

基于游标原理的三相逆变器算法研究

郑 娜,段哲民

(西北工业大学 电子信息学院,陕西 西安 710072)

摘要: 利用游标卡尺的工作原理将多个开关频率不同的逆变器串联,在每个逆变器开关频率不高的情况下得到高精度的输出波形,有效地降低了开关损耗、提高逆变器效率并延长了开关器件的寿命。最后,用仿真技术将游标原理逆变器与传统逆变器相比较:游标逆变器在开关频率仅为传统逆变器开关频率 1/4 的情况下输出与传统逆变器相同分辨率的电压。

关键词: 三相逆变器;空间矢量调制;脉冲密度调制

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)04-0020-03

0 引言

逆变器的设计通常要考虑多个方面,如输出波形的质量、开关损耗和制造成本等。输出波形质量由输出电压误差的大小确定。电源的分辨率决定了输出电压误差大小,表明输出波形拟合参考波形的程度,分辨率与系统结构、调制方式、开关频率以及一些非理想因素有关。开关损耗会降低系统的工作效率,同时导致器件的温度升高,通常开关频率越高器件的温度就越高,过高的温度甚至会损坏元器件。减小开关频率和应用软开关技术可以降低开关损耗。

软开关脉冲密度调制 PDM(Pulse Density Modulation)技术可以有效地降低开关损耗,因此近几年 PDM 技术受到越来越多的关注^[1]。但是,PDM 技术对开关元件的工作速度要求很高,同样性能的逆变器,PDM 所需的开关频率是脉冲宽度调制(PWM)的 4 倍,开关频率越高,输出波形的分辨率就越好,输出电压越接近参考电压^[2]。但是,大功率开关元件的工作速度都很慢,不能满足要求,而速度快的元件不仅稀少,价格也高,使得 PDM 技术很难应用在大功率的逆变器上。本文将游标卡尺的工作原理用在逆变器的设计中,使得 PDM 逆变器在较低的开关频率下依然可以输出高精度的波形,有效地解决了上述问题。通过仿真,证明了该方法的有效性。

1 传统三相 PDM 逆变器调制方法

传统三相逆变器的调制策略实际上是 PDM 与空间矢量调制 SVM(Space Vector Modulation)结合的一种方法。在 PDM 中,控制信号是一组脉冲,由于输出是采样周期内的平均输出电压,而脉冲的频率、占空比都是固定的,所以是由脉冲的数目决定输出电压的大小。调制方法与 SVM 类似,首先对三相参考电压采样,做 Park 变换将这些采样点的参考电压转换成 $d-q$ 平面上的一系列离散矢量^[3]。如果

用 1 表示上桥臂导通,0 表示下桥臂导通,开关管的 8 个状态分别是(000)(001)(010)(011)(100)(101)(110)(111)^[4]。其中(000)与(111)对应零输出。当逆变器工作在状态(001)时,若此时脉冲为高,则逆变器三相输出分别为 $-U_i/3, -U_i/3, 2U_i/3$,其中 U_i 为直流输入电压。若脉冲为低,输出为零。假如一个采样周期中就只有这一个脉冲输出,三相 U, V, W 输出的平均相电压分别为

$$\begin{aligned} U_U &= \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_p} -\frac{U_i}{3} dt = -\frac{U_i T_p D}{3 T_s} \\ U_V &= \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_p} -\frac{U_i}{3} dt = -\frac{U_i T_p D}{3 T_s} \\ U_W &= \frac{1}{T_s} \int_0^{D \cdot T_p} \frac{2U_i}{3} dt = \frac{2U_i T_p D}{3 T_s} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 U_i 为直流输入电压; T_s 为采样周期; T_p 为脉冲周期; D 为占空比。

经过 Park 变换后,为 $d-q$ 平面上的一个矢量。

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_U \\ U_V \\ U_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_i T_p D}{2 T_s} \\ -\frac{\sqrt{3} U_i T_p D}{2 T_s} \end{bmatrix} \quad (2)$$

该矢量在 $d-q$ 平面上是一个大小为 $U_i T_p D / T_s$, 相角为 $-2\pi/3$ 的矢量。同理,针对其他 5 个开关状态也可以得到 $d-q$ 平面上的 5 个矢量,如图 1 所示。称这 6 个矢量为该逆变器的基本矢量,算术表达式为

