

# 双变量交-交变频调压过程触发控制策略研究

陶 慧, 乔美英

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

**摘 要:** 介绍了双变量原理, 将调压与变频相结合, 利用有级变频实现全范围无级调速的方法, 建立了基于 MATLAB 的双变量交-交变频调速系统仿真模型。在分析对比传统触发控制方式的基础上, 提出了一种方便实现闭环控制, 同时保证输出电压对称度和正弦度都很好的控制方式-改进的方波法。结果表明: 采用改进的方波法变频调压, 减少了输出波形的谐波成分, 改善了变频器的性能。

**关键词:** 交-交变频; 调压; 双变量原理; 控制策略; 方波法

中图分类号: TM402

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)05-0041-04

## Study on Trigger Control Strategy of Double-Variable Ac-Ac Frequency-Conversion and Voltage-Regulation

Tao Hui, Qiao Meiyang

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China)

**Abstract:** Introduces the double-variable control principle and a method to realize stepless speed control with the combination of variable-frequency and voltage regulation. Sets up the simulation model of double-variable Ac-Ac frequency converter based on MATLAB. Presents a new control method (improved square-wave law) that achieves closed-loop control easily and ensures the output voltage with a good symmetry and sine. The conclusion indicates that the method using the improved square-wave law for variable-frequency and voltage regulation reduces the output waveform's harmonic components and improves frequency converter's performance.

**Keywords:** AC-AC frequency conversion; voltage regulation; double-variable principle; control strategy; square-wave law

### 1 双变量原理和无级调速的实现

交-交变频器由于可采用普通的晶闸管直接变换, 效率高, 特别适合大容量或低速的传动, 在轧钢、矿山、卷扬、船舶推进、水泥、风洞等传动中, 逐步取代了传统的大功率直流调速, 取得了良好的技术经济效益<sup>[1-3]</sup>。

交-交变频的关键是相控理论, 而传统的相控理论方面的核心内容为“ $\alpha$ 角控制原理”, 即单变量控制原理。双变量控制理论是从单变量控制理论发展而来的, 所谓双变量, 即控制角 $\alpha$ 和脉冲宽度 $b$ , 在 $\alpha$ 角控

制基础上加上对脉冲宽度 $b$ 的控制, 即对触发脉冲的后沿进行控制。第一个变量 $\alpha$ 角的控制方法和单变量相控方法相同, 第二个变量 $b$ 有2个作用: 闭锁可能出现的各种环流条件; 引导电流的换向。双变量控制理论不但可以避免产生环流, 而且省去了零电流检测及逻辑控制线路, 使主回路的结构得到简化<sup>[4]</sup>。

从减少成本、控制简单可靠的角度出发, 本系统采用三波头交-交变频器, 采用双变量自然无环流控制方式, 但输出频率是有级的。因为采用双变量控制目的在于通过调整触发脉冲前后沿, 实现电流过零点的有意识控制, 而频率无级调整, 电流过零点往往是随

收稿日期: 2009-06-19

基金项目: 河南理工大学青年基金资助项目(Q2009-27)

作者简介: 陶 慧(1979-), 女, 河南信阳人, 河南理工大学讲师, 硕士, 主要从事电力电子与电气传动的教学及研究工作,

E-mail: taohui@hpu.edu.cn

机的，双变量控制实现困难。因此，无级变频的控制效果反而不如分级变频。晶闸管工频调压方式可以方便地实现速度的无级调节，将调压与变频相结合，可以利用有级变频实现速度无级调节。这里的调压与变频结合包含着2层含义：1) 调速区段的结合。在半速（额定转速的1/2）以下使用交-交变频调速，半速以上采用调压调速；2) 在交-交变频的各分频下实现变频和调压的结合，填补频段间的速度空白，即在交-交变频的各个频率段下（固定频率）调节分频下的输出电压大小<sup>[5-6]</sup>。

## 2 双变量交-交变频调速系统仿真模型的建立

本文的仿真建立在 MATLAB/SIMULINK 环境下，主要使用电力系统（power system blockset）和系统仿真（SIMULINK）2个模块库<sup>[3]</sup>。

