

基于脉冲阻塞原理的三相 AC/AC 系统等脉宽斩波控制

郑诗程^{1,2}, 陈 玲¹, 曹小虎¹

(1. 安徽工业大学 电气信息学院, 安徽 马鞍山 243002;

2. 安徽工业大学 电力电子与运动控制安徽省重点实验室, 安徽 马鞍山 243002)

摘要: 针对传统的三相 AC/AC 变频电路特点, 提出了一种新的电路拓扑, 仅用 6 个功率器件即可实现三相 AC/AC 变频功能。提出基于脉冲阻塞原理的等脉宽斩波控制策略, 取代传统的移相控制策略施加于该电路拓扑, 实现了三相输出电压幅值、频率分别可调或同时可调。对等脉宽斩波控制策略进行了详细的理论分析, 根据期望输出电压的不同频率和幅值, 利用面积等效原则, 推导出相应占空比的数学表达式。在 PSPICE 环境下根据脉冲阻塞原理, 对三相 AC/AC 系统进行等脉宽斩波控制仿真, 并设计了三相 AC/AC 系统主电路和基于 FPGA 的控制电路, 完成了相关实验。仿真和实验结果一致, 与文中的理论分析结果也完全一致, 验证了该 AC/AC 变频控制策略的正确性及可行性。

关键词: 脉冲阻塞; AC/AC 变换; 面积等效; 等脉宽; 斩波控制

中图分类号: TM 564

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)03-0062-04

0 引言

目前, 变频传动技术主要集中在 3 个方面: 传统的 AC/DC/AC 变换器; 传统的 AC/AC 周波变换器; 矩阵式变换器。在这 3 种变频传动技术中, 应用较多的是 AC/DC/AC 变换器, 一般称为间接变换器, 其前级常采用三相不控整流电路加上大容量的滤波用电解电容器, 因而电路功率因数较低, 成本较高, 且电解电容的寿命有限^[1-3]; 周波变换器虽然省却了中间直流环节, 控制简单, 但是, 由于其采用传统的移相控制方式, 故功率因数很低, 而且功率器件较多, 导致成本也较高, 且只能在基频以下变频; 矩阵式变换器是近年来发展的一种新的直接变频技术, 可以实现基频以上变频, 在有些中/大功率场合已经投入应用, 但是, 其功率器件多, 控制复杂, 成本高, 一般不用于小功率系统^[4-11]。

现对传统的 AC/AC 变频技术进行新控制原理的探索和研究, 提出了一种新型 AC/AC 直接变频技术, 并设计了采用 FPGA 为控制核心的三相 AC/AC 系统, 和传统晶闸管移相控制的 AC/AC 系统相比, 本装置具有成本低、体积小、重量轻、控制简单、功率因数高等优点^[12-14]。

1 传统 AC/AC 变频电路

传统的三相 AC/AC 变频电路是由三组输出电压相位各差 120° 的单相 AC/AC 变频电路组成, 主

要用于大功率的调速系统。图 1 是单相 AC/AC 变频电路原理图, 电路由反并联的晶闸管变流电路(P 和 N)构成。

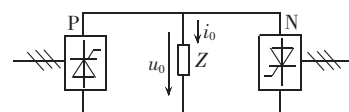


图 1 单相 AC/AC 变频电路原理图

Fig.1 Schematic diagram of single-phase AC/AC converter

变流器 P 和 N 都是相控整流电路, P 组工作时负载电流 i_0 为正, N 组工作时 i_0 为负。让 2 组变流器按一定的频率交替工作, 负载就得到该频率的交流电。改变 2 组交流器的切换频率, 就可以改变输出角频率 ω_0 ; 改变变流电路工作时的控制角 α , 就可以改变交流输出电压的幅值。为了使输出电压 u_0 的波形接近正弦波, 可以按正弦规律对 α 角进行调制, 如图 2 波形所示, 可在半个周期内让正组变流器 P 的 α 角按正弦规律从 90° 逐渐减小到 0° 或某个值, 然后再逐渐增大到 90°。这样, 每个控制间隔内的平均输出电压就按正弦规律从零逐渐增至最高, 再逐渐减低到零, 如图 2 中虚线所示。另外半个周期可对变流器 N 进行同样的控制。

