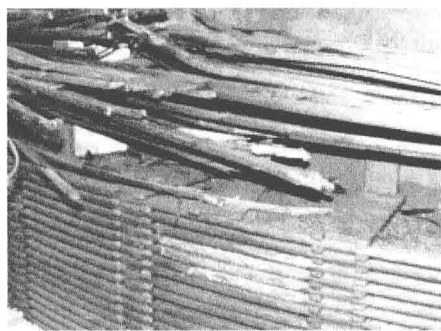


图 1-1 Lethabo 发电厂 4 号主变压器高压绕组

图 1-2 Matimaba 发电厂 6 号主变压器高压绕组

南非 Tutuka、Matimaba 发电厂内 12 台 400kV 的变压器和 Lethabo 电站的 6 台 275kV 升压变压器都加入了“气体分解分析”（DGA）在线监测。事故后技术人员通过油色谱分析，比较了变压器油中各种气体含量，认为 Tutuka、Matimaba 和 Lethabo 发电厂的多台升压变压器中油气体含量快速增加是由变压器内部局部过热造成的。DGA 分析发现，每台变压器中气体含量不尽相同，但是所有变压器的气体含量在 2003 年 10 月磁暴开始后同时显著增加。对每台退出运行的变压器检查后，确认了局部发热造成的

损害主要集中在绕组的绝缘纸上。发热造成的损坏程度与 DGA 具有良好的一致性。

可见,磁暴期间,GIC 会引起变压器绕组、油箱壁、铁芯夹件、铁芯拉板或支撑板的损耗增加,从而引起变压器某些部件局部过热。变压器的局部过热会加速变压器油和绝缘纸或绝缘板的老化,从而导致更多甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、乙烯(C_2H_4)、一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO_2)等气体生成;Matimba 发电厂 4#变压器和 Lethabo 发电厂 6#变压器的高压绕组绝缘纸损坏,则是由于较大的 GIC 引起变压器绕组损耗增大,导致与之相邻的绝缘纸过热,从而导致了绕组绝缘纸损坏;当 GIC 产生的直流偏磁程度相对较小时,变压器不会马上发生故障,但是仍然可能引起局部温升增大,使绝缘纸受到轻微的损伤(比如绝缘纸褪色等)。GIC 消失后,由于受到损伤的绝缘纸热量传递能力下降,可能引起绝缘纸局部温升较大,导致绝缘老化加剧并进一步损伤绝缘纸,这样变压器油中的气体含量也就会相应地不断增加。当变压器油中气体含量达到一定程度时,变压器气体保护装置就会动作。

【事件 2】在 1992 年的地磁暴中,Allegheny 电力公司的一台 350MVA、500/138kV 变压器流过了近似直流的地磁感应电流,导致变压器直流偏磁,油箱壁热点温度在 10min 内从 60°C 增加到 175°C 。变压器正常运行时,进入油箱壁的漏磁通较少,油箱壁的涡流损耗较小,此时油箱壁的温度一般与变压器油的温度相差不多。偏磁电流引起变压器铁芯半波饱和后,会有大量的漏磁通进入到变压器油箱壁中,引起油箱壁涡流损耗增加,导致该变压器油箱壁热点温度在短时间内升高了 115°C 。

【事件 3】在江苏 500kV 阳—淮输电系统投运之后,2001 年 3 月至 2002 年 10 月期间,该系统上河变电站的变压器发生过多次不明原因的噪声异常、强烈振动事件。该站的 750MVA 变压器为日本三菱公司制造,经中日双方专家共同分析,确认是 GIC 导致的直流偏磁。后来,又确认了浙江电网、华东—福建系统双龙等变电站的变压器噪声异常也与磁暴有关。此外,江苏省电力公司电力研究院万达认为,1989 年 3 月 13 日东北赤峰发电厂变压器的噪声异常和强烈振动事件也是强磁暴导致的。

