

农用风机与水泵的劈零矢量 脉宽调制(PWM)调速研究*

成 立

(江苏理工大学)

摘 要 为了在农村泵与风机中实行节电,采用了高频劈零矢量脉宽调制(PWM)变频器,激励一台 220 kW 鼠笼式异步电动机,通过拖动一台风机所做的数字仿真和性能试验,带载转矩脉动很小,运行平稳,电机损耗较小,效率较高,说明了该 PWM 技术用于风机水泵调速中的可行性和经济性。

关键词 农用泵与风机 数字式 PWM 变频器 计算机仿真 交流调速装置

现有的农用泵与风机,绝大多数由于容量偏大,压头偏高或是不经常满负荷运转,不得不依靠风门或闸阀进行节流调节,浪费掉大量宝贵的电力。泵与风机的耗电量与其转速的立方成正比,若把节流调节改为转速调节,并用先进的 PWM 控制技术,其耗电量便可按转速立方的比例衰减。基于这一经济性和实用性的考虑,本文对风机水泵的劈零矢量 PWM 法做了一些研究工作。

1 优化电机磁链轨迹的劈零矢量 PWM 法

1.1 劈零矢量 PWM 理论

高频劈零矢量 PWM 法是相对于正弦 PWM 法^[1]提出的。为了克服正弦 PWM 法电机转矩脉动较大的缺点,将某一非零矢量中间的零矢量劈开,分为若干个零矢量,并把它们分布在非零矢量中,见图 1,使电机磁链 λ 呈准圆形均匀旋转。对于劈开的零矢量,可选择时间分布策略:每隔时间 T_0 切入一相应的零矢量,其作用时间是仅与变频器同步频率有关的常数 t_0 。

1.2 磁链幅值控制-磁链轨迹优化方法

欲使磁链轨迹逼近一个圆,只需增加逼近圆形的多边形边数。但因受控单元转速和变频器开关器件损耗的限制,通常只采用具有一定边数的多边形。设磁链轨迹(图 2)是具有 60° 周期性和 30 偶对称性的多边形,利用傅氏级数的谐波分析可知,磁链轨迹中仅含有 $6N$ ($N = 1, 2, \dots$) 次谐波分量。消除这类谐波分量,就可完全去除整个频率范围内的所有谐波分量。

图 2 磁链幅值 R (φ 为 φ 的偶函数 ($\varphi \in [0, 360^\circ]$), 即 $R(\varphi) = R(-\varphi)$ 。定义其 $6N$ 次谐波

收稿日期: 1998-04-10

* 江苏省应用基础研究项目“交流调速系统的仿真研究”部分内容
成 立, 副教授, 镇江市 江苏理工大学电气工程系, 212013

分量幅值为

$$A_{6N} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} R(\varphi) \cos(6N\varphi) \cdot d\varphi \quad (N = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

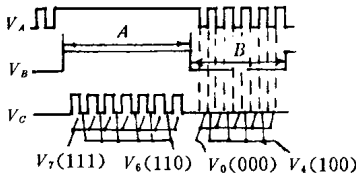


图 1 劈零矢量 PWM 方法示意
Fig 1 Split-zero vector PWM

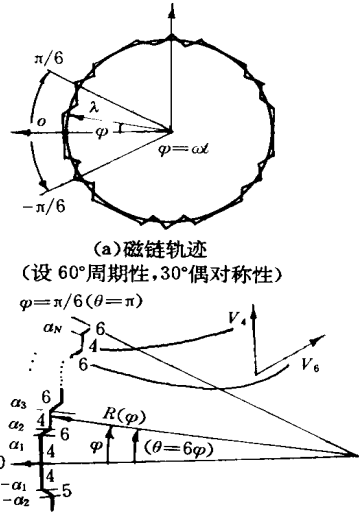


图 2 抑制谐波的磁链轨迹
Fig 2 Flux locus for hamonic reduction

令 $\theta = 6\varphi$ 上式 A_{6N} 记为 A_N , 则

$$A_N = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/6} R(\frac{\theta}{6}) \cos(N\theta) \cdot d\theta \quad (2)$$

