

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181371

# 基于差分进化算法的逆变器 SHEPWM 方法的研究

李国华, 李文悍

(辽宁工程技术大学, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:** 针对两电平特定谐波消除(Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation, SHEPWM)非线性方程组的求解, 提出采用差分进化算法(Differential Evolution Algorithm, DE)对两电平逆变器消谐模型的非线性超越方程组求解的方法。DE 求解 SHEPWM 方程组克服了数值方法需要初值的不足。给出调制度 0~1.15 下的开关角轨迹, 和遗传算法求解进行对比, 得出 DE 求解具有更高的精度。为验证差分进化算法求解的正确性和可行性, 用 Matlab/Simulink 进行仿真研究, 并以 DSP(TMS320F28335)为核心搭建了两电平逆变器进行实验。仿真和实验结果证明了差分进化算法求解的正确性和可行性。

**关键词:** 特定谐波消除; 差分进化算法; 逆变器; 脉宽调制; 非线性超越方程组

## Research on the SHEPWM technique applied to inverter based on differential evolution algorithms

LI Guohua, LI Wenhan

(Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Aiming at solving the nonlinear equations of two-level selective harmonic elimination, a method of solving the nonlinear transcendental equations of two-level inverters harmonic elimination model by Differential Evolution (DE) algorithm is proposed. DE solves the SHEPWM equations and overcomes the shortage of initial values in numerical methods. The switching angle trajectory with modulation degree of 0 to 1.15 is given. Compared with the genetic algorithm solution, the DE solution has higher accuracy. In order to verify the correctness and feasibility of the differential evolution algorithm, a simulation study is carried out with Matlab/Simulink, and a two-level inverter based on DSP (TMS320F28335) is built for experiment. The simulation and experimental results prove the correctness and feasibility of the differential evolution algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307076) and Liaoning Natural Science Foundation of China (No. 20180550268).

**Key words:** selective harmonics elimination; differential evolution algorithms; inverter; pulse width modulation; nonlinear transcendental equations

## 0 引言

特定谐波消除调制策略(SHEPWM)是一种优化的脉宽调制策略, 通过优化开关角度, 能消除特定的低次谐波, 具有波形质量更好, 直流侧电压利用率高, 减少滤波器体积, 减少开关损耗等优点<sup>[1-6]</sup>。SHEPWM 的消谐方程组是非线性超越方程, 国内外学者提出了许多相关算法, 目前常用数值算法如牛顿迭代法<sup>[7-8]</sup>、同伦算法<sup>[9]</sup>、Walsh 函数<sup>[10-11]</sup>等。

数值算法依赖于初值的选取, 选取不合适的初值会使算法收敛于局部最优解, 并且数值算法在求解多电平逆变器的开关角度时, 计算将会变得非常复杂。在代数方法中, 如吴方法<sup>[12]</sup>、Groebner 基<sup>[13]</sup>、结式理论<sup>[14]</sup>、代数多项式<sup>[15]</sup>等, 将非线性超越方程转化为多项式方程来求解开关角, 无需初值。但是该方法计算复杂, 仅适用于低电平逆变器。近年来智能算法的快速发展, 将智能算法应用于 SHEPWM 技术逐渐成为可能。在智能方法中, 文献<sup>[16-17]</sup>采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA), 求解速度快, 但易产生早熟现象, 精度较低; 文献<sup>[18-19]</sup>采用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)具

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51307076); 辽宁省自然科学基金项目资助(20180550268)

有简单、易于实现的优点, 但是对粒子飞行速度的依赖较强, 容易造成局部收敛; 文献[20]将蜂群算法(Bee Algorithm, BA) 应用到 SHEPWM 方程组的计算, 利用蜜蜂的自然觅食行为来获得最优解, 具有精度高的优点, 但收敛速度慢, 易早熟; 文献[21-22]给出蚁群优化算法(Ant Colony Optimization Algorithm, ACOA), 但是起初信息素匮乏, 全局收敛性差, 效率较低。

