

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802062

NPC 型三电平逆变器的中点电位控制方法研究*

黄竞智 吴雷 沈佳桦

(江南大学 物联网工程学院 无锡 214122)

摘要: NPC 型三电平逆变器与传统的二电平逆变器相比具有许多优点,因此在高压大功率场合得到了广泛的应用。但特殊的拓扑结构同样使其存在着中点电位不平衡这一固有问题。针对该问题,在空间矢量脉宽调制(SVPWM)的基础上,提出了一种基于平衡因子与矢量选择相结合的中点电荷预测控制策略,即在调制过程中先通过平衡因子来消除中点电荷,但当平衡因子超出其调制范围时,再通过矢量选择来进一步抑制中点电位波动。最后在 MATLAB 中建模并进行了仿真研究,仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 三电平逆变器;中点电位平衡;空间矢量脉宽调制(SVPWM);中点电荷

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Research on control method of NPC three-level inverter
neutral voltage balance

Huang Jingzhi Wu Lei Shen Jiaye

(Internet of things Engineering College, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Neutral-point-clamped three-level inverter has many advantages compared with the traditional two-level inverter, which have make it widely used in high-voltage and high-power applications. But the special topology also has inherent problem about neutral-point voltage imbalance. On the basis of space vector pulse width modulation (SVPWM), a neutral-point charge prediction control strategy based on the combination of balance-factor and vectors-selection is proposed. during the modulation, neutral point charge can be eliminated according to the balance-factor. but when the balance-factor exceeds it's limit, the fluctuation of neutral voltage can be further restrained by vectors-selection. Finally the MATLAB simulation model was established and studied, the simulation results of which proved it's effectiveness.

Keywords: three-level inverter; neutral-point voltage balance; space vector pulse width modulation(SVPWM); neutral-point charge

0 引言

三电平逆变器具有输出电压谐波含量少、电压变化率小、功率器件承受电压低、转换效率高等优点,在高压大功率的场合被广泛应用^[1-3]。但三电平逆变器直流侧两电容的中点电位很容易发生波动和偏移。这种不平衡将导致电路中 IGBT 耐压裕度降低,输出电压波形畸变等,所以解决三电平逆变器中点电位不平衡状况对三电平逆变器的研究意义重大^[4-5]。

中点电位平衡控制方法大致被分为硬件与软件两大类。文献[6]给出了一种抑制三电平逆变器中点电位波动的硬件电路。增加硬件电路的好处是在改善中点电位的情

况下并不影响脉冲宽调制(pulse width modulation, PWM)的生成,但是增加元器件的同时也增加了逆变器整体控制的复杂度以及成本。软件方法较常使用,常见的软件方法有载波脉宽调制^[7](carrier-base pulse width modulation, CBPWM)和空间矢量脉宽调制^[8](space vector pulse width modulation, SVPWM)两种。零序电压注入法是 CBPWM 中一种常用的电位平衡方法,该方法在不改变输出线电压的情况下通过改变中点电流来控制中点电位,但是计算过程过于复杂^[9-10]。SVPWM 因为其直流电压利用率高、电流纹波小并且输出电压形式丰富等特点得以广泛使用,文献[11-12]都是通过将扇区细分化从而降低中点电位波动,方法虽然简单但是效果甚微。文献[13-15]所提出的虚拟

收稿日期:2018-09-13

* 基金项目:江苏省产学研项目(BY2016069)资助

空间矢量控制算法,虽然精度高,但是算法复杂,而且受电路器件参数影响较大,实际中难以实现。本文提出了一种基于平衡因子与矢量选择相结合的中点电荷预测控制方法,当中点电荷预测控制中平衡因子超出极限范围后,再通过调整矢量组的选择,在不改变合成矢量的前提下进一步抑制中点电位波动。

1 NPC 三电平逆变器拓扑结构及 SVPWM 原理

常见的 NPC 型三电平逆变器的主电路结构如图 1 所示。逆变器每相桥臂由 4 个功率管 $S_{i1} \sim S_{i4}$ 、4 个续流二极管 $D_{i1} \sim D_{i4}$ 以及 2 个箝位二极管 $D_{i5} \sim D_{i6}$ 组成。利用开关状态的不同组合可以获得所需的 P、O、N 3 种电平,本文分别用 1、0、-1 表示。开关函数如下:

$$S_i = \begin{cases} 1, S_{i1}, S_{i2} \text{ 导通}, S_{i3}, S_{i4} \text{ 关断} \\ 0, S_{i2}, S_{i3} \text{ 导通}, S_{i1}, S_{i4} \text{ 关断} \\ -1, S_{i3}, S_{i4} \text{ 导通}, S_{i1}, S_{i2} \text{ 关断} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = a, b, c$ 。

