

研究生教学用书

现代 电力电子技术

林渭勋 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



研究生教学用书

现代电力电子技术

Modern Power Electronics

林渭勋 编著



机械工业出版社

本书阐述现代电力电子技术的基本原理,全书共7章,可分为3个单元:①器件单元:即第1章,着重阐述电路运行条件对功率二极管、Power MOSFET、IGBT和IGCT等器件性能的影响;②PWM硬开关电路单元:由第2~5章组成,分章阐述硬开关环境中用PWM控制的各种变换电路的工作原理,这些电路包含直流变换电路、逆变电路、交流变换电路和整流电路。③PWM软开关电路和PWM多电平电路单元:PWM软开关电路和PWM多电平电路分别代表现代电力电子技术的重要发展前沿,第6章分别阐述控制型、缓冲型和直流谐振型3类PWM软开关电路的工作原理;第7章则分别阐述PWM多重化和PWM中点钳位式两类多电平电路的工作原理。本书结构合理,内容新颖,阐述清楚,可作为电力电子和电力传动专业研究生教材;也可作为从事本专业工作的科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子技术/林渭勋编著. —北京:机械工业出版社,2005.4
研究生教学用书
ISBN 7-111-16096-7

I. 现... II. 林... III. 电力电子学—研究生—教材 IV. TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第007627号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:周娟 于苏华 责任编辑:刘丽敏 版式设计:霍永明
责任校对:张晓蓉 封面设计:鞠杨 责任印制:洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2006年1月第1版第1次印刷
1000mm×1400mm B5·15.25印张·594千字
定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书初版的名称是《电力电子技术基础》(机械工业出版社, 1990, 以下简称《基础》), 作为当时电力电子技术专业研究生教材, 并具有以下特点:

(1) 着重全控型电路 20 世纪 80 年代 GTR 等全控型器件刚在国内应用并显示出巨大的优越性, 而当时本科生教材仍以 SCR 电路为主, 本着既能衔接, 又有分工的原则, 本书只分析由 GTR 等器件组成的全控型电路, 其中包括全控型整流电路。众所周知, 相控式 SCR 整流电路技术成熟, 可靠而价廉, 但对电网的污染严重, 面对谐波抑制和无功补偿的巨大压力却少有良策。

(2) 突出 PWM 控制方式 尽管 PWM 控制对电路有诸多好处, 但在 SCR 电路中却未能普遍使用, 原因一是为了省却换流电路, SCR 电路必须尽量利用电源或负载换流, 故只能采用相控和频控方式; 另是 SCR 开关速度太低, 限制了 PWM 载波频率的提高, 因而即便在必须设置换流电路的 SCR 电路中, PWM 控制的优势也无从发挥; 与此相反, 全控型电路既无需换流电路, 又有较高的开关频率, 因而 PWM 控制能明显提升电路的性能并取代相控和简单频控而成为一种普遍技术。据此, 本书分章讨论各种 PWM 控制的变换电路, 其中也包括 PWM 整流电路, 它能实现网侧电流正弦化, 不仅消除谐波, 还可灵活调节无功。

与本书有关的另一本研究生教材是《现代电力电子电路》(浙江大学出版社, 2002, 以下简称《电路》)。由于学科的迅速发展, 在 12 年间已产生多方面的变化, 其中最重要的有:

(1) IGBT 的崛起和 GTR 的淡出 由于集中了 GTR 和 Power MOSFET 的优点, IGBT 以其优越的性能在短短几年间便完全取代了 GTR 的应用领域, 并将电力电子技术带进了超音频时代, IGBT 的崛起充分证明新器件的出现将会给学科的发展带来更为深远的影响。

(2) 高频化与软开关技术的发展 由于高频化给电力电子技术带来多方面的好处, 因此高频化是现代电力电子技术的特点之一, 而软开关技术则是高频化进程的产物, 也是本学科的又一发展前沿。

为了反映上述特点和前沿, 《电路》除保持《基础》原有的特点之外, 还着重增加以下内容:

- 1) 开关环境对 IGBT 和 MCT 等新型器件性能的影响。
- 2) 分章讨论控制型、缓冲型和谐振型等三类软 PWM 开关电路, 较为系统

地介绍这一学科前沿。

本书仍保持《电路》的格局特点，为反映学科的最新发展，内容作如下增删：

(1) 删去 MCT 代以 IGCT 鉴于 MCT 已宣告停产而 IGCT 已成为 GTO 的有力竞争者，故删去 MCT 代以 IGCT。

(2) 增加 PWM 多电平电路 PWM 多电平电路是近年来的研究热点，其思路是不依靠提高开关频率来抑制谐波，而是通过多重化和中点钳位减低谐波含量和 EMI 强度，这对大功率应用是十分可贵的，因而近年来发展很快。

(3) 增加基于 DSP 的 SVPWM 控制 为了提高水平，PWM 控制自身也在不断发展，其中基于 DSP 的 SVPWM 控制最受关注并已扩展应用到非调速领域。

