

王 聪 编著

Principle and Applications of Soft Switch

er Circuits

软性开关 逆变电路 及其应用

机械工业出版社

煤炭科学基金资助项目

软性开关逆变电路 及其应用

王 聪 编著

机械工业出版社

(京)新登字054号

软性开关逆变电路是近年来电力电子学领域中最活跃的研究方向之一。本书较全面地讲述了该项技术的理论及应用。书中各章节均涉及到了该研究领域的发展前沿。其中第二章和第三章系统地介绍了两种基本类型的软性开关逆变电路的各种典型拓扑结构、工作原理、动态过程及设计原则；第四章详细地讨论了用于DC环节谐振型逆变器输出电压控制的离散脉冲调制策略；第五章给出了一个离散脉冲调制的软性开关逆变器，在直接转矩控制的交流调速系统中的应用实例。

本书可作为高等院校工业自动化专业高年级学生及研究生的教学参考书，也可供从事电力电子技术研究的广大科技人员阅读。

软性开关逆变电路及其应用

王 聪 编著

*

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）

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张5³/₈·字数114千字

1993年11月北京第1版·1993年11月北京第1次印刷

印数 0 001—2 300·定价：7.10元

*

ISBN 7-111-03848-7/TP·191

前 言

近年来电力电子技术的飞速发展，正在带来人类社会的第二次电子革命，而谐振软性开关逆变技术的研究则是目前电力电子技术领域中最活跃的一个研究方向。

谐振软性开关逆变电路这个概念是由美国的 Divan 博士在1986年提出的，这个概念从一出现就显示出了蓬勃的生命力，并受到了各国专家学者的充分关注。Divan 博士也因此而获奖。

与常规的硬性开关逆变器相比，谐振软性开关逆变器具有许多明显的优势。如：低噪声、低电磁干扰、输出波形质量高、不需要缓冲 (Snubber) 电路、散热器尺寸大大减小、开关器件可在高效率和高可靠性下工作等。另外，由于低 du/dt ，电动机绝缘寿命大大延长。因此可以毫不夸张地说，谐振软性开关逆变电路的出现，使PWM逆变器的设计出现了革命性的突破。由于这些明显的优势，各国专家学者一致认为这种类型的逆变器将是下一代逆变器的发展主流。目前各发达国家都在大力从事这方面的研究工作。每年在各种相关的国际会议上均有数十篇到上百篇有关论文发表。与发达国家相比，我国在这一领域的研究还仅仅处于起步。作者希望本书的出版能帮助国内广大从事电力电子技术的科研人员和工程技术人员对这一领域的发展有一个迅速、全面的了解，能对我国在这一研究领域迎头赶上国际先进水平起到一点促进作用。

本书是作者在给本校研究生授课讲义的基础上编写的。各章内容均涉及到了目前这一研究领域的发展前沿。第二章和第三章讨论了谐振软性开关逆变器的两种基本类型，第四章讨论了DC环节谐振型逆变器的离散脉冲调制，第五章讨论了谐振软性开关逆变器在交流调速中的应用。书后的4个附录分别给出了谐振电感的设计原则、GTR和GTO的开关过程、书中用到的重要定理及公式。

在本书出版之前，作者首先要感谢英国Bristol大学的S.R.Bowes教授在作者留学期间，在这个研究领域所给予的精心指导和热情帮助，感谢中国矿业大学的谢桂林教授、郭余庆教授对作者编著此书的支持、鼓励和推荐，感谢我的妻子对全书插图的绘制，感谢本校研究生黄静华、兰西柱把一篇凌乱的讲义用计算机编辑成一篇整洁的书稿。

