

第 九 届 全国电源技术年会 论 文 集

(上 册)

中国电源学会

一九九一·杭州

《全国电源技术年会论文集》

编辑委员会

顾 问 孟昭英

主任委员 何金茂

副主任委员 倪本来

委 员 (按姓氏笔划为序)

丁道宏 马传添 王忠诚 李允武

李朔生 李厚福 李道恺 陈翔龙

郑秋白 季幼章 胡守约 蔡宣三

《全国电源技术年会论文集》编辑部

总 编 辑 倪本来

副总编辑 王忠诚

编 辑 季振江 于百江 张志国

张祖刚

前 言

中国电源学会第九届年会于一九九一年五月六日至十日在杭州召各省、市、自治区共三百余名代表出席了本届年会，会上共发表140余篇。

理事长何金茂教授主持了年会的开幕式。

杭州三科高技术电子有限公司作为本届年会的东道主，为年会顺利开展给予很大支持，做出了积极的贡献。上海华东电脑总公司电源上海电源学会、浙江电源学会等都做了大量的筹备工作；浙江省、市科委、科协对本届年会给予了支持和指导，在此一并致谢。

《第九届全国电源技术年会论文集》分上、下两册出版，经学术委员会审定，全文刊载的论文77篇，其余57篇论文作摘要刊载。由于我们的水平有限，尽管编辑部和编委会的同志做了很大努力，缺点和错误在所难免，望读者批评指正。国家海洋局海洋技术研究所对年会文集的出版提供了各种方便，在此特致谢意。

《全国电源技术年会论文集》编辑委员会

一九九一年五月

前 言

中国电源学会第九届年会于一九九一年五月六日至十日在杭州召开，各省、市、自治区共三百余名代表出席了本届年会，会上共发表论文140余篇。

理事长何金茂教授主持了年会的开幕式。

杭州三科高技术电子有限公司作为本届年会的东道主，为年会顺利召开给予很大支持，做出了积极的贡献。上海华东电脑总公司电源部、上海电源学会、浙江电源学会等都做了大量的筹备工作；浙江省、杭州市科委、科协对本届年会给予了支持和指导，在此一并致谢。

《第九届全国电源技术年会论文集》分上、下两册出版，经学术委员会审定，全文刊载的论文77篇，其余57篇论文作摘要刊载。由于我们的水平有限，尽管编辑部和编委会的同志做了很大努力，缺点和错误在所难免，望读者批评指正。国家海洋局海洋技术研究所对年会论文集的出版提供了各种方便，在此特致谢意。

《全国电源技术年会论文集》编辑委员会

一九九一年五月

目 录

论文全文部分

1. 准谐振型开关功率变换器综述.....	张兴柱 黄是鹏 (1)
2. 调压调频 (VVVF) 方法交流调速系统的发展动态.....	叶治政 (7) ✓
3. 电力电子器件及应用的现状和发展趋势.....	李中江 (13)
4. 电流控制两态调制技术.....	丁道宏 彭灯明 (20)
5. 正弦能量分配器的网络分析.....	林周布 (28)
6. 电力半导体器件的应用与发展.....	蔡宣三 (36)
7. 推挽变换器的运行环理论.....	孙定浩 (42)
8. 稳压变压器的矢量图分析法.....	黄济青 (52)
9. 净化式电子交流稳压电源研究.....	张兴柱 刘雁飞 黄是鹏 (59)
10. 无环流双向可控硅交流电子稳压器的控制.....	邢 坤 马鹤亭 (66)
11. 新型的可控硅交流稳压电源.....	王计法 (70)
12. 大功率静止型UPS的改频增容改造.....	吴天智 (76)
13. 具有稳频稳压功能的UPS.....	叶治政 朱建设 管旭东 王立琦 史立平 (81) ✓
14. 高稳定度工频三相源及其移相电路的设计.....	王登科 (86)
15. SCTA型的不间断电源.....	骆雅琴 瞿树伟 (93)
16. UPS整流器设计中有关问题的探讨.....	金永生 刘 军 (99)
17. 微机控制的UPS.....	邱伟平 顾亚栋 邓世钧 (104)
18. 直流不间断电源在铁道通信系统的实践.....	沈 彤 (110)
19. CWB—2型家用交流稳压器.....	李妹江 (114)
20. 静止式UPS国际电工标准146—4介绍.....	蔡宣三 (117)
21. UPS实能源设计的探讨.....	王其英 (127)
22. 一种由微机控制的高效UPS.....	孙学新 (135)
23. 新型数字化SPWM控制电路.....	章进法 张曦春 林渭勋 (140)
24. 200kHz并联逆变电路.....	章其民 邓勋华 邵金水 (146)
25. 一种新型的PWM方式及其保护技术.....	赵大华 (150)
26. 全加固100kHz、200W开关电源的设计.....	金光 杨云高 (156)
27. 半桥式并联负载型谐振开关电源.....	罗本权 (162)
28. PWM开关电源电感电流不同工作状态下的调节特性.....	赵修科 (166)
29. PWM型开关稳压电源的分析与设计.....	龚凤林 (174) ✓
30. 高频准谐振功率变换器的研究.....	蔡宣三 刘 理 (181)
31. 开关电源功率因数校正.....	黄汉生 (190)
32. 程控机开关电源.....	金永福 (196)
33. 以功率MOSFET为开关管的150kHz300W推挽调宽式开关电源.....	罗忠省 (203)
34. PWM斩波解调推挽式400kHz正弦波电源的研究.....	

