

新型梯形波脉宽调制技术的研究与实践

史国生

(南京师范大学电气与电子工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 对新型梯形波脉宽调制技术的变频调速系统进行了分析和研究, 系统地阐述了各部分电路组成、工作原理和波形变换, 对“ Δ ”脉宽调制器作了深入讨论. 实验检测表明, 该技术具有十分理想的抑制谐波的效果, 系统能效比高, 恒转矩与恒功率之间转换平滑.

[关键词] 梯形波, 脉宽调制, 系统原理, 波形变换

[中图分类号] TN761, [文献标识码] B, [文章编号] 1672 1292 (2003)02 0062 05

0 引言

在正弦脉宽调制 (SPWM) 变频调速系统中, 逆变器输出波形除了基波分量外, 还含有丰富的谐波分量, 它不仅会使电机产生脉动转矩, 恶化输出特性, 使系统运行的稳定性降低, 还会使电机附加损耗增加, 系统的能量转换效率降低. 因此, 谐波对调速性能的不良影响是一个具有普遍性的严重问题, 对 PWM 逆变器的谐波抑制和消除是一个十分重要的研究课题^[1].

采用梯形波脉宽调制代替正弦波脉宽调制是一种新型的脉宽调制技术, 简称为 TPWM 技术. 对 TPWM 技术的研究和实验表明, 在调幅比为 1 时选择合适的梯形波斜坡部分与平直部分的比值 (约为 0.4), 可以使逆变器输出波形中的 5 次谐波为零, 7 次谐波最大值约占基波幅值的 3.2%, 其余 11 次、13 次等谐波幅值几乎可以忽略, 基波分量幅值约是输入直流电压的 1.03 倍, 而 SPWM 逆变器的基波分量只有输入直流电压的 0.87 倍^[2]. 因此采用梯形波脉宽调制技术是抑制谐波, 提高调速系统能量转换效率, 改善运行稳定性的有效途径之一.

1 TPWM 技术的实现

1.1 TPWM 调速系统的组成及原理

TPWM 调速系统框图如图 1 所示. 突加速度给定信号 U_{gd} , 通过软启动器和绝对值放大器产生频率控制信号 U_f , 由 U/f 变换器产生频率为 $18f_0$ 的时钟脉冲, 经三分频器分为 $6f_0$ 脉冲, 触发三相方波发生器产生频率为 f_0 的三相互差 120° 的方波, 经梯形波发生器转换为恒幅三角波, 限幅电路限幅得到梯形波. 梯形波输入“ Δ ”脉宽调制器, 可得到三相双极性梯形脉宽调制波.

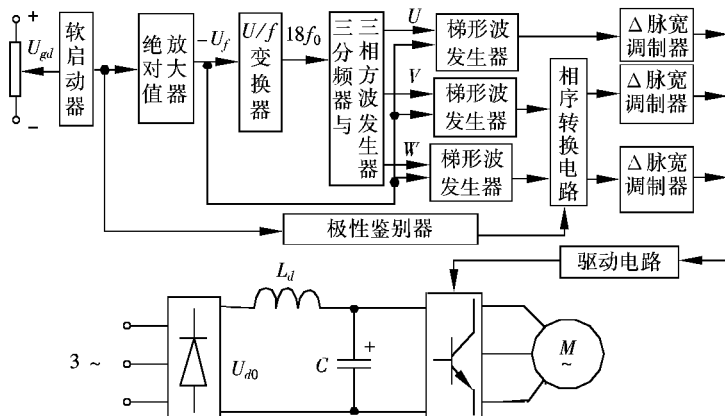


图 1 梯形脉宽调制型变频调速系统框图

收稿日期: 2003 03 17.

