

文章编号: 1005-0523(2011)01-0068-05

NPC型三电平逆变器SVPWM控制研究与仿真

肖潇, 宋平岗, 喻冲

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 多电平逆变器通过对直流侧的分压和开关状态的不同组合, 实现多电平阶梯波输出电压, 能有效地提高逆变器系统容量和耐压水平, 减小输出电压谐波和开关损耗。三电平逆变器以其优越的性能已逐步成为了大容量, 高电压电机调速的主要实现方式之一。以二极管箝位型(NPC)为研究对象, 分析了空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制三电平逆变器的算法原理, 最后给出了用MATLAB仿真的仿真结果。

关键词: 三电平; NPC; SVPWM; MATLAB

中图分类号: TM464

文献标识码: A

二极管三电平逆变器在中高压交流电机传动, 电网无功补偿等多个领域具有广泛的应用。与两电平拓扑相比, 具有如下优点: ①很好的解决了器件耐压不够高的问题; ②输出相电压和线电压更接近正弦波; ③在相同的频率下, 输出谐波含量大幅降低。

电压空间矢量PWM调制方法是通过对开关矢量的选择以及开关矢量作用时间的计算来实现的。本文以三电平逆变器为研究对象, 对其采用SVPWM调制方法, 并进行仿真研究。

1 NPC三电平逆变器拓扑结构

图1所示为二极管箝位型三电平逆变器主电路, U_{dc} 为直流电压; S_{mn} ($m=a, b, c; n=1, 2, 3, 4$) 为开关管。 D_j ($j=1, 2, 3, 4, 5, 6$) 为二极管。其每一相可以输出电压为 $U_{dc}/2, 0, -U_{dc}/2$ 的3种电平。以a相为例, 其开关管的开关状态和输出电平的关系见表1。

表1 A相开关管状态表

Tab.1 Switching variables of phase A

输出电平	S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}
U_{dc}	on	on	off	off
0	off	on	on	off
$-U_{dc}$	off	off	on	on

由图1和表1分析可知, 主开关管 S_{a1} 和 S_{a4} 不能同时导通, 否则4个开关管将短路, 且 S_{a1} 和 S_{a3} , S_{a2} 和 S_{a4} 的工作状态刚好相反, 即工作在互补状态, 平

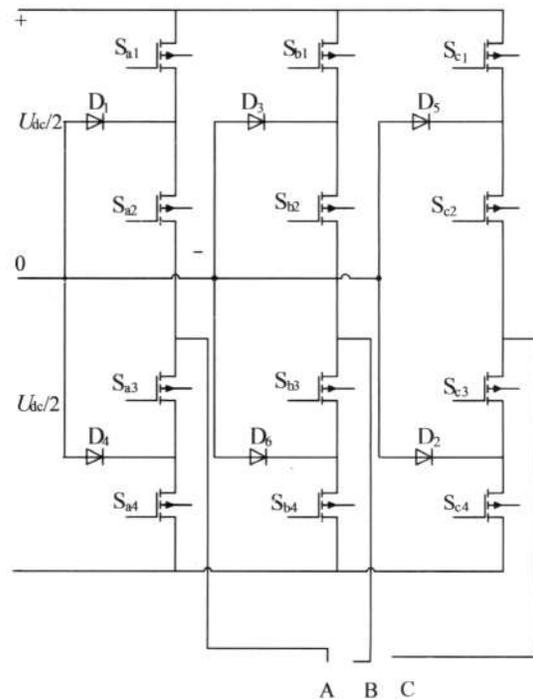


图1 NPC型三电平逆变器主电路

Fig.1 Main circuit of NPC three-level inverter

收稿日期: 2010-11-18

作者简介: 肖潇(1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向是电力电子技术与电力传动。

均每个主开关所承受的正相阻断电压为 $U_{dc}/4$ 。

2 SVPWM调制原理

2.1 三电平逆变器空间矢量分析

对于通用的两电平逆变器,工作状态只有 $2^3=8$ 种,而三电平逆变器有 $3^3=27$ 种。可用 P, O, N 表示直流侧电源的3种电位, P 表示 $+U_{dc}/2$, O 表示零电位, N 表示 $-U_{dc}/2$ 。用该3个字母表示三电平逆变器在此工作状态下三相输出端 A, B, C 分别与直流侧电源哪一电位点相连。如有 PPP, OPN, NPN 等27种工作状态。

若定义开关向量 S_a, S_b, S_c 代表各相桥臂的输出状态,则此时可定义空间电压矢量为

$$V(k) = \frac{1}{3}U_{dc}(S_a + aS_b + a^2S_c) = \frac{1}{6}U_{dc}[(2S_a - S_b - S_c) + j\sqrt{3}(S_b - S_c)] \quad (1)$$

