运用遗传算法选择性消除多电平逆变器新拓扑中的谐波

周 鹏[1]，方 刚[2]， 裴玖玲[3]

(1.塔里木大学信息工程学院，新疆 阿拉尔 843300；2.随州供电公司， 湖北 随州 441300;
3.塔里木大学机械电气化工程学院，新疆 阿拉尔 843300)

摘要：目前，传统的PWM技术和选择性谐波消除问题得到了广泛研究。提出运用遗传算法来选择性消除多电平逆变器新拓扑中的谐波。新拓扑与传统结构相比较有减少开关数量的优势，并且可以把输出电平的数量扩展到任何值，该系统减轻了执行机构的复杂性，缩短了计算时间。对于每一个被要求消除的谐波，如果最优开关切换角存在，搜索过程中，遗传算法都可以找到一组最佳开关切换角。模拟仿真和实验结果都验证了新拓扑适合于不同电平数量的逆变器和不同次数的谐波消除。

关键词：多电平逆变器；选择性谐波消除；PWM；遗传算法

Selective harmonic elimination of new family of multilevel inverters using genetic algorithms

ZHOU Peng[1], FANG Gang[2], PEI Jiu-ling[3]

(1. School of information Technology, Tarim University, Alar 843300,China; 2.Suizhou Power Supply Company, Suizhou 441300,China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300,China)

Abstract: These days, traditional PWM techniques and selective harmonic elimination have been widely research. This paper presents the selective harmonic elimination of a new family of multilevel inverters using genetic algorithms. The new topology has the advantage of a reduced number of devices compared with traditional configurations and can be extended to any number of levels. The presented system reduces both the implementation complexity and the computational time. The GA technique finds the optimal solution set of switching angles, if it exists, for each required harmonic profile. Both simulation results and experimental verification of the proposed inverter topology for different numbers of levels and different harmonic profiles are presented.

Key words: multilevel inverters; selective harmonic elimination; PWM; genetic algorithms

中图分类号： TM714 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2009)06-0017-06

0 引言

近年来，多电平逆变器由于高压大容量、高效率和低电磁干扰（EMI）[1]等优点，得到越来越广泛的运用。多电平逆变器的理想输出电压是由几个直流电压源组合而成的，随着直流电压源数量的增加，输出电压几乎接近正弦波形。

在工业生产中，多电平逆变器普遍用正弦脉冲宽度调制（SPWM）和空间矢量调制（SVM）[2]两种调制方法。其实，选择性谐波消除取决于解答一系列从逆变器输出电压的傅立叶级数展开式中得来的三角方程，方程的解显然是那些把特定低次谐波等于零，同时控制基波频率的开关切换角。根据多电平逆变器输出电压的傅立叶级数展开式，要保持消除谐波的数量为常数，所有的开关切换角必须小于$\pi/2$，选择性谐波消除可利用的技术有迭代方法[3]（Newton-Raphson）和合成理论[4]。迭代方法主要取决于初始值猜测，并且分歧问题很可能发生，尤其对于高数值的多电平逆变器，根据谐波畸变率（THD），无法保证得到最优解。与迭代方法只生成一组解相比，用合成理论消除谐波取决于求解22次的多项式，在生成的所有可能解中，选择THD值最低的解。这两种方法都比较复杂和耗时。

目前，大部分存在的多电平逆变器拓扑属于二极管钳位式结构和级联型H桥式结构，它们都有开关数量多的缺点。将选择性谐波消除的传统技术应用于目前存在的多电平逆变器中，增加整体系统的复杂性。文中基于遗传算法，提出了一种选择性消除谐波的多电平逆变器新拓扑结构，解释了在PWM单相逆变器中使用遗传算法选择性消除谐波的不同

基金项目： 新疆生产建设兵团工业科技攻关计划（2007GG15）

步骤，描述了如何把遗传算法应用到当前问题。遗传算法的不同组成单元，例如染色体，目标函数，复制，交叉和变异，都被阐明了如何应用到当前任务。在相同电平数量的情况下，与其它多电平逆变器相比较，新的拓扑结构有减少开关数量的优势，电路复杂度和计算时间都得到明显改善。

