

多电平逆变器 SHEPWM 问题解的包含关系

费万民¹, 张艳莉¹, 王兴华², 阮新波²

- (1. 南京师范大学电气与自动化学院, 江苏省 南京市 210042;
2. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏省 南京市 210016)

Inclusion Relationship of the Solutions of SHEPWM Techniques for Multilevel Inverters

FEI Wan-min¹, ZHANG Yan-li¹, WANG Xue-hua², RUAN Xin-bo²

- (1. Nanjing Normal University, Nanjing 210042, Jiangsu Province, China;
2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The fact that the solutions of the SHEPWM (selected harmonic elimination pulse width modulation) techniques for multilevel inverters with more output levels include that of multilevel inverters with fewer output levels is illuminated by means of the expressions of SHEPWM equations, the physics concepts of multilevel inverter and the multiple keys characteristics of the non-linear equations. A three-phase seven-level cascade multilevel inverter prototype is constructed. Solutions of the SHEPWM techniques with $M=0.38$ for seven-level inverter, $M=0.76$ for five-level inverter and $M=1.14$ for three-level inverter is experimentally verified, which proved the conclusions proposed.

KEY WORDS: multilevel inverter; selected harmonic elimination; pulse width modulation; including relationship

摘要: 为了利用已知的较低电平数多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制(selected harmonic elimination pulse width modulation, SHEPWM)问题的解, 来构建、丰富和完善具有较多电平数的多电平逆变器的 SHEPWM 问题的解的集合, 该文从 SHEPWM 非线性方程组的形式、多电平逆变器输出电平的物理概念、多电平逆变器 SHEPWM 问题解的多重性等方面出发, 提出并研究了多电平逆变器 SHEPWM 问题解的包含关系。以级联多电平逆变器为例, 对七电平逆变器 $M=0.38$ 、五电平逆变器 $M=0.76$ 和三电平逆变器 $M=1.14$ 时的方程组的数值解进行了实验研究, 结果证明了所求数值解能够实现基波控制、谐波消除目标、七电平对五电平和三电平、五电平对三电平逆变器 SHEPWM 问题的解包含关系。

关键词: 多电平逆变器; 特定谐波消除; 脉宽调制; 包含关系

0 引言

由于多电平逆变器能够利用低耐压器件实现高

电压大功率输出、波形质量高、电磁干扰低等显著优点, 成为中高压调速、交流柔性输电系统的首选方案。脉宽调制技术是多电平逆变器控制的关键技术之一。在脉宽调制技术中, 特定谐波消除脉宽调制 (SHEPWM)方法由于波形质量高、控制性能优、开关频率低、功率转换效率高、直流电压利用率高显著优点, 得到了普遍的重视。

Li Li博士等提出了一种移相SHEPWM方法^[1], 先求取第1个H桥的SHEPWM问题的解, 第2个H桥在第一个H桥波形的基础上移动一个角度, 第3个H桥在第2个H桥波形的基础上移动一个相同的角度, 依次类推, 通过设置合适的移相角, 总的逆变器可以比第1个H桥额外多消除一个低频次谐波, 是较早研究级联多电平逆变器SHEPWM控制方法的文献, 提出了一种将传统两电平逆变器SHEPWM开关切换角应用到级联多电平逆变器的有效方法, 但与直接从级联多电平逆变器的输出波形出发建立并求解非线性方程组的方法相比, 在同样开关频率下, 消除的谐波次数要少一些。John N. Chiasson 博士等利用三角函数倍角正、余弦函数关系, 把多电平逆变器的SHEPWM非线性方程组变换为代数多项式方程组, 再采用对称代数学的方法, 可以求取非线性方程组的所有解^[2-4]。该方法为判断SHEPWM非线性方程组解的重数和求取所有解, 提供了一种学术思路, 但该算法的计算量太大, 计算速度太慢, 在开关切换角较多时甚至无法完成计算, 根本不能用于SHEPWM方法的在线实现。刘文华教授等采用数字仿真的方法研究了五电平逆变器的SHEPWM控制策略及其在变频调速系统中的应用^[5], 得出了在不增加开关频率的前提下, 比三电平

