

高温超导技术 系列丛书

高温超导变压器

原理与装置

Principle and Device Technology of High Temperature
Superconducting Transformers

金建勋 汤长龙 孙日明 陈孝元 著



科学出版社

高温超导技术系列丛书

高温超导变压器原理与装置

Principle and Device Technology of High Temperature
Superconducting Transformers

金建勋 汤长龙 孙日明 陈孝元 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合作者的相关研究和创新工作,全面阐述了高温超导变压器的概念、技术原理、装置技术、应用特性及发展趋势,是一部对超导应用尤其是超导技术在电力领域应用的发展有显著理论和技术指导意义的著作。同时,对高温超导技术的电力应用,尤其是高温超导变压器技术的研究与实用化发展有重要的指导作用。

本书可供从事应用超导技术研究工作的科研人员、电工与电力工程技术领域及相关生产行业的技术人员,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高温超导变压器原理与装置/金建勋等著. —北京:科学出版社,2016.3
(高温超导技术系列丛书)

ISBN 978-7-03-047534-3

I. ①高… II. ①金… III. ①高温超导性-超导变压器 IV. ①TM41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 044366 号

责任编辑:裴 育 陈 捷 纪四穗 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:300 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

高温超导技术的研究已经进入初期实用化发展的新阶段。高温超导体的基本应用特征使其在强电应用领域具有普遍适用和显著高效的优越性,以及在一些特定的领域具有常规导体技术无法实现的功能。节能与高效、技术优越性和潜在的经济价值,使高温超导技术展现了强劲的生命力,并已成为 21 世纪重点研究和发展的的高新技术。超导应用技术正向材料及其装置的实用化方向发展,它是当今科技发展最有影响力的领域之一。

随着高温超导材料与应用技术的发展以及装置和电力系统的需求,高温超导变压器技术的研究与应用意义重大,备受关注。高温超导体的特殊电磁特性,为变压器技术领域引入了一个新的发展技术和方向,在节能与高效的同时,也带来了其他的特殊功效。高电流密度和零直流电阻的高温超导材料的引入,大大降低了变压器的铜损,同时也为降低铁损和无铁损的强耦合提供了新的技术方案。高温超导变压器技术是今后一个时期内超导与电力技术领域的重要研究和应用发展方向之一。

高温超导变压器应用广泛,具有良好和广阔的发展潜力,应用意义重大。由于电力系统的迫切需求,这一技术得到了特别关注。然而,目前在应用超导和电力领域,尚无一部完整且详细阐述高温超导变压器装置的专著。因此,作者希望通过总结多年从事高温超导应用研究的经验以及与本书相关的创新研究工作,全面阐述高温超导变压器的概念、技术原理、装置技术、应用特性及发展趋势,进而形成一部对该领域发展有重要指导意义的著作,以期对高温超导变压器技术的研究与实用化发展有显著的指导作用。同时,希望读者能由此全面了解高温超导变压器这一新技术的原理及其装置和应用技术的核心内容。

本书内容新颖且覆盖全面,兼顾高温超导变压器新技术的原理介绍和应用分析,理论分析与实际技术紧密结合,同时突出高温超导变压器新装置的特性。

本书在撰写过程中,李丰梅、朱永平和巴烈军等辅助做了大量的资料整理工作,特此感谢。

金建勋

2015 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 超导变压器的研究和发展背景	1
1.1 变压器的出现及发展简史	1
1.2 现代电力系统的发展趋势	3
1.3 电力变压器在电力电网中的应用	3
1.4 现代电网对变压器性能的需求	7
1.5 变压器的主要性能指标	8
1.6 现代电力系统与超导变压器	10
参考文献	14
第 2 章 变压器原理与设计	15
2.1 铁芯变压器	15
2.1.1 空载运行	15
2.1.2 负载运行	17
2.2 空芯变压器	18
2.2.1 空载运行	18
2.2.2 负载运行	19
2.3 传统油浸式变压器设计要点	20
2.3.1 基本设计要求	21
2.3.2 变压器内部结构设计	22
2.3.3 油箱结构设计	37
2.3.4 变压器组件的选配	38
第 3 章 变压器铁芯技术	41
3.1 铁芯材料	41
3.1.1 发展概述	41
3.1.2 硅钢片材料	43
3.1.3 非晶合金材料	46
3.1.4 材料性能比较	50
3.2 铁芯分类与结构	53
3.2.1 铁芯类别	53
3.2.2 芯式变压器铁芯	53