.....	刘希胜 国海峰 问延捷	(206)
35. 开关电源中续流二极管吸收网络的优化设计.....	张 群 魏富真	(210)
36. 小功率多路输出的最佳稳压电路拓扑.....	谭 信	(215)
37. 80年代中磁放大器式开关电源的进展.....	徐泽玮	(219)
38. 直流稳压电源的阻峰式预稳.....	施文冲 李 平	(223)
39. 一种新型复合式直流电源.....	刘振亚	(226)
40. 串联补偿式自动调压稳压电源.....	程柏年	(230)
41. 用麦克墨莱换流电路集中换流的PWM变频调速系统.....	.....	.....
.....	应建平 贾爱民	(237)
42. 晶闸管钳位式中频电源.....	邵金水 章其民	(244)
43. 高开关频率工作条件下的GTR隔离驱动电路.....	翁太丰	(249)
44. 能经受高压冲击和具有高灵敏过流保护的特种直流变换器.....	陈柏宏	(254)
45. 交流变频调速(VVVF)装置的谐波问题.....	尹凤鸣	(263)
46. 自动快速充电装置的研制.....	赵成国	(268)
47. 单片微机控制SPWM交流变频调速电源.....	张 智 叶治政	(276)
48. 简捷可靠的机载两相电源.....	侯振义	(284)
49. 高精度、快响应开关型直——直变换器的研制.....	周洁敏 沈冬珍	(288)
50. RC定时逆变器设计及应用.....	田得露 丁庆仁 黄焕馨	(292)
51. 正弦波输出的变频电源.....	秦伯根 王 激	(298)
52. 采用单片机的三相逆变器控制信号发生器.....	哈瑞云	(302)
53. 一种新型的DC/DC开关式组合变换器.....	沈冬珍 龚春英	(306)
54. 能延长白炽灯寿命的电源.....	蔡长寿 黄亚敏	(312)
55. CPU—SCR—D直流可逆调速系统.....	李瑞年 方学广	(315)
56. V—MOS功率场效应管在三相方波电源中的应用.....	邵中君	(319)
57. 1.5KV输入的1KWDC—DC变换器的研制.....	李春	(324)
58. 一种新型脉冲激光电源.....	刘舒书 熊振宏 解桥 李宝荣	(329)
59. 输出115V、600VA的静态换流器.....	李祥林 秦晓梅	(336)
60. 开关电源的初级控制及专用控制器UC1840.....	陆鸣	(341)
61. ZnO压敏电阻交流V—I特性研究.....	张树高 季幼章 贺旦莉	(348)
62. 厚膜集成小型电源模块.....	童尧萍	(351)
63. 高压电源保护的改善.....	宁敬烈	(?)
64. 变频电源的自检技术.....	杨筱辉	.....
65. R型变压器铁心的特点和设计方法.....	包满桂	.....
66. 非晶中频恒压变压器研制综合报告.....	韩一定	.....
67. 多级达林顿晶体管稳定性讨论.....	万积庆 张碧英	.....
68. UPS的保护系统与电路分析.....	郑福元 杨红平	.....
69. 高精度水冷式分流器的设计与制作.....	李勇 张冰	.....
70. 多波形脉宽调制一次变换型脉冲电源的实验研究.....	韩行高 鲁建萍	.....
71. 一种零电压开关谐振变换器的分析与设计.....	郭胜利	.....
72. 进口彩电开关电源厚膜集成电路IX0689的国产化替代产品.....	.....	.....

.....	董良范	广	(403)
73. 高性能PWM GTO逆变器研究.....	中怀仁	张炳煜	(409)
74. 用多个固定比例脉宽波的方法消除有限次谐波分量.....	徐会明		(417)
75. RF CO ₂ 激光电源的信号发生器.....	滕学顺	刘培荣	(422)
76. 用新型电缆对露天矿移动设备供电.....	吴继勇	杨棣	(425)
77. 三科(SANKE)后备式UPS.....	徐建刚		(427)

论文摘要部分

1. SSR及其应用.....	叶荣华		(435)
2. 高精度交流稳压电源.....	何福友		(435)
3. 负压供电脉宽调制稳压变换器.....	卢盛铭		(436)
4. 高效正弦波不间断电源.....	吉东社		(436)
5. UPS的选型及电池维护.....	郝建华		(437)
6. 如何给50KVA UPS逆变器增加辅助控制电源.....	江崇敏		(437)
7. Apple—II 微机不间断电源.....	孙铁成	王世清	吕瑞 (438)
8. YS74大功率变频三相交流稳定电源.....	林丹柯		(438)
9. 高压Resurf (减小表面电场) 结构二维近似分析.....	郎金荣	徐家权	叶润涛 (439)
10. 一种新的信号流图变换规则.....	张达明		(439)
11. 高效低噪声、多路输出开关电源.....	莫裕春		(441)
12. PWM型开关电源过流保护的新途径.....	刘立新		(441)
13. 一种通信用 π C— π C开关稳压电源.....	尤顺		(442)
14. 微型计算机的电源电路分析及维护.....	黎昭生	傅德臻	(442)
15. 100kHz自激变换磁放大器稳压电源.....	徐毅		(443)
16. 用于 π C— π C变换多路输出的开关电源.....	王广乾		(443)
17. 单端复激变换器稳压电源.....	潘玉升		(444)
18. 高频高效开关稳压电源.....	叶治政	沈卫红	饶炳元 焦强 (445)
19. 开关电源MOSFET的快速驱动.....	毛北钧		(445)
20. 功率晶体管的高速驱动电路.....	汤峻	张平	(446)
21. 零电流谐振变换器的效率和纯直流分析.....	宁合兴		(447)
22. 反激式开关电源变压器设计.....	陈永真	于铁利	梁波 (447)
23. 含杂散电感GTR关断吸收网络的研究.....	魏富真	张群	(449)
24. 保护大功率开关晶体管用的抗冲击网络.....	熊振宏	解桥	刘舒书 李宝荣 孙庆斌 (449)
25. 应用大功率高反压开关三极管的40KV10mA推挽调宽式开关电源.....	罗忠省		(450)
26. 正极性移相电路在通用型直流稳定电源中的变通使用.....	李刚		(450)

