

# 基于独立光伏系统的三相三电平逆变器\*

张建功, 刘邦银, 段善旭, 康 勇  
(华中科技大学, 武汉 430074)

**摘 要:** 为给二级能量变换结构的光伏电厂提供高效后级逆变器, 设计和实现了一台 12 kVA 逆变器。主电路采用中点钳位式三电平结构, 以 IGBT 作为主开关器件, 以重复控制与瞬时值反馈控制相结合的控制策略产生 SPWM 波, 利用重复控制抑制非线性负载下的电压畸变, 利用瞬时值反馈控制改善系统的动态响应过程, 输出级采用 LC 滤波器减少输出电压  $u$  的谐波及  $du/dt$ , 采用软硬件相结合的限流保护方法。装置实验表明, 这种逆变器效率和输出波形质量高。

**关键词:** 光伏系统; 三电平逆变器; SPWM 调制; 重复控制; 瞬时值反馈控制

**中图分类号:** TM464      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-6520(2006)11-0103-04

## Three-phase Three-level Inverter Based on Stand-alone Photovoltaic System

ZHANG Jiangong, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, KANG Yong  
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Solar energy is one of the most clean and rich source in nature, almost all states make their best endeavors to exploit it and build many photovoltaic plants, the inverter is an important ingredient of the PV system, high quality output voltage waveform is required for the inverter, the design and implementation of a 12kVA inverter applied to stand-alone PV system is proposed in this paper. The main circuit structure of the inverter is based on neutral point clamped three-level inverter using IGBT, The trigger impulse sequence to each of the inverter bridge arms is given alone and its phase contrast is 120 degree to implement multi-model supply. The amplitude frequency characteristic of the controlled object is drawn by experiment and its mathematic model is derived with the load current treated as a measurable disturbance input. To achieve nearly sinusoidal output voltage even with nonlinear loads and abrupt load variation, the SPWM modulation based on repetitive control and instantaneous feedback control is employed for the inverter, repetitive control is used to reduce voltage distortion under nonlinear loads, and instantaneous control is designed to quicken the dynamic response process under abrupt load variation, the controller parameter is designed and obtained by MATLAB. The output harmonics and  $dv/dt$  is depressed by LC filter, the current-limited method combining software with hardware is adopted. Various tests have proved veracity of the controlled object, rationality of the controller parameter, the high level of output voltage waveform quality and efficiency of the installation.

**Key words:** photovoltaic system; three-level inverter; SPWM modulation; repetitive control; instantaneous feedback control

### 0 引 言

我国有着十分丰富的太阳能资源, 据估算全国年平均太阳能电力为 1700 TWh<sup>[1]</sup>, 为目前装机容量的多倍, 且太阳能发电清洁、无污染, 在我国有着十分广阔的前景。

太阳光照受时间和地域的限制, 为满足用户的需要, 在一些偏远地区, 一般建造带储能二级能量变换结构的独立光伏电站<sup>[2,3]</sup>。前级 DC/DC 实现最大功率跟踪, 后级 DC/AC 实现逆变。由于前级效率一般只能达到 80%~90%<sup>[4]</sup>, 所以要求后级逆变器必须达到较高的效率。多电平逆变器开关管承受

电压应力小, 开关损耗小, 输出电压谐波含量低, 效率高。文中介绍一台 12kVA 独立光伏系统的三相三电平逆变器的设计, 要求装置输出总谐波系数  $\leq 2\%$ , 额定阻性负载下效率  $\geq 94\%$ 。逆变器的控制系统基于重复控制和瞬时值反馈控制<sup>[5-10]</sup>。

### 1 主电路结构

#### 1.1 物理模型

图 1 是电压型中点钳位 (npc) 三电平逆变器的主电路拓扑, C1、C2 组成直流电压分压环节, 逆变器每相桥臂有 4 个开关管 T1~T4 (反并联 4 个续流二极管) 和 2 个钳位二极管 D5、D6。每个桥臂有