(4) 增加低压 PWM 整流电路（含倍流整流电路和同步整流电路）。

(5) 因全书篇幅所限，大幅度压缩 PWM 软开关电路，仅保留其主要内容。

本书共分 7 章并可归纳为以下三个单元：

(1) 器件单元 即本书第 1 章，选材着重于常用器件如功率二极管、Power MOSFET、IGBT 和 IGCT，主要阐述电路运行条件（含开关环境）对上述器件性能的影响，目的在于帮助读者能正确选择和使用这些器件。

(2) PWM 硬开关电路单元 本单元包含第 2~5 章，分别介绍硬开关条件下各种 PWM 变换电路的工作原理，它们是 PWM DC/DC 电路、PWM DC/AC 电路、PWM AC/AC 电路和 PWM AC/DC 电路。作为本学科发展前沿之一，在 PWM 整流电路中阐述当前各种网侧功率因数的校正技术（PFC）。

(3) PWM 软开关电路和 PWM 多电平电路单元 本单元包含第 6 章 PWM 软开关电路和第 7 章 PWM 多电平电路，它们是本学科十几年来活跃的发展前沿。尽管这些电路还存在这样那样的问题，还需要不断改进和完善，但它们代表现代电力电子技术的发展前沿而受到国内外同行的关注，相信在以后会得到更好地提高和发展。

在本书编写过程中，参考了国内外有关单位和学者的著作和文章，在此谨表衷心感谢；对浙江大学电气学院各位同仁的关怀和支持也深表感激之情。

本书可作为电力电子与电力传动专业研究生教学用书，也可作为从事本专业科技工作人员的参考书。

由于电力电子技术发展十分迅速，而作者水平有限，更兼仓促成书，其中疏误之处，敬请读者指正。

编者

目 录

| | |
|-----------------------------|-----|
| 前言 | |
| 绪论 | 1 |
| 第1章 电路运行条件对电力电子器件性能的影响 | 8 |
| 1.1 概述 | 8 |
| 1.1.1 决定电力电子器件实际效能的主要因素 | 8 |
| 1.1.2 电力电子器件的分类 | 8 |
| 1.2 功率二极管 | 10 |
| 1.2.1 结型功率二极管的开关过程分析 | 10 |
| 1.2.2 开关环境对二极管开关性能的影响 | 12 |
| 1.2.3 二极管的功率损耗 | 13 |
| 1.2.4 快速功率二极管 | 14 |
| 1.2.5 肖特基势垒二极管 | 16 |
| 1.3 功率场效应晶体管 (Power MOSFET) | 18 |
| 1.3.1 分类和结构 | 18 |
| 1.3.2 静态特性 | 20 |
| 1.3.3 导通电阻 | 23 |
| 1.3.4 安全工作区 | 26 |
| 1.3.5 开关过程 | 30 |
| 1.3.6 栅极驱动电路 | 41 |
| 1.4 绝缘栅晶体管(IGBT) | 54 |
| 1.4.1 IGBT的结构和工作原理 | 54 |
| 1.4.2 特性和工艺 | 58 |
| 1.4.3 开关过程分析 | 62 |
| 1.4.4 缓冲电路 | 68 |
| 1.4.5 驱动电路 | 75 |
| 1.5 集成门极换流晶闸管 (IGCT) | 81 |
| 1.5.1 IGCT 开关电路 | 82 |
| 1.5.2 VC 开通过程分析 | 83 |
| 1.5.3 VC 关断过程分析 | 85 |
| 1.6 功率集成电路 (PIC) | 88 |
| 1.6.1 IGBT-IPM | 88 |
| 1.6.2 IGBT-PIC | 90 |
| 1.6.3 电力电子集成技术 | 91 |
| 参考文献 | 92 |
| 第2章 PWM 直流变换电路 | 94 |
| 2.1 概述 | 94 |
| 2.1.1 电力电子电路的分类 | 94 |
| 2.1.2 直流变换电路的分类 | 96 |
| 2.1.3 直流变换电路的基本用途 | 97 |
| 2.2 单象限降压型电路 | 97 |
| 2.2.1 电路外特性分析 | 97 |
| 2.2.2 输出滤波电路的参数选择 | 101 |
| 2.2.3 PWM 控制电路 | 103 |
| *2.2.4 ZVS PWM BUCK 电路 | 108 |
| 2.3 单象限升压型电路 | 112 |
| 2.3.1 电路外特性分析 | 113 |
| 2.3.2 考虑电路内阻 r_0 时的工作情况分析 | 115 |
| *2.3.3 ZCS PWM BOOST 电路 | 116 |
| 2.4 单象限隔离型电路 | 120 |
| 2.4.1 反激式电路(Flyback 电路) | 121 |
| 2.4.2 正激式电路(Forward 电路) | 130 |
| 2.5 电流双象限电路 | 136 |
| 2.5.1 双象限电路的分类 | 136 |
| 2.5.2 电流双象限电路 | 137 |
| 2.5.3 缓冲电路 | 139 |
| 2.5.4 电流双象限电路的应用 | |

