

单相方波逆变器的脉宽设计

付继有 丁耀

(天津大学精密仪器及光电子工程学院 300072 天津)

摘要 方波逆变器在输出失真度最小时波形最接近正弦波。采用功率谱分析的方法,得出了单相方波逆变器谐波失真度最小时的脉宽数值。对于固定脉宽系统,导通角取2.331 rad时最佳;对于变脉宽系统,导通角变化区间两端失真度相等时,系统的平均失真最小。该结论在光伏电站控制系统电源的设计中得到了应用与验证。

关键词 谐波失真度 方波逆变器 脉宽

1 单相小功率逆变器分析

为了简化电路,单相小功率逆变器多采用方波式输出。任何一个周期函数在一组三角函数基下,都可以表示成直流分量及从一次开始的各次谐波在基函数上的投影的和式,这就是傅立叶级数展开的数学基础。上述信号作用在负载上的功率为:

$$P = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{u(t) \cdot i(t)}{R} dt = \frac{U_0 I_0}{R} + \frac{1}{2R} \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos Q_n \quad (1)$$

其中 U_n, I_n 为第 n 次谐波分量的电压及电流值;
 $\cos Q_n$ 为 n 次谐波的功率因数。

以上表达式可以描述成:“单端口网络吸收的功率等于直流功率与各次谐波功率之和”^[1]。如果使用如图1所示的正负半周呈中心对称的方波,那么(1)式中直流功率将为零。由(2)式可算出图1谐波失真度^[2]:

$$THD_0 = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} = \sqrt{\frac{\frac{U_2^2}{R} + \frac{U_3^2}{R} + \dots + \frac{U_n^2}{R}}{\frac{U_1^2}{R}}} = \sqrt{\frac{P}{P_1} - 1} \quad (2)$$

