

NPC型三电平逆变器SVPWM优化与仿真

俞健¹，蔡治华¹，王建春²

¹ 上海电力新能源发展有限公司 上海市 200090

²深圳市中兴昆腾有限公司 广东 深圳 518000

摘要：中点箝位型(neutral point clamped, NPC)拓扑为三电平逆变器中最广泛使用的，提出一种三电平SVPWM转化为两电平的SVPWM简化算法，极大减少了运算量，易于工程实现。通过Matlab-Simulink仿真验证并设计搭建20kW光伏并网逆变器验证了控制算法的正确性和工程可行性。

关键词：逆变器，NPC型三电平，空间矢量脉宽调制

The SVPWM Optimization and Simulation of NPC-type Three Level Inverter

Yu Jian¹, Cai Zhihua¹, Wang Jianchun²

¹ShangHai Electric Power Co. , Ltd , ShangHai 200090

²ZTE Quantum Co.,Ltd. Shenzhen 518000

Abstract: The Neutral point clamped topology is the most widely used in three level inverter, propose a simple algorithm by transform the three level SVPWM to two level SVPWM, which greatly reducing the computation of algorithm and easy to realize in engineering. This algorithm has been Verified by Matlab-Simulink and one 20kW solar inverter, which is verified correctly and feasible in the project.

Keywords: Inverter, NPC-type three level, SVPWM

中图分类号: TM464 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2014)11-5-124

0 引言

三电平逆变器由于对功率器件耐压要求低、输出谐波含量低、EMI 小等优势在中高压大容量逆变器中被广泛应用。三电平调制算法主要有空间矢量调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 和载波脉宽调制 (carrier-based pulse width modulation, CBWM) 等。通过对传统三电平 SVPWM 扇区进行重新划分，简化为两电平 SVPWM，使整个大扇区内驱动逻辑相同一致，极大减小了算法和驱动逻辑生成的复杂度，并通过仿真和实验样机验证了的正确性。

1 NPC型三电平拓扑

图 1 为 NPC 型三电平逆变电路拓扑, 其中 VT_{Ai} , VT_{Bi} , VT_{Ci} ($i=1, 2, 3, 4$) 为开关管, VD_{Aj} , VD_{Bj} , VD_{Cj} ($j=1, 2$)

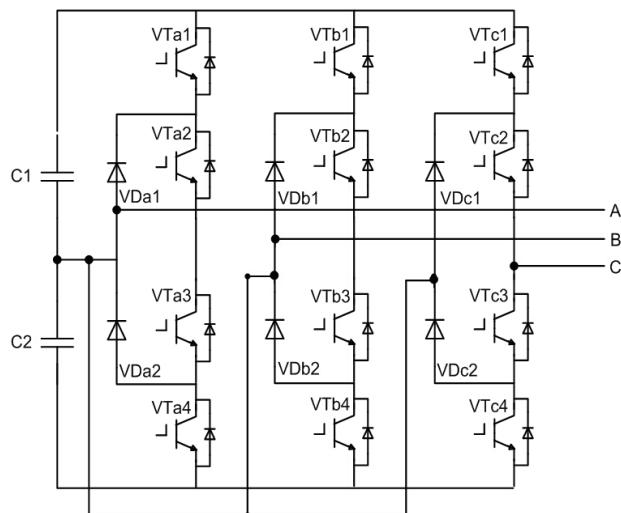


图 1 NPC 型三电平拓扑

Fig.1 NPC-type three level topology

为箝位二极管，箝位二极管中点接到直流侧电容中点，在中间两个开关管导通时将输出电平箝位到0，同时使每个开关管关断电压箝位至母线电压的一半。

表1为三电平逆变器开关状态、输出电压以及工作状态间的对应关系；在三电平逆变器工作的任意时刻，每相的开关管驱动1和3、2和4两两互补，每相可输出 $U_{dc}/2$ 、 0 、 $-U_{dc}/2$ 三种电平，分别对应为1、0、-1三种状态。

开关状态与输出电压对应如表1所示，其中1代表开关管开通，0代表开关管关断， $x=a, b, c$ 。

表1 开关状态与输出电压、状态对应关系

Table 1 Switch State & Output Voltage & State

VTx1	VTx2	VTx3	VTx4	输出电压	状态
1	1	0	0	$U_{dc}/2$	1
0	1	1	0	0	0
0	0	1	1	$-U_{dc}/2$	1