\* 台达电力电子教科发展基金重点资助项目(编号: DREK200501)

P、O 和 N3 种状态。以 A 相为例,具体表示为: T1, T2 关断, T3, T4 导通,  $U_{AO} = -U_D/2$ , 定义为 N 态; T1, T4 关断, T2, T3 导通,  $U_{AO} = 0$ , 定义为 0 态; T1, T2 导通, T3, T4 关断,  $U_{AO} = U_D/2$ , 定义为 P 态。

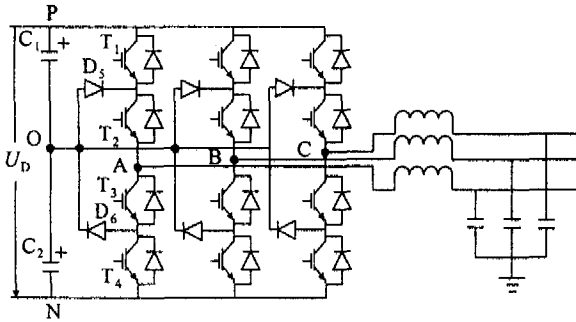


图1 采用 IGBT 的中点钳位三电平结构

Fig1 Structure of neutral point clamped three-level inverter based on IGBT

由于用户的多样性,光伏系统逆变器常运行在不平衡负载状态,为抑制不平衡负载对输出电压的影响,对三电平逆变器采取单相独立控制。三电平 PWM 控制方法主要有载波层叠法、载波移相法、空间电压矢量法和优化 PWM 法等<sup>[11-14]</sup>。它们各有优缺点,文中采用原理简单、实现方便且特别适用于二极管钳位型多电平的载波层叠法。A 相 4 个开关管触发脉冲产生的情况见图 2;  $u_{c1}$ 、 $u_{c2}$  为两交替反相的载波,关于  $\omega t$  轴对称,  $u_r$  为正弦调制波,经调制后产生的触发脉冲分别为 Tg1、Tg2、Tg3 和 Tg4,其中 Tg1 和 Tg3、Tg2 和 Tg4 互补, Tg1 和 Tg4 脉冲相差  $180^\circ$ 。B、C 相触发脉冲除相位相差  $120^\circ$  外其余相同。该功能由 TMS320F2810 控制芯片中事件管理器的比较单元来实现。

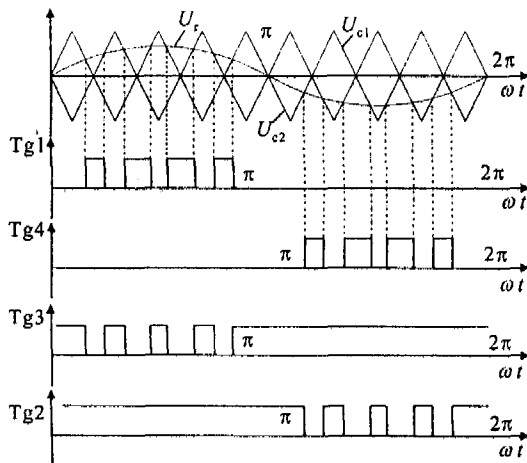


图2 三电平 A 桥臂开关管触发脉冲

Fig. 2 Trigger pulse of switching tube in bridge A of the three-level inverter

逆变器电路基波频率  $f_1 = 50$  Hz, 载波频率  $f_s = 12$  kHz, 滤波电感  $L = 2$  mH, 滤波电容  $C = 10$   $\mu$ F, 死区时间  $2$   $\mu$ s。