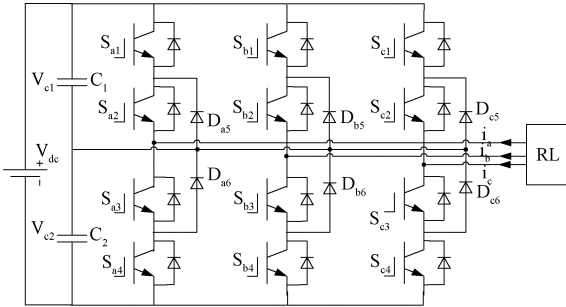


图 1 NPC 型三电平逆变器拓扑结构

由式(1)可知,三电平逆变器的空间电压矢量有 $3^3 = 27$ 种,其中零矢量 3 个;小矢量 12 个;中矢量 6 个;大矢量 6 个。它们对应幅值分别为 $0, U_d/3, \sqrt{3}U_d/3, 2U_d/3$ 。其中小矢量两两重复为一对,存在 P 电平的可称为正小矢量,存在 N 电平的可称为负小矢量。所有矢量形成的三电平空间矢量坐标图如图 2 所示。

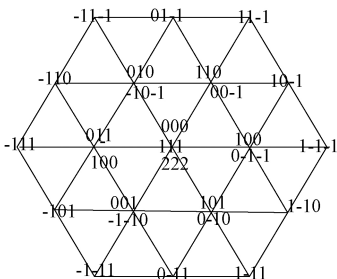


图 2 三电平逆变器平面空间矢量

三电平 SVPWM 算法大致通过坐标变换、参考电压矢量大扇区以及小三角扇区判断、矢量作用时间计算、开关状态映射等步骤实现^[8]。

2 中点电位不平衡原理

图 3 所示为逆变器不同矢量状态下的简化拓扑。图 3(a)和(b)分别是零矢量的两种不同表现形式,图 3(a)是零矢量 PPP 状态下的简化拓扑,此矢量状态下三相负载都不与直流侧中点 O 连接,流入中点 O 的电流 $\Delta \vec{i}_0 = 0$,故中点电位不受影响,NNN 矢量状态下中点电位情况与 PPP 状态相同。而 OOO 矢量状态下,如图 3(b)所示,三相负载都与中点 O 连接,流入中点 O 的电流 $\Delta \vec{i}_0 = \vec{i}_a + \vec{i}_b + \vec{i}_c = 0$,所以该矢量状态下中点电位仍不受影响。图 3(c)所示为大矢量 PNN 状态下的简化拓扑,此时三相负载都只与 P 点或 N 点连接,流入中点 O 的电流 $\Delta \vec{i}_0 = 0$,因此大矢量状态下中点电位依旧不受影响。图 3(d)是中矢量 PON 的简化拓扑,此时流入中点 O 的电流 $\Delta \vec{i}_0 = \vec{i}_b$,因此中矢量状态下,中点电位会受到影响。图 3(e)与(f)是一对正负小矢量状态下的简化拓扑,流入 O 点的电流 $\Delta \vec{i}_0$ 分别为 $-\vec{i}_a$ 和 \vec{i}_a ,所以小矢量状态下中点电位也会受到影响。

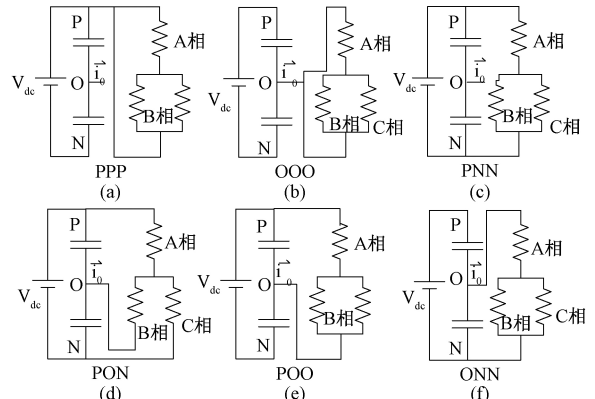


图 3 逆变器不同矢量的拓扑结构简化

3 中点电荷预测控制

3.1 基于平衡因子的中点电荷预测控制

不同中、小矢量开关状态下对应流入中点的电流如表 1 所示。由表 1 可知,每对正负小矢量的中点电流为方向相反的同相电流。基于此,本文先使用一种基于平衡因子的中点电荷预测算法,该算法在不改变最终合成矢量的前提下,通过预测中点电荷,计算出平衡因子 $f (-1 \leq f \leq 1)$,最后来调节正负小矢量时间,达到中点电位平衡的目的。

