

直流电压自平衡新型三电平准谐振逆变器

陆耀强, 戴宁怡, 黄民聪

(澳门大学科技学院, 中国 澳门)

摘要: 传统二极管钳位的三电平逆变器运行时, 中线电流会造成逆变器直流电压不平衡并影响输出效果。同时逆变器中的开关损耗也是在高电压、大容量应用中必须考虑的问题。为了减少逆变器的损耗及改善直流电压不平衡, 本文提出一种直流电压自平衡新型三电平准谐振逆变器及其控制算法。给予直流侧电压自平衡能力, 并利用软开关去降低逆变器的开关损耗。通过仿真模型, 证明了其结构及控制方案的可行性, 并与传统三电平逆变器进行了比较。

关键词: 准谐振直流环节; 软开关; 多电平逆变器

中图分类号: TM761

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2010)04-0031-04

引言

三电平逆变器已经在中电压、大功率的应用中得到广泛使用。它与二电平逆变器相比, 每个三电平桥臂上的开关器件只是承担直流母线的一半电压, 使得开关器件对耐压值的要求大大降低。同时, 三电平逆变器能够提供的电压矢量较多, 通过选择合适的电压矢量, 可以减少电平转换的次数, 从而减少输出电压的谐波含量^[1]。

由于三电平逆变器的直流侧需要串联多个直流电容, 使得直流电压平衡控制成为三电平逆变器运行时必须要解决的一个重要问题。以三相四线, 三桥臂中分的三电平逆变器为例, 直流电压不平衡会导致逆变器的中点电压漂移。很多专家提出了用不同的控制策略和电路结构来解决这个问题^[2,3]。其中以通用多电平逆变器拓扑具有较大的吸引力。通用多电平逆变器带有电压自平衡的能力, 这种逆变器由两个或多个基本模块组成, 可以任意组成所需要的多电平逆变器^[4]。

三电平逆变器比二电平逆变器使用更多的开关器件, 开关损耗也会相应增加并减低系统运行效率。引入软开关技术可以改善以上问题, 减轻开关器件上的电压和电流的压力, 并提高逆变器的效率和性能。目前常用的软开关技术包括谐振直流环节, 准

谐振直流环节, 谐振转换极, 零开关转换^[5-7]等, 这些软开关技术采用不同的辅助电路、控制策略, 因而在软开关特性上也有所不同。当中准谐振直流环节技术具有控制简单、辅助组件少的优点, 它能够使直流母线电压瞬间下降到零, 为开关的动作提供零电压的条件, 从而减轻开关动作时高 dv/dt 的问题, 同时开关在零电压下动作将大大降低整个系统的开关损耗。

在本文中, 为了解决直流电压不平衡问题, 并同时降低整个系统的损耗, 提出把准谐振直流环节技术和通用三电平逆变器结合的解决方案。在下文中, 首先分析了准谐振直流环节软开关技术和通用三电平逆变器的运行原理, 接着提出了一种直流电压自平衡新型三电平准谐振逆变器及其控制策略, 并利用仿真结果证明了所提出新型逆变器及其控制方法的有效性, 同时和传统三电平逆变器进行了比较。

1 电压自平衡和软开关

1.1 通用多电平逆变器

直流侧电压不平衡是多电平逆变器应用中的一个重要问题, 由零序电流引起的直流电压不平衡问题更为严重。在很多应用如有源电力滤波器中^[9], 都需要考虑直流电压的控制问题。图1所示为由三

收稿日期: 2009-12-18

作者简介: 陆耀强 (1984-), 男, 澳门籍, 硕士研究生, 研究方向为软开关技术、多电平逆变器、电能质量补偿器;
戴宁怡 (1979-), 女, 江苏籍, 助理教授, 博士, 主要从事电力电子、电能质量补偿的研究工作;
黄民聪 (1969-), 男, 香港籍, 副教授, 博士, 主攻电力电子、电能质量补偿及 FACTS 与 DFACTS。