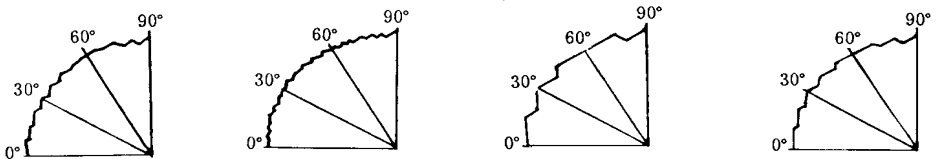
如欲消除 $6N$ 以下次谐波, 只需令

$$A_1 = A_2 = \dots = A_N = 0 \quad (3)$$

利用 Newton-Raphson 法求解方程组(3), 可获得 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ 的值。当 N 取 2, 4, 6, 10 时, 算出的最佳开关角 $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ 如表 1 所示。对应的磁链轨迹见图 3。解一系列三角形, 就可得到各边长 l_1, l_2, \dots, l_{N+1} , 于是各非零矢量作用时间 $t_{nz i}$ 也相应确定

$$t_{nz i} = \frac{l_i}{l_i} t_{nz i} \quad (4)$$

式(4)中 $t_{nz i} = 1/f_e$ (其中, f_e 为额定同步频率)。由表 1 中 N 的不同取值, 可得到图 3 不同磁链幅值波动的极大值 ΔR_{max} , 如表 2 所示。



a 消除 6, 12 次谐波 b 消除 6, 12, 18, 24 次谐波 c 消除 6, 12, 18, 24, 30, 36 次谐波 d 消除 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60 次谐波

图 3 优化磁链轨迹多边形(零矢量未画)

Fig 3 Resulted loci for hamonic reduction (the zero vectors aren't shown)

表 1 消除谐波的开关角

Tab. 1 Switching angles for harmonic elimination

N	开关角	数值/(°)	N	开关角	数值/(°)
2	α_1	15.38	4	$\alpha_1 \ \alpha_2$	10.25 11.85
	α_2	19.81		$\alpha_3 \ \alpha_4$	20.21 23.93
6	$\alpha_1 \ \alpha_2$	7.67 8.47	10	$\alpha_1 \ \alpha_2$	5.09 5.40
	$\alpha_3 \ \alpha_4$	15.20 17.05		$\alpha_3 \ \alpha_4$	10.13 10.84
	$\alpha_5 \ \alpha_6$	22.63 25.68		$\alpha_5 \ \alpha_6$	15.13 16.30
				$\alpha_7 \ \alpha_8$	20.11 21.78
				$\alpha_9 \ \alpha_{10}$	25.06 27.26

表 2 取不同 N 值时电机磁链幅值波动极大值 ΔR_{max}

Tab. 2 ΔR_{max} as a different value N

N	$\Delta R_{max}/\%$
2	5.00
4	3.99
6	2.17
10	1.37

2 高频劈零矢量 PWM 变频器—M 系统的仿真

2.1 仿真软件设计

对于一个周期内调速系统逆变桥 A 相输出电压 V_A 的劈零情况进行分析, 详见表 3。同理可对三相逆变桥 V_B 、 V_C 的劈零情况进行分析, 从而生成三相 PWM 波形。

该系统农机负载为一台 7-29 型风机, 风量 $Q = 61400 \text{ m}^3/\text{h}$, 全压 $p = 10280 \text{ Pa}$; 选用一台 220 kW、4 极鼠笼式异步电动机拖动; 电源采用劈零矢量 PWM 变频器。笔者使用 Turbo Pascal 5.5 版本, 编写出系统的仿真程序。经调试后运行, 输出一组仿真波形, 如图 4 所示。

