

三电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的求解

费万民¹, 张艳莉¹, 阮新波², 姚文熙³, 吕征宇³

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 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 210019; 3. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Solutions to the SHEPWM Non-linear Equations for Three-level Voltage Inverters

FEI Wan-min¹, ZHANG Yan-li¹, RUAN Xin-bo², YAO Wen-xi³, LÜ Zheng-yu³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, Jiangsu Province, China;

2. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210019, Jiangsu Province, China;

3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Initial values are very important for the convergence of the iteration of the none-linear SHEPWM equations. In order to enhance the convergent speed, a new effective method based on rules of equal area and superposition of barycenter of the PWM section with the sine-reference signal for obtaining initial values is proposed. One group of initial values under an M can always assure the convergence of equations corresponding to the majority of M values. For the equations under an M value that don't converge with the given initial values, we take a solution of the equations under an adjacent M as new initial values, and by this method we can solve all the equations under modulation M from 1.15 to 0.01 with a step of 0.01 with fsolve function provided by Matlab6.5. The convergent speed of the iteration of the SHEPWM non-linear equations based on the initial values obtained with the proposed method is greatly increased. The method is experimentally verified through a diode-clamped three-level voltage inverter. Experiment result proved the practicability and validity of SHEPWM Technique for three-level voltage inverter.

KEY WORDS: three-level; inverter; selected harmonic elimination; pulse width modulation; initial values

摘要: 初值对三电平逆变器特定谐波消除脉宽调制(selected harmonic elimination PWM, SHEPWM)非线性方程组求解过程收敛与否和收敛速度都至关重要。为了提高非线性方程组的求解速度,提出了一种以冲量相等、重心重合为原则的求解非线性方程组初值的方法,使得每一个 M 下取得的初值往往可以保证大多数 M (以 0.01 为分辨率)值对应的非线性方程组收敛,而且显著加快了迭代的收敛速度。对采用所提方

法求得的初值不能收敛的 M 值对应的方程组求解,采取了以其相邻的 M 值对应的数值解为初值的有效方法,结合这两种初值方法。以 11 个开关切换点为例,以 0.01 为调制度 M 的分辨率,对 M 从 1.15 到 0.01 范围内的每一点上的非线性方程组,采用 Matlab6.5 中提供的基于牛顿迭代法的 fsolve 函数,分别求解,并给出至少一个可以实现的数值解。讨论了三电平逆变器 SHEPWM 问题的多解现象和简单的优化原则。建立了二极管箝位三电平逆变器实验电路模型,对所求 SHEPWM 的解抽样进行实验,实验证明了所求解能够实现基波控制目标并消除选定的低频次谐波,证明该文提出的方法是有效的。

关键词: 三电平; 逆变器; 特定谐波消除; 脉冲宽度调制; 初值

0 引言

多电平变换器解决了在中高压场合功率元件耐压低的问题,降低了开关过程中的 dv/dt ,改善了变换器的输出波形,因而在中高压变频调速、柔性交流输电系统等方面成为首选方案。特定谐波消除脉宽调制方法^[1-7],通过开关时刻的优化选择,消除选定的低频次谐波,具有以下显著优点: 在同样开关频率下,输出电压波形最优,能有效减小电流纹波和电动机的转矩脉动,从整体上提高控制性能; 由于波形质量的改善,直流侧滤波器的尺寸有所减小; 在同样波形质量的情况下,开关频率最低,能有效降低开关损耗,提高转换效率,这对高压大功率设备具有重要意义; 可以通过过调制来得到较高基波电压,提高直流电压的利用率等。因此,多电平逆变器的 SHEPWM 方法得到了普遍重视^[1-10]。

