

NPC 型三电平变换器中点电压控制方法概述

李宁 王跃 蒋应伟 董晓 王兆安

西安交通大学电气工程学院, 西安 710049

Email: ningli@stu.xjtu.edu.cn

摘要 中点电压波动是 NPC 型变换器存在的主要问题, 目前存在许多种可以抑制 NPC 型变换器中点电压波动的控制方法。本文针对 NPC 型三电平变换器, 对其中点电压波动进行了分类并分析了其产生原因。本文归纳总结了常见的 NPC 型三电平变换器中点电压控制算法, 并对中点电压的软件控制算法进行了细致的分类与分析。在分析的基础上对中点电压波动软件控制算法进行了概括和总结。

关键词 中点电压波动 NPC 型三电平变换器 软件控制算法

1. 引言

中点钳位 (NPC) 型三电平变换器^[1]是目前最为常用的多电平变换器之一, 它的每个功率器件仅承受直流母线电压的一半, 这样可以提升直流母线的电压容量近一倍。由于比传统的两电平多一个台阶, 其输出电压谐波含量显著小于两电平, 在大功率领域应用优势明显。

在 NPC 型三电平变换器中存在一个很重要的问题-中点电压波动问题, 据此, 很多学者从不同的方面提出了许多的解决方案^[2], 本文将对这些方案进行系统的归纳和总结。

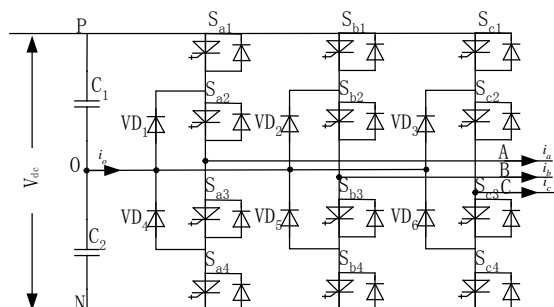


图 1 NPC 型三电平变换器拓扑图

2. 中点电压波动的危害

中点电压波动会对系统造成危害, 主要体现在以下几个方面^[3]:

(1) 中点电压的波动会使输出侧产生低次谐波, 降低输出效率, 影响输出性能;

(2) 中点电压的波动会使功率器件承受的电压不均衡, 影响器件的正常工作甚至毁坏器件;

(3) 中点电压的波动会降低直流侧电容的使用寿命。

3. 中点电压波动的分类及产生原因

3.1 中点电压波动的分类

本文将 NPC 型三电平变换器中点电压波动分为两大类:

1) 直流分量不变的波动 (中点电压脉动)

直流分量不变的中点电压波动是 NPC 型三电平变

换器中点波动中较为常见的一种形式, 它的具体表现为: 在一个工频周期内, 中点电压的平均值不变。但当以开关周期为基准时, 会发现中点电压上出现与开关频率相同的三角波, 而在整个工频周期内, 中点电压实际值也不是固定不变的, 而是以 3 倍频在中点电压的基值 ($V_{dc}/2$) 附近波动, 并成动态平衡。

2) 直流分量变化的波动

直流分量变化的波动在 NPC 型三电平变换器中点电压的实际波形中也是经常出现的, 在很多情况下, 特别是不对中点电压进行控制或只进行开环控制时, NPC 型三电平变换器的中点电压的平均值会随着运行时间的增加渐渐偏离其基准, 并愈演愈烈。

2.2 中点电压波动的成因

NPC 型三电平变换器中点电压波动的产生是有多方面原因的:

1) 直流分量平均值不变的波动成因

NPC 型三电平变换器存在直流分量平均值不变的中点电压波动的根本原因是由三电平拓扑和控制方法决定的^[3]。在每个开关周期内, 当有电流流过中点时, 直流侧上下两个电容的充放电过程正好相反, 即上电容充电时下电容放电, 下电容充电时上电容放电, 这样就在中点电压上产生了与开关周期相同的三角波。而由于标准型的三相调制波在一个周期中存在对称性的变化, 使得中点电流在一个周期内换流三次, 故产生 3 倍频的中点电压波动。

2) 直流分量平均值变化的波动成因

在实际系统中, NPC 型三电平变换器中点的电压往往是存在直流分量变化的, 产生这种变化的原因主要有几个方面:

(1) 直流侧电容参数存在差异

在理想情况下, 三电平变换器直流侧的两个电容容值相等, 通过两个电容将整个直流电压均分, 这是三电平变换器控制的一个重要前提。但是在实际过程

中，由于制造手段和材料本身的差异，实际上两个直流电容在容值和其它性能上往往存在着微小的差异，这些差异直接导致直流侧两电容上的电压分配不均，使得中点电压从一开始就偏离其基准值。