27.	GFF—70/23 2KW氙灯稳流电源	唐抗柱	(451)
28.	程控电源在DY—200晶体管自动测试筛选仪中的应用	沈朗然 郑 平 史红兵	(452)
29.	DC/DC变换器的设计与试制	陈景银 叶润涛	(452)
30.	放映电源的选用及发展趋势	李元彪	(449)
31.	单片机控温电源	韩有根	(453)
32.	砷化镓激光器脉冲电源	张逸民 杨关义 张小东	(473)
33.	航天运载火箭电源的设计	金步平 晋 虔	(454)
34.	恒压充电和一组电池供电在我省推广应用概况	钟持波	(454)
35.	硅胶体电解质的机理与应用	丁和主	(455)
36.	300KV三相油浸高压隔离变压器设计与研制	纪庙智	(455)
37.	氩离子激光器F—P标准具恒温电源	赵书印	(456)
38.	一个有效的GTR驱动网络	魏富真 问延林 张 群	(457)
39.	大型表面分析仪器上常用的几种电源	王恕德	(457)
40.	GTO深潜推进逆变器控制电路稳压电源	丛 望	(458)
41.	GTR三相逆变器的驱动技术	陈永真 梁 波 于铁利	(459)
42.	一种新颖的串联式可控硅中频逆变电源触发电路的设计	张 群 张存山	(459)
43.	VMOS管小型直流电压变换器	梁国忠	(460)
44.	10种静止型中频电源线路	张谷勋	(460)
45.	解决开机浪涌问题——提高开关电源可靠性	褚云龙	(461)
46.	飞行试验用“抗强脉冲干扰消除电路的设计与检验方法	牛焕生 刘春亭	(462)
47.	用改进的常规工艺生产高效M1NP结构硅太阳电池	沈相国 吴 越	(463)
48.	高能ZnO非线性电阻微观结构的分析	季幼章 董显林 贺旦莉	(463)
49.	制造高可靠肖特基二极管新工艺的研究	杨碧梧	(464)
50.	过电压检测集成电路MC34061、MC34062和MC35062简介	董浩斌	(464)
51.	热阻测试仪介绍	金文新	(465)
52.	蓄电池计算机巡回检测装置	黄良万	(465)
53.	TMOS—150功率放大器及应用	王楚清	(466)
54.	微机电源中比例驱动和功率保护在同一线路中的实现	徐 平	(466)
55.	铁芯近似计算	贝冠祺	(467)
56.	滤波阻流圈无直流磁化电路设计	陈再清	(468)
57.	抗干扰谐振电源	戴作东	(468)
	杭州三科高技术电子有限公司简介		(248)

准谐振型开关功率变换器综述

张兴柱 黄是鹏

(浙江大学电机系)

摘 要

本文总结了准谐振型开关功率变换器在拓扑、模型和控制三个方面研究的最新进展。通过分析和综合,提出一些尚待研究、探讨的课题内容。

一、引言

准谐振型开关功率变换器的产生和发展标志了电力电子学研究的一个高频化方向正在崛起。推动其迅速发展的原因是对电源日益增加的小型化要求。

开关功率变换器的研究开始于60年代。受器件水平和电路理论的限制,这个时期把频率在数十千赫的功率变换器称为高频功率变换器。与电子学其它领域一样,电力电子学(即处理功率变换的电子学)很快成为一门横跨电力、电子器件和控制的独立边缘学科而异乎迅速地发展起来。空间技术、通讯技术和计算机技术的高精度、高可靠性和小型化要求使其开关电源分支(主要是直流开关电源)的发展不仅在理论上而且在应用上一直起着先驱引导的作用。经过近三十年的努力,已经取得了很大的进展,最显著的是开关电源的小型化和高频化。现在把大于500kHz的频率称为高频,而正在追求的高频目标是10MHz甚至更高。

大规模集成电路技术的迅速进展使制造厂家对整个装置提出更加轻便、紧凑的要求。其中的功率处理器——电源的小型化技术最为关键。其他仪器、设备如大型计算机、飞机、汽车、宇宙飞船、人造卫星、空间站、轮船、潜水艇、机器人和人造器官等均要求微型电源。开关电源小型化的技术要求是高效率和高频化。

在脉冲宽度调制型(PWM)电源中,“频率提高,体积减小”是鼓舞大家去提高电源开关频率的最有影响的因素。这个结论在频率为500kHz左右是正确的。但随着频率的进一步提高,许多因素如:电容器容量的减小,使其处理交流电流的能力下降;磁性材料的功率损耗增加快于其电感值的减小,需要更大铁芯以减小磁密和损耗;由开关器件MOSFET和二极管的寄生电容及隔离变压器的寄生电感引入更大的高频损耗和带来的其他许多问题[1],与严重的EMI干扰,反而使开关电源体积有所增加,性能有所下降。因此用传统的材料、器件和电路技术(PWM)构成的开关电源,其最佳工作频率选择在500kHz最为合适。CUK等完成的500kHz高频高功率密度(50W/inch³)开关电源[2]就是一例。而其极限频率为3MHz[3]。

