

用 Walsh 函数方法的阶梯波式 DC/AC 变换器的设计与实现

李宗瑞 高红梅 李行善

(北京航空航天大学 302 教研室, 北京, 100083)

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A WALSH FUNCTION CONTROLLED DC/AC INVERTER

Li Zongrui, Gao Hongmei, Li Xingshan

(Faculty 302 of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

摘要 讨论了阶梯波式 DC/AC 变换器的一种新的设计与实现方法, 即用 Walsh 函数方法及矢量合成原理分析、综合和设计。试验结果表明实现了逆变器结构的简化及其输出电压频率稳定, 幅值便于调节与自动稳定。给出了有关硬件、软件框图与说明、试验结果及进一步设想。

关键词 沃尔什函数, 电子学, 换流器

中图分类号 V242.43

Abstract An investigation on staircase sine wave DC/AC inverter is described. The inverter is analysed and designed with Walsh function approach and vector summation scheme. The unique characteristics of walsh function make the inverter structure simplified and waveform quality improved, compared with those of the conventional inverter switch-controlling method. The vector summation scheme makes the regulation and the automatic stabilization of the output magnitude easily realized. The system block diagram, the circuit of the switch-transformer bridges, the concept of the software design and the test results of a 250VA laboratory prototype are given. The results are quite satisfactory.

Key words Walsh function, electronics, inverters

目前关于 PWM 逆变器的研究较多, 而关于阶梯波逆变器的研究则较小, 主要原因是阶梯波逆变器较难实现对输出电压幅值的自动调节与稳定。但 PWM 逆变器对开关器件的开通与关断时间、电流上升率等指标要求苛刻, 其控制电路、特性是为消除低次谐波优化设计所得的开关开通角的逻辑控制比较复杂; 而阶梯波逆变器却因各开关导通与关断时间规律性强, 使电路相对简单; 且在输出波形谐波失真相同的情况下, 一个周期内开关导通次数要少得多; 而对开关快速性要求较低, 或可适用于更高频率的场合。因此解决阶梯波逆变器输出电压的自动调节与稳定并尽可能进一步简化其结构就是在功率电子学领域中具有重要意义的工作。本文将近年来才开始研究应用于功率电子学领域的 Walsh 函数方法用于 DC/AC 变换器的设计, 实现了阶梯波发生器结构的简化; 并利用矢量合成原理, 改变两组阶梯波的相对相位差来改变合成阶梯波的幅值。通过数字处理及模拟信号处理单元构成闭环系统, 使逆变器输出电压幅值的调节方便并实现自动稳定。考虑到航空方面应用发展的要求, 该逆变器以直流 27V 供电, 输出为单相 400Hz, 115V, 250VA。

1 Walsh 函数综合正弦波的特点

按变号数次序排列的 Walsh 函数的定义是^[1]

$$\text{Walw}(k, H) = \prod_{c=0}^{p-1} \text{Sgn}[\cos(Kc \delta 2^c PH)] \quad 0 \leq H \leq 1 \quad (1)$$

任意周期函数 $x(H)$ 可展开为无穷 Walsh 级数,

$$\text{即} \quad x(H) = \sum_{k=0}^{\infty} X(k) \text{Wal}(k, H), \quad 0 \leq H \leq 1 \quad (2)$$

其中 Walsh 系数

$$X(k) = \int_0^1 x(H) \text{Wal}(k, H) dH \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

在满足列率采样定理的条件下, 式(2) 及式(3) 表示的 Walsh 变换对可离散化为

$$\text{DWT:} \quad X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{Wal}(k, n) \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (4)$$

$$\text{IDWT:} \quad x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \text{Wal}(k, n) \quad (n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (5)$$