基金项目: 江苏省高等学校科技计划项目(2005111TSJB154); 中国博士后科学基金项目(20060400934)。

非线性方程组的求解方法，是多电平逆变器 SHEPWM 方法及其在线实现的前提和基础，是本文研究的核心内容。非线性方程组求解的关键，包括高质量初值的选取和高效率的迭代算法两个方面。文献[11]和文献[12]分别研究了同伦算法和多项式代换算法在两电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组求解方面的应用；文献[13]和文献[14]分别研究了采用三角载波正弦脉宽调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM)法求取 SHEPWM 问题初值的方法，对提高初值求取速度和成功率有较好的效果，但三角载波 SPWM 方法较适合于硬件电路实现，用于以 DSP 为核心的三电平逆变器数字控制系统中求取初值，有较大的困难。为此，本文根据冲量相等和重心重合的原则，提出了一种新的初值选取办法。以 11 个开关切换点为例，以 0.01 为幅值调制度 M 的分辨率，对 M 从 1.15 到 0.01 范围内的每一点上的非线性方程组，采用 Matlab6.5 中提供的基于牛顿迭代法的 fsolve 函数，分别求解，通过求解过程发现，在一个 M 值下求取的初值，往往可以使大多数 M 值对应的非线性 SHEPWM 方程组收敛，对于无法收敛的 M 值对应的方程组，采用以相近 M 值下的数值解为初值的有效方法，对每一个 M 值下的方程，至少求取了一组可以物理实现的数值解。建立了二极管箝位三电平逆变器实验电路模型，对所求 SHEPWM 问题的解抽样进行了实验验证。

1 新的初值求取方法

三电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组为各开关切换角及其倍角的余弦函数的代数和，易于求导，非常适合采用牛顿迭代法进行求解。牛顿法迭代收敛的必要条件是初值必须在解的一个小的邻域内，而且初值越接近于解，收敛速度越快。脉宽调制 PWM 的根本原理为冲量原理：“冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同”。将参考信号的 $1/4$ 周期分成 $J+0.5$ 等份，在第 $i(1 \leq i \leq J+1)$ 个等份中，用面积和该区域内参考正弦信号与时间轴组成的面积相等的高度为 E 、宽度为 T_i 的矩形波代替，矩形波的中心为该分区的中心，就可以得到 $1/4$ 周期内的 PWM 波的上升沿、下降沿组成 SHEPWM 非线性方程组的初值，这就是传统的规则取样的 PWM 方法。其中的 0.5 等份是为了保证在 $1/4$ 周期内的最后一个沿为上升沿，PWM 波在 90° 处为高电平，这更符合正弦信号的特点。该初值求取方法适合于编程计算，但收敛速度

和三角载波方法处于大致相当的水平上，迭代次数一般情况下大于 100。分析发现，在上述求取初值的冲量等效过程中，只考虑了冲量等效或功率强度的等效，而等效前后两个波形的等效作用时间不同，特别是在接近 0° 的地方，因此，造成了谐波增加，导致初值远离了 SHEPWM 非线性方程组的解。为此，将力学中重心概念引入，保证等效前的正弦波的重心与等效后矩形波的重心重合，提出了一种更准确的初值求取办法，如图 1 所示。其中的虚线表示分区，点划线表示每一个区内波形的重心， T_f 为分区长度。根据冲量(面积)相等、重心重合的原则，可以得到第 i 个分区内矩形波的脉冲宽度 T_{wi} 、重心位置 T_{gi} 、上升沿 T_{ri} 和下降沿 T_{fi} 的计算公式如下：

$$T_{wi} = \frac{U_r}{E} \int_{(i-1)T_f}^{iT_f} \sin(\omega t) dt = \frac{M}{\omega} [\cos \omega(i-1)T_f - \cos \omega i T_f] \quad (1)$$