尽管在高频化的途径中碰到了许多困难,但正是由于这些问题和困难动摇了PWM变换器的主导地位,开辟了谐振类(包括全谐振型和准谐振型)变换器的研究;推动和促进了磁性材料、电容材料和功率开关器件的研究,对电路新拓扑,数学模型和系统控制提出了新挑战。基于直流开关变换器的这些研究再一次起到了电力电子学领域的先驱作用,对整个领域的发展将起极大作用。

谐振类功率变换器的工作原理与PWM变换器不同,它通过嵌入谐振元件 L_r 、 C_r 改变开

关器件的电压或电流波形为正弦半波或准正弦半波。Sum等〔4〕总结了谐振类功率变换器的主要优缺点：

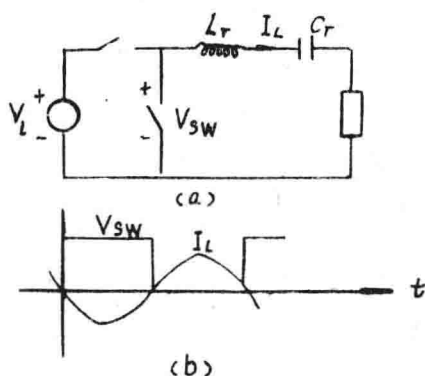
优点：

- (1) 零电流或零电压通断大大降低了开关损耗，提高了开关频率；
- (2) 充分利用开关器件的寄生电容和隔离变压器的寄生电感；
- (3) 近似正弦波开关电流降低了元件的 di/dt 耐量，近似正弦波开关电压降低了元件的 dv/dt 耐量；
- (4) 寄生参数的利用大大降低了噪声和EMI；
- (5) 可以处理，控制大功率。

缺点：

- (1) 实现零电流通断和零电压通断的控制电路比较复杂；
- (2) 功率开关的电压、电流峰值很高；
- (3) 开关器件不能充分利用。

全谐振型开关功率变换器包括串联、并联谐振变换器和E类变换器〔5~51〕。图1是描述串联谐振变换器工作原理的等效电路〔1〕，从图1(b)，当谐振频率等于开关频率时，功率



开关实现零电流通断。实际的输出控制往往是通过改变频率来实现的，当谐振频率和开关频率发生偏移时，图1(b)中的 I_L 与 V_{SW} 不再同相，开关关断时其电流不再为零。克服这一问题的方法之一是准谐振技术，它是本文要详细介绍的内容。

图1 串联谐振变换器和开关波形

二、准谐振型开关变换器电路拓扑

为克服PWM开关变换器在高频化时存在的问题，K·H·Liu和F·C·Lee〔54〕、〔79〕提出准谐振型变换器技术，扩大了谐振类变换器的范畴。它实质上是全谐振型变换器的不连续工作模式或者是嵌入谐振环节的PWM变换器。因此也称为PWM变换器和谐振变换器的混合型〔52〕。

准谐振变换器技术包括两大类：（一）零电流开关技术；（二）零电压开关技术。

零电流开关准谐振变换器中的有源开关（功率MOSFET）因电流过零后自然关断，消除了它的关断损耗，允许开关频率达到2MHz。但由于它的容性开通损耗，非零电压开通经密勒电容（ dg ）所引起的开关噪声和晶体管输出电容引起的振荡，使开关频率难以继续提高。另外它的有源开关具有较高的电流耐量，而无源开关具有较高的电压耐量〔53~59〕。

零电压开关准谐振变换器中的有源开关因电压过零开通消除了它的开通损耗和密勒效应，允许开关频率达到10MHz〔58〕。但它有两个主要缺点：（1）有源开关耐压与负载范围成正

比〔58〕,〔60〕,在要求宽负载范围的场合,有源开关电压耐量非常高,以致于不能实现或者是不现实的。(2)无源开关的寄生结电容在其关断时与谐振电感引起振荡,如进行阻尼,则产生较大的高频损耗,如不阻尼,则影响变换器的电压增益和闭环系统的稳定性〔58〕,〔61,62〕。

K·H·Liu等提出谐振开关概念,奠定了准谐振变换器技术的基础。他将谐振开关分成L型和M型,每一种类型又被分成零电流开关(ZCS)和零电压开关(ZVS)两类,如图2所示。在零电流谐振开关中,电感 L_r 与开关 S_1 串联达到零电流通断;在零电压谐振开关中,电容

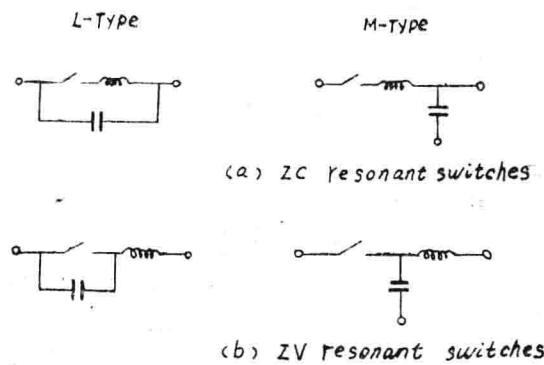


图2 谐振开关

C_r 与开关 S_1 并联达到零电压通断。理想开关 S_1 的实际结构决定了谐振电流或者谐振电压的波形,据此将谐振开关分为半波工作模式型和全波工作模式型。在半波谐振开关中,其谐振电流或谐振电压仅为正半波;而在全波谐振开关中,其谐振电流或谐振电压具有正负半波。由此而构成的准谐振变换器又可冠上“半波”或“全波”两字。近四、五年来,大家都集中研究半波工作模式,故未加特殊说明者,即指半波准谐振变换器。并仍用理想开关表示。