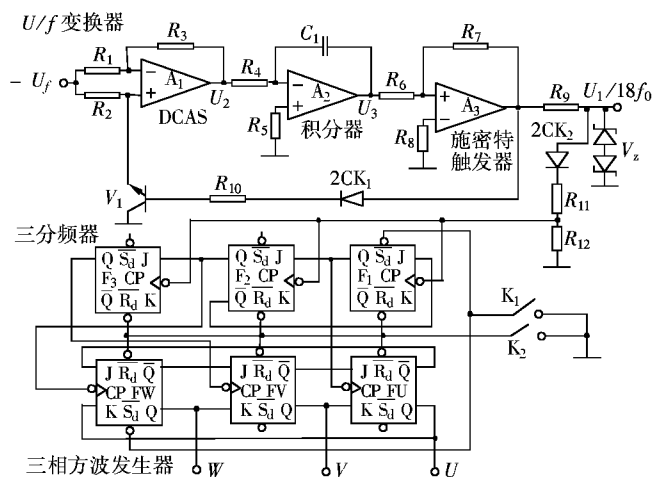
作者简介: 史国生, 1951, 南京师范大学电气与电子工程学院副教授, 主要从事电力传动控制、PLC、传感器检测的教学与研究.

1.2 TPWM 调速系统各部分技术实现

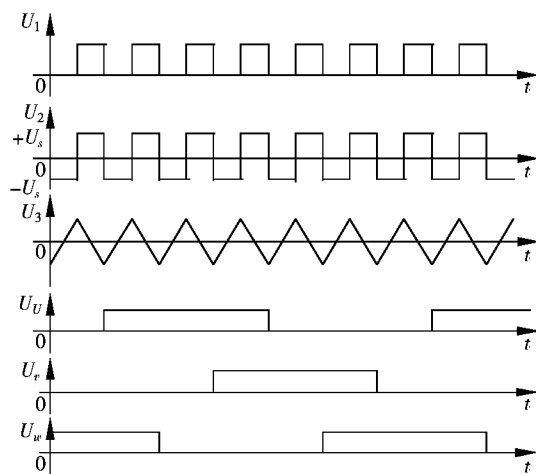
1.2.1 U/f 变换器和三相方波发生器

图2所示为 U/f 变换器、三分频器和三相方波发生器电路及波形变换图。图(a)中 U/f 变换器由数模模拟开关 A_1 (简称 DCAS)、积分器 A_2 和施密特触发器 A_3 组成。施密特触发器的输出电压 U_1 控制 DCAS 的开关状态。DCAS 输出方波 U_2 的频率与 U_f 大小成正比, 并且幅值正、负对称, 使积分器交替地正、反向积分产生三角波。只要适当地选择 DCAS 的各个电阻并使施密特触发器为单位增益, 则 $U_{f_{\max}}$ 与输出频率之间符合下式关系:

$$U_{f_{\max}} \times \frac{1}{R_4 C_1} \times \frac{1}{2 \times 18 f_{0\max}} = 2 U_Z \quad (1)$$



(a) U/f 变换器、三分频器和三相方波发生器电路



(b) U/f 变换器、三相方波发生器的波形图

图2 U/f 变换器和三相方波发生器电路及实测波形

若取最大频率控制信号 $U_{f_{\max}} = 10 \text{ V}$, 稳压管电压 $U_Z = 10 \text{ V}$, $f_{0\max} = 1/18 T_{\min}$, 根据公式(1) 即可选出电阻 R_4 和电容 C_1 。图2(a)中电阻 R_2 的取值应保证在 U_f 最小时开关三极管 V_1 饱和导通, 在 U_f 最大时 V_1 的集电极电流要小于 $I_{cm\max}$ 。

U/f 变换器输出电压 U_1 是方波脉冲列。其频率为 $18f_0$, 输入到由 F_1 、 F_2 、和 F_3 三个 JK 触发器构成的三分频器, 分频后触发三相方波发生器。

工作前, 三分频器和三相方波发生器的清零开关 K_2 应闭合清零, 然后置位开关 K_1 闭合置初始状态: 使三分频器的 $Q_{F1} = 1$, $Q_{F2} = 0$, $Q_{F3} = 0$, 三相方波发生器的 $U_U = 0$, $U_V = 0$, $U_W = 1$ 。工作时, 应断开 K_1 、 K_2 。三相方波发生器在三分频器输出脉冲的循环触发下输出三相脉宽为 180° 的对称方波, 波形如图2(b)所示。