双变量交-交变频调速系统仿真模型如图1所示，由三相交流电源、触发单元、晶闸管装置、电机、Powergui 和电压电流测量等组成，其中晶闸管装置有3个单元，这3个单元内部结构相同，都是由2组三相半波反并联而成。触发单元以双变量理论为基础，采用S函数编写，包括U-Generate、V-Generate、W-Generate 3块。Powergui 用于对电压电流波形的谐波含量分析。

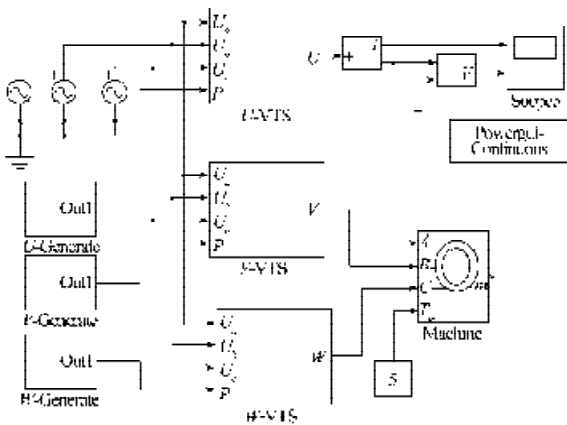


图1 双变量交-交变频调速系统仿真模型  
Fig. 1 The simulation model of two-variables Ac-Ac VVVF system

## 3 常规触发控制策略的分析与比较

常规触发控制策略有余弦交截法、三角波法、梯形波法、方波法。三角波法、梯形波法的调压效果与余弦交截法差别不大，这里不做讨论，本文重点讨论余弦交截法和方波法<sup>[1]</sup>。

### 3.1 余弦交截法调压

余弦交截法以期望输出的余弦波为基准波，截取同步余弦波的交点作为触发时间常数。由余弦交截法可得正、反组变流器的触发角分别为：

$$\alpha_p = \cos^{-1} \left( \frac{rU_{om}}{V_{Lm}} \sin \omega_0 t \right), \quad \alpha_n = \cos^{-1} \left( -\frac{rU_{om}}{V_{Lm}} \sin \omega_0 t \right)$$

式中： $U_{om}$ ——输出电压需用分量的最大峰值；  
 $V_{Lm}$ ——理想空载整流电压。

根据上面2个式子，变频器的调压和调频可以各自独立进行，既可以在最大的输出电压比（ $r=1$ ）下，通过改变输出频率 $\omega_0$ 实现调频，又可以在保持输出频率 $\omega_0$ 不变的情况下，改变输出电压比 $r$ ，实现调压，即“分频调压”。

以下是采用余弦交截法得到的“分频调压”的电压波形和其谐波分析，图2是三分频三分压不调压时（即三分频下）最大电压仿真电压波形和谐波分析，图3为调压系数为 $r=1/12$ 的仿真电压波形和谐波分析。

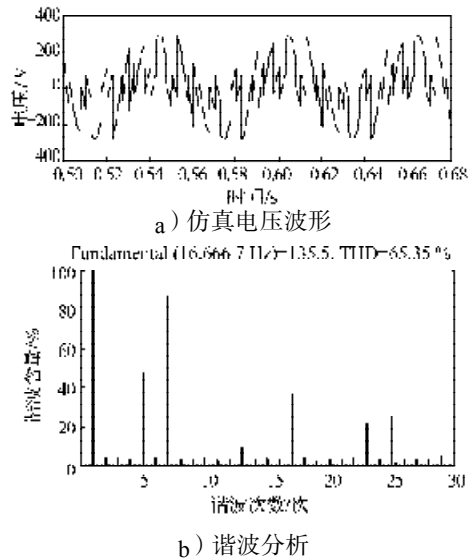


图2 余弦交截法  $r=1/3$  输出电压及谐波含量  
Fig. 2 Waveform and harmonic component of voltage under cosine wave modulation method when  $r=1/3$