| | | | |
|---|-----|---|-----|
| 示例 | 143 | 3.4.3 有源负载的工作情况分析 | 208 |
| 2.6 电压双象限电路 | 148 | 3.4.4 三相方波逆变电路的特点 | 211 |
| 2.6.1 $U_0 > 0$ 时的工作情况分析 | 148 | 3.5 三相 SPWM 逆变电路 | 213 |
| 2.6.2 $U_0 < 0$ 时的工作情况分析 | 151 | 3.5.1 控制极信号的时序分布 | 213 |
| 2.6.3 电压双象限电路在可逆直流 调速系统中的应用 | 151 | 3.5.2 纯阻负载下的电路工作 情况 | 215 |
| 2.7 单极性 PWM 四象限直流变换 电路 | 153 | 3.5.3 感性负载下的电路工作 情况 | 217 |
| 2.7.1 四象限桥式直流变换电路的 分类 | 153 | 3.6 逆变电路输出电压波形改善 | 217 |
| 2.7.2 同频式单极性 PWM 全桥 电路 | 154 | 3.6.1 附加输出滤波器 | 217 |
| 2.7.3 倍频式单极性 PWM 全桥 电路 | 157 | 3.6.2 PWM 技术的优化 | 219 |
| 2.8 双极性 PWM 四象限电路 | 158 | 3.7 逆变电路的控制 | 222 |
| 2.8.1 电路工作原理分析 | 158 | 3.7.1 电压瞬时值单环反馈控制 | 223 |
| *2.8.2 PWM 四象限桥式电路在可逆 直流调速系统中的应用 | 160 | 3.7.2 电流瞬时值单环反馈控制 | 225 |
| 参考文献 | 165 | 3.7.3 电压电流双环反馈控制 | 230 |
| 第 3 章 PWM 逆变电路 | 167 | 3.7.4 电压空间矢量控制 | 230 |
| 3.1 概述 | 167 | 3.7.5 PWM 逆变电路的控制 手段 | 240 |
| 3.1.1 特殊交流电源的分类 | 167 | 参考文献 | 248 |
| 3.1.2 逆变电路的基本用途 | 168 | 第 4 章 PWM 交流变换电路 | 249 |
| 3.1.3 逆变电路的分类 | 169 | 4.1 概述 | 249 |
| 3.2 单相方波逆变电路 | 170 | 4.2 单相交流调压电路 | 250 |
| 3.2.1 基本假定 | 172 | 4.2.1 理想条件下 PWM 交流调压电路 的工作情况 | 250 |
| 3.2.2 方波逆变电路 | 172 | 4.2.2 双向功率开关的连接方式 | 254 |
| 3.2.3 相移式方波逆变电路 | 176 | 4.2.3 网侧功率因数和载波频率 的选择 | 256 |
| 3.3 单相 SPWM 逆变电路 | 178 | 4.2.4 控制栅压的非互补方式 | 256 |
| 3.3.1 双极性 SPWM 逆变电路 | 178 | 4.3 三相交流调压电路 | 259 |
| 3.3.2 单极性 SPWM 逆变电路 | 187 | *4.4 由半控型器件组成的直接变频 电路 | 260 |
| 3.3.3 单相 PWM 逆变电路用例 | 197 | 4.4.1 理想条件下三相电流源 SCR 直 接变频电路分析 | 260 |
| 3.4 三相方波逆变电路 | 200 | 4.4.2 同步电动机的调速方法 | 265 |
| 3.4.1 纯阻负载的工作情况分析 | 201 | 4.4.3 变频电路的换流过程分析 | 266 |
| 3.4.2 无源感性负载的工作情况 分析 | 204 | | |