### 1.2 数学模型

逆变电源的动态特性决定于输出 LC 滤波器, 可认为输出三相滤波器即控制对象, 实际都采用对称结构, 各相滤波器参数一致, 且三相独立控制, 故可取单相进行分析, 其等效电路模型见图 3<sup>[15]</sup>, 等效电阻  $R_o$ 。由线路阻抗、滤波电感电阻、开关损耗、死区等产生,  $L$  为滤波电感,  $C$  为滤波电容,  $i_o$  是负载扰动,  $u_i$  为逆变桥输出电压,  $u_o$  为电容电压。逆变器负载可能为非线性负载, 建模时将负载电流  $i_o$  处理为扰动输入, 这样所接负载的非线性仅体现在扰动量的任意性上, 而逆变器模型为二阶线性模型。根据基尔霍夫定律对图 3 列方程, 整理后得到控制对象传函为:  $P(s) = 1/(s^2 LC + sR_o C + 1)$ 。

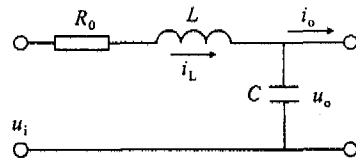


图3 单相等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit of single phase

由于实测  $R_o$  很难, 可通过实验直接测取控制对象的幅频特性, 将其与二阶系统对比来获得。

将三相逆变电源实测的幅频特性绘制在波特图 4 中, 与之最为接近的二阶系统为:

$$P(s) = 6800^2 / (s^2 + 2 \times 0.045 \times 6800 \times s + 6800^2),$$

其截止频率为  $6800$  rad/s, 阻尼比为  $0.045$ ,  $R_o \approx 1$   $\Omega$ 。在  $12$  kHz 采样频率下的离散形式为:

$$P(z) = (0.1537z + 0.1511) / (z^2 - 1.646z + 0.9503).$$

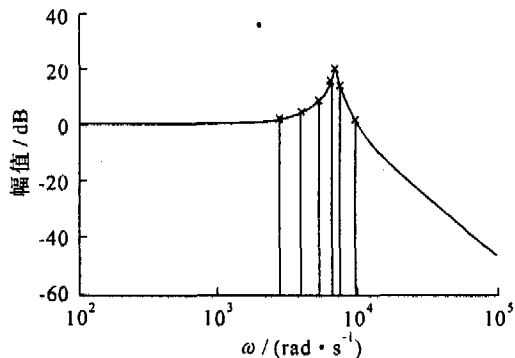


图4 逆变器的幅频特性

Fig. 4 Amplitude frequency characteristics of the inverter

## 2 控制与保护

### 2.1 控制器的设计

为获得良好的输出电压波形, 须对逆变电源的输出电压进行闭环控制, 控制框图见图 5, 采用重复控制加瞬时值反馈控制。

常用改进型重复控制器见图 6, 其中  $Q(z) = 0.95$ ,  $z^{-N}$  为周期延时环节,  $C(z) = K_r z^k S(z)$  为补偿器。比例项  $K_r$  为重复控制增益;  $z^k$  为超前环节,

实现相位补偿;滤波器  $S(z)$  抵消控制对象较高的谐振峰,可用一陷波器和一二阶滤波器同时作用来满足要求。根据控制对象的幅频特性,陷波器为  $S_2(z) = (z^5 + 2 + z^{-5})/4$ 。二阶滤波器  $S_1(z)$  截止频率取 7000 rad/s, 阻尼比为 1, 离散形式为:  $S_1(z) = (0.0446z + 0.0357)/(z^2 - 1.433z + 0.5133)$ 。