将零电流谐振开关和零电压谐振开关代替PWM变换器中的PWM开关,就得到零电流开关准谐振变换器和零电压开关准谐振变换器。准谐振变换器是由PWM变换器衍生而来,它的拓扑很多。F·C·Lee等〔54〕〔57〕〔62~67〕在这些方面已经做了不少工作。并已做成电源产品,于1988年申请了两个美国专利〔68,69〕。

K·D·T·Ngo〔70〕首先引入准谐振开关概念,尽管这实际上与Liu和Lee的谐振开关概念是一回事,但这一名字更加确切,具有特征。他从已有准谐振变换器拓扑归纳出四个谐振开关拓扑,如图3所示。总结了一套由谐振开关拓扑产生准谐振开关变换器的程序。用图3(a)、(b)的2个谐振开关拓扑,能产生Liu和Lee等提出和发现的全部ZCS和ZVS准谐振变换器电路;用图3(c)、(d)得到二类新的ZCS和ZVS准谐振变换器。这两类准谐振变换器被V·Vorperian〔71〕命名为准方波变换器,原因是其有源开关的电流或电压呈准方波形状。准方波零电压开关变换器比准谐振零电压开关变换器具有更低的电压耐量和更高的电流耐量;准方波零电流开关变换器比准谐振零电流开关变换器具有更小的电流耐量和更大的电压耐量。在ZVS准方波变换器中,开关器件电压呈准方波形状;在ZCS准方波变换器中,开关器件电流呈准方波形状。

零电流开关和零电压开关准方波变换器确实大大降低了有源开关的电流耐量和电压耐量。但它缩小了工作增益范围,增加了开关频率带宽〔71,72〕。

W·A·Tabisz等〔59〕〔63〕提出多谐振变换器技术。在ZVS准谐振变换器的无源开关两端并一谐振电容构成ZVS多谐振变换器。在ZCS准谐振变换器的无源开关支路串一谐振电感构成ZCS多谐振变换器。W·A·Tabisz研究了ZVS多谐振变换器的特性,归纳了它的优点即:两个开关器件均为零电压通断;降低了MOSFET的电压耐量;增加了负载工作范围;减少了开关频率带宽。

开关器件的寄生电容和电路的寄生电感在准谐振变换器中被吸收利用是这类电路的优点之一。但从相反的角度看问题,即如果我们直接由一个PWM变换器(以Buck变换器为例)

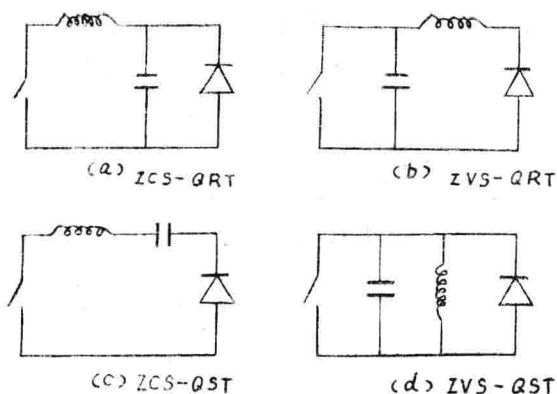
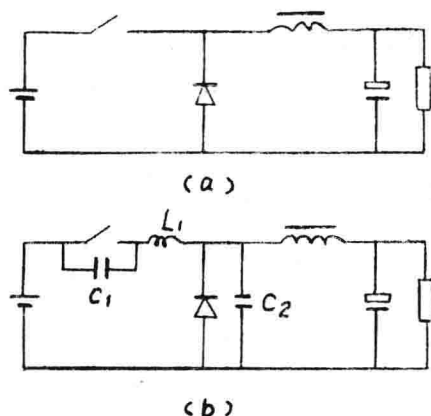


图3 准谐振开关拓扑

出发,如图4(a),发现它的包含寄生参数的电路如图4(b)与Buck型ZVS多谐振变换器电路一样,这不是巧合,而可以作为提出、发现准谐振变换器拓扑的途径之一,当然F·C·Lee等



(a) BUCK型PWM变换器

(b) 包含寄生参数的BUCK变换器

图4 BUCK变换器

则从另一途径发现了这些准谐振变换器拓扑。如上所述。在包含寄生参数的PWM变换器中(图4(b)),如果忽略其中一个寄生电容的作用,则就构成ZCS或ZVS准谐振变换器。由此可见,准谐振变换器和多谐振变换器实质上是PWM变换器的高频派生拓扑或高频变型,两者的关系有点象同一个电子电路的不同的高低频等效电路之间的关系。从这里,还可以看出,当开关频率非常高时,多谐振开关变换器更加合适,因它更接近实际情况。