| | | | |
|--|-----|------------------------------------|-----|
| 4.5 由全控型器件组成的直接变频 电路 | 270 | 参考文献 | 338 |
| 4.5.1 电压源双向型直接降频 电路 | 270 | 第 6 章 PWM 软开关电路 | 340 |
| 4.5.2 电压源双向型直接变频 电路 | 278 | 6.1 概述 | 340 |
| 4.5.3 电流源双向型直接降频 电路 | 279 | 6.1.1 高频化与 PWM 技术 | 340 |
| 参考文献 | 283 | 6.1.2 高频工况下电路开关环境的 比较 | 340 |
| 第 5 章 PWM 整流电路 | 284 | 6.1.3 软 PWM 开关电路的 分类 | 341 |
| 5.1 概述 | 284 | 6.1.4 PWM 软开关电路存在的 问题 | 341 |
| 5.1.1 整流电路的理想状态 | 284 | 6.2 缓冲型 PWM 软开关电路 | 342 |
| 5.1.2 传统整流电路存在的问题 | 286 | 6.2.1 缓冲型 PWM 软开关电路 的分类 | 342 |
| 5.1.3 PWM 整流电路的分类 | 288 | 6.2.2 分立式缓冲型软 PWM 电路 | 346 |
| 5.2 低压大电流高频整流电路 | 289 | 6.2.3 单相式缓冲型软 PWM 电路 | 350 |
| 5.2.1 倍流整流电路 | 289 | * 6.2.4 集中式缓冲型软 PWM 电路 | 363 |
| 5.2.2 同步整流电路 | 293 | 6.3 控制型 PWM 软开关电路 | 371 |
| 5.3 电压型单相单管 PWM 整流 电路 | 298 | * 6.3.1 高频感应加热用移相式谐 振逆变电路 | 371 |
| 5.3.1 含 Boost APFC 的 PWM 整流电路 | 300 | 6.3.2 移相式高频链软 PWM 逆变 电路 | 379 |
| 5.3.2 含 Flyback APFC 的 PWM 整流电路 | 307 | 6.4 直流谐振型 PWM 软开关 电路 | 397 |
| 5.4 电压型单相桥式 PWM 整流 电路 | 310 | 6.4.1 SCR 集中换流电路 | 398 |
| 5.4.1 理想条件下的电路分析 | 310 | 6.4.2 直流谐振环的基本结构及 其存在问题 | 399 |
| 5.4.2 实际条件下的电路分析 | 313 | 6.4.3 有源钳位直流谐振 环 | 402 |
| 5.4.3 输出电压 U_0 的调节 | 317 | 6.4.4 并联式有源钳位直流谐 振环 | 406 |
| 5.4.4 网侧功率因数 $\lambda = -1$ 时的 电路分析 | 319 | 6.4.5 谐振型单相软 PWM 逆变 电路 | 411 |
| 5.4.5 电路的控制 | 322 | 参考文献 | 416 |
| 5.5 电压型三相桥式 PWM 整流 电路 | 326 | | |
| 5.5.1 电路工作原理分析 | 327 | | |
| 5.5.2 电路的控制 | 333 | | |
| 5.5.3 输出直流电压的估算 | 336 | | |

| | | | |
|--------------------------------------|-----|---|-----|
| 第7章 PWM多电平电路 | 418 | 7.5.1 中点钳位式方波逆变 电路 | 446 |
| 7.1 概述 | 418 | 7.5.2 中点钳位式 PWM 逆变电路 (NPC-PWM-INV) | 451 |
| 7.1.1 PWM多电平电路的工作 背景 | 418 | *7.5.3 直接转矩控制在 NPC-PWM- INV 中的应用 | 457 |
| 7.1.2 PWM多电平电路的 分类 | 419 | 7.6 中点钳位式直流变换电路 (NPC-DC/DC) | 465 |
| 7.2 多重化方波电路 | 420 | 7.6.1 间接式 NPC-DC/DC 电路 | 465 |
| 7.2.1 多重化方波整流电路 | 420 | 7.6.2 直接式 NPC-DC/DC 电路 | 466 |
| 7.2.2 多重化电压源方波逆变 电路 | 422 | 7.7 中点钳位式 PWM 整流电路 (NPC-PWM-REC) | 468 |
| 7.2.3 多重化电流源方波逆变 电路 | 429 | 7.7.1 SVPWM 的控制算法 | 468 |
| 7.3 多重化 PWM 直流变换电路 | 431 | 7.7.2 NPC-PWM-REC 的 控制 | 470 |
| 7.3.1 多重化 PWM 单象限降压型 电路 | 432 | *7.7.3 直流电源中点电位的 控制 | 473 |
| *7.3.2 多重化 PWM 双管正激式直流 变换电路 | 433 | 7.7.4 间接式 IGCT-NPC 双向变频 调速系统 | 474 |
| 7.4 多重化 PWM 逆变电路 | 435 | 参考文献 | 477 |
| 7.4.1 多重化 PWM 电压源逆变 电路 | 435 | | |
| 7.4.2 多重化 PWM 电流源逆变 电路 | 443 | | |
| 7.5 中点钳位式逆变电路 | 445 | | |

绪 论

电力电子技术作为一个学科仅有半个世纪的历史，但由于它对国民经济有明显作用，受到国内外的普遍重视，因而发展相当迅速，以致目前所用的技术，无论在功率器件、电路拓扑、控制方法和系统性能等方面均与早期有明显差别，具体而言有以下几个方面的特点：