3.2.3 壳式变压器铁芯	56
3.2.4 卷铁芯	57
3.2.5 超导变压器铁芯实例	59
3.3 铁芯损耗计算	59
3.4 低温铁芯技术	63
参考文献	66
第4章 超导变压器绕组技术	67
4.1 超导材料	67
4.1.1 实用超导线材	67
4.1.2 超导复合导体	72
4.2 绕组分类与结构	82
4.2.1 绕组分类	82
4.2.2 层式绕组	84
4.2.3 饼式绕组	85
4.2.4 超导绕组结构实例	90
4.3 超导绕组损耗	95
4.3.1 分类及内在机理	95
4.3.2 磁滞损耗	96
4.3.3 磁通流动损耗	98
4.3.4 耦合损耗	99
4.3.5 涡流损耗	100
4.4 绕组结构设计与优化	101
4.4.1 绕组性能比较	101
4.4.2 优化设计方法	103
参考文献	110
第5章 超导变压器装置原理	112
5.1 低温制冷技术	112
5.1.1 分类与方法	112
5.1.2 实例与分析	116
5.2 电流引线技术	119
5.2.1 分类与结构	119
5.2.2 实例与分析	121
5.3 高压绝缘技术	123
5.3.1 材料与方法	123
5.3.2 实例与分析	125

5.4 性能测试技术	130
5.4.1 概述	130
5.4.2 涌流性能测试	132
5.4.3 交流损耗测试	139
5.4.4 失超检测与保护	143
参考文献	146
第6章 超导变压器设计	148
6.1 基本分类	148
6.2 设计概述	148
6.3 630kVA 电力变压器设计	155
6.4 1MVA 电力变压器设计	159
6.5 3MVA 牵引变压器设计	168
6.6 100MVA 大型变压器设计	173
6.7 240MVA 大型变压器设计	178
参考文献	185
第7章 超导变压器实例与分析	186
7.1 发展与应用概述	186
7.2 超导电力变压器	187
7.2.1 升降压变压器	187
7.2.2 限流变压器	193
7.3 超导牵引变压器	203
7.4 超导空芯变压器	207
7.5 超导混合变压器	211
7.5.1 高电压变压器	211
7.5.2 大电流变压器	215
7.6 超导特殊变压器	219
7.6.1 松耦合电能传输变压器	219
7.6.2 感应加热变压器	229
7.7 发展前景展望	233
参考文献	235

第 1 章 超导变压器的研究和发展背景

1.1 变压器的出现及发展简史

许多重要的发明创造最初都来源于对偶然现象的发现,变压器也是如此。1831 年 8 月 29 日,法拉第(Faraday)采用图 1-1(a)所示的两个线圈 A 和 B 分别绕制在 7/8 英寸(in, 1in=2.54cm)粗的圆铁棒制成的圆环上。线圈 A 是由三段各长 24 英寸的铜线圈组成,三段铜线圈可以根据需要进行串联。线圈 B 是由总长为 60 英寸的铜线绕制而成的两段铜线圈,两段铜线圈根据需要也可以串联连接。在实验中将线圈 B 首尾连接一个检流计-电流表。当用电池给线圈 A 通电时,发现检流计指针摆动,即说明线圈 B 和检流计中有电流通过。后来这个线圈被称为法拉第感应线圈,实际上这就是第一只变压器的雏形。同年 11 月 24 日,法拉第向英国皇家学会报告了他的实验及其发现,因此,他被公认为电磁感应现象的发现者。