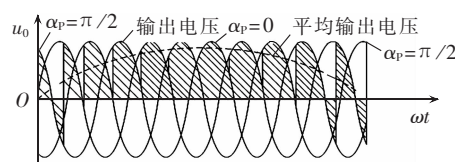


图 2 单相 AC/AC 变频电路输出电压波形

Fig.2 Output voltage waveform of single-phase AC/AC converter circuit

图 2 所示的波形是变流器 P 和 N 都是三相半波相控电路时的波形。可以看出,输出电压 u_0 并不是平滑的正弦波,而是由若干段电源电压拼接而成。在输出电压的一个周期内,所包含的电源电压段数越多,其波形就越接近正弦波。因此,图 1 中的交流电路通常采用 6 脉波的三相桥式电路或 12 脉波变流电路。AC/AC 变频电路的优点是:只用一次变流,效率较高;可方便地实现四象限工作;低频输出波形接近正弦波。缺点是:接线复杂,如采用三相桥式电路的三相 AC/AC 变频器至少要用 36 只晶闸管;受电网频率和变流电路脉波数的限制,输出频率较低;输入功率因数较低;输入电流谐波含量大。

2 三相 AC/AC 系统

2.1 基本原理

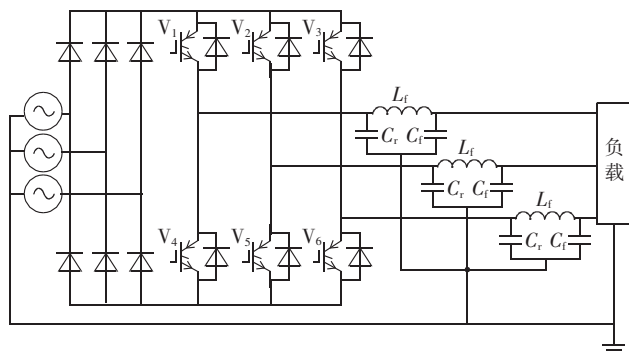
交流调压电路是利用可控的电力电子器件组成双向开关,把输入到负载的正弦交流电能按一定规则周期性地接通和关断,通过控制一个周期中通断时间的占空比,即可控制输出到负载的电压有效值。其控制方式一般有整周波通断控制、相位控制和斩波控制 3 种^[15]。其中,斩波控制就是利用 PWM 控制技术,将交流电压波形斩控成一系列脉冲波,改变脉冲的占空比即可调节输出电压的大小,和整周波通断控制与相位控制相比,斩波控制能够容易获得连续的输出电压,并且波形中只含有高次谐波分量。

虽然采用斩波控制的交流调压电路具有一些优点,但仅获得输出电压的幅值可调而不能实现频率可调,基于此,本文对传统的斩波调压电路进行了改进,在斩波控制的前级增加了不控整流电路,通过对电网电压的不控整流,获得了具有 6 个网频正弦半波的脉动输出电压,同时,通过对网频正弦半波的周期性阻塞,实现了三相 AC/AC 功能。相关电路拓扑及原理如图 3 所示。图 3(b)中, u_i 为三相输入电压波形; u_{Pa} 、 u_{Pb} 、 u_{Pc} 和 u_{Na} 、 u_{Nb} 、 u_{Nc} 为相应的控制信号时序,其数字 1~6 分别对应图 3(a)中的功率器件 $V_1 \sim V_6$; u_{oa} 、 u_{ob} 、 u_{oc} 为三相输出电压波形。根据控制规则可知,输出电压和输入电压的频率关系为