一、绝缘栅晶体管(IGBT)的崛起和功率晶体管(GTR)的淡出

早期的功率器件是晶闸管(简称晶闸管或 SCR)，由于它和充气晶闸管相比，在功率密度、开关速度、工作寿命和功率损耗等方面均占优势，因而淘汰了后者并促使半导体变流技术的迅速发展。SCR 是一种半控型器件，由它组成的电路简称半控型电路，其基本特点是开关容量大，技术成熟且价廉，但电路结构复杂，开关频率不高，功率密度和整机效率仍然偏低。GTR 的应用，使电力电子电路由半控型转为全控型，并在不同程度上克服了 SCR 电路存在的缺点，因而在中小功率领域中出现了 GTR 电路取代 SCR 电路的局面。和功率场效应晶体管(Power MOSFET)相比，GTR 具有导通内阻低和阻断电压高的优点，但其输入特性却远逊于前者，因为 GTR 是一种电流控制型器件，其开通增益仅为 5~10，这对大功率器件控制电路的制作工艺和电能消耗都是沉重的负担。此外，为降低噪声，现代电源要求器件以超音频工作，但在硬开关环境中，GTR 的典型开关频率仅为 5kHz，这显然无法满足上述要求；与此相反，MOSFET 是一种电压控制型器件，控制功率极低；它同时又是一种高频器件，完全能在超音频硬开关环境中工作，但其输出特性却不如 GTR。由此看来，GTR 和功率 MOSFET 的优缺点具有明显的互补性，因此希望研制一种新型器件，其输入特性和开关频率与 MOSFET 相似；而输出特性和开关容量则与 GTR 相似，这种器件就是 IGBT，实际上它是一种用 MOS 栅控制的晶体管。由于 IGBT 具有 GTR 和 Power MOSFET 都无法具备的性能，在短短几年间，IGBT 就完全占据了原先 GTR 的应用领域并使电力电子技术进入到超音频时代。

在高压大功率领域，门极可关断晶闸管(GTO)的成功应用，使该领域的变流电路省去复杂的阳极关断电路(换流电路)。但 GTO 存在关断不均匀，易因局部过热而失效；此外 GTO 也是一种电流控制型器件，其关断增益仅为 3~5，需要复杂而昂贵的驱动电路和缓冲电路。由于这些弱点，限制了 GTO 的广泛应用。当初人们曾寄希望于 MOS 门控晶闸管(MCT)，但经历了 17 年的研制和生产之后不得不宣告中止，足令人扼腕。

在高压大功率全控型器件中,集成式门极换流晶闸管(IGCT)是一种将门极驱动电路与芯片集成封装的门极换流晶闸管(GCT),其表现很引人关注。它是在GTO和IGBT的基础上发展起来的,兼具两者的优点,又能克服两者的缺点。以成本为例说明,本来GTO芯片很便宜,但因外围电路价格昂贵,使组件的总成本明显升高;相反,虽然IGBT外围电路很简单,但芯片成本太高;IGCT是以GTO芯片为基础,但可省去关断缓冲电路,因而器件的总体成本最低。

目前GTO已失去其原先占有的4.5kV以下的国际市场,并由IGCT和IGBT取而代之。由于这两种器件正处于发展阶段,可以预计,高于4.5kV的GTO市场也将受到它们的挑战。

二、模块化和功率集成电路(PIC)的出现

就器件内部结构而言,功率MOSFET、IGBT和IGCT都是功率集成器件(PID),例如一只IGBT是由 10^5 个单胞集成而来的。但就这些器件的外部结构而言,早期却都是分立式的,因而在实用时必须为每个器件安置独立的散热器,这自然影响电路和系统功率密度的提高。模块技术的应用解决了这一问题。所谓器件模块化是指多个PID按电路拓扑安置在一起以构成功率模块(PM),PM的外壳是导热的绝缘体,因而可共用一个散热器,这就明显地提高了电路的功率密度。例如国外某公司生产的在线式不间断电源系统(UPS),对于输出容量为30kVA的同一产品,其逆变电路采用SCR时,整机功率密度为 $9.23\text{kVA}/\text{m}^3$,用分立式GTR时为 $20\text{kVA}/\text{m}^3$,而用GTR模块时则为 $35.3\text{kVA}/\text{m}^3$ 。此外,模块的应用也减少器件间连线。从而减少寄生参数对电路工作的影响,提高电路可靠性,尤其在高频工况下更是这样。

随着集成技术的进步,功率模块逐渐向智能化方向发展,也即模块内部除主电路功率器件之外,还包含相应的各种接口电路、保护电路(含过电流、过电压、欠电压和过热等保护)和驱动电路,故称智能模块(IPM)。若进一步将控制电路也包含在内便称为功率集成电路(PIC)。由器件的集成发展到电路的集成,是电力电子技术的一大进步。说明集成电路已由信息电子技术领域扩展到功率电子技术领域,或者说,在功率电子领域也正经历着昔日信息电子领域曾经走过的道路:器件和电路融为一体,器件的生产实际上也就是电路的生产。这个历程,不仅影响到器件和电路的行业分工,乃至影响人才培养。

必须指出,目前已有的IPM和PIC在功率等级上还很有限,但已在各个应用领域中显示出明显的优点,因此可以预见,它还会继续发展。但也应该看到,电力电子技术和信息电子技术之间尽管有很多相似之处,但由于处理的对象不同,不可避免地会同时存在明显差异,例如在电力电子技术领域中必须面对的电压等级从1V到1MV,在如此宽广的电压范围内,电源系统所要求的功率密度自然有很大差别,它们对集成度的要求也会不同。因而没有可能也没有必要强求

