

逆变器软开关技术的发展和现状

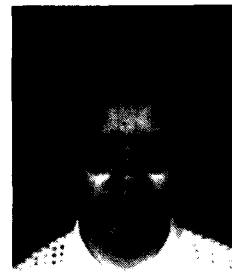
郑连清¹, 王青峰¹, 朱 军¹, 王 腾²

(1. 重庆大学 电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 华艺设计顾问有限公司, 广东 深圳 518031)

摘 要: 介绍了 DC/AC 逆变器软开关的发展和现状, 以及实现逆变器软开关的基本电路, 包括谐振 DC 环节方式电路、谐振极方式电路、负载谐振方式电路、辅助谐振缓冲电路、主辅开关电路、载波控制逆变电路等, 列出了它们的基本电路拓扑图。同时, 对拓扑图进行了简单的分析。最后, 对逆变器软开关的发展方向提出看法。

关键词: 逆变器; 软开关; 辅助谐振; 电路拓扑

中图分类号: TM 464 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5531(2007)03-0021-04



郑连清(1964—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电力电子与电力传动。

Development and the Current Station of Inverter Soft Switching Technology

ZHENG Lianqing¹, WANG Qingfeng¹, ZHU Jun¹, WANG Teng²

(1. Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Ministry of Education, Electrical Engineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Huayi Design Infrastructure Co., Ltd., Shenzhen 518031, China)

Abstract: The development of DC/AC inverter soft switching technology and the fresh research state were presented, some basic circuits to realize inverter soft switch which contains resonant DC link inverter circuit, resonant pole inverter circuit, load resonant inverter circuit, auxiliary resonant cushion inverter circuit, main-assist gain inverter circuit, carrier wave controlling inverter circuit were also introduced. The basic circuits and simple analysis to some of circuits were given out. At last, a point about development of DC/AC inverter soft switching technology was put forward.

Key words: inverter; soft switching; auxiliary resonant; circuit topology

0 引 言

由于现代电力电子装置愈来愈趋向于小型化和轻量化, 必然要求开关频率越来越高。当开关频率很高时, 给电路造成严重的噪声污染和开关损耗, 且产生严重的电磁干扰, 软开关技术的出现解决了这一系列问题。软开关技术指通过辅助的谐振电路使开关管开通前电压先降为零, 或关断前电流先降为零, 这样, 实现了在零电压情况下开通或者在零电流条件下关断, 从而大大降低了开关功率损耗, 减少了噪声污染和电磁干扰。软开关分为零电压开关(ZVS)和零电流开关(ZCS)。

逆变器是电子电路中最常见的电路, 自从上

世纪 80 年代末美国威斯康星大学的 Divan 博士提出谐振直流环节逆变器后, 软开关在逆变器中得到了长足的发展, 之后, 出现了各种软开关逆变器拓扑结构。

1 逆变器软开关基本拓扑

逆变器的软开关电路根据谐振电路和辅助电路在逆变器主电路上的不同位置可分为谐振 DC 环节方式、谐振极方式、负载谐振方式、辅助谐振缓冲电路等方式。

1.1 谐振 DC 环节方式

图 1 为串联谐振 DC 环节逆变器, 它在逆变器 DC 母线上设置 LC 并联谐振或串联谐振电路,

王青峰(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

朱 军(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

王 腾(1979—), 男, 助理工程师, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动。

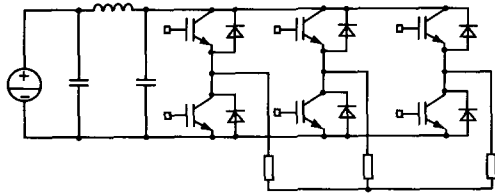


图1 串联谐振 DC 环节逆变器

利用谐振使 DC 母线上产生零电压或零电流,在此期间逆变器的开关器件进行切换,实现零电压或零电流动作。该拓扑是谐振 DC 环节的基本结构,但有明显的缺点:母线上电压和电流的峰值是电源的 2 倍以上,所以,必须考虑器件的耐压,另外,电压过零点与逆变器开关难以同步,使逆变器输出产生大量的次谐波。针对以上的缺点,提出了改进型谐振 DC 环节逆变器(IRDCLI)、有源箝位谐振 DC 环节逆变器(ACRLI)等。

IRDCLI^[1]是在 DC 母线上加上辅助开关器件和 LC 谐振电路(见图 2)。在逆变器开关模式切换之前启动该谐振电路,当谐振过程使 DC 母线电压和电流为零时才开始软开关切换,辅助器件的动作也是以软开关进行的。谐振动作仅在逆变器开关模式要切换时发生。该方法的优点是,谐振电路的开关器件和无源器件数目少、结构简单。缺点是根据逆变器开关模式的不同,负载电流和电压波动大。

