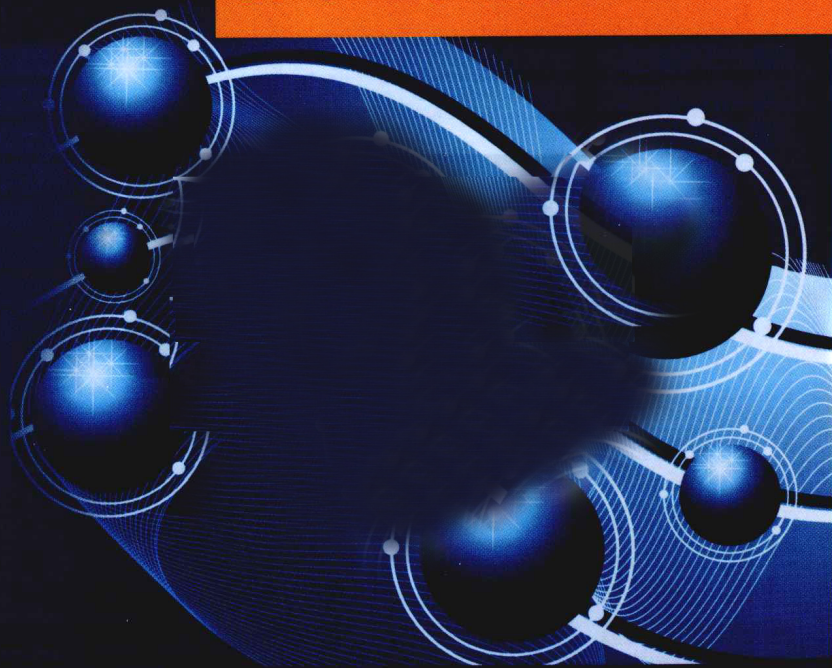




DIANZI DIANLI BIANYAQI

# 电子电力变压器

毛承雄 王丹 范澍 陆继明 著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 电子电力变压器

---

毛承雄 王丹 范澍 陆继明 著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

电子电力变压器是一种将电力电子变换技术和基于电磁感应原理的电能变换技术相结合,实现将一种电力特征的电能转变为另一种电力特征的电能的新型智能变压器。它在完成常规变压器变压、隔离、能量传递等功能的同时,也可以完成波形控制、潮流控制或电能质量调节功能,因此它具备解决电力系统中面临的许多新问题的潜力。

本书系统介绍了电子电力变压器的基本理论及其在电力系统中的主要应用,包括电子电力变压器的工作原理、数学模型、运行特性及运行方式、在输电系统及配电系统的应用以及多相、非工频等特殊用途。本书总结了作者多年来对电子电力变压器的研究成果。

本书可供从事和电子电力变压器相关的电力电子专业科研、设计、制造人员,以及高等院校相关专业教师和学生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子电力变压器/毛承雄等著. —北京:中国电力出版社, 2010.7

ISBN 978-7-5123-0420-8

I. ①电… II. ①毛… III. ①电子-电力变压器  
IV. ①TM41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 087085 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 10 月第一版 2010 年 10 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 14.5 印张 244 千字

印数 0001—3000 册 定价 50.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
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

电力变压器作为电力系统应用最广泛的设备之一，自一百多年前被发明以来，它的工作原理和基本功能一直没有发生变化。然而，在这一百多年的时间里，电力系统发生了深刻变化：系统规模日益扩大、结构更加复杂，如何保证其安全、稳定和经济运行是一个突出问题；以风能和太阳能等为代表的高效、清洁、可再生的分布式能源发电技术受到了世界各国的高度重视，如何将电源安全地接入系统，需要解决大功率、高效和高质量的能量转换及控制问题；电网智能化受到广泛关注，智能电网的建设对电网的可控性提出了很高的要求；大量非线性负荷的增长，迅速恶化了电力系统的供电品质，与此同时，用户对供电电能品质的要求却越来越高，使得电能质量问题成为了当前电力系统面临的亟待解决的重要问题。

