

变频调速SVPWM技术的原理、算法与应用

曾允文 编

电气自动化新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化新技术丛书

变频调速 SVPWM 技术的 原理、算法与应用

曾允文 编



机械工业出版社

SVPWM 技术是一种较新的逆变器调制技术, 具有很多独特的优点, 其应用范围已经跨越变频调速系统, 进入各个领域。本书系统地讲述它的调制原理、分类、算法、应用及实例, 全书共分 7 章, 内容包括变频调速与 SVPWM 技术、两电平 SVPWM 技术、两电平 SVPWM 技术的应用、三电平 SVPWM 技术、三电平 SVPWM 技术的应用、多电平 SVPWM 技术及其应用和 SVPWM 技术工程应用实例。本书内容完整丰富, 可作为相关大专院校学生和工程技术人员学习、应用的参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频调速 SVPWM 技术的原理、算法与应用/曾允文编. —北京: 机械工业出版社, 2010. 10

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 978-7-111-31903-0

I. ①变… II. ①曾… III. ①变频调速 IV. ①TM921. 51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 179730 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: 罗 莉 责任编辑: 吕 潇 版式设计: 霍永明

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 姚 毅 责任印制: 乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm 239 mm · 14. 75 印张 · 285 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-31903-0

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

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第5届电气自动化新技术丛书

编辑委员会成员

主任：王志良

副主任：赵相宾 牛新国 王永骥 赵光宙

孙跃 阮毅 何湘宁 霍勇进

委员：王永骥 王旭 王志良 王炎

牛新国 尹力明 许宏纲 孙跃

孙流芳 李永东 李崇坚 陈伯时

陈敏逊 阮毅 赵光宙 赵杰

赵争鸣 赵相宾 张浩 张承慧

张彦斌 徐殿国 何湘宁 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘书：刘娟 林春泉

电气自动化新技术丛书

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别是在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了电气自动化新技术丛书编辑委员会，负责组织编辑“电气自动化新技术丛书”。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版“电气自动化新技术丛书”，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

电气自动化新技术丛书
编辑委员会

第5届电气自动化新技术丛书

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者的支持下，在前4届编辑委员会的努力下，至今已发行丛书48种50多万册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了巨大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断地推出介绍我国电气传动自动化新技术的丛书。本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已经出版的丛书，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。为了更加方便读者阅读，我们对今后新出版的丛书进行了改版，扩大了开本。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版过程中，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位提供的出版基金支持，在此我们对这些单位再次表示感谢。

第5届电气自动化新
技术丛书编辑委员会
2007年12月18日

前 言

变频调速技术经过半个多世纪的发展、丰富和完善，至今已成为交流调速中独领风骚的调速方式。由于它有优异的控制性能、已能取代直流调速，因此变频调速有一统调速领域之势。

如所周知，变频调速的核心——变频器有一个先天的缺陷，那就是输出侧输出电压或电流存在大量的谐波，输入侧也使电压、电流发生畸变而产生谐波，这些谐波会对电机和电网造成不良影响，必须采取抑制谐波的措施。在一系列措施中，PWM（脉宽调制）技术是主要的，首先是采用正弦波 PWM（SPWM）技术，一直沿用至今，经过不断完善，效果显著，已成为变频调速技术的顶梁柱。然而它仍有不足之处，例如在低速时存在的转矩脉动、载波频率过高带来大的开关损耗和直流利用率不高等。20 世纪 80 年代中，德国学者首先提出另一种 PWM 技术，那就是本书所要讲述的 SVPWM（空间矢量脉宽调制）技术，它可以克服 SPWM 技术的缺点，表现在谐波抑制效果更好、转矩较平稳、直流利用率高，且极适于计算机控制，因此很快得到推广应用，成为变频调速技术另一个新的支柱。

SVPWM 技术得以取得如此效果的原因，就是在于调制的策略不同。SPWM 技术着重在使逆变器输出的电压尽量接近于正弦波，但电动机需要的是在气隙中形成圆形旋转磁场，产生恒定的转矩，而 SPWM 技术不易做到。SVPWM 技术则以控制电压空间矢量，使磁链轨迹逼近圆形为目标，所以转矩十分平稳。从这一点出发，SVPWM 优于 SPWM，此外还有如上所述的其他优点，因此它的应用日益广泛。