2.2 计算机辅助分析

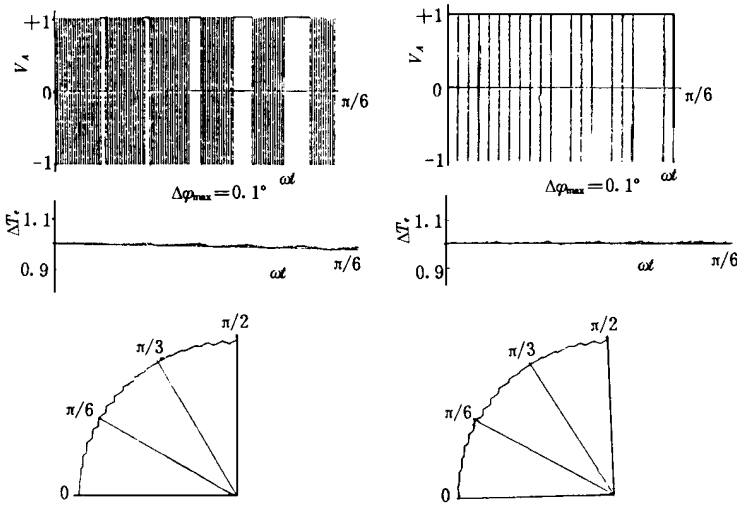
1) 图 4 仿真例 $N = 10$, 消除了 66 次以下的谐波分量; 2) 当给定频率 f_1 不同时, 优化磁链轨迹多边形相同, 均为图 3 d 情形, 这是因为各图皆 $N = 10$, 磁链轨迹优化原理相同; 3) 两小图电机转矩均较平稳, 但比较起来, f_1 愈低, 劈零相对愈密 (开关器件频率 $f_s = 16 \text{ kHz}$ 不变), 相应转矩脉动就愈小, 拖动风机负载运行也就愈平稳。

图 5 为调速系统中电机的起动转矩和转速波形, 可见起动性能良好, 波形与谐波去除法和优化阶梯波 PWM 法的波形^[2,3]相吻合。因风机负载转矩差不多与转速的平方成正比, 电机起动时只需克服一些静摩擦转矩, 故系统只需经约 1.2 s 就进入平稳运行状态。

表 3 逆变桥输出电压 V_A 在一个周期内劈零情况

Tab. 3 Split-zero vector details of voltage revector V_A within one cycle

电角度区间	输出电压(开关模式)	劈零情况
$(0^\circ; 60^\circ)$	$V_4(100)$	一种状态: "1", V_4 劈零
	$V_6(110)$	
$(60^\circ; 120^\circ)$	$V_6(110)$	两种状态, 不劈零
	$V_2(010)$	
$(120^\circ; 180^\circ)$	$V_2(010)$	一种状态: "0", V_3 劈零
	$V_3(011)$	
	$V_3(011)$	
$(180^\circ; 240^\circ)$	$V_1(001)$	两种状态, 不劈零
	$V_1(001)$	
$(240^\circ; 300^\circ)$	$V_5(101)$	一种状态: "1", V_4 劈零
	$V_5(101)$	
$(300^\circ; 360^\circ)$	$V_4(100)$	



a. $f_1 = 10 \text{ Hz}$, $f_s = 16 \text{ kHz}$, $N = 10$, 从上到下依次为:
 $0 \sim 30 \text{ PWM}$ 波形图
 稳态转矩波形图和
 优化磁链轨迹多边形

b. $f_1 = 40 \text{ Hz}$, $f_s = 16 \text{ kHz}$, $N = 10$, 从上到下依次为:
 $0 \sim 30 \text{ PWM}$ 波形图
 稳态转矩波形图和
 优化磁链轨迹多边形

图 4 电压、转矩仿真波形和优化磁链轨迹多边形

Fig 4 $V_A, \Delta T_e$ waveforms and resulted loci obtained by simulation

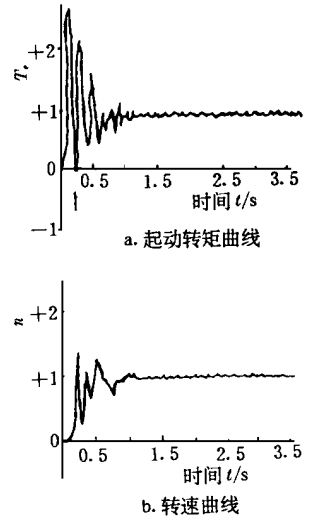


图 5 一组典型的起动特性曲线
 ($N = 4, f_1 = 30 \text{ Hz}, f_s = 16 \text{ kHz}$)
 Fig 5 A set of typical starting curves