在电力系统面对这些新挑战的背景下，作为电力系统最基本输变电装置的电力变压器，过于单一的功能及其固有的缺点使得其越来越难以满足现代电力系统的要求。因此，如何从功能上对电力变压器进行革新，实现变压器技术的再一次飞跃，使其满足现代乃至未来电力系统的各种新要求，是一个很有价值的理论课题和实践课题，也是广大研究工作者们面临的新的挑战。因此，自 20 世纪以来，国内外学者都在积极探索研究新型电力变压器。

电子电力变压器作为一种新型电力变压器，通过在常规电力变压器基础上，引入电力电子变换技术，使变压器的一、二次侧电压或电流可以灵活控制，从而具备了解决现代电力系统面临的许多新问题的潜力。

对电子电力变压器进行研究，国内外已有不少论文发表，但目前尚未见到有关专著问世。近年来，作者在这一领域进行了大量的研究工作，特别是率先开展其在电力系统中应用研究。相关研究工作曾先后得到湖北省自然科学基金、教育部新世纪优秀人才支持计划（NCET-04-0710）、中国博士后科学基金（20070410937）和国家自然科学基金（50807020）的资助，其相关理论和技术也是作者正在负责的 973 课题（2009CB219702）和参与的国家自然科学基金重点项目（50837003）重要研究内容。作者结合多年的研究成果写成本书，以期为我国

电子电力变压器的继续深入研究和实际应用作出一些贡献。

本书由毛承雄、王丹、范澍和陆继明合作撰写。毛承雄拟定了本书的大纲后，作者进行了充分研讨。毛承雄编写了第1、5、7和8章，王丹编写了第2、3、6、10和11章，范澍编写了第9和12章，陆继明编写了第4章。全书由毛承雄和王丹统稿。

在本书的编写过程中，武汉大学刘涤尘教授对本书进行了仔细的审阅，提出了许多宝贵的修改意见，华中科技大学熊信银教授也对本书提出了很多宝贵意见，在此表示衷心的感谢；课题组博士生刘海波和硕士生陈嫦娥、崔艳艳、曹解围、成建鹏、黄贻煜、方华亮、何金平、颜诒、习超等做了大量具体工作；书中还参考了同行们的一些研究成果，在此一并表示感谢。另外，作者对华中科技大学陈德树教授给予特别感谢，陈教授建议将作者早年称为“电力电子变压器”的名称改为“电子电力变压器”，其含义是要突出电力变压器，作者接受了陈教授的建议，自此以后，作者发表的学术论文以及本书的名称均称为“电子电力变压器”。在本书申请出版立项过程中，华中电网有限公司卢放副总经理、武汉大学刘涤尘教授、华中科技大学中国科学院院士程时杰教授、中国工程院院士潘垣教授和涂光瑜教授给予了大力推荐，也一并表示感谢。

本书的出版得到了国家科学技术学术著作出版基金的资助，在此深表感谢。

受作者水平所限，错漏之处敬请读者斧正！

作 者

2010年3月于华中科技大学

前言

英文缩写列表

<b>1</b>	<b>绪论</b> .....	1
1.1	变压器发展简史.....	1
1.2	电力电子变换技术概述.....	4
1.3	电子电力变压器的基本概念和研究现状.....	8
1.4	本书的主要内容.....	11
	参考文献.....	12
<b>2</b>	<b>电子电力变压器的工作原理和基本结构</b> .....	16
2.1	电子电力变压器的工作原理和分类.....	16
2.2	电子电力变压器的构成.....	19
2.3	电子电力变压器的额定值.....	20
2.4	直接 AC/AC 型电子电力变压器.....	21
2.5	AC/DC/AC 型电子电力变压器.....	27
2.6	小结.....	32
	参考文献.....	33
<b>3</b>	<b>电子电力变压器的数学建模</b> .....	34
3.1	概述.....	34
3.2	电压源变换器通用数学模型.....	34
3.3	电子电力变压器数学模型.....	38
3.4	谐波分析.....	43
3.5	小结.....	49
	参考文献.....	49

