

文章编号: 1005-6548(2006)04-0444-04

空间电压矢量 PWM 控制的优化算法及其仿真实现^{*}马 洁¹, 吴丽静², 徐忆平¹

(1. 中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008; 2. 聊城供电公司, 山东 聊城 225000)

An Optimization and Its Simulation Algorithm for Space-vector PWM

MA Jie¹, WU Li-jing², XU Yi-ping¹

(1. Information and Electrical Engineering Institute, University of Mining and Technology, Xuaohou 221008, China; 2. Liaocheng Power Company, Liaocheng 225000, China)

摘 要: 基于传统三电平逆变器空间电压矢量 PWM 技术的研究经验, 提出了 1 种优化的空间电压矢量 PWM 控制算法。该方法是将参考电压矢量分解成基矢量和二电平矢量, 然后利用二电平的矢量调制算法来控制二电平分量, 因此简化了建模过程, 提高了仿真效率。最后, 在 Matlab/Simulink 环境下分别对传统算法和优化算法进行仿真, 比较后验证了优化算法的可行性和优越性。

关键词: 逆变器; 三电平; 空间矢量脉宽调制

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A

Abstract: This paper proposes an optimization space-vector pulse width modulation on the basis of traditional three-level PWM method. With this method, the reference voltage vector is divided into two parts: based vector and two-level vector, then the two-level vector is synthesized by conventional two-level space vector modulation method, so the process of modeling is simplified and the simulation is accelerated. To verify the superiority and effectiveness of this optimization algorithm, the traditional modulation algorithm and the new algorithm simulation is implemented respectively under Matlab/

Simulink environment. The simulating results are analyzed and compared.

Key Words: inverter; three-level; space vector pulse width modulation

为解决低电压主开关器件在高电压应用情况下的矛盾, 多电平逆变技术的出现为高压大容量电压型变换器的研制开辟了 1 条新的思路。它的主要优点在于: 单个器件承受电压应力小, 而系统主电路容量实现高压大容量; 相同开关频率下输出电压、电流波形更好的接近正弦, 谐波含量低, 消除了器件串联实现带来的困难, 因此, 多用于中、高压大功率场合。

目前, 多电平逆变器已成为电力系统及中大功率交流电机调速领域的研究重点, 它研究的核心技术是多电平逆变器的脉宽调制 (PWM) 控制技术。多电平变换器常用的 PWM 控制方法主要有: 载波 PWM 技术和空间电压矢量法 (SVPWM), 它们都是二电平 PWM 技术在多电平中的扩展。近年来, SVPWM 因其电压利用率高, 谐波含量低等特点受到了广泛的关注和应用^[1]。

本文针对多电平逆变器的空间电压矢量控制

* 收稿日期: 2006-08-14 修回日期: 2006-09-27

作者简介: 马 洁(1981-), 女, 江苏仪征人, 工程硕士, 控制理论与控制;
吴丽静(1977-), 女, 山东聊城人, 助理工程师, 电力系统;
徐忆平(1982-), 男, 苏州太苍人, 硕士研究生, 控制理论与控制工程。

问题进行了分析和探讨,给出了 1 种实现多电平逆变器空间电压矢量简化算法,该算法不需复杂的计算,通用性强,可以很容易推广到多电平电路中。文中针对二极管钳位三电平逆变器电路,详细分析了该算法的实现步骤,并对其进行了仿真研究,验证了算法的正确性。

1 三电平逆变器 SVPWM 控制原理^[2]

空间电压矢量 PWM(SVPWM)控制原理是用若干个开关矢量逼近参考电压矢量。三相电压逆变器(见图 1)的开关元件组合为空间的 27 个电压矢量,若对三相电压进行变换,根据空间矢量理论,输出电压矢量定义为:

$$U^* = \frac{2}{3}(u_a + au_b + a^2u_c), a = e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (1)$$