一律。按照技术可能, 分别对待, 在不同功率等级中采用不同集成度, 是目前的基本做法。

三、脉冲宽度调制 (PWM) 控制技术的广泛应用

PWM 是诸多斩波控制方式中的一种, 它维持开关周期恒定并通过功率器件的占空比控制输出量的大小, 最初应用于直流变换电路, 尔后将这种方式与频率控制相结合, 产生了应用于逆变电路(DC/AC) 的 PWM 控制技术: 通过改变调制信号频率实现输出电压基波频率的调节; 用改变调制信号幅值实现输出电压基波幅值的调节。与方波电压逆变电路相比较, PWM 逆变电路具有以下优点:

(1) 兼具压控和频控功能 方波电压逆变电路输出电压幅值调节必须借助于直流电压或桥间移相控制, 逆变电路自身无调压功能。由于采用 PWM 控制方式可实现电压调节, 这样既可简化直流环节, 又能提高控制反应速度。

(2) 降低输出电压的谐波含量 降低输出电压谐波含量可简化输出滤波环节、降低成本、提高电路功率密度和反应速度。与方波电压逆变电路相比, PWM 逆变电路输出电压谐波含量降低, 且载波频率越高, 输出电压的频谱特性便越佳。

尽管 PWM 控制技术在 SCR 逆变电路中便开始应用, 但 PWM 技术的优点并没有得到充分发挥, 因为提高载波频率就意味着提高 SCR 的开关频率, 但由于关断时间的限制, 在硬开关环境中, SCR 的上限频率仅为 1kHz 左右, 而与此相反, IGBT 在相同开关环境下, 其上限频率可达 20kHz (超音频), 这就为发挥 PWM 优点创造了远优于 SCR 和 GTR 的客观条件。事实证明, IGBT PWM 逆变电路的频谱特性远优于 SCR 和 GTR PWM 逆变电路, PWM 控制方式因而成为当今逆变电路的主要控制方式。

由于 PWM 控制方式在 DC/DC 和 DC/AC 变换领域中所显示出来的优点, 人们开始尝试将它推广应用到整流电路(AC/DC) 和交流变换电路(AC/AC)。众所周知, 以往的可控整流电路均用 SCR 构成并采用相位控制方式, 具有技术成熟、价格低廉和可靠性高等优点, 是所有变流电路应用最早的电路。但它同时也存在很多问题, 例如由于采用相控方式, 网侧功率因数低, 谐波含量高, 在电力电子装置应用日广、容量日增的今天, 这种情况使公共电网受到严重污染, 不仅有害于网间负载, 也会对各种信息设备产生干扰, 甚至影响到电网质量管理。为解决上述问题, 人们曾在谐波抑制和无功补偿等方面做过诸多努力, 也取得显著成绩, 但从总体上并没有解决, 原因是所有可控整流电路依然用 SCR 构成并沿用相控方式。也就无法消除产生谐波和无功的根源。相反, 如果在整流电路中采用 PWM 控制方式、功率器件改为 IGBT 等全控型器件, 上述问题便可迎刃而解。因此, 尽管 PWM 整流电路目前还没有普遍应用, 但终将会成为整流电路的主要形式。

在以往的 AC/AC 变换中, 主要采用相控和频控相结合的相频控制方式, 同

样由于电网频率低,存在输出电压谐波含量高。控制时滞长和装置噪声大等弱点。在采用 PWM 控制方式后,这些弱点会在不同程度上得到克服,但这是以功率器件改用全控型器件为代价,所幸的是随着技术的进步和生产规模化,全控型器件的售价已逐步降低。

可以看出, PWM 技术已成为所有电能变换电路均可应用的一种普遍技术,由于它能克服各种电路原先的某些不足,它的使用使电路性能普遍得到提升。诸如各种新型 PWM 整流电路及网侧功率因数校正技术的研究成为近年来学科的研究热点之一。

必须指出,随着应用领域的扩展,为了满足各种不同要求, PWM 技术自身也在不断地进步,从电压正弦化、电流正弦化到磁链正弦化,各种新型的 PWM 控制方式不断涌现,其中最有影响的是电压空间矢量 PWM 控制方式(SVPWM),由于它具有直流电压利用率高、开关次数少和易于实现全数字化控制等优点,在不同程度上克服了 SPWM 的弱点,使这一始用于交流传动系统的控制方式,迅速扩展到其他非电动机负载的应用领域。当然, SVPWM 的推广应用还得力于现代 PWM 实现手段的飞速发展,例如正是由于数字处理器(DSP)的强大功能和明显的面向工业倾向,使 SVPWM 的诸多复杂算法都能用软件处理并实现在线控制。