这里的 $X(k)$ 可以很方便地 (因 Walsh 函数只取 ± 1 值) 通过快速 Walsh-Hadamard 变换 (FWHT) 求得。

对于正弦函数 $x(H) = \sin H = \sin X_t$ 。若取 $N=32$, 第 k 个采样点取在 $H=5.6+(k-1) \times 11.2^\circ$ 处, 通过 FWHT 可求得 $X(1) = 0.6407$, $X(5) = -0.2654$, $X(9) = -0.0528$, $X(13) = -0.1274$, $X(17) = -0.0125$, $X(21) = 0.0052$, $X(25) = -0.0261$, $X(29) = -0.0631$, 其它 24 个 $X(k)$ 值均为 0。

Kitai 已证明^[2], 当 $N=32$ 时, 由具有上述系数的 32 个 Walsh 函数 (其中 24 个的系数为 0, 实际上只有 8 个) 合成的阶梯波将在其近似表示的正弦波的 $1/4$ 个周期内有等间隔的 8 个阶梯, 其 Fourier 展开式中的基波振幅为 0.9968, 第 1 对谐波为第 31 次和第 33 次, 振幅分别为 0.9968/31 和 0.9968/33; 第 2 对谐波为第 63 次和第 65 次, 振幅分别为 0.9968/63 和 0.9968/65。可见用截断至 $N=32$ 的 Walsh 函数级数表示正弦波, 可使此阶梯波与理想正弦波之差的平方积分比其他形式阶梯波的要小, 而获得高品质的阶梯波。

Evan 推出^[3]以截断的 Walsh 级数合成正弦函数 $x(H)$ 时, 估算准确度的均方误差表示为 $E = \frac{1}{2} - \sum_{k=1}^N X^2(k)$ 。计算结果还表明, 级数中系数非 0 的函数项, 在 $N=32$ 时, 即第 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29 等序号项, 形成长度为 L ($L=2^n$, n 为正整数) 的各组, 在每组内出现在非过渡位置上的函数项只对上述均方误差有微小的影响。

Evan 的分析是, 系数非零的第 9, 17, 21, 25 序号项因不是组间过渡项, $X(29)$ 又较 $X(1)$, $X(5)$, $X(13)$ 小得多, 故为了使结构简单可只取序号为 1, 5, 13 的 Walsh 函数来综合正弦波。这时将会有较小的低于 31 次的谐波出现。

Tadokaro 等给出^[4]信号的 Walsh 系数与 Fourier 系数间的对应转换关系可从消除低次谐波的角度解简单的线性代数方程组, 进一步调整 Walsh 函数的系数值为: $X(1) = 0.6440$, $X(5) = -0.2683$, $X(13) = -0.1295$ 。

综上所述, 有充分的理由在实际构成阶梯波发生器时, 只叠加 $0.6440 \text{Wal}(1)$,

- 0.268 3Wal(5) 和 - 0.129 5Wal(13)

2 矢量合成法调压原理

由基本电路理论可知, 当 $f_1(t) = K\sin(Xt + H)$, $f_2(t) = K\sin(Xt - H)$ 时, 合成波 $f(t) = f_1(t) + f_2(t) = 2K\cos H\sin Xt$, 其幅值 $2K\cos H$ 可通过调节 H 来改变。Peng 等曾将此技术^[5]用于似方波合成的阶梯波形。本文用此原理实现逆变器输出电压幅值的调节, 即串接两同样的上述 Walsh 函数阶梯波发生器的输出, 改变控制此二发生器开关动作的 Walsh 函数组间的相位差, 达到调节输出电压幅值的目的。