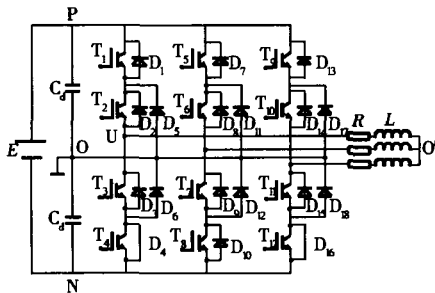


图 1 三电平逆变器的主电路结构图

可以得到如图 2 所示空间开关矢量图^[2]。

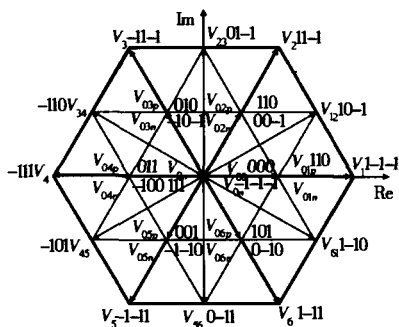


图 2 六角形空间电压相量图

1.1 空间电压矢量的作用时间

假设参考电压矢量 V 在由 V_0, V_7, V_9 组成扇区内由 V_1, V_7, V_8 组成的三角形里(见图 3),则参考矢量由这 3 个矢量合成得到,根据伏秒平衡原则,各矢量的作用时间由式(2)求解,即:

$$\begin{cases} V_1t_1 + V_7t_7 + V_8t_8 = VT_s, \\ t_1 + t_7 + t_8 = T_s. \end{cases} \quad (2)$$

作用时间分别为:

$$t_7 = \frac{4V}{\sqrt{3}E}T\sin(\frac{\pi}{3} - \theta) - T;$$

$$t_8 = \frac{4V}{\sqrt{3}E}T\sin\theta; t_1 = T - t_7 - t_8.$$

式中: t_1, t_7, t_8 分别为 V_1, V_7, V_8 的作用时间。

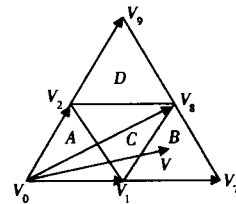


图 3 SVPWM 原理图

1.2 空间电压矢量的作用顺序

设参考矢量落在小三角形 A 中,则可供选择的矢量为 V_0, V_1, V_2 。按 7 段式 SVPWM 的产生方法,得到开关序列 $V_0(000) - V_1(100) - V_2(110) - V_0(111) - V_2(110) - V_1(100) - V_0(000)$ 。只要参考电压矢量 V 的端点轨迹位于六边形的内切圆内,就可以利用逆变器的输出矢量合成,其输出电压就为正弦波形。此时,能达到线性最大调制。

2 空间电压矢量的优化算法

2.1 空间电压矢量调制(SVM)方法的实现步骤

空间电压矢量调制方法是根据伏·秒平衡原理,将采样到的参考电压矢量用其落入的矢量三角形 3 个顶点的电压矢量组合来替代,生成所需频率和幅值的三相电压波形。归纳起来,有以下 4 个步骤^[3]:①确定参考电压矢量落入的矢量三角形 3 个顶点的电压矢量;②确定 3 个电压矢量的作用时间;③确定各个基本矢量对应的冗余开关状态;④确定参考矢量的作用顺序。

传统的空间电压矢量调制方法在处理问题①时,往往要依逆变器的有效矢量将 $d-q$ 平面分为不同的扇区,并依次与参考电压矢量比较以确定参考电压矢量落入的扇区,控制算法较复杂。当二电平以上的多电平钳位结构逆变器被采用时,更会大大增加控制算法的复杂性。本文提出了 1 种有效的 SVM 简化算法,为高压大功率调速系统采用空间矢量调制提供了 1 种有效的方法。

2.1 空间电压矢量调制的优化算法^[4-5]

2.2.1 三相参考电压分解

二极管钳位式三电平逆变器(如图 1)的三相输出电压可以表示成为开关状态的形式为

$$V_{ss} = (S_a, S_b, S_c)^T \quad (3)$$

式中: $S_i = -1, 0, 1; i = a, b, c$ 。

三相参考电压可以表示为:

$$V_{RS} = [v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}]^T, \quad (4)$$

式中: $-1 < v_{ri} < 1, i = a, b, c$ 。

三电平逆变器可以看作是多个二电平逆变器的叠加(见图 4), 所以三电平矢量也可以分解成 1 个基分量与二电平分量即

$$V_{RS} = V_{RSO} + V_{RST}, \quad (5)$$

式中: 参考电压的偏移分量 V_{RSO} 定义为:

$$V_{RSO} = \begin{bmatrix} v_{roa} \\ v_{rob} \\ v_{roc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{int}(v_{roa}) \\ \text{int}(v_{rob}) \\ \text{int}(v_{roc}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\text{int}()$ 为取整函数。