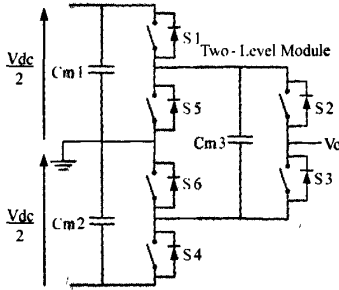


图 1 通用三电平逆变器

Fig. 1 Generalized three-level inverter

个基本模块组成的通用三电平逆变器。其中每个基本模块是一个二电平桥臂。通过将上一级模块的输出端连接到下一级模块的直流母线,就可以组成任意电平的逆变器。这种通用多电平逆变器具有电压自平衡能力,不需要额外的直流电压控制^[4]。表 1 给出了通用三电平逆变器的四种可能转换组合和其相应的电容连接。当开关 S1, S2 和 S6 导通时,逆变器输出 $V_{dc}/2$,同时电容 C_{m1} 和 C_{m3} 并联连接,两个电容上的电压将相等。当开关 S3, S4 和 S5 被触发时,逆变器输出为 $-V_{dc}/2$,此时电容 C_{m2} 和 C_{m3} 并联且电压相等。透过选择不同的电压输出形式,电容 C_{m3} 可以与电容 C_{m1} 和 C_{m2} 交替并联,将使得三个直流电容上的电压相等,实现直流电压的自平衡。

表 1 通用逆变器的开关转换表

Tab. 1 Switching table of a generalized inverter

输出电压	S1	S2	S3	S4	S5	S6	并联电容
$V_{dc}/2$	1	1	0	0	0	1	$C_{m1} \& C_{m3}$
0	1	0	1	0	0	1	$C_{m1} \& C_{m3}$
0	0	1	0	1	1	0	$C_{m2} \& C_{m3}$
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1	1	0	$C_{m2} \& C_{m3}$

1.2 准谐振直流环节软开关电路

图 2(a)所示为用于三电平逆变器的准谐振直流环节软开关电路,该电路由两个对称且独立运行的模块组成。电感 L_r 和电容 C_r 是小容量的能量存储器件。当电容 C_r 中的能量转换到电感时,电容 C_r 的电压将减小到零,逆变器的主开关将触发从而实现零电压开启和关断。图 2(b)所示为一个准谐振直流环节模块的谐振电压和电流以及相应辅助开关 S_a 和 S_c 的触发信号。准谐振直流环节电路的谐振频率由 C_r 的电容量和 L_r 的电感值通过以下公式得到

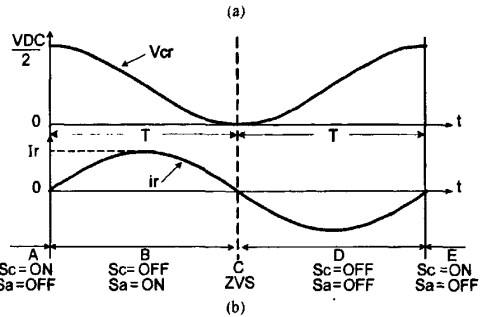
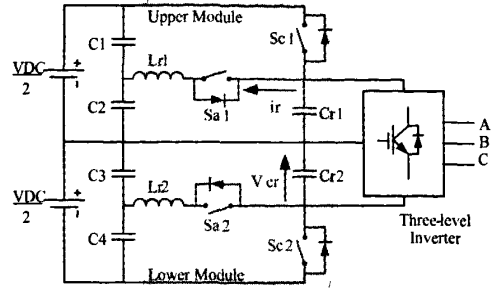


图 2 (a) 准谐振直流环节模块; (b) 相应的谐振波形

Fig. 2 (a) quasi-resonant DC-link modules;

(b) corresponding resonant waveforms

$$T = \pi \sqrt{L_r C_r} \quad (1)$$

准谐振直流环节电路的详细分析和工作原理文献 [7]中有详细论述,准谐振直流环节软开关技术具有如下的特性:

- 逆变器的主开关和辅助开关都实现了软开关;
- 准谐振直流环节与桥臂数无关,只对逆变器的直流母线动作,因此在单相或三相逆变器中应用时辅助开关的数目是相同的。

2 含准谐振直流环节的新型三电平逆变器

将图 1 中由直流电容 C_{m1} 和 C_{m2} 组成的直流母线由图 2(a)中谐振电容 C_{r1} 和 C_{r2} 替代,将通用多电平逆变器的直流母线转换成谐振母线,便得出如图 3 所示,本文提出三相四线系统的直流电压自平衡新型三电平准谐振逆变器。因为一个通用型桥臂就能为直流电压带来自平衡的效果,若三个桥臂也设定为通用型桥臂只会增加系统的复杂性和组件数目。所以逆变器只有一相桥臂由通用多电平拓扑构成,另外两相桥臂采用了传统的二极管箝位结构。