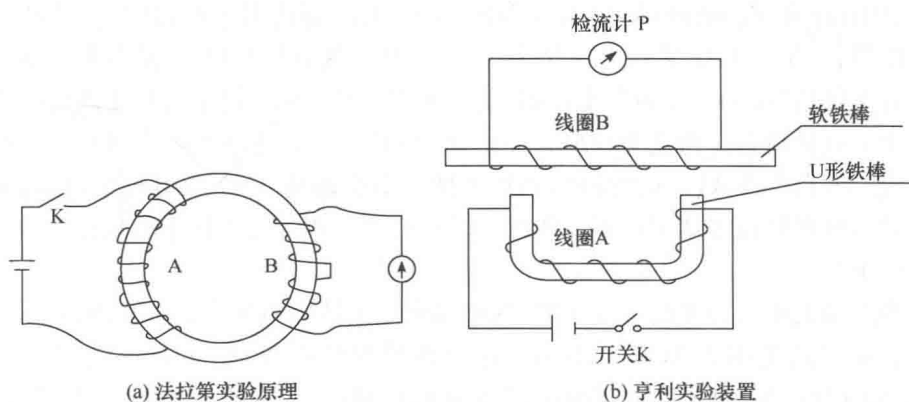


图 1-1 变压器原理与实验装置

1830 年 8 月,纽约奥尔巴尼学院(Albany Academy)教授亨利(Henry)采用图 1-1(b)所示的实验装置进行了磁生电实验。他在实验中发现,当合上开关 K 时,检流计 P 的指针摆动;当打开开关 K 时,检流计 P 的指针向相反的方向摆动,而且在线圈 B 的两端间存在火花现象;当改变线圈 A 和 B 的匝数,可以将大电流变为小电流,也可以将小电流变为大电流。这个实验是观察电磁感应现象非常直观的关键性实验,这个实验装置实际上也是一台变压器的雏形。因此,亨利被认为是实际上最早发现电磁感应现象的人。

但由于当时没有交流电源,所以不管是法拉第磁感应线圈,还是亨利实验装置,都只能算是一个双绕组脉冲变压器,没有实际应用价值。它们的区别只在于:法拉第电磁感应线圈是闭合磁路结构,亨利实验装置是双芯开路磁路结构。

1950年,德国技师 Ruhmkorff 在 Masson 和 Brequent 的指导下,制造出第一只感应火花线圈。由于线圈的原边绕组采用酒精开关,可实现反复连续开合,故而可以使副边线圈产生连续的交流电;同时线圈用涂漆铜线绕成,线圈层间用纸或稠漆绝缘,副边线圈与原边线圈之间用一只玻璃管隔开,达到了良好的整体绝缘效果,所以 Ruhmkorff 线圈可以大功率连续供电,不仅可以用于实验,还可以用于放电治疗。因此,可以说 Ruhmkorff 感应线圈是第一台有实用价值的变压器。

19世纪80年代,交流电进入人类社会生活,变压器(感应线圈)的原理也被许多人所了解,人们自然而然想到将变压器用于实际交流电路中。

在这方面迈出第一步并作出重大贡献,同时被称为现代变压器的鼻祖的是法国学者 Gauland 和英国人 Gibbs。他们发明了一只被称为“secondary generator”(二次发电机)的感应线圈,也就是一台靠推进、拉出铁芯来控制电压的开路铁芯变压器。

第一台闭合铁芯,且在铁芯柱外有绕组的变压器,是1884年9月16日由 Dery、Blathy 和 Zipernovsky 在匈牙利的 Ganz 工厂制造出来的,这台变压器是单相变压器,容量为1400VA,电压比为120V/72V,频率为40Hz。他们在其专利申请中首次使用“transformer”(变压器)这一术语。1885年,匈牙利布达佩斯博览会上展出了这种设备。博览会开幕时,由一台150V、70Hz单相交流发电机发出的电流,经过75台5kVA变压器降压,点燃了博览会会场的1067只爱迪生灯泡,其光耀夺目的壮观场面轰动了世界。所以,人们把1885年5月1日作为现代实用变压器的誕生日。

当欧洲人正致力于改进变压器、探索隔离变压器应用领域的时候,因火车空气制动器起家的美国人 Westinghouse 正想涉足交流电领域,于是他购买了几台 Gauland 和 Gibbs 的交流电压变换设备及其专利,并重新进行机械和电气设计。1886年,第一台用于交流照明系统的变压器投入使用并获得成功,随后这一项技术得到迅速发展。

1890年,原德国通用电气公司(AEG)工厂的俄国科学家 Dolivo-Do-browsky 发明了三相变压器。由此,他被称为“三相交流电之父”。1888年,他提出三相电流可以产生旋转磁场,并发明三相同步发电机和三相鼠笼式电动机。1889年,他为解决三相电流的传输及供电问题开始研究三相变压器。他研制的三相变压器的原边、副边线圈与当时的单相变压器相比并无太大差别,主要区别在于其铁芯布置方面:三个芯柱在周向垂直对称布置,上、下与两个轭环相连,结构类似于欧洲中世纪的修道院,故被称为“temple type”结构。这种结构和今天我们熟知的三相卷铁

芯变压器铁芯结构有一点类似。

1.2 现代电力系统的发展趋势

能源是人类发展的基本条件。电能作为现代社会最主要的二次能源,在生产 and 生活中有着极广泛的应用,在人类社会的现代化进程中扮演着极其重要的角色。自 20 世纪中叶以来出现的大电力系统,是一切工业系统中规模最大、层次复杂、资金和技术密集的复合系统,是人类工程科学上最重要的成就之一。尤其是在现代社会,科技水平的提高以及经济的发展,使得人类对电能的需求和依赖越来越高。