差分进化算法(Differential Evolution Algorithm, DE)由 Storn 和 Price<sup>[23]</sup>于 1997 年首次提出, 是一种基于群体的全局优化算法, 通过不断迭代找到复杂问题的最优解, 利用目标函数对每一代的数值进行评价<sup>[24-25]</sup>。该算法无需初值, 结构简单, 求解精度高, 在许多工程问题的优化中得到了广泛的应用。该算法和遗传算法(GA)相比具有结构简单, 精度高的优点, DE 有更强的搜索能力, 能有效摆脱局部最优解。本文采用差分进化算法进行特定消谐方程的求解, 以两电平逆变器为例, 给出调制度 0 到 1.15 的开关角度轨迹。通过仿真和实验研究验证了差分进化算法求解的正确性和可行性。

## 1 SHEPWM 方程组的建立

图 1 为两电平逆变器原理图, SHEPWM 产生的相电压波形如图 2 所示, 其具有 1/2 周期奇对称和 1/4 周期偶对称的特点, 相电压谐波中自然消除偶次分量和零序分量, 因为三相系统之间的对称性, 线电压的 3 及 3 的倍数次谐波自动消除, 由傅里叶分解得

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

$$U_{mn} = \pm \frac{2U_d}{n\pi} [1 + 2 \sum_{i=1}^N (-1)^i \cos(n\alpha_i)] \quad (2)$$

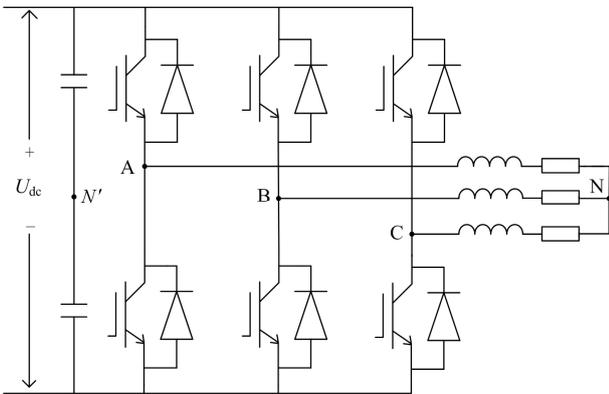


图 1 两电平逆变器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a two-level inverter

式中:  $U_{mn}$  为  $n$  次谐波幅值;  $N$  为 1/4 周期内开关角的个数;  $U_d$  为直流侧电压,  $\omega$  为基波角频率;  $\alpha_i$  为第  $i$  个开关角,  $0 < \alpha_i < \pi/2$ ; 可以消除  $6k \pm 1$  次谐波, 通过对式(2)所组成的方程组求解即可得到开关角的分布,  $N$  个开关角对应  $N$  个方程, 其中一个方程满足基波电压要求,  $N-1$  个方程用来消除谐波。  $N$  个开关角对应  $2N+1$  个脉冲。令基波  $U_{m1} = U_1^*$ , 谐波  $U_{mn} = 0$  得到式(3)。

$$\begin{cases} U_{m1} = \pm \frac{2U_d}{\pi} [1 + 2 \sum_{i=1}^N (-1)^i \cos(\alpha_i)] = U_1^* \\ U_{mn} = \pm \frac{2U_d}{n\pi} [1 + 2 \sum_{i=1}^N (-1)^i \cos(n\alpha_i)] = 0 \end{cases} \quad (3)$$

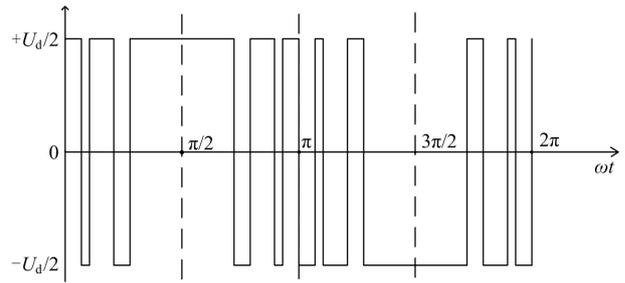


图 2 两电平相电压 SHEPWM 波形示意图

Fig. 2 Phase voltage SHEPWM waveforms of two-level inverter

定义基波调制度  $m = \frac{U_{m1}}{U_d/2}$ , 由式(3)建立适应

度函数方程式, 如式(4)所示。

$$\begin{cases} f_1(\alpha) = -\frac{4}{\pi} [1 + 2 \sum_{i=1}^7 (-1)^i \cos(\alpha_i)] - m = \varepsilon_1 \\ f_2(\alpha) = -\frac{4}{5\pi} [1 + 2 \sum_{i=1}^7 (-1)^i \cos(5\alpha_i)] = \varepsilon_2 \\ \vdots \\ f_7(\alpha) = -\frac{4}{19\pi} [1 + 2 \sum_{i=1}^7 (-1)^i \cos(19\alpha_i)] = \varepsilon_7 \end{cases} \quad (4)$$

