

# 三电平逆变器 SVPWM 直接转矩控制方法

韩黎明

(中国铝业股份有限公司 中州分公司, 河南 焦作 454174)

**摘要:** 二极管中点箝位型三电平逆变器广泛用于中高压大容量交流调速系统, 具有对器件耐压要求低、输出谐波含量低和控制性能好等优点。直接转矩控制方法拥有快速的转矩响应、对电机参数变化的鲁棒性等优点。文章采用中长矢量合成的方法, 提出了一种新的空间矢量调制方法, 应用于二极管中点箝位型三电平逆变器的直接转矩控制。仿真结果表明, 该方法有效地控制了逆变器的中点电压, 抑制了电压跳变。

**关键词:** 三电平逆变器; 直接转矩控制; SVPWM

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2009)02-0015-03

## A Novel SVPWM Direct Torque Control Method of Three-level Inverter

HAN Li-ming

(Zhongzhou Branch, China Aluminum Industry Co., Ltd., Jiaozuo, Henan 454174, China)

**Abstract:** Neutral-point-clamped three-level inverter of diode is widely used in AC speed modulating system with middle-high voltage and big capacity. The advantage includes few requirements to voltage resistance of component, low content of harmonic and good performance of control. The direct torque control method has some merits in terms of fast torque response, robustness against the motor parameter variation. A new SVPWM is presented based on the synthesizing of middle and long vectors to apply on the direct torque control of three-level neutral-point-clamped inverter. The simulations show that it can effectively control the neutral point voltage of inverter and voltage flicks.

**Key words:** three-level inverter; direct torque control; SVPWM

## 0 引言

直接转矩控制变频调速技术 DTC(Direct Torque Control)具有控制结构简单<sup>[1]</sup>、动态响应快以及参数鲁棒性好等优点, 得到了广泛的研究和应用。用二电平逆变器实现直接转矩控制的研究已取得了相当多成果。与二电平逆变器相比<sup>[2]</sup>, 三电平逆变器具有动态性能好、输出电压谐波较少、控制性能好等优点, 在高压大容量的变频调速领域有着广阔的应用前景。但是, 三电平逆变器的输出电压不能有跳变, 由于使用了二极管中点箝位, 故还存在中点电压漂移的问题; 另外由于控

制矢量选择更多, 导致控制策略更加复杂。

本文提出一种基于空间矢量脉宽调制技术(SVPWM)的三电平逆变器直接转矩控制方法, 并给出了仿真结果。

## 1 三电平逆变器

三电平逆变器有 3 个显著的优点:

(1) 由 3 个电平阶合成输出电压正弦波形, 输出电压谐波较小, 能够在较低的开关频率下得到较好的波形;

(2) 每个功率开关管的电压额定值只为直流母线上电压的一半, 降低了对开关器件的耐压和绝缘要求, 适合高压大容量场合应用;

(3) 开关过程中电压变化率  $dv/dt$  较小, 电磁干扰大

收稿日期: 2009-01-15

作者简介: 韩黎明(1968-), 男, 高级工程师, 从事电气自动化研究与开发。

为减轻。

二极管中点箝位型三电平逆变器主回路结构如图 1 所示。图中 V1 ~ V4 为可关断功率器件。

通过控制各相的功率器件 (V1 ~ V4) 的开通和关断, 使每一相都可获得 3 种不同电平 (+E、0 和 -E), 用电压状态符号 P、O 和 N 表示 (表 1)。