3 逆变器的电路设计

逆变器的电路框图示于图 1, 由 3 部分组成。

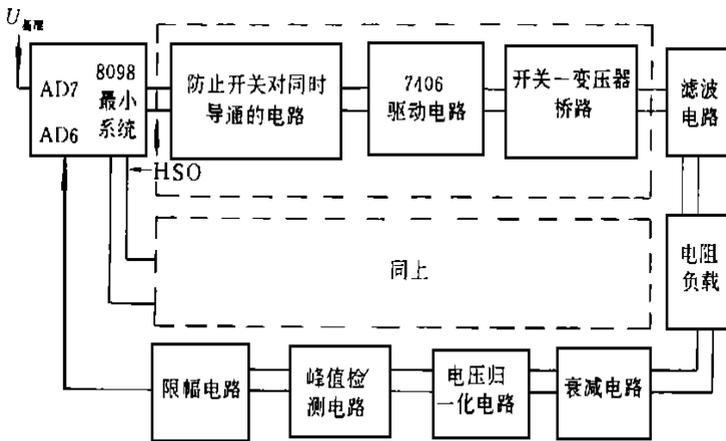


图 1 逆变器电路框图

(1) 控制部分 8098 最小系统用于生成两组 Walsh 函数, 每组包括 Wal(1), Wal(5) 和 Wal(13), 通过 HSO. 0~HSO.5 输出; 用于对设定输出电压期望值的基准信号与反馈信号采样、比较两者得出偏差信号, 再按 PID 控制规律计算出新的两组 Walsh 函数应有的相位差, 控制部分还包括防止 MOSFET 开关管对同时导通的电路, 以及减小开关管导通电阻及功耗而将高电平信号由 5V 提高到 12V 的驱动电路。

(2) 功率输出部分 开关-变压器桥路(阶梯波发生器) 示于图 2。直流电源为 $27 \pm 2.7V$; K_1 、 K'_1 分别由 Wal(1) 和 Wal(1) 控制, 变压器 B1 的变比 $n_1 = N_2/N_1 = X(1) \sqrt{2 \cdot 115 / (27 - 2.7)}$, 以满足逆变器输出电压 115V 的要求; K_2 、 K'_2 分别由 Wal(5) 和 Wal(5) 控制。 $n_2 = X(5) \sqrt{2 \cdot 115 / (27 - 2.7)}$; K_3 、 K'_3 则由 Wal(13) 和 Wal(13) 控制; $n_3 = X(13) \sqrt{2 \cdot 115 / (27 - 2.7)}$; B_1 、 B_2 、 B_3 次级电压波形分别与 Wal(1)、Wal(5)、Wal(13) 相似; 合成波形即所要求的阶梯波。将这样结构的两相同阶梯波发生器的输出串接即可得逆变器的阶梯波。用软件方法改变两组阶梯波的相位差即可调节和稳定输出幅值。

(3) 反馈部分 经过 LC 滤波后的输出电压通过衰减隔离变压器, 电阻分压归一化电路峰值检测电路, 限幅电路等而变为与输出电压有效值成正比, 并与基准信号可比拟的反馈

信号送到 8098 的 A/D 端供采样。

4 逆变器的软件设计

主程序完成调压及自动稳压; 两组由高速输出口输出的 Walsh 函数由中断服务程序产生。

逆变器输出电压 $f = 400\text{Hz}$, $T = 2.5\text{ms}$ 。最高序号的 Wal(13) 在一个周期内有 16 个等宽度的正或负脉冲; 故在每个周期内对每一 Walsh 函数应取 16 个状态值, 每个状态持续 $156L_s$ 。将相应于两组各 Walsh 函数的 16 个状态值分别以表格的形式存于 EPROM 中, 每隔 $156L_s$ 一次中断, 使各 Walsh 函数的一个状态值通过 HSO. 0~HSO. 5 输出, 持续此过程即可输出各函数波形。

前面已推出输出电压幅值 $U_m = 2K \cos H$ H 为两组正弦波相位差 H 的 $1/2$ 。 $H = 0$, $U_m = 2K$ 有最大值; $H = 180^\circ$, $U_m = 0$ 有最小值, 将 8098A/D 的每一离散值所对应的 H 值通过 $t = H \times 2500L_s / 360$ 转化为滞后组相对于领先组的时间延迟 t , 制出对 t 的粗调与细调参数表亦存于 EPROM 中备主程序查找。

