

静止变流器设计

〔苏〕П.В. 戈卢别夫 等著

赵一强 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书着重介绍了具有正弦波输出的晶体管三相静止变流器的设计计算方法,其中包括:静止变流器线路和结构的选择,与一次电源能量特性的协调;降低非线性失真的方法;调压和对称调节;频率稳定以及滤波器、变压器和阻流圈、石英晶体振荡器等部件的设计计算,此外还谈到了过渡过程分析及可靠性等问题。此书对静止变流器的设计问题的论述比较全面、系统。

本书对从事静止变流器研究和设计制造人员有一定的参考价值,也可供高等院校有关专业的教师、学生参考。

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

П. В. Голубев и т. д.

Энергия 1974

*

静 止 变 流 器 设 计

〔苏〕 П. В. 戈卢别夫 等著

赵一强 译

丁道宏 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张12 314千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷 印数: 0,001—2,520册

统一书号: 15034·2775 定价: 2.20元

译者序

静止变流器是一种将直流电变成交流电的半导体电能变换装置。和现有的旋转变流机相比,它具有无噪音、效率高、重量轻、寿命长、性能好、使用维护简单等优点,因此近来在航空、宇航、船舰、车辆和工业设备上获得了越来越广泛的应用。在以直流电源为主电源的场合,如小型飞机和坦克等,静止变流器用来作为二次电源,对无线电通讯、导航、仪表等交流用电设备供电;在以交流电源为主电源的场合,如一些大型飞机,常以蓄电池作为直流应急电源,而以静止变流器作为交流应急电源;在地面,静止变流器还是组成不间断供电的重要组成部分。

本书着重介绍了具有正弦波输出的晶体管三相静止变流器的设计计算方法,其中包括:静止变流器线路和结构的选择;与一次电源能量特性的协调;降低非线性失真的方法;调压和对称调节;频率稳定以及滤波器、变压器和阻流圈、石英晶体振荡器等部件的设计计算,此外还谈到了过渡过程分析及可靠性等问题。本书对静止变流器的设计问题的论述比较全面、系统,在某些方面的研究相当深入,有作者独特之处。因此,本书对从事静止变流器研究和设计制造人员有一定的参考价值,也可供高等院校有关专业的高年级学生及研究生参考。

全书由南京航空学院丁道宏副教授校对。

在翻译过程中,我们对原书中的一些错误作了校正,并在必要的地方加了译注。对原书中明显的笔误和印刷错误改正后一般未加译注。

由于我们水平有限,本书翻译难免有错误和不妥之处,欢迎读者批评指正。

本书翻译过程中曾得到戚建匡、林兆荣等同志不少帮助,谨此表示感谢。

译者

前 言

在现代技术中, 静止变流器被用来实现直流到交流的变换。

静止变流器在使用特性方面, 比起振动式变流器和旋转式变流机优越得多, 因此广泛用于自动控制系统和电气传动系统中。特别是在要求电源使用期很长的场合, 采用静止变流器更是无可替代的。

静止变流器的线路和结构很多, 但是本书只研究输出电压波形接近正弦的三相静止变流器的设计方法, 这些方法在参考文献中很少讲到。

在这些设计方法的基础上建立了电气系统主要元件设计功率最小化的准则, 文献〔1〕利用这些准则对单相静止变流器作了相当详细的计算, 因此本书仅仅只从三相静止变流器计算的需要叙及单相静止变流器。

静止变流器及其部件大量新线路的涌现, 使得全面分析使用特性和能量特性变得比较困难。静止变流器最佳参数计算的理论基础与研制实践之间的严重脱节, 往往使得最初选定的满足用电设备要求的静止变流器方案就作为最佳方案投入生产, 研制者不再继续努力改善它的指标。

本书企图在一定程度上弥补这一缺陷。

由于在静止变流器中半导体器件工作于开关状态, 促使人们研究主要中频●用电设备在矩形波电压供电下的工作状态。研究表明, 对于个别自动器装置可以不采用正弦波电压而采用矩形波或准矩形波电压供电。但是实践指出, 广泛采用的还是正弦波电压。随着整个自动调节装置的复杂化, 对输出电压谐波含量