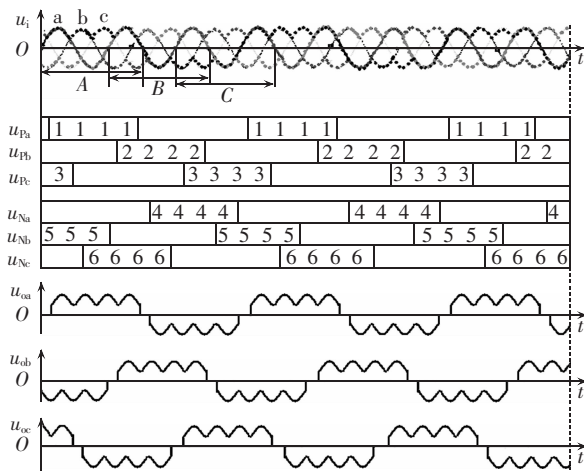
$$f_o = \frac{3f_i}{2N+1} \quad N=1, 4, 7, 10, \dots \quad (1)$$

由图 3 可知,如果对图 3(a)中的各个功率器件施加类似于图 3(b)所示的控制信号,即按照一定的控制规律让各个 120° 电角度的电网电压波形完全通过,则可以获得不同频率的输出电压波形;图 3(b)中是以 $N=4$ 为例,则输出电压的频率为 16.7 Hz。由此即可实现输出电压的频率可调。

为了进一步实现输出电压的幅值可调,可以采用传统的斩波调压控制方式,即在图 3(b)所示的控制信号中进行相应的斩波控制。图 4 为采用等脉宽斩波控制方式时各功率器件的相关控制信号。



(a) 电路拓扑



(b) 输出电压波形和控制规则

图 3 基于脉冲阻塞方式的三相 AC/AC 变频系统拓扑及原理

Fig.3 Topology and schematic diagram of three-phase AC/AC system based on plugged pulse principle

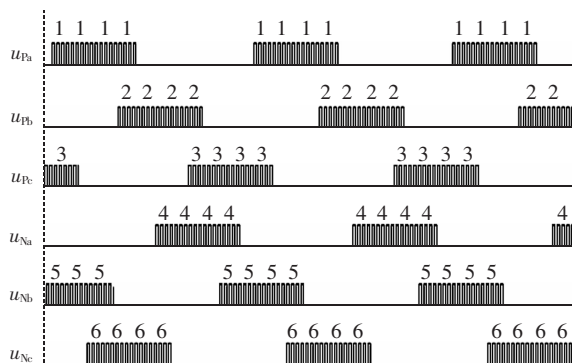


图 4 功率器件的斩波控制信号

Fig.4 Chopping control signals of power devices

2.2 控制规律

控制理论中有一个重要的结论:冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时,其效果基本相同。冲量即指窄脉冲的面积。这里所说的效果基本相同,是指惯性环节的输出响应波形基本相同。如果把各输出波形用傅里叶变换分析,则其低频段非常接近,仅在高频段略有差异。该原理称之为面积等效原理。

根据面积等效原理,若要使输出电压波形与期望的工作电压波形等效,则半个输出电压周期内包含的 N 个经过高频脉冲信号斩控后的网频正弦波形包围的面积之和必须与期望工作电压波形包围的面积相等。

由于控制输出电压的幅值归根到底是控制每个网频正弦半波的幅值,而每个网频正弦波形采用的是斩波调压,所以必须先计算出每个经过高频脉冲信号斩控后网频正弦波形包围的面积。

设网频正弦波形经过高频脉冲信号斩控后所得到的电压波形如图 5 所示,设网频正弦电压的幅值为 U_{im} , 频率为 f_i , 周期为 T_i , 角频率为 ω_i , 则网频正弦波形经过高频脉冲信号斩控后所得到的电压波形可表示为

$$u_i = U_{im} \sin(\omega_i t) \quad (2)$$

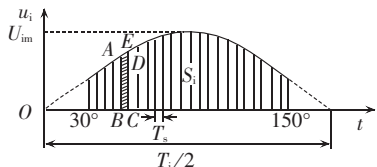


图 5 高频脉冲信号斩控后的网频正弦电压波形

Fig.5 Waveform of grid voltage chopped by high frequency pulse signal

设高频脉冲斩控信号的频率为 f_s , 周期为 T_s , 占空比为 D , 则每个经过高频脉冲信号斩控后网频正弦波形包围的面积 S_i 近似为

$$S_i = \sum_{n=\frac{T_i/12}{T_s}-1}^{\frac{5T_i/12}{T_s}-1} \int_{nT_s}^{(n+D)T_s} U_{im} \sin(\omega_i t) dt \quad (3)$$