最早将发电、送电、用电完成实际应用的是在 19 世纪上半叶。1882 年,德国慕尼黑国际博览会向世人展示了从 57km 外的密示巴赫小水电站直流发电机发出的 1kV 左右的直流电如何输送到现场并驱动一台水泵运转的过程,因此最初的电力输送是直流系统。19 世纪下半叶,相继研究出三相电机、三相变压器和三相交流输电系统。1891 年,德国建立了最早三相交流输电系统(从鲁劳镇输电到法兰克福),如图 1-2 所示。图中三相输电线用单线表示,发电厂的升压变压器将水轮发电机送出的 95V 三相交流电提高到 15kV,然后经三相架空输电线路送至 170km 外的法兰克福,再经降压变压器降到 110V,供给灯泡照明,并由三相异步电动机驱动水泵。

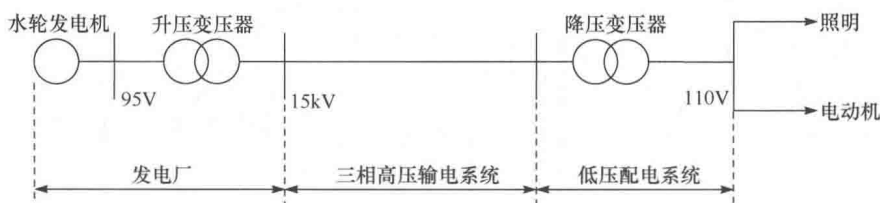


图 1-2 最早的三相交流输电系统示意图

随着国民经济的发展,社会对电能的需要越来越大,早期的一个发电厂孤立运行供电的方式已不再适用。我国从 20 世纪 50 年代就开始了城市电网的建设,就是将各个电厂包括水电厂、火电厂通过传输线互联在电力网上组成城市电力系统。20 世纪 60 年代我国逐渐形成了省网,70~90 年代发展成区域电网。现在我国有东北电网、华北电网、华东电网、华中电网、西北电网和南方电网六大区域电网。区域电网的互联是现代电力系统发展的一大趋势。

1.3 电力变压器在电力电网中的应用

随着我国经济的不断发展,对能源的需求量也越来越大,然而能源的不足与需

求之间的矛盾在近几年不断加深。电力作为一种特殊的能源,可以从能源产地由煤炭、石油、天然气或核能等转化成电能后,很方便地通过变压器经输电线路将电能输送到需要动力源的地方。电力输送比其他形式的能源输送都更简单、方便。同时在下大力气狠抓环境治理的国际大环境中,电能更是以一种可再生的绿色能源成为为各国经济发展提供保障的能源突破口。

作为一种特殊形式能量的电能,其在输送上与其他形式能量有不同的要求。在电力工业中,不管是向军队、国防、市政办公输送电能,还是向生产车间、城镇居民、商贸货物运输电能,变压器都是整个庞大能量传输网络中必不可少的枢纽性关键电气设备,因此变压器的整体运行性能无疑直接影响用电的安全性、可靠性以及电能传输的效率问题。它分布于电力系统的发、输、配、用各个环节。通常情况下,电能从发电到用电要使用变压器经过 5~10 次的电压等级变换。随着单机容量的日益增大,用户对变压器的要求越来越高,电力变压器除了要满足电、磁、力、热及高效率等技术规范,还要满足小型、无油、低噪声的要求,以减小占地面积和减少环境污染。