● 原文为“高频”。——译者

的要求不是愈来愈低,相反,而是愈来愈高。

正弦波形对这样一些重要用电设备供电最佳:执行电动机、同步随动系统、感应式传感器、电气模拟装置、相敏放大器等。在设备充满了许多用以实现复杂逻辑运算装置的情况下,最好供电电压波形能够适应设备的抗干扰要求。因此,本书的重点在于具有正弦波输出电压的三相静止变流器,和降低非线性失真的最简单方法。

本书内容的安排顺序是按照二次电源的设计工作顺序。

第一步,通常是解决从现有的许许多多线路中选择静止变流器线路和结构的一般性问题,以及静止变流器与一次电源能量特性的协调问题。因此,在第一章介绍了几种最有前途的静止变流器线路;在第二章讲述设计的一般问题、能量特性的协调以及静止变流器方案的比较。

第二步,是拟订静止变流器线路和结构。拟订的出发点是满足能量指标、输出电压波形、频率和电压稳定度等要求。在第三章提供了静止变流器逆变部分及输出滤波器的计算方法;在第四章讲述电压调节器的设计问题;在第五章给出了石英晶体给定振荡器的计算方法。

第三步,是使电压调节系统动态最佳化,和评估静止变流器的工作可靠性。在第六章进行了过渡过程分析,介绍了由环形计数器组成的静止变流器部件的逻辑分析方法。

本书还提供了大量的实验数据,作者认为这些数据对于从事自动器、电气传动和电源装置计算和设计的专家们有所裨益。书中对静止变流器线路、结构和部件的比较与选择问题也给予了较大的注意。

十分明显,不论是整个装置还是它的元件,如果没有统一的标准静止变流器的设计是不可能的。静止变流器的设计质量不仅决定于线路和无线电元件的正确选择,而且与静止变流器及其部件的标准化程度有关^[2]。本书给出了三相变压器用的菱形结构新型导磁体的标准规格,和环形结构下一步标准化的设想,并且注意

到不分离的围绕菱形导磁体三相变压器的运用前景。

作者力图比较全面而详细地阐述在设计过程中通常发生的问题，如：静止变流器与一次电源的相互作用、采用输出滤波器的合理性、按所要求的效率计算静止变流器、输出电压的对称调节、频率的稳定等等问题。

作为本文结果的利用，书中提供了一些静止变流器元件具体计算的例子，这些例子不能与正文分离，而是它们逻辑的延续。

本书的目的在于探讨静止变流器设计的基本方法。

一切有利于本书进一步完善的意见，作者将予采纳并表示感谢。

作 者

目 录

第一章 静止变流器线路的概述.....	1
§1-1 建立静止变流器线路的一般原理	1
§1-2 静止变流器输出电压正弦波形的保证	3
§1-3 带输出滤波器的静止变流器线路	6
§1-4 无滤波的静止变流器线路	10
第二章 静止变流器线路和结构的选择.....	21
§2-1 静止变流器和一次电源能量参数的协调	21
§2-2 确定在静止变流器中使用输出滤波器的合理性	29
§2-3 静止变流器及其各环节损耗功率的估算	33
§2-4 静止变流器的功率损耗与不对称负载的关系	38
§2-5 负载特性的非线性对静止变流器能量特性的影响	44
§2-6 匹配变压器在输出电压滤波器线路中的应用	49
§2-7 静止变流器重量-尺寸特性的计算	53
§2-8 环形和分离式导磁体单相变压器的特性比较	59
§2-9 三相变压器的结构及其特性比较	64
§2-10 变压器和阻流圈组合结构选择的特点	85
第三章 静止变流器线路和环节的计算.....	90
§3-1 输出滤波器的计算	90
§3-2 滤波器输入端脉冲宽度变化时确定其设计功率和参数	97
§3-3 逆变器中电压稳态过程的研究方法	100
§3-4 单相逆变器中的稳态过程	108
§3-5 利用脉冲宽度控制输出电压的单相逆变器中过程的研究	121
§3-6 在被调节的三相桥式逆变器中的电磁过程	127
§3-7 晶体管的换向过程和功率损耗的确定	132
§3-8 在静止变流器线路中晶体管使用情况的比较	138
§3-9 中间放大器的计算	142
§3-10 分相装置的计算	147