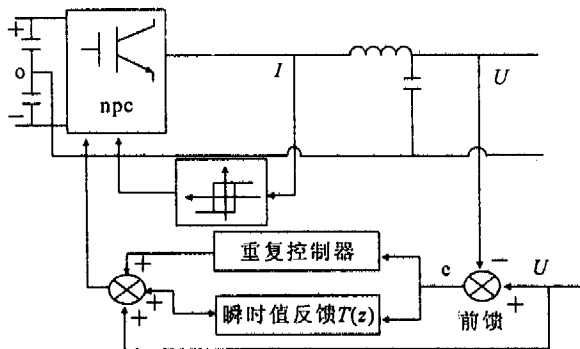


图5 逆变器控制系统框图

Fig. 5 Control system diagram of the inverter

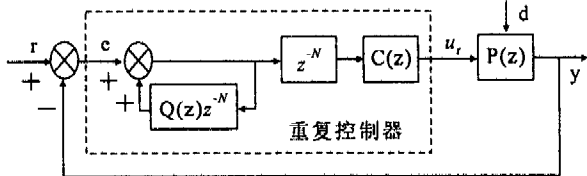


图6 重复控制系统框图

Fig. 6 System diagram of repetitive control

补偿器的幅频特性见图7,其中  $K_r = 1$ ,  $a, c, b$  分别为控制对象  $P(z)$ 、二阶滤波器  $S_1(z)$ 、 $P(z) \cdot S_1(z)$  的幅频特性,  $d, e$  分别为滞后环节  $z^{-k}$ 、陷波器的幅频特性。从图中超前4拍时  $z^{-k}$  的幅频特性可见中低频段  $d$  的相角几乎与  $b$  重合,重复控制能较强地抑制该段范围内的谐波;  $S(z) = S_1(z) \cdot S_2(z)$  使谐振峰为负值,高频段则迅速衰减。

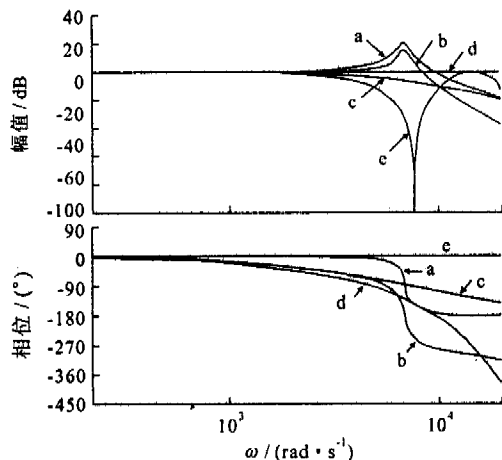


图7 补偿器幅频特性

Fig. 7 Amplitude frequency characteristics of the compensator

为减小输出量对指令跟踪速度的限制,一般设置了指令的前馈通道。

重复控制是逐周期地修正输出电压波形,故系

统动态性能较差,如在重复控制基础上并联一个瞬时值反馈控制器,则系统的动态性能将大为改善。

为了使瞬时值反馈控制器稳定,使用了一个超前环节,提高系统的截止频率,增大相位裕量。瞬时值反馈控制器  $T(s)$  如下式所示:

$$T(s) = 0.2(1 + 0.00024s)/1 + (0.00004s)$$

在 12 kHz 采样频率下,其离散形式为:

$$T(z) = 0.2(6z - 5.125)/(z - 0.1245)$$

图8a、b分别为原系统  $P(z)$  和加入瞬时值反馈  $P(z)T(z)$  后的幅频特性图的幅频特性。实用时可串连一小惯性环节抑制高频噪声。

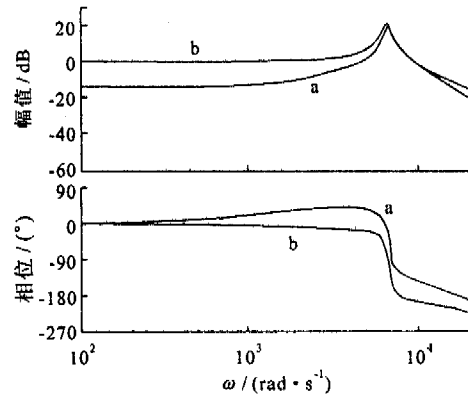


图8  $P(z)$ 和 $P(z)T(z)$ 幅频特性图

Fig. 8 Amplitude frequency characteristics of  $P(z)$  and  $P(z)T(z)$

### 2.2 过流保护

该装置采用硬件和软件相结合的保护措施。当检测到峰值电流超过滞环比较器设定上限值时,从硬件上将各路驱动脉冲强制拉为低,封锁正在导通的开关管,使电路进入续流状态;当电流降到滞环比较器下限值,驱动脉冲又重新起作用,使电流上升,强迫电路又起作用。软件上用过载限时的方法,使其具有输出 110% 额定功率历时 30 min、150% 额定功率历时 2 min 的过载能力。实验证明这种保护策略可使装置有很好的短路和过载保护能力。