<b>4</b>	<b>电子电力变压器的特性与接入系统</b>	<b>50</b>
4.1	空载和负载运行	50
4.2	电子电力变压器的运行特性	51
4.3	电子电力变压器接入方式	56
4.4	小结	62
	参考文献	63
<b>5</b>	<b>电子电力变压器的并联运行与控制</b>	<b>64</b>
5.1	概述	64
5.2	并联运行的形式	66
5.3	并联的主要问题	68
5.4	并联运行的控制策略	69
5.5	主从控制的实现	76
5.6	基于调差原理的无互联线控制的实现	82
5.7	小结	89
	参考文献	89
<b>6</b>	<b>电子电力变压器的实现与试验研究</b>	<b>91</b>
6.1	概述	91
6.2	电力系统不平衡的危害	91
6.3	自平衡电子电力变压器的拓扑结构	93
6.4	控制策略	96
6.5	仿真研究	99
6.6	简化的试验研究	108
6.7	样机试验系统	115
6.8	小结	127
	参考文献	128
<b>7</b>	<b>多相电子电力变压器及多相 PARK 变换技术</b>	<b>129</b>
7.1	概述	129
7.2	多相电子电力变压器	129

7.3	多相 PARK 变换	131
7.4	3/4 相电子电力变压器仿真及结果分析	142
7.5	小结	144
	参考文献	144
<b>8</b>	<b>特种电子电力变压器</b>	<b>146</b>
8.1	概述	146
8.2	3/1 相与 3/2 相电子电力变压器	146
8.3	变频变压器	154
8.4	小结	155
	参考文献	155
<b>9</b>	<b>电子电力变压器的特殊用途</b>	<b>157</b>
9.1	概述	157
9.2	有载调压	157
9.3	故障限流	162
9.4	小结	163
	参考文献	163
<b>10</b>	<b>基于电子电力变压器的配电系统电能质量控制</b>	<b>164</b>
10.1	电力系统电能质量问题	164
10.2	电能质量控制的常规措施	167
10.3	基于电子电力变压器的电能质量控制系统模型及控制策略	169
10.4	仿真及结果分析	175
10.5	小结	178
	参考文献	178
<b>11</b>	<b>基于电子电力变压器的配电系统无功优化</b>	<b>181</b>
11.1	电力系统无功功率	181
11.2	电力系统无功优化	183
11.3	基于电子电力变压器的配电系统无功优化	185



11.4	基于电子电力变压器的电压崩溃防止·····	195
11.5	小结·····	199
	参考文献·····	200
<b>12</b>	<b>电子电力变压器在输电系统中的应用</b> ·····	<b>201</b>
12.1	概述·····	201
12.2	电子电力变压器与发电机励磁的协调控制·····	202
12.3	在远距离输电系统中的稳定控制策略·····	210
12.4	小结·····	213
	参考文献·····	214
附录 A	42 节点配电系统数据·····	215
附录 B	主要研究成果·····	219

## 绪 论

## 1.1 变压器发展简史

变压器是将一种形式的交流电能变换成另一种形式的交流电能的电力设备。电力变压器主要用于实现电压等级变换和电气隔离，自 19 世纪末被发明以来<sup>[1][2]</sup>，已有 100 多年的发展历史。目前已成为电力系统最基本和最重要的组成设备之一，被广泛地用于输变电系统和配电系统，是电力系统应用数量最多的输变电设备。

从原理上而言，变压器的历史甚至可以追溯到更早的 19 世纪 30 年代。1831 年，英国物理学家法拉第（Michael Faraday）建立的借以发现了电磁感应现象的实验设备，实际上已经包含了构成变压器的所有基本要素：一个封闭的铁心、两个独立的线圈，具备了变压器的雏形。在随后的直到真正意义的变压器出现前的 50 多年里，各种各样的类似于变压器的感应装置先后出现<sup>[2]</sup>。