§3-11	直流电路滤波器的选择	150
第四章	三相静止变流器的电压调节问题	157
§4-1	调节能力	157
§4-2	静止变流器电压调节器的测量机构	163
§4-3	借助换流器调节电压	177
§4-4	借助电压提升装置调节电压	182
§4-5	借助饱和阻流圈调节电压	186
§4-6	电流源供电的饱和电抗器工作状态	193
§4-7	饱和阻流圈的特性及其近似算法	199
§4-8	在负载的不对称限制条件下使输出电压对称的方法	203
§4-9	在各相负载随机分布的情况下输出电压对称调节的方法	213
§4-10	按相调节的静止变流器线路比较	221
第五章	石英晶体振荡器的设计问题	226
§5-1	石英晶体振荡器的要求和分类	226
§5-2	频率误差的概率算法	230
§5-3	多频率石英晶体谐振器在一般振荡器线路中的工作分析	234
§5-4	石英晶体振荡器非周期线路的分析	247
§5-5	滤波式石英晶体振荡器线路的分析	253
§5-6	隧道二极管的石英晶体振荡器	259
§5-7	石英晶体振荡器中频率建立的时间	268
§5-8	石英晶体振荡器的余度	270
§5-9	给定振荡器结构设计中的一些问题	276
第六章	静止变流器中的过渡过程	280
§6-1	静止变流器在使用时可能出现的过渡过程的分类	280
§6-2	短路电流的稳态值	286
§6-3	短路时的过渡状态	291
§6-4	逆变器的一个晶体管损坏所产生的过渡过程	296
§6-5	确定功率晶体管损坏时电源电压的变化	305
§6-6	静止变流器同步的过渡过程	309
§6-7	接通静止变流器时和短时断开电源电压时的过渡过程	314
§6-8	脉宽调制器的过渡特性	322
§6-9	电源电路中带有换流器的静止变流器的过渡过程	325

§6-10	环形计数器过渡过程的逻辑分析	336
§6-11	当变压器输出绕组曲折连接和每级接单个负载时, 环形 计数器的过渡过程	342
§6-12	在控制信号的第一拍输出端就工作在正确状态的环形 计数器	357
§6-13	求逆变器电路在过渡过程中的电压和电流瞬时值	368

第一章 静止变流器线路的概述

§ 1-1 建立静止变流器线路的一般原理

在自动调节和控制系统中通常采用静止变流器作为二次交流电源。与电机式变流机或振动式变流器相比，静止变流器具有较长的工作寿命、较高的效率和可靠性、较好的起动特性和较小的无线电干扰；其重量-尺寸指标，由于半导体技术的迅速发展，实际上已不亚于上述的变流机和变流器。

对于作为二次电源的直流-交流[●]变换装置提出了许多技术要求^[2,3]，其中主要的是要求输出电压和频率稳定精度高，以及非线性失真小。

对输出电压波形提出的相当苛刻的要求，取决于由静止变流器供电的很多设备对这个参数敏感的程度。有些设备在谐波含量较高的情况下，其特性明显变坏，如执行电动机、陀螺马达等；有些设备则要求波形经过微分或积分运算后仍然保持不变，如随动系统、计算装置、电气模型、相敏放大器、感应式传感器以及其他许多装置。

对静止变流器所提的各种技术要求决定了它的方块图（见图1-1）。静止变流器的主要环节是逆变器本身（И），即通常所说的功率放大器，它是用来将直流电能变换成交流电能。

静止变流器中的逆变器，实质上是一个换向器。静止变流器直流电路的电压就是换向器的电源电压。交流电路的电压就是它的输出电压。静止变流器的直流电路包括直流电源，同时还可能

● 以后如果文中没有特别说明，“交流”二字应理解为接近正弦波的电流或电压。

包括电源滤波器，交流电路包括负载，也可能包括变换电压大小所需的变压器、输出电压的高次谐波滤波器，以及负载无功功率和负载电流电路中无功压降的补偿元件。换向器的换向元件交替地将交流电路中与之相连的各点与换向器电源电压的不同极性接通，周期地改变这些点的电位。

