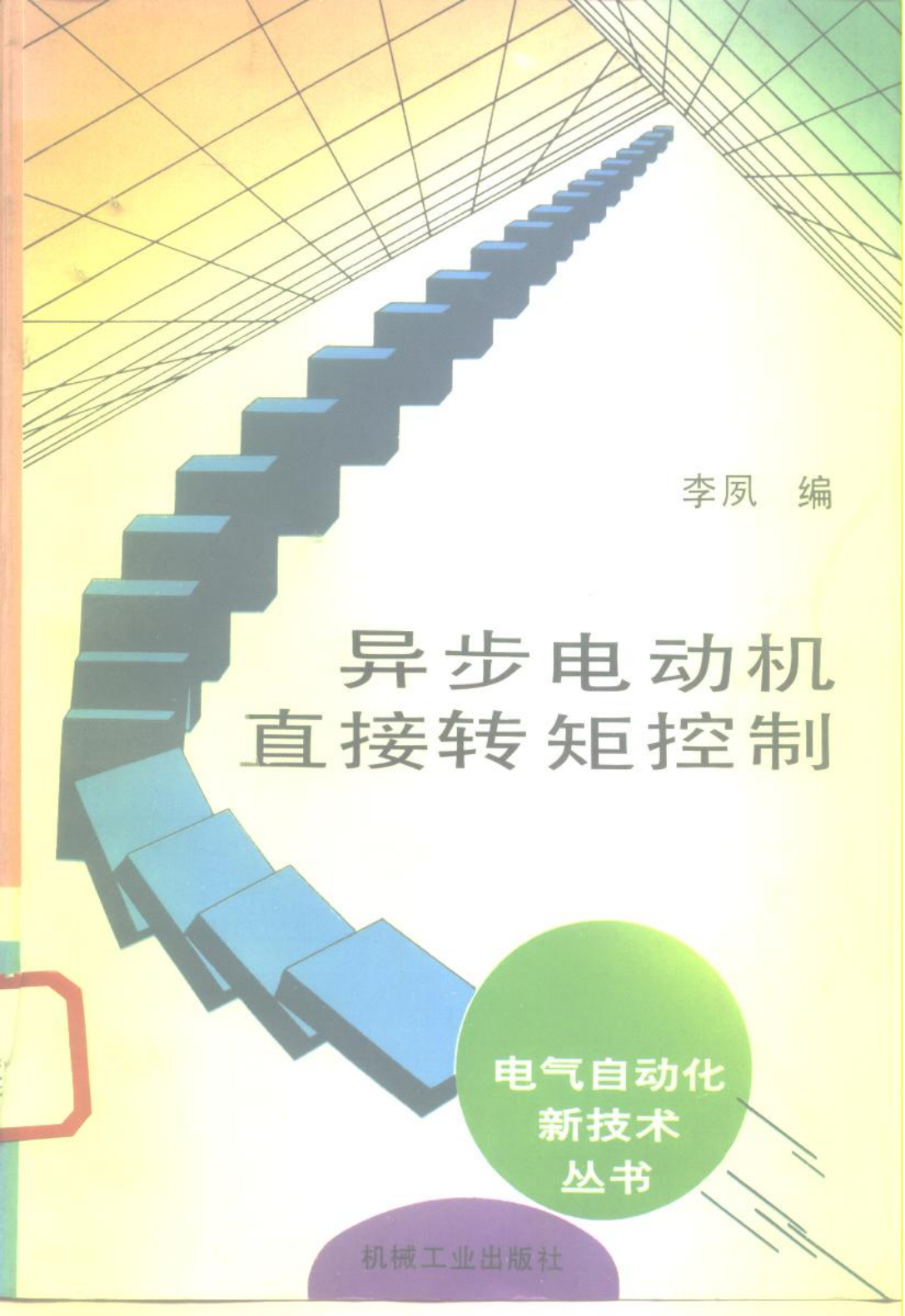




李凤 编

异步电动机 直接转矩控制

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

异步电动机直接转矩控制

李 凤 编



机械工业出版社

(京)新登字 054 号

异步电动机(本书均指感应电动机)直接转矩控制技术是继矢量变换控制技术之后,于本世纪 80 年代中发展起来的一种新型的高性能的控制技术。其方案新颖,控制简单,对电动机参数变化不敏感,且某些动态性能更好。它在交流调速传动技术领域里,是一种很有发展前途的新技术。