其中 P 为信号总功率; P_1 为基波功率。

在失真度最小的情况下信号最接近正弦波,这将成为设计方波逆变器脉冲宽度的依据。

2 方波逆变器最佳导通角分析

对图1的方波进行谐波分析,推算出波形失真度

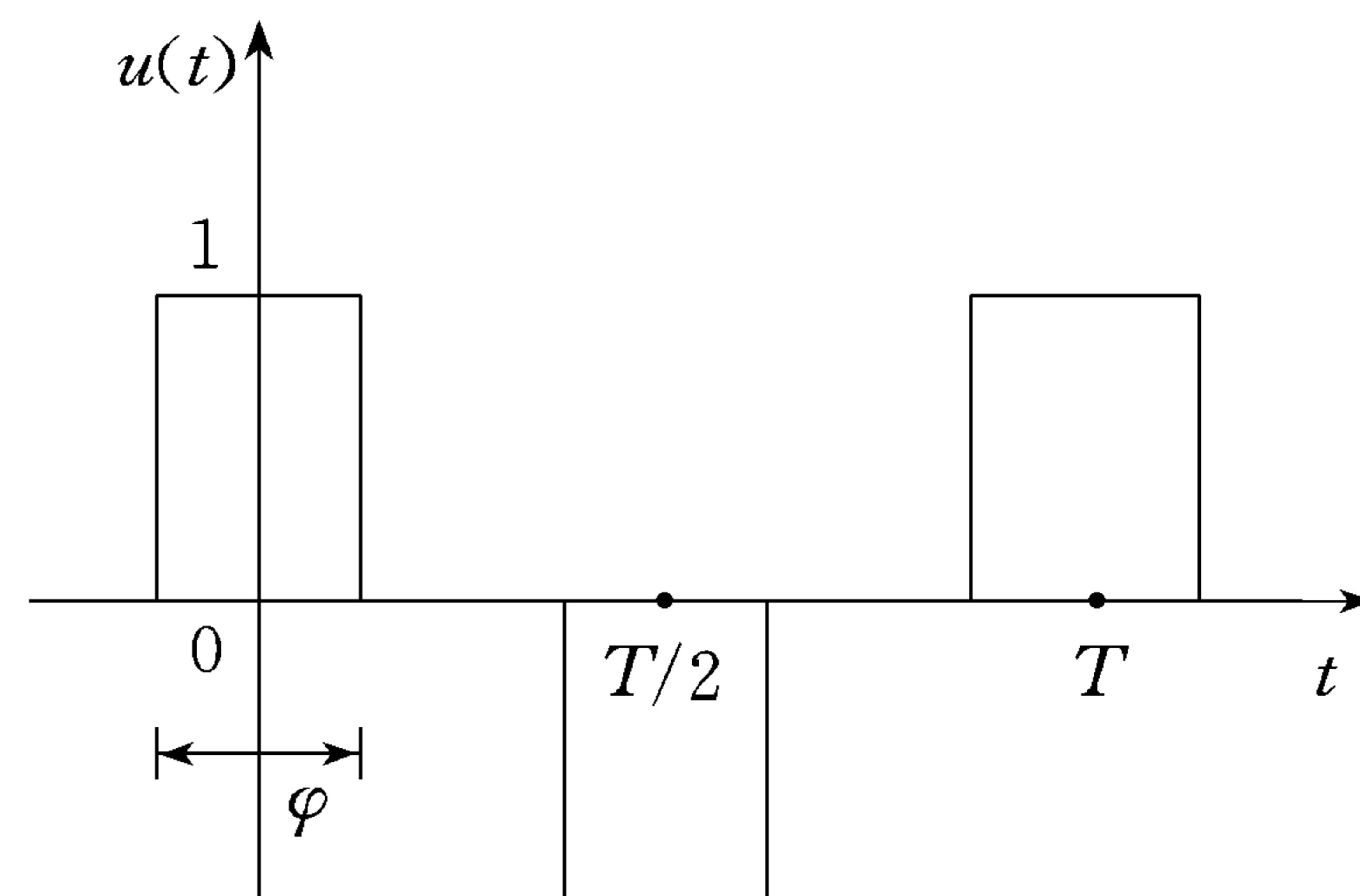


图1 方波逆变器输出电压波形
Fig. 1 Output voltage wave shape of rectangular wave inverter

最小时的导通角 φ 。

首先假设波形正负半周是对称的,正半周导通角为 φ ($\varphi < \pi$),为了便于计算,不妨设方波幅度为1,且作用在单位纯电阻上($R=1$),则该信号的总功率为:

$$P = \frac{W}{T} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t) \frac{u(t)}{R} dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{2\varphi T}{\pi}} 1 \cdot dt = \frac{\varphi}{\pi} \quad 0 < \varphi \leq \pi \quad (3)$$

式中 φ 取弧度。

基波的幅值 $a_{1(\varphi)}$ 为:

$$a_{1\varphi} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t) \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt = \frac{4}{T} \left[\int_0^{\frac{T}{4}\cdot\frac{\varphi}{\pi}} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt + \int_{\frac{T}{2}-\frac{T}{4}\cdot\frac{\varphi}{\pi}}^{\frac{T}{2}} (-1) \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt \right] = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\varphi}{2} \quad 0 < \varphi \leq \pi \quad (4)$$

由(2)式,当 P_1/P 取得最大值时, THD_0 取得最小值,故求失真度最小转换成求 P_1/P 最大值。

$$\frac{P_1}{P} = \frac{\frac{U_1^2}{R}}{\frac{U_1^2}{R} + \frac{16}{2\pi^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}} = \frac{\frac{16}{2\pi^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}}{\frac{\varphi}{\pi}} = \frac{4}{\pi\varphi} (1 - \cos \varphi) \quad 0 < \varphi \leq \pi \quad (5)$$

(5)式对 φ 求导,可得:

$$\frac{d\left(\frac{P_1}{P}\right)}{d\varphi} = \frac{8}{\pi} \frac{\varphi \sin \varphi + \cos \varphi - 1}{\varphi^2} \quad (6)$$

令(6)式为0,可以求出极值点,即:

$$\varphi \sin \varphi = 1 - \cos \varphi \quad (7)$$

对(7)式,用C语言编写牛顿迭代法程序得到数值解: $\varphi = 2.331 \text{ rad} = 133.56^\circ$

即导通角为 2.331 rad 时,方波中基波功率占总功率的比例最大。图2为谐波失真度与导通角对应关系的微机仿真曲线。从曲线上可以看出,导通角为 134° 左右时失真度出现极小值。