本文作者在已有拓扑结构的基础上,发展了准谐振开关变换器技术,提出了N阶准谐振变换器概念,用开关单元合成技术综合

了许多新型拓扑结构。下面简单介绍这些内容。

N阶准谐振开关变换器是在PWM开关变换器中用适当的连接方法嵌入 N ($N \geq 2$)个谐振元件的准谐振变换器。这个思想超越了准谐振变换($N=2$)和多谐振变换器($N=3$)的框框,扩大了准谐振型拓扑的研究内容,并且从一般的观点来研究准谐振变换器[73~75]。下文中将准谐振变换器和多谐振变换器一律改称为2阶和3阶准谐振变换器。

与F·C·Lee等[57]和K·T·Ngo[70]不同,作者引用Tymerski[76] PWM变换器拓扑合成思想,发展了N阶准谐振变换器的开关单元合成法。基本要点是:把一个N阶准谐振变换器用一个一般的结构形式表示。如图5所示,其中谐振元件,开关器件和低频电感被归纳为一个方框,称N阶准谐振开关单元。同此N阶准谐振变换器可概打成输入,N阶准谐振开关单元和输出RC并联负载三部分组成。综合拓扑的关键是如何获得N阶准谐振开关单元。根据拓扑限制条件,[74]总结了一套拓扑合成程序,发现对于每个基本PWM变换器电路共有132个2阶至4阶的准谐振变换器电路拓扑相对应,其分布情况如表1。当阶数相加时,则拓扑数量更多。

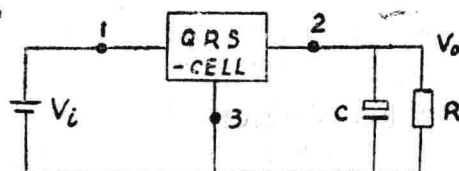


图5 N阶准谐振变换器一般结构框图

表1 2阶—4阶准谐振变换器分布表

N \ 类型	ZCS	ZVS	总和
2	9	6	15
3	9	27	36
4	45	36	81
总和	63	69	132

用同样的思想，〔80〕合成了N阶准方波变换器电路拓扑。发现对于每个基本PWM变换器电路共有84个2阶至4阶的准方波变换器电路拓扑相对应，其分布情况如表2。同时发现，不存在奇数阶准方波变换器。

表2 2阶—4阶准方波变换器分布表

N \ 类型	ZCS	ZVS	总和
2	9	3	12
3	0	0	0
4	63	9	72
总和	72	12	84

〔73〕〔75〕用计算机仿真获得 $N=4, 5$ 阶零电压开关准谐振变换器的稳态结果，已被实验证实，发现高阶零电压开关准谐振变换器比3阶零电压开关准谐振变换器〔59〕〔77〕优越：（1）增加了最低开关频率，缩小了开关频率带宽，以利于提高开关频率，方便控制；（2）实现了全部增益和负载范围内的零电压开关，以利于减小功率损耗。

高阶准谐振变换器不能归结为PWM变换器的高频变型，这一点是与2阶、3阶准谐振变换器的最大区别。

三、准谐振变换器的数学模型

建立准谐振变换器的数学模型是分析和设计准谐振变换器的关键。K·H·Liu和F·C·Lee在提出2阶准谐振变换器技术后，用一般的开关网络分段线性分析方法，把2阶零电流开关和2阶零电压开关准谐振变换器用四段模式法进行分析，得到了电压增益的稳态关系式。这种瞬时分析法物理概念清楚，但过程繁复。

S·Freeland等〔66〕仿建立PWM变换器的等效受控源平均电路法发展了准谐振变换器的等效平均电路模型。他将准谐振开关单元中的有源开关和无源开关用两个平均受控电源

等效代替。在零电流开关2阶准谐振变换器中,有源开关用平均受控电流源等效代替,无源开关用平均受控电压源等效代替。在零电压开关准谐振变换器中,有源开关用平均受控电压源等效代替,无源开关用平均受控电流源等效代替。根据准谐振开关满足的电路拓扑条件,建立准谐振开关的平均受控源模型。用这个模型代替实际的准谐振开关,获得准谐振变换器的等效受控源平均电路模型,再求取稳态关系和动态小信号传递函数。这种方法物理概念明确,形式简单、统一。V·Vorperian [78] 发展了谐振开关和PWM开关的等效电路模型,原理与 [66] 基本一致,他将这一方法推广到建立2阶准方波变换器的数学模型 [71]。

上面两种常见的建模方法只适用于2阶准谐振变换器的分析。对于3阶以上准谐振变换器的分析,尽管可用分段线性分析法来加深对电路原理的理解,但不能得出显示解析结果;目前还不能建立它的等效受控源平均电路模型。较为切实可行的是计算机辅助分析以获得高阶准谐振变换器的数值稳态结果。

高阶准谐振变换器的统一建模问题是非常困难的课题,攻克这一理论问题必将推动电力电子学领域的极大发展。目前有许多研究人员在从事这一课题。

四、准谐振变换器的闭环控制

准谐振变换器闭环控制的研究相对较少。有文献报导是用在2阶准谐振变换器中的2种传统闭环控制方法:即准谐振变换器的单环控制技术和多环控制技术。

单环控制准谐振变换器的控制原理与PWM变换器基本一致。只是控制量不同。在PWM变换器中,经输出取样,反馈和误差放大等电路后控制脉冲宽度,固定脉冲频率,控制电路实现比较容易;而在准谐振变换器中,经输出取样,反馈和误差放大等电路后控制脉冲频率,固定脉冲宽度(ZCS开关为ON Time而ZVS开关为OFF Time),需要一个压控振荡器(VCO)。控制电路比较复杂。由于准谐振变换器功率级的小信号特性类似于其对应的PWM变换器,因此可与PWM变换器类似地设计补偿网络来满足闭环系统的稳定性。单环控制技术有下面缺点 [81]。