换向元件的状态随时间的变化规律这样选择，使得换向器输出端产生所需相数的交流电压。换向

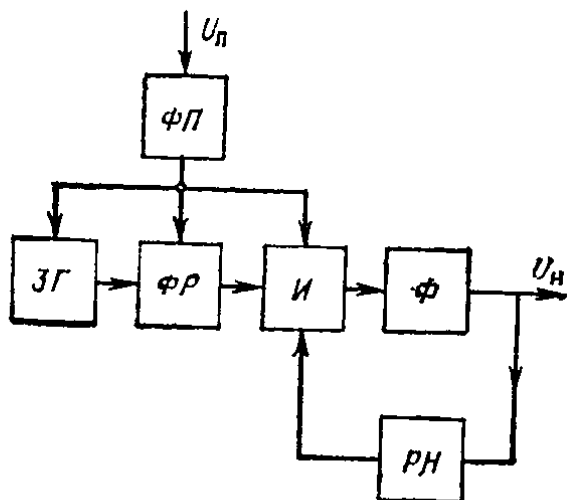


图1-1 静止变流器一般方块图

元件状态的上述变化规律由换向器输入电压系统保证。在下面所讲的静止变流器中，换向器的换向元件是晶体管，控制电压加在晶体管的发射极-基极电路。因为晶体管工作于开关状态(或是处于饱和状态——接通状态，或是处于截止状态——断开状态)，所以在电阻负载下，换向器输入端和输出端具有同样的矩形波。除了下面讲的采用缩短控制电压时间的情况之外，在电抗负载下也会产生同样的波形。为了得到三相交流电压系统采用了分相器(ΦР)。其余的环节用来满足其他技术要求，例如：给定振荡器(ЗГ)用来保证输出电压所需要的频率稳定精度；输出滤波器(Φ)用于抑制输出端电压的高次谐波，保证输出电压达到所要求的波形；电压调节器(РН)用来保证输出电压所需要的电压稳定精度；输入滤波器(ΦΠ)用来将直流电压的脉动抑制到可接受的程度。

在某些静止变流器中，一个环节可能兼有几种功能。例如，逆变器可能采用同时具有给定振荡器、分相器和滤波器三种功能的线路，也可能采用仅具有分相器和滤波器功能的线路。大功率静止变流器通常将各个功能尽量分开，在这种情况下，给定振荡器和分相器之间、分相器与逆变器之间常常引入中间放大器，以消除较大功率的一级电路对较弱的输入控制电路的有害影响。按

静止变流器的线路来分，可分为具有最大分散功能的变流器（带有滤波器的静止变流器属于此种）和具有最大复合功能的变流器（这种变流器通常没有滤波器）两类。它们在实际中都得到了广泛的应用。

图 1-1 线路中分相器 (ΦP) 和逆变器 (I) 这两个环节是必不可少的，因为没有它们就不可能实现电流变换，其余的环节在一定的条件下可以取消。实践指出，当要求的频率稳定精度为 2% 时就不需要专门的给定振荡器，因为工作于自激振荡状态的分相器所保证的频率稳定精度就已足够。如果要求稳定精度为 2~0.5%，那么可以采用独立的给定振荡器——在反馈电路中具有 $L-C$ 谐振回路的自激振荡器；当稳定精度高于 0.5% 时，就应采用带有石英晶体稳定的给定振荡器。如果是稳定的对称负载，且电源电压的相对变化范围不大于容许的输出电压相对变化范围，则在静止变流器线路中可不用调压器。如果负载是变化的，那么不采用调压器而借助于电容补偿负载电流造成的压降也可以保证输出电压达到所需的稳定精度。此时直流电源应有较小的内阻。

采用输出滤波器的问题将在下面叙述。

§ 1-2 静止变流器输出电压正弦波形的保证

在静止变流器输出端获得正弦波电压的方法实际中最常用的有两种。第一种方法是在静止变流器输出端加一滤波器，此滤波器从原始的矩形波或阶梯波电压中取出基波分量（具有允许的高次谐波含量）。高次谐波滤波器是一种选频电路，由电感和电容组成，它向负载电路的传递系数对基波来说是最大，而对高次谐波是最小。

第二种方法基于将直流电压变换成矩形波交流电压的前置多相系统（其相数几倍于静止变流器输出端所要求的相数），然后借助于输出变压器绕组的适当连接，将此多相电压转换成三相，结果在输出端产生一个多阶的阶梯波电压。输出电压半周内的最大