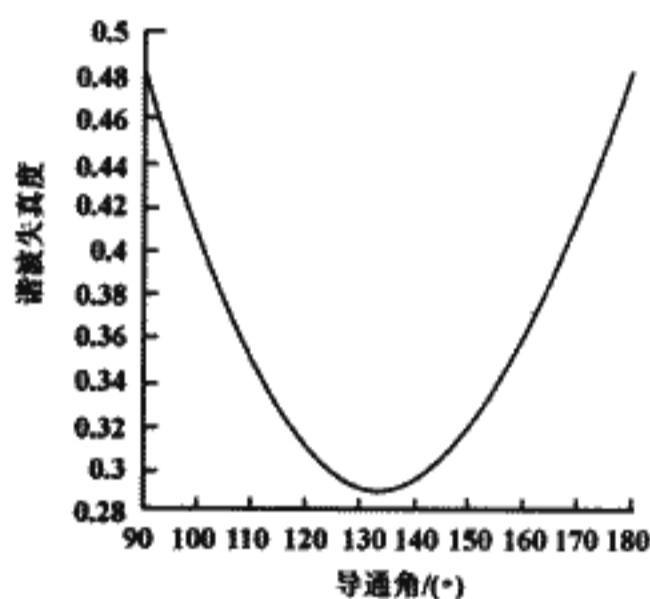


图2 谐波失真度与导通角对应关系的微机仿真曲线

Fig. 2 Relation between THD and angle of flow

对于导通角为 π 的方波逆变器,可以由公式(4)计算出其基波振幅为:

$$a_{1(\pi)} = \frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi}{2} = \frac{4}{\pi}$$

代入(2)式,可得其失真度:

$$THD_{0(\pi)} = \sqrt{\frac{P_{(\pi)}}{P_{1(\pi)}} - 1} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{2}}{\left(\frac{4}{\pi}\right)^2} - 1} = 48.34\%$$

而当取最佳导通角为 2.331 rad 时,失真度为:

$$THD_{0(2.331)} = \sqrt{\frac{P_{(2.331)}}{P_{1(2.331)}} - 1} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{\pi \cdot 2.331}{4(1 - \cos 2.331)}} - 1 \cdot 100\% = 28.96\%$$

两者相比,后者失真度明显小得多。

3 电路实测结果

依上述分析,设计了一台 450 W 方波式逆变器。该电源是中科院电工所承接的西藏那曲双湖特别行政区招标的 25 kW 光伏电站的控制系统电源。它主要是为电站所使用的一台386工控机及一台9针打印机供电。电源输入取自电站蓄能的150节铅酸蓄电池,输出见表1。

表1 电源输出特性表

Table 1 Output character of power supply

编号	输出电压/V	电流/A	频率/Hz	电流调整率/ (%)	是否要求隔离	负载用途
1	AC 220	1.5	50	±5	要求	工控机、打印机
2	DC 110	1		±5	不要求	指示灯
3	DC 24	1		±5	要求	控制线路、继电器

由于电源输出要求的特殊性,采用开关式稳压及逆变相结合的方式,即先由一套“on-on”式开关电路把输入 $285 \sim 390 \text{ V}$ 的电压稳定成 $110 \text{ V} \pm 0.5\%$ 的直流,再由后续的逆变电路以固定的脉宽(按以上分析,导通角为 2.331 rad)逆变成 50 Hz 的方波。图3为该系统的原理图。主开关管MOS1(10N50)由SG3524控制工作在 50 kHz 上,开关输出经LC滤波,得到 110 V 直流,再由MOS2,MOS3构成的电路转换成 50 Hz 的方波。电路中 110 V 开关电源及 220 V 逆变部分都设有“折返”式过流(短路)保护电路^[3]。

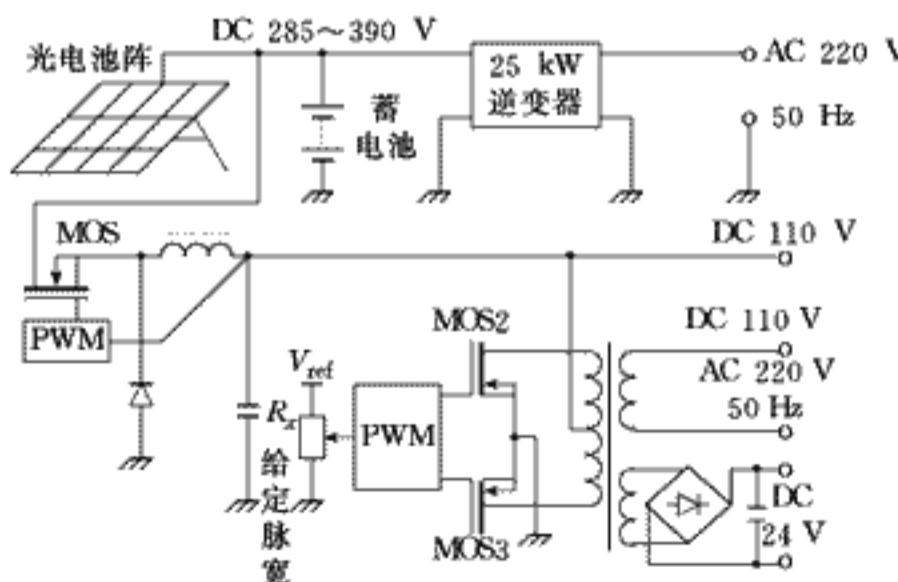


图3 25 kW光伏电站辅助供电系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram for auxiliary power-supply of 25 kW PV power station