目前 SPWM 技术已有系统的文献讲述，而 SVPWM 技术则只散见于各种文献之中，未及整理，给读者学习、应用带来不便；因此有必要编出一本较为系统的读物，本书即为此而作。

本书第 1 章“变频调速与 SVPWM 技术”，讲述变频调速系统、变频器谐波的影响及对策、SPWM 技术、变频调速系统的控制和 SVPWM 技术概述等知识，为讲述 SVPWM 技术打下必要的基础。第 2 章“两电平 SVPWM 技术”，讲述两电平逆变器，两电平电压空间矢量的分布，两电平 SVPWM 控制算法。第 3 章“两电平 SVPWM 技术的应用”，讲述两电平 SVPWM 在变频调速系统及整流器等领域的应用。第 4 章“三电平 SVPWM 技术”，讲述三电平逆变器、三电平电压空间矢量的分布、三电平 SVPWM 控制算法。第 5 章“三电平 SVPWM 技术的应

用”，讲述三电平 SVPWM 技术在变频调速系统、整流器以及其他领域中的应用。第 6 章“多电平 SVPWM 技术及其应用”，讲述多电平逆变器、多电平逆变器空间电压矢量与分布、多电平 SVPWM 控制算法与在各个领域中的应用。第 7 章“SVPWM 技术工程应用实例”，列举 6 个实例，供读者学习、应用参考。

SVPWM 技术从诞生起，至今已有 20 余年的历史，发展迅速，普及广泛。在调速领域，从工业生产扩展到交通运输，电动汽车、电力机车、船舶推进等方面都有采用。它不仅用于调速系统，还扩大到其他领域，特别是电力系统，可以提高功率因数、稳定电压等，对改进供电质量有着重要的贡献。在与控制理论结合方面，从经典控制理论到现代控制理论都已普遍采用；近年来智能控制也开始渗入，如模糊控制、免疫算法，混沌算法等的应用，已取得良好的效果。总之，SVPWM 技术内容十分丰富，这是这本小书所无法包容的，只能从基础讲起，提纲挈领，做一个概括的介绍，有“抛砖引玉”之意。

本书为汇编性质，参考和引用了大量文献资料，谨向所有原编、著者致以衷心的感谢。本书编者水平有限，在全书内容的编排和对参考文献的理解等方面，均有许多不当之处，请读者和专家不吝指正。

编者

目 录

电气自动化新技术丛书序言

第5届电气自动化新技术丛书编辑委员会的话

前言

第1章 变频调速与 SVPWM 技术	1
1.1 变频调速概述	1
1.1.1 变频调速系统	1
1.1.2 变频器	1
1.1.3 电力电子器件	8
1.2 变频器谐波的影响与对策	13
1.2.1 输入侧谐波的影响与对策	13
1.2.2 输出侧谐波的影响及对策	16
1.3 SPWM 技术	18
1.3.1 调制的原理和分类	18
1.3.2 SPWM 波形成的方法	21
1.3.3 SPWM 的优点与缺点	22
1.3.4 SPWM 的优化	22
1.4 变频调速系统的控制	24
1.4.1 开环控制	24
1.4.2 闭环控制	25
1.5 SVPWM 技术	26
1.5.1 概述	26
1.5.2 SVPWM 技术的原理与分类	26
1.5.3 SVPWM 技术的优点与展望	27
参考文献	29
第2章 两电平 SVPWM 技术	30
2.1 两电平逆变器	30
2.2 两电平逆变器合成电压矢量与磁链的空间分布	31
2.2.1 逆变器输出电压空间矢量的空间分布	31
2.2.2 电压矢量与磁链矢量轨迹	34
2.3 SVPWM 的调制模式和算法	35
2.3.1 多个电压矢量连续切换的 SVPWM 模式	35

