

多电平三相逆变器的建模及仿真

Moulding and Simulation of Multi-Level Three-Phase Inverter

定明芳

广州电器科学研究院研发中心 广州 510300

摘要：论文研究了多电平逆变器的结构，建立了逆变器的数学模型，为解决传统多电平空间矢量 PWM 方法复杂，难以应用于实际系统的问题，深入研究了多电平的空间矢量 PWM 方法，提出了一种新型多电平的 SVPWM 方法。为验证新方法的正确性，建立了逆变器的 Matlab/Simulink 仿真模型，仿真初步验证了新型多电平 SVPWM 方法的可行性，为多电平空间矢量 PWM 方法的实际应用提供了一种新的思路。

关键词：多电平逆变器，空间矢量脉宽调制，Matlab/Simulink

中图分类号：TM464 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2015)01-3-125

1 引言

多电平逆变器适用于高压、大功率电力电子装置和设备中，是当前研究的热点。其基本思想是把多个功率器件按一定的拓扑结构连接成可以提供多种电平输出的电路，然后使用适当的控制逻辑将几个电平台阶合成阶梯波以输出逼近正弦的交流电压。多电平逆变器在大功率有源电力滤波、无功补偿等电能质量综合治理领域以及高电压电动机驱动等场合获得了广泛的应用。

2 三电平逆变器的数学模型

对多电平变换器的时域和频域模型的深入研究，是提高多电平变换器系统控制性能的一个关键问题，因此需要对多电平变换器进行数学建模处理，以期获得更好系统性能。这里以二极管钳位式的三电平逆变器（如图 1 所示）为对象，对其进行了数学建模分析。三电平逆变器^[1]是

多电平逆变器^[2]中最简单、最实用的一种，目前比较成熟是二极管中点钳位式三电平逆变器。中点钳位式（Neutral Point Clamped）三电平逆变器由 A. Nabae 等人在 1980 年的 IAS 会议上提出。

为建立三电平变换器的数学模型，作如下理想假设：(a) 直流侧的输入电源是理想的恒定的直流电压源。(b) 所有开关器件都是理想的开关，也即所有开关器件没有惯性和损耗。(c) 直流侧电容也是理想，也即无内阻、无电感 (d) 变换器的开关频率远大于基波频率。(e) 变换器的负载是三相对称感性负载。引入开关函数 S_{ij} ，其中 i 表示第 i 相 ($i=a,b,c$)， j 表示 i 相的开关接到哪个点 ($j=P,N,O$)，对中点钳位型的变换器建立等效模型如图 1 所示。

2.1 ABC 静止坐标下的高频数学模型

根据图 1 所示三电平三相逆变器的电路图，由 Kirchoff 电压定律，列交流侧 a ， b ， c 三相的回路方程如式(1)：

$$\begin{cases} L_a \frac{di_a}{dt} = R_a \cdot i_a + v(o, N) - v(o, S_a) \\ L_b \frac{di_b}{dt} = R_b \cdot i_b + v(o, N) - v(o, S_b) \\ L_c \frac{di_c}{dt} = R_c \cdot i_c + v(o, N) - v(o, S_c) \end{cases} \quad (1)$$

其中， L_a ， L_b ， L_c 负载端电感， i_a ， i_b ， i_c 为三相输出电流， $v(o, S_a)$ ， $v(o, S_b)$ ， $v(o, S_c)$ 为交流输出端与直流中点之间的电压差； $v(o, N)$ 为直流中点与交流中点之间的电压差。

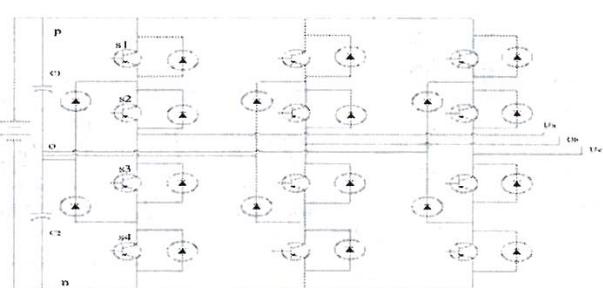


图 1 三电平三相逆变器的主电路

由开关函数关系可以得如下式(2)：

$$\begin{cases} v(S_a, o) = S_{ap} \cdot V_{dc1} - S_{an} \cdot V_{dc2} \\ v(S_b, o) = S_{bp} \cdot V_{dc1} - S_{bn} \cdot V_{dc2} \\ v(S_c, o) = S_{cp} \cdot V_{dc1} - S_{cn} \cdot V_{dc2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, V_{dc1} 和 V_{dc2} 分别是直流侧滤波电容 C_1 和 C_2 的端电压, p 点为直流侧正极, n 点为直流端负极。