1.2.2 梯形波发生器

梯形波发生器是由 DCAS 和积分器构成的恒幅三角波产生器与射极跟随器组成, 其电路和各点波形如图3所示。改变输入方波 U_U 的频率, 即可改变三角波的频率。为了获得恒幅三角波, 将频率控制信号 U_f 也作为这里 DCAS 的输入信号。这样, 当积分器输入的 U_U 方波频率升高时, U_f 值也增大, 而使 DCAS 的输出电压 U_{A4} 提高, 可以保证积分器输出三角波的幅值不变。恒幅三角波经限幅后输出的是梯形波。为了使积分器输出的三角波幅值恒定在 $\pm U_{\Delta\max} (= \pm 10 \text{ V})$, 时间常数 $R_4 C_1$ 可由下式求出:

$$U_{f_{\max}} \times \frac{1}{R_4 C_1} \times \frac{1}{2 f_{0\max}} = 2 U_{T\max} \quad (2)$$

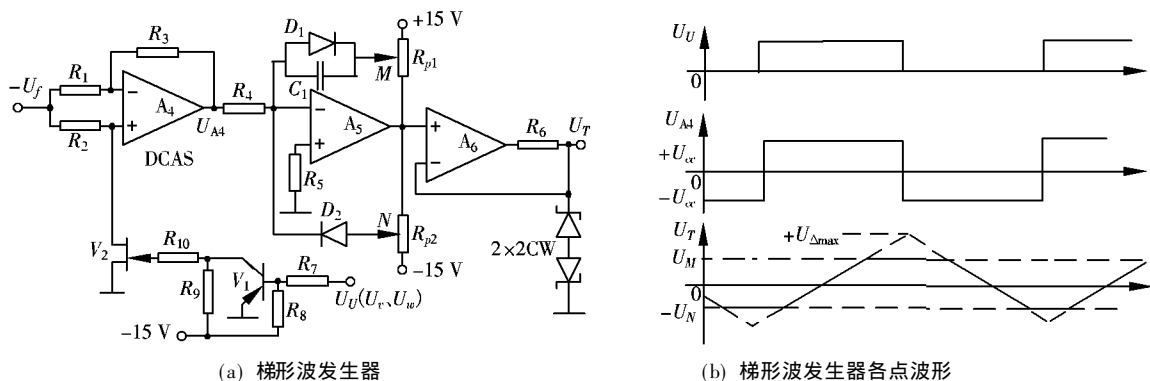


图 3 梯形波发生器电路及输出梯形波

1.2.3 梯形波的“ Δ ”脉宽调制器

“ Δ ”脉宽调制器是系统中关键环节,其线路和波形如图 4 所示。图中输入信号 U_T 是梯形调制波;比较器 A_7 输出的开关电压 U_K 是积分器 A_8 产生系列三角(Δ)载波 U_Δ 的开关函数,它决定 TPWM 逆变器中功率开关元件的开关状况。图 4(a) 中 R_3 与 R_4 之间的关系应满足下式关系:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{1}{2R_1CN_{\max}} \quad (3)$$

式中: N_{\max} 为逆变器件每秒的最大换相次数,应根据换相损耗的系统效率考虑确定。

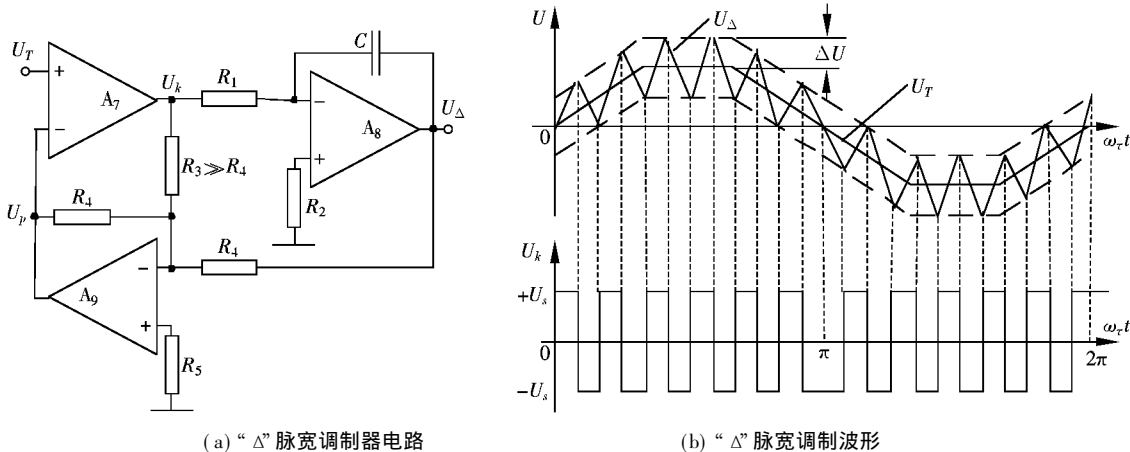


图 4 梯形波的“ Δ ”脉宽调制器及波形

1.2.3.1 梯形波的“ Δ ”脉宽调制器调制原理^[3]