进入 19 世纪 80 年代后，发电机技术的日趋成熟使电力技术逐步实用化，这促进了变压器技术开始向实用化方向发展。1882 年，爱迪生在纽约建立了第一个可以大区域范围提供照明电力供应的直流电力系统。与此同时，法国人 Lucien H. Gaulard 和英国人 John D. Gibbs 开始尝试将“变压器”（当时他们称之为“Secondary generator system”）用于照明系统。随后，匈牙利三位年轻的工程师 Karl Zipernowski, Otto T. Blathy 和 Max Deri 在此基础上设计了两种具有封闭铁心和绕组的感应设备。1885 年，他们建立了第一台真正意义的变压器。他们在布达佩斯成功地将 75 个变压器并联在交流电机提供的 1350V 的交流电源上，点亮了 1067 只白炽灯。尽管整个实验系统造价昂贵，但它证明了利用变压器降压实现用高电压点亮低压灯的可行性，揭开了现代变压器技术发展的序幕。与此同时，美国的发明家和工业家 George Westinghouse 也对电力产生了浓厚的兴趣，他投资支持工程师 William Stanley 在变压器方面的研究工作，并取得了实质性的进展。他们发明了叠片技术制造变压器的铁心，大幅度降低了变压器制造的难度和成本，为交流电廉价、灵活、便捷的传输奠定了基础，并由此使得“交流电发配制”在与“直

流电发配制”的斗争中取得了胜利<sup>①</sup>。电力工业逐步进入交流电发配制的时代。变压器技术也日趋成熟。到了 20 世纪初，电力变压器已经是非常成熟的产品，其基本特征直到今天都保持不变。

早期的变压器由铁心和缠绕其上的铜线圈组成。第一台变压器是采用一般的碳素钢丝作为铁心的导磁材料，将钢丝绕成卷铁心结构，绕组绕在卷铁心上。这种变压器虽然可以输送电能，但损耗大、效率低。随后，热轧钢片的出现，使铁心结构变成叠片式，从而使变压器的空载损耗比以钢丝作为导磁材料时大幅度下降，但变压器的效率仍然偏低。

此后，研究者在制造工艺上进行了大量的改进。其中，具有里程碑意义的几次技术飞跃包括以下两方面。

(1) 绝缘和冷却方面。早期的变压器纯粹采用空气绝缘和冷却，由于发热厉害，变压器工作寿命非常短。1906 年，人们开始采用矿物油实现绝缘和冷却<sup>[3][4]</sup>，从而提升了变压的绝缘等级和允许在更高的温度下正常运行，尤其是采用风扇进行强迫冷却后，变压器的体积可以做得更小，而容量却可以做得更大。为了解决矿物油的污染问题和易燃问题，采用树脂、难燃油或 SF<sub>6</sub> 作为绝缘或冷却介质的变压器也开始逐渐实用化<sup>[5]</sup>。

(2) 铁心导磁材料和结构方面。20 世纪初，英国的冶金学家 Robert A. Hadfield 经过长期的研究发现了磁滞损耗比锻铁更低的硅钢，并用之于变压器铁心的制造（热轧硅钢），在随后的 17 年时间内，使电力工业节约了约 3.4 亿美元<sup>[3]</sup>。20 世纪 20~30 年代，开始出现和应用冷轧取向硅钢。20 世纪 70 年代，薄的高导磁晶粒取向硅钢片出现，开始用于构成变压器铁心，加之叠片方法的改进，实现了铁心柱无缝、心柱与轭片内不设孔，从而大大降低了变压器的空载损耗和噪声<sup>[4]</sup>。20 世纪 80 年代，非晶合金材料开始被用于变压器的制作，进一步大幅度降低了变压器的铁心损耗。

经过 100 多年的发展，今天的电力变压器，无论是工艺，还是性能都达到了前所未有的高度。现代的电力变压器，电压等级已达到 1000kV，容量达到百万 kVA 级，效率已经达到了 99% 以上。