2.3.2	矢量合成法的 SVPWM 模式	38
2.4	对称调制模式和算法	42
2.4.1	基本原理	42
2.4.2	实施算法	46
2.4.3	对称调制模式与 SPWM 的比较	49
2.4.4	对称调制模式的特点和优点	50
2.4.5	对称调制模式的推广	51
2.5	两电平 SVPWM 的新算法	52
2.5.1	随机控制算法	52
2.5.2	免疫算法	54
2.5.3	反向传播神经网络算法	54
2.6	两电平三维空间电压矢量 SVPWM 控制	55
2.6.1	三相四桥臂逆变器	55
2.6.2	三相四桥臂逆变器的电压空间矢量	56
2.6.3	三相四桥臂逆变器的电压空间矢量控制	57
	参考文献	58
第 3 章	两电平 SVPWM 技术的应用	60
3.1	两电平 SVPWM 技术在矢量变换控制中的应用	60
3.1.1	矢量变换控制的基本原理	60
3.1.2	SVPWM 矢量控制系统的构成与控制原理	64
3.1.3	矢量变换控制的特点	66
3.2	SVPWM 在直接转矩控制系统中的应用	66
3.2.1	直接转矩控制的基本原理	66
3.2.2	直接转矩控制系统的构成与控制原理	68
3.2.3	电压矢量与 Ψ 、 T_e 的关系	70
3.2.4	采用电压矢量选择表的直接转矩控制系统	72
3.2.5	直接转矩控制的数字化	72
3.2.6	直接转矩控制的特点与存在的问题	74
3.3	直接转矩控制的改进方案	76
3.3.1	模糊控制的直接转矩控制	76
3.3.2	预测转矩的直接转矩控制	76
3.4	采用谐振极软开关逆变器的直接转矩控制	77
3.4.1	RPZVT 逆变器的构成及工作原理	77
3.4.2	控制系统的构成	79
3.4.3	控制原理	79
3.4.4	仿真及实验结果	81
3.5	PWM 整流器的控制	82
3.5.1	PWM 整流器	82

3.5.2	SVPWM 功率滞环控制系统	84
3.6	双 PWM 变频器系统	86
3.6.1	系统的构成	86
3.6.2	四象限运行的控制	86
	参考文献	89
第 4 章	三电平 SVPWM 技术	90
4.1	三电平逆变器	90
4.2	三电平电压空间矢量的分布	93
4.2.1	逆变器三电平的产生	93
4.2.2	三电平空间电压矢量与分析	94
4.3	三电平 SVPWM 控制算法	97
4.3.1	传统的三电平 SVPWM 算法	98
4.3.2	60°坐标系 SVPWM 的算法	102
4.3.3	三电平 SVPWM 分解为两电平 SVPWM 的简化算法	105
4.3.4	扇区两位数编号法	105
4.4	中点电压平衡问题	107
4.4.1	逆变器中点电压波动的原因和控制	107
4.4.2	电压矢量与中点电流的关系	107
4.4.3	抑制中点电压不平衡的控制方法	109
4.5	三电平 SVPWM 算法的特点与电压矢量的优化	116
	参考文献	118
第 5 章	三电平 SVPWM 技术的应用	119
5.1	三电平 SVPWM 技术在矢量变换控制中的应用	119
5.1.1	NPC 逆变器矢量控制调速系统的构成与控制原理	119
5.1.2	SVPWM 算法	121
5.1.3	中点电压平衡问题的其他解决方法	122
5.1.4	SVPWM 矢量控制的效果	123
5.2	三电平 SVPWM 技术在直接转矩控制中的应用	125
5.2.1	采用优化矢量表的直接转矩控制系统	126
5.2.2	采用自适应技术的优化矢量表直接转矩控制系统	127
5.2.3	三电平逆变器直接转矩控制在连续混炼机中的应用	129
5.3	三电平整流器的 SVPWM 控制和双 PWM 调速系统	132
5.3.1	三电平整流器的结构	132
5.3.2	整流器控制原理	133
5.3.3	三电平整流器 SVPWM 控制系统	136
5.3.4	双 PWM 变频调速系统	137
5.3.5	单相三电平 PWM 整流器	140
5.4	同步电动机变频调速的 SVPWM 控制	146