$$T_{gi} = \frac{AT_f + B}{C} \quad (2)$$

式(1)、(2)中：系数 A 、 B 、 C 分别为

$$A = (i-1) \cos(\omega(i-1)T_f) - i \cos(\omega i T_f)$$

$$B = \frac{1}{\omega} [\sin(\omega i T_f) - \sin(\omega(i-1)T_f)]$$

$$C = \cos(\omega(i-1)T_f) - \cos(\omega i T_f)$$

$$T_{ri} = T_{gi} - \frac{T_{wi}}{2} \quad (3)$$

$$T_{fi} = T_{gi} + \frac{T_{wi}}{2} \quad (4)$$

式(3)、(4)中： ω 为正弦参考信号的频率； U_r 为正弦参考信号的峰值； E 为一个电平所代表的电压。

幅值调制度 $M=U_r/E$ 。根据式(1)~(4)，可以计算出确定 M 值下的一组初值。

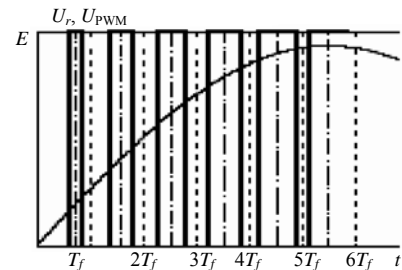


图 1 新的初值求取方法
Fig. 1 New method for obtaining initial values

2 三电平逆变器 SHEPWM 的基本原理及非线性方程组的表述

图2(a)所示为三电平逆变器的相电压波形，具

有1/4周期对称的特点。图2(b)是为了描述开关切换角定义而进行的相电压波形在1/4周期内的放大。本文以1/4周期内有11个开关切换角为例。SHEPWM的基本原理是对相电压进行傅立叶分解,强制基波幅值为某一设定值,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。由图2(a)可知相输出电压脉冲序列满足Dirichlet定理,并根据波形的对称性,可表示为

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad n=1,2,3,\dots \quad (5)$$

根据 n 的奇偶性, b_n 可表示为^[7-8]

$$b_n = \begin{cases} 0, & n \text{ 为偶数} \\ \frac{4U}{n\pi} \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos n\alpha_k, & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $0^\circ \leq \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_N \leq 90^\circ$; U 为一个电平代表的电压值。

考虑到多电平功率变换器主要用于高电压功率场合,只考虑三相的情况,需消除低频次谐波中的非3倍频次谐波。所以,根据图2(b)所示,可得到的求取三电平 SHEPWM 开关切换角的非线性方程组为

$$\begin{cases} b_1 = M \\ b_n = 0, & n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31 \end{cases} \quad (7)$$

目前从文献中看到的三电平逆变器 SHEPWM 方程组, b_n 的表达式均采用式(6),适用于完全满足

约束条件: $0^\circ \leq \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_N \leq 90^\circ$ 的解,也就是图2(a)所示的波形。对在正半周期有负脉冲、负半周期有正脉冲的 PWM 波形,如图2(c)所示,式(6)不再适用。

参考文献[15]提出了一种包括三电平逆变器在内的通用多电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组表述方法,方程式与式(7)一样,而 b_n 的表达为

$$b_n = \begin{cases} 0, & n \text{ 为偶数} \\ \frac{4U}{n\pi} \sum_{k=1}^N p_k \cos n\alpha_k, & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (8)$$

其中的系数 p_k 为

$$p_k = \begin{cases} 1, & \alpha_k \text{ 处为上升沿} \\ -1, & \alpha_k \text{ 处为下降沿} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)、(9)描述系数 b_n 的表达式,可以表达图2(a)和(c)所示波形的傅立叶系数,对 SHEPWM 非线性方程组数值解中 α_i 排序的变化与是否能够用三电平逆变器进行物理实现的判断条件更宽松,更灵活,有利于找到更多、更好的解,增加了优化设计时的选择余地。

3 非线性方程组的求解结果

SHEPWM 非线性方程组是开关切换角及其倍角的余弦函数的代数和,易于求导,适合采用收敛效率较高的牛顿迭代法求解。为了便于同行参考,采用 Matlab6.5 提供的非线性方程组求解函数 fsolve() 来求解方程组。

为了全面了解本文所提初值求取方法的有效性和三电平逆变器 SHEPWM 非线性方程组的求解的规律,取1/4周期内11个开关切换点为例,以0.01为分辨率,对 M 从1.15到0.01之间的每一个值。根据本文提出的“冲量相等、重心重合”原则所推出的式(1)~(4),求取一组初值,采用 Matlab6.5 提供的 fsolve() 函数,对非线性方程组进行了求解,对每个 M 值至少求出了一组可以物理实现的真解。

通过非线性方程组的求解过程,采用“冲量相等、重心重合”新方法求取的初值,具有很高的质量。作为实例,分别采用 $M=1.0$ 、0.8、0.6、0.4、0.38 时求取的初值,对 M 以0.01为分辨率、从1.15到0.01之间的每一个值对应的非线性方程组进行求解,发现每一组初值都能保证60%以上的 M 值对应的非线性方程组收敛,而且在非线性方程组最大求解误差小于 10^{-5} 的情况下,迭代次数均小于30次。而在采用基于三角载波 SPWM 初值方法求解非线