本书主要介绍异步电动机直接转矩控制的基本原理、基本组成、数学模型、检测方法、在不同转速范围内控制系统的各种调节方案,以及直接转矩控制的数字化方法。

本书读者以从事电气传动自动化技术的工程技术人员为主,也可作为大专院校的教师、研究生和学生的参考书。

电气自动化新技术丛书

异步电动机直接转矩控制

李 凤 编

责任编辑:孙流芳 版式设计:李松山

封面设计:姚 毅 责任校对:丁丽丽

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

河北三河市宏达印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 4.75 · 字数 123 千字

1994 年 12 月北京第 1 版 · 1994 年 12 月北京第 1 次印刷

印数 00 001—4500 · 定价 8.80 元

*

ISBN 7-111-04457-6/TP · 252

《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,推动人类社会向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术既是多种学科的交叉综合,又是全面提高国民经济水平的有力手段,在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在建设“四化”,实现到 2000 年使国民生产总值比 1980 年翻两番的宏伟目标中发挥重要的作用。

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,负责丛书组稿与定稿工作。丛书将由机械工业出版社分期分批陆续出版。

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,并适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,结合应用阐述理论,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。

本丛书的读者将以工程技术人员为主,但也可作为科研人员及大专院校教师、研究生和学生的参考书。

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

本丛书选题将随新技术的发展不断扩充,凡属电气自动化领域新技术均可作为专题撰写。我们面向社会公开征稿,欢迎自列选题投稿,来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174 号中国

自动化学会电气自动化专业委员会《电气自动化新技术丛书》编辑委员会。

《电气自动化新技术丛书》
编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员:夏德铃

副主任委员:喻士林 胡慎敏 陈亚鹏

委员:(按姓氏笔画顺序)

王 炎 王永珠 许广锡

李序葆 刘宗富 孙流芳

冷增祥 陈伯时 李鹤轩

周国兴 陶近贤 涂 健

夏遂华 黄 俊 韩素琴

秘书:杨 斌

前 言

直接转矩控制技术是本世纪 80 年代中期发展起来的新技术。它是继矢量变换控制技术之后,且与之并行发展的一种新型的高性能的交流调速传动的控制技术。目前该技术已成功地应用在电力牵引中的大功率交流传动上。德国、美国、日本都竞相发展此项新技术,预计 90 年代后期至下世纪初会有较大的发展。

目前,国内关于直接转矩控制技术的参考书籍还是空白。本书旨在向读者介绍异步电动机交流调速传动系统的直接转矩控制技术。本书第 1 章为绪论。第 2、3 章介绍直接转矩控制的基本概念和基本结构。第 4 章介绍磁链模型。第 5 章介绍基本组成和基本原理。第 6~8 章分别介绍低速、高速、弱磁范围内的调节方案。第 9 章介绍数字化方法。第 10 章为结论。

本书可供从事电气传动自动化技术的科研、开发工作的工程技术人员参考,也可作为大专院校自动化专业的教师、研究生和高年级学生的参考书,并可作为工程技术人员继续教育的培训教材。

初稿完成后,蒙清华大学周明宝教授主审,提出了许多宝贵的修改和补充意见,特此表示感谢。在本书的选题、编写、审稿和出版过程中,中国自动化学会电气自动化专业委员会、中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会、机械工业出版社以及一些多年从事电气传动工作的同行给予了许多支持和帮助,没有他们的支持和帮助,本书是不可能问世的,作者对此深表谢意。