式中: $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, k 表示开关状态,如 PNN, S_a, S_b, S_c 分别有 P, O, N 三种状态,设 P 对应取1, O 对应取0, N 对应取-1。

以 PNN 开关矢量为例,运用上式计算电压矢量如下

$$V(PNN) = \frac{1}{6}U_{dc}[(2+1+1) + j\sqrt{3}(1-1)] = \frac{2}{3}U_{dc} \quad (2)$$

同理,可计算得其它开关矢量。按幅值大小来分,共有6个幅值为 U_{dc} 的大矢量,6个幅值为 $2U_{dc}/\sqrt{3}$ 的中矢量,12个幅值为 $U_{dc}/2$ 的小矢量,3个零矢量。

将这些矢量在二维平面上进行排列,则在 $\alpha-\beta$ 平面上的系统的空间矢量如图2所示。如不计重合矢量,独立的矢量只有19个。

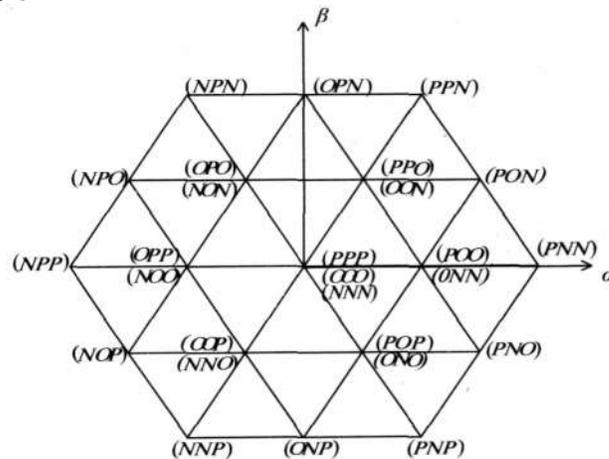


图2 NPC三电平逆变器的空间矢量分布图
Fig.2 Space vector distribution of NPC Three-level inverter

2.2 矢量作用时间计算

一般定义参考电压矢量为

$$V_{ref} = |V_{ref}|e^{j\theta} \quad (3)$$

式中: $|V_{ref}|$ 为参考电压矢量 V_{ref} 的幅值; θ 为参考电压矢量的相位角。

所谓的SVPWM法就是用逆变器的输出相电压去逼近参考电压矢量 V_{ref} 。根据伏秒平衡可得

$$\begin{aligned} V_{ref}T_s &= V_aT_a + V_bT_b + V_cT_c \\ T_s &= T_a + T_b + T_c \end{aligned} \quad (4)$$

式中: T_s 为采样周期; T_a, T_b, T_c 分别为矢量 V_a, V_b, V_c 对应的作用时间。因此由以上的公式可以求出各个矢量的作用时间,求得每个小区间内矢量的作用时间表。如图3所示,当矢量位于第一扇区中的A小区

间时, A 小区间内 V_0 由 V_{10} , V_{20} 三个基本矢量组成, 由上述公式可知

$$V_{\text{ref}} T_s = 0 \times T_0 + \frac{1}{2} U_{\text{dc}} e^{j\theta} T_{10} + \frac{1}{2} U_{\text{dc}} e^{j\frac{1}{3}\pi} T_{20}$$

这样可求出

$$\begin{aligned} T_{10} &= 2mT_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ T_{20} &= 2mT_s \sin\theta \\ T_{30} &= \left[1 - 2mT_s \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right)\right] T_s \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $m = \frac{2V_{\text{ref}}}{\sqrt{3}U_{\text{dc}}}$ 。

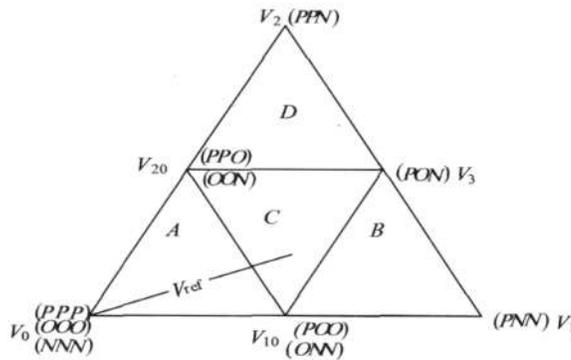


图3 扇区 I 的四个区间
Fig.3 Four regions of sector I

3 仿真实现

3.1 判断 V_{ref} 所在扇区

我们将 α - β 坐标分为 6 个扇区, 每个扇区为 60° 。当 $0 < \theta \leq \frac{1}{3}\pi$ 时定义为第一扇区, $\frac{1}{3}\pi < \theta \leq \frac{2}{3}\pi$ 定义为第二扇区, 依次类推我们可得到参考矢量所在的扇区。