图 4 所示为空间矢量第一大扇区图,第一大扇区可分为 4 个小三角小扇区,分别对应 A、B、C、D。其中 A 三角扇区的基矢量为零矢量和小矢量,B 三角扇区的基矢量为中矢量和小矢量,而 C、D 三角扇区则为小矢量、中矢量大矢量。以第一大扇区 C 三角区域为例,其合成矢量的开关作用顺序如表 2 所示。

表 1 各矢量开关状态及其对应的中点电流

矢量开关状态	\vec{i}_0	矢量开关状态	\vec{i}_0	矢量开关状态	\vec{i}_0
100	\vec{i}_a	0-1-1	$-\vec{i}_a$	10-1	$-\vec{i}_b$
110	$-\vec{i}_c$	00-1	\vec{i}_c	01-1	$-\vec{i}_a$
010	\vec{i}_b	-10-1	$-\vec{i}_b$	-101	$-\vec{i}_c$
011	$-\vec{i}_a$	-100	\vec{i}_a	-110	$-\vec{i}_b$
001	\vec{i}_c	-1-10	$-\vec{i}_c$	01-1	$-\vec{i}_a$
101	$-\vec{i}_b$	0-10	\vec{i}_b	1-10	$-\vec{i}_c$

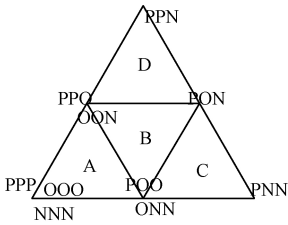


图 4 空间矢量第一大扇区图

表 2 第一扇区 C 区矢量开关顺序及作用时间

开关序列	100	10-1	1-1-1	0-1-1
作用时间	$T_1/2$	T_2	T_3	$T_1/2$

其中, T_1 、 T_2 和 T_3 分别为所选矢量的作用时间,调整正负对称小矢量的作用时间分别为 $T_{1p} = T_1(1+f)/2$, $T_{1n} = T_1(1-f)/2$ 。由此可以计算出一个周期 T_s 内中点的电荷增量 Q_0 。

$$Q_0 = -i_a T_{1p} - i_b T_2 + i_a T_{1n} \quad (2)$$

代入 T_{1p} 、 T_{1n} 后化简得:

$$Q_0 = -i_b T_2 - i_a T_1 f \quad (3)$$

如图 5 所示,假设 $C_1 = C_2 = C$, 此时中点电荷 Q_1 为上下两电容储存电荷之差,即:

$$Q_1 = C_1 \cdot V_1 - C_2 \cdot V_2 \quad (4)$$

此时,只需让即将流入中点的电荷 Q_0 与原本中点的电荷 Q_1 相互抵消,即可使中点电荷为 0,从而使中点电位保持平衡。即:

$$Q_0 + Q_1 = 0 \quad (5)$$

代入 Q_0 、 Q_1 , 可得:

$$f = \frac{-C(V_1 - V_2) - T_2 i_b}{T_1 i_a} \quad (6)$$

3.2 加入矢量选择的中点电荷预测控制

基于平衡因子的中点电荷预测控制虽然能够时时考虑并调整中点电位,但是该算法存在着它的局限性,因为时间 T_{1p} 、 T_{1n} 不可能小于 0,所以平衡因子 f 受到区间 $[-1, 1]$ 的限制。以式(6)为例,当分子不为 0 而分母接近于 0 时,实际计算值 f 必定超出 $[-1, 1]$ 范围,此时 f 只能取边界值 1 或 -1,这就造成一个周期 T_s 内中点电荷只是得到抑

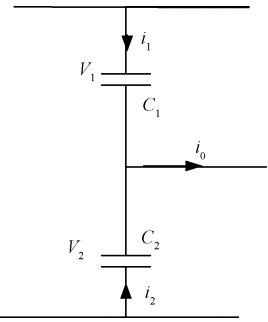


图 5 三电平逆变器电容拓扑

制,并没有完全抵消,中点电位依旧在波动。

为进一步抑制波动,本文在基于平衡因子的中点电荷预测控制算法上加入了矢量选择,通过选取不同的矢量组来进一步抑制中点电位波动。

以第一大扇区 A 三角区域为例,当合成矢量在该区域时,存在两种矢量组的选择,第 1 种是 100、000、00-1、0-1-1,第 2 种是 110、100、000、00-1。两组矢量中,都有一对正负小矢量可以相互抵消,再加上无影响的零矢量外,真正影响中点电位平衡的仅是两个无法成对的小矢量。基于此,可以通过选择影响最小的矢量组来进一步抑制因平衡因子超出范围而造成的电位波动。表 3 所示为两组矢量组的开关序列。