为保证峰值检测电路的正常工作, 程序分配了 2.5ms (正弦波一个周期的时间) 供电路中电容充电, 用另一个 2.5ms 时间完成 8098 的采样、各项计算及电容的放电。在由 8098AD6 和 AD7 分别采样反馈和基准信号取得相应的转换结果后, 即可求得其偏差 e_n 。本文实际采用比例控制规律, 遂可算出使输出电压稳定于给定期望值的新的相位差值 $\$U = KP (e_n - e_{n-1})$ 及相应的两组 Walsh 函数间的时延。

5 结论及设想

对 250VADC/AC 逆变器实验室模型的测试结果表明:

- (1) 在基准电压、电源电压、负载等变化情况下, 逆变器输出的正弦电压频率都准确地保持为 $f = (400.7 \sim 400.8)\text{Hz}$; 见表 1 及表 2。
- (2) 输出电压与基准电压间有较准确的线性关系, 可通过调整基准电压值调整输出电压, 调压范围为 $(8 \sim 160)\text{V}$ (幅值)。基准电压不变, 不论电源电压还是负载变化, 输出电压幅值都基本保持不变, 输出电压幅值在 $(40 \sim 160)\text{V}$ 范围内时, 其幅值稳定精度为 $\pm 1.2\%$, 见表 1 及表 2。

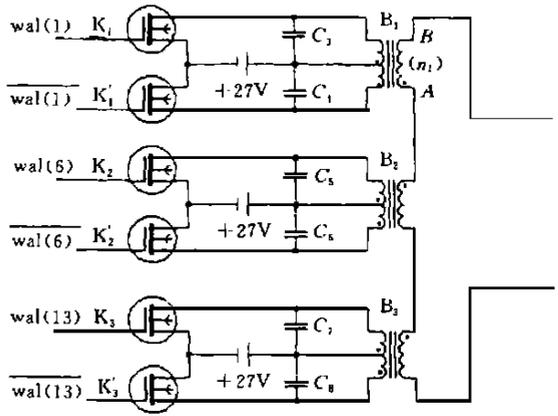


图 2 开关-变压器桥路

表1 10%负载时输出电压幅值、频率与基准电压及电源电压的关系

	24.3V	27.0V	29.7V	f / Hz
4V	160	162	161	400.7
3V	120	120	120	400.7
2V	81	81	81	400.7
1V	40	40	41	400.7
0V	6.6	7.6	8.0	400.8

表2 100%负载时输出电压幅值、频率与基准电压及电源电压的关系

	24.3V	27.0V	29.7V	f / Hz
4V	160	160	162	400.7
3V	120	121	120	400.8
2V	81	80	80	400.8
1V	40	40	41	400.8
0V	2.2	2.4	2.5	400.8

(3) 输出波形中只有很小的谐波分量, 波形失真度 $\text{THD} = 1.04\%$ 。见图3及图4

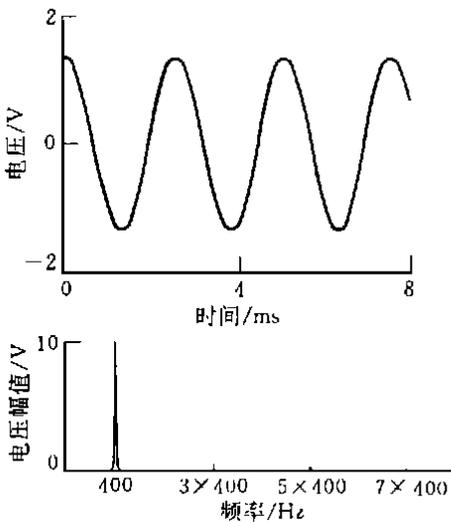


图3 输出电压的波形及频谱 (10%负载)

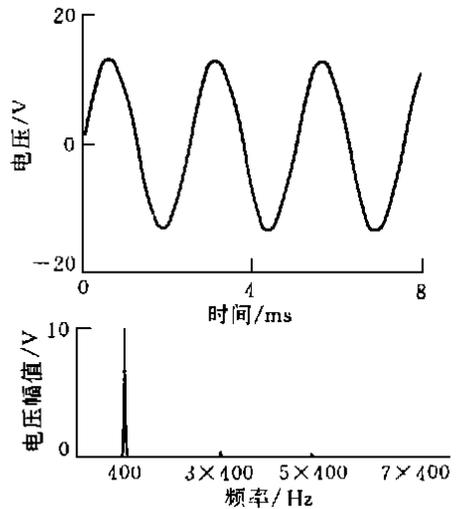


图4 输出电压的波形及频谱 (100%负载)