当 U_T 从零开始上升时, A_7 输出的 U_K 迅速上升到正饱和值 $+U_s$, 经积分器 A_8 反向积分, 输出电压 U_Δ 负向线性增长。 U_Δ 经 R_4 , U_K 经 R_3 都加到反相求和放大器 A_9 的反相端。由于 $R_3 \gg R_4$, U_Δ 的作用将远大于 U_K 的作用, 所以 A_9 的输出电压 U_P 正上升, 一旦 $U_P > U_T$, A_7 输出的 U_K 迅速翻转为负向饱和电压值 $-U_s$, 其“ Δ ”脉宽调制波形如图 4(b) 所示。三角载波 U_Δ 在梯形波 U_T 上下 $2\Delta U$ “带宽”内振荡, 并且上、下幅值是相等的, 于是迫使 U_Δ 以脉动频率围绕梯形波 U_T “振荡”, 这种强制振荡保证了 U_Δ 的基波分量和梯形波 U_T 具有相同的幅值, 即 $U_{\Delta 1} = U_T$ 。

1.2.3.2 “ Δ ”脉宽调制分界频率 f_{TL}

当梯形波 U_T 频率升高到一定值时, 将会出现分界频率 f_{TL} , 其大小与 U_T 、电源 U_s 及积分时间常数 R_1C 有关, 这些参数一经确定, 电路就存在一个确定的分界频率 f_{TL} 。

当 $f_T < f_{TL}$ 时, 为恒转矩控制, 可以证明输出电压和频率之比保持恒定:

设 U_{Kn} 和 $U_{\Delta n}$ 分别为 U_K 和 U_{Δ} 第 n 次谐波的幅值. 因 A_8 中输入 R_1 的电流与积分电容 C 中的电流相等, 则有

$$\frac{U_{Kn}}{R_1} = 2\pi f_0 C U_{\Delta n} \quad (4)$$

式中: f_0 是逆变器输出的基波频率, 它受控于梯形波频率 f_T , 即 $f_0 = f_T$.

对于基波(即 $n = 1$)来说, 其压频比为:

$$\frac{U_{K1}}{f_0} = |2\pi R_1 C U_{\Delta 1}| \quad (5)$$

由于电路在强迫振荡中, 比较器 A_7 的两个输入信号 U_T 和 U_P 的基波幅值相等, 而 U_P 基波和 U_{Δ} 的幅值也基本相同, 即有 $U_{\Delta 1} = U_T$, 这样(5)式可写成

$$\frac{U_{K1}}{f_0} = |2\pi R_1 C U_T| = \text{常数} \quad (6)$$

由(6)式可见, 当 U_T 一定时, 输出基波电压 U_{K1} 与频率 f_0 之比是恒值.

当 $f_T = f_{TL}$, U_K 是一系列单个的方波, 其基波不随 f_T 变化, 其幅值为

$$U_{K1} = \frac{4 U_s}{\pi} \quad (7)$$

代入(6)式, 可求出分界频率为

$$f_{TL} = \frac{2 U_s}{\pi^2 R_1 C U_T} \quad (8)$$

这样就不需要附加任何环节就能在 f_{TL} 处实现恒转矩与恒功率之间平滑过渡.

2 实验结果

根据公式(3)和(8), 设定分界频率 $f_{TL} = 50 \text{ Hz}$, $U_{TM} = 4 \text{ V}$, $U_s = 12 \text{ V}$, $N_{\max} = 510 \text{ 次/s}$, 可求出“ Δ ”调制器中 $R_1 = 6 \text{ k}\Omega$, $C = 2 \mu\text{F}$, $R_3 = 8.2 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$. “ Δ ”调制器输

表 1 梯形波的“ Δ ”调制电压/频率的实测数据

f_T/Hz	10	20	30	40	50	80	100
U_{K1}/V	1.9	4.1	6.0	8.0	9.9	10	10

出的梯形脉宽调制波 U_K 和载波 U_{Δ} 波形如图 5 所示. 由图 5 可见, 输出电压半个周期内的矩形脉冲数与输出频率成反比, 且能连续变化, 最后过渡到单脉冲方波工作方式.