图 1-3 为一电力系统实例示意图。

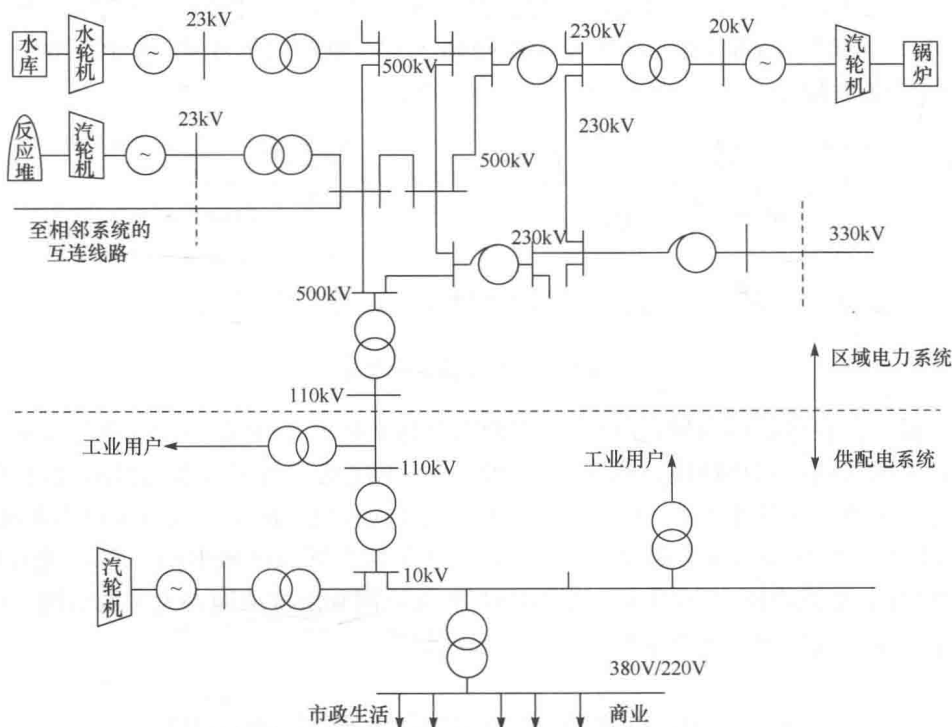


图 1-3 电力系统实例示意图

从图 1-3 中可以看出,在发输电和供配电过程中,都需要用到变压器。在电力系统中,变压器是主要构成装置,因此变压器的效率问题直接关系到电力系统的效率问题。变压器在传递功率的过程中,自身不仅要产生有功损耗,而且要产生无功损耗。在电力系统中,变压器总的电能损耗约占发电量的 10%,约占电力系统线损的 50%,而变压器在农电系统中的突出特点是季节性强、峰谷差大,再加上其全年空载和轻载运行时间较长,结果导致其损耗占电量损耗的 60%~70%。因此,各变压器制造厂商和发、供、用电部门正在研究降低变压器损耗的实用化策略,同时这已成为他们共同关注的重要课题。

自 1886 年变压器于照明领域中得到实际使用以来,交流输电电压和容量增长很快。1949 年以后,随着国民经济的快速发展,电力工业也同样得到了快速发展,特别是改革开放以来,随着我国经济的快速发展,与工业生产相关联的电力消耗量大幅增加(表 1-1)。

表 1-1 新中国电力工业和变压器工业的发展

年份/年	发电机装机/万 kW	年发电量/亿 kWh	变压器年产量/万 kVA
1949	185	43	11.9
1995	21724	10069	13444
2001	33861	14839	20832
2014	136019	54638	170076

据中商情报网报道,2014 年全国年发电量为 54638 亿 kWh,变压器产量高达 170076 万 kVA。图 1-4 是 2005~2014 年的全国年发电量。图 1-5 是 2008~2014 年全国变压器的生产量。