其中, n 为第 n 个积分单元。

由式(3)可以看出, 每个经过高频脉冲信号斩控后网频正弦波形包围的面积 S_i 仅与高频控制脉冲的占空比 D 有关, 但两者之间的关系是非线性的。只要当高频脉冲斩控信号的频率 f_s 足够大时, 图中每个积分单元的面积即曲边梯形的面积 S_{ABCE} 就可以用梯形上底作为高、梯形高作为宽的矩形面积 S_{ABCD} 来代替。这样, 每个经过高频脉冲信号斩控后网频正弦半波包围的面积 S_i 可以表示为

$$S_i = \sum_{n=\frac{T_i/12}{T_s}-1}^{\frac{5T_i/12}{T_s}-1} (DT_s) U_{im} \sin(\omega_i n T_s) = DT_s U_{im} \sum_{n=\frac{T_i/12}{T_s}-1}^{\frac{5T_i/12}{T_s}-1} \sin(\omega_i n T_s) \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 经过近似等效计算后, 每个经过高频脉冲信号斩控后网频正弦半波包围的面积 S_i 与高频斩波控制脉冲的占空比 D 成正比。因此, 要控制每个经过高频脉冲信号斩控后的网频正弦半波包围的面积 S_i , 只需控制高频斩波控制脉冲占空比 D 即可。

所谓的等脉宽控制方式是指, 对每个通过开关的输入电压的正弦波形(即半个输出电压周期内包含的 N 个网频正弦波形)均采用相等脉宽(相同的占空比)的高频(频率为 f_s)脉冲信号进行斩控, 则输出电压的每个网频正弦波形的峰值都相等。

等脉宽控制的面积等效原理如图 6 所示, 设期望工作电压的峰值为 U_{om} , 频率为 f_o , 周期为 T_o , 角频率为 ω_o , 则期望工作电压波形可表示为

$$u_o = U_{om} \sin(\omega_o t) \quad (5)$$

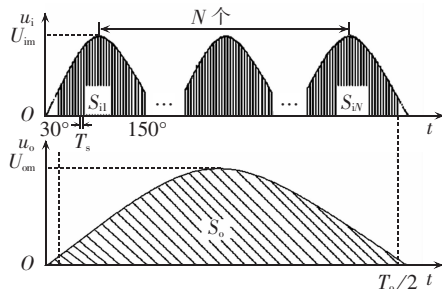


图 6 等脉宽控制的面积等效原理图

Fig.6 Area equivalent rule of equal pulse width control

期望工作电压波形半个周期包围的面积 S_o 为

$$S_o = \int_0^{T_o/2} U_{om} \sin(\omega_o t) dt = \frac{2U_{om}}{\omega_o} \quad (6)$$

由于采用等脉宽控制, 因此期望工作电压波形半个周期内包含的 N 个经过高频脉冲信号斩控后的网频正弦波形的形状都相同, 且包围的面积也都相等, 均为 S_i , 故根据面积等效原理有

$$S_o = N S_i \quad (7)$$

将式(4)和式(6)代入式(7)可得:

$$\frac{2U_{om}}{\omega_o} = N D T_s U_{im} \sum_{n=\frac{T_i/12}{T_s}-1}^{\frac{5T_i/12}{T_s}-1} \sin(\omega_i n T_s) \quad (8)$$

由式(8)可得占空比为

$$D = \frac{2U_{om}}{\omega_o N T_s U_{im} \sum_{n=\frac{T_i/12}{T_s}-1}^{\frac{5T_i/12}{T_s}-1} \sin(\omega_i n T_s)} \quad (9)$$