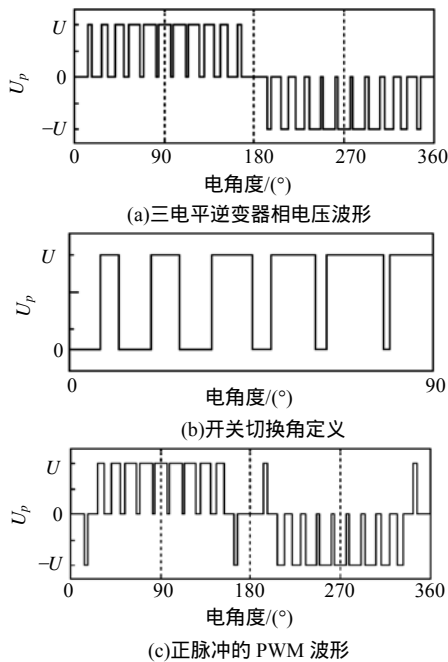


图2 三电平 SHEPWM 波形及开关切换角定义

Fig. 2 SHEPWM waveform of three-level voltage inverter and the definition of switching angles

性方程组时, 很难一次就能求取使非线性方程组收敛的初值, 往往需要通过调整三角载波的初相位和以 SHEPWM 非线性方程组中的 M 值为基准值试探性地增加或减小 SPWM 方法中的 M 值等方法, 经过多次试探, 才能得到一组有效的初值, 而且, 在非线性方程组求解误差小于 10^{-4} 的条件下, 迭代次数均大于 100。

即使这样, 由于 SHEPWM 方程组的非线性特点, 仍然存在使本文所提方法无效的一些 M 值的点。对于这些 M 点所对应的非线性方程组, 采取了以其相邻 M 值下非线性方程组的数值解为初值的方法, 事实证明是非常有效的, 而且迭代收敛的速度更快。

在综合采用了上述两种初值方法之后, 可以求取 M 从 1.15 到 0.01 之间以 0.01 为分辨率的所有非线性方程组的数值解。此处以(记录数据最完整的) $M=0.38$ 时求取的初值(10.45, 11.34, 24.11, 26.69, 39.33, 43.39, 54.92, 60.13, 70.78, 76.73, 86.90)为例, 介绍非线性方程组的求解结果。为了便于了解方程组迭代速度和求解精度等情况, 抽取较典型的 M 值的一段, 列出包含 M 值、迭代结果、迭代次数、最大误差等内容的表格, 如表 1 所示。开关切换角 α_i 后边的“+”号表示该点为上升沿, “-”表示该点是下降沿。表中的粗体字表示角度大小顺序发生了变化。表中的“迭代次数, 最大误差”是指在特定初值条件下, 用 Matlab6.5 中的 fsolve() 函数, 按照默认设置求取非线性方程组时的迭代次数和最大误差。必须指出的是, 由于将数值解复制到表格后, 对角度进行了从小数点后 4 位到两位的四舍五入处理, 若以表中数据求最大误差的话, 表中数据将无参考意义。

在研究三电平逆变器 SHEPWM 方法的过程中, 发现了以下几个值得讨论的问题:

(1) SHEPWM 问题的真解。

采用基于“上升沿处对应的开关切换角及其倍角的余弦函数项的系数为+1、下降沿处对应的开关切换角及其倍角的余弦函数项的系数为-1”非线性方程组描述方法, 当非线性方程组的数值解完全满足约束条件: $0^\circ \leq \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_N \leq 90^\circ$ 时, 肯定是 SHEPWM 问题可以物理实现的真解, 比如表 1 中 $M=1.01 \sim 0.99$ 之间的解。这部分的相电压的大致波形如图 1(a)所示, 即: 正半周只有正脉冲, 负半周只有负脉冲。但当非线性方程组的数值解不能