四、高频化的趋势和 PWM 软开关的提出

提高器件的开关频率可以使电路和系统获得多方面的好处,例如,超音频电路具有更高的功率密度和可靠性、低噪声和快速响应能力等。当电路采用 PWM 控制时,器件开关频率越高,相当于载波频率越高,输出电压中最低次谐波也越高,对滤波也越有利。因此高频化成为现代电力电子技术的特点。但由于器件的开关损耗与开关频率成正比,频率越高,器件开关损耗越大。电路效率也越低;此外,开关频率越高,电路中各电量的变化率也越高,电路所产生的电磁干扰(EMI)也越强,对环境的污染也越严重,所有这些都是不希望的。为提高效率,降低 EMI 强度,必须设法降低器件的开关损耗,减缓电量变化率,为此可采取以下两项措施:

(1) 设法缩短器件的开关时间 也即研究频率特性更为优越的器件。众所周知,器件的开关时间越短,每次开关所花费的能耗便越少。这一措施的难处在于器件的各项性能参数间的相互制约,因而开关时间的缩短要受到其他参数的制约。但必须指出,电力电子技术的发展经历表明,器件性能的改良乃至新器件的出现对技术的发展会产生更为深远的影响, IGBT 的表现便是很好例证。为此要注重器件的研究,尽管它比电路和系统的研究要更艰辛,需要更多人力和物力的投入。

(2) 设法改善器件在电路中的开关环境 器件开关环境(即电路运行条件)

的优劣会直接影响器件的开关损耗。例如在感性负载下，器件将在满压下开通，又在满载下关断，这种在大电流高电压下的开关操作必然产生很大的能耗，凡具有上述操作环境的开关方式称为硬开关方式，按硬开关方式工作的 PWM 控制简称为硬 PWM 控制，其相应的电路称为 PWM 硬开关电路。

如果通过外加措施使开关过程中器件的电流和电压错位，就有希望降低器件损耗，例如在零电压或零电流条件下进行开关，器件都不可能产生损耗。现将拥有或近于拥有上述环境的开关方式称为软开关方式，按该方式工作的 PWM 开关电路简称为 PWM 软开关电路。

对器件所在电路进行改造以实现软开关的技术称为软开关技术，它是当今电力电子技术的发展前沿之一。迄今为止，用来实现软开关的主要技术措施有：

1) 主要借助器件控制信号时序的合理安排以实现软开关，此类电路泛称控制型软开关电路。

2) 在电路中增设无源或有源缓冲电路以实现软开关，此类电路泛称缓冲型软开关电路。

3) 在直流侧设置谐振电路，将直流电压改变成高占空比的高频脉冲列，后续电路器件的状态更迭若保持在直流输入电压的零压期中进行，电路便能实现软开关，此类电路泛称直流谐振型软开关电路。

可以看出，几乎各种类型的软开关电路都是在原电路中增设无源或有源辅助电路，这自然会增加系统的复杂性。例如，缓冲型软开关电路必须在电路中附加有源或无源缓冲电路，而这些电路拓扑与 SCR 电路中的有源或无源换流电路十分相似，这就相当于全控型电路可省去换流电路的优点完全丧失。这种变化的影响相当深远，因为每个技术措施的贡献率是各自正负面影响的总和，贡献率越大，价值越高，生存空间就越大。对于 SCR 的换流电路，留给电源系统设计者的选择空间并不大，充其量是在诸多电路拓扑中择优而用；但对 PWM 电路中的缓冲电路，情况会有所不同，尤其是在大功率领域，如果高频化与可靠性之间的矛盾到了必须作出取舍的地步，决策者的选择更可能倾向于后者。为了减缓这种矛盾，使软开关技术能向商业化顺利迈进，需要做的工作很多，其中之一是产品开关频率的合理选择，高频化是一种必然的发展方向，提高开关频率会有很多好处。但电力电子技术是一种综合技术，开关频率的高低，要受到器件、电路、材料(包括磁性材料)等诸多方面的限制。因此应根据不同的应用领域，合理选择开关频率会减轻软开关技术所必须面对的压力。

五、PWM 多电平电路在大功率领域中的应用

新型大功率工业电源系统的应用有多方面的好处，其中之一是节约电能。据统计，我国单产能耗是发达国家的 5 倍。且长期居高不下，其原因很多，而电能严重浪费是其中之一。以大型风机水泵为例，其驱动电动机电压为交流 3kV~

10kV, 若由变频电源供电。则低流量输出时可使电动机低速运行, 电源低功率输出, 既方便又省电, 但由于缺乏合适的变频电源, 目前大多数均由电网直接供电, 电动机只能恒速运转, 导致低流量下电能大量浪费。

无论是电路结构或是控制方式, 低压变流技术(其代表是变频技术)已臻于成熟, 为将其延用于高压大功率领域, 高压大功率变频器的传统方案采用高-低-高方式, 即在低压变频器的出入端分别采用变压器进行电压匹配, 方案虽然可行但存在缺陷, 首先是低压大电流格局导致馈电损耗增加, 变压器的采用不仅价高、耗材、费电还降低整机功率密度。据此, 新型大功率高压变频器宜采用无输出变压器的高-高方式, 即将高压变频器直接插在高压电源和负载之间。