由于本书涉及的是一个全新的研究领域，因此作者在各个章节的论述都还很深入、全面，加之作者学识有限，书中肯定有值得讨论之处，敬请广大读者给予批评指正。

作 者
1993年2月

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 硬性开关PWM逆变电路的局限	2
第二节 谐振软性开关逆变电路的提出	4
第二章 DC环节谐振型逆变器	9
第一节 谐振DC环节逆变器 (RDCLI)	9
一、谐振DC环节的基本工作原理	10
二、RDCLI的工作过程分析	14
三、对RDCLI的几点讨论	18
第二节 改进型的谐振DC环节逆变器 (IRDCLI)	21
一、IRDCLI的基本工作原理	21
二、初始化电感电流阈值的选择	25
第三节 有源钳位的谐振DC环节逆变器 (ACRLI)	30
一、ACRLI的基本工作原理	31
二、ACRLI的工作过程分析	32
三、对ACRLI的几点讨论	37
第四节 DC环节并联谐振逆变器 (PRDCLI)	42
一、DC环节并联谐振电路 (PRDCL) 的基本工作原理	43
二、PRDCL 电路的工作过程分析	45
三、对PRDCLI电路的两点讨论	52
第三章 极谐振型逆变器(RPI)	55
第一节 准谐振电流模式逆变器 (QRCMI)	56
一、QRCMI电路的基本工作原理	56
二、QRCMI的工作过程分析	57

三、QRPM电路与DC环节谐振型逆变电路的比较	64
第二节 辅助二极管谐振极逆变器 (ADRPI)	65
一、ADRPI变换桥臂的拓扑结构及工作原理	66
二、ADRPI变换桥臂的工作过程讨论及相平面分析	69
三、零电压开关操作的限制	76
四、设计过程举例	81
第四章 DC环节谐振型逆变器的离散脉冲PWM调制	87
第一节 线性Delta调制器	88
一、线性Delta调制器的基本工作原理	88
二、线性Delta调制器的电路分析与设计	93
三、对线性Delta调制器的几点分析	96
第二节 $\Sigma\Delta$ 调制器	97
一、 $\Sigma\Delta$ 调制器的构成	97
二、 $\Sigma\Delta$ 调制器的工作原理分析	99
三、对 $\Sigma\Delta$ 调制器的几点讨论	108
第三节 电流调节型 Δ 调制器 (CRDM)	110
一、CRDM的提出及特性	110
二、CRDM的工作原理	113
第四节 谐振脉冲保持器 (RPH) 与零阶保持器 (ZOH) 的 比较	113
一、采样保持器为零阶保持器 (ZOH)	115
二、采样保持器为1型谐振脉冲保持器 (RPH1)	116
三、采样保持器为2型谐振脉冲保持器 (RPH2)	120
第五章 离散脉冲调制的感应电动机的直接转矩控制	125
第一节 引言	125
第二节 感应电动机在两相静止坐标系上的空间复矢量模型	127
一、定子电流的空间复矢量表示	127
二、感应电动机在两相静止坐标系上的电压方程和磁链 方程	128

三、定子磁链的电压模型	129
四 以定子磁链为基准的转矩模型	131
第三节 离散脉冲调制的DSC控制系统	133
一、离散脉冲调制的DSC的基本工作原理	133
二、离散脉冲调制的DSC的工作过程分析	135
第四节 定子电流空间复矢量 i_s 的估计	137
一、问题的提出	137
二、 i_s 的估计原理	138
三、基于定子电流 i_s 观测的DSC开关策略	140
第五节 离散脉冲调制的DSC控制系统的实现	142
附录	145
附录A 谐振电感的设计与选择原则	145
一、电感量的选择	145
二、电感器铁心的选择	146
三、电感线圈的导线选择	148
四、谐振电感测试电路	149
附录B GTR和GTO的开关过程和开关损耗	150
一、GTR的开关特性及开关损耗	151
二、GTO的开关特性及开关损耗	153
附录C 电力电子电路中两个重要的稳态原理	157
附录D 常用信号的拉氏变换与z变换	159
参考文献	160

第一章 概 述

谐振软性开关逆变器这个新概念从一出现就显示出了蓬勃的生命力。1989年 Divan 博士因提出此新概念而获得IEEE工业应用分支优秀论文一等奖。近几年来此概念受到了各国专业人员越来越多的关注,并在较短的时间里得到了非常迅速的发展。