完全满足约束条件时, 如表 1 中 $M=0.86 \sim 0.84$ 之间的解, 前 2 个开关切换角的大小顺序发生了变化, 即出现了 $\alpha_1 > \alpha_2$ 的现象, 如表中粗体数字所示。根据 1/4 周期内上升沿、下降沿的概念, 假设相电压 PWM 波形在 0° 时为 0, 然后沿着绝对值从小到大的顺序, 每经过一个上升沿相电压增加一个 E , 每经过一个下降沿相电压减少一个 E , 在经历完 1/4 周期内的所有开关切换角之后, 只要相电压的 PWM 波形保持在 $[-E, E]$ 之间, 这个数值解所代表的波形就可以用三电平逆变器来实现, 所以是问题的真解。以表 1 中 $M=0.86$ 的这组解为例, 相电压 PWM 波形在 0° 时为 0, 沿着开关切换角绝对值从小到大的顺序, 遇到的第 1 个开关切换角为下降沿, PWM 波在经过该点后变为 $-E$; 第 2 个开关切换角为上升沿, PWM 波在经过此点后变为 0; 第 3 个开关切换角为上升沿, PWM 波在经过后变为 $+E$, ..., 直到第 11 个开关切换点, 相电压的 PWM 波都保持在 $(-E, +E)$ 之间, 因此能够采用三电平逆变器来实现, 是三电平逆变器 SHEPWM 问题的真解。根据这部分解所实现相电压的大致波形如图 1(c)所示, 其特点是正半周有负脉冲, 负半周有正脉冲。而采用国内外普遍采用的如式(6)、(7)所表示的开关切换角及其倍角余弦项系数交替为+1和-1的表达方式, 当求取的数值解的大小顺序发生变化时, 该组数值解无物理意义, 不是三电平逆变器 SHEPWM 问题的真解。由此可见, 以上升沿、下降沿为根据的非线性方程组建立方法, 允许波形在一定范围内变化, 扩展了可实现数值解的范围, 一定程度上降低了非线性方程组求解的难度。

(2) 分段描述。

由于相电压输出波形在 $M=0.86$ 处发生了变化, 在整个 M 值范围内的数值解的曲线组, 必须分段描述, 如图 3(a)、(b)所示。

(3) SHEPWM 多组解。

SHEPWM 非线性方程组具有多组解, 不同的初值可以使同一个 M 值所对应的非线性方程组收敛于不同的解。大多数解是随着 M 值的变化连续变化的, 但在有些点上, 如 $M=0.97$ 、 0.95 、 0.94 处, 采用 $M=0.38$ 求取的初值, 可以使非线性方程组各收敛于一组解, 但这几组解远离了在同一初值条件下邻近的多数 M 值处求取的。为了研究解曲线的连续性, 以 $M=0.98$ 处的解为初值, 则能够求得非线性方程组在这几个 M 值下和附近其它 M 值下的解

相近的解,如表 1 中数据所示。可见,SHEPWM 问题的解的曲线可以有多簇,SHEPWM 问题多重解的特点,为实际应用时的优化提供了条件。

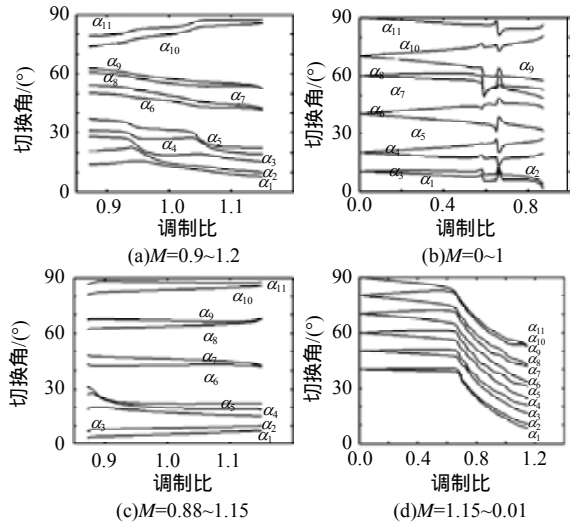


图 3 开关切换角随幅值调制比 M 变化的曲线(列举)
Fig. 3 Curves of switching angles (in degree) vary with modulation index M

对某一个 M 点处的多重可以物理实现的解,若以其中之一为初值,以小的增量从该点开始改变 M 值并对非线性方程组求解,往往可以求得经过该组解的一簇解的变化曲线。例如,以 $M=0.6$ 求得的一组初值为初值,可以求得 $M=0.87$ 处的数值解,以 $M=0.87$ 处的数值解为初值,则可以求得 $M=0.88$ 到 1.15 之间的另一簇解,如表 2 和图 3(c)所示。另外