【事件 4】广西北海某 220kV 变电站 2#主变压器发生多次噪声异常现象:2003 年 10 月 31 日,主变压器 3 次发出沉重的“嗡嗡”声,持续 1.5min 左右后自动消失。第一次发生在 4 时 20 分,第二次发生在 9 时 20 分,第三次发生在 10 时 20 分。3 次噪声异常后,经检查,主变压器开关、TA、避雷器以及保护、信号等均未发现任何异常。11 月 5 日 18 时,主变压器噪声有少许异常,比正常大一点,2min 左右消失。11 月 20 日 20 时 38 分,主变压器有较为沉重的“嗡嗡”声,经全面检查未发现异常。2004 年 12 月对主变压器进行了吊罩大修,认为噪声异常是绕组垫块、绝缘支架等部件松动引起的。其实,2003 年 10 月底至 11 月中旬发生过罕见的特大磁暴,磁暴报告表明:10 月 30 日、31 日和 11 月 20 日发生的磁暴为强磁暴($K=9$),11 月 5 日和 15 日的为中强磁暴($K=7$),其中 10 月底的强磁暴对全球的影响很大,导致瑞典马尔默城市电网停电、我国满洲里短波通信中断等事故。北海主变压器噪声异常现象的发生时间与强磁暴的发生时间吻合,因此,很有可能该 220kV 变

站变压器噪声异常的原因是磁暴引起的 GIC，而并非变压器绕组垫块、绝缘支架等部件的松动。

【事件 5】 神华广东国华粤电台山发电有限公司（简称国华台电）成立于 2001 年 3 月，地处广东省西南海台山市铜锣湾，工程分两期建设。一期工程 5 台机组，总容量为 3000MW ($5 \times 600\text{MW}$)，其中 1、2 号机组接入 220kV 升压变电站上网，通过 4 条 220kV 线路与广东江门电网的唐美、水口、能达 220kV 变电站连接，3、4、5 号机组接入 500kV 升压变电站上网，通过 2 条 500kV 线路与广东电网 500kV 香山站连接。二期工程 4 台机组，总容量为 4000MW ($4 \times 1000\text{MW}$)。国华台电机组相继投运以来，经常出现变压器噪声增大事件，基本上与南方电网直流输电工程单极大地回路运行有关。据不完全统计，自 2005 年 7 月至 2009 年 4 月之间，发生变压器直流偏磁事件 137 起，其中变压器中性线直流偏磁电流超过 26A 的有 47 起，单台变压器最大中性点电流高达 58A。

经分析，发现国华台电 220kV 电网直流偏磁严重，发电厂 1、2 号主变压器中性点电流源自恩平、开平、水口、唐美等距离直流接地极较近的变电站。这些呈源极特性的变电站位于大地电位上游，吸入地中电流并通过大容量的输电线路向位于海边的下游发电厂流去，在发电厂汇集，造成该发电厂主变压器中性点产生高达 58A 的严重直流偏磁现象。国华台电直流偏磁现象呈漏斗状，严重影响了变压器正常运行，对电力系统稳定运行也构成了一定的威胁。

国华台电二期 6 号机组于 2011 年 3 月 29 日通过 168h 试运行后正式投产。自投产以来，根据对 6 号主变压器运行状态的监测，发现 6 号主变压器已受到电网直流偏磁的影响。在电网中出现单极一大地运行方式时，6 号主变压器运行声音明显增大，变压器振动增大，并且在变压器铁芯中也检测到电流，引起铁芯发热。通过监测，6 号主变压器 2011 年 4~11 月运行期间，中性点直流电流超过 8A 的有 12 次，最大直流电流达到 20A，超出了主变压器设计允许值近一倍，威胁主变压器正常运行及机组安全稳定运行。

【事件 6】 1989 年 3 月 13 日，一场特大磁暴侵袭地球，北美、北欧等地区的多个国家电网均不同程度地受到了 GIC 的干扰，并引发了著名的魁北克大停电事故，这也是迄今为止导致电网灾害最为严重的一次事件，带来了一系列的严重后果：加拿大魁北克 ($46^{\circ}5'N$) 水电站 735kV 的 2 台升压变压器烧毁，在 59s 内 7 个 SVC 相继跳闸，1200t 的电容器毁坏，在这之后 25s 系统电压崩溃，魁北克 735kV 系统全部停电，导致近魁北克 600 万用户停电超过 9h，损失 21 500MW 的发电量。美国新泽西州 ($40^{\circ}13'N$) 的一座核电站的变压器被烧毁，损失高达 1200 万美元，许多变压器损坏、跳闸。

事故前系统发电共 21 350MW，大部分由詹姆斯海湾水电群、丘吉尔瀑布和马尼夸根水电群通过 735kV 输电线路远距离送电至南部负荷中心，并向相邻系统送出 1950MW 电能（其中 1325MW 由直流系统送出，625MW 由与系统不相连的发电厂送出），当时 735kV 输电系统的输送容量约为其稳定极限的 90%。