尽管变压器在导磁材料，铁心结构等方面进行了一系列的改进，从而极大地提高了变压器的效率和可靠性。但变压器的基本功能、工作原理和结构却没有发

---

<sup>①</sup> 实际上，直流电发配制的失势，还有几个其他重要的原因：一是 1888 年 Oliver B. Shallenberger 发明了比直流电表更优越的交流电表，为交流电的准确计量提供的依据；二是 Nikola Tesla 发明了多相交流电动机。

生任何变化：它依旧是根据电磁感应定律，利用导磁铁心和导电绕组（或线圈），实现交流电能的电压等级变换和不同系统间的电气隔离。

然而，在 100 多年的时间里，电力系统发生了深刻的变化。特别是近几十年来，电力系统出现了一系列新的特点：

### （一）电网规模日益扩大

工业的发展和社会的进步，促使电网规模（容量和覆盖地域）不断扩大。目前世界上已经形成了以北美联合电网、欧洲大陆互联电网和我国电网为代表的多个超大规模电力系统。其中北美联合电网总装机容量已达 8.3 亿 kW，230kV 及以上输电线路总长度约为 34 万 km，覆盖人口达 3.34 亿<sup>①</sup>。我国电网随着三峡电站和特高压输电工程等的建成投运，已经初步形成以西北部巨型水力、火力发电机群为电源，特/超高压远距离输送和东南部大规模受端电网为主要特征的超大型互联电网。截止 2009 年底，全国电力装机总容量累计达到 8.74 亿 kW，年发电量总计 36 639 亿 kWh，220kV 及以上输电线路达到 39.97 万 km<sup>②</sup>。超大规模电力系统结构复杂、覆盖区域广阔，如何保证其安全、稳定和经济运行是一个突出问题。

### （二）分布式发电技术迅速发展

随着矿物燃料的日益枯竭和全球环境的日益恶化，以风能和太阳能等为代表的高效、清洁、可再生的分布式能源发电技术受到了世界各国的高度重视，发展迅速。电力系统的电源由传统的工频交流形式变成了多种形式并存，如直流电源（光伏发电）、交流变频电源（风力发电）等。如何将这些电源安全地接入系统或者供给用户，都涉及一系列的大功率、高效、高质量的能量转换和控制问题。

### （三）电网智能化受到广泛关注

智能化对于提高电网的可靠性、经济性、安全性和稳固性，实现电力系统更高效、更环保的运行有重要意义。因此，智能电网一经提出，就受到广泛关注，已经在世界各国掀起了智能电网建设热潮。电网的智能化，以现有物理电网为基础，将现代先进的测感技术、通信技术和控制技术（包括控制方法和控制手段）与物理电网高度集成，形成新型电网。智能电网对电网的可控性提出了很高的要求。

① 数据来源于 North American Electric Reliability Corporation (<http://www.nerc.com/page.php?cid=1|7|10>)。

② 数据来源于中国电力企业联合会发布的 2009 年全国电力工业统计快报。

#### (四) 非线性负荷增长迅速

随着现代工业技术的发展，电力系统中非线性负荷和敏感性负荷大量增加。非线性负荷主要由两大类构成，一类是瞬时突变的负荷，如电机的启动、变压器激磁等；另一类是周期性的非线性负荷，如电弧炉、电焊机等。各种非线性负荷大规模的应用导致了电网电压和电流波形的严重失真，造成电网电能质量不断恶化，影响了供、用电设备的安全经济运行。另一方面，各种对电能质量敏感的负荷（如精密加工生产线）的持续增长，对电能质量要求越来越高。因此，现代电力系统的电能质量问题日益突出。