定义适应度函数

$$f(\alpha) = \frac{1}{1 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2 + \varepsilon_5^2 + \varepsilon_6^2 + \varepsilon_7^2} \quad (5)$$

按式(5)定义适应度函数, 求解的开关角个数为 7, 消除谐波的次数为 5、7、11、13、17、19。

## 2 差分进化算法求解 SHEPWM 方程组

DE 是一种基于种群的全局搜索算法, 利用目标函数对算法中的个体进行评价, 保留优良个体, 通过不断迭代找到复杂问题的最优解。差分进化算

法包括种群初始化, 变异、交叉、选择等操作, 具体方法如下, 图 3 为差分进化算法的流程图。

1) 种群初始化, 设总群规模为  $N_p$ , 每一代种群是由  $N_p$  个维数为  $n$  的向量组成的。初始种群随机产生, 可表示为式(6)。

$$x_{i,j} = x_{\min,j} + \text{rand}(0,1)(x_{\max,j} - x_{\min,j}) \quad (6)$$

2) 变异, 从种群中随机选择 3 个互不相同的个体( $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ ), 并且按式(7)产生变异向量  $U$ , 其中  $F$  为缩放因子, 取值范围为[0, 2]。

$$U = X_1 + F(X_2 - X_3) \quad (7)$$

3) 交叉,  $U$  和目标向量  $X_i$  之间交叉操作产生一个子代向量  $Z$ 。然后按式(8)产生试验个体  $V_i$ ,  $CR$  为交叉概率, 取值范围为[0, 1]

$$V_i = \begin{cases} Z & \text{if } \text{rand}(0,1) \leq CR \\ X_i & \text{if } \text{rand}(0,1) > CR \end{cases} \quad (8)$$

4) 选择, 根据式(9)对试验个体选择, 如果目标个体的适应度函数值小于试验个体, 则目标个体保留到下一个, 否则试验个体保留到下一代。

$$X_i = \begin{cases} V_i & \text{if } f(V) \leq f(x_i) \\ X_i & \text{if } f(V) \geq f(x_i) \end{cases} \quad (9)$$

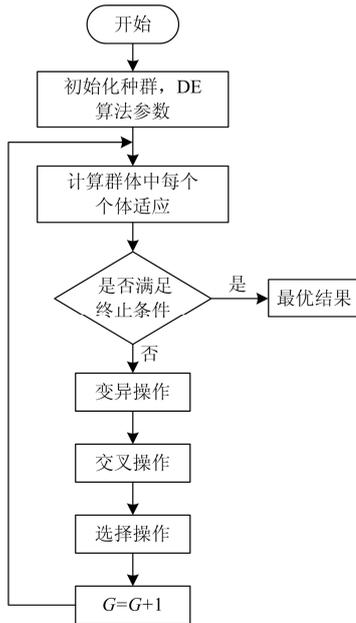


图 3 差分进化算法流程图

Fig. 3 Flow chart of differential evolution algorithm

按式(5)为适应度函数, 当  $f(\alpha)$  为 1 时,  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_4$ 、 $\varepsilon_5$ 、 $\varepsilon_6$ 、 $\varepsilon_7$  均为 0, 此时认为得到了方程组的解。DE 参数如下: 交叉概率  $CR=1$ , 变异概率  $F=0.8$ , 最大迭代次数为 200, 采用 DE/rand/1 变异