(2) 开关器件特性差异

即使是同一批的开关器件，仍然会在一些参数上有所差异，如开关延时，最小脉宽等等，这些参数的不同都会对直流侧中点电压产生影响，使得中点电压偏离其基准值。

(3) 负载的不对称性及非线性

负载的不对称或非线性都会导致三相电流的不对称，使得整个系统不能理想运行，使得中点电压偏移理论值。

(4) 控制算法本身存在一定的缺陷

在实际控制中，有的时候采用一些简单的前馈控制方法来控制中点电压的波动，这些算法本身成立的前提条件是将整个系统理想化（无控制积累误差、三相电压电流为标准正弦波），而实际运行时不存在这些理想条件，这样的算法在实际运行中本身就会引起直流分量平均值的变化。另一方面，即使采用了一些中点电压的闭环控制方法，但其没有认清各开关状态对中点电压波动的影响，或者仅采用较少的开关状态，使得整个算法本身对中点电压波动的控制效果较差，可控区域很小，在实际中应用仍然会使得系统的中点电压存在波动。

4. 中点电压波动的几种常用控制方法

由于中点电压波动对系统存在很大的危害，实际应用中需对其进行控制，控制的目标是：

- 1) 消除中点电压直流分量的变化；
- 2) 尽量减小中点电压的交流分量。

在实际过程中，由于考虑问题的角度不同，或者对系统的要求不同，产生了几大类中点电压波动的控制方法：

4.1 多个直流源法

将直流侧的电容用直流源替代，这样就不会出现直流侧电压波动的情况。这种方法的优点在于大大的简化了系统的控制算法，H桥级联多电平就是从这种构想出发的。这种方法使得软件成本下降，适用于硬件成本较低的电路，早期的一些三电平交直交变频器就是采用这种方法避免中点电压的波动的^{[4][5]}。

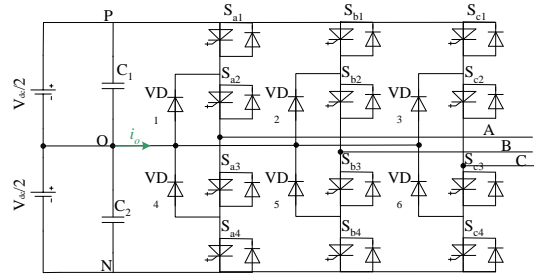


图2 直流侧采用电流源的三电平变换器

4.2 附加硬件电路法

本方法通过在直流侧增加附加电路来控制其中点电压波动^{[6][7]}，具体如图3所示。当一个电容上的电压升高时，通过开通与其对应的开关管，将多余的能量转移到相应的电感上，在开关管关断时将电感上的能量传递到另一个电容上。本方法的优点是减少了软件的控制复杂度，但是增加了系统的硬件成本，同时本方法对直流两个电感 L_1 、 L_2 的敏感性很大，如果参数设计不好，仍然不会有很好的中点电压控制效果。

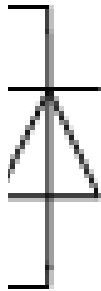


图3 直流侧附件硬件电路控制中点电压波动

4.3 改进拓扑法

中点电压波动是传统NPC型多电平变换器必然存在的问题，它的根本原因在于传统控制策略与控制拓扑之间的矛盾，当不对控制策略进行改进的情况下，可以通过改进控制拓扑来消除中点电压的波动，当然，采用这种方式得到的拓扑不再是典型的NPC型拓扑了。图4是我国学者提出的一种具有冗余功能并无中点电压波动的新拓扑^[8]。

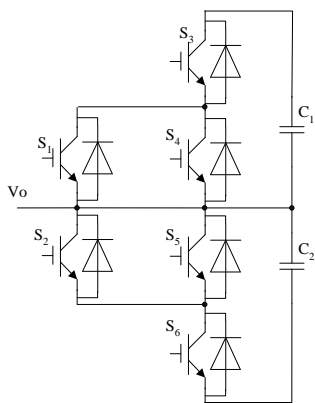


图4 具有冗余功能的三电平拓扑(一相图)

4.4 软件控制法

实际应用中, 由于多电平控制算法本身就存在一定的自由度, 充分的利用这些自由度, 就可以通过软件算法来实现对中点电压波动的控制。用软件算法控制中点电压波动的优点在于节省了硬件成本, 但是其问题是增加了软件复杂性, 同时在一些情况下, 软件算法只能对中点电压的波动进行抑制而不能进行完全控制。

5. 抑制中点电压波动的软件算法

随着电子技术的发展,当今的控制芯片迅速发展,其处理能力越来越强大,而同时由于材料的限制,现代电子电子系统的硬件成本越来越高,在这种前提下,应用软件算法实现NPC型三电平变换器中点电压波动控制已经越来越成为各国学者和公司的首选。