1　多电平逆变器的新拓扑

多电平逆变器新拓扑主要是在不改变输出电压的阶梯性的情况下，减少使用开关管的数量。因此，当具有相同数量的电平输出时，它与常规级联型H桥式逆变器有相同个数的直流电源。新拓扑中，最简单的电路是如图1所示的5电平逆变器。它有一个主H桥式逆变器Q_1~Q_4，两个辅助开关Q_5和Q_6，和两个直流电压源。辅助开关管的作用是控制两个直流电压源的连接，使输出电压呈现阶梯性，逆变器的输出电压和开关管驱动信号如图2所示。根据负载电压和电流的极性，这种结构能够在三种不同模式下工作：供给模式，惯性模式和再生供给模式。在7电平逆变器中，另外增加两个辅助开关和一个直流电源，如图3所示。每额外增加一个电平，这个增加两个辅助开关和一个直流电源的过程就被重复。如图4所示的9电平逆变器与图3相比较，增加了两个辅助开关管和一个直流电源。与传统级联型H型桥式逆变器相比，节省的开关数量是n-3（这里n是电平数），所以大大降低了传统多电平逆变电路的复杂度。

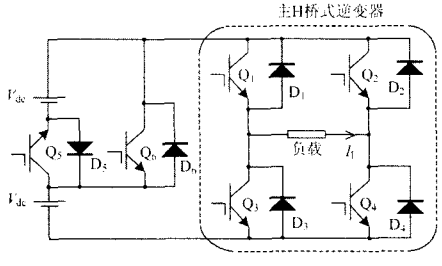


图1 新拓扑的5电平逆变器

Fig.1 The 5 level inverter of the new family

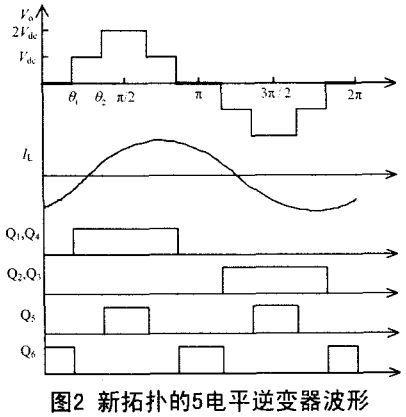


图2 新拓扑的5电平逆变器波形

Fig.2　Waveform of the new 5 level inverter

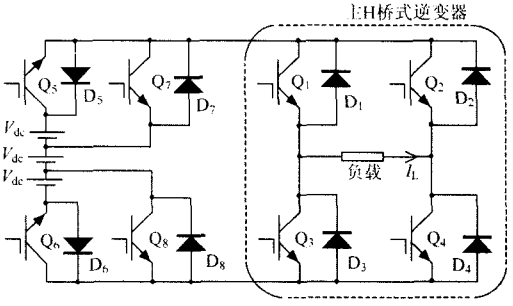


图3 新拓扑的7电平逆变器

Fig.3 The 7 level inverter of the new family

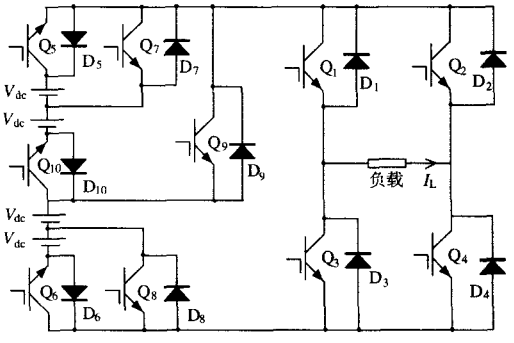


图4 新拓扑的9电平逆变器

Fig.4　The 9 level inverter of the new family

2　开关切换角的数学方法

多电平逆变器新拓扑的控制是选择一系列的开关切换角来合成理想的正弦电压波形。图5表示了由$2s$+1个电平合成匀称的、阶梯状的一般电压波形，这里s是开关切换角数量，也等于直流电压源数量。