表 3 矢量组开关序列及作用时间

开关序列	100	000	00-1	0-1-1
作用时间	$T_1/2$	T_2	T_3	$T_1/2$
开关序列	110	100	000	00-1
作用时间	$T_1/2$	T_2	T_3	$T_1/2$

一个周期内两种矢量组合的电荷增量 ΔQ_2 、 ΔQ_3 分别为:

$$\Delta Q_2 = \frac{T_1}{2} i_a + T_3 i_c + \frac{T_1}{2} (-i_a) = T_3 i_c \quad (7)$$

$$\Delta Q_3 = \frac{T_1}{2} (-i_c) + T_2 i_a + \frac{T_1}{2} i_c = T_2 i_a \quad (8)$$

从式(7)和(8)可以看出,第 1 种矢量组合中 00-1 影响中点电位,其对应流入中点的电流为 i_c ;第 2 种矢量组合中则是 100 影响中点电位,其对应流入中点电流则是 i_a 。因此,选择不同小矢量,相应的流过中点的电流不同,造成中点电位的偏移也不同。

设两种情况下最终的中点电荷分别为 Q_2 、 Q_3 。

$$Q_2 = Q_1 + \Delta Q_2 \quad (9)$$

$$Q_3 = Q_1 + \Delta Q_3 \quad (10)$$

比较 $|Q_2|$ 、 $|Q_3|$ 的大小,选择数值小的矢量组。因为数值越小,所选矢量组合对中点电位的影响越小。

4 仿真研究

为验证算法的正确性,研究在 MATLAB 仿真软件中

建模并进行了仿真研究。仿真参数如下:直流侧电压暂定 $V_{dc}=700\text{ V}$,直流侧上下电容 $C_1=C_2=4\ 000\ \mu\text{F}$,交流侧频率 $f=50\text{ Hz}$,电感电阻分别为 $L_m=10\text{ mH}$ 、 $R_s=1\ \Omega$,采样频率为 10 kHz 。

实验仿真的初始阶段未加入中点电位控制,随后先加入基于平衡因子的预测控制,最后才加入基于平衡因子与矢量组选择相结合的预测控制。中点电位的仿真波形如图6所示。

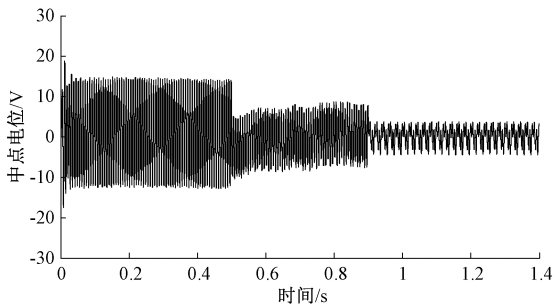


图6 中点电位仿真波形

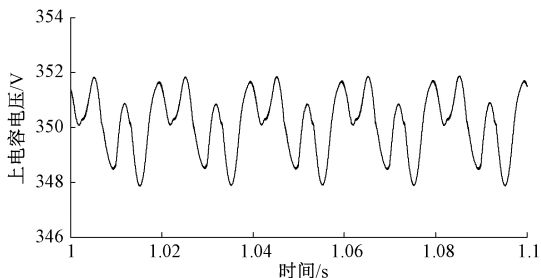
表4所示为不同控制的切换时间以及相应控制下的中点电位波动范围。不加控制的中点电位在 $\pm 15\text{ V}$ 区间内波动,波动较大。只加平衡因子的预测控制虽然能够很好的改善中点电位的波动,但与基于平衡因子和矢量选择相结合的预测控制方法比较,后者的中点电位波动在 $\pm 5\text{ V}$ 之间,对中点电位波动的改善更明显。