故输出电压幅值为

$$U_{om} = \frac{1}{2} \omega_o N D T_s U_{im} \sum_{n=\frac{T_i/12}{T_s}-1}^{\frac{5T_i/12}{T_s}-1} \sin(\omega_i n T_s) \quad (10)$$

由式(1)、式(5)和式(10)可得输出电压为

$$u_o = \left[3 \pi f_i N D T_s U_{im} \sum_{n=\frac{T_i/12}{T_s}-1}^{\frac{5T_i/12}{T_s}-1} \sin(\omega_i n T_s) \right] \div (2N+1) \times \sin \frac{3\omega_i t}{2N+1} \quad (11)$$

式(11)就是采用等脉宽控制时三相 AC/AC 变频系统的输出电压表达式。该式说明, 调节输出电压波形的半个周期内包含网频正弦波形的个数 N 和高频斩控信号的占空比 D , 就可实现对输出电压的调频和调压。

3 仿真与实验结果

根据上述控制策略, 采用等脉宽控制方式, 本文在 PSPICE 环境下分别进行了不同输出频率时的仿真; 同时, 设计了系统主电路和基于 FPGA 的系统控

制电路,采用VHDL语言完成了系统的软件设计,实现了相应的功能^[16-17]。图7、图8是在阻性负载条件下,输出频率为16.7 Hz($N=4$)时的输出电压仿真和实验波形。

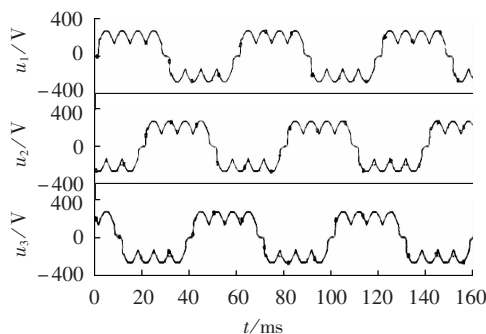


图7 输出电压仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms of output voltage

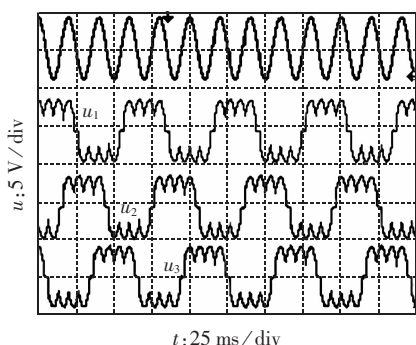


图8 输出电压实验波形

Fig.8 Experimental waveforms of output voltage

由图7和图8可知,仿真和实验结果完全相同,从而验证了该控制策略的正确性和可行性。

4 结论

多年来,在各种节电方案中,人们更多关心的是大、中容量系统,并且为之进行了大量卓有成效的工作。而各种小容量系统数量多,其消耗的电能也相当可观。如果小容量系统成本能够降低到可接受程度,则应用前景非常广阔。基于此,本文研究了成本低、体积小、控制简单、功率因数高的小容量AC/AC变频系统。

参考文献:

- [1] 王兆安,黄俊. 电力电子变流技术[M]. 4版. 北京:机械工业出版社,2002:127-131.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2003:184-188.
- [3] 林渭勋. 电力电子技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,1990:316-320.
- [4] YOON Youngdoo, SUL Seungki. Carrier-based modulation technique for matrix converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(6):1691-1703.
- [5] LUO Fanglin, PAN Zhiyang. Sub-envelope modulation method to reduce total harmonic distortion of AC/AC matrix converters [C]//IEEE Conference on Industrial Electronics. Singapore:[s.n.],

2006:823-829.