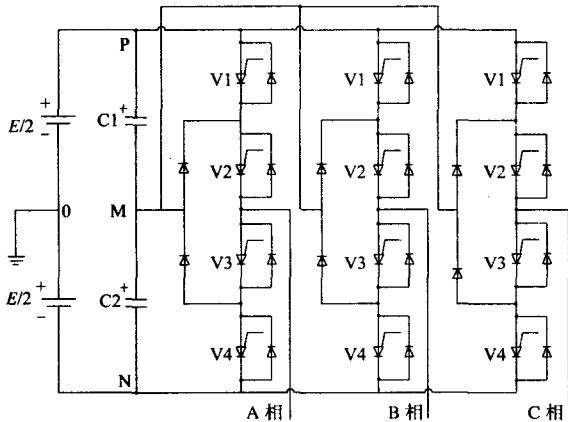


图 1 三电平逆变器基本拓扑结构

Fig.1 Basic topology of three-level inverter

输出电压只能是 +E 到 0, 0 到 -E, 或相反地变化, 不允许在 +E 和 -E 之间直接变化。

表 1 三电平逆变器的各相电压组合表

Tab.1 Compound table of phase voltage for three-level inverter

| 输出电压 | 电压状态 | V1  | V2  | V3  | V4  |
|------|------|-----|-----|-----|-----|
| +E   | P    | ON  | ON  | OFF | OFF |
| 0    | O    | OFF | ON  | ON  | OFF |
| -E   | N    | OFF | OFF | ON  | ON  |

三电平逆变器有 27 种不同的开关组合, 对应有 27 种空间电压矢量。可将三电平逆变器的空间电压矢量分为 4 类: 长矢量、中矢量、短矢量和零矢量 (图 2)。长矢量有 6 个, 矢量长度为  $E_d$ , 位于图中外六边形的 6 个顶点; 中矢量也有 6 个, 矢量长度为  $\frac{\sqrt{3}}{2}E_d$ , 位于长矢量之间; 短矢量 12 个, 矢量长度为  $E_d/2$ , 成对出现, 位于内六边形的顶点上; 零矢量 3 个, 矢量长度为 0, 均位于原点。

图 2 为由 27 个空间电压矢量构成的空间电压矢量合成图。由图 1 和图 2 可看出: 长矢量所对应的逆变器开关状态使对应的输出和正、负母线相连, 不会产生中点电流, 也就不会影响中点电压; 零矢量使得负载三相短路, 并挂在正、负、零母线之一上, 也不会导致中点电压变动; 而中矢量和短矢量则至少有一相输出和零母线相连, 并和正、负母线形成电流回路, 从而导致电容 C1 和 C2 充放电, 中点电压偏离零电位。由此可知, 三电平逆变器中点电压不平衡是因为存在不为零的中点

电流, 我们可以采用矢量合成调制的方法<sup>[3]</sup>, 通过控制中点电流来控制中点电压, 使一个采样周期内流出中点的电流和流入中点的电流大小相等, 达到动态平衡。从宏观上来看, 中点电压不变。

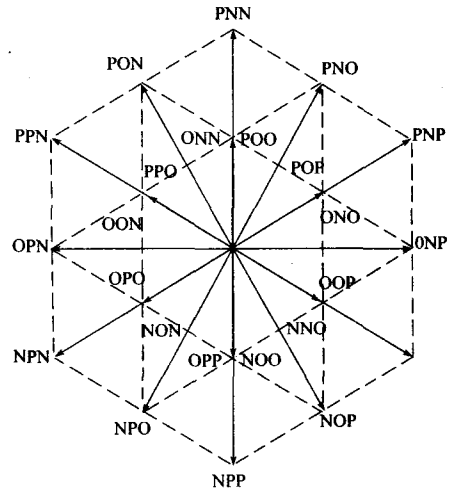


图 2 三电平逆变器可输出的空间电压矢量  
Fig.2 Space voltage vectors of three-level inverter

## 2 三电平电压空间矢量的调制

以短矢量 ONN 为例 (图 3),  $i_{NP}$  为中点电流, 流出中点 M 为正。对于短矢量 ONN,  $i_{NP} = i_a$ 。当负载电流  $i_a > 0$  时, 电容 C1 充电, 电压  $U_{C1}$  增大; 电容 C2 放电, 电压  $U_{C2}$  减少; 中点电压  $U_M = (U_{C2} - U_{C1})/2 \neq 0$ 。短矢量 POO 的中点电流  $i_{NP} = i_b + i_c = -i_a$ , 其作用刚好与短矢量 ONN 相反。考虑到短矢量 POO 与短矢量 ONN 的空间电压矢量方向一致, 只要在一个采样控制周期内保证发短矢量 POO