3.2 判断 V_{ref} 所在区间

6 个扇区划分是相同的, 可将其它的扇区旋转到第一扇区中, 旋转到第一扇区后要根据幅值和新的相角 $\theta' = 0 \sim \frac{1}{3}\pi$ 重新计算 V'_a, V'_b 。若 $V'_a + \frac{\sqrt{3}}{3}V'_b \leq \frac{1}{3}U_{\text{dc}}$, 则 $A=1$, 否则 $A=0$; 若 $V'_a - \frac{\sqrt{3}}{3}V'_b \geq \frac{1}{3}U_{\text{dc}}$, 则 $B=1$, 否则 $B=0$; 若 $V'_b \geq \frac{\sqrt{3}}{6}U_{\text{dc}}$, 则 $D=1$, 否则 $D=0$; 若 A, B, C 都取 0, 则 $C=1$, 否则 $C=0$ 。

文中: V'_a, V'_b 分别为参考矢量在直角坐标系中水平轴和垂直轴上的分量, A, B, C, D 为扇区 I 的 4 个小区间。

3.3 确定基本矢量的作用顺序

在三电平逆变器 SVPWM 方法中, 为了防止两个串联的开关管同时导通或关断, 以及减少开关次数, 开关状态转换必须满足下列要求:

1) 同一桥臂不允许 N 状态直接切换到 P 状态。

2) 从一个开关状态到下一个开关状态, 三相桥臂只允许一相有开关动作。因为如果有两相或者三相的桥臂同时作用, 会在线电压的半周期内出现反极性的脉冲, 产生反向转矩, 引起脉动。

为此通常采用输出矢量的首发矢量均采用正小矢量或者负小矢量的算法, 本文采用的是首发矢量为正小矢量。正小矢量和负小矢量分别指开关状态只有 P, O 或者 N, O 状态的小矢量。基于上述的原则, 借

鉴二电平采用中心对称7段式脉冲系列,将 T_s 分为7段,以B区间为例,矢量作用顺序为 $POO, PON, OON, ONN, OON, PON, POO$,作用时间分别为 $T_a/4, T_b/2, T_c/2, T_a/2, T_c/2, T_b/2, T_a/4$ 。

3.4 跳变时间的计算

根据每个区间的矢量作用顺序和作用时间,画出该区间的开关状态的波形图。图4为第一扇区B区内参考电压的输出电压矢量时序图。由图4可知3个开关的跳变时间分别为 $T_a/4, T_a/4+T_b/2, T_a/4+T_b/2+T_c/2, 3T_a/4+T_b/2+T_c/2, 3T_a/4+T_b/2+T_c, 3T_a/4+T_b+T_c, T_a+T_b+T_c$ 。

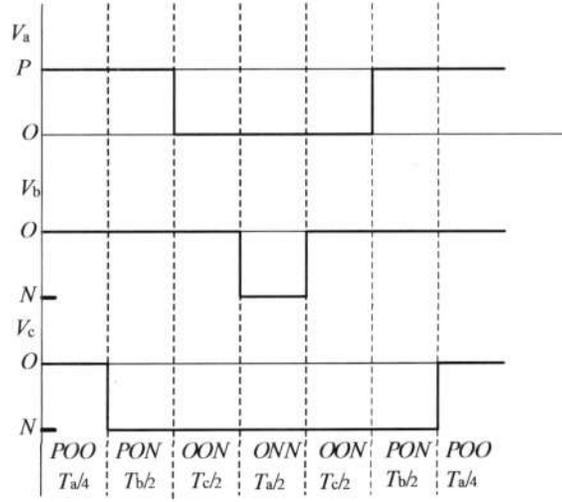


图4 B区内参考电压的输出电压矢量时序图
Fig.4 Output voltage of the reference voltage in Region B

3.5 仿真结果

用MATLAB软件进行仿真,设采样周期为0.01 s,直流侧电压 $U_{dc}=200$ V,负载电阻 $R=100 \Omega$,负载电感 $L=50 \times 10^{-3}$ H。图5~图8给出了调制比 M 分别为0.778时和0.389时,A相相电压和线电压波形。