### 3 试验结果

试验用 TI 公司 TMS320F2810 为控制芯片,直流输入电压  $U_d = 750 \sim 800$  V, 输出电压 220 V、50 Hz, IGBT 为 MG100J1BS11, 输出容量 12 kVA。

在装置上分别作了空载、突加载载和带整流性负载实验,测得的输出电压波形如图9~11,可知动态响应瞬变范围较小、恢复时间较短。在额定线性负载下,总谐波系数 THD 为 1.58%,用功率测试仪测得整机效率为 95.2%<sup>[16]</sup> ( $U_d = 750$  V 和额定阻性负载下,效率  $\eta = \sqrt{3UI}/U_d I_d$ , 其中  $I_d$  为直流输入电流,  $\bar{U}, \bar{I}$  分别为三相平均线电压、线电流)。装置的谐波含量和效率均达到了设计要求。

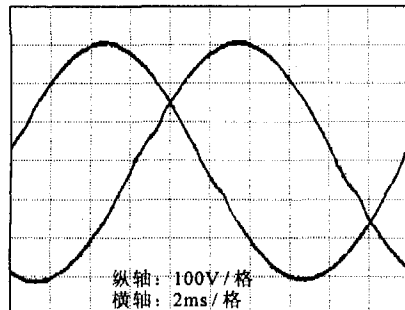


图9 空载时A、B相输出电压波形  
Fig. 9 Output voltage waveform of phase A and B for no-load

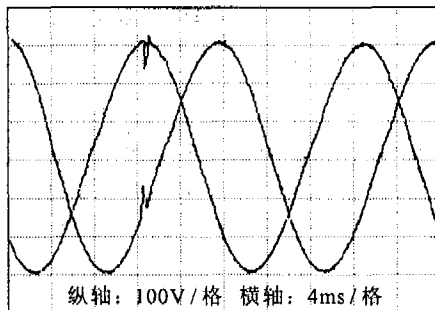


图10 突加额定线性负载时A、B相输出电压波形  
Fig. 10 Output voltage waveform of phase A and B for rated linearity load

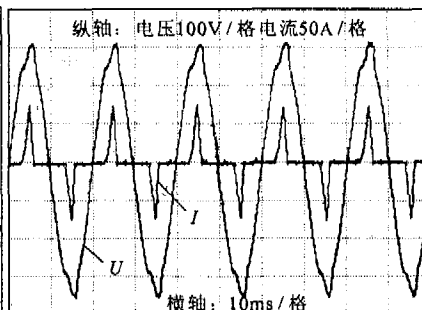


图11 带整流型负载时A相输出的电压、电流波形  
Fig. 11 Output voltage and circuit waveform of phase A for rectified load

#### 4 结论

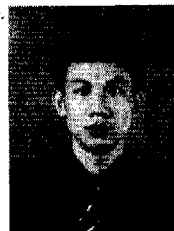
采用重复加瞬时控制的三电平逆变器输出波形谐波系数低,波形质量高,具有低成本、高效率和高可靠性,很适合作为10~20 kVA两级能量变换结构光伏系统的后级逆变器。