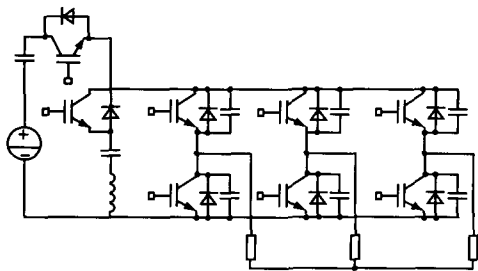
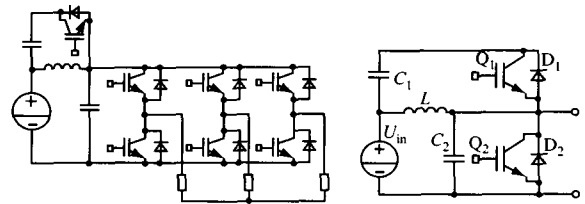


图2 改进谐振 DC 环节逆变器

ACRLI^[2]如图 3 所示,有两种不同的形式。图 3(a)在 DC 母线上增加了用电容或高频变压器做成的电压箝位电路,该方式通过控制电压、电流值适中,脉冲密度调制是其基本结构,也可以在逆变器各桥臂上并联无损耗缓冲电容,实现 ZVC 的 PWM 调制。该方法简单,但是谐振始终存在,LC 电路的导通损耗太大。

图 3(b)只显示直流侧的电路结构。其工作原理是在 LC 谐振电路开始工作之前,电容 C_1 上



(a) 拓扑 1

(b) 拓扑 2

图3 有源箝位谐振 DC 环节逆变器

预充电到一定电压值,该电压值与直流供电电压之和即为谐振电压的箝位值 KU_{in} ,则电容 C_1 上预充电电压值为 $(K-1)U_{in}$ 。首先导通 Q_2 ,当 i_L 增大到预充电电流阈值时,关断开关 Q_2 ,这时 LC 电路开始谐振。当谐振电压达到箝位电压时,二极管 D_1 导通,由于电容 C_1 的存在,谐振电压被限制在箝位电压。由于二极管 D_1 的存在,箝位开关 Q_1 可在电感电流 i_L 反向之前在零电压下自然导通。当电感电流 i_L 反向后,电容 C_1 向电感放电,当其放出的电荷等于之前所接受的电荷时,关断 Q_1 ,可实现零电压关断。

1.2 谐振极方式

谐振极方式包括准谐振模式逆变器(QR-MI)、辅助谐振变换极逆变器、辅助二极管变换极逆变器。与 DC 环节谐振型逆变器比较,谐振极逆变器的优点是:① 逆变器各相相互独立,且不存在软开关操作与逆变器开关同步的问题,可方便地采用常规的 PWM 调制策略进行输出电压控制;② 不增加逆变器开关器件的电压应力。其缺点是:① 大多数这类逆变器的开关器件的电流应力增加;② 需要多组辅助谐振电路,使用多个电感、电容,造成逆变器体积、重量增加,效率降低。

图 4 为准谐振 DC 环节的改进电路^[3]。ZVS 电路插在直流电压源和无缓冲电容三相逆变器之间。在逆变器需要开关切换时,ZCS 电路使直流母线提供一个很短的零电压周期,以达到 ZCS 动作的目的。该电路的优点是电路的结构简单,系统的综合效率高。

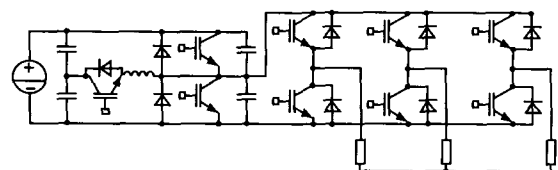


图4 准谐振 ZVS PWM 逆变器

图5(a)为辅助二极管谐振极逆变器一条桥臂的拓扑结构。电感 L_1 在该拓扑中起了两个作用:稳态时,它作为储存能量的元件;而在开关过程中,它作为谐振元件。图中: $C_3、C_4$ 与 L_1 构成谐振电路,续流二极管 D_3 和箝位二极管 D_4 分别与 $C_1、C_2$ 并联连接,这种拓扑结构的目的是,不仅要形成使功率开关管及整流二极管零电压导通,而且要通过合适的电路安排及适当的开关次序消除电路中的寄生成分影响。图5(b)为辅助谐振变换极逆变器^[4],它利用辅助开关器件上加缓冲电路,抑制二极管反向恢复电流,其缓冲电路用二极管和稳压管相串联,利用该电路可抑制二极管关断时的过电压。