由于水平所限,书中定有不少谬误和欠妥之处,衷心希望读者批评指正。

编者

1994 年 5 月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

第 1 章	诸论	1
1.1	直接转矩控制技术的产生与概况	1
1.2	直接转矩控制的主要特点	2
1.3	直接转矩控制技术在德国的发展	3
第 2 章	直接转矩控制(DSR)的基本概念	5
2.1	异步电动机数学模型的基本方程	5
2.2	逆变器的 8 种开关状态和逆变器的电压状态	7
2.3	电压空间矢量的概念	11
2.4	电压空间矢量对定子磁链的影响	14
2.5	电压空间矢量对电动机转矩的影响	16
2.6	电压空间矢量的正确选择	17
第 3 章	直接转矩控制的基本结构	21
3.1	直接转矩控制的基本结构	21
3.2	弱磁过程中的转矩特性	24
3.3	定子电阻压降对定子磁链幅值的影响	25
第 4 章	异步电动机的磁链模型	27
4.1	磁链模型	27
4.2	磁链误差的计算	32
第 5 章	直接转矩控制的基本组成和基本原理	41
5.1	磁链自控制	43
5.2	转矩调节	52
5.3	磁链调节	60
5.4	电压状态的选择	65
5.5	最小开关持续时间	72
5.6	逆变器的开关频率调节	77

5.7 逆变器的数学模型、异步电动机的数学模型 和速度调节器	79
第 6 章 低速范围内的调节方案	82
6.1 结构特点	82
6.2 测量结果——转矩特性	91
第 7 章 高速范围内的调节方案	98
7.1 结构特点	98
7.2 测量结果——转矩特性	99
第 8 章 弱磁范围内的调节方案	103
8.1 结构特点	103
8.2 测量结果——转矩特性	109
第 9 章 直接转矩控制的数字化方法	111
9.1 数字化积分方法的选择	111
9.2 数学模型的差分方程	114
9.3 计算机系统	122
第 10 章 结论	129
附录 符号和缩写	133
参考文献	136

第1章 绪 论

1.1 直接转矩控制技术的产生与概况

直接转矩控制变频调速技术,德语称之为 DSR(Direkte Selbstregelung),英语称之为 DSC(Direct Self-Control),是近 10 年来继矢量控制变频调速技术之后发展起来的一种新型的具有高性能的交流变频调速技术。

自从 70 年代矢量控制技术发展以来^[2,3],交流传动技术就从理论上解决了交流调速系统在静、动态性能上与直流传动相媲美的问题。矢量控制技术模仿直流电动机的控制,以转子磁场定向,用矢量变换的方法,实现了对交流电动机的转速和磁链控制的完全解耦。它的提出具有划时代的重要意义。然而,在实际上由于转子磁链难于准确观测,由于系统特性受电动机参数的影响较大,以及在模拟直流电动机控制过程中所用矢量旋转变换的复杂性,使得实际的控制效果难于达到理论分析的结果。这是矢量控制技术在实践上的不足之处。

1985 年由德国鲁尔大学的德彭布罗克(Depensbrock)教授首次提出了直接转矩控制的理论^[1],接着 1987 年把它推广到弱磁调速范围^[4]。不同于矢量控制技术,直接转矩控制有着自己的特点。它在很大程度上解决了矢量控制中计算控制复杂、特性易受电动机参数变化的影响、实际性能难于达到理论分析结果的一些重大问题。

直接转矩控制技术一诞生,就以自己新颖的控制思想,简洁明了的系统结构,优良的静、动态性能受到了普遍的注意和得到迅速的发展。在短短不到 10 年的时间里,单由德国工程师协会出版社出版的新技术丛书里,有关直接转矩控制的博士论文就有几十本。

目前该技术已成功地应用在电力机车牵引的大功率交流传动上。德国、日本、美国都竞相发展此项新技术,预计 90 年代后期至下世纪初会有较大的发展。

1.2 直接转矩控制的主要特点

直接转矩控制有以下几个主要特点:

(1)直接转矩控制直接在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型、控制电动机的磁链和转矩。它不需要将交流电动机与直流电动机作比较、等效、转化;既不需要模仿直流电动机的控制,也不需要为解耦而简化交流电动机的数学模型。它省掉了矢量旋转变换等复杂的变换与计算。因此,它所需要的信号处理工作特别简单,所用的控制信号使观察者对于交流电动机的物理过程能够做出直接和明确的判断。