众所周知,脉宽调制(PWM)技术在逆变器中的应用对近代电力电子技术、近代交流调速系统的发展起到了极大的促进作用。与常规的六阶梯波逆变器相比,PWM逆变器具有很显著的优点。如:主电路结构简单,一个功率控制级即可用来控制逆变器输出交流基波电压幅值,又可控制其输出频率;使用了不可控整流桥,使系统对电网的功率因数与逆变器输出电压值无关而接近于1;逆变器在调频时同时实现了调压,而与中间直流环节的元件参数无关;加快了系统的动态响应;可获得比常规六阶梯波好得多的输出电压波形,能消除与抑制低次谐波,使负载电动机可在近似正弦的交变电压下运行,转矩脉动小,从而大大地扩展了拖动系统的调速范围。正是这些优点,使脉宽调制(PWM)的电压型逆变器在当今DC~AC转换领域里占据了绝对的统治地位。

然而常规的PWM逆变器远不是最优的,很长时间以来人们就认识到,在PWM逆变电路中,如果能将开关频率在原有基础上进一步大大提高,将会带来一系列好处。如低次谐波会被更有效地抑制,输出将具有更标准的正弦波形,滤

波器尺寸将大大减小，特别当开关频率在 18kHz 以上时，噪声将已超出人类听觉范围，即已超出临界噪声，使无噪声传动系统成为可能。

为了使逆变器的开关频率能在原有基础上大大提高，长期以来人们在器件的改善和电路的设计方面做出了不懈的努力，而谐振软性开关逆变电路则在这一系列努力中获得了突破性的进展。这一类型的逆变器被认为是下一代逆变器的发展主流。

第一节 硬性开关PWM逆变电路的局限

大功率电力晶体管GTR和可关断晶闸管GTO分别是目前在中小功率和中大功率范围内使用最广泛的两种器件。当考察这两种器件时可发现，GTR的开关时间大约为几十纳秒至几微秒，而GTO的开通与关断时间也不过 $10\mu\text{s}$ 左右（参见附录B）。然而用它们构成的逆变器的开关频率范围一直被限制在 $2\sim 3\text{kHz}$ 。很明显这两种器件构成的逆变器应该可以有更高的开关频率。那么究竟什么限制了它们的开关频率？

在常规的PWM逆变电路中，电力电子开关器件在高电压下导通，大电流下关断，处于强迫开关过程。因此这种电路又称为硬性开关电路。硬性开关电路在高开关频率下运行将受到如下一系列限制，见文献[2]。

1. 热学限制 在感性负载关断、容性负载开通时，电力电子开关器件将承受很大的瞬时功耗。一个周期内器件的开关损耗一般可占总平均损耗的 $30\%\sim 40\%$ 。随着开关频率的增加，这种损耗成正比例地增加。由于过大的开关损耗使结温上升，GTR和GTO在 $2\sim 3\text{kHz}$ 工作频率时结温已达极限。因此尽管它们本身开通、关断时间很短，但由于结温的限

制, 不仅工作频率不能再提高, 而且器件的电流、电压容量也不能在额定条件下运行。

2. 二次击穿限制 开关过程中, GTR 的开关轨迹如图

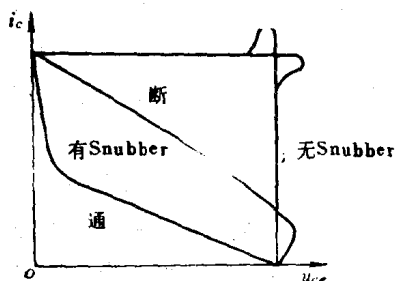


图 1-1

1-1 所示。由图可知, GTR 承受的电流、电压会出现同时为最大值, 这时候的电流、电压已远远超出 FBSOA、RBSOA 所容许的直流安全区。这一状态停留时间稍长即会产生二次击穿使 GTR 烧坏。为了扩大安全区, 设计