3 风机调速装置的性能试验

3.1 硬件电路

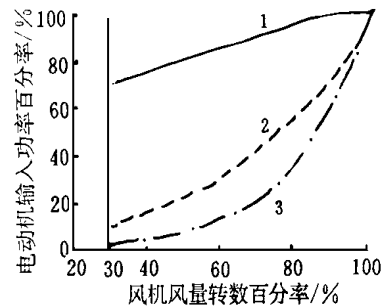
该调速系统主电路采用交-直-交电压型 PWM 逆变器, 以绝缘门极晶体管 IGBT 作为开关器件, 控制单元是以 MCS-96 系列中 8394 BH 单片机为中心控制元件的最小系统。全部硬件电路(电路图省略)结构简单, 工作可靠, 适宜于农村使用。

3.2 软件设计

离线计算出消除 66 次以下谐波分量时每个非零矢量每次作用时间, 将其存放在 8394 BH 内存贮器 RAM 中; 在线工作时依次读出, 并乘以系数 $1/k = f_e/f_1$, 在片内 HSO 口中中断服务程序中写入高速输出时间寄存器。这样无需 CPU 干涉, 到时 HSO 口自动将相应状态改变, 并再次进入中断。整个软件结构占内存约 2K 字节, 仅为正弦 PWM 法^[1]的 1/10。

3.3 调速装置运行试验

用一台 220 kW、4 极电动机拖动一台 7-29 型风机做了试验。采用劈零矢量 PWM 法, 系统能在 1~ 50 Hz 内平滑变速, 在此范围内电机运行平稳, 电流波形畸变小(示波器屏幕摄影



1. 出口风门控制(100% 转速)
 2. 液力耦合器控制;
 3. 劈零矢量 PWM 控制

图 6 风机电动机的耗电特性曲线
 Fig 6 The power-consumed curves of the motor

图略), 并且由于开关频率 f_s (16 kHz) 相当高而消除了频率噪声。

3.4 风机电动机耗电特性曲线

在调速装置试验时, 风机风量在不同控制方法下, 电机电力消耗特性曲线, 如图 6 所示。在输出同样风量的情况下, PWM 控制耗电最小。

4 结束语

1) 仿真结果表明, 采用劈零矢量 PWM 法, 带载转矩脉动很小, 运行平稳, 而且起动性能和调速性能均优良, 与其它 PWM 开关策略^[1~3]相比, 电机损耗较小, 效率较高。

2) 硬件装置实验结果与软件仿真结果吻合, 说明了劈零矢量 PWM 技术有效地改善了电机电流波形, 减小了其谐波分量, 消除了频率噪声。

3) 本课题所做的研究工作表明: 对于大量要求调节流量的单台泵或风机, 或者其它农用电动机, 采用劈零矢量 PWM 调速策略既能满足农业工程要求, 又能节约大量电力。

参 考 文 献

- 1 成 立, 杨正堂, 刘国海. 电压型 PWM 逆变器—M 调速系统的仿真研究. 江苏工学院学报, 1991, 12(2): 77~ 85
- 2 成 立. PWM 逆变器中谐波消去法的仿真研究. 江苏工学院学报, 1993, 14(6): 94~ 101
- 3 成 立, 蒋晓东. 优化阶梯波 PWM 逆变器—M 调速系统的数字仿真和性能试验. 电气传动, 1996, 26(3): 16~ 20

Researches in a High Frequency Split-Zerovector PWM Inverter - M Drive System for Agricultural Pump or Fan

Cheng Li

(Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang)

Abstract To reduce the power consumption, an advanced method of regulating speed for agricultural pump and wind machine was proposed. This method was based on the split-zero vector PWM inverter that was used in the testing system. By means of digital simulation and performance experiments using a 220 kW three-phase squirrel cage induction motor installed on a 192 kW fan, the availability and economy of this system were verified.

Key words computer simulation, digitized PWM inverter, agricultural pump and wind machine, AC drive system