阶数等于

$$S_{\text{最大}} = \frac{n}{4} \quad (1-1)$$

如果 $\frac{n}{4}$ 是整数，就取上式计算结果；如果 $\frac{n}{4}$ 是分数，则取最近的大数^①。这里 n 是前置多相电压系统的相数。每个台阶的高度取决于各相变压器的绕组数据。合理地选择逆变器的相数和台阶高度可以在很大程度上降低高次谐波的含量，在输出端获得所要求的电压波形。例如，采用 12 相系统就已经可以得到十分接近正弦波形的电压。适当地连接各相变压器绕组，使十二相系统的五个电压相加所得到的阶梯波相电压仅含有 11 次奇次谐波^②（不大于 10%），而非线性失真系数 k_f ^③ 不超过 16%。此 k_f 值已经是标准所允许的，完全可以满足许多用电设备的需要。采用二十四相电压系统可以得到的 k_f 不超过 8%，而高次谐波中最低次数谐波含量小于 4.5%（23 次谐波）的三相电压系统。

上述获得接近正弦波形电压的方法有许多优点：取消了静止变流器的输出滤波器，因而在某些条件下可能减轻重量；减小了静止变流器内阻，使外特性变硬；使输出电压大小和波形与逆变频率及负载的 $\cos \varphi$ 无关；减小了由静止变流器这种用电设备所引起的电源电压脉动。

但是上述方法也有一些缺点，主要的有以下几点：

为了得到多相电压必须增加晶体管数量。理论上功率晶体管的设计功率没有增加；而实际上作为开关元件的总设计功率常常增加很多，因为计算所要求的与晶体管手册所给的数据不总是符合的。

多相系统还需要较多的功率变压器。由于变压器电压是矢量相加而不是代数相加，而且要增加一些结构零件，因此总重量

① 原文如此，似有误。——译者

② 原文如此，有误，参看式 (1-2)。——译者

③ k_f 是高次谐波分量幅值平方的总和与基波幅值平方之比。——译者

增加。

由于电压波形有间断点，因而采用电容来补偿负载中的无功功率有困难。

带有滤波器（用来抑制高次谐波，而让低次谐波通过）的变流器也有它的缺点：在静止变流器-负载电路中可能引起复杂的铁磁谐振^[4]或自振过程。在静止变流器-同步或异步电动机系统中可能发生电容自激现象，此现象或以稳定自振的形式出现，或是以电动机“卡”在与静止变流器输出电压的频率无关的某一速度上的形式出现。

因此，上述两种获得正弦波输出电压的方法都有自己的优点和缺点。

按开关元件的连接方法可将静止变流器分为桥式线路和带中点的线路。两种线路都可以串联和并联，以满足电源电压增大时或输出电压和负载电流增加时的需要。

图 1-2 为带中点的静止变流器线路，图 1-3 为桥式静止变流器线路。

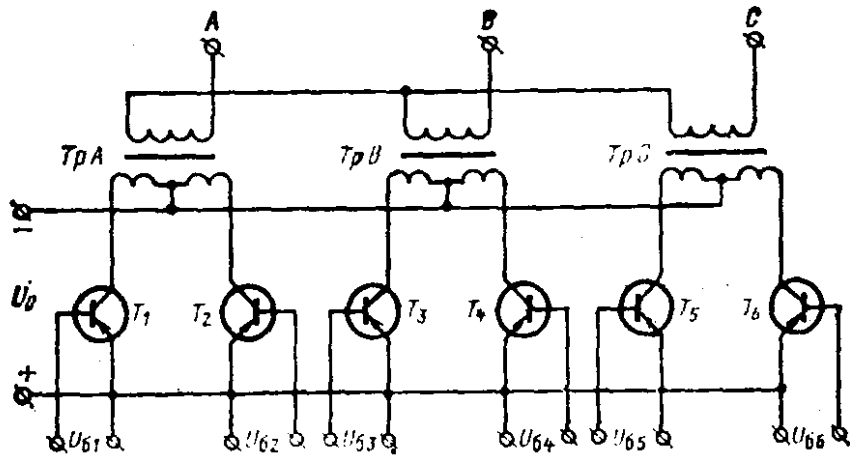


图1-2 带中点的线路组成的静止变流器

如果其他条件都相同，桥式静止变流器线路的电源电压是带中点的静止变流器线路的两倍，则在两种静止变流器输出端功率相同时，两种线路中截止晶体管上的电压和导通晶体管中的电流都相同。桥式静止变流器线路的变压器的设计功率小于带中点的