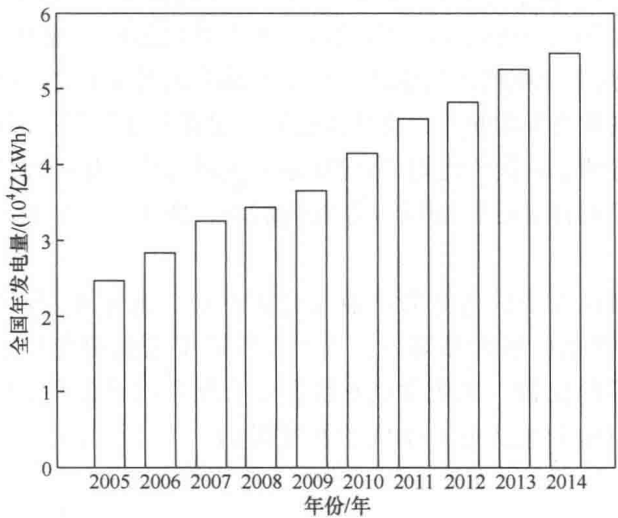


图 1-4 2005~2014 年的全国年发电量

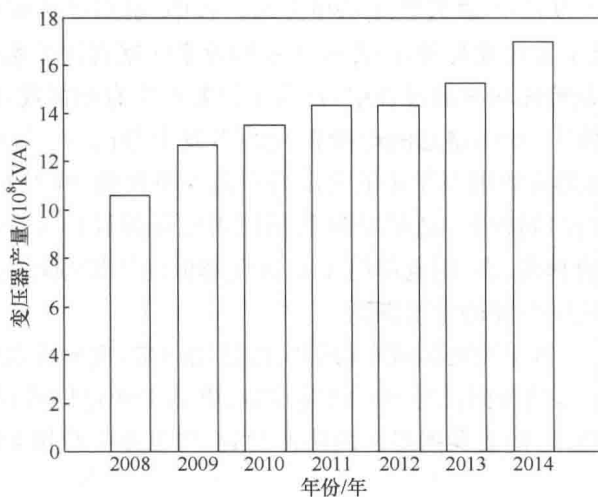


图 1-5 2008~2014 年全国变压器的生产量

变压器在新能源电动汽车领域有广泛的应用和巨大的市场。经济的稳定增长和快速城市化使汽车拥有量快速增加,但用油驱动的汽车会带来石油等化石燃料消耗的大量增加,同时,伴随着化石能源的消耗,二氧化碳及其他污染物的排放造成了环境的进一步破坏。电动汽车作为一种高节能、低污染的交通工具,是缓解全球能源危机和环境危机的重要突破口,也是发展低碳经济、落实节能减排政策的重要途径。据中商情报网报道,经过 2012 年和 2013 年的缓慢起步,全球电动汽车销量终于在 2014 年下半年爆发,6 月和 9 月两个月的销量均突破 30000 辆,全年销量已超过 30 万辆大关,远远高于 2012 年的 14 万辆和 2013 年的 20 万辆,2015 年电动车销量达到 54.9 万辆新高。电动汽车的产业化带动了电动汽车充电站的建设和发展,电动汽车充电机作为电动汽车充电站的关键设备之一,其快速、高效、智能充电技术对电动汽车续航能力及其普遍推广起着关键作用。充电机输出的电压一般在几十伏特到 700 伏特之间,输出功率可达到几百千瓦,因此加速了充电站对小体积、大功率、大容量裕度变压器方面的需求。图 1-6 是高频开关充电机原理框图。

另一个发展比较快的新能源产业是光伏产业。近年来,我国光伏产业发展迅速,光伏电池产量位居世界第一。表 1-2 为近年来我国光伏电池产量增长态势及与全球产量的比较。光伏发电系统需要有配套的且含有变压器的控制站或逆变柜。光伏电池和光伏电力系统的快速增加,加速了光伏产业对变压器的需求量。

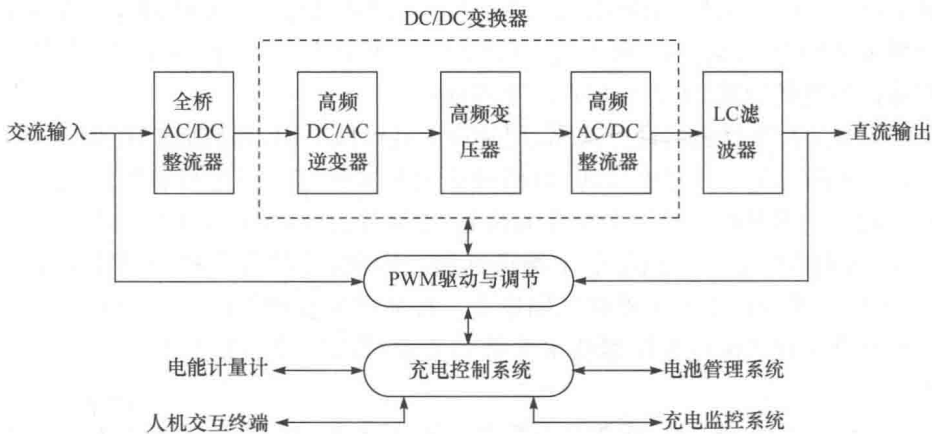


图 1-6 高频开关充电机原理框图

表 1-2 近年来我国光伏电池产量增长态势及与全球产量比较

年份/年	全球光伏电池产量/MW	中国光伏电池产量/MW	中国占比/%
2001	401.00	4.60	1.15
2005	1815.00	145.00	7.99
2009	12464.00	5851.00	46.94
2012	37488.00	22749.00	60.68
2013	40300.00	25100.00	63.00

1.4 现代电网对变压器性能的需求

在社会现代化建设进程中,随着高精度设备加工的推广,用电设备工作控制元件的集成小型化及城市建设用电的集中性,对电能质量和单台变压器供电量提出了更高的要求 and 需求。特别是在市政建设中对低电压、高可靠性大容量等级的配电变压器的需求极为广泛。此类变压器一般都装设在城区,对其噪声和环境污染等级要求也更为严苛。