(2)直接转矩控制磁场定向所用的是定子磁链,只要知道定子电阻就可以把它观测出来。而矢量控制磁场定向所用的是转子磁链,观测转子磁链需要知道电动机转子电阻和电感。因此直接转矩控制大大减少了矢量控制技术中控制性能易受参数变化影响的问题。

(3)直接转矩控制采用空间矢量的概念来分析三相交流电动机的数学模型和控制其各物理量,使问题变得特别简单明了。

(4)直接转矩控制强调的是转矩的直接控制与效果。它包含有两层意思:①直接控制转矩;②对转矩的直接控制。

1)直接控制转矩 与著名的矢量控制的方法不同,它不是通过控制电流、磁链等量来间接控制转矩,而是把转矩直接作为被控量,直接控制转矩。因此它并非极力获得理想的正弦波波形,也不专门强调磁链的圆形轨迹。相反,从控制转矩的角度出发,它强调的是转矩的直接控制效果,因而它采用离散的电压状态和六边形磁链轨迹或近似圆形磁链轨迹的概念。

2)对转矩的直接控制 直接转矩控制技术对转矩实行直接控制。其控制方式是,通过转矩两点式调节器把转矩检测值与转矩给

定值作带滞环的比较,把转矩波动限制在一定的容差范围内,容差的大小,由频率调节器来控制。因此它的控制效果不取决于电动机的数学模型是否能够简化,而是取决于转矩的实际状况。它的控制既直接又简化。

对转矩的这种直接控制方式也称之为“直接自控制”。这种“直接自控制”的思想不仅用于转矩控制,也用于磁链量的控制和磁链自控制。但以转矩为中心来进行综合控制。

(5)综上所述,直接转矩控制技术,用空间矢量的分析方法,直接在定子坐标系下计算与控制交流电动机的转矩,采用定子磁场定向,借助于离散的两点式调节(Band-Band 控制)产生 PWM 信号,直接对逆变器的开关状态进行最佳控制,以获得转矩的高动态性能。它省掉了复杂的矢量变换与电动机数学模型的简化处理,没有通常的 PWM 信号发生器。它的控制思想新颖,控制结构简单,控制手段直接,信号处理的物理概念明确。该控制系统的转矩响应迅速,限制在一拍以内,且无超调,是一种具有高静态性能的交流调速方法。

1.3 直接转矩控制在德国的发展

直接转矩控制在德国的发展可以从以下几个方面来分类。

(1)功率器件方面已采用

- GTR(大功率晶体管)
- GTO(可关断晶闸管)

目前正在试用

- IGBT(绝缘栅双极晶体管)

(2)功率单元的线路

- 两点式逆变器,输出电压状态有 $2^3=8$ 种
- 三点式逆变器,输出电压状态有 $3^3=27$ 种

(3)数字化控制元件

- TMS32010 数字信号处理器
- TMS32025 数字信号处理器

(4) 控制技术方面^[18]

- 高速范围内采取直接转矩控制——DSR
- 弱磁范围内的直接转矩控制——FS
- 低速范围内的间接转矩控制——ISR

(5) 应用方面^[20]

- 已成功地运用于兆瓦级的电力机车牵引上

目前鲁尔大学的施泰莫尔(Steimel)教授继德彭布罗克教授之后继续领导着直接转矩控制的深入研究工作。

本书旨在介绍直接转矩控制的基本原理、直接转矩控制的基本概念和基本结构、几种不同的磁链模型、基本组成和基本原理,以求对直接转矩控制有个较全面的了解,并介绍在不同转速范围内对所采取的控制方案的不同考虑和数字化方法。

第2章 直接转矩控制(DSR) 的基本概念

在直接转矩控制系统的分析研究过程中,会遇到一些不同于传统分析的方法及其基本概念。本章首先介绍这些基本概念,以便对 DSR 的基本组成的了解和对后面章节较详细的分析打下概念基础。这些概念包括:

- 异步电动机的空间矢量等效电路图及其数学模型的基本方程;
- 逆变器的 8 种开关状态和逆变器的电压状态;
- 电压空间矢量的概念;
- 电压空间矢量对定子磁链的影响以及六边形磁链的概念;
- 电压空间矢量对电动机转矩的影响及定子磁链走走停停的概念;
- 电压空间矢量的正确选择与“磁链自控制”的概念。

2.1 异步电动机数学模型的基本方程

本节介绍在 DSR 分析中所采用的异步电动机的空间矢量等效电路及其数学模型的基本方程。

在 DSR 的分析中,采用空间矢量的数学分析方法,使问题变得特别简单明了。在本书的分析中,一般采用空间矢量的分析方法。图 2-1 是异步电动机的空间矢量的等效电路图。

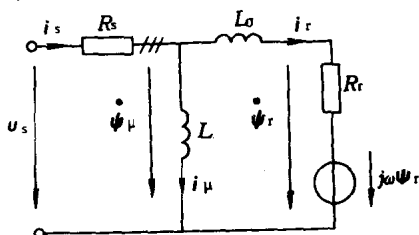


图2-1 异步电动机的空间
矢量等效电路图

该等效电路是在正交定子坐标系(α - β 坐标系)上描述异步电

动机的。各量的意义如下：

$u_s(t)$ —— 定子电压空间矢量；

$i_s(t)$ —— 定子电流空间矢量；

$i_r(t)$ —— 转子电流空间矢量；

$\Psi_u(t)$ —— 定子磁链空间矢量；

$\Psi_r(t)$ —— 转子磁链空间矢量；

ω —— 电角速度(机械角速度和极对数的积)。

并且规定,将旋转空间矢量在 α 轴(见图 2-2)上的投影称为 α 分量,在正交的 β 轴上的投影称为 β 分量。

根据以上规定,异步电动机在定子坐标系上由下列方程式表示^[1]:

$$u_s = R_s i_s + \dot{\Psi}_u \quad (2-1)$$

$$0 = R_r i_r - \dot{\Psi}_r + j\omega \Psi_r \quad (2-2)$$

定子磁链与转子磁链由下式获得:

$$\Psi_u = L i_u \quad (2-3)$$

$$\Psi_r = \Psi_u - L_\sigma i_r \quad (2-4)$$

定子旋转磁场提供的功率如下:

$$\begin{aligned} P &= \omega_s T_d = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \{ \dot{\Psi}_u i_s^* \} \\ &= \frac{3}{2} (\dot{\Psi}_{u\alpha} i_{s\alpha} + \dot{\Psi}_{u\beta} i_{s\beta}) \end{aligned} \quad (2-5)$$

式中 ω_s —— 定子频率(定子旋转磁场的频率)。

且

$$\dot{\Psi}_u = j\omega_s L (i_{u\alpha} + j i_{u\beta}) \quad (2-6)$$

由此方程可得出下面两个方程式:

$$\dot{\Psi}_{u\alpha} = -\omega_s L i_{u\beta} = -\omega_s \Psi_{u\beta} \quad (2-7)$$

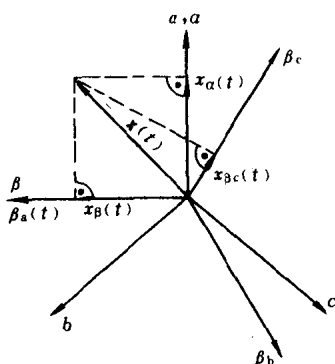


图 2-2 空间矢量分量的定义

和

$$\dot{\Psi}_{\mu\beta} = \omega_s L i_{\mu\alpha} = \omega_s \Psi_{\mu\alpha} \quad (2-8)$$

将式(2-7)和式(2-8)代入式(2-5),得转矩

$$T_d = \frac{3}{2} (\Psi_{\mu\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{\mu\beta} i_{s\alpha}) \quad (2-9)$$

如果用转子磁链代替定子电流,转矩方程式将变为简明的形式。由

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{i}_\mu + \mathbf{i}_r \quad (2-10)$$