在电力系统面对这些新挑战的背景下，作为电力系统最基本输变电装置的电力变压器，过于单一的功能使得其不足之处也越来越明显，包括：体积大、重量重，变压器绝缘油对环境存在威胁；空载损耗较高，而负载时输出电压随负荷波动；负荷侧发生故障时，不能隔离故障，将波及到电源侧；带非线性负载时，畸变电流通过变压器耦合进入电网，会对电网造成污染；电源侧电压受到干扰时，又会传递到负荷侧，导致对敏感负荷的影响；需要配套的相关设备对其进行监测和保护；铁心饱和时，会产生谐波，在投入电网时还会造成较大的励磁涌流。此外，随着高压直流输电的发展，高压直流输电线路越来越多，直流输电单极大地方式运行时，直流地电流通过变压器中性点，造成变压器铁心偏磁饱和，变压器的输出谐波、振动和噪声增大。为了解决电力系统出现的各种新的问题，人们不得不在本已非常复杂的系统上继续加装各种调节器、稳定器、控制器和补偿器，使电力系统更加复杂。如果能够直接利用电力系统最基本的元件——电力变压器，来解决电力系统现有的问题，那么电力系统会变得更简洁、更安全。

因此，如何从功能上对电力变压器进行革新，实现变压器技术的再一次飞跃，使其满足现代乃至未来电力系统的各种新要求，是一个很有价值的理论课题和实践课题，也是广大研究工作者们面临的新的挑战。因此，自 20 世纪以来，国内外学者都在积极探索研究各种新型电力变压器。

## 1.2 电力电子变换技术概述

20 世纪 40 年代，在电能变换和传输领域，随着变压器设计制造技术的成熟和应用日益普及，人们又开始探索采用变压器以外的设备实现电能的变换和控制。1958 年，第一只商用晶闸管（Thyristor，也被称为可控硅整流器 SCR，Silicon

Controlled Rectifier) 的出现, 标志着一门新兴技术——电力电子技术 (Power Electronics) 的诞生。1974 年, 第四届国际电力电子会议提出了著名的 W. Newell 定义, 这是首次对电力电子技术 (或电力电子学) 做出的定义, 电力电子技术是横跨在电子技术、电力技术以及控制技术之间的交叉学科。

### (一) 电力电子技术的内容

电力电子技术主要包括了两个方面的内容: 一是电力电子器件 (也称为电力半导体器件或功率开关) 制造技术, 二是电力电子变流技术。这二者相辅相成, 共同决定了电力电子技术的发展水平和方向。

(1) 电力电子器件是电力电子技术的基础。自第一只晶闸管诞生以后, 电力电子器件一直处于快速发展阶段, 它先后经历了半控型器件时代、全控型器件时代以及复合型器件时代。半控型器件是电力电子技术发展初期的主要开关器件, 其最大的特点是控制极只能控制其导通而不能控制其关断。半控型器件的典型代表是普通晶闸管 (或者称为相控晶闸管)。20 世纪 70 年代, 全控型器件开始实用化, 全控型器件是指既可以控制其开通又可以控制其关断的电力电子器件, 其典型代表有门极可关断晶闸管 GTO (Gate Turn-off Thyristor)、功率双极结型晶体管 BJT (Bipolar Junction Transistor) 和功率场效应晶体管 P-MOSFET (Power MOSFET) 等, 全控型器件的出现, 大大提高了电力电子开关的控制灵活性。复合型器件的出现始于 20 世纪 80 年代, 最具代表性的器件有绝缘门极双极性晶体管 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 和集成门极换向晶闸管 IGCT (Integrated Gate Commutated Turn-off Thyristor), 它们仍然是全控型器件。复合型器件的特点是既具有良好的可驱动性, 又具有大的电压和电流耐受能力, 它们已成为电力电子技术中最具应用前景的开关器件。电力电子器件经过近 50 多年的发展, 无论是驱动方式, 还是电压和电流定额, 均得到了很大的提高。而且, 随着固体电子技术、新材料技术的进一步快速发展, 电力电子器件制造技术仍然在不断前进, 其总体发展趋势是: 高压、大功率、低功耗、复合型、集成化、模块化。

(2) 电力电子变流技术是指依靠利用电力电子器件构成的各种电力电子变换器灵活地实现电能可在各种形态间变换。它实际上包括两个方面的内容: ① 电力电子变换器技术; ② 控制技术。利用电力电子变换器实现的电力变换, 有四类基本变换, 它们是: 实现交流电到直流电变换的整流 (AC-DC)、实现直流电到