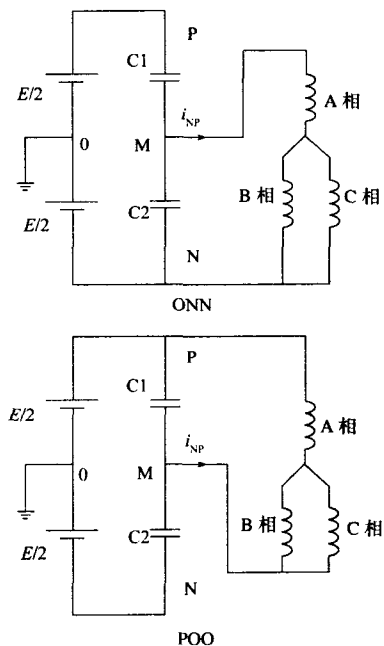


图 3 短矢量 ONN 调制原理图

Fig.3 Modulation principle diagram of short vector ONN

时插入短矢量 ONN, 并使它们作用的时间相等, 即可保持中点电压平衡。

以中矢量 PON 为例, 中矢量 PON 的中点电流  $i_{NP} = i_b = i_c - i_a$ , 短矢量 ONN 的中点电流为  $i_a$ , 短矢量 PPO 的中点电流为  $-i_c$  (图 4)。要使中点电压平衡, 可在采样控制周期内加入等时间作用的短矢量 ONN 和 PPO, 则中点平均电流  $i_{NP} = i_b - i_c + i_a = 0$ 。

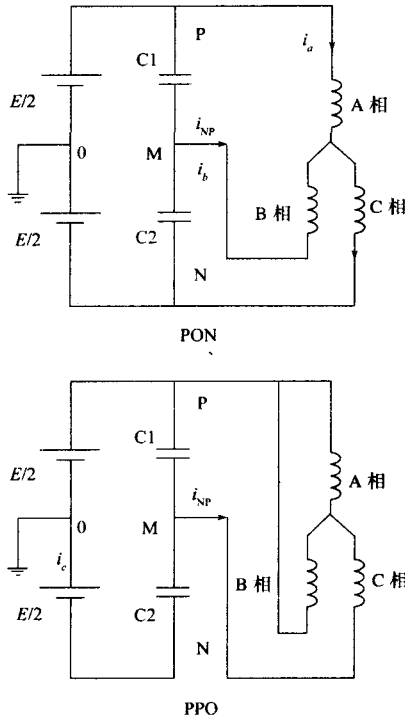


图 4 短矢量 PPO 调制原理图

Fig.4 Modulation principle diagram of short vector PPO

### 3 SVPWM 控制算法

由于电压利用率较高、电流谐波与转矩脉动较低<sup>[3]</sup>, SVPWM 成为多电平逆变器普遍采用的控制方法。通常采用的 SVPWM 控制算法——“最近三矢量”合成法则, 理论上可以合成任意参考电压, 但为了保证中点电压平衡, 会使得算法复杂, 计算量加大。由于此前解决了中短矢量导致中点电压不平衡的问题, 因此只采用中长矢量来合成任意矢量。

以 12 个中长矢量为边, 将  $\alpha\beta$  平面分为 12 个三角区间。取其中一个三角形为例 (图 5), 图中角  $\theta$  为合成矢量  $V_{ref}$  与长矢量  $V_L$  的夹角,  $V_M$  为中矢量,  $V_S$  为短矢量。

如果用长矢量  $V_L$  和中矢量  $V_M$  合成参考矢量  $V_{ref}$ , 根据伏秒平衡原则, 可由式 (1) 求解各矢量作用时间, 即:

$$\begin{cases} 2V_M t_M / 3 + V_L t_L = V_{ref} T_s \\ t_M + t_L = T_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T_s$ ——采样周期;  $t_M$ —— $V_M$  的作用时间;  $t_L$ ——