由基尔霍夫定律得式(3)：

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3)$$

式中, i_a 、 i_b 、 i_c 为 a、b、c 三相电流。

由上三式可以得到：

$$v(0, N) = -(v(0, S_a) + v(0, S_b) + v(0, S_c)) / 3 \quad (4)$$

从而得到式(5)：

$$\begin{aligned} v(S_a, N) &= (S_{zp} - (S_{ap} + S_{bp} + S_{cp}) / 3) \\ &\cdot V_{dc1} + (-S_{an} (S_{ap} + S_{bp} + S_{cp}) / 3) \cdot V_{dc2} \\ v(S_b, N) &= (S_{bp} - (S_{ap} + S_{bp} + S_{cp}) / 3) \\ &\cdot V_{dc1} + (-S_{bn} (S_{ap} + S_{bp} + S_{cp}) / 3) \cdot V_{dc2} \\ v(S_c, N) &= (S_{cp} - (S_{ap} + S_{bp} + S_{cp}) / 3) \\ &\cdot V_{dc1} + (-S_{cn} (S_{ap} + S_{bp} + S_{cp}) / 3) \cdot V_{dc2} \end{aligned} \quad (5)$$

对直流侧正端 p 可以得方程：

$$i_p = -i_{cl} + i_{dc}; i_p = S_{ap} \cdot i_a + S_{bp} \cdot i_b + S_{cp} \cdot i_c, i_{cl} = C_1 \frac{dV_{dc1}}{dt}$$

对于负端 n 可以得方程：

$$C_2 \frac{dV_{dc2}}{dt} = (S_{an} \cdot i_a + S_{bn} \cdot i_b + S_{cn} \cdot i_c) - i_{dc}$$

式中, i_a 、 i_b 、 i_c 为 a、b、c 三相电流, i_{dc} 为直流侧母线电流。

综合以上关系列状态方程得二极管钳位式的三电平逆变器等效的 ABC 坐标系的电路模型式(6)：

$$\begin{aligned} &\left\{ L \frac{di_a}{dt} \right\} = \\ &\left\{ \begin{array}{cccc} -R & 0 & 0 & \frac{2S_{ap} - S_{bp} - S_{cp}}{3} & \frac{-2S_{an} + S_{bn} + S_{cn}}{3} \\ 0 & -R & 0 & \frac{2S_{ap} - S_{bp} - S_{cp}}{3} & \frac{-2S_{an} + S_{bn} + S_{cn}}{3} \\ 0 & 0 & -R & \frac{2S_{ap} - S_{bp} - S_{cp}}{3} & \frac{-2S_{an} + S_{bn} + S_{cn}}{3} \end{array} \right\} \\ &\left\{ \begin{array}{c} i_a \\ i_b \\ i_c \\ V_{dc1} \\ V_{dc2} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{array} \right\} i_{dc} \end{aligned} \quad (6)$$

3 多电平最优空间矢量 SVPWM 控制方法

多电平空间矢量 PWM 方法现在主要用在三电平变流器(总共 27 个矢量)的电机控制, 由于电平数增加, 矢量也急剧增加, 这个方法用于五电平(总共 125 个矢量, 2 个单元串联)以上时分析十分繁杂, 常规的空间矢量调制方法不能满足电压较高、电平数目多时的要求。下面介绍一种适用于多电平逆变器的最优空间矢量 PWM 控制方法^[3-5]。

这种方法基于空间电压矢量控制的原理, 通过选取最优空间矢量来确定三相最佳电平组合, 得到三相电压实际电平值, 从而生成三相电压 PWM 控制模式。这种方法微机执行时间与电平数目无关, 不受电平数目增加的影响, 当电压较高电平数目较多时有较大优势。

多电平最优空间电压矢量控制方法的具体过程如下, 首先借助电平调整的方法将成百上千的待选矢量限制在接近参考电压矢量的 8 个矢量, 而不管多电平变流器的电平级数多大, 然后将这八个矢量与参考电压矢量一一对比, 最接近参考电压矢量的即为最优空间电压矢量。