交流电的逆变 (DC-AC)、实现直流电到直流电的直流斩波 (DC-DC) 以及实现交流电到交流电的交流斩波 (AC-AC), 如图 1-1 所示。这相对于只能实现电压等级变换的常规电力变压器而言, 具有更广泛的意义。利用这四类基本变换, 可以构成许多种复合型电力电子变换器。

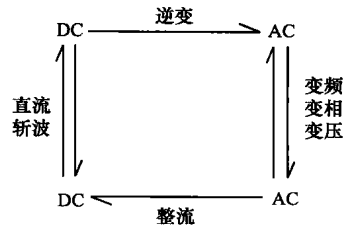


图 1-1 采用电力电子技术实现电能变换种类

## (二) 大功率电力电子技术的应用

电力电子技术的应用主要有两类: 第一类应用, 电力电子开关型变换电源, 这是以往 40 年间电力电子变流技术的主要应用领域; 第二类应用, 电力电子开关型电力补偿、控制器, 未来 20 年间, 将会在电力系统 (发电、输电、配电) 及负载电能质量控制领域得到广泛应用<sup>[6]</sup>。

已有的研究成果表明, 大功率电力电子技术应用于电力系统可提高输电能力和供电可靠性, 改善电能质量, 提高电网运行稳定性; 同时使电气设备重量减轻、体积变小, 节省大量铜、钢等原材料, 广泛采用电力电子技术以后, 还可以大幅度节能降耗, 从而节约大量资源和一次能源, 改善人类的生活环境<sup>[7][8]</sup>。

目前, 大功率电力电子技术在电力系统中的应用领域可以粗略地概括为以下几个方面<sup>[9][10]</sup>: ① 高压直流 (High Voltage Direct Current, HVDC) 输电技术; ② 柔性交流输电系统 (Flexible Alternating Current Transmission System, FACTS) 技术; ③ 用户电力 (Custom Power, CP) 技术等。

### (1) 高压直流输电。

高压直流输电技术自 1954 年在瑞典投入工业化运行以来<sup>[11]</sup>, 全世界 40 多个国家建立和计划中的直流输电工程已经超过 100 个, 总设备容量超过 100GW<sup>●</sup>。同时, 在全控型大功率电力电子器件发展的推动下, 新一代直流输电技术——轻型直流输电 (HVDC Light, 或称柔性直流输电) 也已出现, 它采用 GTO、IGCT 或 IGBT 等全控型功率器件构成电压源型换流站, 应用 PWM (Pulse Width Modulation) 控制技术, 实现电能变换和传输。其接受端既可以是有源网络, 也可以是无源网络, 能够实现对潮流、输出电压的大小和频率灵活控制<sup>[9]</sup>。

### (2) 柔性交流输电。

● 数据来自于 IEEE 输配电委员会 2009 年 7 月公布的材料。

根据 1997 年 IEEE PES 冬季会议上对 FACTS 的定义, 所谓柔性交流输电系统, 即是装有电力电子控制器以加强可控性和增大电力传输能力的交流输电系统。20 世纪 80 年代 FACTS 技术的提出, 极大地推进了电力电子技术在交流输电系统中的应用。从装置的角度来看, FACTS 技术已经发展到了第三代——复合型 FACTS, 即将两台或多台控制器复合成一组 FACTS 装置, 并使其具有一个共同的、统一的控制系统。典型的 FACTS 控制器有<sup>[12][13]</sup>: 静止无功补偿器 (Static Var Compensator, SVC), 晶闸管控制串联电容补偿器 (Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC), 静止同步补偿器 (Static Synchronous Compensator, STATCOM), 静止同步串联补偿器 (Static Synchronous Series Compensator, SSSC 或 S<sup>3</sup>C) 以及统一潮流控制器 (Unified Power Flow Controller, UPFC) 等, 另外还有很多 FACTS 设备正处于研究开发或初步应用阶段, 例如: 晶闸管控制制动电阻 (Thyristor Controlled Braking Resistor, TCBR), 晶闸管控制移相器 (Thyristor Controlled Phase Shifter, TCPS), 超导储能器 (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) 等。