策略, 如式(7)所示, 得到调制度 0~1.15 的开关角度的轨迹, 如图 4 所示。

GA 的参数选取为交叉概率 0.6, 变异概率 0.01, 最大迭代次数 200。

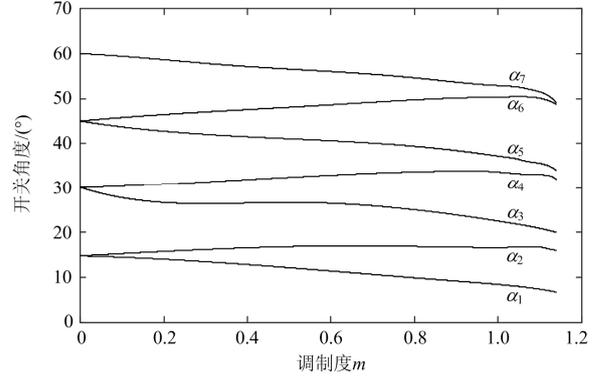


图 4 调制度 0 到 1.15 开关角度轨迹

Fig. 4 Modulation 0 to 1.15 switch angle trajectory

表 1 和表 2 分别为 DE 和 GA 在调制度 0.8~1.15 下的开关角度和适应度函数  $f(\alpha)$ ,  $m$  为调制度, 求解的开关角个数为  $7(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7)$ ,  $f(\alpha)$  代表求解的精度大小。由式(5)可知,  $f(\alpha)$  越接近于 1, 则求解精度越高。

表 1 DE 在调制度 0.8~1.15 的开关角度

Table 1 DE switch angle between modulation 0.8 to 1.15

$m$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$f(\alpha)$
1.15	6.447	15.678	19.451	31.150	32.903	46.851	47.319	1
1.1	7.071	16.414	20.679	32.717	34.985	49.980	51.072	1
1.05	7.539	16.679	21.428	33.190	36.024	50.318	52.074	1
1.0	7.969	16.815	22.054	33.385	36.799	50.299	52.713	1
0.95	8.377	16.880	22.611	33.442	37.440	50.158	53.228	1
0.9	8.772	16.897	23.122	33.417	38.002	49.962	53.682	0.999 7
0.85	9.156	16.881	23.600	33.340	38.513	49.736	54.101	1
0.8	9.531	16.839	24.054	33.227	38.988	49.491	54.499	0.999 9

表 2 GA 在调制度 0.8~1.15 的开关角度

Table 2 GA switch angle between modulation 0.8 to 1.15

$m$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$f(\alpha)$
1.15	6.140	14.738	18.141	25.845	27.017	32.625	33.873	0.998 8
1.1	6.688	16.509	20.552	25.523	26.726	46.231	46.785	0.968 4
1.05	6.908	16.485	20.728	31.183	34.062	52.970	53.662	0.993 2
1.0	6.070	14.297	18.229	28.264	31.215	36.595	36.976	0.972 9
0.95	8.294	16.891	22.284	34.042	37.610	50.865	53.929	0.997 9
0.9	8.966	17.000	22.827	33.297	37.506	50.250	54.009	0.998 6
0.85	7.179	15.964	22.857	30.965	36.715	45.178	48.016	0.971 1
0.8	9.408	17.501	24.234	33.003	38.543	51.285	55.544	0.986 9

通过表 1 和表 2 的比较可知, DE 得出的适应度函数值  $f(\alpha)$  可为 1, 均大于 GA 得到的适应度函数值, 说明 DE 的计算精度更高, 对基波和 5、7、11、13、17、19 次谐波的控制更加精准, 具有更好的消谐能力。表 3 给出了 DE 求解三电平逆变器的开关角度和 THD 值。

表 3 DE 求解三电平逆变器的开关角度

Table 3 Switching angle of three-level inverter solved by DE

$m$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	THD 相	THD 线
0.9	23.979	29.319	39.295	47.838	55.575	55.10(%)	45.04(%)

### 3 仿真研究

为了验证差分进化算法求解 SHEPWM 方程组的正确性, 利用 Matlab/Simulink 仿真软件进行研究。图 5—图 8 为  $m=0.9$  时相电压和线电压的波形及频谱分析, 给出基波电压幅值和谐波畸变率 (THD)。

直流电压源的电压为 200 V, 基波频率为 50 Hz;  $U_{an(1)}$ 、 $U_{ab(1)}$  分别为相电压和线电压的基波幅值;  $U_{an(n)}$ 、 $U_{ab(n)}$  分别为相电压和线电压的  $n$  次谐波幅值;  $U_{an(n)}/U_{an(1)}$ 、 $U_{ab(n)}/U_{ab(1)}$  分别为相电压、线电压的  $n$  次谐波与基波的比值。