和式(2-3)和式(2-4)可得

$$T_d = \frac{1}{L_\sigma} \frac{3}{2} (\Psi_{\mu\beta} \Psi_{r\alpha} - \Psi_{\mu\alpha} \Psi_{r\beta}) \quad (2-11)$$

该公式表达的是定子磁链与转子磁链之间的交叉乘积,也可写成如下形式:

$$T_d = \frac{1}{L_\sigma} \frac{3}{2} |\Psi_\mu| |\Psi_r| \sin\theta \quad (2-12)$$

式中 θ ——定子磁链与转子磁链之间的夹角,即磁通角。

在实际运行中,保持定子磁链的幅值为额定值,以便充分利用电动机;而转子磁链幅值由负载决定。如果要改变异步电动机的转矩,可以通过改变磁通角 θ 来实现。转子磁链可以根据式(2-2)通过改变转子电流来实现。而定子磁链可以根据式(2-1)以定子电压的积分来改变。稳态转矩的计算则是根据式(2-12)通过对转子磁链与磁通角 $\theta(t)$ 的计算来完成。

2.2 逆变器的 8 种开关状态和逆变器的电压状态

一台电压型逆变器(见图 2-3),由三组、六个开关(S_a 、 $\bar{S}_a$ 、 S_b 、 $\bar{S}_b$ 、 S_c 、 $\bar{S}_c$)组成。由于 S_a 与 $\bar{S}_a$ 、 S_b 与 $\bar{S}_b$ 、 S_c 与 $\bar{S}_c$ 之间互为反向,即一个接通,另一个断开,所以三组开关有 $2^3=8$ 种可能的开关组合。

把开关 S_a 、 $\bar{S}_a$ 称为 a 相开关,用 S_a 表示; S_b 、 $\bar{S}_b$ 称之为 b 相开关、用 S_b 表示;把 S_c 、 $\bar{S}_c$ 称之为 c 相开关,用 S_c 表示。也可用简称 S_{abc} 表示三相开关 S_a 、 S_b 和 S_c 。若规定, a、b、c 三相负载的某一相与

“+”极接通时,该相的开关状态为“1”态;反之,与“-”极接通时,为“0”态。则 8 种可能的开关组合状态见表 2-1。

表 2-1 逆变器的 8 种开关组合状态

状态	0	1	2	3	4	5	6	7
S_a	0	1	0	1	0	1	0	1
S_b	0	0	1	1	0	0	1	1
S_c	0	0	0	0	1	1	1	1

8 种可能的开关状态可以分成两类:一类是 6 种所谓的工作状态,即表 2-1 中的状态“1”到状态“6”,它们的特点是三相负载并不都接到相同的电

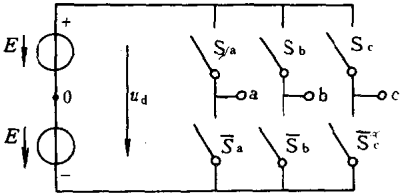


图 2-3 电压型理想逆变器

位上去;另一类开关状态是零开关状态,如表 2-1 中的状态“0”和状态“7”,它们的特点是三相负载都被接到相同的电位上去。当三相负载都与“+”极接通时,得到的状态是“111”,三相都有相同的正电位,所得到的负载电压为零。当三相负载都与“-”极接通时,得到的状态是“000”,负载电压也是零。

表 2-1 中的开关顺序与编号只是一种数学上的排列顺序,它与 DSR 工作时逆变器的实际开关状态的顺序并不相符。现将实际工作的开关顺序列于表 2-2 中,并按照本书分析方便的原则重新编号。在以后的分析过程中可以看到,这样的编排正符合 DSR 的工作情况。在以后的分析中,将采用表 2-2 的编号次序。

表 2-2 逆变器的开关状态

状态		工作状态						零状态	
		1	2	3	4	5	6	7	8
开关组	S_a	0	0	1	1	1	0	0	1
	S_b	1	0	0	0	1	1	0	1
	S_c	1	1	1	0	0	0	0	1

下面分析逆变器的电压状态。