迄今为止, 能实现这一要求的电路结构是 PWM 多电平电路。所谓多电平电路指其输出(或输入)具有多个电平的大功率变换电路, 而 PWM 多电平电路则指采用 PWM 控制方式的多电平电路。必须指出, 在早期文献中, 多电平电路专指具有中点钳位结构的变换电路, 如中点钳位逆变电路(简称 NPC-INV)。其实多重化电路也具有多电平特征, 而且比 NPC 电路更早应用, 但前者在文献中常称为多重电路、组合电路、级联电路和多单元串联电路等, 其实它与 NPC 电路除都具有多电平的特征之外, 还具有以下的共同特点。因而将它们视为多电平电路的两个分支将更为妥当。

(1) 合理解决器件容量与电源扩容间的矛盾 PWM 多电平电路, 采用有源电路的串并联代替多器件的直接串并联, 利用电压源钳位消除器件串联时电压分配不均; 利用电流源限流消除器件并联时电流分配不均。因而可用现有水平的器件构建更大功率电路, 实现电源扩容的目的。但必须指出, 由于电路结构的差异, 各电路固有的扩容能力也有所不同。例如应用现有水平的 IGCT 或 IGBT 可以直接在变压器耦合输出的多重化 PWM 逆变电路上获得 6kV 的线电压(有效值), 但三电平 NPC 逆变电路却无法做到。

(2) 有效控制谐波含量和电磁干扰(EMI) 和低压电源系统相仿, 高压电源系统也存在谐波污染和电磁干扰, 而且由于电源功率大, 这种不良影响更为严重。在低电源系统, 解决上述问题的有效办法是高频化及软开关技术, 可惜这些措施在高压电源却难于实现, 因为高压大功率器件诸如 GTO 和 IGCT 的有效开关频率并不高, 因此多电平电路不依靠提高载波频率抑制谐波, 而是依靠提高电路重数和钳位点数来提高电平数, 使输出电压逼近正弦波, 实现谐波抑制和减低 EMI, 在这种思路下, PWM 多电平电路中频率比选得较低。因而功率器件的开关频率并不高, 这对于 GTO 和 IGCT 来说是十分可贵的。

依借上述特点, PWM 多电平电路的研究成为本学科的另一前沿, 近年来发展很快, 例如 PWMNPC 电路已从最初的逆变电路推广到直流变换电路和整流电路等。

但是下列两个问题却是推广应用 PWM 多电平电路所必须认真考虑的：

(1) 复杂性与可靠性间的制约关系 高压大功率电源多应用于电力、化工、冶金、能源等行业中的大型设备，一旦出现故障便会造成巨大损失，因此对电源的可靠性要求很高。但由上述，多电平电路无论在扩容或抑制谐波方面所采取的措施却均以增加系统的复杂性为代价。例如对于 PWM 多重化逆变电路而言，提高重数就意味着输出电压升高，谐波含量减少，但整机结构也相应更为复杂，这不仅增加成本，还降低可靠性。为此必须采用冗余设计和具备旁路控制功能等提高电源可靠性措施。

(2) 高投入与低回报之间的矛盾 为序述方便，仍以大型风机水泵为例，采用变频电源供电的节能效果显著毋庸置疑，但高压大功率变频电源技术含量高，难度大，成本自然也高，这与一般风机水泵等节能改造项目低投入高回报的要求正好相悖，因此如何利用高技术生产出低成本和高可靠的高压大功率电源系统成为当前国内外关注的热点。

第 1 章 电路运行条件对电力电子器件性能的影响

1.1 概述

1.1.1 决定电力电子器件实际效能的主要因素

所有电力电子器件在其装置中的实际效能取决于两方面：一是电力电子器件的设计和制作(参数设计、结构安排、材料性能、工艺水平和散热能力等)；二是器件所在电路的运行条件(电路结构、负载性质、控制信号、开关频率、环境温度和冷却条件等)。前一个因素属于器件的设计制作，后一个因素则与器件的选择和使用有关。

由于电路运行条件千差万别，器件制造厂只能根据某些典型运行条件对器件进行测试。因此所有器件性能参数均对应于该运行条件而言，使用者必须了解器件实际运行条件与测试条件间的差异，以及这些差异对器件性能产生的影响，只有这样才能合理选择和使用器件，并使它们在实际装置中发挥最大效能。

由于电力电子器件在电路中起功率开关的作用，因此本书着重分析开关环境对器件性能的影响。实践证明，器件开关性能与电路结构、负载性质、控制策略、开关频率和开关方式等条件密切相关，这些条件对器件某一性能参数的影响有好有坏，这种情况与设计制造对器件性能的影响很相似：器件参数对材料和结构的要求往往并不一致，因此用同一材料和结构制成的器件，不可能同时符合诸多参数的要求，因而产生器件参数间常有的相互制约现象。必须指出，器件参数固然会受到电路运行条件的影响，但电路运行条件又常常通过一定的结构特征起作用。

1.1.2 电力电子器件的分类

电力电子器件指用半导体材料制成的功率电子器件，半个世纪以来已发展了多种不同类型的器件，并可大致分类如下：