### (3) 用户电力技术。

用户电力技术是 FACTS 技术在配电系统的延伸, 它和 FACTS 技术属于姊妹型技术, 它们的共同基础是电力电子技术, 各自的控制器也在结构上相似, 其差别通常仅在于额定电气值和控制目标不同。用户电力技术的目的是在配电系统中加强供电的可靠性和提高供电质量, 具有代表性的用户电力技术装置有<sup>[14]~[17]</sup>: 动态电压恢复器 (Dynamic Voltage Restorer, DVR), 固态断路器 (Solid State Circuit Breaker, SSCB), 故障电流限制器 (Fault Current Limiter, FCL), 有源电力滤波器 (Active Power Filter, APF), 统一电能质量调节器 (Unified Power Quality Conditioner, UPQC) 和功率因数校正器 (Power Factor Correction, PFC) 等。

这些电力电子装置的出现, 使电力系统的运行方式发生了深刻的变化, 产生了深远的影响。通过控制这些电力电子设备来提高电力系统稳定性、优化系统各线路潮流的大小和流向, 降低网络传输损耗, 提高电能传输效率或者改善电能质量等。

大功率电力电子技术已被引入到滤波器、断路器、电流限制器的设计中, 并取得了良好的效果。因此, 是否也有可能将电力电子技术应用到变压器的设计中, 使变压器的功能得以扩展, 是一个值得研究的课题。电子电力变压器 (Electronic Power Transformer, EPT) 正是在这一背景下出现的一种新型变压器<sup>[18]~[34]</sup>。这



是一种通过电力电子变换和电磁耦合实现电力系统中的电压变换和能量传递的新型智能变压器。

### 1.3 电子电力变压器的基本概念和研究现状

电子电力变压器又被称为电力电子变压器<sup>[19]</sup> (Power Electronic Transformer, PET), 固态变压器<sup>[21]</sup> (Solid State Transformer, SST) 或者电子变压器<sup>[24]</sup> (Electronic Transformer, ET), 也可以称作柔性变压器 (Flexible Transformer, FT)。它是近年来随着大功率电力电子技术的发展而逐步发展起来的新型电力变压器。它在实现常规电力变压器电压等级变换、电气隔离和能量传递等基本功能的基础上, 还可以实现潮流控制、电能质量控制等许多额外功能。

通过分析目前已经提出的各种电子电力变压器的拓扑结构, 我们可以对电子电力变压器作出如下定义: 所谓电子电力变压器, 是一种将电力电子变换技术和基于电磁感应原理的电能变换技术相结合, 实现将一种电力特征的电能转变为另一种电力特征的电能的电力设备。这里所谓的电力特征, 包括电压 (或电流) 的幅值、相位、频率、相数、相序和波形等。

在结构上, 它包含两个基本要素: 电力电子变换器和中 (高) 频变压器。它的主要功能是变压、变流、电气隔离、传递能量和电能控制。

电子电力变压器的突出特点在于通过引入电力电子变换器对其一次侧和二次侧的电压幅值和相位的实时控制, 实现变压器一次侧、二次侧电压、电流和功率的灵活调节。因此, 电子电力变压器可以满足未来电力系统很多新的要求, 包括: 获得更高的稳定性, 实现更加灵活的输电方式, 整合各种交直流分布式电源, 提供高品质电能, 实现电力市场下对功率潮流的实时控制, 以及为智能电网提供更有效的控制手段等。作为输配电系统最基本的组成设备, 这种新型变压器具备解决电力系统中面临的许多新问题的潜力。

#### 一、电子电力变压器的发展状况

1970 年, 美国 GE 公司的 W. McMurray 首先提出了一种具有高频链接的 AC/AC 变换电路<sup>[35]</sup>, 如图 1-2 所示。图 1-2 中 4 个开关均由一对带续流二极管的开关器件反向并联而成。这是一种相控变换装置, 其工作原理为: 左侧开关 S1 和 S2 以高频交替导通, 且通断时间相同, 这样低频交流或直流输入信号就被调