5.1 中点电压波动软件算法的分类

实际中应用的NPC型三电平中点电压控制算法,与变换器应用的PWM控制策略是紧密联系的。中点电压控制策略与PWM算法的联系通常有两种方式,如图5所示。一种是中点电压控制算法与PWM控制策略相关联,即在现有的PWM控制策略中考虑中点电压的波动,从而得到具有消除(抑制)中点电压波动的PWM控制策略;另一种是在现有的PWM控制策略之外,单独考虑中点电压波动的影响,从而修正PWM控制策略的参考值,实现消除(抑制)中点电压波动的效果。

从有无单独控制环的角度，可以将NPC型三电平变换器中点电压波动控制策略分为两大类：

1) 开环控制策略（前馈控制策略）

所谓的开环控制策略，也就是从NPC型三电平变换器的控制理论出发，在理想的情况下，研究其控制算法对中点电压波动的影响，根据从理论分析得到的结果对传统的PWM控制策略进行改进，从而从理论上对中点电压波动进行消除或抑制^[2]。这种方式由于带有很大的主观性（实际中的器件及系统都为非理想），同时由于有些开环控制算法的分析过于简单，往往在实际应用中得不到应有的效果，因而很多学者都认为没有闭环的中点电压波动控制不能称其为中点电压控制。

2) 闭环控制策略

NPC型三电平变换器的中点电压波动控制中较为常用的是闭环控制方法，这类方法的基本思想是通过对整个系统的实时检测，实时的修改PWM控制策略中的变量，进而控制中点电压的平衡。

除了以上的两种分类方法，还可以从其适用的PWM控制策略的角度认识NPC型三电平中点电压波动控制算法。NPC型三电平中点电压波动的软件控制法都是适用于一定的PWM控制策略的，而在NPC型三电平变换器中，较为常用的控制策略是SPWM和SVPWM控制策略。根据中点电压软件控制法适用的PWM策略不同，可将其分为三大类：

1) SPWM和SVPWM均适用型

这类中点电压控制策略不拘泥于具体的PWM控制策略，它一般是分析中点电压波动时的一些具体情况，实时的对PWM控制策略的给定值进行一定的补偿，从而达到控制中点电压波动的效果。

2) SVPWM適用型

此类中点电压控制策略针对的是目前较为广泛的PWM调制策略-SVPWM策略,通过研究其中不同矢量对中点电压波动的影响,灵活的利用小矢量的冗余开关状态,达到控制中点电压波动的效果。

3) SPWM和SVPWM均不适用型

有一些NPC型三电平变换器的中点电压控制策略从一些特殊的角度,如功率、转矩等出发,考虑三电平变换器中点电压波动的控制方法,这也是中点电压控制的一种方式。

5.2 几种常用的中点电压波动软件控制法

下面分别介绍几种常用的NPC型三电平变换器中点电压控制策略：

1) 一种效果较好的前馈控制策略-最近三虚拟矢量控制 (VSVPWM) 策略

图5 中点电压控制算法与PWM控制策略的关系

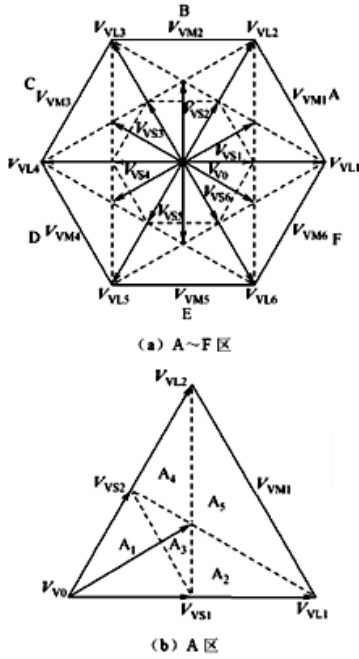


图6 三电平变换器虚拟空间矢量图

VSVPWM是一种空间矢量控制方法^{[10][11]}，具体如图6所示。它的出发点是基于普通的SVPWM，对四类矢量：零矢量、小矢量、中矢量和矢量大矢量对点电压的影响进行了分析，提出了与之等效但不会造成中点电压波动的四类虚拟电压，以图6(b)中所示，得到虚拟中矢量 V_{VM1} 、虚拟小矢量 V_{VS1} (V_{VS2})、虚拟大矢量 V_{VL1} (V_{VL2})和虚拟零矢量 V_{V0} ，在第一扇区内，四类矢量具体如下式：

$$\begin{cases} V_{VM1} = k_1(V_{onm} + V_{pon} + V_{ppo}) \\ V_{VS1} = k_2V_{poo} + k_3V_{onn} (k_2 + k_3 = 1) \\ V_{VL1} = k_4V_{pnn} + k_5(V_{poo} + V_{onn})(k_4 + 2K_5 = 1) \\ V_{V0} = K_6V_{ooo} + k_7V_{ppp} + k_8V_{nnn} (k_6 + k_7 + k_8 = 1) \end{cases} \quad (1)$$