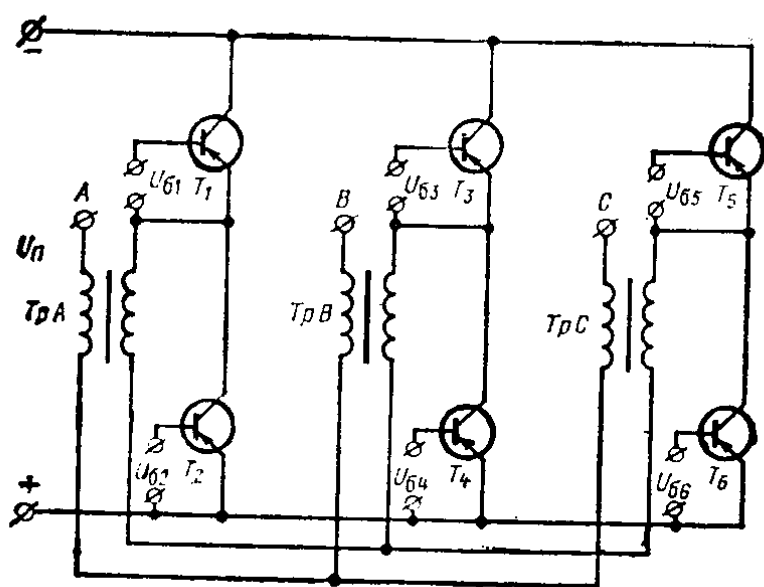


图1-3 桥式线路组成的静止变流器

静止变流器线路，这是因为它的初级绕组中电流没有中断，铜的利用率较高，而且导磁体中的磁通没有3的倍数次谐波分量，导磁体利用率也高。

每种线路在工作时都有自己的特点，如带中点的静止变流器线路，若输出变压器的两半绕组之间存在着漏感，则在截止的晶体管上可能产生较大的过电压。消除过电压的办法是减小变压器两半绕组之间的漏磁通（两半绕组并绕在环形铁芯上）。

在桥式线路中通常不会产生过电压，这是因为当晶体管换向时，在换向回路中没有电抗元件。但是，由于晶体管工作在开关状态，在截止晶体管的基区少数载流子消失过程还没有完结时相反臂的晶体管已经导通，因而集电极出现换向尖峰电流。

在带中点的线路中，这个尖峰电流受到了半绕组电阻的限制。消除换向尖峰电流的有效办法是减小功率开关晶体管控制脉冲的宽度，其目的是推迟晶体管开始导通的时间（相对于与第一只晶体管成对工作的另一只晶体管的截止瞬间）。

§ 1-3 带输出滤波器的静止变流器线路

按输出滤波器线路，静止变流器可分为以下几类：

带Γ形滤波器的变流器，这个滤波器包括一个串接在线电流

电路中的阻流圈，和一个与负载并联的电容器；

带 Γ 形滤波器的变流器，而这个滤波器带有用于补偿线电流电路压降和负载无功功率的电容器；

带 Π 形滤波器的变流器，这个滤波器包括一个串接在线电流电路中的阻流圈，和两个电容器，其中一个与负载并联，另一个并接在滤波器输入端；

带有复杂 Γ 形滤波器的变流器，其滤波器包括一个或几个串接在线电流电路中的 LC 并联回路型式的阻塞滤波器，和一个或几个与负载并联的 LC 串联回路型式的分流滤波器（用来给负载电流的高次谐波分流）。滤波器回路调谐在主要高次谐波——5次、7次等频率附近。滤波器还可包含谐振于基波频率的回路：与负载并联的并联回路，和与负载串联的串联回路。