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金研究项目(07KJB470056); 中国博士后科研基金项目(20060400934)。

逆变器消除的输出电压谐波次数更多、输出LC滤波器设计更容易等结论。张波教授等提出了一种基于沃尔什函数变换的SHEPWM非线性方程组快速求解方法,求出了开关切换角与基波幅值的一种线性关系,显著提高了计算速度^[6-8],有一定实用价值,但在将SHEPWM非线性方程组转化为线性方程组的过程中,失去了非线性方程组的部分特征,比如非线性方程组解的多重性等,丢失了很多性能优良的解,不利于多电平逆变器SHEPWM方法的优化设计。宋平岗教授等将同伦算法应用到级联多电平逆变器的SHEPWM问题求解方面,能够在一定程度上提高迭代过程的收敛速度,但迭代过程对初值的依赖程度较强,无法保证迭代过程收敛^[9-10]。文献[11]针对具有1/4周期对称特点的脉宽调制波形,提出了根据其上升沿、下降沿直接写出SHEPWM非线性方程组的简单而通用方法。采用该方程描述方法,允许SHEPWM非线性方程组解中的开关切换角的顺序发生一定的变化,只要根据上升沿、下降沿的概念所定义的波形中的电平数小于或等于逆变器所能输出的最大电平数,就是SHEPWM问题的真解,在很大程度上扩展了可实现数值解的范围,降低了非线性方程组求解的难度,为解的优化选择扩展了空间;文献[12-14]深入系统地研究了SHEPWM方法中初值问题,发现初值越接近SHEPWM的解,迭代收敛的速度越快;依靠高质量的初值,不但可以保证迭代过程快速收敛,而且通过初值的选择,可以决定迭代过程收敛于SHEPWM非线性方程组多重解中预期的那组“最优”解,为SHEPWM方法的在线实现和优化设计提供了有效途径;文献[15-16]分别进一步研究了多电平逆变器SHEPWM方法在实际应用时的电容电压平衡、功率平衡等问题。

本文从多电平逆变器SHEPWM非线性方程组的表达方式和多电平逆变器电平输出特点以及多电平逆变器SHEPWM非线性方程组的解的多重性等方面出发,提出了具有较多电平数的多电平逆变器的SHEPWM问题的解对具有较少电平数的多电平逆变器SHEPWM问题解的包含关系,并进行了初步的实验研究。

1 多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的描述

多电平逆变器SHEPWM的基本原理是对逆变器输出电压进行傅里叶分解,然后,强制其基波幅值为期望值,并使选定的低频次谐波为零,建立

非线性方程组,求取满足要求的开关切换角或者输出电压波形,然后采用合适的多电平逆变器拓扑来实现所期望的输出波形。随着输出电平数的增加,多电平逆变器的相电压输出波形更加丰富多样,其方程描述和解的分布也将更加复杂。下面从非线性方程组的描述方法出发,对多电平逆变器SHEPWM问题解的包含关系进行研究。

图1(a)所示为具有 L 个电平的多电平逆变器的相电压输出波形,具有1/4周期对称的特点。图1(b)为开关切换角的定义,假设有 N 个开关切换点,在0和 E 之间的开关切换点个数为 $N_{0,1}$,在 E 和 $2E$ 之

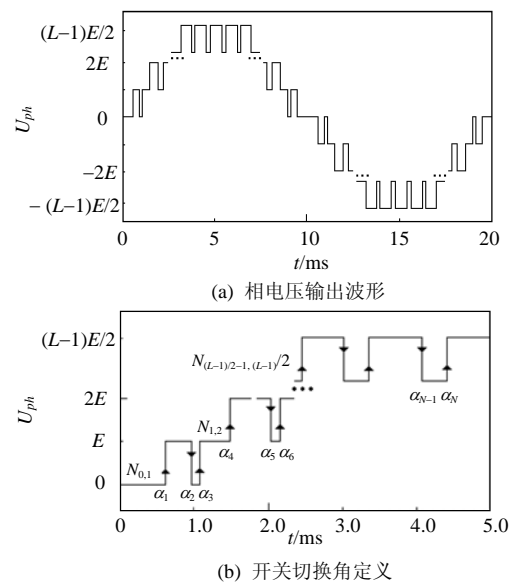


图1 相电压输出波形及开关切换角定义
Fig. 1 Phase-voltage Waveform and defining of switching angles for multilevel inverters