在开环控制策略中，一般定义上式中的系数为：

$$\begin{cases} k_1 = 1/3 \\ k_2 = k_3 = 1/2 \end{cases} \quad (2)$$

其余的几个系数根据所处的三角形的不同选取也各不相同。

本方法的优势在于充分的利用了SVPWM中的所有开关状态，通过对所有状态的合理利用达到了比较好的中点电压控制效果，但是本法实现较为复杂，且在各扇区和小三角形间切换时存在过渡开关状态。

2) 应用最为广泛的中点电压控制策略-滞环控制策略

滞环控制策略在NPC型三电平变换器中点电压控

制中最常使用，也是最为简单的闭环控制策略，它的理论基础如下表所示：

表1 6对可产生相同线电压的开关状态

No.	G_i	$!G_i$
1	POO(100)	ONN(0-1-1)
2	PPO(110)	OON(00-1)
3	OPO(010)	NON(-10-1)
4	OPP(011)	NOO(-100)
5	OOP(001)	NNO(-1-10)
6	POP(101)	ONO(0-10)

表1中的6对开关矢量，它们可产生相同的线电压，但是所对应的中点电流大小相等，方向相反。通过闭环实时控制，使得有益于抑制中点电压波动的一对开关状态中的一个作用的时间尽量长，就可以起到抑制中点电压波动的效果。

(1) 与调制策略无关的中点电压波动滞环控制法
文[11]提出了一种与调制策略无关的中点电压波动控制策略，它的基本思想是实时检查系统的直流侧电压、三相电流等信息，据此判断每个时刻的开关状态是否有利于中点电压波动的抑制，当发现此时的开关状态为表1中的12个状态之一并有利于中点电压波动的抑制，则直接输出此时的开关状态，否则则输出与之对应一组开关状态中的另一个，具体如图7所示。

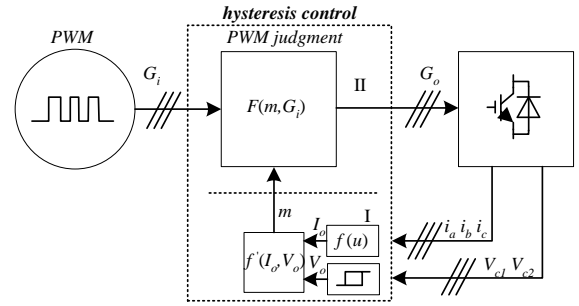


图7 中点电压滞环控制示意图

此种方法的优点是实现较为简单，它的主要缺点在于表1中一组开关状态相互变换时三相的开关状态都要变化，会出现两个短暂的过渡开关状态，同时也增加了系统的开关损耗。

(2) 应用于SVPWM下的中点电压滞环控制算法
有一些中点电压滞环控制法是针对特殊调制策略的，本文介绍在SVPWM下较为常用的三种中点电压滞环控制法。

在SVPWM下，将整个三电平空间矢量图分为6个大扇区，每个扇区分为4个小三角形，具体如图8所示。

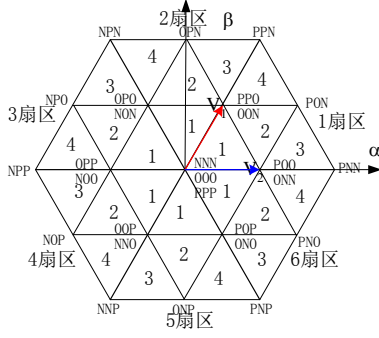


图8 NPC型三电平变换器空间矢量图

①根据电压电流方向实时选择开关顺序

文献[12][13]中采用的中点电压控制法也是实时采集直流侧电压和三相电流信息，根据具体情况选择初始开关状态，进而选择整个开关序列，1扇区2号小三角形中的开关序列如表2所示。

表2 1扇区2号小三角形中的开关序列

中点电位	电流	调制方法
$\Delta V_{NP} \geq 0$	$i_c \geq 0, i_a \geq 0$	110→100→10-1→00-1→0-1-1→0-1-1→00-1→10-1→100→110
	$i_c \geq 0, i_a < 0$	110→100→10-1→00-1→00-1→10-1→100→110
	$i_c < 0, i_a \geq 0$	100→10-1→00-1→0-1-1→0-1-1→00-1→10-1→100
	$i_c < 0, i_a < 0$	100→10-1→00-1→00-1→10-1→100
$\Delta V_{NP} < 0$	$i_c \geq 0, i_a \geq 0$	100→10-1→00-1→00-1→10-1→100
	$i_c \geq 0, i_a < 0$	100→10-1→00-1→0-1-1→0-1-1→00-1→10-1→100
	$i_c < 0, i_a \geq 0$	110→100→10-1→00-1→00-1→10-1→100→110
	$i_c < 0, i_a < 0$	110→100→10-1→00-1→0-1-1→0-1-1→00-1→10-1→100→110