GTR 时势必使开关速度、电流增益、饱和压降以及电压等级等参数付出较大代价, 导致 GTR 的设计难以最佳化。

在感性负载关断时出现的尖峰电压、在容性负载开通时出现的尖峰电流, 更易造成二次击穿, 从而极大地危害了器件的安全运行。

3. 电磁干扰限制 在高频状态运行时, 开关器件本身的极间电容成为极重要的参数。这种极间电容在开关过程中会产生两种不利因素, 其一, 在高电压下开通时, $CU^2/2$ 的电容储能被器件本身吸收和耗散, 势必增加温升, 频率越高越严重。其二, 极间电容电压转换时的 du/dt 会耦合到输入端, 产生电磁干扰 (EMI), 使系统不稳定。此外极间电容与电路中的杂散电感会形成振荡, 也会干扰正常工作。

4. 缓冲电路 (Snubber) 的利弊 在 PWM 硬性开关电路中, 常常加入串联或并联缓冲电路。它可限制开通时的 di/dt 、关断时的 du/dt , 使动态开关轨迹缩小到直流安全区

SOA之内（见图1-1），保证GTR能安全运行。而在一个可靠的GTO逆变电路的成功设计中，它更是作为一个必不可少的电路而必须存在。改变器件的开关轨迹这种精明的想法最早是由Calkin和Hamilton首先提出的，其后McMurry、Undeland等多人都相继对此概念进行过讨论。Snubber电路的提出对逆变电路的可靠性设计带来了极大的好处，但必须注意的事实是，Snubber电路是通过把器件本身的开关损耗转移到缓冲电路中而使器件得到保护的，而这部分能量最终还是被消耗掉，因此系统总的功耗不会减小。随着工作频率的提高，开关器件仍会出现很可观的功率损耗，使系统的效率大大降低。另外，缓冲电路增加了逆变电路的复杂性和造价，而又因其部件有一定的特殊性，为制造和使用带来不便。

第二节 谐振软性开关逆变电路的提出

与PWM硬性开关电路相反，在谐振软性开关电路中，开关器件在零电压或零电流条件下开关，理论上开关损耗为零。因此，与硬性开关电路相比，在采用同一类开关器件的条件下，谐振软性开关电路可以很轻松地在高于一个数量级的开关频率下工作。例如，同一GTR开关器件在壳温达到100℃时，PWM硬性开关频率只能达到3kHz，而在谐振软性开关应用中则可提高到75kHz，这时开关器件的工作频率不受开关损耗的限制，而受其它参数的影响。高开关频率使谐振软性开关电路具有许多明显的优点，如低噪声、低电磁干扰（EMI）、输出波形中的谐波成分少；另外，由于开关器件在零电压或零电流条件下动作，开关器件的动态开关轨迹大为改变，如图1-2所示。这使得Snubber电路成为多余，散热器尺寸大大减小，从而使设备尺寸、重量大大减小，开关器

件可在高可靠性、高效率条件下工作。总而言之，人们过去在硬性PWM电路设计中追求的许多目标，在软性开关条件下都较容易地实现了。可以这么说，谐振软性开关电路的出现，使PWM逆变器的设计出现了革命性的突破。

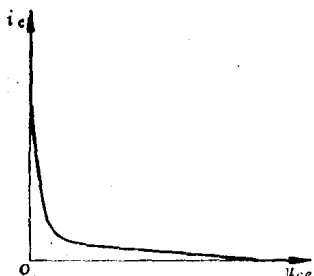


图 1-2

谐振软性开关电路中的零电压和零电流条件是由辅助的谐振电路创造的，而辅助的谐振电路通常由电力电子开关器件S和辅助谐振元件L和C构成。当然，辅助谐振电路中的开关器件S也应在零电压或

零电流条件下实现通断。

由于谐振软性开关逆变电路与常规硬性开关逆变电路比较具有明显的优点，因此，从1986年以来，在每一年的IEEE-IAS年会、PESC年会、IPEC会议上都有大量的关于这个领域研究的论文发表，目前已提出多种不同拓扑结构的谐振软性开关逆变电路。如果粗略地把它进行分类，大致可分为两类：一类为DC环节谐振型逆变器，包括谐振DC环节逆变器