表 1 三电平逆变器 11 个开关切换点 SHEPWM 非线性方程组的数值解举例

Tab. 1 Examples of the solutions of the nonlinear SHEPWM equations with 11 switching angles													
M 值	α_{1+}	α_{2-}	α_{3+}	α_{4-}	α_{5+}	α_{6-}	α_{7+}	α_{8-}	α_{9+}	α_{10-}	α_{11+}	迭代次数	最大误差
1.01	12.60	14.19	18.74	26.99	31.25	45.82	48.45	54.76	56.90	80.24	83.67	21	-3.2×10^{-6}
1.00	13.13	14.72	18.69	26.87	31.47	46.27	49.04	55.08	57.22	79.78	83.41	21	-3.6×10^{-7}
0.99	13.76	15.43	18.75	26.77	31.67	46.66	49.60	55.45	57.56	79.38	83.21	28	-1.4×10^{-8}
0.98	14.44	16.37	19.00	26.70	31.87	47.01	50.15	55.88	57.95	79.02	83.04	29	-1.5×10^{-7}
0.97	15.10	17.61	19.60	26.67	32.09	47.31	50.66	56.36	58.38	78.68	82.88	4	7.4×10^{-6}
0.86	4.78	3.44	18.89	26.70	32.19	43.92	48.86	53.10	57.78	79.74	85.07	17	-9.7×10^{-6}
0.85	5.53	4.21	18.57	26.40	32.49	44.36	49.34	53.31	57.95	79.18	84.74	17	-5.9×10^{-8}
0.84	6.04	4.68	18.35	26.20	32.70	44.65	49.73	53.47	58.10	78.79	84.57	16	-3.1×10^{-6}

表 2 调制度 M 在 0.87 到 1.15 之间的另一组解的曲线的一部分

Tab. 2 A part of another group of solution curves of the nonlinear equations for M in 0.87 to 1.15													
M 值	α_{1+}	α_{2-}	α_{3+}	α_{4-}	α_{5+}	α_{6-}	α_{7+}	α_{8-}	α_{9+}	α_{10-}	α_{11+}	迭代次数	最大误差
0.91	4.79	8.19	19.69	23.16	23.96	42.37	47.18	62.91	67.27	82.41	88.15	26	2.5×10^{-8}
0.90	4.67	8.09	19.90	24.25	24.91	42.34	47.31	62.81	67.33	82.28	88.18	25	1.4×10^{-10}
0.89	4.54	7.97	20.06	25.89	26.52	42.33	47.44	62.71	67.39	82.11	88.16	21	4.2×10^{-8}
0.88	4.34	7.74	19.97	28.05	30.00	42.56	47.71	62.59	67.36	81.64	87.35	14	2.3×10^{-10}
0.87	4.00	7.25	19.42	27.27	31.57	43.23	48.25	62.41	67.17	80.62	85.86	13	3.8×10^{-8}

表 3 从一组解出发求得所有 M 值下的方程组的解的曲线的一部分

Tab. 3 A part of solutions obtained by taking updated solution for newer M value as initial values													
M 值	α_{1+}	α_{2-}	α_{3+}	α_{4-}	α_{5+}	α_{6-}	α_{7+}	α_{8-}	α_{9+}	α_{10-}	α_{11+}	迭代次数	最大误差
1.15	8.12	10.50	16.27	20.78	24.63	31.02	33.28	41.29	42.35	52.02	52.33	1	4.3×10^{-7}
1.14	8.40	10.75	16.59	21.07	25.02	31.42	33.79	41.89	43.08	53.11	53.58	4	-3.1×10^{-5}
1.13	8.66	10.95	16.85	21.28	25.33	31.67	34.16	42.23	43.55	53.49	54.13	5	-5.7×10^{-8}
1.12	8.91	11.15	17.11	21.46	25.60	31.86	34.48	42.46	43.93	53.66	54.48	5	-7.6×10^{-6}
1.11	9.18	11.36	17.37	21.64	25.87	32.03	34.77	42.64	44.26	53.75	54.74	6	-1.3×10^{-7}
1.10	9.45	11.59	17.63	21.82	26.14	32.19	35.05	42.78	44.55	53.79	54.95	6	-1.5×10^{-6}