本方法的本质也是改变同一矢量对应得两组开关状态的作用时间，从而稳定中点电压，采用的也是滞环控制的思想。相对于文献[11]中的方法,本方法的最大区别在于：本方法对中点电压波动的抑制是以一个开关周期为基准，通过每个周期改变开关序列来实现；而[11]中的方法是对每个开关状态进行考虑，一个开关周期内最多可以改变四次。本方法仍然存在着过渡开关状态，但其开关损耗略小，在同等情况下，其中点电压的波动较[11]中的略大。

②根据电压电流方向实时选择冗余开关状态的作用时间

用时间

相比于文献[12][13]中通过实时选择开关序列来稳定中点电压，文献[14]是通过实时检测中点电压和三相电流，根据具体情况选择冗余矢量对应的开关状态的作用时间，进而稳定中点电压，其中，第一扇区内各矢量对中点电压的影响表3所示。

文献[14]中设定冗余开关状态作用时间与整个开关矢量作用时间比为 $0.5+k$ ($k \in [-0.5, 0.5]$)，预先设定滞环宽度 h 和 k 值，根据式(3)来实现中点电压的控制。

$$\begin{cases} V_{dc1} - V_{dc2} > h \text{ 且 } \text{取反}, k \\ V_{dc1} - V_{dc2} > h \text{ 且 } \text{不变}, k \\ V_{dc1} - V_{dc2} > -h \text{ 且 } \text{不变}, k \\ V_{dc1} - V_{dc2} > -h \text{ 且 } \text{取反}, k \end{cases} \quad (3)$$

表3 第一扇区各矢量对中点电位影响关系表

矢量类型	开关状态		中点电流	中点电位
零矢量	NNN, OOO, PPP		0	无影响
大矢量	PNN, PPN		0	无影响
中矢量	PON		i_b	$i_b > 0$, 下降; $i_b < 0$, 上升
小矢量	V_1	PPO	i_c	$i_c > 0$, 下降; $i_c < 0$, 上升
		OON	$-i_c$	$i_c > 0$, 上升; $i_c < 0$, 下降
	V_2	POO	$-i_a$	$i_a > 0$, 上升; $i_a < 0$, 下降
		ONN	i_a	$i_a > 0$, 下降; $i_a < 0$, 上升

③无电流传感器系统实时选择冗余开关状态作用时间

在有些情况下，系统中无电流传感器，这就需要根据中点电压的实际情况来选择冗余开关状态的作用时间，从而抑制中点电压的波动。

文献[15]提出了一种在无电流传感器情况下的中点电压控制策略，它的出发点也如(3)式，在滞环控制下，只需知道某个时刻的中点电流方向（三相电流方向）即可进行控制，而三相电流与电压存在着一定的关系，本方法首先根据电压情况判断三相电流的正负，进而通过滞环控制平衡中点电压。

通过电流判断电压需要有一些假设条件，如相电

流滞后相电压一般不超过 90° 等,在这些条件下可以得到整个区间内的中点电流符号,进而应用滞环控制法实现中点电压的控制。图9所示为功率因数角大于 30° 时的电压电流波形, S_1 - S_6 为采用参考电压分解法时整个三电平变器空间矢量图的六个分区,其中第一区 S_1 的偏移矢量所对应的开关状态为ONN,此时中点电流 $i_o=i_a$,所以 $i_o>0$ 。

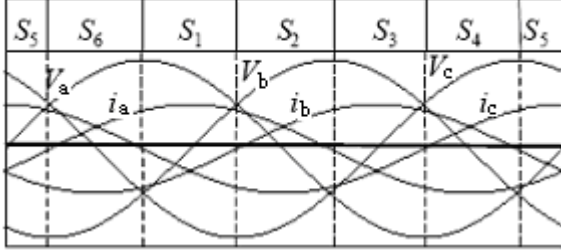


图9 功率因数角大于 30° 时三相电压电流波形

以上介绍的是几种常用的滞环控制方法,它们本身都存在的问题,实际中较为常用的是文献[12]和文献[13][14]的两种方法^{[16][17][18][19][20][21][22][23][24]}。

3) 一种典型的与PWM控制策略无关的中点电压控制策略-零序分量注入法

考虑到三相系统中注入相同的零序分量对线电压无影响,实际中常通过注入零序分量的方式对三相系统的性能(如电压利用率)进行优化,也可以通过注入零序分量的方式对中点电压的波动进行控制。