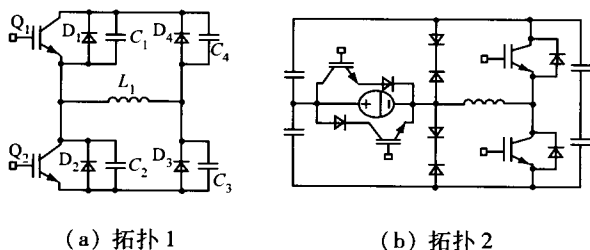


图5 辅助二极管谐振极和辅助谐振变换极逆变器

1.3 负载侧谐振

图6为负载侧谐振式变换器,它在三相负载支路上加串联 LC 谐振电路,并与直流的中性点连结,利用该串联 LC 谐振电路,负载电流里加了谐振电流,在电流瞬时过零时,实现ZCS动作。缺点是谐振电感和开关器件导通损耗大。

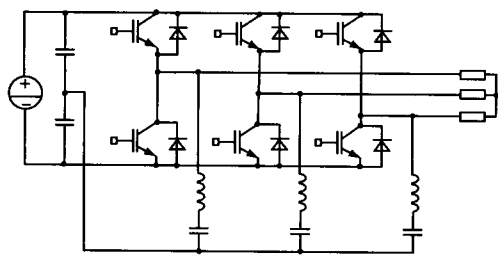


图6 负载谐振逆变器主电路

1.4 辅助谐振缓冲器方式

图7所示的辅助谐振缓冲式逆变器^[5]在各相输出线上接双向开关器件和谐振电感,组成谐振缓冲电路。它与逆变器各开关上并联的电容一起产生部分谐振才动作,该电路仅在逆变器开关模式切换时,辅助谐振动作。可利用并联电容的无

损工作使逆变器的开关器件和辅助谐振电路内所有开关器件都能实现软开关。缺点是使用的无源器件和半导体器件比较多;优点是缓冲电路半导体器件上承受的电压和电流峰值应力减小,可用于大功率逆变。

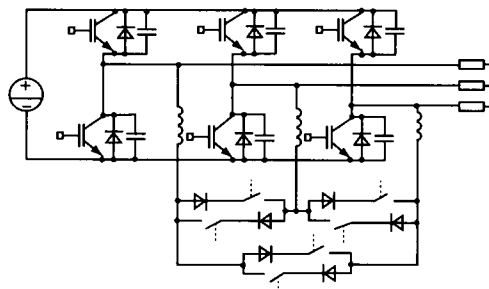


图7 辅助谐振缓冲式逆变器

2 软开关逆变器的其他方法和现状

随着逆变器软开关技术的不断提高,在原有的基本拓扑结构的基础上,又出现了一些新的逆变器软开关拓扑电路。具有代表性的有主辅开关电路和控制载波电路等。

主辅开关电路逆变器^[6]可实现主开关管及辅助开关管的零电流关断,降低开关损耗。同时,由于采用了高频与低频开关相结合的控制方法,避免了因死区控制而出现的谐波噪声,使输出波形含较少的谐波分量。主电路工作原理和单相逆变器的拓扑结构如图8所示。 $S_1 \sim S_4$ 为逆变器的主开关管, $S_{a1}、S_{a2}$ 为辅助开关管。其中, $S_1、S_2、S_{a1}、S_{a2}$ 为高频管,开关频率 $f_s = 15 \text{ kHz}$; $S_3、S_4$ 为工频开关管, $f_s = 50 \text{ Hz}$ 。在正半周期, $S_1、S_4、S_{a1}$ 开通,而在负半周期, $S_2、S_3、S_{a2}$ 开通。利用开关管的开通顺序来实现主辅开关的ZCS,其电路的逆变效率非常高^[7]。

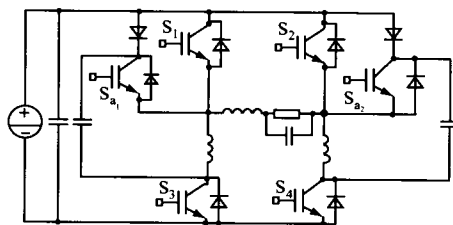


图8 主辅开关实现ZCS单相逆变器

图9为控制输入载波的软开关逆变器主电路^[8]。逆变器主电路中的每个功率开关器件上都并联有一个缓冲电容,由于电容电压不能突变,

故功率开关器件在任何时候关断都属零电压开关(ZVS)方式。要实现逆变器主电路的软开关动作,只要使逆变器功率开关器件实现零电压软开通就可以了。为了便于实现软开关动作,PWM调制的载波不采用传统的三角载波,而采用斜率随逆变器输出电流极性交替改变的正负斜率锯齿载波,当逆变器的输出电流极性为正时,采用正斜率锯齿波;输出电流极性为负时,采用负斜率锯齿波。通过这种调制方式,逆变器的所有功率开关器件需要进行ZVS软开通的开通动作都集中到锯齿载波的垂直沿附近。在该时刻,启动辅助谐振换流电路,就可实现三相功率开关器件软开通,辅助谐振电路的控制较为简单。