传统变压器受到其材料本身的限制,即使近些年对新材料、新结构的开发应用卓有成效,如采用非晶合金材料加工制造变压器铁芯,可将空载损耗降低 80%,但是对某一种新材料或新结构的运用都不能较为完美地达到对变压器所期望的性能要求。

采用非晶合金材料加工制造的变压器称为非晶合金变压器。变压器的铁芯不是由普通的冷轧硅钢片制造的,而是由非晶合金材料制造的。非晶合金是一种在急速冷却的情况下形成的、具有非常好的导磁性能、单位损耗非常低的新材料。

通常情况下,用非晶合金制造的变压器,其空载损耗只有用普通硅钢片制造的变压器空载损耗的 20% 左右,空载电流下降约 85%,但因其物理特性,在实际使用中就存在难以回避的缺陷,主要体现在以下方面:

(1) 非晶合金材料的硬度很高,用常规工具难以剪切,制造加工困难。

(2) 非晶合金单片厚度极薄,对机械应力非常敏感。在进行装配和运行过程中产生的振动容易把非晶合金单片的棱角、边缘片折断,导致变压器内部留下较多的碎片,从而影响变压器内部的主绝缘性能。因此,非晶合金材料只能用于小容量、小电压等级的配电变压器铁芯制造中。按照国家标准 GB/T 25446—2010《油浸式非晶合金铁芯配电变压器技术参数和要求》规定,单相最大为 160kVA,三相最大为 2500kVA。

(3) 材料表面不平坦,铁芯填充系数较低,片与片之间的间隙较大。变压器运行时噪声较大。

综合以上非晶合金材料本身在变压器铁芯制造上的缺陷与高阻抗变压器的设计要求,非晶合金变压器也不可能设计成高阻抗变压器。

目前全世界变压器制造厂家几乎还没有用传统材料制造的高阻抗、低损耗变压器。在需要使用高阻抗变压器的场合,如炼铝厂、矿石冶炼厂等需要产生电弧,同时又能抵抗电压闪络和强大的短路电流的工作场合,一般都会单独在变压器的一次侧串联一个电抗器,而很少直接把变压器设计成阻抗很高的变压器。因为阻抗高于一定值时,一台高阻抗变压器的成本可能比一台同容量常规变压器加上一台性能优良的电抗器的成本还要高。

1.5 变压器的主要性能指标

变压器的主要性能指标包括短路阻抗、负载损耗、空载损耗、声级水平、容量、质量、尺寸与性能之间的关系。

短路阻抗:在额定频率及参考温度下,在变压器一对绕组中,某一个绕组端子之间的等效串联阻抗 $Z=R+jX(\Omega)$ 就是变压器的短路阻抗。

负载损耗:在变压器一对绕组中,一个绕组流经额定电流,另一个绕组短路,其他绕组开路时,在额定频率及参考温度下,这个绕组所消耗的功率。而在 IEC 标准里所给定的损耗参考标准均为总负载损耗值。

空载损耗:给变压器一个绕组施加额定频率下的额定电压,当其他绕组开路时,变压器吸取的功率定义为空载损耗。而流经该绕组线路端子的电流的方均根值定义为变压器的空载电流。通常以变压器额定容量下绕组额定电流的百分数值表示。

声级水平:在额定电压、额定频率下,变压器铁芯处于激磁条件时,在规定的距

离弧线上测得的噪声等级。

除此之外,一台变压器的重要参数还包括额定容量、绕组的额定电压、额定电压比、绝缘水平、绕组及油(为油浸式变压器时)的温升、绕组联结组标号等。

其中对于用户或者整个供电系统最关心且最具有直接相关性的莫过于涉及能源传输效率的负载损耗和空载损耗、关乎噪声污染的声级水平、影响变压器可靠运行(即抗干扰能力)的短路阻抗和绝缘水平。其中绝缘水平可以通过合理的结构设计予以保证,并通过出厂试验确保达标。

在具体设计中,对变压器主要性能参数的选用,应保证变压器可靠运行为基础,综合考虑技术参数的先进性和合理性,结合损耗的评价,提出变压器的技术经济指标;还要考虑系统的安全运行、运输及安装空间的需要和可能,以及在提出高性能参数的同时,由变压器的制造而相应增加的制造成本。