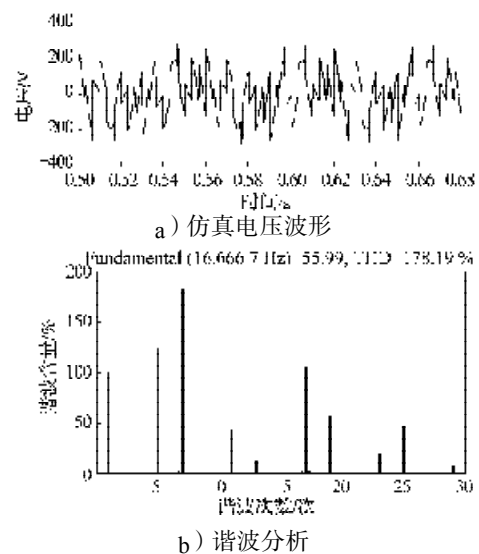


图3 余弦交截法  $r=1/12$  电压波形及谐波含量  
Fig. 3 Waveform and harmonic component of voltage under cosine wave modulation method when  $r=1/12$

通过比较可以看出, 不调压时输出电压的对称度和正弦度都较好, 但调压后的波形, 对称度有所下降, 谐波含量明显增加(总谐波含量由 65.35 % 升到 178.19 %), 触发时间常数有的前移, 有的后移, 移动的幅度也不同。但从波形整体输出的幅值和形状上可以看出输出电压的面积明显下降, 基波含量从不调压时的 135.5 下降到 55.99, 这也说明输出电压的下降。

通过改变基准波的调压系数  $r$ , 使用该方法可以改变输出电压的大小, 但其调压范围相对较小。在三分频下, 调压系数只能做到  $r=1/12$ 。经实际测算, 当调压系数下降到  $1/12$  后, 各触发角度基本保持不变, 此后就失去了调压的作用, 因此该方法在电压深调状态下的效果并不理想。刚进入电压深调状态, 对称性就开始严重下降, 电机脉振很大, 且由于触发时间常数是离散固定的, 因此该方法不适宜用作闭环调速<sup>[6]</sup>。

### 3.2 方波法调压

相对于其它常规分频调压方法方波调压, 对称度最好。在分频调压, 特别是电压深调时, 对称性对电机性能的影响要比对正弦度的影响大得多, 因此, 理论上方波调压较其它调压方法调压效果更好。

采用方波法调压时, 对所有触发时间常数的调整是通过整体后移所有触发脉冲的前沿。下面给出调压系数为  $r=1/3$  和  $r=1/18$  的电压波形和谐波分析, 如图 4、5。方波法调压与其它调压方式相比, 即使在深调压状态下, 输出电压的对称度也保持得较好。同时, 在相同调压深度下, 基波含量明显增加, 说明其带载能力强于其它调压方法, 这对于低频下提高电机的带载能力较为有利。

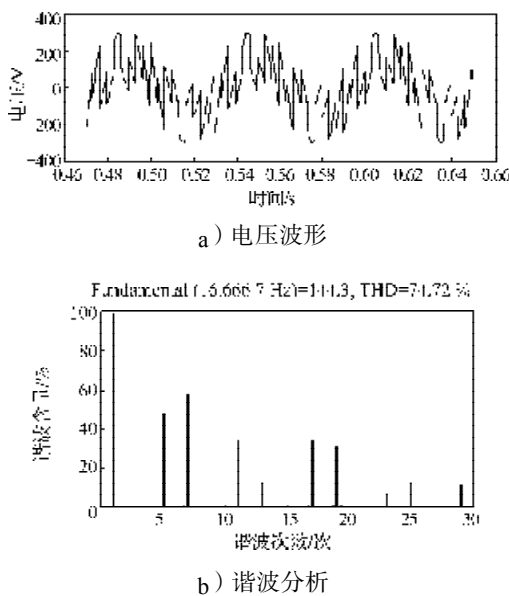


图 4 方波法  $r=1/3$  电压波形及谐波含量  
Fig. 4 Waveform and harmonic component of voltage under square-wave modulation method when  $r=1/3$