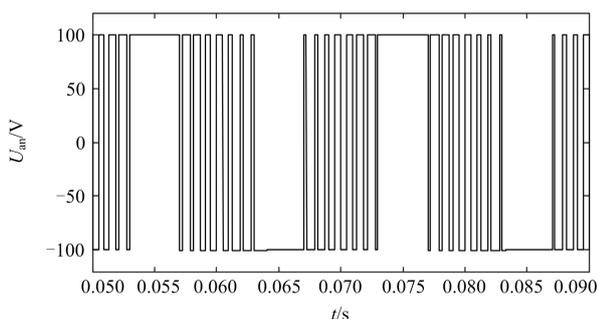


图 5 相电压仿真波形

Fig. 5 Phase voltage simulation waveform

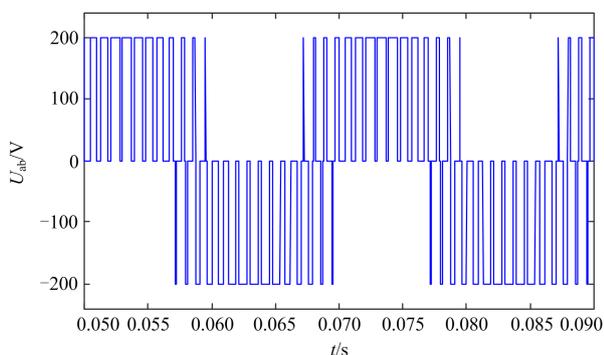


图 6 线电压仿真波形

Fig. 6 Line voltage simulation waveform

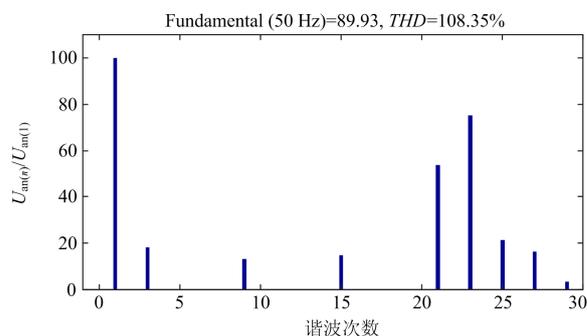


图 7 相电压仿真频谱

Fig. 7 Phase voltage simulation spectrum

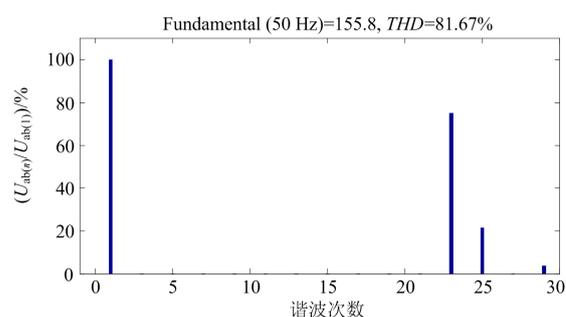


图 8 线电压仿真频谱

Fig. 8 Simulation spectrum of line voltage

从图 7 和图 8 的频谱分析可知, 相电压和线电压中的 5、7、11、13、17、19 次谐波基本消除, 线电压中 3 的倍数次谐波基本消除, 消除谐波的效果良好, 由此能证明基于差分进化算法求解 SHEPWM 方程组的解是可行的。

### 4 实验分析

本文搭建了两电平三相逆变器的实验平台, 使用 DSP(TMS320F28335)进行控制, 落木源 DA962D6 进行驱动, 开关管为 IGBT 英飞凌 BSM50GB120DN2, 直流侧电压 24 V, 5  $\Omega$  电阻和 5 mH 电感作为阻感性负载, 选取表 1 中  $m=0.9$  时的开关角度。图 9 为实验装置图, 实验结果如图 10—图 13 所示。