静止坐标系中 d - q 轴电压分量 U_d 、 U_q 和 θ 角经旋转变换得到三相参考电压 U_a 、 U_b 、 U_c , 设每一级电平即电容器电压为 U_{dc} , 三相参考电平数目 U_a^* 、 U_b^* 、 U_c^* 可由下式求得

$$U_a^* = U_a / U_{dc}, U_b^* = U_b / U_{dc}, U_c^* = U_c / U_{dc}$$

由三相参考电平数目 U_a^* 、 U_b^* 、 U_c^* 形成参考电压矢量 $V^* = U_a^* + p U_b^* + p^2 U_c^*$ 。

式中：

$$\rho = e^{j120} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

由于电平级数只能为整数, 故此对 U_a^* 、 U_b^* 、 U_c^* 分别向上、向下就近取整数, 得 U_{1a} 、 U_{1b} 、 U_{1c} 、 U_{2a} 、 U_{2b} 、 U_{2c} , 如表 1 所示。向上取整时为 U_{1a} 、 U_{1b} 、 U_{1c} , 向下取整

表 2 生成的 8 个待选矢量表

矢量序号	a 相电平值 U_{ai}	b 相电平值 U_{bi}	c 相电平值 U_{ci}
V_1	U_{1a}	U_{1b}	U_{1c}
V_2	U_{1a}	U_{1b}	U_{2c}
V_3	U_{1a}	U_{2b}	U_{1c}
V_4	U_{1a}	U_{2b}	U_{2c}
V_5	U_{2a}	U_{1b}	U_{1c}
V_6	U_{2a}	U_{1b}	U_{2c}
V_7	U_{2a}	U_{2b}	U_{1c}
V_8	U_{2a}	U_{2b}	U_{2c}

时 U_{2a} 、 U_{2b} 、 U_{2c} 进一步对 U_{1a} 、 U_{1b} 、 U_{1c} 、 U_{2a} 、 U_{2b} 、 U_{2c} 这些电平值分别进行组合，可以得到 8 个电压空间矢量如表 2 所示，第 i 个矢量 $V_i = U_{ai} + \rho U_{bi} + \rho^2 U_{ci}$ ($i=1,2,\dots,8$)。式中 U_{ai} 、 U_{bi} 、 U_{ci} 分别为第 i 个矢量 a、b、c 的电平数值， U_{ai} 取 U_{1a} 或 U_{2a} ， U_{bi} 取 U_{1b} 或 U_{2b} ， U_{ci} 取 U_{1c} 或 U_{2c} 。

在八个矢量中选取与参考电压矢量 V^* 最接近的空间电压矢量 V_i ， V_i 满足条件 $\min|V^* - V_i|$ ($i=1,2,\dots,8$) 由此可得的 V_i 就是最优空间电压矢量，这里最优指 V_i 是 DQ 复平面上所有矢量中最接近参考电压矢量 V^* 的。

4 三电平三相逆变器建模

由于大功率电力电子装置的结构非常复杂，若直接对装置进行实验，代价高且费时费力，故在研制过程中需要借助计算机仿真技术，对装置的运行机理与特性、控制方法的有效性进行验证，以预测并解决问题，缩短研制时间。MATLAB 软件具有强大的数值计算功能和方便直观的 Simulink 建模环境，其 PSB(电力系统模块库) 中有丰富的各类电气元件模块，如电力电子器件模型，三相桥电路模型，PWM 脉冲发生器模型以及各种测量与算法模块，为建立电力电子装置的模型提供了极大的方便。

图 2 是利用 Matlab/PSB 中的各种元件模块所建立的一个三相三电平电压型逆变器的系统仿真模型。逆变器的输出通过一台三相变压器供给一个交流负载。变压器的漏抗和负载电容可对逆变器输出电压进行滤波，以消除交流电压中的谐波成分。

本系统中使用了一个三相三电平桥，此三电平桥的桥臂数为 3，功率开关元件为 IGBT，每个桥臂除开关器件外，还有 4 个与开关器件反并联的续流二极管和两个中点钳位二极管。开关器件内阻 $R_{on}=0.1m\Omega$ ，正向压降 $U_f=0.7V$ ，二极管的正向压降也为 0.7V。