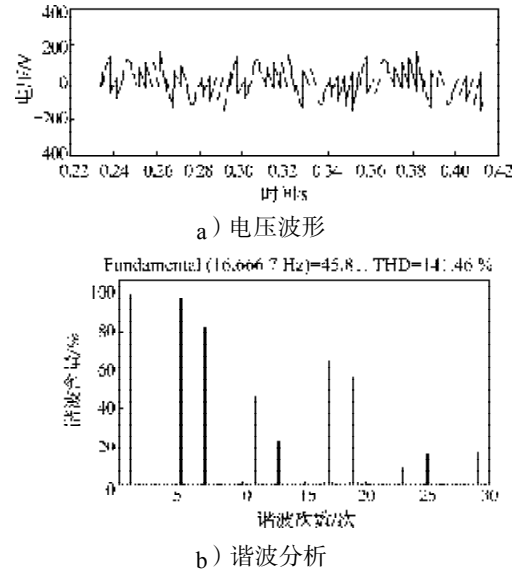


图 5 方波法  $r=1/18$  电压波形及谐波含量  
Fig. 5 Waveform and harmonic component of voltage under square-wave modulation method when  $r=1/18$

方波法调压虽然输出电压的对称度较好, 但输出电压的正弦度不太好, 这是由于方波调制时, 方波本身的正弦度不好。常规“分频调压”方法除方波调压外, 普遍存在着对应不同的调压系数, 必须分别计算出各自的触发时间常数, 计算比较复杂; 本系统属于实时控制, 一旦计算出错, 就会引起触发错误, 有可能引起短路等严重事故。但方波调压是在原先触发脉冲的基础上整体后移, 调节方便。但由于方波控制方式本身的特点, 导致方波控制时即使不调压, 输出电压的谐波含量也较大, 当调压时, 随调压深度的加深, 输出电压的谐波分量还要增加, 调压效果不太理想。

## 4 改进的方波调压法

### 4.1 改进的方波调压法原理

经实验研究, 发现一种能使调压时输出电压对称度和正弦度都较好, 同时又方便实现形成闭环的一种调压方法, 即改进的方波调压法。其原理为在不调压(即调压系数为最大时)将方波控制的触发脉冲时间常数采用双变量控制原理进行正弦度改造, 调压时, 在改造后的时间常数的基础上, 整体后移触发脉冲的前沿。这样只需要一组比较好的触发时间常数就可以完成闭环调压, 相对于实时计算方式, 实现上更为简单, 是一种实用的调压方法。

### 4.2 仿真验证与谐波分析

改进的方波法调压最大电压下和调压系数为  $1/18$  时的输出电压波形及其谐波含量分别如图 6、7 所示。

在相同的调压系数下, 改进的方波法调压与方波法调压相比, 输出电压的基波含量略低, 但谐波含量有明显下降。这说明新方法输出电压的正弦度有较大

改善。同时,通过观察输出电压波形和分析波形的偶次谐波含量,发现输出电压的对称度也较好。

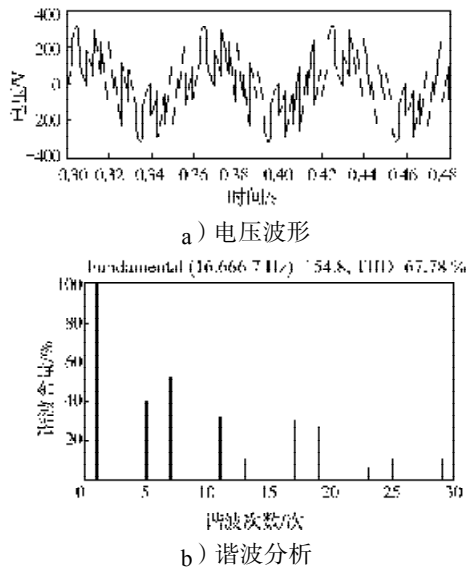


图6 改进的方波法  $r=1/3$  电压及谐波含量

Fig. 6 Waveform and harmonic component of voltage under improved square-wave modulation method when  $r=1/3$