为保持上级和下级准谐振直流环节模块的谐振电压平衡,开关 S5 和 S6 在谐振期间不能触发,否则等效的谐振电容被改变从而导致实现零电压的异步。另外因图 3 中的电容 C_m 通过开关 S1 和 S4 的

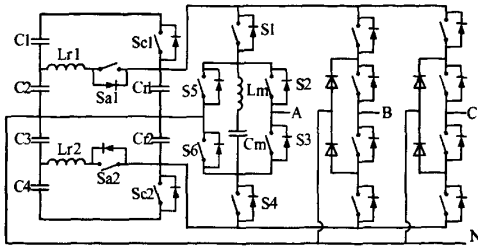


图 3 通用三电平准谐振直流环节逆变器
Fig. 3 Generalized three-level quasi-resonant DC-link inverter

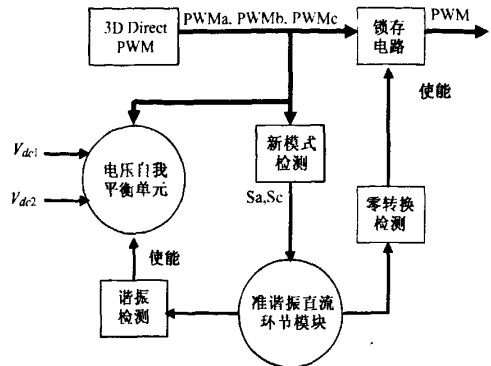


图 4 直流电压自平衡新型三电平准谐振逆变器的控制图
Fig. 4 Control diagram of proposed generalized three-level quasi-resonant DC-link inverter

两个续流二极管并联到直流母线,当直流侧出现谐振时,电容 C_m 会影响谐振电压不能下降到零点。谐振电压的最低值,同时受到电感 L_m 的电感值影响。但电感 L_m 亦可减低直流电压平衡时的冲击电流。因此,本文提出的新型逆变器中,准谐振直流环节并不能实现完全的零电压软开关技术;同时,开关 S_2 和 S_3 因为被电容 C_m 箝位,没有产生软开关的效果。但其它开关的损耗都被大大降低。根据以上分析,本文提出的新型三电平准谐振逆变器有如下特点:

- 只需要改变一相的设计,能为三相的逆变器带来直流电压自平衡的效果;
- 新型逆变器同时具有软开关和电压自平衡能力;
- 除了开关 S_2 和 S_3 ,其余开关器件都可以实现软开关,能减低整个系统的开关损耗。

3 直流电压自平衡新型三电平准谐振逆变器的控制系统

本文运用了近年提出的三维通用型直接脉宽调制技术^[8],它减轻了运算电压空间矢量的压力,在多电平转换器上应用有较大的优势。图 4 所示为通用三电平准谐振直流环节逆变器的控制图表。通用型直接脉宽调制的信号会发送到锁存电路中暂存,同时脉宽信号亦会被检测。当脉宽信号改变时,会触发软开关的谐振模块,产生直流电压谐振。整个谐振过程会被监控。当检测到谐振电压达到最小值时,锁存电路会发送最新的脉宽信号给逆变器的主要开关组件,使得逆变器的电力组件能实现类似零电压的开关。谐振模块与电压自平衡单元之间透过不同的检测电路以确保两者功能相互配合而不会相互影响。

4 仿真结果

针对本文提出的直流电压自平衡新型三电平准谐振逆变器,在 PSCAD/EMTDC 中进行了仿真。逆变器被设定成一个三相四线交流电压源去带动一个含零序电流的非线性负载,用以演示直流侧电压的不平衡问题。表 2 列出了仿真系统的参数。

表 2 仿真系统的参数
Tab. 2 System parameters of simulation

参数	符号	数值
直流母线电压	Vdc	200V
谐振电感	Lr	3H
谐振电容	Cr	0.3F
平衡电感	Lm	10H
平衡电容	Cm	200F
开关频率	fs	5000Hz