(1) 压控振荡器需要许多元件,增加了控制电路的复杂性;

(2) 控制的有效带宽受噪声限制:一是VCO电路高频比较灵敏,另一是高增益放大器传输大量纹波;

(3) 不嵌位Buck准谐振变换器,Boost准谐振变换器和Buck—Boost准谐振变换器补偿困难。在带宽、好的闭环特性和系统稳定性之间必须折衷。

采用多环控制技术 [81] 的准谐振变换器系统。除检测电压信号外,同时反馈电流信号,这种控制技术也称电流检测控制技术(CSFC)。它具有与PWM变换器中电流控制技术的相同优点。同时不需要压控振荡器电路,提高了噪声抑制能力,具有好的暂态特性。

准谐振变换器控制方法的研究很少,特别是高阶准谐振变换器的控制。研究这些变换器电路的新的控制策略以改善系统的性能是非常重要的课题内容。

五、结论

本文综述了准谐振型功率变换器在拓扑、模型和控制三个方面研究的最新进展。简单地概括了作者近一年来在准谐振变换器拓扑上的研究,提出了一些尚待研究、探索的课题内容。

参考文献(略)

调压调频(VVVF)方法交流

调速系统的发展动态

叶治政

(西安交通大学)

摘 要

本文首先论述了过去在调速领域中占统治地位的直流调速拖动系统所存在的问题,接着就介绍,为了解决这些问题所出现的各种各样的交流调速系统,随着功率电子技术及微电子学的发展,交流调速中最有发展前途的采用VVVF方法的交流调速系统也就随之迅速发展,由于其所具有的优异性能(功率因数高 $\cos\phi\approx 1$,节电节能效果显著,维修费用低,调速时能实现理想的拖动特性曲线和理想的力矩特性,电压调节速度快,系统动态响应好等),所以使得交流调速拖动可以与直流调速拖动相媲美,并有取代的趋势,最后,文章在综述国内外交流调速发展动态的基础上,指出了交流调速拖动系统的发展方向和今后要做的四项工作。

一、直流调速拖动系统存在的问题

工业上应用的电力拖动系统,主要有直流调速系统和交流调速系统两类,由于直流电机比较容易启动,正、反转,制动,同时其调速精度高,调速范围宽、调速时静态特性和动态响应性能好,所以在二十世纪以前相当长的时期内,工业上采用的几乎都是直流调速系统。然而,由于直流电机有整流子和电刷,因而电机不能应用在尘埃多及易爆气体的场合,对它还必须经常进行检查和维修,同时直流电机向大容量、高转速方向发展时受到限制。这主要表现在:

1、直流电机由于受换向限制,其电枢电压最高只能做到1千多伏,而交流电机可做到6~10千伏;

2、直流电机单机最大容量一般为12~14兆瓦,还常做成双电枢形式,而交流电机单机容量可以是直流电机的几倍;

3、直流电机换向器部分受机械强度的限制,其额定转速随额定功率增加而减少,一般每分钟几百转到1千多转,而交流电机转速每分钟可高达几千转;

4、直流电机的体积、重量与价格比同等容量的交流电机大。

鉴于交流电机和直流电机相比,交流电机具有结构简单,易加工,价格低廉,体积小,重量轻,容量大,转速高,惯量小,省铜,坚固耐用,无换向器等磨损部件,运行时无火花,维修简单等优点,所以二十世纪三十年代以来,许多国家就开始进行交流调速系统的研究,但进展缓慢,直到六十年代以后,随着功率电子技术的发展,使得采用晶闸管的交流调速系统得以实现,特别是七十年代以来,微电子技术和计算机控制技术的发展以及现代控制理论的应用,使得交流调速逐步具备了宽的调速范围,快的动态响应,高的稳速精度以及在四象限

作可逆运行等良好性能。在调速性能方面已可与直流调速系统相媲美。目前许多国家已实现了交流调速装置产品的系列化。它们的调速性能和可靠性都在不断地提高,价格也在不断下降。

交流电机有同步电机和异步电机两大类。同步电机的调速靠改变供电电压的频率而改变其同步转速。异步电机的调速方法虽然很多,但从功率电子器件控制技术来看,用得较多的方法为:

- 1、调压调速 —— 控制加于电机定子绕组上电压进行调速。
- 2、串级调速 —— 控制附加在电机转子回路中的电势进行调速。
- 3、调压调频调速 —— 控制电机供电电压与频率进行调速。

上述三种调速方法中,调压调速:电机的转差功率全部消耗在电机转子中,且转差损耗随电机的调速范围成比例地增大。串级调速:电机的转差功率虽和调压调速时一样,但它仅在转子回路中损耗掉一部分,大部分都能通过由功率电子器件构成的逆变装置反馈回交流电网。而调压调频调速:由于异步电机的同步转速随频率而变。所以调速时相应转差率变化不大,这样转差损耗就很小。因而调压调频调速是最有发展前途的一种交流调速方式。采用正弦脉宽调制 (SPWM) 调压调频 (VVVF) 方法的变频交流调速技术是由近代功率电子技术和微电子技术相结合而实现的。今天它又在新型功率电子器件GTR, 功率MOSFET, GTO和微电子技术的高档单片机8096系列, 大规模集成电路HEF 4752的结合下,使这门高技术日臻完善,其经济技术价值更加突出。