间为 $N_{1,2}$ 等等,假设只消除非3倍频谐波,则根据上升沿、下降沿的顺序,非线性SHEPWM方程组^[11]如下:

$$\begin{cases} b_1 = (L-1)ME/2 \\ b_n = 0, \quad n = 5, 7, 11, 13, \dots, Q \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为一个电平的电压值,为简单起见,可以取 $E=1$; M 为幅值调制比; Q 为欲消除的谐波的最高次数,其数值如下:

$$Q = \begin{cases} 3N-1, & n \text{ 为偶数} \\ 3N-2, & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (2)$$

b_n 为 n 次谐波幅值,表达式为

$$b_n = \begin{cases} 0, & n \text{ 为偶数} \\ \frac{4E}{n\pi} \sum_{k=1}^N p_k \cos n\alpha_k, & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $p_k = \begin{cases} 1, & \alpha_k \text{ 为上升沿} \\ -1, & \alpha_k \text{ 为下降沿} \end{cases}$, 并且 $0^\circ \leq \alpha_1 < \alpha_2 <$

$\alpha_3 < \dots < \alpha_N \leq 90^\circ$ 。将式(3)代入(1), 得到多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的一般表达式

$$\begin{cases} \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^N p_k \cos \alpha_k = \frac{L-1}{2} M \\ \sum_{k=1}^N p_k \cos n\alpha_k = 0, \quad n = 5, 7, 11, 13, \dots, Q \end{cases} \quad (4)$$

2 多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的解的多重性

对于具有 N 个开关切换角的多电平 SHEPWM 非线性方程组来说, 根据三角函数关系^[2-4], 有

$$\cos(Q\alpha) = \text{Poly}(\cos^Q(\alpha)) \quad (5)$$

式中 Q 为选定的欲消除的低频次谐波的最高次数, 当开关切换点数 N 为奇数时, 其值为 $3N-2$, 而当 N 为偶数时, 其值为 $3N-1$ 。将式(5)三角函数关系式代入方程组(4), 可以得到一个由 $\cos\alpha_1$ 、 $\cos\alpha_2$ 、 \dots 、 $\cos\alpha_N$ 等组成的最高次数为 Q 的多项式方程组, 根据多项式函数的性质, 变量 $\cos\alpha_1$ 、 $\cos\alpha_2$ 、 \dots 、 $\cos\alpha_N$ 应该具有 Q 组数值解, 而其中有物理意义的为数值在 $[0, 1]$ 之间, 而且对应的开关切换角根据上升沿、下降沿顺序所确定的多电平 PWM 波形, 可以用具有 L 个输出电平的逆变器进行物理实现的解。所以, 有实际意义的解的重数远小于 Q , 即具有 N 个开关切换点的多电平逆变器的 SHEPWM 方法的解的重数的上限为 Q 。

开关切换点数增加, Q 值也随之近 3 倍的线性关系增加, 因而 SHEPWM 非线性方程组的解的重数也将随之线性增加, 这为多电平 SHEPWM 非线性方程组的求解提供了有利条件。但开关切换点数 N 的增加, 求解非线性方程组的计算量将随之大大增加, 这对多电平逆变器的 SHEPWM 在线实现是个不利因素。

多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组解的多重性, 决定了优化研究的必要性。为了求取 SHEPWM 问题的最优解, 必须求取 SHEPWM 问题解的全集。本文主要研究多电平逆变器 SHEPWM 问题解的包含关系, 为求取多电平逆变器 SHEPWM 问题解的全集, 提供了一种从具有较少电平数的多电平逆变器出发, 逐步增加电平数, 来求取多电平逆变器的 SHEPWM 问题解的全集的有效方法。