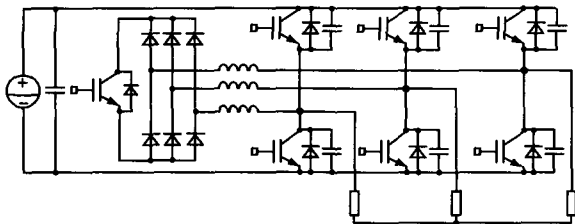


图9 输入载波实现 ZVT 软开关逆变器

近年,Beherd等提出了一种新型的多用准谐振三相逆变器结构,组成准谐振直流环节的组件包括4个开关元件、2个谐振电感和1个谐振电容。其中,2个开关和谐振直流环节串联,另外2个与之并联。这种拓扑结构采用空间矢量调节,工作于软开关状态,无源或有源三相负载低功率因数和高功率因数负载均适用。

Ogiwara等设计出一种新型的单端推挽式软开关高频逆变器,该逆变器应用于高频感应加热装置。该模型是在传统电路的基础上加上谐振电路,可实现软开关并能在对称的PWM辅助电路下大范围内连续调节输出功率,其工作频率固定为20kHz,可实现定频变功率控制,用在家用加热电器中具有很好的安全性和高效性。

近年来,关于控制型软开关理论^[9]的提出,开拓了逆变器软开关技术新的发展空间,控制型软开关主要是在不增加主电路的元器件(有时可以适当的增加电感、电容量来增强软开关的条件,但是坚决不容许增加半导体器件)的前提下,通过合理设计控制电路来实现软开关。一些学者已经归纳出控制型软开关的一些特点^[10]:具有半桥

结构的开关组;半桥结构的开关组的2个开关管的驱动信号互补;半桥结构的开关组的每个开关管上要有并联电容;半桥结构的中点对外要连接一个或一个以上电感;对于顺半桥结构电感上的电流在一个开关管连续导通的时期内要反向;对于逆半桥结构电感上的电流在一个开关管连续导通的时期内不能反向。根据这些理论特点,可以设计出控制型逆变器软开关。

3 结 语

虽然软开关逆变器有许多明显的优势,但还未成熟起来,将来主要从以下几个方面发展:①在不增加开关器件的电压、电流应力的同时,用比较简单的拓扑结构实现逆变器的软开关;②用比较优化的控制方式控制软开关工作;③设计合理的高频谐振电感和电容。减少谐振电路中元件的数量、简化谐振变换器的结构和合理的控制方法是以后软开关逆变器发展的方向。

【参考文献】

- [1] CHUNG H, HUI S Y R, WANG W H. An Isolated ZVS/ZCS Fly Back Converter Using the Leakage Inductance of the Coupled Inductor [J]. *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, 1998, 45 (4): 679-682.
- [2] VENKATARAMANAN G, DIYAN D M. Pulse Width Modulation with Resonant dc Link Converter [J]. *IEEE Trans Ind Appl*, IA-29, 1993(1):113-120.
- [3] KOMIYAMA S, TANIGUCHI K. Quasi-Resonant Zero-Voltage-Switching PWM Inverter [J]. *IEE-IAS Japan, National Convention Record*, 1996 (5): 145-151.
- [4] OHSUGI M, SHIMIZU T, KIMURA G, *et al.* The Analysis of ZVS Turn-off Loss and the New Snubber Circuit for the ARCP Inverter [C]//*Proceedings of IECON' 94, 20th International Conference*, 1994: 316-321.
- [5] LAI J S, YOUNG R W, SR O, *et al.* A Delta-Configured Auxiliary Resonant Snubber Inverter [J]. *IEEE Trans Ind Appl*, IA-32, 1996 (3): 518-525.
- [6] 陈厚岩,王环,许洪华. 具有零电流关断特性的并网光伏逆变器研制[J]. *电力电子技术*, 2005 (3): 38-39.