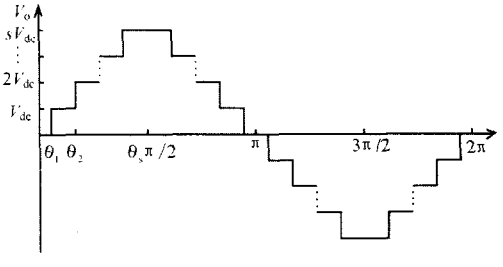


图5 多电平逆变器生成的阶梯电压

Fig.5　Generalized stepped voltage of multilevel inverter

因为s等于直流电压源V_{dc}数量，使用基波频率切换规则，图5所示输出电压波形的傅立叶级数展开式如式(1)：

$$V_0(\omega t)=\sum_{n=1,3,5,\cdots}^{\infty}\frac{4V_{dc}}{n\pi}(\cos(n\theta_1)+\cos(n\theta_2)+\cdots+\cos(n\theta_s))\sin(n\omega t) \tag{1}$$

理想地，给定一个基波电压V_1，由它可以决定使期望输出电压等于$V_0(\omega t)=V_1\sin(\omega t)$和特定高次谐波等于零的开关切换角$\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_s$。可以证明为了控制基波输出电压和消除$n$次谐波，需要$n$+1个方程。开关切换角可以通过求解描述输出电压基波和各谐波系数的方程组式（2）而得到：

$$\begin{cases}\cos(\theta_1)+\cos(\theta_2)+\cdots+\cos(\theta_s)=m\\ \cos(3\theta_1)+\cos(3\theta_2)+\cdots+\cos(3\theta_s)=0\\ \cos(5\theta_1)+\cos(5\theta_2)+\cdots+\cos(5\theta_s)=0\\ \vdots\\ \cos(n\theta_1)+\cos(n\theta_2)+\cdots+\cos(n\theta_s)=0\end{cases} \tag{2}$$

式中：$m=V_1/(4V_{dc}/\pi)$，调制度$m_a=m/s$。

求解非线性超越方程组式（2）的方法之一是迭代法，例如Newton-Raphson法[3]。和迭代法相对的是，把描述谐波内容的超越方程组（2）转化为多项式方程，当多项式存在时，可以用合成理论来求解[4]。多项式的这些解逐个被检验，目的是选择一组使THD值最小的解（主要由于第11和第13次谐波）。按百分比计算THD的定义为：

$$\mathrm{THD\%}=\sqrt{\frac{V_3^2+V_5^2+V_7^2+\cdots+V_{19}^2}{V_1^2}}\times 100 \tag{3}$$

迭代法仅仅给定一个特殊解，这个解取决于假想的初始值，并且这个解还不能保证是最优解。另一方面，使用合成理论可以生成所有可能解，但是比较复杂和耗时。因此，有必要思考一种具有更多技巧的简单方法（例如遗传算法）来求解非线性超越方程组式(2)。

3　使用遗传运算规则方法

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局最优化概率搜索算法，遵循生物的自然选择理论和基因遗传学原理[7]。它是将问题域的可行解看作是群体的“染色体”，将其置于问题的“环境”中，根据适者生存的原则，从中选择出适应环境的“染色体”进行复制，即再生，通过交叉、变异两种基因操作产生出新一代更适合环境的“染色体”群，这样一代代不断改进，最后收敛到一个最适合环境的个体上，求得问题的最佳解。以优化为目的的基因算法不同于常规经典的优化方法表现在这几个方面：随机对确定性操作，种群对单一最佳解，解的选择符合适者生存理论。

3.1 染色体编码

一个简单的遗传算法是以一个种群的随机产生开始的，种群由一组染色体串组成，通常，染色体串的大小在50~1000之间。其实，按照精确性要求，种群数目可以是任意大小。在整个进化过程中，种群数目保持常数，在某种程度上，一个染色体应该包含它所代表的解信息，问题中的变量要用合适的编码系统编码。当然，编码方式有许多种，但最常用的是二进制编码。采取什么样的编码主要取决于所解决的问题，特殊问题的特殊编码能改善遗传算法性能。本文采用的是二进制编码系统，那么染色体串如：

