

基于 MPSO 算法的特定谐波消除技术研究

曾庆宏

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要:目的 对于级联 H 桥逆变器的调制, 特定谐波消除技术具有开关损耗小, 能够消除特定次谐波, 变换效率高等优点, 但传统粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)在求解消谐方程组时收敛性差, 容易局部最优, 提出一种改进的粒子群优化算法(Modified Particle Swarm Optimization, MPSO)。方法 该算法用非线性惯性权重取代线性变化的惯性权重, 并在非线性惯性权重引入混沌映射以产生随机性更好的随机量, 新的惯性权重可权衡粒子的全局搜索和局部搜索能力, 使粒子具有后期跳出局部最优的能力; 另外, 该算法优化了速度和位置的更新机制, 以增强算法的收敛速度, 并保证粒子在后期仍具有一定种群多样性优势。结果 根据级联 H 桥型逆变器的非线性消谐方程组, 在保证输出电压基波的前提下最大化降低目标次谐波, 建立适应度函数, 将 MPSO 算法应用于级联 H 桥型逆变器的 SHEPWM, 能够在 1~1.2 的调制度范围内得到优化的开关角, 提高收敛精度和求解成功率。通过七电平 CHB 逆变器仿真平台验证了 MPSO 算法所求的优化开关角能够有效地消除 5 次、7 次谐波。结论 通过使用非线性惯性权重和优化粒子的速度和位置更新机制, 可以增加开关角求解成功率, 所得解可以有效地消除目标次谐波。

关键词:特定谐波消除; 开关角; 消谐方程组; 惯性权重; 收敛精度

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0001.006

Research on Selective Harmonic Elimination Technology Based on MPSO Algorithm

ZENG Qinghong

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China

Abstract: Objective Regarding the modulation of cascaded H-bridge inverter, the selective harmonic elimination technology has the advantages of low switching loss, elimination of specific subharmonics, and high transformation efficiency. However, the traditional particle swarm optimization (PSO) algorithm has poor convergence and is easy to be locally optimized when solving harmonic elimination equations. A modified particle swarm optimization (MPSO) algorithm was proposed. **Methods** In this algorithm, the nonlinear inertia weight was used to replace the linear inertia weight, and chaotic mapping was introduced into the nonlinear inertia weight to produce the random quantity with better randomness. The new inertia weight can balance the global search ability and local search ability of particles, so that particles have the ability to jump out of the local optimum in the late stage. In addition, the algorithm optimized the updating mechanism of speed and position to enhance the convergence speed of the algorithm and to ensure that the particles still have a certain population diversity advantage in the later stage. **Results** According to the nonlinear harmonic elimination equations of cascaded H-bridge inverter, the fitness function was established to ensure the maximum reduction of the target harmonic under the premise of the output voltage base wave. When applied to SHEPWM of cascaded H-bridge inverter, MPSO algorithm obtained optimized switching angle in the range of 1~1.2 adjustment system. Compared with the PSO

收稿日期:2022-11-27 **修回日期:**2023-05-18 **文章编号:**1672-058X(2024)01-0045-08

作者简介:曾庆宏(1998—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,从事电力电子技术研究。

引用格式:曾庆宏.基于 MPSO 算法的特定谐波消除技术研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(1):45—52.

ZENG Qinghong. Research on selective harmonic elimination technology based on MPSO algorithm[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(1): 45—52.

algorithm, MPSO can improve the convergence accuracy and solving success rate. The seven-level CHB inverter simulation platform verified that the optimized switching angle obtained by MPSO algorithm can effectively eliminate the 5th and 7th harmonics. **Conclusion** By using the nonlinear inertia weight, optimizing the velocity of particles, and applying position update mechanism of particles, the success rate of switch angle solution can be increased, and the obtained solution can effectively eliminate the target subharmonics.

Keywords: selective harmonic elimination; switching angles; harmonic elimination equations; inertia weight; convergence precision

1 引言

随着非线性负荷不断涌入电力系统,电网中谐波和无功问题日益严重。多电平逆变器(Multilevel Inverters, MLIs)^[1]由于输出电压谐波含量低、电压应力低、输出侧不需要变压器等优点被广泛用于电力系统的有源滤波和无功补偿等应用场合,可以有效提高电能的生产、传输和利用效率^[2-3]。