#### 参 考 文 献

- [1] 时璟丽. 我国光伏发电技术和市场发展[J]. 电工技术杂志, 2002, 12(6): 79-80.
- [2] Kjaer S, Pedersen J, Blaabjerg F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005 41(5): 1292-1306.
- [3] 焦在强, 许洪华. 单级式并网光伏逆变器[J]. 可再生能源, 2004, 5: 34-36.
- [4] 潘玉良, 等. 光伏发电系统最大输出功率探索[J]. 电子工程师, 2001, 27(9): 50-52.
- [5] Tzou Ying-Yu. High performance programmable AC power source with low harmonics distortion using dsp-based repetitive control technique[J]. IEEE Trans on Power Electron, 1997, 12(4): 715-725.
- [6] Kawamura A. Instantaneous feedback controlled PWM inverter with adaptive hysteresis[J]. IEEE Trans on Ind Apple, 1984: 769-775.
- [7] Zhou Keliang, Wang Danwei. Digital repetitive learning controller for three-phase CVCF PWM inverter[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2001 37(3): 864-872.
- [8] 孔雪娟, 王荆江, 彭力, 等. 基于内模原理的三相电压源型逆变电源的

波形控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 67-70.

- [9] 裴学军, 段善旭, 康勇, 等. 基于重复控制与瞬时值反馈控制的逆变电源研究[J]. 电力电子技术, 2002, 36(1): 12-14.
- [10] Akira Nabae, Isao Takahashi, Hirogumi Akagi. A new neutral-point-clamped PWM inverter[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1981, 1A-17(5): 518-523.
- [11] 李永东, 高跃, 侯轩. 大容量多电平变换器PWM控制技术现状及进展[J]. 电力电子技术, 2005, 39(5): 2-6.
- [12] 刘文华, 宋强, 严干贵. 采用IGCT电压型三电平逆变器的高压变频调速器[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(20): 61-65.
- [13] Ishida T, Matsuse K, Sugita K, et al. DC voltage control strategy for a five-level converter[J]. IEEE Trans on Power Electron, 2000, 15(3): 508-515.
- [14] 王立乔, 黄玉水, 刘兆桑, 等. 多电平变频器多载波PWM技术的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(7): 1026-1030.
- [15] 张凯. 基于重复控制原理的CVCF-PWM逆变器波形控制技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2000.
- [16] BJ/T 7143. 2-93. 风力发电机组用逆变器试验方法[S]. 1993.



张建功

张建功 1975—, 硕士生, 从事电力电子电与电力传动研究。电话: (027) 87445900; E-mail: jg-zhang1031@163.com

刘邦银 1979—, 博士生, 从事电力电子电与电力传动研究。

段善旭 1970—, 博导, 从事电力电子电与电力传动研究。

收稿日期 2005-12-20

编辑 曹昭君

#### (上接第77页)

- [13] Sibilant G C, Ijumba N M, Britten A C. Studies of DC conductor corona in a small corona cage[C]. Proceedings of Power System Technology International Conference. [S. l.], 2002: 2202-2207.
- [14] Lahti K, Lahtinen M, Nousiainen K. Transmission line corona losses under hoar frost conditions[J]. IEEE Trans on PWRD, 1997, 12(2): 928-933.
- [15] Pedrow P D, Qin B L, Wang Q Y. Influence of load current on bipolar DC corona[J]. IEEE Trans on PWRD, 1993, 8(3): 1443-1450.
- [16] 谢书勇, 刘成, 李政. 超高压输电导线起始电晕电压测量方法的探讨[J]. 高压电器, 1989(6): 39-41.
- [17] Comber M C, Zaffanella L E. The use of single phase overhead test lines and test cages to evaluate the corona effects of EHV and UHV transmission line[J]. IEEE Trans on Power Appar Syst, 1974, 93(1): 81-90.

- [18] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.



关志成

关志成 1944—, 男, 教授, 博导. 研究方向为高电压与绝缘技术以及电工与环境、材料、生命科学等交叉学科领域的研究。电话: (0755) 26036118; E-mail: guanzc@tsinghua.edu.cn

麻敬华 1982—, 女, 硕士生, 研究方向为高电压外绝缘及导线电晕的研究。电话: (0755) 26036423; E-mail: mminhua00@mails.tsinghua.edu.cn

惠建峰 1979—, 男, 博士生, 研究方向为气体放电理论及检测技术。电话: (0755) 26036693; E-mail: huij02@mails.thu.edu.cn

收稿日期 2006-07-28

编辑 蔡爱蛟