(1) 零序分量的简单注入法

文献[25][26]中应用了最简单的零序分量注入法,它的基本原理如图10所示。将与直流侧电压偏差成负数比例的零序分量 V_o 叠加到原来的三相调制波上,得到的调制波就包含了中点电压的波动情况,就可以通过电压电流的闭环来控制系统的中点电压波动。

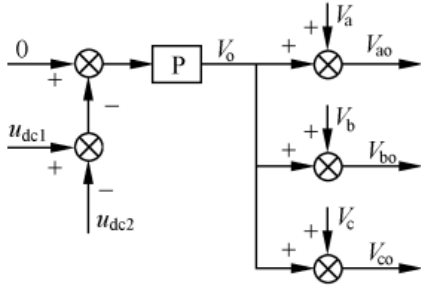


图10 叠加零序分量的中点电位控制

本方法的主要优点是实现简单,但是比例因数的选取是本方法的关键,不当的比例因数不但不能稳定中点电压,还会影响整个系统的稳定工作。

(2) 零序分量实时计算法

由于零序分量的简单注入法存在着一定的问题,文献[27][28][29][30]采用了零序分量的实时计算法来

实现中点电压的平衡,如式(4)所示,在原有的参考电压基础上叠加一定的零序分量 V_o , V_o 是根据一定的原则实时计算得到。

$$\begin{cases} V_{ra} = V_{ra1} + V_o \\ V_{rb} = V_{rb1} + V_o \\ V_{rc} = V_{rc1} + V_o \end{cases} \quad (4)$$

采用零序分量实时计算法控制中点电压的关键在于确定参考电压与中点电流的关系,在一个开关周期内令中点电流的平均值为零,就可以使得本周期内中点电压的平均值无波动。

目前所见的理论分析较为完备的零序分量实时计算法是文献[27]中所分析之方法,式(5)是推导出的中点电流 i_{NP} 与三相参考电压和三相电流的关系。

$$i_{NP} = -[\text{sgn}(V_{ra}) \cdot V_{ra1} \cdot i_a + \text{sgn}(V_{rb}) \cdot V_{rb1} \cdot i_b + \text{sgn}(V_{rc}) \cdot V_{rc1} \cdot i_c] - V_o \cdot [\text{sgn}(V_{ra}) \cdot i_a + \text{sgn}(V_{rb}) \cdot i_b + \text{sgn}(V_{rc}) \cdot i_c] \quad (5)$$

$$\text{sgn}(V_{rx}) = \begin{cases} 1 & V_{rx} \geq 0 \\ -1 & V_{rx} < 0 \end{cases} \quad (x=a,b,c) \quad (6)$$

$$V_o = -\frac{s_{sgna} \cdot V_{ra1} \cdot i_a + s_{sgnb} \cdot V_{rb1} \cdot i_b + s_{sgnc} \cdot V_{rc1} \cdot i_c}{s_{sgna} \cdot i_a + s_{sgnb} \cdot i_b + s_{sgnc} \cdot i_c}$$

(7)

在式(5)中定义了如式(6)所示的符号函数,令 $i_{NP}=0$,即可得求出所需叠加的零序分量,如式(7)所示。其中,定义:

$$(s_{sgna}, s_{sgnb}, s_{sgnc})^T = [\text{sgn}(V_{ra}), \text{sgn}(V_{rb}), \text{sgn}(V_{rc})]^T$$

通过实时计算得到的零序分量是要受一定条件约束的,一个最基本也是最重要的条件就是叠加零序分量后的参考电压不能使得系统过调制,故对计算得到的零序分量要进行一定的处理,在三电平SPWM中计算得到的零序分量(标么值)存在如下的关系:

$$|V_{rx}| = |V_{rx1} + V_o| \leq 1, x=a,b,c \quad (8)$$

由于一些情况下计算得到的 V_o 不满足(8)式,此时对中点电压的波动只能起到抑制作用,不能完全消除。

4) 基于SVPWM控制自由度的一种中点电压控制策略-冗余开关状态作用时间实时计算法

与上文通过滞环控制选择冗余开关状态的作用时间来抑制中点电压波动相类似,文献[31]提出了实时计算冗余开关状态作用时间来控制中点电压波动的方法。它的理论基础与实时计算零序分量法基本一致,

是根据冗余开关状态作用时间与中点电流的关系, 令一个开关周期内中点电流的平均值为零, 由此可以实时计算出冗余开关状态的作用时间。式(9)为当参考电压矢量落在第一扇区3号小三角形中时, 冗余开关状态POO占整个矢量作用时间的比例值。

$$k = \frac{i_a(T_a + T_b) + i_b(T_a + T_c) + i_c T_s + Q_{NP0}}{-2i_a T_c} \quad (9)$$