$V_L$  的作用时间。

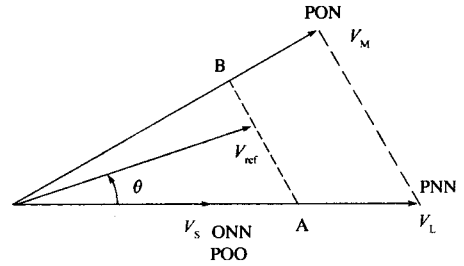


图 5 电压矢量合成示意图

Fig.5 Synthetic principle of voltage vectors

设  $V$  为参考矢量  $V_{ref}$  的幅值, 将  $V_{ref} = V \cos \theta + jV \sin \theta$ ,  $V_M = 3E_d/4 + j\sqrt{3}E_d/4$ ,  $V_L = E_d$  代入式 (1) 中, 解得:

$$\begin{cases} t_M = 2\sqrt{3}VT_s \sin \theta / E_d \\ t_L = T_s - t_M \end{cases} \quad (2)$$

为保证中点电压平衡, 须加入短矢量和零矢量, 对中矢量进行调制, 得到的新中矢量长度为 0 ~ 2/3 原中矢量长度。参考电压矢量  $V_{ref}$  只要落在以虚线 AB 为界的小三角形内, 由式 (2) 计算各矢量的作用时间, 就能达到线性最大调制。

当  $V_{ref}$  落在 AB 上时, 则按式 (13) 计算, 即:

$$\begin{cases} t_M = 2T_s \sin \theta / \sin(\theta + \pi/3) \\ t_L = T_s (\sqrt{3} \cos \theta - 3 \sin \theta) / 3 \sin(\theta + \pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

当  $V_{ref}$  落在 AB 外时, 有:

$$\begin{cases} t_M = 2\sqrt{3}VT_s \sin \theta / E_d \\ t_L = 2VT_s \sin(\pi/3 - \theta) / E_d \end{cases} \quad (4)$$

但此时  $t_M + t_L > T_s$ 。因此当  $V_{ref}$  落在 AB 外时, 也只能按式 (3) 对各矢量的作用时间进行计算。

由于参考矢量是否落在虚线 AB 之外的判断过程比较复杂, 将上述方法进行简化。以  $\sqrt{3}E_d/3$  为半径作一圆, 参考矢量的端点轨迹落在圆内和圆上时采用式 (2) 计算电压矢量的作用时间; 当参考矢量的端点轨迹落在圆外时, 采用式 (3) 计算电压矢量的作用时间。

### 4 仿真分析

为了验证上述算法的正确性, 利用 Matlab6.5 仿真环境, 用 m 文件编程实现 DTC 算法和空间矢量调制, 针对三相阻感负载进行了仿真研究。其基本参数为: 三相异步电动机额定功率为 2.2 kW, 额定电压为 380 V, 定子电阻为 2.96  $\Omega$ , 定子电感为 0.382 mH, 转子电感为 0.382 mH, 定转子互感为 0.346 mH, 转子电阻为 2.22  $\Omega$ , 转动惯量为 0.11  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ , 极对数为 2。

仿真结果如图 6、图 7 和图 8 所示。仿真给出了系统

(下转第 34 页)

烧写引导代码设计要点如下:

(1) 本段代码必须被拷贝到片内 RAM 运行, 禁止调用和访问任何 FLASH 区间的子函数和变量;

(2) 为了确保下载的可靠性, 应对每条 HEX 记录和整个 HEX 文件内容进行两级和校验;

(3) 关闭所有中断使能标志, 避免调用中断服务子程序;

(4) 烧写时应忽略 HEX 文件记录中 ROM 空间部分, 该部分内容已经被 TI 公司固化在片内 ROM 中。

## 6 结语

本文以以太网-CAN 网络为例, 利用远程以太网技术扩展了工业现场总线的应用范围, 实现了 DSP 程序的远程下载。本文的思想同样适用于硬件支持的其他工业现场总线标准, 具有良好的通用性和可移植性。文