目前,传统的 MLIs 主要有二极管箝位型多电平逆变器(Diode-Clamped MLI, DCMLI)、飞跨电容型多电平逆变器(Flying Capacitors MLI, FCMLI)和级联 H 桥型多电平逆变器(Cascaded H-bridge MLI, CHBMLI)等拓扑^[4-6]。其中,CHBMLI 相较于 DCMLI 和 FCMLI 这类钳位型拓扑,由于不需要考虑箝位电压平衡问题,结构简单,得到了广泛关注。CHBMLI 的拓扑在直流侧各单元使用相互独立的直流电源,因此可以作为交流电网和分布式发电的理想接口。在 CHBMLI 中,传统正弦波脉冲宽度调制(Pulse-Width Modulation, PWM)技术一般要求开关管工作在高频情况下,在应用于高压大功率场合时会带来较高的开关损耗。相比于 PWM 技术,低频调制技术一般控制开关管工作在基频左右,使变换器具有更高的能量转换效率,因此特别适用于高压大功率应用场合^[7]。

作为低频调制技术中的一种,特定谐波消除技术(Selective Harmonic Eliminate PWM, SHEPWM)可以有效地消除特定次谐波,提高电能质量^[8]。在 SHEPWM 技术中,需要求解复杂的非线性消谐方程组。常见的求解方法有数值法、代数法和智能算法^[9-11]。其中数值法包括牛顿拉夫逊迭代法、梯度优化算法等,这类算法如果给定了准确的初值,它们就可以快速并准确地收敛于最优解。然而它们极度依赖初值,在没有一组准确初值的情况下,很容易造成发散,而初值的选择本身就是难题。文献[12]针对多电平 SHEPWM 消谐方程组,在牛顿法的基础上提出一种新的初值求解方法,该方法通过正弦脉宽调制技术的三角载波与正弦波之交点作为牛顿法的初值,在电平数较少的情况下使牛顿法能够得到有效的解,然而该方法只能通过仿真在线选取初值。代数法是将非线性方程组转换为等价

的代数多项式方程组,如吴方法、Walsh 变换法等。这类方法虽然不怎么依赖初值,但转化过程复杂,计算量非常庞大。

随着人工智能的发展,智能算法也被学者们应用于非线性方程组的求解。智能算法在极值选优时,几乎不依赖初值,常见有遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、蜂群算法(Bee Algorithm, BA)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)等^[14-15]。智能算法利用目标函数建立适应度函数,通过适应度值来评价算法所得解的优劣,适应度值越接近于目标值说明解越接近于真实解。文献[12]针对 CHB 多电平逆变器采用 GA 求解非线性消谐方程组,在五电平 CHB 逆变器上实现了 SHEPWM 技术,但该方法存在繁琐的变异和交叉操作,收敛速度慢,收敛精度差。文献[13]以七电平逆变器的非线性消谐方程组为研究对象,提出了一种新型的 BA 算法,在 GA 算法的基础上提高了收敛精度,加强了前期的收敛度,但该算法在某些调制度下存在无解的情况。文献[15]采用 PSO 算法对目标函数进行优化,该算法原理简单,实现容易,但在迭代后期由于失去了粒子多样性,易收敛于局部最优。

针对 PSO 算法的不足,本文以三单元 CHB 逆变器为研究对象,对 PSO 算法做出改进,引入混沌映射的非线性惯性权重,并对速度和位置更新机制进行改进。改进的粒子群优化算法(Modified PSO, MPSO)提高了收敛性,并通过了 Matlab/Simulink 仿真验证。

2 CHBMLI 的阶梯波 SHEPWM 技术

由于三相系统的对称性,这里只以一相为例进行分析。图 1 为单相 CHBMLI 的一般电路拓扑结构,每相由 s 个子模块单元组成,所有子模块为单相全桥的变换器,每个子模块直流侧均为隔离直流电源进行供电,每个子模块均有 4 个开关管: S_{i1} 、 S_{i2} 、 S_{i3} 和 S_{i4} ($i=1, 2, \dots, s$)。通过不同开关状态的组合,各个模块在交流侧均可输出 $+E$ 、 0 和 $-E$ 3 种电平,逆变器输出相电压为各个模块输出电压之间的累加,则 s 个单元最多可输出 $2s+1$ 个电平。图 2 给出了 CHB 型逆变器的七电平输出电压波形,该逆变器具有 3 个单元,每个单元交流测输出电压分别为 u_1 、 u_2 和 u_3 , u_{aN} 为逆变器输出的相电

压。由于输出电压具有正负半周对称性,图中只给出了正半周期的波形情况。由于交流测总输出为各单元输出的累加,则图 2 中的逆变器输出相电压 u_{aN} 可表示为

$$u_{aN} = u_1 + u_2 + u_3$$

而 u_{aN} 傅里叶变换的一般表达式为

$$u_{aN} = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (1)$$

式(1)中: n 为谐波次数, ω 为基波角频率, a_n 和 b_n 分别为傅里叶变换的余弦和正弦参数。

在相内各单元输出相同的情况下,逆变器输出相电压 u_{aN} 波形具有 1/2 周期对称,同时也呈 1/4 周期对称,因此式(1)中的 a_n 为零。此时,式(1)可改写为

$$u_{aN} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t)$$

而 b_n 可表示为

$$b_n = \frac{4U_d}{n\pi} \sum_{i=1}^s ((-Q_i)^{i+1} \cos(n\alpha_i)) \quad (2)$$