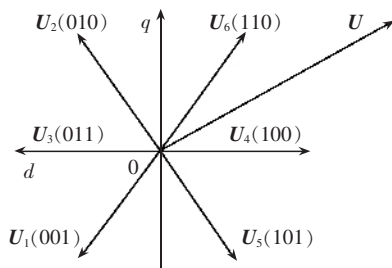


图 1 $d-q$ 平面基本矢量分布图

Fig.1 The vector distribution on $d-q$ plane

$$U_k = U e^{ja(n)}, \quad a(n) = n \pi / 3 \tag{3}$$

式中 $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 时 $k = 6, 2, 3, 1, 5, 4$ ^[5]; $U = U_i T_p D / T_s$ 。

与 SVM 类似,在 1 个开关周期 T_s 内,参考矢量的作用效果可以由与其相邻的 2 个基本矢量 U_x, U_y 和零矢量 U_0 合成^[6]。只是将基本矢量的运行时间改为占用的脉冲次数。合成公式为

$$U = aU_x + bU_y + cU_0, \quad T_s = (a + b + c)T_p \tag{4}$$

式中 U 是要输出的矢量; a, b 为整数,是 2 个基本矢量运行所占的脉冲次数。

在传统逆变器中,输出电压并不能准确地接近参考电压。逆变器的分辨率与 $U_i T_p D / T_s$ 成比例,该值等于这个逆变器所能输出的最小电压矢量的大小,也就是基本矢量的大小。该值越小,分辨率越高,输出电压越接近参考电压。显而易见,当脉冲频率升高时,该值就会变小,输出精度就越高。但是,开关频率升高会导致对开关元件的要求提高,同时会带来电磁干扰,增加开关损耗,并使控制电路变得更复杂。本文提出的应用游标原理的逆变器可以用低速的开关元件输出高精度的波形。

2 应用游标原理的组合逆变器

应用游标原理的组合逆变器是利用多个逆变器同时工作,有效地提高了输出电压的精度。首先,介绍游标卡尺的工作原理。游标卡尺是用来测量长度的精密仪器,为了便于说明,假设游标卡尺中主尺的最小刻度是 1 mm,游标的最小刻度是 0.9 mm,如图 2 所示。当两个尺子单独使用时,最小刻度仅为 1 mm 和 0.9 mm,但当 2 个尺子同时使用时,通过刻度间的比较,就可以测量 0.1~0.9 mm 的长度。

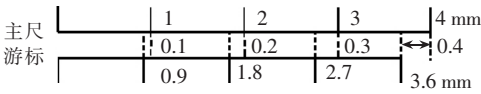


图 2 游标卡尺
Fig.2 The principle of vernier

将其原理应用到逆变器中,让两个输出分辨率不同的逆变器同时工作,它们之间的分辨率的差可以满足系统输出更高精度波形的要求,使输出电压更接近参考电压。原理图如图 3 所示。

各单元逆变器的脉冲周期不同,则在 $d-q$ 平面上基本矢量的大小不同,其分辨率就不同。根据 PDM 的工作原理,脉冲周期 T_p 一直保持恒定,基本矢量的幅长也保持恒定。设这 2 个逆变器的基本矢量的幅长为 U_1 和 U_2 。叠加后 2 个逆变器的基本矢量由原先的 12 个增至 48 个,如图 4 所示,每个点代表一个以原点为起点的矢量,算术表达式为

$$U_k = U_1 e^{ja(n)} + U_2 e^{ja(m)} \tag{5}$$
$$a(n) = n \pi / 3, \quad a(m) = m \pi / 3$$