梯形波的“ Δ ”调制器的电压/频率实测数据如表 1 所示, 由表 1 的数据可绘出实验特性曲线如图 6 所示.

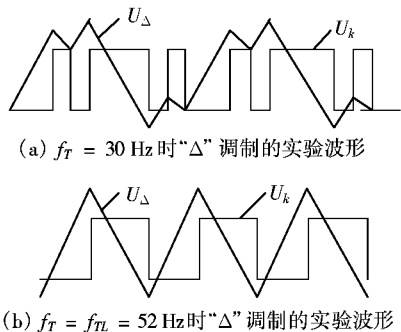


图 5 “ Δ ”调制器的实验波形

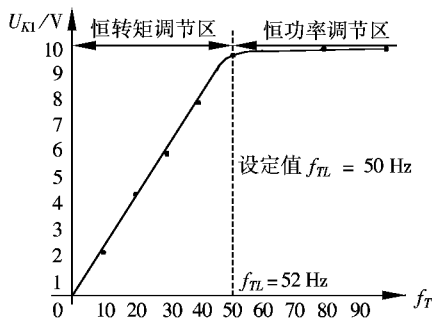


图 6 “ Δ ”调制器的实验特性曲线

图 6 中 $U_{K1} = 10 \text{ V}$ 的分界频率 $f_{TL} = 52 \text{ Hz}$ (其设定值是 50 Hz). 表 1 中实测的数据验证了以上证明, $f_T < f_{TL}$ 时, U_{K1}/f_0 近似为恒值, 是恒转矩工作方式; $f_T \geq f_{TL}$ 时, U_{K1} 电压不随梯形波频率 f_T 变化, 是近似

恒功率工作方式,这两种工作方式可以平滑过渡.

[参考文献]

- [1] Marlen Varnovitsky. Development and Comparative Analysis of a Pulse Width Modulation Strategy[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1984, IE 31(3): 272~ 276.
- [2] 吴安顺. 高效率抑制 PWM 型逆变器谐波的梯形调制信号[J]. 电气传动, 1987, (6): 10~ 14.
- [3] Phoivos, Ziogas D. The Delta Modulation Technique in static PWM Inverters[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1981, IA17(2): 199~ 204.

Study and Practice of A New Type TPWM Technique

Shi Guosheng

(College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: A new type trapezoid wave PWM technique employed in VFVS (varying frequency and varying speed) system was studied. The circuit principle and wave transformation as well as organization of sub circuit are demonstrated systemically. Furthermore, the delta PWM inverter, the key unit in system, are also discussed in paper. Experiment results show that the new technique has an ideal effect in harmonic wave suppression, high efficiency of energy conversion and advantage of smoothly conversion between constant torque and constant power.

Key words: trapezoid wave, pulse width modulation, system principle, wave conversion

[责任编辑: 严海琳]

(上接第14页)

- [4] 乔萍, 闻建平. 2-氯-5-甲基吡啶合成的研究进展[J]. 现代化工, 2001, 21(12): 23~ 26.
- [5] 李肖华, 计建炳, 朱丰国. 分离旋性戊醇与异戊醇萃取剂的选择[J]. 浙江工业大学学报, 1998, 26(2): 104~ 106.

The Separation of 2-Chloro-5-methylpyridine from Mother Liquor

Sun Chunxia, Peng Panyang, Cui Shihai, Wang Yuping

(College of Chemistry and Environmental Science, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, PRC)

Abstract: A $\Phi 24$ mm distillation column was established to separate 2-Chloro-3-methylpyridine and 2-chloro-5-methylpyridine from mother liquor by extractive distillation. The purity of both products was over 95% (wt. %). The results show that the recovered extractant can be reused. The main operational parameters in the extractive distillation process is also discussed.

Key words: extractive distillation, 2-chloro-3-methylpyridine, 2-chloro-5-methylpyridine, mother liquor

[责任编辑: 严海琳]