表4 不同控制下的中点电位波动范围

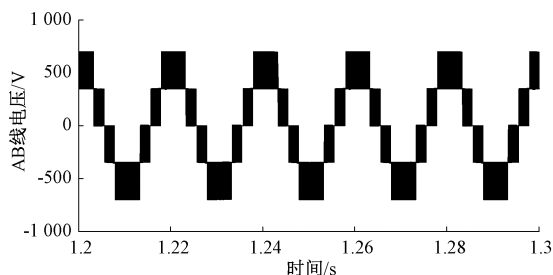
控制方法	切换时间/s	中点电位波动范围/V
无中点电位控制	0	$+14.7\sim-12.7$
平衡因子	0.5	$+8.2.\sim-8.6$
平衡因子与矢量选择相结合	0.9	$+3.6\sim-4.3$

图7(a)所示为中点电荷预测控制下上电容的电压波形,电压波动在 4 V 左右。图7(b)所示为交流输出端的AB线电压波形。

本次研究仿真效果不错,但缺少实物论证,后期将搭建实验平台进一步论证该方法的可行性。



(a) 上电容电压波形



(b) 加中点电荷预测控制的AB线电压波形

图7 仿真波形

5 结 论

本文介绍了 NPC 型三电平逆变器拓扑结构以及 SVPWM 的原理,在分析完中点电位不平衡的原因后,给出了一种基于平衡因子和矢量选择相结合的中点电荷预测控制方法。实验首先对基于平衡因子的中点电荷预测控制进行了仿真研究,结果证明平衡因子的确可以改善中点电位波动,但受其取值范围的影响,也确实存在一定的局限性。对比之后加入矢量选择的仿真效果,研究表明加入矢量选择后的中点电荷预测控制对中点电位波动的抑制效果会更明显。然而本次研究缺乏实物论证,后期将通过实验平台进一步检验该方法的有效性 with 实用性。

参考文献

- [1] 薛高飞,潘启军,吴文力,等.三相三电平逆变装置全系统电路仿真模型研究[J].电机与控制学报,2014,18(4):17-24.
- [2] 康润生,张锐.模块化多电平逆变器的仿真分析[J].电子测量技术,2016,39(3):23-28.
- [3] 马大俊,胡存刚,王群京,等.三电平 ANPC 逆变器中点电压平衡控制策略[J].电子测量与仪器学报,2016,30(12):1992-2000.
- [4] 姜媛媛,王友仁,吴祎,等.基于小波包能量谱和 ELM 的光伏逆变器多故障在线诊断[J].仪器仪表学报,2015,36(9):2145-2152.
- [5] WANG X, HUO T, NIAN X, et al. Research on balance of neutral-point potential in three level neutral point clamped inverter[C].IECON 2017, Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2017: 8329-8333.
- [6] MISHRA M K, JOSHI A, GHOSH A. Control schemes for equalization of capacitor voltages in neutral clamped shunt compensator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2):538-544.
- [7] LIU P, DUAN S, YAO C, et al. A double modulation wave CBPWM strategy providing neutral-point voltage oscillation elimination and CMV reduction for three-level NPC inverters [J]. IEEE Transactions on

- Industrial Electronics, 2017(99):1-1.
- [8] 李启明.三电平 SVPWM 算法研究及仿真[D].合肥:合肥工业大学,2008.
- [9] 李清政,黄峰.一种三电平 NPC 中点箝位逆变器并网控制算法设计[J].湖南工程学院学报(自然科学版), 2015,25(4):17-21.
- [10] WANG Z, CUI F, ZHANG G, et al. Novel carrier-based PWM strategy with zero-sequence voltage injected for three-level NPC inverter[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 4(4):1442-1451.
- [11] 周皓.三电平光伏并网逆变器拓扑结构及控制策略的研究[D].北京:北京科技大学,2015.
- [12] 王慧敏,温坤鹏,张云,等.基于精细分区控制的三电平逆变器中点电位平衡策略[J].电工技术学报, 2015, 30(19):144-152.
- [13] 范波,赵伟刚,刘刚,等.基于优化虚拟矢量的三电平逆变器中点电位平衡闭环控制[J].电工技术学报, 2015, 30(4):179-186.
- [14] 谢之光,侯世英,唐治德,等. NPC 三电平逆变器最优虚拟电压矢量控制[J].电力系统自动化, 2017, 41(18):95-102.
- [15] CHOUDHURY A, PILLAY P, WILLIAMSON S S. DC-bus voltage balancing algorithm for three-level neutral-point-clamped (NPC) traction inverter drive with modified virtual space vector [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 3958-3967.

作者简介

黄竞智,1993 年出生,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动。

吴雷,1962 年出生,博士、副教授,主要研究方向为电力电子与电力传动。

沈佳焯,1994 年出生,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail:769818203@qq.com