从图 12、图 13 的频谱分析可得, 相电压和线电压的 5、7、11、13、17、19 次谐波以及线电压的 3 的倍数次谐波均已消除, 其中纵坐标为电压的有效值 ( $V_{rms}$ ), 可知相电压基波电压有效值为 7.7 V, 线电压基波电压有效值为 13.1 V。由上文的基波调制度定义  $m = \frac{U_{m1}}{U_d/2}$  得, 理论值  $0.9 \times (24/2) / \sqrt{2} = 7.6$  与

实际结果 7.7 V 吻合,  $\sqrt{3} \times 0.9 \times (24/2) / \sqrt{2} = 13.2$  与实际结果 13.1 V 吻合, 实验结果验证了开关角求解

的正确性，能满足基波的需求和消除指定次的谐波，证明的差分进化算法在 SHEPWM 研究中的可行性。

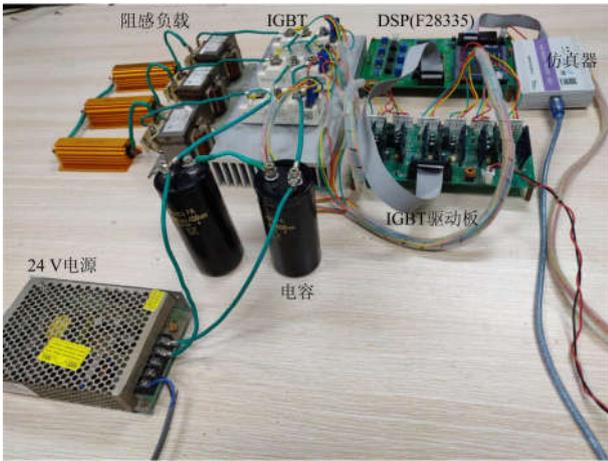


图 9 实验装置图

Fig. 9 Experimental device diagram

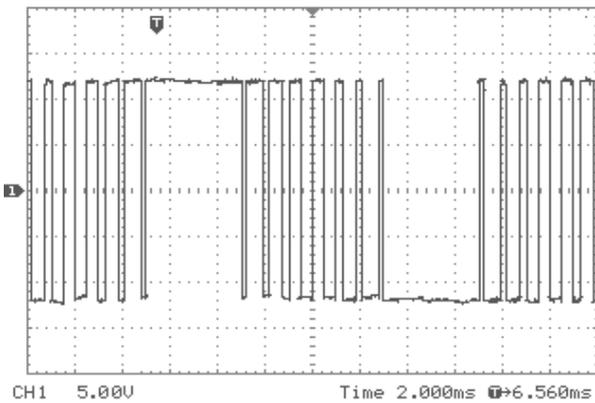


图 10 相电压实验波形

Fig. 10 Experimental waveform of phase voltage

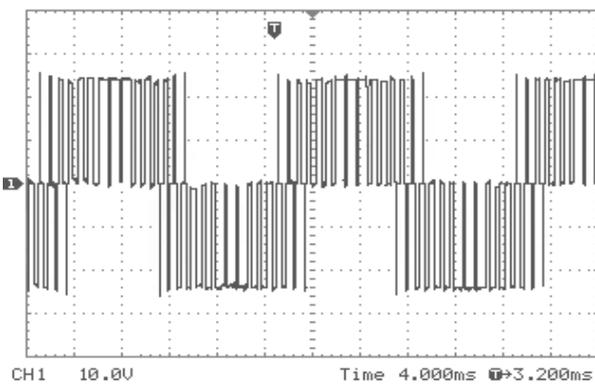


图 11 线电压实验波形

Fig. 11 Experimental waveform of line voltage

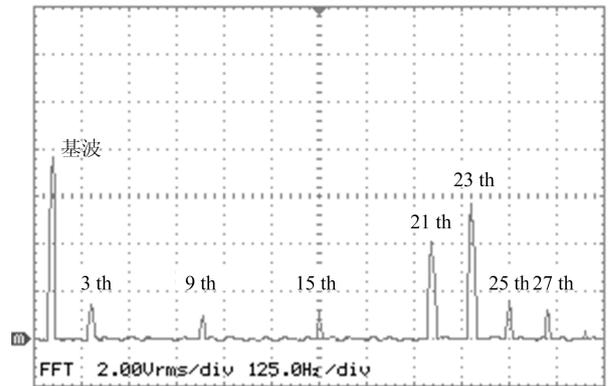


图 12 相电压实验频谱

Fig. 12 Experimental spectrum of phase voltage

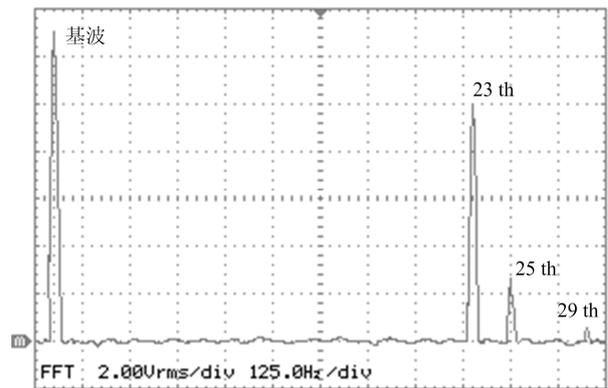


图 13 线电压实验频谱

Fig. 13 Experimental spectrum of line voltage

## 5 结论

本文利用差分进化算法对两电平逆变器 SHEPWM 方程组进行求解，差分进化算法无需初值，给出调制度 0 到 1.15 的开关角度的轨迹，和 GA 相比，DE 具有精度高，结构简单，易摆脱局部最优解的优势。仿真结果证明了差分进化算法求解 SHEPWM 方程组的准确性和可行性。实验中搭建了以 DSP(TMS320F28335)为核心的两电平逆变器实验平台，对基于差分进化算法的 SHEPWM 调制策略进行了验证，为 SHEPWM 控制方法的工程应用提供了一种优化方法。

## 参考文献

- [1] 张永昌, 赵争鸣, 张颖超, 等. 三电平变频调速系统 SVPWM 和 SHEPWM 混合调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 72-77.  
ZHANG Yongchang, ZHAO Zhengming, ZHANG Yingchao, et al. Study on the mixed modulation method

- of SVPWM and SHEPPWM for three-level frequency converter speed regulating system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 72-77.
- [2] 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. Study on specific harmonic elimination PWM method for three-level inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 11-15.
- [3] 叶满园, 肖云煌, 宋平岗, 等. 基于直流侧电压不均衡的 CHB 多电平逆变器 SHEPWM 控制技术[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(9): 64-73.  
YE Manyuan, XIAO Yunhuang, SONG Pinggang, et al. SHEPWM control technology for HB multilevel inverters based on unbalanced DC voltage[J]. Journal of Motor and Control, 2018, 22(9): 64-73.
- [4] 张晓华, 葛兴来. 基于 SHEPWM 的三电平 NPC 逆变器中点电位平衡控制算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 144-150.  
ZHANG Xiaohua, GE Xinglai. Neutral point potential balance control algorithms for three-level NPC inverters based on SHEPPWM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 144-150.
- [5] 胡存刚, 胡军, 陈权, 等. 基于特定谐波消除 PWM 的三电平有源中点钳位逆变器共模电压抑制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 93-102.  