在完成样机后我们进行了实验,负载为纯电阻白炽灯(200 W)。对应不同的脉宽(调节图3中的 R_z),使用BSI型失真度测试仪分别进行了测试,结

果为图4曲线,与图2仿真曲线相对照可以看出,理论与实际基本吻合。

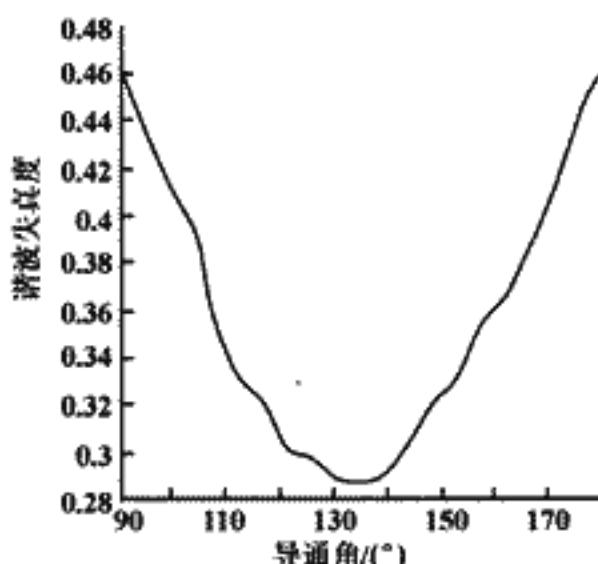


图4 实测方波逆变器谐波失真度与导通角的对应关系曲线

Fig. 4 Measured relation between THD rectangular wave inverter and angle of flow

4 结论

通过理论分析和实际验证,得出了单相方波逆变器最佳导通角 φ 的设计原则;对于固定输出脉宽方式,取导通角 $\varphi = 2.331 \text{ rad}$ 可以获得最小的输出失真;而对于小功率方波 UPS 的变化输出脉宽方式,因对应不同的电池残存电量及负载情况,考虑功

率管、变压器等的损耗及电池端电压变化较大,使用闭环调宽,以稳定输出电压的平均值,这时脉宽的设计可以参照图2,使输出脉宽最窄时(对应电池端压最高、负载最轻)的失真度与最宽时(对应电池端压最低,负载最重)的失真度相等,这样,整个逆变器运行区间输出失真度都较小。另外,因逆变器输出接有 EMI 滤波器,其内部的并联电容与主变压器的漏感构成了低通结构,对方波中的高次谐波阻抗较大。而导通角 $\varphi = \pi$ 时二次谐波为零,主要谐波成份是三次谐波开始的奇次谐波,所以实际失真度曲线在 φ 接近 π 时失真度比仿真结果要略小一些。

5 参考文献

- Tripathi A. N. Linear System Analysis. New Delhi (India): Wiley Eastern Limited, 1987
- 常新华, 郭群芳, 吴俊源. 电子测量仪器技术手册. 北京: 电子工业出版社, 1992
- 丁耀. 开关式风/光互补电站控制电源的设计. 电力电子技术, 1995, (1): 29~31

付继有, 女, 1970年生, 博士研究生, 主要从事精密仪器及自动控制研究。

丁耀, 男, 1970年生, 硕士研究生, 主要从事电子仪器及功率电子技术的研究。

PULSE WIDTH FOR SINGLE PHASE RECTANGULAR WAVE INVERTOR

Fu Jiyu, Ding Yao

(Tianjin University, 300072, Tianjin, China)

Abstract Based on power spectrum analysis, this paper presents the basic design principle of the best pulse width with the purpose of minimum THD for single phase rectangular wave inverter. Analysis shows that for fixed pulse width system, the best angle of flow should be 2.331 rad , and variable systems THD will be minimum if the THD are equal at two ends. The conclusion has been proved by the application of a power supply system in a photo-voltage power station.

Keywords total harmonic distortion (THD) rectangular wave inverter pulse width