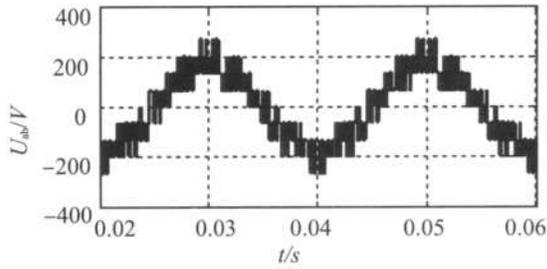


图5 M=0.778时的相电压 U_{an}
Fig.5 Phase voltage waveform of U_{an} at $M=0.778$

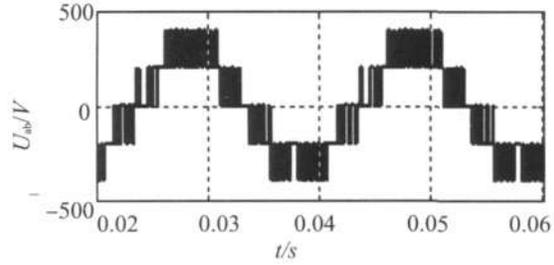


图6 M=0.778时的线电压 U_{ab}
Fig.6 Line voltage waveform of U_{ab} at $M=0.778$

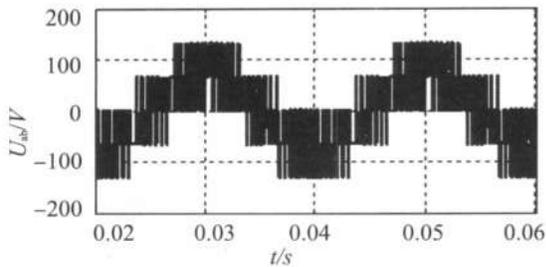


图7 M=0.389时的相电压 U_{an}
Fig.5 Phase voltage waveform of U_{an} at $M=0.389$

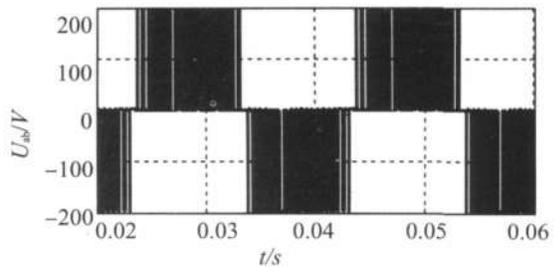


图8 M=0.389时的线电压 U_{ab}
Fig.8 Line voltage waveform of U_{ab} at $M=0.389$

4 结论

从仿真结果可以看出,三电平逆变器的特点是由多个电压等级合成的输出电压为正弦波形,并且当调制比 $M > 0.5$ 时,此时线电压呈现五电平。当调制比 $M \leq 0.5$ 时,参考电压在 A 区间,此时参考矢量由小矢量,零矢量组成,线电压退化为三电平,即三电平逆变器吃时已退化为两电平。

参考文献:

- [1] 杨超,陶生桂,谢维达. 二极管箝位式多电平逆变器拓扑结构分析与控制策略研究[J]. 中国科技信息,2009(2):25-29.
- [2] 宋文祥,陈国呈. 三电平中点钳位式逆变器 SVPWM 方法的研究[J]. 电工电能新技术,2005,32(3):34-36.
- [3] 林磊,邹云平,钟和清. 二极管箝位型三电平逆变器控制系统研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15):33-39.
- [4] 程善美,姜文龙,孙文焕,等. SIMULINK 环境下空间矢量 PWM 的仿真[J]. 电气自动化,2002(3):39-41.
- [5] 田玉超,刘勇,丛望. SVPWM 控制三电平逆变器算法研究[J]. 应用科技,2005(3):34-36.
- [6] 谭聪. 三电平逆变器空间电压矢量 PWM 调制及实现[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
- [7] BAE J, KIM Y, BAEK S, et al. A study on the comparison methods for a three-level converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,3(2):2-6.
- [8] MENG Y, LIU Z, SU Y, et al. Study on mathematical model and Lyapunov—based control for three-phase four-wire three-level NPC voltage-source rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2005(2):20-23.

Research and Simulation of SVPWM Control on NPC Three-level Inverter

Xiao Xiao, Song Pinggang, Yu Chong

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Through separating pressure of dc and different combination of switch state, multi-level inverter realizes multi-level ladder wave output voltage, which can effectively improve capacity and voltage pressure levels of inverters, and reduce the output voltage harmonic and switching losses. Adopting NPC as research object, this paper analyzes the algorithm principle of SVPWM, and finally presents the simulation results of MATLAB.

Key words: three-level; NPC; SVPWM; SIMULINK