上式中 k 为比例值, i_a, i_b, i_c 为三相瞬时电流, T_a, T_b, T_c 为三矢量作用时间, T_s 为开关周期, Q_{NP0} 为上下两个电容上的电荷差。

由于实际中 $k \in [0, 1]$, 计算得到的一些 k 值不满足这个条件, 所以此时对中点电压的波动只能起到抑制作用, 不能完全消除。

5) 其它方法

除了上述四类比较常见的方法外, 有的学者通过其他的一些控制策略或者是对以上几种方法进行综合的方法对中点电压的波动进行控制, 大体上可以分为以下三种情况:

(1) 多种调制方式结合下的中点电压控制

文献[38]中的PWM控制策略为SVPWM与VSVPWM两种方式的结合, 在低调制度时采用较为简单的SVPWM, 此时中点电压的波动通过调节冗余开关状态的作用时间来进行控制, 当调制度较高时, 采用无中点电压波动的VSVPWM, 使得中点电压的波动在任何情况下都有比较好的效果。

(2) 其他控制策略下中点电压控制

文献[33][34][35]对NPC型三电平变换器所采用的控制策略分别为模糊控制、直接功率控制和直接转矩控制。在这些控制策略下, 需要对开关状态进行重新分析, 得到其对控制策略和中点电压的影响, 进而提出在这些控制策略下的中点电压波动控制方法。

(3) 非最近三矢量法

一般的SPWM和SVPWM, 为了优化系统的性能, 采用的都是最近三矢量法, 即选择与参考电压矢量最近的三个矢量来合成参考电压。在一些情况下, 为了优化系统的其他性能, 也有学者提出非最近三矢量法。文献[36][37]从控制中点电压的波动角度, 提出了弃用中矢量的非最近三矢量法, 它的基本原理也是基于SVPWM中各矢量对中点电压的影响, 如表3所示。其中的中矢量和小矢量对中点电压有影响, 而小矢量所对应的两个开关状态对中点电压的影响相反, 可以自行抵消。而中矢量对中点电压的影响是无法自行消除的, 故将其弃用, 通过零矢量、小矢量和矢量来合

成参考电压矢量, 从而达到消除中点电压波动的效果。

此外, 还有一些文章所采用的中点电压控制方法从形式上与上文介绍的方法有些不同, 但是其本质与上文介绍的五大类方法相同, 如文献[38][39]中对中点电压波动采用的方法分别为滞环控制法和叠加零序分量法, 其区别在于文献[38]所采用的不是abc坐标系, 而是gh坐标系, 而文献[39]是在dq轴上叠加零序分量, 本文对此种情况不做单独介绍。

6. 结论

本文介绍了目前较为常用的一种多电平拓扑-NPC型三电平变换器中点电压波动的分类、成因以及常用的抑制中点电压波动的几种方法。针对实际中应用较多的中点电压波动软件控制法, 本文对文献中所见的一些方法进行了分类和总结。通过分析比较各种中点电压波动控制策略的优、缺点, 根据系统的实际情况, 合理选择控制策略, 可以达到较好的控制效果。

参考文献

- [1] Nabae A, Takahashi I, Akai H, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," *IEEE Trans. Ind. Applicat.* IA-17, 1981: 518-523.
- [2] Celanovic N, Boroyevich D, "A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions, Volume: 15*, 2000, 15 (2) : 242-249.
- [3] 王广柱. 二极管箝位式多电平逆变器直流侧电容电压不平衡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 111-117
- [4] 绳伟辉, 李崇坚, 朱春毅, 等. 大功率IGCT三电平变流器空间矢量PWM调制算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 1-6
- [5] 刘文华, 宋强, 严干贵, 等. 采用IGCT电压型三电平逆变器的高压变频调速器[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 61-65
- [6] Jouanne A, Shaoan Dai, Haoran Zhang. "A multilevel inverter approach providing DC-link balancing, ride-through enhancement, and common-mode voltage elimination," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 8(4): 739-745.
- [7] 陶生桂, 龚熙国, 袁登科. 三电平逆变器中点电位平衡电路的设计与仿真[J]. 同济大学学报, 2005, 33(3): 395-399
- [8] 陈阿莲, 邓焰, 何湘宁. 一种具有冗余功能的多电平变换器拓扑 中国电机工程学报 2003年, 第23卷第9期
- [9] 宋文祥, 陈国呈, 陈陈, 等. 基于矢量合成的三电平空间电压矢量调制方法[J]. 电工技术学报, 2007, (10).
- [10] 胡存刚, 王群京, 李国丽, 等. 基于虚拟空间矢量的三电平NPC逆变器中点电压平衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 100-107
- [11] 姚文熙, 吕征宇, 费万民, 等. 一种新的三电平中点电位滞环控制法[J]. 中国电机工程学报, 2005, (7):