3 多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的解的包含关系

在式(4)中, L 表示所研究的多电平逆变器输出相电压的最大电平数, 体现了不同电平数的多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的不同之处, 而且, L 只出现在表达基波幅值约束的方程组中的第一个方程中。比如, 三电平、五电平和七电平逆变器 SHEPWM 方程组的基波约束方程的右边分别为 M 、 $2M$ 和 $3M$ 。在多电平逆变器的 SHEPWM 控制方法中, 调制比 M 是随着输入电压和负载需求的变化而变化的变量, 其理论上的变化范围为 $0 \sim 1.15$, 所以具有 L 个电平的多电平逆变器的 SHEPWM 非线性方程组的基波约束的右边的变化范围, 比三电平逆变器宽了 $(L-1)/2$ 倍。在开关切换角个数相等的前提下, 对选定的欲消除的低频次谐波的约束方程是一样的。因此, 从方程组的表达形式上可以看出, 当调制比 M 从 $0 \sim 1.15$ 之间变化时, 具有较多电平的逆变器的 SHEPWM 问题的解, 包含了具有较少电平数的逆变器的 SHEPWM 问题的解。

本文从不同多电平逆变器的输出能力、调制比对应关系等方面, 对多电平逆变器 SHEPWM 问题解的包含关系进行一般意义上的研究。

从式(4)可以看出, 基波幅值约束和调制比 M 有关, 在要求基波幅值大于 $[(L-1)/2-1]E$ 时, 即要求调制比 $M > (L-3)/(L-1)$ 时, 在一般情况下, 逆变器输出相电压必须包含 $-(L-1)E/2$ 、 $[-(L-1)/2+1]E$ 、 \dots 、 $-2E$ 、 $-E$ 、 0 、 E 、 $2E$ 、 \dots 、 $[(L-1)/2-1]E$ 、 $(L-1)E/2$ 等所有的 L 个电平, 这是少于 L 个输出电平的多电平逆变器无法实现的。当调制比 $M < (L-3)/(L-1)$ 时, 逆变器输出相电压只须包含 $[(L-1)/2-1]E$ 、 \dots 、 $-2E$ 、 $-E$ 、 0 、 E 、 $2E$ 、 \dots 、 $[(L-1)/2-1]E$ 等 $(L-2)$ 个电平, 除了可以采用具有 L 个电平的多电平逆变器来实现外, 还可以采用具有 $(L-2)$ 个输出电平的多电平逆变器来实现。多电平逆变器 SHEPWM 方法的本质, 是先用数学方法求取满足基波幅值要求和低频次谐波要求的多电平 PWM 波形, 然后选用合适的多电平逆变器拓扑来实现。可见具有 L 个电平的多电平逆变器的 SHEPWM 问题的解, 应该包含具有 $(L-2)$ 个电平的多电平逆变器 SHEPWM 问题的解。

多电平逆变器调制比的定义, 为参考正弦信号的幅值与直流侧总电压的比值。设参考正弦信号的幅值为 A_m , 对于具有 L 个电平的多电平逆变器, 其直流侧总电压为 $(L-1)E/2$, 所以, 具有 L 个电平的

多电平逆变器的调制比为： $M_L=2A_m/(L-1)E$ ，而具有 $(L-2)$ 个电平的多电平逆变器的调制比为 $M_{L-2}=2A_m/(L-3)E$ ，因此，在输出相电压基波幅值相等的条件下，具有 L 个电平和 $(L-2)$ 个电平的多电平逆变器的调制比关系如下：

$$\frac{M_{L-2}}{M_L} = \frac{L-3}{L-1} \quad (6)$$

根据上述分析，假设开关切换点个数 N 确定，则五电平逆变器的 SHEPWM 问题的解，可以由 2 部分构成：一部分包括 M 从 1.15~0.50 之间的范围（此处以 0.01 为分辨率），另一部分包括 M 从 0.5~0.01 之间，而后一部分则包含了三电平逆变器在 M 从 1.00~0.01 之间的解。一般而言，具有 L 个电平的多电平逆变器的 SHEPWM 问题的解，分为两部分，一部分是在 M 从 1.15~ $(L-3)/(L-1)$ 之间的解，而另一部分是 M 从 $(L-3)/(L-1)$ 到 0.01 之间的解，后一部分则包含了具有 $(L-2)$ 个电平的多电平逆变器的 N 个开关切换点、调制比从 1 到 $0.1 \times (L-3)/(L-1)$ 之间的解。