二、采用PWM调压调频方法的变频调速的主要优点

1、功率因数高, $\cos \phi \approx 1$ 。

交——直——交的SPWM电压型逆变器,其中间直流环节采用电容器滤波,电容器的容性电流补偿了电机和变压器的感性电流造成的无功损耗。尤其是脉宽调制的四象限控制,使SPWM的正弦电流和电网电压同步,同时其调压和调频在逆变器中同时进行,因此其 $\cos \phi \approx 1$ 。这对提高发电厂和变电所的出力具有十分重大的技术经济价值,以我国的电气化铁道为例,我国的电气化铁道由于变电所容量小及应用相控机车等原因,造成电网电流滞后电压 $40 \sim 50$ 度。有的区段功率因数 $\cos \phi \approx 0.4 \sim 0.6$, 这个沉重的无功负担,即使国家投很大资金,在变电所进行无功补偿,功率因数也只能提高到 $\cos \phi \approx 0.8$ 左右。如果采用PWM的四象限控制的交流变频调速电力机车,其 $\cos \phi \approx 1$,在我国现在电气化铁道电网的情况下,变电所不需要补偿设备,也可将 $20 \sim 40\%$ 的无功功率转化成有功功率,相当于变电所提高了效率,可节电 $20 \sim 40\%$ 。

2、节电、节能效果显著

在世界能源紧张,能源费用高涨的今天,节能引起人们高度的重视。现今,交流拖动负荷在各国的总用电量中都占有很大的比重(在工业发达的国家,大都占一半以上),对这类负荷实现节能,可以获得十分可观的节电效益。以工业上大量使用的风机,水泵、压缩机为例,这类机械用电量约占工业用电的 50% ,过去大都靠调节风门,闸阀来改变流量,使得大量电能白白浪费掉。这是由于风机的功率与转速的三次方成正比,当风量由 100% 减小到 50% 时,如果采用挡板控制,其输入功率减少不多,如采用变频调速控制,转速下降一半可以同样满足 50% 的风量输出,其所需功率将下降到额定功率的 13% ,即使考虑附加控制装置的

损耗等,一般还可节电20~30%以上,这对我国来讲,就意味着每年可以节约几百亿度电。

异步机交流变频调速,除了逆变器外,不需外加启动设备,不需要直流电机的正反向转换开关,电制动时转换开关、励磁设备等,因此将它用在机车上,节能效果也很显著。据西德BBC公司大量试验资料介绍,机车三种传动系统在相同条件下,其总效率分别为:

①PWM电压型交流变频调速系统效率为:91.3%

②“交—直”直流电机调速系统效率为:85.7%

③“液压”机械传动系统效率为:78%

即交流传动系统比直流传动系统,总效率提高了5~6%;而对液压传动系统则提高了13.3%。在交流调速系统中,若采用自关断功率器件GTR、GTO,则其效率还可提高5~8%左右。

3、维修费用低

由于异步电机无整流子,无炭刷和滑环等带接触点的磨损部件,逆变器是静止型无触点电器设备,控制电路也都是无触点的中大规模集成电路,故障率低,坚固耐用,设备维修费用低,加上微机自动诊断装置使系统定修改成状态修,这样使部件能充分利用,又节约人工,物力和时间。据联邦德国铁路十几年营运经济统计,其维修费用减少50%。

4、VVVF的变频调速能得到理想的力矩特性

微机控制VVVF的变频调速系统,可以根据异步电机不同工作情况对力矩特性的要求,使逆变器输出的 U/f 函数曲线关系与其相适应及匹配。如 $U/f = \text{常数}$,就是恒力矩特性; U/f 低频段有负斜率,则能改善电机低频段软起动的力矩特性; U/f 为指数关系,则电机能输出适用于风机水泵工作时的力矩特性。

由于微机软件的柔软性,使VVVF逆变器输出的 U/f 函数关系能与电机的力矩特性相匹配,因而就能使电机设计更具有合理性,使电机能始终工作在最佳状态。

5、能实现理想的拖动特性曲线

在SPWM的VVVF交流调速中,采用微机自动化系统(MicAS)控制转差频率闭环和电机电流闭环,能获得非常好的恒力矩及恒功率特性曲线,从而实现相当理想的拖动特性。

VVVF交流调速中,异步电机的起动电流仅比其额定电流略大一些,由于没有大的起动电流限制,因此异步拖动电机从低速到高速,任何一点速度都是持续速度。

拖动异步电机转成发电机的制动特性也十分理想,其制动恒力矩能达到零速。这用于电力机车上,不仅可以使机车达到完全停车的目的,而且由拖动状态转向制动状态,也非常迅速。只要转子频率小于定子频率,即 $\Delta f > 0$,则为电动机的拖动状态;反之, $\Delta f < 0$,则为发电机的制动状态。在这个转换的过程中,不象直流电机那样需要一批强电转换开关设备。同时其正反转,可通过改变控制电路中弱电三相相序来实现,不需要直流电机的那种强电开关转换设备。

此外,由于异步电机机械力矩是“硬特性”,速度随频率响应非常快,因此,在任何一点实现恒速控制非常容易。

6、电压调节速度快,系统动态响应好

7、SPWM变频调速,采用高频调制时,其输出电流接近正弦波,高次谐波分量小,谐波损耗小,输出转矩平稳。

总之,由于变频调速具有优良的调速性能,并能带来能源的节省,维修费用减少等优点,尤其在大容量或工作于恶劣环境时更为直流调速所不及。因此在西欧、日本、美国等国都在合理地使用变频调速技术,并且都几乎停止了直流调速系统的生产。