串1：　1101100100110110

串2：　1101111000011110

遗传算法中，一个二进制串可以被划分为一定数量的子串。通常，子串数量等于问题变量的个数。因此，上述串可以可能代表一个参数变量（16位），或2个参数变量（8位），或其它组合。

3.2 适应度函数

一旦产生随机种群，每个串代表的解应该被检验。遗传算法对一个个体（解）的好坏用适应度函数来评价，适应度函数是遗传算法进化过程的驱动力，也是进行自然选择的唯一标准。适应度函数是多电平逆变器中选择性消除谐波问题的评估函数，它检验迭代过程中每一步出现的所有个体解，目标是在确定开关切换角过程中，使评估误差值最小，将一些选择性谐波系数最小化或等于0。规定适应度函数作用是使个体绝对误差总和减到最小，这样，绝对误差总和可以写为：

$$AE=\frac{1}{\sum_{i=1}^{N}|e(i)|+\Delta} \tag{4}$$

式中：假如$F_{sum}=\sum_{i=1}^{N}|e(i)|$趋近于0，为避免溢出，$\Delta$取一个非常小的常数（文中$\Delta=0.000\ 01$）。还有一点非常重要，假设公式（4）中误差函数是个已知协方差的高斯白噪声序列：

$$E\{e(i)e(j)^{\mathrm{T}}\}=\begin{cases}0, & i\neq j\\ R(i), & i=j\end{cases} \tag{5}$$

除编码和适应度函数外，简单的遗传算法由复制、交叉和变异三种基因操作组成。新种群生成之前，父代种群的每串染色体都要经历这三个步骤[5]。

3.3 选择

受生物界自然选择启发，遗传算法需要对所有个体解完成选择过程，选择时种群的具有最大适应度值的个体解被存留，最小适应度值的个体解被淘汰。在一个受约束的最优化问题中，适应度的概念一部分取决于个体解是否可行（例如，是否满足所有的约束条件），一部分取决于它的目标函数值。选择是一种引导进化算法朝着更好地解决问题的方向前进的过程，父代选择可以在各种各样的方式下完成，例如归一化几何选择方法、锦标赛选择方法和轮盘赌选择算法等。文中，使用轮盘赌技术完成选择过程[6]。

3.4 交叉

复制后，可进行交叉操作，交叉是从父代染色体中选择基因并创造新的子代。最简单的交叉是随机选择某个交叉点，从最初的父代染色体中复制这个点以前所有信息，接着从其它父代染色体中复制这个交叉点之后的所有信息。举例说明交叉过程（| 是交叉点）：

染色体1：　11011|00100110110

染色体2 ：　11011|11000011110

子代1 ：　11011|11000011110

子代2 ：　11011|00100110110

交叉还可以按其它方式进行，例如可以选择多点交叉。交叉过程有时可能十分复杂，主要取决于染色体编码技术。

3.5 变异

交叉后，基因会发生变异。变异可以随机改变交叉形成的子代，防止种群的所有解陷入待求问题的局部优化。在二进制编码的情况下，变异就是以极小的概率随机选择几位向相反方向变化（从1到0，或从0到1），例如：

原来子代1：　1101111000011110

原来子代2：　1101100100110110

变异子代1：　1100111000011110

变异子代2：　1101101100110110

变异技术（以及交叉）主要取决于染色体的编码。例如，当进行编码改变时，因为两个基因交换，可能发生变异。

文中采用基于Matlab的遗传算法和直接搜索工具箱，例如“FlexGA version lCynapSys. LLC”，来完成最优化问题的遗传算法研究，将个体的随机取样初始化，使用遗传算法把这些具有不同变量的个体解达到最优。基于经验、实验和多次失败的基础上，选择遗传算法操作概率和种群数目。对于本文研究的问题，种群的初始数目为100，交叉的概率选为0.6，突变概率为0.02。在所有的测试中，用的编码制是二进制。