(下转第40页)

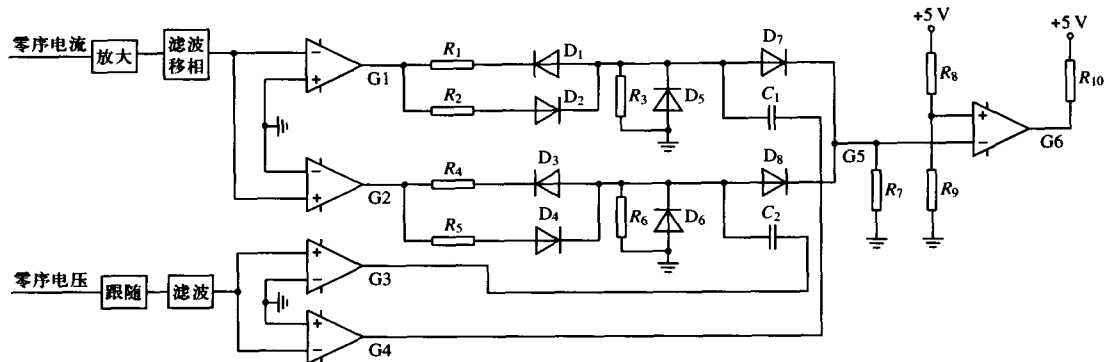


图4 全波化相原理图

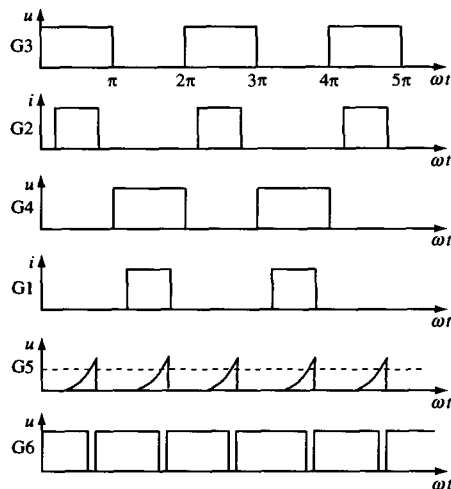


图5 零序电流和零序电压相位比较波形图

由图可见,当本条支路发生漏电时,零序电流和电压经过比相在G5点产生尖脉冲,此脉冲经过电压比较器后在G6点输出周期为10ms的负脉冲,该负脉冲输入单片机的外部中断引脚。若此时从主馈电得到的漏电阻值达到规定要求(1140V:20kΩ,660V:11kΩ),则单片机驱动保护继电器动作,开关跳闸,动作时间<10ms,远小于标准规定30ms。但是在试验过程中发现,只检测1次负脉冲有时会出现误动作,实际使用中

为了兼顾系统的可靠性和快速性,软件修改为只有单片机连续检测到在22ms内出现3次负脉冲时才认为是真正漏电,改进后用1kΩ电阻对地和直接对地分别作20次漏电试验,没有一次误动作。

3 结 语

本文提出了一种新的基于PLC和全波比相的选择性漏电实现方法。试验证明,该方法不仅具有稳定的漏电阻值,而且具有动作速度快和选择性判断准确等优点,具有良好的应用前景。

【参 考 文 献】

- [1] 孟庆海. 基于故障分量有功功率的选择性漏电保护[J]. 中国矿业大学学报,2002(31):380-383.
- [2] 王玉洁,永智群. 单片机在漏电保护装置中的应用[J]. 中国安全科学学报,2000(3):75-78.
- [3] 王安,赵永强. 井下电网选择性漏电保护装置研究与设计[J]. 内蒙古煤炭经济,2002(1):84-85.
- [4] 戴恒阳. 低压电力载波技术在自动化领域中的应用[J]. 电气传动自动化,2003(25):47-50.
- [5] 张博. 基于PL3105的电力载波终端的设计与实现[D]. 南京:南京理工大学,2005.

收稿日期:2006-09-27

(上接第24页)

- [7] CHOI H S, CHO Y J, KIM J D, et al. Grid-Connected Photovoltaic Inverter with Zero-Current-Switching [C]//International Conference on Power Electronics, 2001:251-255.
- [8] 许春雨,陈国呈,孙承波,等. ZVT软开关三相PWM逆变器控制策略研究[J]. 电工技术学报,2004(11):36-41.

- [9] MALESANI L, TOMASIN P, TOIGO V, et al. Space Vector Control and Current Harmonics Quasi-Resonant Soft-Switching PWM Conversion [J]. IEEE Trans Ind Appl, IA-32,1996(2):269-278.
- [10] 顾亦磊,陈世杰,吕征宇,等. 控制型软开关变换器的实现策略[J]. 中国电机工程学报,2005(6):55-59.

收稿日期:2006-09-08