多电平逆变器 SHEPWM 问题解的包含关系，对利用已知较低电平数的多电平逆变器的 SHEPWM 问题的解，来构建、丰富和完善具有较多电平数的多电平逆变器的 SHEPWM 问题的解的集合，具有重要的实用价值和学术意义。

4 多电平逆变器 PWM 波形随调制比 M 的变化趋势

对于具有 L 个电平的多电平逆变器而言，假设在 $1/4$ 周期内有 N 个开关切换点，如图 1(b)所示，则这 N 个开关切换点分布在各个电平之间。假设在 0 到 E 之间的开关切换点个数用 $N_{0,1}$ 表示，在 E 到 $2E$ 之间的开关切换点个数用 $N_{1,2}$ 表示。在 iE 到 $(i+1)E$ 之间的开关切换点用 $N_{i,i+1}$ 来表示，...，则各电平之间的开关切换点个数满足下列关系：

$$N_{0,1} + N_{1,2} + \dots + N_{\frac{L-1}{2}-1, \frac{L-1}{2}} = N \quad (7)$$

在调制比 M 从 1.15~0 变化的过程中，在较高电平之间切换的开关点数逐渐减少，而在较低电平之间变化的开关切换点数则逐步增加。所以，多电平逆变器的输出电压波形随着调制比 M 的变化而变化，而描述波形上升沿、下降沿和谐波消除目标与基波约束的 SHEPWM 非线性方程组的形式，主要体现在式(4)中 p_k 的规律，也在发生变化。这就是多电平逆变器波形的多变性和 SHEPWM 非线性方程组

及其数值解的复杂性。所以，多电平 SHEPWM 问题的解，可以采用分段的方式，针对具体的各电平间开关切换点的分布特点，给出各段的数值解及其对应的波形定义。

在对多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的求解过程中发现，对具有 L 个电平的多电平逆变器而言，当调制比 $M < (L-3)/(L-1)$ 时，会出现 2 种类型的解：①解所代表的波形的 $N_{(L-1)/2-1, (L-1)/2} = 0$ ，即缺少 $[(L-1)/2-1]E$ ， $(L-1)E/2$ 和 $\{-(L-1)E/2, [(L-1)/2-1]E\}$ 之间的电平，也就是说，这部分解可以采用具有 $(L-2)$ 输出电平的逆变器来实现；②在第 1 个 $1/4$ 周期内，出现了 $(-E, 0)$ 之间的负脉冲，由于该类数值解可以采用 L 电平的逆变器进行物理实现，能够满足基波幅值约束和谐波消除目标，因此，也是 SHEPWM 问题的真解，如实验研究部分选取的 3 组数值解的第 3 组解，这一点体现了采用上升沿、下降沿表达 SHEPWM 非线性方程组能够扩展解的范围的优势，这类解在实际应用时的具体特点和问题，还有待于进一步研究。

5 实验研究

为了验证多电平逆变器 SHEPWM 问题解的包含关系，设计制作了级联七电平逆变器实验模型，如图 2 所示，其中的开关管采用 RF840 型 MOSFET， $E=150V$ ，以小功率电阻为负载，采用上述 SHEPWM 控制方法，对七电平逆变器 $M=0.38$ 的 3 组典型解： $(+7.540 1, -10.146 9, +15.494 0, -21.474 0, +25.184 9, -31.514 1, +33.859 5, -66.404 8, +66.872 4, -76.887 8, +78.065 1)$ 、 $(+16.042 7, -20.086 2, +37.426 3, -44.802 9, +45.900 8, -50.504 3, +52.806 3, +68.187 2, -70.371 9, +83.851 3, -88.952 0)$ 和 $(-7.369 7, +12.381 6,$