(RDCLI)，改进型的谐振DC环节逆变器(IRDCLI)，有源钳位的谐振DC环节逆变器(ACRLI)，DC环节并联谐振逆变器(PRDCLI)等。这种电路的特点是在逆变桥与DC总线之间有一辅助谐振回路。图1-3a为RDCLI的电路原理图。图中LC即为辅助谐振电路。通过谐振，电容电压 u_c 周期性地返回零点，从而为后面的逆变桥创造了零电压开关间隔。图1-3b为逆变器输出PWM电压波形，从图中可看到，输出电

压从正向负或从负向正的转换是在DC环节电压为零时进行的。另一类称为极谐振型逆变器 (RPI)，包括准谐振电流模式逆变器 (QRCMI)，辅助谐振变换极逆变器 (ARCPI)，辅助二极管变换极逆变器 (ADRPi) 等。图1-4a为ARCPI的电路原理图，从图中可知，与DC环节谐振型逆变电路不同，极谐振型逆变器每一个逆变桥臂都配有一组辅助谐振电路，为该桥臂上下开关器件创造零电压通断条件，这使其每一相的操作都完全独立于其它相，图1-4b为ARCPI 输出 PWM 电压波形。

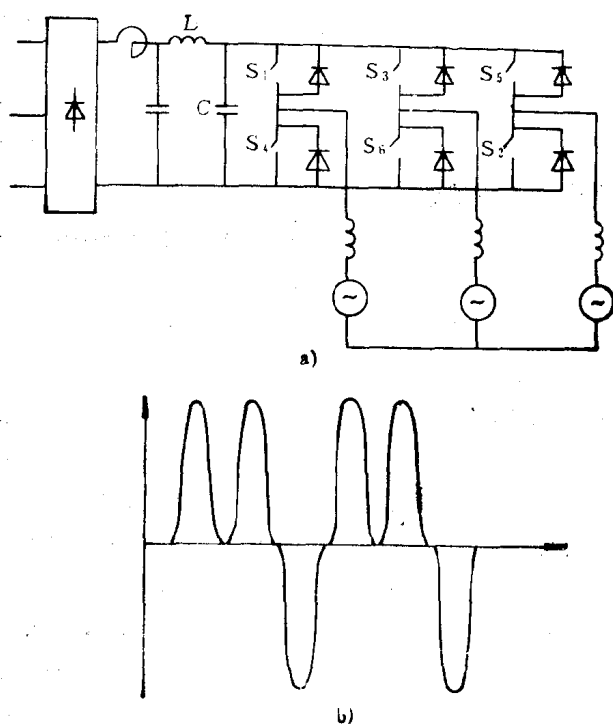


图 1-3

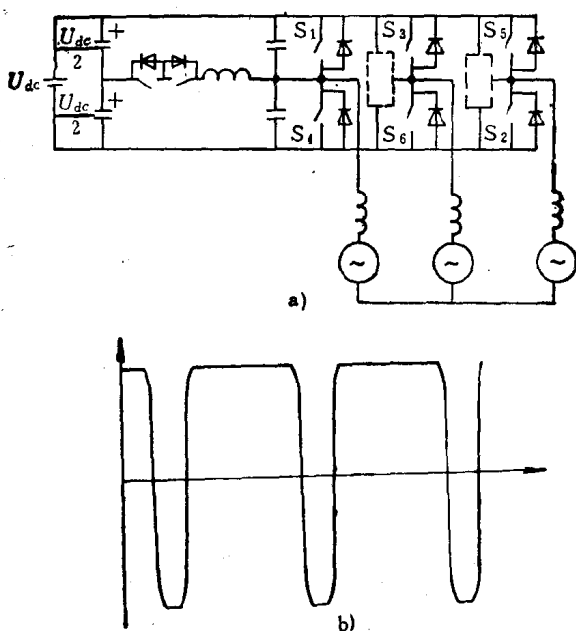


图 1-4

就RDCLI、ACRLI这类电路来说, 由于DC环节不再是稳定的直流电压, 而是一系列的脉冲, 这就给逆变器的动态分析及PWM调制策略的应用带来了一些新问题, 因此近年来, 不仅有大量的文章讨论了不同拓扑结构的谐振软性开关电路, 同时也有大量文章探讨了适合于这种直流环节谐振型逆变器的调制策略及适用于分析这种系统的理论工具。文献[10]详细地分析了Delta型调制器(如线性Delta调制器, $\Sigma\Delta M$ 调制器)在DC环节谐振型逆变器中的应用, 并与采用正弦PWM调制的硬性开关电路进行了比较。其后1988年、1989年及1990年, 又相继讨论了适用于DC环节谐振型逆变器的最

优离散脉冲调制法^[13]，相邻空间电流矢量调制法^[12]及离散时间积分型滑模控制策略等^[14]，文献^[15]在对采用RDCLI逆变电路、Delta调制策略的磁场定向控制系统进行动态分析时，讨论了谐振脉冲保持器RPH这个概念（即把谐振的DC环节看做一个保持器），分析比较了这种保持器与广泛应用于控制信号领域中的零阶保持器ZOH响应特性的异同，并分析了采用Delta调制的带有RPH的电流调节器的Z变换模型。