4 模拟仿真

使用上述遗传算法求解多电平逆变器的通用超越方程组（2），适用于不同电平数值的逆变器。对于不同m值，不同电平数值的逆变器的开关切换角的解如图6~9所示，图中从3次谐波开始，连续奇次谐波被消除。运用Matlab遗传算法工具箱，得到很多模拟结果，例如5电平逆变器的输出电压和其对应的FFT仿真结果如图10所示，图中V_{dc}=20 V，m_a=0.6（s=2，m=1.2，$V_1=(4mV_{dc}/\pi)$=30.5 V）。另外7电平逆变器的一组波形如图11所示，（V_{dc}=20 V，s=3，m_a=0.6，m=1.8，$V_1=(4mV_{dc}/\pi)$=45.8）。通常，上述遗传算法对于消除一个特定谐波会搜出多组解，选择生成最小THD的那组。

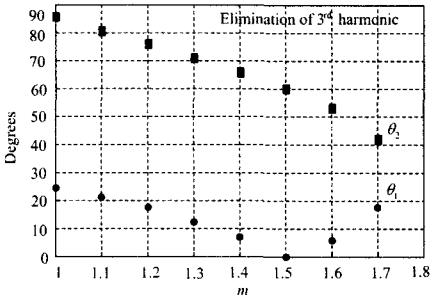


图6 不同m值时5电平逆变器的2个开关切换角（消除3次谐波）

Fig.6 Solutions for 2 angles versus m for 5 level inverter (3rd harmonic eliminated)

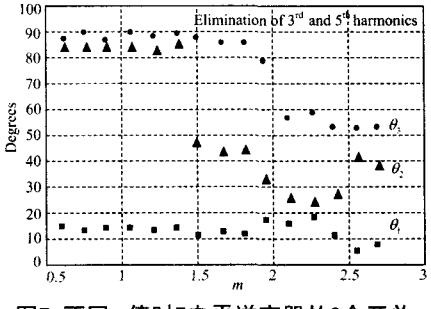


图7 不同m值时7电平逆变器的3个开关切换角（消除3次、5次谐波）

Fig.7 Solutions for 3 angles versus m for 7 level inverter (3rd and 5th harmonics eliminated)

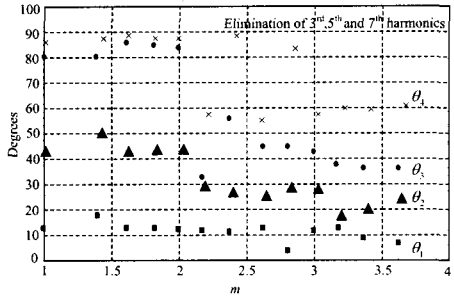


图8 不同m值时9电平逆变器的4个开关切换角(消除3次、5次和7次谐波)

Fig.8 Solutions for 4 angles versus m for 9 level inverter (3rd, 5th and 7th harmonics eliminated)

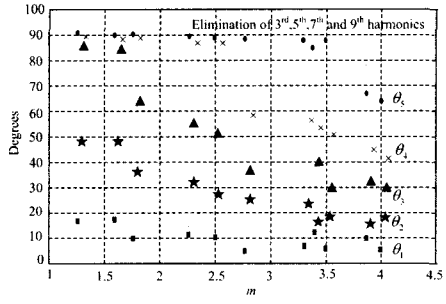
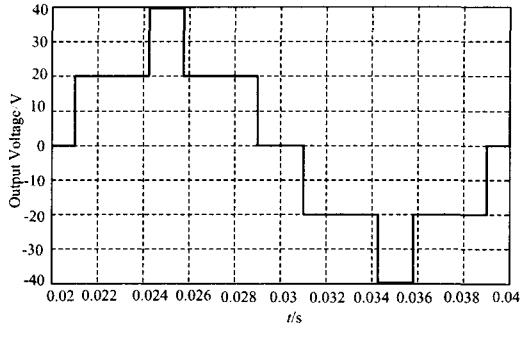
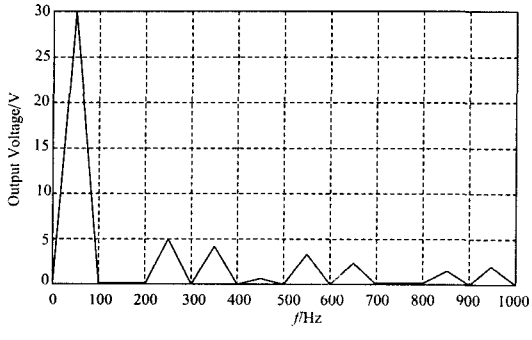