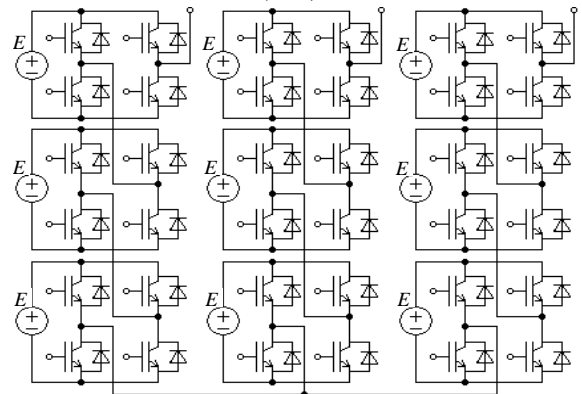


图 2 级联七电平逆变器实验模型

Fig. 2 Experimental model of seven-level voltage inverter

-23.855 2, +34.923 9, +41.053 8, -44.215 8, +54.193 6, +66.208 2, -75.085 1, +79.393 0, +86.991 5)进行了实验验证,波形如图 3 所示。其中,图 3(a)~(i)分别为对应于第 1 组解、第 2 组解和第 3 组解的相电压实测波形、线电压实测波形和线电压频谱。

实验结果证明所求数值解能够实现基波控制、谐波消除目标。在这 3 组解中,第 1 组解只有 3 个输出电平,可以采用三电平($M=1.14$)、五电平($M=0.76$)、七电平($M=0.38$)以及更多输出电平数的逆变器来实现;第 2 组解具有 5 个输出电平,可以采用五电平($M=0.76$)、七电平($M=0.38$)以及更多输出电平数的逆变器来实现;第 3 组解具有 7 个输出电平,只能采用七电平($M=0.38$)以及更多输出电平数的逆变器来实现。由此,可以清楚地看出,具有较多电平数的多电平逆变器的 SHEPWM 问题的解包含了具有较少电平数的多电平逆变器 SHEPWM 问题的解。

从图 3 还可看出,这 3 组解能够实现完全一致的基波控制和谐波消除目标,但从剩余的谐波含量,

可以看出,相电压的输出电平数越多,输出波形质量越好。由于图 3(c)、(f)、(i)所示的频谱分析中的数量概念不是特别明显,为了便于定量分析,将较低频次的剩余谐波含量的计算结果罗列出来:由于开关切换点数为 11,可以消除 5、7、11、13、17、19、23、25、29、31 次谐波,剩余谐波低于 2000 Hz 的频次分别为 35、37、41、43、47、49,在相电压的基波幅值为 1.14 的前提下,对应于第 1~3 组解的剩余谐波含量从低频次到高频次依次为(0.181 1, 0.117 2, 0.129 1, 0.094 4, 0, 0.007 3)、(0.113 6, 0.071 9, 0.049 2, 0.062 3, 0.175 4, 0.019 1)和(0.017, 0.075, 0.02, 0.066 6, 0.149 5, 0.058 6)。出乎预料的是,第 3 组解对应的相电压含有 7 个输出电平,而线电压却只有 5 个电平,但线电压的谐波含量却明显低于其它两组解。级联多电平逆变器具有模块化结构、所用元器件数目小、控制灵活、易于实现等显著优点,所以,本文实验模型采用了级联多电平结构,但本文研究的问题及所得结论,不依赖于多电平逆变器的主电路拓扑结构,同样适用于二极管箝位型、飞