图 5 所示为系统的非线性负载电流与中线电流。当中的零序电流为逆变器带来了直流侧电压偏移。如果采用没有加入直流电压控制的传统的三电平逆变器,直流侧电压差如图 6(a) 所示会不断增加。而图 6(b) 所示为新型三电平准谐振逆变器的直流电压自平衡效果,直流侧电压明显地受到了控制。直流电压的平衡效果并没有受到软开关电路工作的影响,显示了本文所提出的控制方法能有效地同时运作两个功能又不互相冲突。图 7 所示为准谐振电路的谐振过程,可见直流侧上下电压在软开关瞬间的变化情况。虽然如前文所叙,新型三电平逆变器中谐振电压不能下降到零,但是直流电压可以

瞬间降到接近零,仍然能实现软开关的效果。加入准谐振直流环节前后的平均开关损耗分别为 4.7W 及 3.6W。可见,在不影响逆变器输出性能和电压自平衡的运作下整个系统的开关损耗减小了 23.4%。

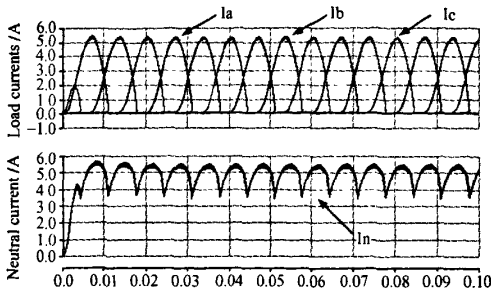


图 5 非线性负载电流
Fig. 5 Nonlinear load currents

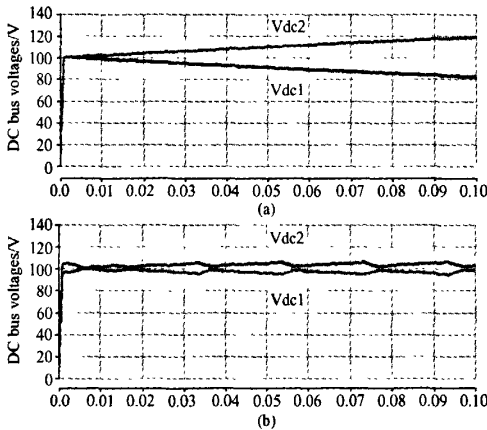


图 6 (a)不平衡直流母线电压;(b)新型三电平逆变器的平衡直流电压

Fig. 6 (a) Unbalanced DC bus voltage; (b) balanced DC bus voltage of proposed novel inverter

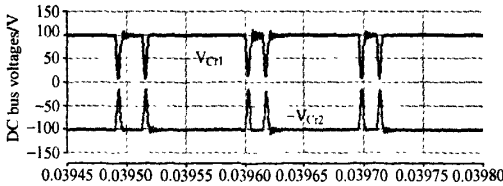


图 7 上下侧直流电压的谐振过程
Fig. 7 Resonant DC bus voltage

5 结论

直流母线电压不平衡的问题常常受零序电流的

影响,而通用多电平逆变器不需要额外的辅助电路,就可以使逆变器直流电压平衡。准谐振直流电路控制简单,需要的器件数目少。本文通过将准谐振直流技术和通用逆变器相结合,再经过简化,提出了一种同时具有电压自平衡和软开关能力的新型三电平准谐振逆变器及其控制方法。仿真结果显示所提出的新型三电平逆变器可以控制直流电压,并使整体开关损耗减少 23.4%,通过使用本文提出的控制方法,能够协调实现电压自平衡和软开关功能而不影响逆变器输出效果。

参考文献 (References):