一个例子,在 $M=1.15$ 处的一组解(8.13, 10.5, 16.27, 20.78, 24.63, 31.03, 33.29, 41.29, 42.35, 52.03, 52.34),从该点出发,并及时用新的 M 下的解更新初值,可以非常容易地求得 M 从 1.15 到 0.01 的所有解,在最大误差小于 10^{-5} 的前提下,可以保证迭代次数不超过 5,开关切换角与 M 的关系曲线如图 3(d)所示,部分典型数据如表 3 所示。由于该组解在全程范围内无突变,易于快速在线实现,非常具有应用价值。

(4) 平缓部分。

在比较平缓的部分,以邻近点的数值解为初值求得非线性方程组的解时,迭代次数很小,收敛速度很快,这一特点对在线实现很重要。

(5) 在个别点的解。

在个别点上,数值解变化较大,比如 $M=0.66$,非线性方程组在这些点处不易收敛,对初值要求很高。建议在实际应用时,将这些特殊点上的解作为初值存储在表格中,可以使得在这些点上或附近的方程组快速收敛。

(6) 本方法不足之处。

本文所介绍的逐点求解 SHEPWM 非线性方程组的方法,虽说在一定的开关切换点数的条件下,可以为每一个 M 值对应的非线性方程组求得一组可以物理实现的数值解,但无法求得非线性方程组解的全集,这是这一方法的不足之处。

4 多重解的简单优化方法

非线性方程组解的多重性,决定了优化选择的必要性。优化选择的原则主要包括:必须剔除含有难以物理实现的窄脉冲的数值解;采用 SHEPWM 方法之后,被选定的低频次谐波被消除了,其余的较高频次的谐波依然存在,选择 THD 最小是一种必然的选择。在具体实施时,如果无输出滤波器,则可以根据相电压 PWM 波形的 THD 最小为原则进行优化,如果有输出滤波器,则以滤波器输出的 THD 最小为原则,则更为合理;逆变器的 SHEPWM 方法,只有在线实现才具有实际意义,在线实现时只能通过初值来选择迭代结果,为了便于快速在线实现,应该优先选用变化比较平缓的解的曲线组;优化是分层次的,有局部优化和全局优化两种。局部优化是指在已经得到的解的范围内进行优化选择,一般情况下,不能取得最优控制效果。全局优化是指在给定条件下,求出满足条件的所有解,并在此基础上进行优化选择,能取得最优控制效果。所以,为了实现全局最优,需要求出满足特定条件的解的全集。三电平逆变器 SHEPWM 方法的研究,还有很多工作有待完成。

5 实验研究

采用本文提出的方法求得的初值的有效性,通过迭代收敛的(以 0.01 为分辨率离散后) M 值的个数、迭代次数、非线性方程组的求解精度等参数,可以得到体现。为了证明所求数值解确实是三电平逆变器 SHEPWM 问题的解,设计制作了二极管箝位三电平逆变器实验电路模型,如图 4 所示。其中的开关管采用 RF840 型 MOSFET,以一小功率三相鼠笼电动机为负载,采用上述 SHEPWM 控制方法,对 $M=1.15$ 时的 SHEPWM 问题的一组解(7.55, 10.01, 15.52, 19.21, 22.36, 41.89, 42.85, 67.45, 67.73, 85.67, 87.47)进行了实验验证。

线电压实验波形及频率谱分析,如图 5 所示。在 $1/4$ 周期内有 11 个开关切换点,一个工频周期内有 44 次开关切换操作,所以,最高开关频率为 2 200 Hz。从图 5(b)所示的频谱可以看出,没被消除的最低次谐波的频率大约为 1 750 Hz,谐波次数为 35 次,实验证明了谐波消除的实际效果。线电压的基波幅值为 298.8 V,相电压幅值为 173 V,储能电容 C_1 、 C_2 两端的电压为 150 V,直流侧总电压为 300 V,可以证明调制度 M 为 $173/150=1.15$,证明达到了预