HU Cungang, HU Jun, CHEN Quan, et al. Common-mode voltage suppression method for three-level active neutral-point clamped inverters based on specific harmonic elimination[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 93-102.
- [6] XIA Y, GOU B, XU Y. A new ensemble-based classifier for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase PWM converter[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 364-372. DOI: 10.1186/s41601-018-0109-x.
- [7] 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. Solution of SHEPWM nonlinear equations for three-level inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 62-68.
- [8] 刘闯, 田孝铜, 曹亚华, 等. 基于随机牛顿法(SNM)的级联多电平逆变器特定谐波消除[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 96-102.  
LIU Chuang, TIAN Xiaotong, CAO Yahua, et al. Specific harmonic elimination of cascaded multilevel inverters based on stochastic Newton method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 96-102.
- [9] 谢运祥, 周炼, 彭宏. 逆变器消谐 PWM 模型的同伦算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 24-27.  
XIE Yunxiang, ZHOU Lian, PENG Hong. Homotopy algorithm for harmonic elimination PWM model of inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 24-27.
- [10] 郑春芳, 张波. 基于 Walsh 变换的逆变器 SHEPWM 技术[J]. 电工技术学报, 2005, 25(5): 65-71.  
ZHENG Chunfang, ZHANG Bo. SHEPWM technology of inverter based on Walsh transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 25(5): 65-71.
- [11] 蔡鸿. 多电平逆变器 SHEPWM 若干问题研究[D]. 上海: 华东交通大学, 2015.  
CAI Hong. Research on several problems of SHEPWM for multilevel inverters[D]. Shanghai: East China Jiaotong University, 2015.
- [12] 郑春芳, 张波. 吴方法在电力电子逆变器消谐技术中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 40-45.  
ZHENG Chunfang, ZHANG Bo. Application of Wu elimination method to harmonic elimination techniques[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 40-45.
- [13] YANG K, YUAN Z, YUAN R, et al. A Groebner bases theory-based method for selective harmonic elimination[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 6581-6592.
- [14] CHIASSON J N, TOLBERT L M, MCKENZIE K J, et al. Control of a multilevel converter using resultant theory[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(3): 345-354.
- [15] 叶满园, 李宋, 蔡鸿. 三电平逆变器 SHEPWM 技术的所有解问题[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(10): 18-21, 29.  
YE Manyuan, LI Song, CAI Hong. All solutions of the three-level inverter SHEPWM technology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(10): 18-21, 29.