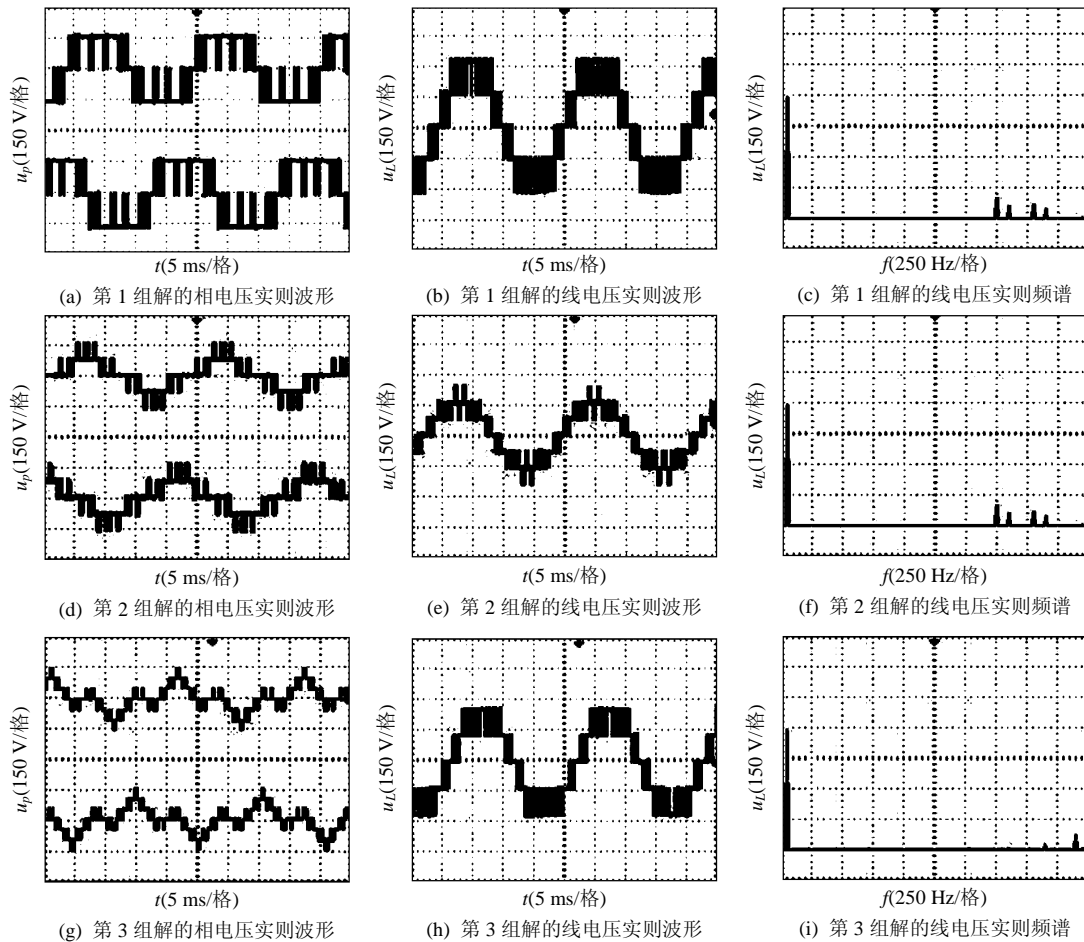


图 3 多电平逆变器 SHEPWM 控制方法的输出电压实测波形及频谱

Fig. 3 Waveforms and their frequency spectrums of output voltages under SHEPWM control strategy

跨电容型以及其它组合型多电平逆变器。

6 结论

本文从多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组表达式、多电平逆变器电平输出的物理概念及多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的解的多重性等方面出发,提出并论证了具有较多电平数的多电平逆变器的 SHEPWM 问题的解对具有较少电平数的多电平逆变器 SHEPWM 问题解的包含关系,对七电平逆变器 $M=0.38$ 、五电平逆变器 $M=0.76$ 和三电平逆变器 $M=1.14$ 时的方程组的数值解进行了实验研究,结果证明了该 3 组数值解能够实现基波控制、谐波消除目标、七电平对五电平和三电平、五电平对三电平逆变器 SHEPWM 问题的解包含关系。