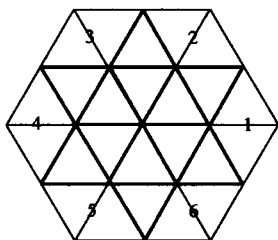


图 4 分解为 6 个二电平空间矢量

参考电压二电平分量 V_{RST} 定义为:

$$V_{RST} = \begin{bmatrix} v_{rta} \\ v_{rtb} \\ v_{rtc} \end{bmatrix} = V_{RS} - V_{RSO} \quad (7)$$

空间电压矢量调制方法是在 $\alpha - \beta$ 坐标系中完成的。三相参考电压及开关状态都可以转换为两相坐标系中的空间电压矢量的形式, 转换矩阵为

$$C_{3/2} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

那么, 逆变器的开关矢量和参考电压矢量分别为:

$$V_{SV} = C_{3/2} V_{SS}, \quad (9)$$

$$V_{RV} = C_{3/2} V_{RS} \quad (10)$$

所以, $V_{RV} = C_{3/2} V_{RSO} + C_{3/2} V_{RST} = V_{RVO} + V_{RVT}$, 其中 $V_{RVT} = |V_{RVT}| \angle \theta$, 即参考电压矢量分解成为参考电压偏移矢量和参考电压二电平矢量的和(如图 3)。

图 5 示出 1 个三电平逆变器空间矢量分解图的例子。分解过程决定了矢量 V_{RVT} 一定处于 1 个以矢量 V_{RVO} 为中心的六边形中, 这类似于传统的逆变器的空间矢量图, 因此将 V_{RVT} 定义为参考电压二电平矢量。

2.2.2 参考电压二电平矢量合成算法

参考电压的基矢量必定和 1 个二电平逆变器

的开关矢量相对应, 所以, 它可以不通过任何 PWM 方法, 直接用这个开关矢量等效。这样, 问题被简化为如何合成参考电压的二电平矢量, 并可以通过二电平 SVM 方法很容易得到。

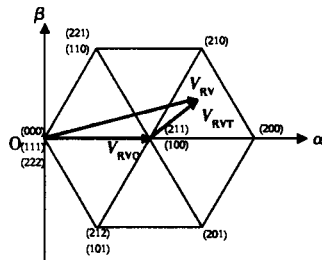


图 5 参考矢量的分解

如图 6 所示, 参考电压二电平矢量可以看成是 1 个二电平逆变器的参考电压矢量。根据二电平 SVM 算法, 可以将空间矢量划分为 6 个扇区, 根据二电平参考电源矢量位于哪 1 个 60° 扇区选择 3 个二电平开关矢量 V_{RV1T} 、 V_{RV2T} 、 V_{RV3T} , 并控制它们的作用时间来等效参考电源二电平矢量, 即 $V_{RVT} T_S = V_{SV1T} T_1 + V_{SV2T} T_2 + V_{SV3T} T_3$ 。 (11) 其中: 位于原点的二电平开关矢量 V_{SV1T} 对应着 2 个二电平开关状态, 而另外 2 个开关矢量都只有 1 个开关状态与其对应。这样只需简单地判断二电平参考电压矢量位于哪 1 个扇区, 就可以计算各二电平开关矢量的作用时间。

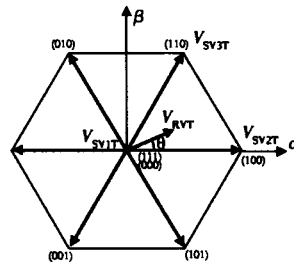


图 6 二电平空间矢量图

2.2.3 多电平参考电压矢量合成

三电平 SVM 算法的目标当然是用多电平开关矢量来合成多电平参考电压矢量, 这只要用已得的二电平开关矢量与参考电压的基矢量相加即可:

$$\begin{cases} V_{SV1} = V_{RVO} + V_{SV1T}, \\ V_{SV2} = V_{RVO} + V_{SV2T}, \\ V_{SV3} = V_{RVO} + V_{SV3T} \end{cases} \quad (12)$$

各开关矢量的作用时间仍用式(11)计算的结果。

这样, 通过对参考电压矢量的分解, 使开关矢量选择及其作用时间计算十分简单快速, 并且算法推导过程与电平数无关, 适用于任何电平数

2.2.4 开关状态的选择

在三电平逆变器中, 同 1 个开关矢量可能对应

多个开关状态,即冗余开关状态,这使 1 个控制周期内可能存在大量的有效开关状态组合方式。这里提出基于零序电压等效的方法来选择开关状态。

首先,为限制期间的开关频率和输出电压的 dv/dt , 目前的多电平 SVM 算法中的开关状态选择及输出顺序都遵循以下 2 个原则:

- a. 在每个控制周期内每相桥臂的开关状态变化不超过 1 次;
- b. 在每次开关状态变化时,一般只有一相的开关函数发生变化,并且只变化 1 个电平。

根据零序电压等效的原则,并满足开关状态选择基本原则,这个控制周期内各个开关状态、作用顺序可以确定如下:

$$V_{VSO} + (000)^T \rightarrow V_{RSO} + V_{SS2T} \rightarrow V_{RSO} + V_{SS3T} \rightarrow V_{RSO} + (111)^T$$

3 仿真结果

为验证这种改进算法的正确性,在 Matlab/Simulink 环境下分别对优化前后的控制算法进行仿真实验。基本参数为:三相异步电动机额定功率 2.2 kW,额定电压 380 V,频率 50 Hz,定子电阻 3.18 Ω ,电感 10.304 mH,转子电阻 1.308 Ω ,电感 7.62 mH,转动惯量 0.89 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$,极对数 2;直流侧电容 4 700 μF ;采样周期 $T_s = 2 \text{ ms}$, $E = 400 \text{ V}$ 。

图 7、8 分别示出算法优化前后的相电压及线电压波形,可见,算法优化前后对电压波形的影响不是很大,但在仿真过程中,优化算法的仿真建模明显比传统的算法简单,而且仿真速度也比传统算法的仿真速度快。

4 结束语

本文针对传统三电平逆变器空间电压矢量 PWM 调制算法,提出了 1 种改进的空间电压矢量 PWM 控制技术。该方法设计简单,占用的计算时间少,提高了仿真效率,仿真实验结果也表明了该方法的优越性。

参考文献:

[1] 陈坚. 电力电子学[M]. 北京:高等教育出版社,2004: 15-25.
 [2] 吴学智,刘业东,黄立培. 三电平电压型逆变器空间电压调制算法的研究[J]. 电工电能新技术,2002,21(4): 16-19.

[3] 祝琴,钟样微,章鸿. SVPWM 原理及其 Simulink 仿真[J]. 电器技术,2005,4:49-51.
 [4] Seo J H,Choi C H,Hyun D S. A new simplified space-vector PWM method for three-level inverters[J]. IEEE Trans. On Power Electrnics,2001,16(7):545-550.
 [5] Nikola Celanovid,Dushan Boropovich. A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converter[J]. IEEE Trans. On indus. Appl,2001,37(2): 637-641.

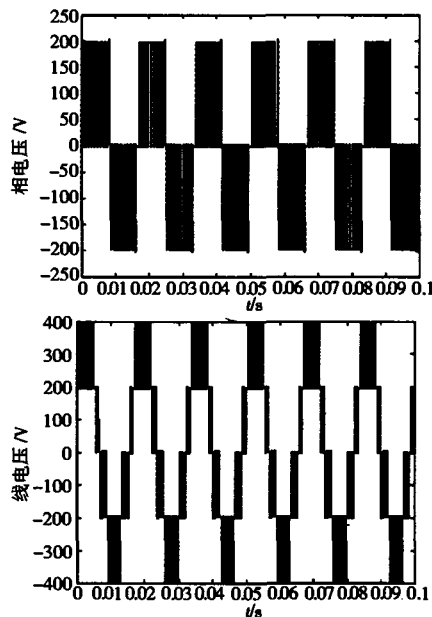


图 7 相电压及线电压波形(优化前)

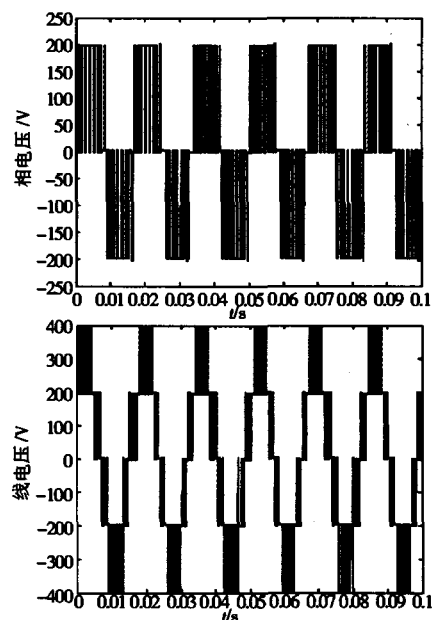


图 8 相电压及线电压波形(优化后)

[责任编辑:任云丽]