当 n 和 m 分别是 (4,1)(2,5)(3,6)(6,3)(5,2)(1,4) 时,对应的合成矢量最小,大小等于 $U_1 - U_2$ 。

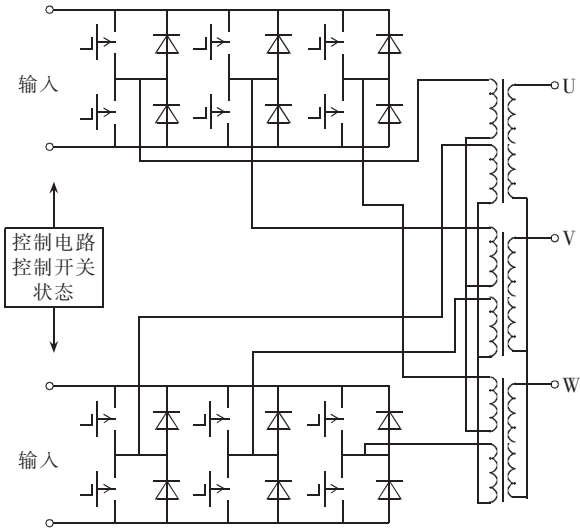


图 3 游标逆变器原理图
Fig.3 The principle of vernier-based inverter

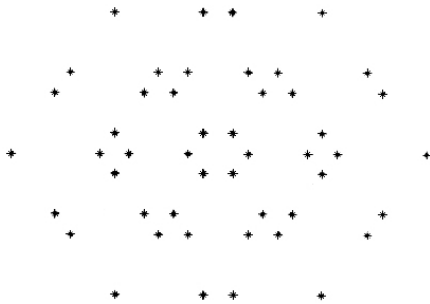


图 4 游标逆变器的合成基本矢量

Fig.4 The composite vectors of vernier-based inverter

它们是 6 个以原点为中心,相互间隔 60° 的矢量,在图 4 中就是距离原点最近的那 6 个点,本文中称这 6 个矢量为高精度基本矢量。

因为基本矢量的数目增加很多,使运算变得非常复杂,所以不能使用传统的算法。本文使用消除法可以有效减小运算的复杂度。该方法分为 2 步。第 1 步,使用与传统逆变器相同的方法选择 4 个基本矢量参与运算,每个逆变器选 2 个。用参考电压矢量分别减这 4 个被选矢量,得到 4 个结果,比较这 4 个剩余矢量,取结果最小的那个基本矢量作为输出矢量,控制开关的动作。然后,用最小的那个剩余矢量替换参考矢量,重复上面的步骤,直到最后的剩余矢量在 U_1 或 U_2 范围内。第 2 步与第 1 步类似,只是参与运算的矢量是 2 个高精度基本矢量。用第 1 步中的最后结果作为参考电压矢量,分别减那 2 个被选的高精度矢量,确定输出矢量,控制 2 个逆变器的开关状态。重复运算逐步缩小剩余矢量,直到结果小于 $U_1 - U_2$ 。

高精度矢量的大小决定了游标逆变器的输出分辨率,它越小输出波形的精度就越高。高精度矢量的大小等于

$$U_1 - U_2 = \frac{U_i T_{p1} D}{T_s} - \frac{U_i T_{p2} D}{T_s} = \frac{U_i D}{T_s} (T_{p1} - T_{p2}) \tag{6}$$

式中 T_{p1}, T_{p2} 分别为 2 个逆变器的脉冲周期。

由式(6)可见,分辨率的大小由 2 个脉冲周期差决定,这样就不需要提高脉冲频率,因此只要 2 个逆变器的脉冲频率足够接近就可以获得所需精度的输出电压。

3 仿真结果和分析

本文用 Matlab 构造了 1 个两单元的游标逆变器,并与 1 个普通的高频率逆变器比较,得出了该方法的优越性。逆变器输出为 400 Hz 的三相交流电,线电压峰值是 20 V,输入是 80 V 直流电,采样频率是 9.6 kHz 相当于 1 个周期内有 24 个采样点,占空比是 0.5。游标逆变器 1 个单元的脉冲频率是 76.8 kHz,是采样频率的 8 倍,另 1 个单元脉冲频率为 96 kHz 是采样频率的 10 倍。传统逆变器的脉冲频率为 384 kHz 是采样频率的 40 倍。对这 2 种逆变器进行比较,它们的开关频率是特意设定的,可以使这两种逆变器有相同的平均输出电压。以三相电压的 U 相输出电压为例,图 5 是传统逆变器和游标逆变器输出电压的瞬态波形和平均输出电压波形。由图 5 可见这 2 种频率不同逆变器虽然瞬态输出不同,但平均输出电压却是相同的。

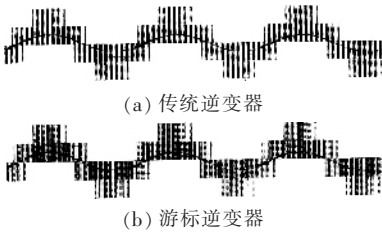


图 5 传统逆变器和游标逆变器的 U 相输出电压
Fig.5 Output voltages of vernier-based inverter and conventional inverter

逆变器的平均输出电压值如表 1 所示,是半个周期的输出相电压值,第 1 列是采样点,第 2 列是参考电压值,第 3 列是工作频率为 96 kHz 的 PDM 逆变器单独工作时的输出电压,第 4 列是频率为 384 kHz 的 PDM 逆变器的输出电压,第 5 列是 76.8 kHz 和 96 kHz 的 2 个逆变器组合的游标逆变器的输出电压。