当然，还可以有以上滤波器的各种组合。前两种滤波器的工作在第二章叙述。

带 Π 形滤波器的静止变流器示于图1-4。大家知道^[8]，当控

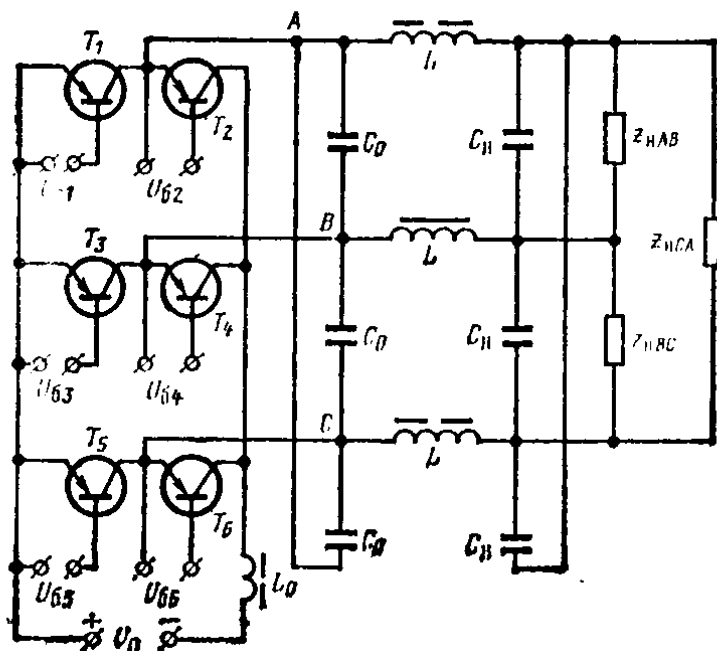


图1-4 带 Π 形滤波器的静止变流器线路

制脉冲终止时，由于阻流圈电感的存在，接在换向晶体管的那一相不可能立即从电源断开。在阻流圈绕组电流从初始值降到零的那段时间内，还未加控制信号的晶体管反向流过电流（见图1-5），

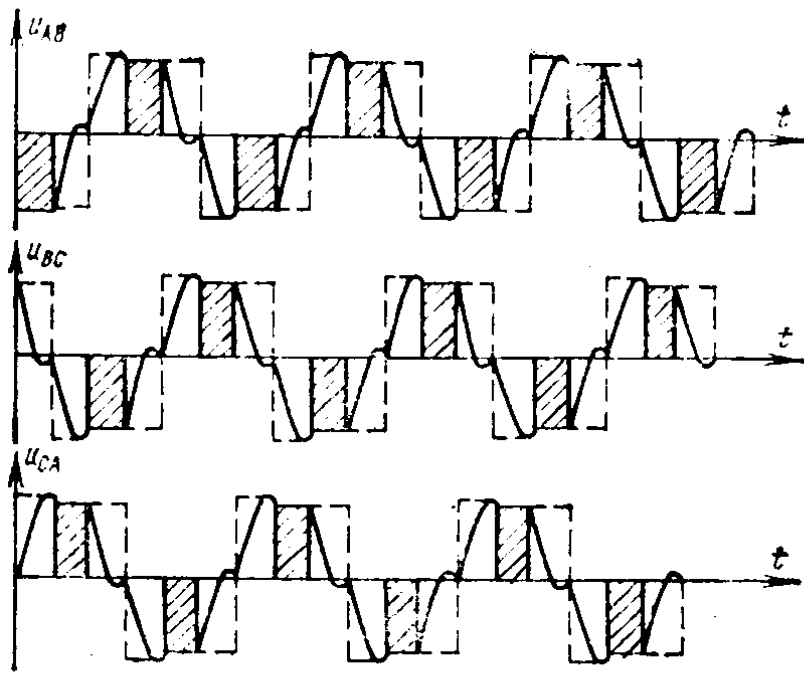


图1-5 缩短功率晶体管控制电压时间时， Π 形滤波器输入端的电压波形

电感的能量部分反馈给直流电源，部份加给其他相的电感。因此，当没有电容 C_0 时，实际作用在滤波器输入端的是矩形波电压。当逆变器输出端接有电容器 C_0 时，则完全是另外一种情况。阻流圈的无功电流被这些电容器短路，因此能够保证功率晶体管的换向与控制信号同步。为了限制某相接通瞬间的电容性电流，经验指出，匹配变压器的漏感和电源电路中的电感 L_0 是完全足够的。

晶体管导通时，静止变流器的相应相接入电源，其线电压决定于这段时间的电源电压 U_n 。在图1-5中，所有三个线电压的这个区间都画上了阴影线。其余区间的线电压主要由过渡过程的自由分量决定，而过渡过程决定于滤波器的参数和负载。可以指出，当负载功率因数较低时，在这些区间内的线电压也按正弦规律变化。

为了比较起见，在图1-5中同时绘出了接有电容器 C_0 (实线) 和没接电容器 C_0 (虚线) 两种情况下的线电压波形。

正确地计算 C_0 、 L 和 C_n 时，滤波器输入端的电压波形接近梯形。因此，引入电容器 C_0 ，不仅大大改善功率晶体管的工作状态，还将滤波器输入端的 k_f 值从40~45%大约降到20~25%。上述滤波器的优点还在于：如果采用带饱和导磁体的阻流圈，那么阻