- [1] José Rodríguez, JihSheng Lai, Fang Zheng Peng. Multi-level inverters: a survey of topologies, controls, and applications [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002, 49(4): 724-738.
- [2] Dongsheng Zhou, Didier G Rouaud. Experimental comparisons of space vector neutral point balancing strategies for three-level topology [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2001, 16(6): 872 - 879.
- [3] N Y Dai, M C Wong, Y D Han. Three-dimensional space vector modulation with DC voltage variation control in a three-leg centre-split power quality compensator [J]. IEE Proc. -Electr. Power Appl., 2004, 151(2): 198-204.
- [4] Fang Zheng Peng. A generalized multilevel inverter topology with self voltage balancing [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, 37(2): 611-618.
- [5] Deepakraj M Divan. The resonant DC link converter - a new concept in static power conversion [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1989, 25: 317-325.
- [6] Jie Chan, Jun Hu. Modular design of soft-switching circuits for two-level and three-level inverters [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, 21(1): 131-139.
- [7] Guichao Hua, ChingShan Leu, Yimin Jiang, et al. Novel zero-voltage-transition PWM converters [J]. IEEE Trans. on Power Electroncis, 1994, 9(2). 213-219.
- [8] Ningyi Dai, Manchung Wong, Yuanhua Chen, et al. A 3-D generalized direct PWM algorithm for multilevel converters [J]. IEEE Power Electronics Letters, 2005, 3(3): 85-88.
- [9] 戴宁怡,黄民聪,韩英铎 (Dai Ningyi, Huang Mincong, Han Yingduo). 三相四线系统并联电能质量补偿器的新型控制方法 (Control of shunt power quality compensators in 3-phase 4wire system) [J]. 电力自动化设备 (Elec. Power Automation Equipment), 2003, 23(6): 16-20.

(下转第 61 页, cont. on p.61)

- wave tracking bypass diode assisted-boost soft switching chopper and PWM inverter [A]. IEEE Power Electronics, Machines and Drives [C]. 2006. 616-621.
- [7] Jun-Yup Lee, Nabil A. Ahmed, Ki-Young Suh, et al. High efficiency power conditioner using bypass diode assisted sinewave pulse modulation boost chopper-fed inverter with electrolytic capacitorless DC link [A]. IEEE ICEMS [C]. 2005. 959-964.
- [8] 吴卫民, 汤天浩, 彭青松, 等 (Wu Weimin, Tang Tianhao, Peng Qingsong, et al.). 组合式正弦波高频链逆变器 (A compositive, sinusoidal, high-frequency link inverter) [J]. 电工技术学报 (Trans. China Electrotechnical Society), 2008, 23(2): 56-60.
- [9] Pan Geng, Weimin Wu, Yinzhong Ye, et al. Small signal modeling of a novel single-phase photovoltaic inverter [A]. IEEE IPEMC [C]. 2009. 2188-2192.
- [10] 朱建华, 罗方林 (Zhu Jianhua, Luo Fanglin). 多元件功率谐振变换器的小信号模型 (Small-signal model of multi-element power resonant converter) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2003, 22(2): 1-5.

Comparative research on single-phase time-sharing photovoltaic inverter

GENG Pan¹, WU Wei-min¹, YE Yin-zhong², LIU Yi-jian¹

(1. The Research Institute of Electronic Automation of Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;
2. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China)

Abstract: Based on the modeling of two similar time-sharing cascaded photovoltaic inverters, the essential differences of the two circuits caused by different filters are revealed. During the “boost” operating stage, one system is a traditional fourth-order system, while another is a special fourth-order system similar to a second-order system. Consequently, different compensators will be required for these two systems, featuring two pairs of conjugated zeros and an integrator for one system and a simple PID compensator for another. Both the theoretical analysis and the experimental results show that the special fourth-order system could achieve much better control performance as compared with its counterpart.

Key words: time-sharing; photovoltaic inverter; fourth-order system; PID compensator

(上接第34页, cont. from p.34)

A novel soft-switching three-level inverter with self DC voltage balance capability

LOK Io-keong, DAI Ning-yi, WONG Man-chung

(Faculty of Science and Technology University of Macau, Macau, China)

Abstract: This paper presents a combination of a quasi-resonant DC-link (QRDCL) inverter and a generalized three-level inverter. QRDCL inverter can provide a zero voltage condition for the power devices. The voltage stresses of the power devices and the switching losses of the inverter can be reduced. Generalized multilevel inverter topology provides an alternative way in high level inverter implementation. The generalized multilevel topology gives the inverter a self voltage balancing ability without any assistance from extra circuits. Control strategy of a generalized three-level QRDCL inverter is proposed. Simulation results of the inverter are also presented to prove the feasibility of a generalized three-level QRDCL inverter.