5.4.1	概述	146
5.4.2	永磁式同步电动机直接转矩控制	147
5.4.3	励磁型同步电动机矢量控制	148
	参考文献	149
第6章	多电平 SVPWM 技术及其应用	150
6.1	多电平逆变器	150
6.1.1	高压变频器	150
6.1.2	多电平逆变器	151
6.1.3	多电平逆变器分类	151
6.1.4	多电平逆变器的优缺点	155
6.2	多电平逆变器空间电压矢量与分布	155
6.3	多电平 SVPWM 控制算法	158
6.3.1	算法的复杂性和解决的基本思路	158
6.3.2	各种坐标系算法	159
6.3.3	多电平 SVPWM 简化算法二例	163
6.4	五电平逆变器三维 SVPWM 控制	168
6.4.1	五电平逆变器结构和开关逻辑	169
6.4.2	两层 3D - PWM 电压矢量滞环控制策略	170
6.5	级联型 (功率单元串联) 逆变器在有源滤波系统中的应用	171
6.5.1	错时采样空间矢量调制 (STS - SVM) 的工作原理	171
6.5.2	级联型逆变器 STS - SVM 在有源电力滤波 (APF) 系统中的应用	173
	参考文献	176
第7章	SVPWM 技术工程应用实例	178
实例 1	SVPWM 技术在电动游览车中的应用	178
实例 2	基于电压空间矢量脉宽调制的水泵压力闭环控制系统	184
实例 3	基于电压空间矢量的电动汽车电驱动系统高效快速转矩响应控制	193
实例 4	多电平变流器在风力发电系统中的应用	200
实例 5	SVPWM 技术在单相逆变电源中的应用	209
实例 6	TR08 磁浮列车驱动控制系统的研究	219

第 1 章 变频调速与 SVPWM 技术

SVPWM 技术是空间矢量脉冲宽度调制技术的简称，它是变频调速逆变器所用的调制技术，故有时称为逆变器 SVPWM 技术。虽然目前 SVPWM 技术已跨越调速进入了其他领域，但主要应用还是在变频调速。所以为了讲述这种技术，有必要先了解变频调速系统的构成、各个环节的作用、系统会出现的问题与对策，以及 SVPWM 技术起什么作用、有什么优点。本章将扼要讲述这些内容，以便与下面讲述 SVPWM 技术相衔接，使读者易于接受与理解。

1.1 变频调速概述

1.1.1 变频调速系统

变频调速系统由变频器、电动机和控制系统三大部分构成，有时还包括负载。变频器是一个能改变频率的交流电源，它是系统的核心。控制系统主要由控制器和电流、转速等检测仪器组成，用于按照给定指令，调节电动机的转速和控制电动机的转矩，完成传动任务。电动机主要是异步电动机，少数场合用同步电动机。负载即各类工作机械、设备，用于完成各种生产任务。整个变频调速系统如图 1-1 所示。

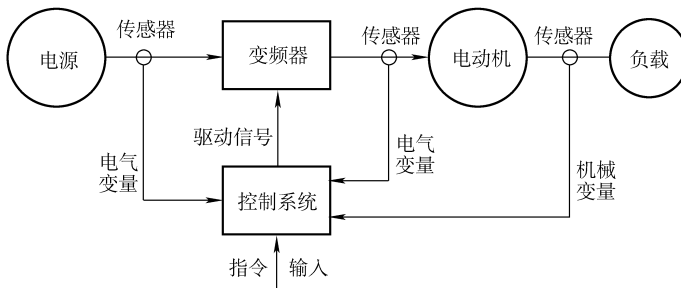


图 1-1 变频调速系统

1.1.2 变频器

变频器是一个变频电源，可分为“交-直-交”和“交-交”两大类，所谓“交-直-交”就是将交流电输入，经整流器整流变成直流电，然后经过滤波环节，再进入逆变器，逆变成三相频率可调的交流电，故称“交-直-交”；又分电压型（大电容滤波）和电流型（大电感滤波）两类。所谓“交-交”，就是将交流电送入变频器后直接变成三相频率可调的交流电输出，故称“交-