图9 不同m值时11电平逆变器的5个开关切换角(消除3次、5次、7次和9次谐波)

Fig.9 Solutions for 5 angles versus m for 11 level inverter (3rd, 5th, 7th and 9th harmonics eliminated)



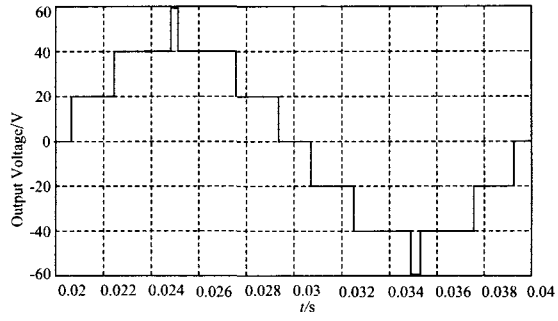
(a)



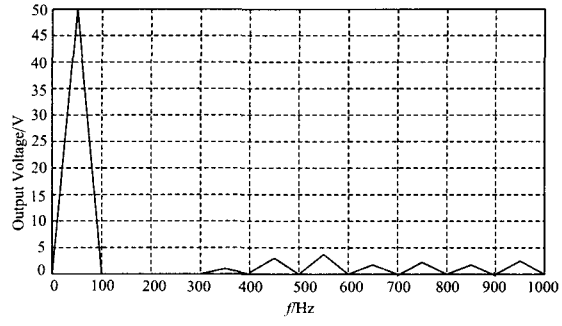
(b)

图10 （a）输出电压图 (b) 用于消除3次谐波的5电平逆变器相应的FFT（V_{dc}=20 V，m_a=0.6）

Fig.10 (a) Output voltage (b) corresponding FFT of 5 level inverter for 3rd harmonic elimination at V_{dc}=20V, and m_a=0.6



(a)



(b)

图11 （a）输出电压 (b) 用于消除3次、5次谐波的7电平逆变器相应的FFT（V_{dc}=20 V，m_a=0.6）

Fig.11 (a) Output voltage (b) corresponding FFT of 7 level inverter for 3rd and 5th harmonics elimination at V_{dc}=20V, and m_a=0.6.

5 实验结果

虽然提出的理论提供了选择性的开关切换波形，文中选择性谐波控制技术仍然属于软件PWM法。结果，系统硬件执行机构类似于其它软件PWM技术，通常依靠微处理器、DSP的灵活性和高性能指标来实现。基本原理依靠存储在微处理器中预先计算的开关切换角和通过循环表生成PWM输出。一个基于MCB-1A Hampden微处理器的实时控制器常常用来实现选择性谐波消除的PWM，用IRF620(200 V/5 A) MOSFET作为开关元件，建立一个多电平逆变器。用遗传算法获得的开关切换角，转化为以一定的时间间隔查询存储在EPROM中的以不同调制度值为索引的表格，使用减法数计数器和一些逻辑运算，最后以PWM模式输出。从控制器中得到的PWM通过电气隔离（发光绝缘物）连接到逆变器功率开关管。为了验证提出的观点，用硬件开发来实现5电平逆变器，并且它可以扩展到任何电平数的逆变器和任何期望的谐波消除。模拟结果的实验验证如图12所示，从模拟图10和实验图12可以看出，两者结果非常一致，发现实验的THD结果稍微高于模

拟的，那是因为控制决策被限制在8 μs，且开关管也不是理想的。实验中，四个主开关管的有效开关频率是50 Hz，辅助开关管的频率是100 Hz。另外，7电平逆变器的实验结果与图11的仿真结果也非常相似。