2 三电平逆变器空间矢量

由表1可知三电平逆变器的每相输出有1、0、-1三种状态，所以三电平逆变器共有 $3^3=27$ 种开关状态，具体矢量分布如图2所示，其中包括大矢量6个、中矢量6个、小矢量12个、零矢量3个；其中大矢量与中矢量为独立矢量，零矢量和小矢量均有冗余矢量，冗余矢量对三电平逆变器的直流侧电容电压影响相反，通过对冗余矢量时间的控制实现三电平中点位控制等等，所以三电平矢量较多，控制自由度高，合成方式更灵活。

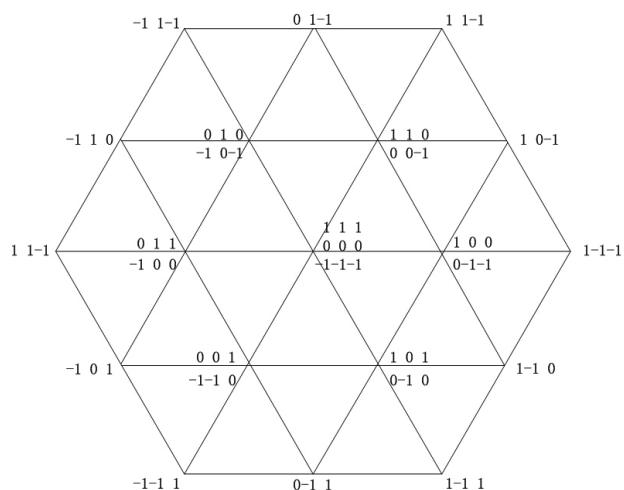


图2 三电平逆变器矢量分布

Fig.2 Space Vector diagram of three level inverter

3 优化三电平 SVPWM 算法

3.1 三电平大扇区重新划分

将三电平大扇区以小矢量为中心，重新划分成6个大扇区，如此划分，可通过矢量合成，将每个大扇区转换为两电平SVPWM算法，并按照两电平扇区顺序将每个大扇区划分成6个小扇区，分别对应两电平下的大扇区，并可按照两电平计算每个小扇区中矢量作用时间，开关管驱动脉宽，具体扇区划分如下图：

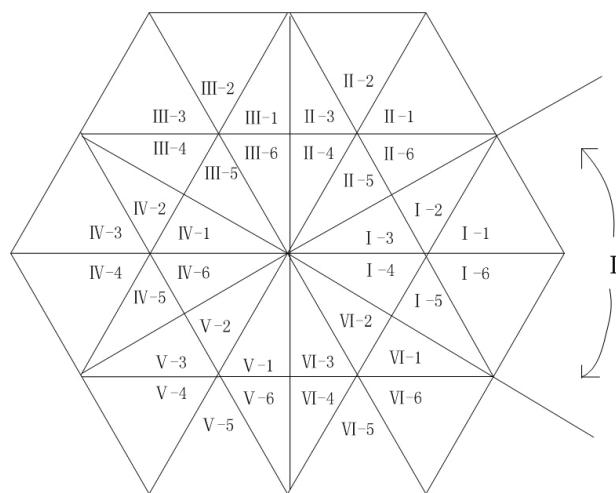


图3 三电平扇区划分

Fig.3 Sectors of three level

3.2 大扇区确定

根据不同的大扇区内相电压关系，可通过如下方式确定矢量所处的大扇区号，如果 $U_a>0$ ，则 $A=1$ ，否则 $A=0$ ；如果 $U_b>0$ 则 $B=1$ ，否则 $B=0$ ；如果 $U_c>0$ 则 $C=1$ ，否则 $C=0$ ；令 $M=4A+2B+C$ ，大扇区与 M 值对应关系如表2所示。

表2 大扇区判断

Table 2 Judgment rules of large sector

M值	1	2	3	4	5	6
大扇区						

3.3 三电平矢量合成

将三电平矢量转换成 $-$ 静止坐标系矢量后，减去正小矢量（大扇区中心矢量）在 $-$ 静止坐标系值 U_{ref0} 、 U_{ref0} 得到最终 U_{ref} 、 U_{ref} ，其中每个大扇区对应的 U_{ref0} 、 U_{ref0} 如下表。 $U_{dc}/3$

表3 大扇区中心矢量对应 U_{ref0} 、 U_{ref0}

Table 3 U_{ref0} 、 U_{ref0} of Large Sector Mid-vector

大扇区	中心矢量	U_{ref0}	U_{ref0}
	100	$U_{dc}/3$	0
	110	$U_{dc}/6$	$U_{dc}/2\sqrt{3}$
	010	$-U_{dc}/6$	$U_{dc}/2\sqrt{3}$
	011	$-U_{dc}/3$	0
	001	$-U_{dc}/6$	$-U_{dc}/2\sqrt{3}$
	101	$U_{dc}/6$	$-U_{dc}/2\sqrt{3}$