章同时详细阐述了基于 TMS320F2812 型 DSP 的目标代码解析处理方法和编写引导下载代码的技术要点。笔者将该方法应用于南车株洲电力机车研究所有限公司自行研制的 1.5 MW 双馈式风电变频器, 使用效果表明, 该方法操作简单、可靠, 大大提高了设备在实验室和风场的调试效率。

## 参考文献:

- [1] TMS320F2810, TMS320F2811, and TMS320F2812 Flash APIs: Texas Instruments Incorporated[Z].2005.
- [2] TMS320F281x Boot ROM Serial Flash Programming: Texas Instruments Incorporated[Z].2007.
- [3] 曲芸, 刘俊, 李杰, 等. DSP 的 FLASH 引导加载研究[J]. 微计算机信息, 2007, 23(11):190-191.
- [4] 张雄伟, 曹铁永. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

(上接第 17 页) 输出频率为 63 Hz、调制系数为 0.9 时的运行波形。图 6 和图 7 分别给出了线电压和定子电流的仿真波形。

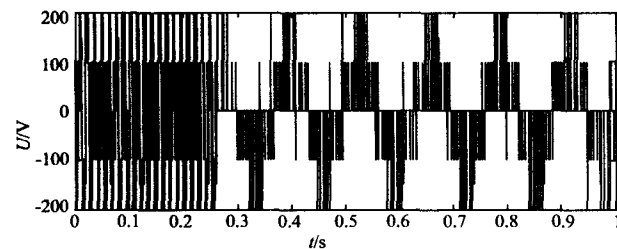


图 6 线电压波形  
Fig.6 Waveform of line voltage

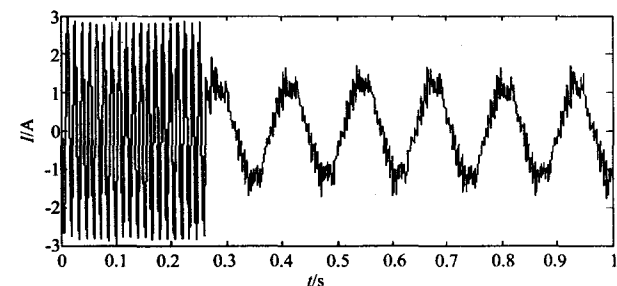


图 7 定子电流波形  
Fig.7 Waveform of stator current

在仿真过程中发现, 中点电压平衡的实现效果并不十分理想, 仍然需要补发短矢量以确保中点电压的平衡, 但需要补发短矢量的次数和短矢量的作用时间大为减少。其原因是: 在中矢量的调制过程中, 流入和流出中点的电流只是近似相等, 并不完全等同。图 8 给

出了中点电位波形。

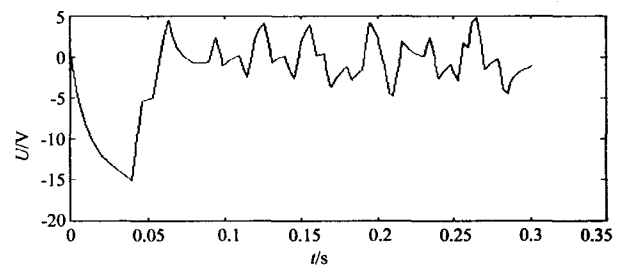


图 8 中点电位波形

Fig.8 Waveform of neutral point potential

## 5 结语

三电平逆变器以其良好的控制性能和实用性在高压大容量调速领域得到了广泛的研究和应用。本文提出的 SVPWM 方法能有效地实现中点电压平衡, 抑制电压跳变, 简化算法。仿真结果证明了这种方法的可行性。

## 参考文献:

- [1] 李凤. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] Kyo-Beum Lee. Improvement of Low-Speed Operation Performance of DTC for Three-level Inverter-fed Induction Motors[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2001, 48(5):1006-1014.
- [3] 李永东, 侯轩, 谭卓辉. 三电平逆变器异步电动机直接转矩控制系统[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4):34-39.