期的基波控制目标。

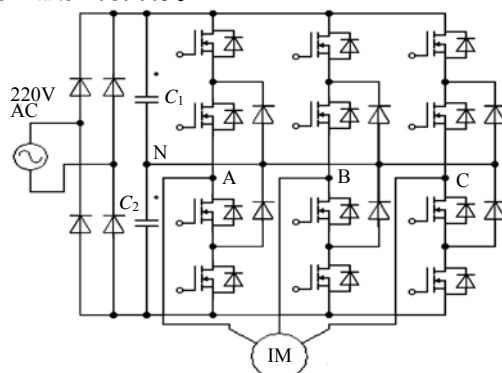


图 4 三电平 SHEPWM 实验电路原理图

Fig. 4 Circuit of three-level inverter SHEPWM experimental model

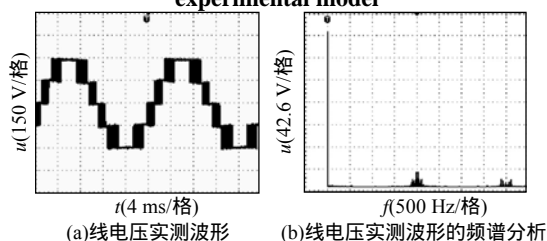


图 5 实验波形及频谱

Fig. 5 Experimental waveform and its frequency spectrum

6 结论

(1) 初值的求取方法是三电平逆变器 SHEPWM 技术及其在线实现的关键之一,好的初值不仅是迭代过程收敛的必要条件,而且可以减小迭代次数,提高收敛速度。求解 SHEPWM 非线性方程组的结果,充分证明了本文所提基于冲量相等、重心重合的初值求取方法是有效的,结合以其相邻 M 值下非线性方程组的数值解为初值的方法,可以为 M 整个变化范围内的所有非线性方程组求得至少一组可以物理实现的数值解。实验证明所求数值解是有效的。

(2) 以上升沿、下降沿为根据的非线性方程组的建立与描述方法,允许波形在一定范围内变化,扩展了可实现数值解的范围,一定程度上降低了非线性方程组求解的难度。

(3) 逆变器的 SHEPWM 问题有多重可以物理实现的解,欲求取最优解,需求取数值解的全集并在此基础上进行优化选择。

参考文献

- [1] Tan Xinyuan, Bian Jingming. An algebraic algorithm for generating optimal PWM waveforms for AC drives-part I: selected harmonic elimination[C]. Record of IEEE Power Electronics Specialists Conference, Massachusetts, USA, 1991.
- [2] 谭新元. 牵引逆变器 SHEPWM 控制技术的研究[J]. 中国电机工程学

- 报, 2001, 21(9): 47-52.
- Tan Xinyuan. Advanced SHEPWM technique for AC traction drives [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 47-52(in Chinese).
- [3] Li Li, Dariusz Czarkowski, Yaguang Liu, et al. Multilevel selective harmonic elimination pwm technique in series-connected voltage inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1): 160-170.
- [4] Prasad N Enjeti, Phoivos D Ziogas, James F Lindsay. Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: a critical evaluation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(2): 302-316.
- [5] 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).
- [6] 潘孟春, 单庆晓, 胡楷. 基于鲁棒系数的逆变器开关角选择方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 87-90.
- Pan Mengchun, Shan Qingxiao, Hu Kai. The methods about selecting switching angle of inverter based on robust coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 87-90(in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] Jorge Pontt, José Rodríguez, Odrigo Huerta. Mitigation of non-eliminated harmonics of SHEPWM three-level multi-pulse three-phase active front end converters with low switching frequency for meeting standard IEEE-519-92[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1594-1600.
- [11] Toshiji Kato. Sequential homotopy-based computation of multiple solutions for selected harmonic elimination in PWM inverters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1999, 46(5): 586-593.
- [12] Tolbert L M, Chiasson J, McKenzie, et al. Elimination of harmonics in a multilevel converter with nonequal DC sources[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Miami, Florida, USA, 2003.
- [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 multi-level voltage inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 87-92(in Chinese).
- [14] 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).
- [15] 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).

收稿日期: 2007-05-20。

作者简介:

费万民(1965—), 男, 教授, 南京航空航天大学电气工程博士后流动站研究人员, 研究方向为电力电子技术及其应用, feiwanmin@njjnu.edu.cn;

张艳莉(1970—), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为非电量检测技术、电力电子技术等;

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;

姚文熙(1977—), 男, 博士, 研究方向为电力电子技术及其应用;

吕征宇(1957—), 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)