3.4 小扇区判断

使用合成后矢量判断小扇区，判断方式同两电平大扇区判断方式，具体如下：如果 $U_{ref} > 0$ 则 $a=1$ ，否则 $a=0$ ；如果 $\sqrt{3}U_{ref} - U_{ref} > 0$ ，则 $b=1$ ，否则 $b=0$ ；如果 $-\sqrt{3}U_{ref} - U_{ref} > 0$ ，则 $c=1$ ，否则 $c=0$ ；令 $N=a+2b+4c$ ，小扇区与 N 值对应关系如表 4 所示。

表 4 小扇区判断

Table 4 Judgment rules of small sector

N值	1	2	3	4	5	6
小扇区	2	6	1	4	3	5

3.5 小扇区矢量作用时间

设 $X = 2\sqrt{3}U_{ref} \cdot T_s/U_{dc}$ ， $Y = (\sqrt{3}U_{ref} + 3U_{ref}) \cdot T_s/U_{dc}$ ， $Z = (\sqrt{3}U_{ref} - 3U_{ref}) \cdot T_s/U_{dc}$ ，每个小扇区矢量作用时间 T_1 、 T_2 如下表 5 所示。

表 5 小扇区矢量作用时间

Table 5 Vector time of small sector

小扇区	1	2	3	4	5	6
T_1	$-Z$	Z	X	$-X$	$-Y$	Y
T_2	X	Y	$-Y$	Z	$-Z$	$-X$

3.6 切换时间

设 $T_a = (T_s - T_1 - T_2)/4$ ， $T_b = T_a + T_1/2$ ， $T_c = T_b + T_2/2$ ，则不同小扇区切换时间 $TCM1$ 、 $TCM2$ 、 $TCM3$ 如下表 6 所示。

表 6 小扇区切换时间

Table 6 Auxiliary time of small sector

小扇区	1	2	3	4	5	6
$TCM1$	T_a	T_b	T_c	T_c	T_b	T_a
$TCM2$	T_b	T_a	T_a	T_b	T_c	T_c
$TCM3$	T_c	T_c	T_b	T_a	T_a	T_b

3.7 驱动生成

三电平逆变器采用 7 段式对称驱动输出，调制方式为同相载波调制，开关顺序以正小矢量作为两电平下的中心零矢量，负小矢量作为起始与结束零矢量，该种驱动方式，矢量输出对称，PWM 谐波含量低，同时每个大扇区驱动逻辑相同，具体驱动逻辑由大扇区中心矢量决定，例如大扇区 1，中心矢量为 $(1, 0, 0)$ ，由三电平逆变器驱动方式，驱动只能从 0 状态到 1 状态，只能从 -1 状态到 0 状态，根据每个大扇区的中心矢量可确定每个大扇区下驱动逻辑。

大扇区 驱动逻辑：

A 相驱动：

$$\begin{cases} V_{Ta1}=TCM1 \\ V_{Ta2}=0 \\ V_{Ta3}=1-TCM1 \\ V_{Ta4}=1 \end{cases}$$

B 相驱动：

$$\begin{cases} V_{Tb1}=1 \\ V_{Tb2}=TCM2 \\ V_{Tb3}=0 \\ V_{Tb4}=1-TCM2 \end{cases}$$

C 相驱动：

$$\begin{cases} V_{Tc1}=1 \\ V_{Tc2}=TCM3 \\ V_{Tc3}=0 \\ V_{Tc4}=1-TCM3 \end{cases}$$

$TCMx(x=1, 2, 3)$ 代表驱动合成时间， $1-TCMx(x=1, 2, 3)$

代表互补驱动时间，0 代表驱动为常开，1 代表驱动为常关。

4 Simulink 仿真

使用 Matlab-simulink 搭建三电平逆变器 20kW 模型如图 4、图 5，通过仿真验证了算法的正确性。

5 样机实现

为证明仿真结果，搭建 20kW NPC 型三电平样机，直流侧电压 600V，输出 18.5kW 时波形，机器输出 THD=1.7%，并网波形较好，证明了算法的工程可行性。如图 7 所示为实验波形。