表 1 U 相电压输出值
Tab.1 The output voltages of phase U V

采样点	参考电压	传统逆变器		游标逆变器
		96 kHz	384 kHz	76.8 kHz 和 96 kHz
1	-6.666 7	-6.666 7	-6.666 7	-6.666 7
2	-3.450 9	-4	-3.333 3	-3.333 3
3	0	-1.333 3	0	0
4	3.450 9	4	3.333 3	3.333 3
5	6.666 7	6.666 7	6.333 3	6.333 3
6	9.428 1	8	9.333 3	9.333 3
7	11.547 0	10.667 0	11	11
8	12.879 0	12	12.667 0	12.667 0
9	13.333 0	10.667 0	12.667 0	12.667 0
10	12.879 0	12	12.667 0	12.667 0
11	11.547 0	10.667 0	11	11
12	9.428 1	8	9.333 3	9.333 3

从表中的数据可以看出,使用游标逆变器可以收到与提高逆变器频率同样的效果,与 96 kHz 的传统逆变器相比较,384 kHz 的传统逆变器和游标逆变器的输出可以更加逼近预输出值。将 384 kHz 的传统逆变器和游标逆变器相比较,它们的平均输出电压是相同的,等同于它们输出电压的分辨率相同,但是它们之间的开关频率却相差很大,由 76.8 kHz 和 96 kHz 逆变器构成的游标逆变器的开关频率仅为这个传统逆变器的 1/4。

4 结论

游标原理逆变器使用 2 个单独的逆变器串联,有效地提高了输出电压的分辨率,与传统 PDM 逆变器不同,它不需要过高的开关频率就可输出高精度的正弦波,此技术可应用于各类软开关 PDM 和硬开关 PDM。因为输出的三相电压的分辨率与脉冲频率无关,只需 2 个逆变器的脉冲频率足够接近就可以输出高分辨率的电压波形,所以不需要过高的开关频率,满足了那些大功率开关元器件的要求。相对于其他 PDM 逆变器,游标逆变器具有以下优越性:

- a. 游标逆变器各单元的开关频率低,可以使用那些开关速度慢但是功率大的开关器件如 GTO 或 SCR^[7],因此可用于高精度大功率的交流电源上;
- b. 游标逆变器的输出分辨率比传统逆变器高,输出电压更精确;
- c. 游标逆变器可以减少开关转换次数,减小开关损耗,提高逆变器的效率并延长开关器件的寿命。

参考文献:

[1] VENKATARAMANAN G. Discrete pulse modulation strategies for high-frequency inverter systems[J]. **IEEE Trans. on Power Electronics**, 1993, 8(3): 279-287.

[2] RASHID M H. Power electronics handbook[M]. [s.l.]: Academic Press, 2001.

[3] ZHOU Ke-liang, WANG Dan-wei. Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: A comprehensive analysis [J]. **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, 2002, 49(1): 186-196.

[4] TRZYNADLOWSKI A M. Space vector PWM technique with minimizing switching losses and a variable pulse rate [J]. **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, 1997, 44(2): 137-181.

[5] 王立乔, 王长永, 张仲超. 组合变流器相移 SVM 技术的研究[J]. **电力系统自动化**, 2002, 26(18): 36-40, 49. WANG Li-qiao, WANG Chang-yong, ZHANG Zhong-chao. Study of the multi-modular phase-shifted SVM converters [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2002, 26(18): 36-40, 49.

[6] 金 雍, 羊 彦, 毕 强. 利用单片机实现空间矢量调制算法[J]. **电机与控制学报**, 2001, 5(1): 47-51. JIN Yong, YANG Yan, BI Qing. A space vector modulation algorithm using single chip computer [J]. **Electric Machine and Control**, 2001, 5(1): 47-51.

[7] 张一工, 肖湘宁. 现代电力电子技术原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

郑娜(1980-),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向是电工理论与新技术(E-mail:zhengna@public.xa.sn.cn);

段哲民(1953-),男,陕西白水人,副院长,教育部电子科学与信息工程类专业指导委员会委员,全国电子高等教育学会副秘书长,研究方向为电路与系统、电工理论。

Algorithm research of 3-phase inverter based on vernier principle

ZHENG Na,DUAN Zhe-min

(Northwest Polytechnical University,Xi'an 710072,China)

Abstract: Applying vernier principle,multi inverters are connected in series to settle down the incompatibility of output voltage precision and switching frequency. The high precision of output wave is obtained while each inverter operates at a low switching frequency,which lowers the switching losses,enhances the inverter efficiency and thus prolongs the life of switch. The vernier-based inverter and conventional inverter are compared through simulation. Results show that,to generate voltages with same resolution,the vernier-based inverter operates at one-fourth switching frequency of conventional one.

Key words: 3-phase inverter; space vector modulation; pulse density modulation