- [16] 王群京, 胡存刚, 李国丽. 基于遗传算法的三电平逆变器 SHEPWM 方法的研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(8): 848-852.  
WANG Qunjing, HU Cungang, LI Guoli. Study on SHEPWM method of three-level inverter based on genetic algorithm[J]. Journal of China University of Science and Technology, 2009, 39(8): 848-852.
- [17] 周卫庆, 王顺, 李辉, 等. 一种基于遗传算法的热工数据校正方法[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 45-50.  
ZHOU Weiqing, WANG Shun, LI Hui, et al. A method of thermal data correction based on genetic algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(3): 45-50.
- [18] 温继芳. 基于改进粒子群算法的逆变器 SHEPWM 研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
WEN Jifang. Research on inverter SHEPWM based on improved particle swarm optimization[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [19] 韩祥鹏. T 型三电平逆变器 PWM 调制策略的研究[D]. 上海: 华东交通大学, 2018.  
HAN Xiangpeng. Study on PWM modulation strategy of T-type three-level inverters[D]. Shanghai: East China Jiaotong University, 2018.
- [20] KAVOUSI A, VAHIDI B, SALEHI R, et al. Application of the bee algorithm for selective harmonic elimination strategy in multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1689-1696.
- [21] 夏秋实. 基于智能优化算法的三电平逆变器 SHEPWM 调制方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.  
XIA Qiushi. Research on SHEPWM modulation method of three-level inverter based on intelligent optimization algorithm[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- [22] 付光杰, 贾雨桐. 混沌蚁群算法在三电平逆变器 SHEPWM 策略中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2018, 45(8): 617-620, 656.  
FU Guangjie, JIA Yutong. Application of chaotic ant colony algorithm in SHEPWM strategy of three-level inverters[J]. Chemical Automation and Instrumentation, 2018, 45(8): 617-620, 656.
- [23] STORN R, PRICE K. Differential evolution — a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. J Glob Optim, 1997, 11(4): 341-359.
- [24] 盛四清, 陈玉良, 张晶晶. 基于差分进化人工蜂群算法的光伏最大功率跟踪策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 23-29.  
SHENG Siqing, CHEN Yuliang, ZHANG Jingjing. Study on maximum power tracking strategy of photovoltaic based on differential evolution artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 23-29.
- [25] 张新萍, 张孝远, 刘杰. 基于差分进化算法的模糊核聚类算法及其在故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 102-106.  
ZHANG Xinping, ZHANG Xiaoyuan, LIU Jie. Fuzzy kernel clustering algorithm based on differential evolution algorithm and its application in fault diagnosis [J]. Power system protection and control, 2014, 42(17): 102-106.

收稿日期: 2018-11-05; 修回日期: 2019-02-26

作者简介:

李国华(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统谐波抑制与无功补偿等; E-mail: 26480073@qq.com

李文悍(1992—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力电子在电能质量治理中的应用。E-mail: 616952223@qq.com

(编辑 张爱琴)