6 结论

本文针对 NPC 型三电平逆变器，通过对三电平

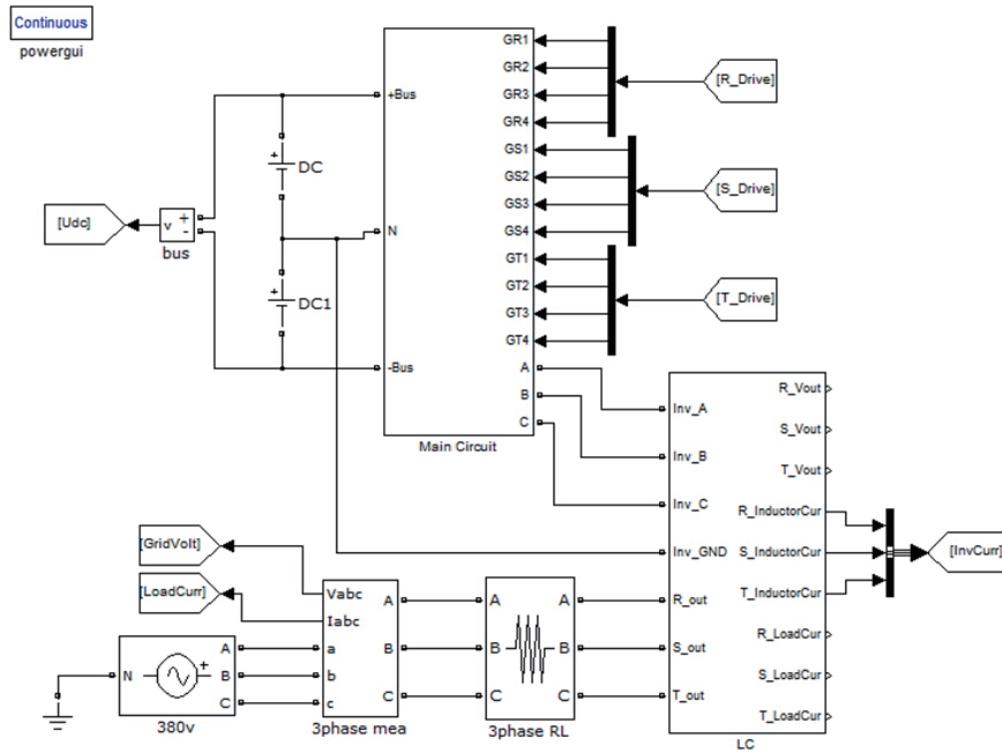


图 4 仿真模型主电路

Fig.4 Simulation module of main circuit

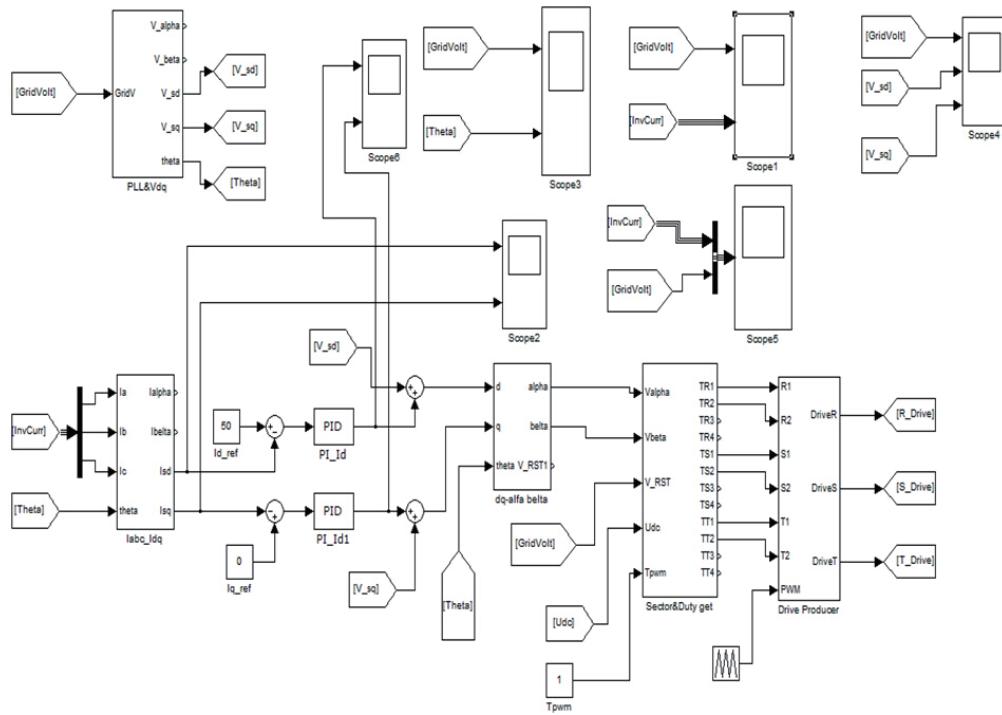


图 5 闭环控制部分模型

Fig.5 Simulation module of closed loop

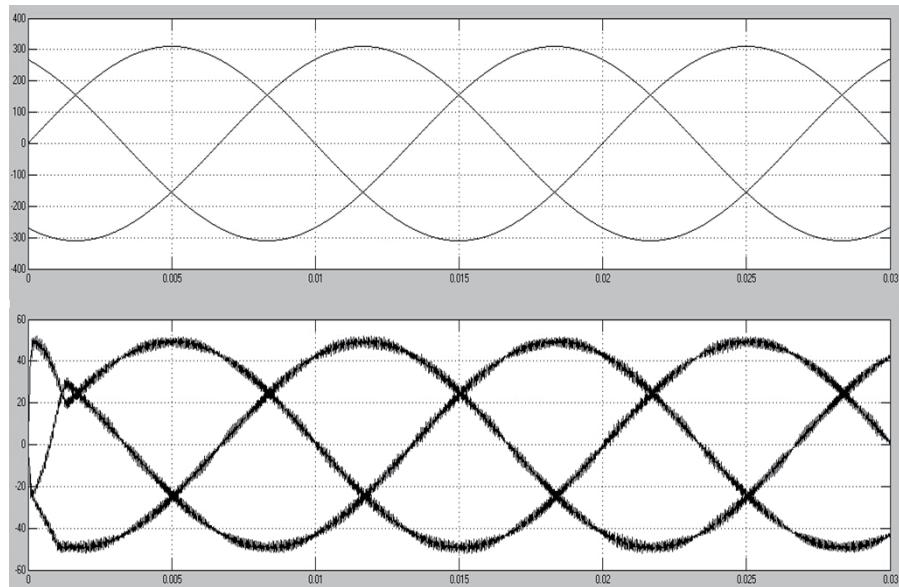


图 6 相电压、电感电流仿真波形
Fig.6 Waveforms of grid volt, inductor current

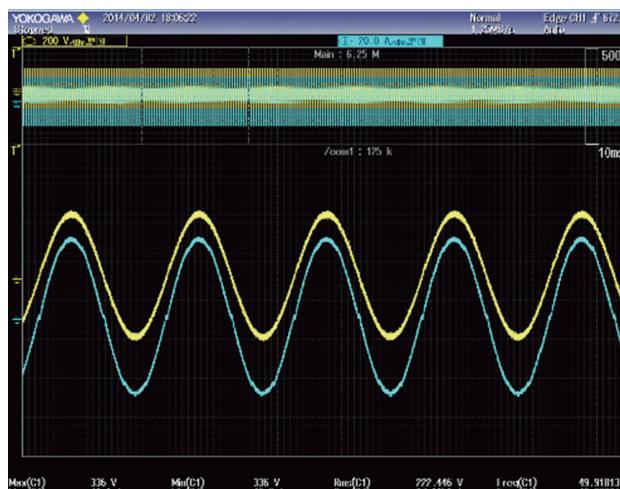


图 7 实验波形
Fig.7 Experimental waveforms

SVPWM 扇区重新划分和简化到两电平下的 SVPWM，使扇区判断、驱动合成更简单。并通过仿真和 20kW 实验样机验证了该 SVPWM 算法的正确型和工程可行性。

参考文献

[1] Richa Adlakha, P.R Sharma. Space vector modulation for

two level and three level VSI[A]. IEEE Beijing Section、IEEE Wuhan Section、Tongji University、Wuhan University、Engineering Information Institute. Proceedings of 2011 World Congress on Engineering and Technology(CET 2011) VOL06[C]. IEEE Beijing Section、IEEE Wuhan Section、Tongji University、Wuhan University、Engineering Information Institute: 2011: 5.

- [2] Huang Jin, Zhang Bo, Lu Yang China Academy of Railway Sciences Beijing ,China. DSP-Based Implementation of a Simple Space Vector Pulse Width Modulation Algorithm for Three-Level NPC Inverter[A]. IEEE Beijing Section、Beijing Jiaotong University. Proceedings of 2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications[C]. IEEE Beijing Section、Beijing Jiaotong University: 2011: 4.
- [3] 夏晶晶, 耿庆娥, 王华平. 基于 KL 坐标系三电平 SVPWM 算法的仿真研究 [J]. 现代电子技术. 2010(20): 174-177.
- [4] 田玉超, 刘勇, 从望. SVPWM 算法控制三电平逆变器仿真 [J]. 应用科技. 2005(02): 37-39.