- [12] 林磊,邹云屏,钟和清,等. 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,(15).
- [13] 金红元,邹云屏,林磊,等.三电平 PWM 整流器双环控制技术及中点电压平衡控制技术研究[J]. 中国电机工程学报,2006,(20).
- [14] 吴洪洋, 何湘宁. 多电平载波 PWM 法与 SVPWM 法之间的本质联系及其应用[J]. 中国电机工程学报. 2002(05).
- [15] 金舜,钟彦儒,明正峰,等.一种控制中点电位并消除窄脉冲的三电平 PWM 方法[J]. 中国电机工程学报,2003,(10).
- [16] 桂红云,姚文熙,吕征宇. DSP 空间矢量控制三电平逆变器的研究[J]. 电力系统自动化,2004,(11).
- [17] 刘小虎,谢顺依. 三电平逆变器中点电位偏移的抑制方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,(8).
- [18] 何英杰,邹云屏,林磊,等.三电平有源滤波器直流侧电压控制方法[J]. 高电压技术,2006,(6).
- [19] 付勋波,郭金东,赵栋利,许洪华,. 基于线电压伏秒平衡的三电平 SVM 研究[J]. 电力自动化设备,2009,(5).
- [20] 何英杰,刘进军,唐健,等.适用于二极管钳位型三电平有源滤波器的母线电压数字控制方法[J]. 中国电机工程学报,2008,(36).
- [21] 宋文祥,陈国呈,束满堂,等.中点箝位式三电平逆变器空间矢量调制及其中点控制研究[J]. 中国电机工程学报,2006,(5).
- [22] 刘述喜,王明渝,. 基于快速空间矢量调制算法的三电平直接转矩预测控制系统[J]. 电工技术学报,2009,(2).
- [23] 窦真兰,张同庄,凌禹,等.三电平 NPC 整流器空间矢量脉宽调制及中点电位平衡控制[J]. 电力自动化设备,2008,(2).
- [24] 詹长江,韩郁,赵良炳,等.基于电压空间矢量 PWM 脉宽调制方式的新型三电平高频整流器研究[J]. 电工技术学报,1999,(2).
- [25] 孟永庆,沈传文,刘正,等.基于 d-q 轴解耦和中点电位控制的高性能三电平 NPC 整流器控制方法[J]. 电工技术学报,2007,(1).
- [26] 王小峰,邓焰,何湘宁. 三相三电平二极管箝位型整流器的单载波调制和中点平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2006,(8).
- [27] 宋强,刘文华,严干贵,等.基于零序电压注入的三电平 NPC 逆变器中点电位平衡控制方法[J]. 中国电机工程学报,2004,(5).
- [28] 李国丽,史晓锋,姜卫东,等.二极管钳位型多电平逆变器脉宽调制时电容电压均衡方法[J]. 电工技术学报,2009,(7).
- [29] 宋文祥,陈国呈,丁肖宇,等.基于两类脉宽调制方式本质联系的三电平逆变器中点电压平衡控制的研究[J]. 电工技术学报,2005,(12).
- [30] 原熙博,李永东,王琛琛. 基于零序分量注入的三电平 PWM 整流器目标优化控制[J]. 电工技术学报,2009,(3).
- [31] 宋文祥,陈国呈,武慧,孙承波,. 一种具有中点电位平衡功能的三电平空间矢量调制方法及其实现[J]. 中国电机工程学报,2006,(12).
- [32] 姜卫东,杜少武,史晓锋,等. 中点箝位型三电平逆变器空间矢量与虚拟空间矢量的混合调制方法[J]. 中国电机工程学报,2009,(18).
- [33] 陈鑫兵,何礼高,. 基于模糊控制的三电平逆变器中点电位平衡策略[J]. 电工技术学报,2007,(10).
- [34] 张颖超,赵争鸣,袁立强,等.三电平 PWM 整流器直接功率控制[J]. 电工技术学报,2008,(5).
- [35] 刘述喜,王明渝. 基于快速空间矢量调制算法的三电平直接转矩预测控制系统[J]. 电工技术学报,2009,(2).
- [36] 金舜,钟彦儒,明正峰,等. 一种控制中点电位并消除窄脉冲的三电平 PWM 方法[J]. 中国电机工程学报,2003,(10).
- [37] 伍文俊,钟彦儒,段博. 三电平整流器弃用中矢量的对称三区电压矢量调制策略[J]. 电工技术学报,2009,(6).
- [38] 赵辉,李瑞,王红君, ,等.60° 坐标系下三电平逆变器 SVPWM 方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2008,(24) .
- [39] 孟永庆,沈传文,刘正,等.基于零序电压注入的三电平中点箝位整流器中点电位控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2007,(10).