参考文献

- [1] Li Li, Czarkowski D, Liu Yaguang, et al. Multilevel selective harmonic elimination PWM technique in series-connected voltage inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1): 160-170.
- [2] Tolbert L M, Chiasson J, McKenzie K, et al. Elimination of harmonics in a multilevel converter with nonequal DC sources[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2005, 41(1): 75-82.
- [3] Chiasson J N, Tolbert L M, McKenzie K J J, et al. A complete solution to the harmonic elimination problem[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(2): 491-499.
- [4] Chiasson J N, Tolbert LM, McKenzie K, et al. Elimination of harmonics in a multilevel converter using the theory of symmetric polynomials and resultants[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(2): 216-223.
- [5] 刘文华,吕建升,宋强,等. 五电平电压型逆变器的变频 SHE-PWM 控制策略[J]. 清华大学学报, 2004, 44(4): 450-453. Liu Wenhua, Lü Jiansheng, Song Qiang, et al. SHE-PWM control strategy with variable frequency for series-connected five-level inverters[J]. Journal of Tsinghua University, 2004, 44(4): 450-453(in Chinese).
- [6] 郑春芳,张波,丘东元. 基于沃尔什函数的逆变器选择性谐波消除技术开关角的快速求解[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 38-44. Zheng Chunfang, Zhang Bo, Qiu Dongyuan. Fast-solving switching angles of inverter's selected harmonic elimination technique with walsh function[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 38-44(in Chinese).
- [7] 郑春芳,张波,丘东元. 基于 Walsh 变换的多电平逆变器谐波消除技术(English), 电工技术学报, 2006, 21(7): 121-126. Zheng Chunfang, Zhang Bo, Qiu Dongyuan. Selective harmonic elimination technique based on walsh transform for multilevel inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 121-126(in Chinese).
- [8] 赵艳雷,何飏,童建忠. 基于 Walsh 变换的特定谐波消除脉宽调制技术在动态电压恢复器中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 45-49. Zhao Yanlei, He Biao, Tong Jianzhong. Application of selective harmonic elimination pwm technique based on walsh transform in DVR[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 45-49(in Chinese).
- [9] 官二勇,宋平岗,叶满园,等. 电流源型逆变器 SHE-PWM 开关角度的计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 62-65. Guan Eryong, Song Pinggang, Ye Manyuan, et al. A method of solution to SHE-PWM switching angles for CSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 62-65(in Chinese).
- [10] Song Pinggang, Guan Eryong. Selective harmonic elimination for all modulation indices of multilevel cascaded converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 81-87.
- [11] 费万民,吕征宇,姚文熙. 多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 102-106. Fei Wanmin, Lü Zhengyu, Yao Wenxi. Research of selected harmonic elimination pwm technique applicable to multilevel voltage inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 102-106(in Chinese).
- [12] 费万民,吕征宇,姚文熙. 三电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 11-15. Fei Wanmin, Lü Zhengyu, Yao Wenxi. Research on selected harmonic elimination pwm technique applicable to three-level voltage inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 11-15(in Chinese).
- [13] 费万民,阮新波,张艳莉,等. 多电平逆变器 SHEPWM 方法的初值问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 87-92. Fei Wanmin, Ruan Xinbo, Zhang Yanli, et al. Research on the initial values of SHEPWM method for multilevel voltage inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 87-92(in Chinese).
- [14] 费万民,张艳莉,阮新波,等. 三电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的求解[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 62-68. Fei Wanmin, Zhang Yanli, Ruan Xinbo, et al. Solutions to the SHEPWM non-linear equations for three level voltage inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 62-68(in Chinese).
- [15] 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, 25(7): 92-96. Yao Wenxi, Lü Zhengyu, Fei Wanmin, et al. A new three-level neutral point potential hysteresis-band control[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 92-96(in Chinese).
- [16] 孙宜峰,阮新波. 级联型多电平逆变器的功率均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 126-133. Sun Yifeng, Ruan Xinbo. Power balance control schemes for cascaded multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 126-133(in Chinese).

收稿日期: 2007-08-20.

作者简介:

费万民(1965—),男,博士,教授,研究方向为电力电子技术及其应用, feiwanmin@njnu.edu.cn;

张艳莉(1970—),女,博士研究生,副教授,研究方向为测量与仪器、热能工程等;

王学华(1978—),男,博士研究生,研究方向为电力电子技术;

阮新波(1970—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力电子技术及其应用。

(编辑 王彦骏)