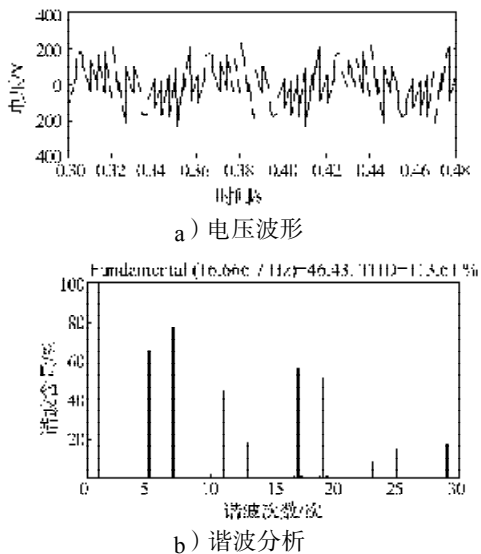


图7 改进的方波法  $r=1/18$  电压及谐波含量

Fig. 7 Waveform and harmonic component of voltage under improved square-wave modulation method when  $r=1/18$

图2~7给出了不同调制比下的谐波含量相对于基波的百分比,下面进一步分析在采用改进的方波法调压时,谐波含量的大小变化情况。调压系数为  $r=1/3$  和  $r=1/18$  的谐波含量的大小比较见表1。

从表1中可看出,随调压深度的增加,除13次谐波外,其它所有谐波含量都在下降,但基波含量的下降幅度最大。虽然一些高次谐波含量如23、25次谐波的下跌幅度也较大,但高次谐波对电路的影响较小。这说明采用改进的方波调压法,主要通过改变基波成分,改变输出电压的大小。

表1 改进的方波法调压不同调压系数下谐波含量比较

Tab.1 Comparison of harmonic component under improved square-wave modulation method with different voltage coefficient

谐波次数 /次	谐波含量		下降比例 /%
	$r=1/3$	$r=1/18$	
基波	154.8	46.43	67
5	43.3	37.3	14
7	70.98	38.2	46
11	43.41	26.5	39
13	8.3	9.2	-11
17	51.1	29.4	42
19	37.5	27.8	26
23	11.2	4.8	57
25	18.8	8.9	53
29	18.3	9.1	50

## 5 结语

采用改进的方波调压法调压时,在正弦度改造后的时间常数的基础上,整体后移触发脉冲的前沿,实现方便,且输出电压对称度和正弦度都很好,因此是一种很好的方便实现形成闭环控制的调压方法。

## 参考文献:

- 李华德.交流调速控制系统[M].北京:电子工业出版社,2003.  
Li Huade. AC Speed-Regulating Control System[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- 张燕宾.变频调速取代其他调速电机[J].自动化博览,2006(5): 28-30.  
Zhang Yanbing. Replace the other Speed Governing Motor by Frequency Control Speed One[J]. Automation Panorama, 2006(5): 28-30.
- 洪乃刚.电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真[M].北京:机械工业出版社,2004.  
Hong Naigang. MATLAB Simulation of Power Electronics and Electric Drive Control System[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- 杜庆楠.交-交变频器的双变量控制理论研究[J].焦作工学院学报,1998,17(4): 276-279.  
Du Qingnan. On the Control Theory of Two-Variable for Triac Cycloconverters[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 1998, 17(4): 276-279.
- 乔美英.双变量交-交变频器控制方法的研究及变频过程分析[D].焦作:焦作工学院,2003.  
Qiao Meiyang. The Study of Double-Variable Cycloconverter Control Method and the Analysis of Frequency Converter Process[D]. Jiaozuo: Jiaozuo Institute of Technology, 2003.
- 谭兴国.多重变结构双变量交-交变频调速专家自适应PID控制策略研究[D].焦作:河南理工大学,2006.  
Tan Xingguo. Study on Expert Self-Adaptive PID Control Strategy of Multiple Variable-Structure Two-Variables Ac-Ac Converter[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2006.

(责任编辑:罗立宇)