Key words: Quasi-Resonant DC Link (QRDCL); soft-switching; multilevel inverter

作者: [陆耀强](#), [戴宁怡](#), [黄民聪](#), [LOK Io-keong](#), [DAI Ning-yi](#), [WONG Man-chung](#)
作者单位: [澳门大学科技学院](#), 中国, 澳门
刊名: [电工电能新技术](#) **ISTIC** **PKU**
英文刊名: [ADVANCED TECHNOLOGY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND ENERGY](#)
年, 卷(期): 2010, 29(4)
被引用次数: 1次

参考文献(9条)

1. [José Rodriguez](#); [JihSheng Lai](#); [Fang Zheng Peng](#) [Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications](#) [外文期刊] 2002(04)
2. [Dongsheng Zhou](#); [Didier G Rouaud](#) [Experimental comparisons of space vector neutral point balancing strategies for three-level topology](#) [外文期刊] 2001(06)
3. [N Y Dai](#); [M C Wong](#); [Y D Han](#) [Three-dimensional space vector modulation with DC voltage variation control in a three-leg centre-split power quality compensator](#) [外文期刊] 2004(02)
4. [Fang Zheng Peng](#) [A generalized multilevel inverter topology with self voltage balancing](#) [外文期刊] 2001(02)
5. [Deepakraj M Divan](#) [The resonant DC link converter - a new concept in static power conversion](#) 1989
6. [Jie Chan](#); [Jun Hu](#) [Modular design of soft-switching circuits for two-level and three-level inverters](#) [外文期刊] 2006(01)
7. [Guichao Hua](#); [ChingShan Leu](#); [Yimin Jiang](#) [Novel zero-voltage-transition PWM converters](#) [外文期刊] 1994(02)
8. [Ningyi Dai](#); [Manchung Wong](#); [Yuanhua Chen](#) [A 3-D generalized direct PWM algorithm for multilevel converters](#) [外文期刊] 2005(03)
9. [戴宁怡](#); [黄民聪](#); [韩英铎](#) [三相四线系统并联电能质量补偿器的新型控制方法](#) [期刊论文] - [电力自动化设备](#) 2003(06)

本文读者也读过(8条)

1. [严干贵](#), [刘文华](#), [陈远华](#), [韩英铎](#) [基于直接PWM方法的悬浮电容逆变器实验研究](#) [会议论文] - 2003
2. [陈峻岭](#), [姜新建](#), [朱东起](#), [邓礼宽](#) [中压配电网大容量新型混合有源滤波器](#) [期刊论文] - [电力电子技术](#) 2004, 38(6)
3. [张长征](#), [陈乔夫](#), [李达义](#), [朱海锋](#), [ZHANG Changzheng](#), [CHEN Qiaofu](#), [LI Dayi](#), [ZHU Haifeng](#) [一种三相大容量有源电力滤波器的研究](#) [期刊论文] - [高电压技术](#) 2006, 32(3)
4. [林智声](#), [戴宁怡](#), [黄民聪](#), [韩英铎](#), [LIN Zhi-sheng](#), [DAI Ning-yi](#), [HUANG Min-cong](#), [HAN Ying-duo](#) [DVR的不平衡浪涌和过电压控制](#) [期刊论文] - [电力系统自动化](#) 2005, 29(20)
5. [《微电机》投稿须知](#) [期刊论文] - [微电机](#) 2010, 43(11)
6. [唐净](#), [黄明聪](#), [韩英铎](#) [新型五电平逆变器三维PWM控制](#) [期刊论文] - [电网技术](#) 2003, 27(8)
7. [李达义](#), [陈乔夫](#), [熊娅俐](#), [盛建科](#), [贾正春](#) [一种带多个补偿绕组的大容量有源电力滤波器](#) [期刊论文] - [高电压技术](#) 2004, 30(9)
8. [沙德尚](#), [齐铂金](#), [鲍云杰](#), [段红海](#), [Sha Deshang](#), [Qi Bojin](#), [Bao Yunjie](#), [Duan Honghai](#) [电压型高频链逆变器的全数字化双极性双调制波控制策略](#) [期刊论文] - [电工技术学报](#) 2005, 20(12)

引证文献(1条)

1. [钟黎萍](#), [顾启民](#), [孔维涛](#), [李鑫](#) [基于虚拟作用时间变换的N电平逆变器参考电压矢量合成方法](#)[期刊论文]-[电工电能新技术](#) 2011(4)

引用本文格式: [陆耀强](#), [戴宁怡](#), [黄民聪](#), [LOK Io-keong](#), [DAI Ning-yi](#), [WONG Man-chung](#) [直流电压自平衡新型三电平准谐振逆变器](#)[期刊论文]-[电工电能新技术](#) 2010(4)