- [6] 王汝田,王建勋,纪延超,等. 3×4 矩阵变换器[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):96-101.
WANG Rutian, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. 3×4 matrix converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 96-101.
- [7] 张志学,马皓. 矩阵变换器的电流控制策略[J]. 中国电机工程学报,2004,24(8):61-66.
ZHANG Zhixue, MA Hao. Current control strategies for matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8):61-66.
- [8] 刘勇,贺益康. 矩阵式变换器交-交直接变换控制分析[J]. 电网技术,2002,26(2):37-40.
LIU Yong, HE Yikang. An analysis of AC-AC direct transformation control for the matrix converter[J]. Power System Technology, 2002, 26(2):37-40.
- [9] 张晓峰,何必,林华,等. 矩阵变换器的一种安全换流策略[J]. 中国电机工程学报,2008,28(18):12-17.
ZHANG Xiaofeng, HE Bi, LIN Hua, et al. Safe commutation for strategies for matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18):12-17.
- [10] 马星河,赵军营,汪旭东,等. 矩阵变换器电流控制策略[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):56-59.
MA Xinghe, ZHAO Junying, WANG Xudong, et al. Current control strategy of matrix converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2):56-59.
- [11] 权建洲,吴保芳,孙容磊,等. 基于前馈补偿的SPWM矩阵变换器控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):88-94.
QUAN Jianzhou, WU Baofang, SUN Ronglei, et al. A compensation method for SPWM matrix converter based on feed-forward control[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5):88-94.
- [12] ZHOU Qianzhi, WU Weihua, LIN Jianwei. AC SPWM cycloconverter based on an extended chopper scheme[C]//IEEE Conference on Power Electronics, 7th, EXCO. Daegu, Korea:[s.n.], 2007:1033-1037.
- [13] ZHOU Qianzhi, LIN Jianwei, LIU Yanfei. Chopper-cycloconverters for energy saving in motor control[C/CD]//IEEE Conference on Industrial Electronics. Singapore:[s.n.], 2008.
- [14] ZHOU Qianzhi, WU Weihua. AC-AC conversion with carrier frequency of electric network and application prospect[C]//IEEE Conference on Industrial Electronics. Harbin, China:[s.n.], 2007:1564-1568.
- [15] 杨荫福,段善旭,朝泽云. 电力电子装置及系统[M]. 北京:清华大学出版社,2006:154-158.
- [16] 潘松,黄继业. EDA 技术应用教程[M]. 3版. 北京:科学出版社,2006:64-88.
- [17] 苏宏于. PSPICE 电路编辑程序设计[M]. 北京:国防工业出版社,2004:35-48.

(编辑:李育燕)

作者简介:

郑诗程(1972-),男,安徽合肥人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子功率变换技术、太阳能光伏发电技术等(E-mail: zsc108@ahut.edu.cn);

陈玲(1982-),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子功率变换技术;

曹小虎(1986-),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子功率变换技术。

(下转第70页 continued on page 70)

Equal pulse width chopping control based on plugged pulse principle in three-phase AC/AC system

ZHENG Shicheng^{1,2}, CHEN Ling¹, CAO Xiaohu¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Anhui University of Technology,
Maanshan 243002, China; 2. Key Lab of Power Electronic & Motion Control of
Anhui Province, Anhui University of Technology Maanshan 243002, China)

Abstract: A circuit topology of three-phase AC/AC system is presented, which needs only six power devices to realize the three-phase AC/AC frequency conversion. The traditional phase-shifted control strategy is replaced by the equal pulse width chopping control strategy based on plugged pulse principle to regulate the amplitude and frequency of output voltage separately or simultaneously. The equal pulse width chopping control strategy is analyzed in detail and the mathematic expression of duty cycle is deduced based on the area equivalent rule according to different frequency and amplitude of anticipated output voltage. Under the environment of PSPICE, the three-phase AC/AC system with the equal pulse width chopping control strategy is simulated. Its main circuit and FPGA-based control circuit are designed and tested. The experimental results are consistent with the simulation results, completely same as the theoretical analysis, which verifies the correctness and feasibility of the introduced control strategy.

Key words: plugged pulse; AC/AC conversion; area equivalent; equal pulse width; chopping control