交”。目前用得最广泛的是交-直-交电压型变频器，故本书将其作为重点。由于电流型也可用 SVPWM 技术，故作简单介绍，“交-交”变频器与 SVPWM 技术无关，故只作简述。

1. 交-直-交电压型变频器

图 1-2 所示为一个六拍交-直-交电压型三相变频器拓扑结构，左侧为二极管不可控整流器，提供直流电源；中间为大电容滤波，以获得平直的直流；右侧为逆变器。逆变器用 6 个 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor，绝缘栅双极型晶体管） $VT_1 \sim VT_6$ 构成三相逆变桥（称为六拍三相桥）， VT_1 、 VT_3 、 VT_5 为共阳极组， VT_2 、 VT_4 、 VT_6 为共阴极组；每个桥臂有 2 个 IGBT 串联，从连接点引出三相接线。把一个周期 T 等分为 360° （见图 1-4），将 $VT_1 \sim VT_6$ 以相隔 60° 的电角度依次导通，每个 IGBT 导通 180° ；任一时刻有三个 IGBT 导通，同桥臂的另一个 IGBT 必须关断；这样工作下去，逆变器便可对三相负载 R 输出三相交流电。调节触发频率（ T 时间长短）便可调节输出交流电的频率，其波形如图 1-4 所示。

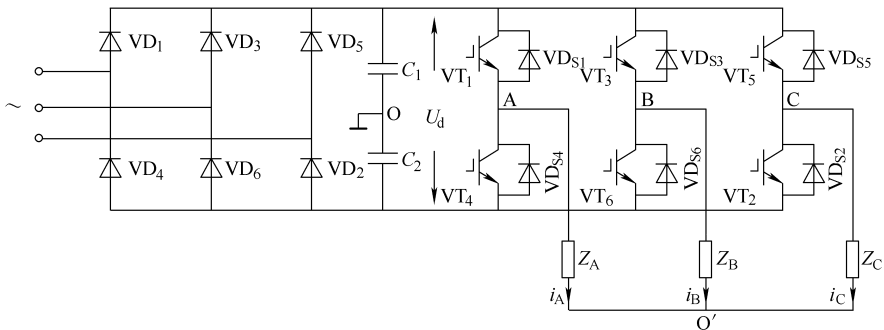


图 1-2 IGBT 三相变频器

图 1-2 中 U_d 为直流电源电压， E 为 $U_d/2$ ， O 为理想中性点， O' 为负载中性点。 u_A 、 u_B 、 u_C 为 A、B、C 三点电位， $u_{AO'}$ 、 $u_{BO'}$ 、 $u_{CO'}$ 和 u_{AB} 、 u_{BC} 、 u_{CA} 分别表示负载上的相电压和线电压。

先求两个中点间的电压 $u_{00'}$ 。在 $0 \sim 60^\circ$ 区间，等效电路如图 1-3a 所示。

$$U_{PO'} = \frac{\frac{R}{2}}{R + \frac{R}{2}} \times 2E = \frac{2}{3}E$$

$$u_{00'} = -U_{PO'} + E = -\frac{2}{3}E + E = \frac{1}{3}E = \left(\frac{1}{3}\right) \frac{1}{2}U_d = \frac{1}{6}U_d$$

在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 区间，等效电路如图 1-3b 所示。

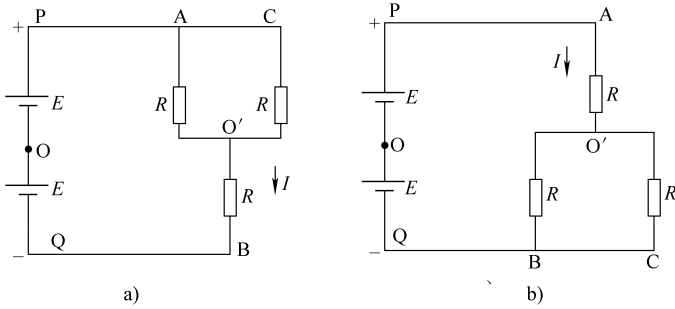


图 1-3 等效电路

$$U_{PO'} = \frac{R}{R + \frac{R}{2}} \times 2E = \frac{4}{3}E$$

$$u_{OO'} = -U_{PO'} + E = -\frac{4}{3}E + E = -\frac{1}{3}E = \left(-\frac{1}{3}\right) \frac{1}{2}U_d = -\frac{1}{6}U_d$$