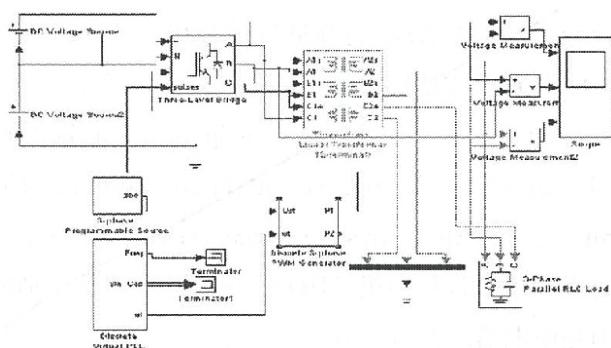


图 2 三电平三相逆变器的系统仿真模型

逆变器输出通过变压器给一个三相交流负载供电。这一变压器使用 PSB 中的三相线性变压器模块，它是三个单相双绕组变压器构成的，有 12 个端子。有关参数设置为：三相额定功率为 5000VA， $f=50Hz$ ，一次绕组线电压为 1500V，二次绕组线电压为 1400V。

采用三相离散 PWM 发生器模块可为三电平三相逆变器产生触发脉冲，在本模块中，PWM 脉冲发生器的输出端 P1 产生一组 12 脉冲序列，供给三电平桥作为驱动脉冲信号。

在本模型中，直流母线电压设为 1000V；载波频率设为 1500Hz；三个调制信号的频率设为 50Hz。

5 三电平三相逆变器的仿真结果及结论

设置仿真时间为 0.08 秒，启动仿真，在示波器上可观测到 3 个电压波形，如图 3 所示：(1) 三电平桥输出的相电压波形、(2) 三电平桥输出的线电压波形 (3) 加在负载上的线电压。从波形图可以看出：三电平桥相电压有三个电平： $\pm 500V, 0V$ ；三电平线电压有 5 个电平： $\pm 1000V, \pm 500V, 0V$ 。而负载电压非常接近正弦波，这是由于变压器漏感和负载电容所组成的滤波回路大大地减少了逆变器输出电压中的谐波。

仿真实例的结果证明了仿真模型的正确性，此模型可用于定量地分析计算逆变器的输出特性，对实际开发工作有重大的参考价值。

计算机仿真对于研究大型电力电子装置具有非常重要的作用，利用本文基于 Matlab/Simulink 环境构建的三电平 PWM 三相逆变器仿真模型，可以在较短的时间内以较小代价验证系统的运行机理和控制方法的有效性，有利于加快高电压大容量三相逆变器的研发进度。

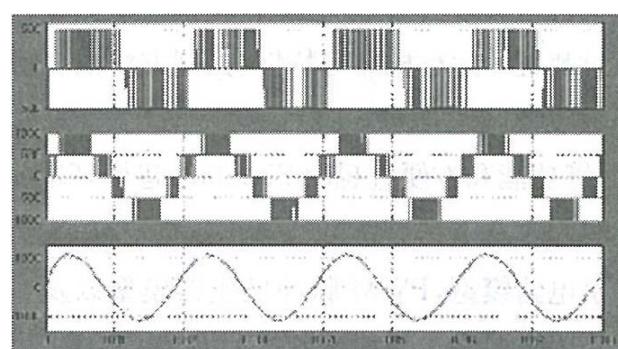


图 3 三电平三相逆变器输出电压波形

参考文献

- [1] Shun Jin, Yanru Zhong. A novel three-level SVPWM algorithm considering neutral-point control, narrow-pulse elimination and dead-time compensation. IPEMC 2004. The 4th International. 2004, 2, 688—693.
- [3] R. S. Kanchan, M. R. Baiju, K. K. Mohapatra, P. P. Ouseph and K. Gopakumar. Space vector PWM signal generation for multilevel inverters using only the sampled amplitudes of reference phase voltages. IEEE Proc. -Electr. Power Appl, 2005, 152(2): 297—309.
- [3] Steinke J. Switch frequency optional PWM control of a three level inverter. IEEE. Transactions Power Electronics, 1992, 7(7): 487—496.
- [4] 薄保中, 苏彦民, 马学亮. 多电平最优空间矢量PWM控制方法的研究. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 89—92.
- [5] 吴忠智, 吴加林. 变频器应用手册(第二版). 北京: 机械工业出版, 2002: 356—369.

作者简介

定明芳, 男, 1976 年生, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力电子和电力传动。