1. 短路阻抗

当负载的功率因数一定时,变压器的电压调整率与短路阻抗基本成正比,变压器的无功损耗与短路阻抗的无功分量成正比。短路阻抗大的变压器,电压调整率也大,因此,短路阻抗小较为适宜。然而,短路电流倍数与短路阻抗成反比,短路阻抗越小,则短路电流倍数越大,电网所受的影响越大,系统中开关开断的短路电流也大。对变压器则是,当变压器短路时,绕组会遭受巨大的电动力,并产生更高的短路温升。为了限制短路电流,则希望较大的短路阻抗。

然而,对于芯式变压器,当取较大的短路阻抗时,就要增加绕组的匝数,即增加导线质量,或者增大漏磁面积和降低绕组的电抗高度,从而增加铁芯的质量。由此可见,高阻抗变压器不仅相应增加制造成本,而且严重影响变压器传输效率。

随着短路阻抗的增大,负载损耗也会相应增大。因此,选择短路阻抗要考虑电动力和制造、电能损耗成本,两者兼顾。

2. 负载损耗

负载损耗包括绕组直流电阻损耗、导线中的涡流损耗、并列导线间的环流损耗和结构件(如夹件、钢压板、箱壁、螺栓、铁芯片、铁芯拉板等)的杂散损耗。

降低绕组直流电阻损耗的有效方法是增大导线截面积,这样就会导致绕组体积增大,相应增加导线长度,为了设计出低负载损耗的变压器,需耗用较多的导线,因而制造成本必然增加。

导线中的涡流损耗是指,绕组处于漏磁场中,在导线中产生的涡流损耗。在大型变压器中,涡流损耗有时会达到直流电阻的10%以上,纵向漏磁场在导线中产生的涡流损耗是该部分损耗的主要部分。当变压器短路阻抗增大时,纵向漏磁场增大,导致涡流损耗增加。降低涡流损耗的途径有可采用多根导线并联,或用组合

导线或换位导线。但是,考虑绕组的机械强度,若采用自黏性换位导线,或不惜牺牲损耗而采用截面积大的单根导线,这样又会使成本增加。

对于并列导线间的环流损耗,由于变压器绕组很多由多根导线并列绕成,且每根导线在漏磁场中占据的空间位置不同,因而它们各自产生的漏感电动势也不尽相同,由于漏感电动势之差会产生环流,故而产生环流损耗。当要求变压器短路阻抗大时,由前所述原因可知,需要减小电抗高度,增加导线匝数,但这种方式会增加环流损耗。为了抵偿该损耗的增大,需要采取适当的导线换位方式或增加导线截面积,以减小直流电阻损耗。

对于结构件的杂散损耗来说,在大型变压器中,杂散损耗有时会达到直流电阻损耗的 30%。

3. 空载损耗

变压器的空载损耗主要是指由铁芯带来的损耗,它由磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗组成。磁滞损耗和导磁材料的单位磁滞损耗及质量成正比,与磁通密度的二次方也成正比。涡流损耗也与导磁材料质量及磁通密度的二次方成正比。可见降低空载损耗可以通过减小铁芯质量、采用单位磁滞损耗小的导磁材料、降低磁通密度实现。而减轻铁芯质量和降低磁通密度都将不同程度地增加绕组铜线的用量,并且铜线用量的增加还不仅仅只是带来线圈成本的增加,同时由于绕组铜线用量的增加是基于导线长度的变化而引起的,所以这样的增加直接导致绕组电阻的增大,从而导致负载损耗的增大。

1.6 现代电力系统与超导变压器

电力变压器是电力电网中的主要电气设备,其制造工业随着电力工业的大规模发展而不断发展,以达到可靠性高、效率高、制造工艺成熟等目标。电力变压器的进一步发展趋势是降低损耗水平、提高单机容量、减小单机体积、加强环保功能、电压等级向 750~1000kV 特高压方向发展。现在变压器正处于一个成熟的发展阶段,仅仅采用传统方法已经难以满足现代电力工业发展的需求。提高电力变压器的性能,有赖于新材料、新工艺的采用和新型电力变压器的研究与发展。超导材料在减小变压器的体积和总损耗,以及提高单机容量等方面具有巨大的潜力,非常符合电力工业发展的需要。

从经济上看,超导材料的低阻抗、高电流密度特性有利于减小变压器的总损耗,提高电力装置和系统的效率,采用超导变压器将会大大节约能源,降低运行成本;从绝缘运行寿命上看,超导变压器的绕组和固体绝缘材料都运行于深度低温(如液氮温区 77K)下,不存在绝缘老化问题,即使在两倍于额定功率下运行也不会