其余类推，便可得到图 1-4 所示的 $u_{OO'}$ 波形。

再求 u_A 、 u_B 、 u_C ，它们的求法主要看 IGBT 的导通情况。例如求 u_A ，当 VT_1 导通时， $u_A = U_P = E = U_d/2$ ，而在 VT_4 导通时， $u_A = U_Q = -E = -U_d/2$ 。同理可求 u_B 、 u_C 。

在上述数据求得后，负载相电压及线电压就可以按照下列式子计算：

$$\begin{aligned} u_{AO'} &= u_A - u_{OO'} \\ u_{BO'} &= u_B - u_{OO'} \\ u_{CO'} &= u_C - u_{OO'} \\ u_{AB} &= u_{AO'} - u_{BO'} \\ u_{BC} &= u_{BO'} - u_{CO'} \\ u_{CA} &= u_{CO'} - u_{AO'} \end{aligned}$$

例如求相电压 $u_{AO'}$ 有效值：

$$\begin{aligned} u_{AO'} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{AO'}^2 dt} \\ &= \sqrt{4 \times \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{1}{3}U_d\right)^2 dt + 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{2}{3}U_d\right)^2 dt} \quad (1-1) \\ &= 0.471U_d \end{aligned}$$

线电压有效值：

$$u_{AB} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{AB}^2 dt} = \sqrt{2 \times \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{3}} U_d^2 dt} = 0.816U_d \quad (1-2)$$

因此

$$\frac{u_{AB}}{u_{AO'}} = \frac{0.816U_d}{0.471U_d} = \sqrt{3}$$

$$u_{AB} = \sqrt{3}U_{AO}$$

从计算结果可以看到，线电压与相电压有效值之比为 $\sqrt{3}$ ，可见逆变器输出电压为三相交流，便可描绘出相电压和线电压的波形，如图 1-4 所示。

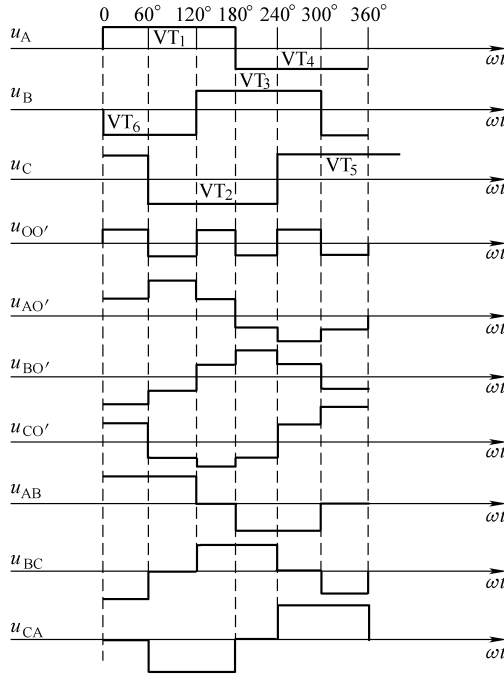


图 1-4 电压型三相变频器输出波形

IGBT 的驱动信号发生电路可参看电子学教科书。从式 (1-1) 和式 (1-2) 可知，改变直流电压 U_d 便可改变逆变器输出交流电压，从而完成变压变频 (VVVF) 的功能^[注1]。

图 1-2 所示的三相拓扑结构，由于 IGBT 导通角为 180° ，故称为 180° 导电型逆变器；还有一类逆变器，在一个周期内每个开关管导通 120° ，同时有两个开关管导通，称为 120° 导电型逆变器。故电压型三相变频器分两类： 180° 导电型和 120° 导电型。

请读者注意，由于交-直-交变频器实质上是逆变器直变交，因此一般说逆变器就是指交-直-交变频器，特别是电压型，以下各章说逆变器就是指电压型变频器。

2. 交-直-交电流型变频器