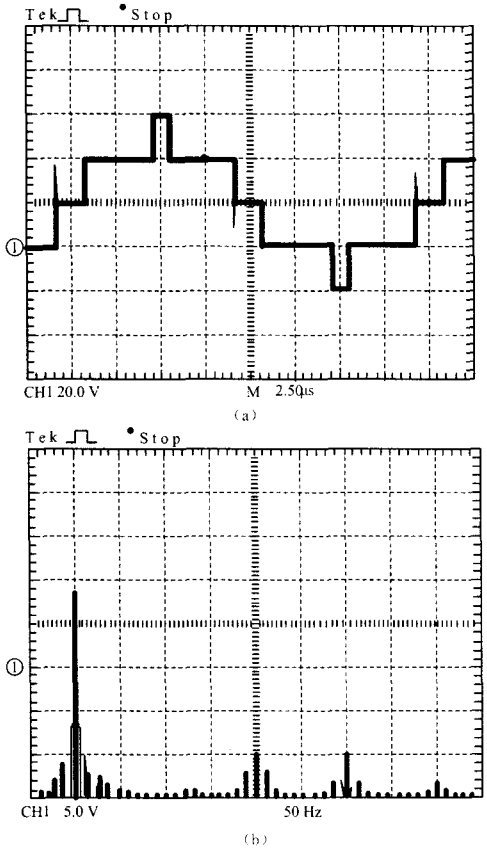


图12 (a)输出电压 (b) 消除3次谐波的5电平逆变器对应的FFT

Fig.12 (a) Output voltage (b) corresponding FFT of 5 level inverter for 3rd harmonic elimination at V_{dc}=20V, and m_a=0.6

6 结论

文中基于遗传算法，提出了一种选择性消除谐波的多电平逆变器新拓扑结构。与传统结构相比，在电平数相同情况下，新拓扑有减少开关管数量的优点。遗传算法证明了新拓扑的有效性，并且大部分连续范围的开关切换角可导。对于某次谐波和给定具体的调制度，遗传算法通常生成多组解，在这些多组解中，选择那个生成最小THD值的解。模拟仿真和实验结果表明，新的逆变器拓扑结构和提出的遗传算法的有效性，从模拟和实验图中可以看出输出电压的THD剧烈减小。另外，遗传算法具有通用性、智能性、鲁棒性、全局性和并行性的特点，减少了计算量和搜寻时间，并且还能够求解复杂的多目标函数[7]。

然而，新拓扑中H桥式四个主开关管承受是所有公共直流电压源电压，四个主开关电压处于高额定值状态，因此，多电平逆变器新拓扑一般应用在中功率场合。

参考文献

[1] Rodriguez J, Lai J, Peng FZ. Multilevel Converters: a Survey of Topologies, Controls, and Applications[J]. IEEE Trans on Ind Appl 2002;49(4):724–738.

[2] Rodriguez J, Correa P, Moran L. A Vector Control Technique for Medium Voltage Multilevel Inverters[A]. In: Proc IEEE APEC[C]. Anaheim: 2001. 173 - 178.

[3] Patel HS, Hoft RG. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: part I- Harmonic Elimination[J]. IEEE Trans Ind,1973,3:310 - 317.

[4] Chiasson J N, Tolbert LM, McKenzie K J, et al. Control of a Multilevel Converter Using Resultant Theory[J]. IEEE Trans Cont Syst Theory, 2003,11(3):345 - 354.

[5] Ozdemir A, Lim J Y, Singh C. Voltage and Reactive Power Distribution Factors Calculated by Genetic Algorithms[A]. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[C]. 2002.1276 - 1281.

[6] Ramerirez-Rosado J I, Bernal-Agustin J L. Genetic Algorithms Applied to the Design of Large Power Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Syst, 1998,13(2): 696 - 703.

[7] Ovaska S J, Bose T, Vainio O. Genetic Algorithm-assisted Design of Adaptive Predictive Filters for 50/60 Hz Power Systems Instrumentation[J].IEEE Trans Instrum Meas, 2005,54(5):2041-2048.

收稿日期： 2008-05-12

作者简介：

周　鹏（1970-），男，副教授，硕士，主要研究方向为计算机应用和现代控制技术；E-mail:zpzqxy@163.com

方　刚（1969-），男，本科，从事电力基建工作；

裴玖玲（1980-），女，讲师，硕士，主要研究方向为电力电子技术，当前课题是大功率高频逆变电源的研究。