(4) 逆变器总体效率可达 85.3%, 变压器直流电阻的功耗占总功率的 8.3%。

可见, 采用本文方法设计制作的阶梯形逆变器结构简单、效率高、波形品质好, 可对输出电压方便地实现调压及自动稳压。

为进一步探讨此方法的实用价值尚有以下工作可做:

(1) 提高效率, 主要是减小变压器的直流电阻损失, 可考虑将进入变压器的信号先调制成高频信号, 经变压器叠加后再解调。另采用更好的铁芯材料以进一步减小逆变器的体积和重量。

(2) 采用键盘输出, 数码管显示, 以便于设定输出电压的期望值并显示实际输出电压值。

(3) 研究三相逆变器的设计与实现。

参 考 文 献

- 张彦仲, 沈乃汗. 快速富里叶变换和沃尔什变换. 北京: 航空工业出版社, 1989: 184
- Kitai R. Synthesis of periodic sinusoids from Walsh waves. IEEE T., 1975, IM-24 (4): 313-317

- 3 Evans W A. Sine-wave synthesis using Walsh functions. In: IEE Proceedings. Pt G, 1987; 134 (1): 1- 6
- 4 Tadokaro Y, Higuchi T. Discrete Fourier transform computation via the Walsh transform. IEEE T, 1978. ASSP-26 (3): 173- 178
- 5 Peng C H, Chen D Y, Lee F C. Transistorized power module for high power DC-sinusoidal inverter for very low-frequency transmitter application. In: Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting, Philadelphia. 1981: 829- 834

民用航空器安全性评估国际学术 研讨会在沪举行

民用航空器安全性评估国际学术研讨会于 1995 年 4 月 10 日在上海虹桥国际机场中国民航华东管理局举行。这次研讨会是中国民航华东管理局和上海市航空学会软科学专业委员会主办的。美国国际科技应用公司 (简称 SAIC) 总裁助理 Robert. E. Kurph 博士和沈聿博士应邀专程来沪,在会上分别作了用“概率统计风险评估”方法,即 Probabilistic Risk Assessment (PRA) 来评估民用航空器安全性的学术报告,引起上海航空界同仁的浓厚兴趣。

PRA 是一种全面地、定量地评估一个工程系统安全性的方法。利用 PRA 方法可以比传统方法更加快速、经济、有效地评估民用航空器的安全性。在美国,这种方法已被广泛地应用在民航工业、航空工业、太阳能发电工业和化学工业上。

上海市航空学会理事长薛德馨和民航华东管理局副局长、上海市航空学会副理事长兼软科学专业委员会主任吴锡祺,会前会见了 Kurph 博士和沈聿博士。

中国民航华东管理局、上海市航空学会、中国东方航空公司、上海航空公司和上海飞机研究所等单位的有关领导和专家出席了研讨会。中美两国专家就 PRA 方法及用 PRA 方法评估民航航空器安全的一些问题,诸如 PRA 方法比飞机公司的维修手册优越在哪里,如何取得民航适航当局的确认等问题进行了深入的探讨。

国际科技应用公司 (SAIC, U. S. A) 是美国最大的科技应用公司。公司有 16000 多名科技人员。公司在 PRA 工作上有长期的经验。目前正在做的 PRA 项目有航天飞机和宇航员教练飞机的安全分析。该公司愿意为中国民航制定最高标准的民航管理制度提供服务。

与会中方各单位领导和专家与美国 SAIC 公司都表示愿意继续就此和其它领域作进一步的探讨,并在更多的领域进行交流与合作。

(李铁柏)