到目前为止，大多数讨论谐振软性开关逆变器的文章仍然称其为下一代逆变器，主要是因为在大功率范围内的实际应用上，这种类型的逆变器仍然存在着一些需要解决的问题。首先是工作在高频状态下的大功率半导体开关器件需要有更高的电压额定值，如果采用RDCLI或改进型的RDCLI拓扑结构，它们必须能承受至少两倍于直流供电电压值。另外，谐振电感也是构成谐振软性开关逆变器的一个很关键的因素，为了减少谐振电感在高频状态下的电阻值，一般需要专门设计并用多股绞线专门制作。另外目前现有的谐振电容，如果应用在大功率范围内，功率也还远远不够。随着这些问题的解决，谐振软性开关逆变器的实用性将会大大增加，成本也会大大降低。毫无疑问，它将成为新一代逆变器的发展主流，随着这种技术的成熟，它必将产生较大的经济效益，并对工业的发展与进步做出其应有的贡献。

第二章 DC 环节谐振型逆变器

由前一章可知,随着开关频率的增加,PWM 硬性开关逆变电路的开关损耗将迅速增加。巨大的开关损耗一方面使器件温度增高从而使其容易造成损坏,另一方面使逆变器的整体效率大大降低,从而使其从经济角度考虑无法使用。各种各样的缓冲器(Snubber 电路)的巧妙设计虽然降低了器件的开关损耗,但逆变器的总体效率并没有提高。这促使人们不得不想办法从另一条途径去探索改善器件开关环境的办法。实际上早在美国的 Divan 博士之前,已有很多文章探讨过在能量传递通路上使用高频谐振的 LC 电路的谐振型变流器。然而它们的共同缺点是需要附加很多开关器件,控制上复杂,有些还需要大尺寸的谐振 LC 元件,这就使它们在工业的实际应用上缺少了吸引力。1986年 Divan 博士第一次提出了 DC 环节谐振型逆变电路这一新概念,这个电路的提出,使人们顿觉耳目一新,从此,软性开关逆变技术的研究成为电力电子学领域中最活跃的研究方向之一。在这一章里将对 DC 环节谐振型逆变器的几种典型拓扑结构分别进行讨论。

第一节 谐振 DC 环节逆变器 (RDCLI)

RDCLI (Resonant DC Link Inverter) 的电路拓扑结构及控制策略在所有 DC 环节谐振型逆变器中是最简单的。仅需增加一个电感和一个电容,就可使原来的 PWM 电压型硬性开关逆变器的开关频率提高一个数量级,并进而带来了一