式(2)中: U_d 为子模块直流侧的期望电压,而 $Q_i = \frac{U_{di}}{U_d}$, U_{di} 为子模块直流侧电源电压, α_i 为谐波所对应的开关角。

将式(2)展开可得:

$$b_n = \frac{4U_d}{n\pi} [Q_1 \cos(n\alpha_1) \pm Q_2 \cos(n\alpha_2) \pm \dots \pm Q_s \cos(n\alpha_s)]$$

其中:“+”和“-”分别表示电压脉冲序列的上升沿和下降沿。

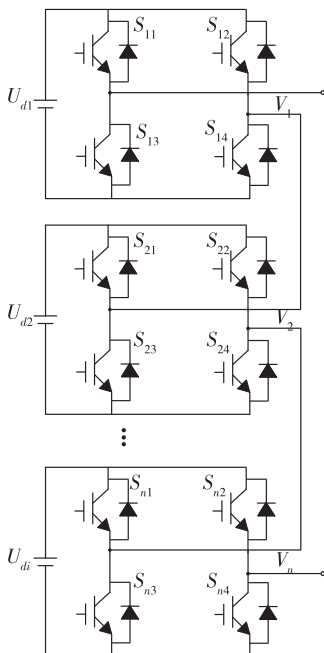


图 1 CHBMLI 的电路结构

Fig. 1 Circuit structure of CHBMLI

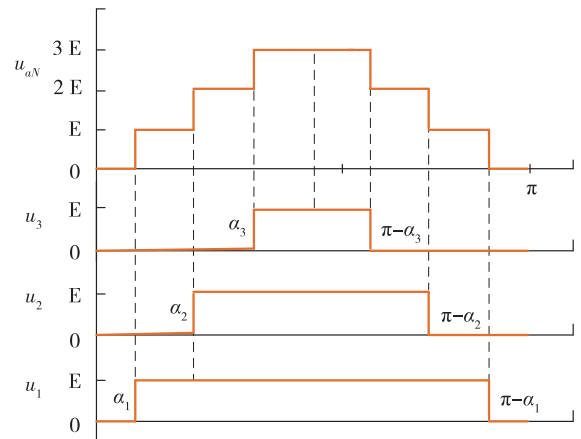


图 2 CHB 型逆变器七电平输出电压波形

Fig. 2 Seven-level output voltage waveforms of CHB inverter

SHEPWM 技术是通过将目标次谐波的参数降低为零,从而实现谐波的消除。在阶梯波调制中,各模块在对应的开关角处进行输出电压的跳变,最后体现于输出相电压脉冲序列的上升沿或下降沿。SHEPWM 应用于式(1)中就是将目标次谐波项的参数 a_n 和 b_n 的值降到零,使得相应的谐波得到消除。由于 a_n 为零,只要令 b_n 的值为零,就可以建立非线性消谐方程组,对于 s 个单元的阶梯波 SHEPWM,可建立 s 个非线性方程,消除 $s-1$ 个谐波。图 2 中, u_{aN} 前 1/4 周期的电压波形具有 3 个上升沿,对应应有 3 个有效开关角 (α_1 , α_2 和 α_3),它们须满足式(3)所示约束关系。

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

对于 3 个有效开关角,可以得到基波和 5、7 次谐波的非线性方程组,令基波项的参数为调制比,谐波项的参数幅值令为零,可得:

$$\begin{cases} V_1 = [\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3)]/3 - M \\ V_5 = \cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) = 0 \\ V_7 = \cos(7\alpha_1) + \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: M 为调制比,且可被定义为

$$M = \frac{\pi U_{fun}}{4sU_d}$$

其中: U_{fun} 为输出电压的基波幅值。

通过求解式(4)所示的消谐方程组得到相应的开关角度,即可消除 5 次和 7 次谐波。然而,该消谐方程组为非线性的超越方程组,不易求解。

3 PSO 算法的改进

3.1 PSO 算法

PSO 算法最初是由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年

提出的一种种群优化算法,用以求解复杂的优化问题。在 PSO 算法中,种群中的每个成员都被称为粒子,每个粒子的位置都代表目标优化问题的一个潜在解。在每一代中,粒子都朝着最优解的方法移动,并与相邻粒子或种群整体共享信息。每个粒子在种群中具有位置和速度的信息,并受到个体最优粒子 P_{best} 和全局最优粒子 G_{best} 的影响。基于 P_{best} 和 G_{best} ,粒子 i 根据式(5)更新 $t+1$ 代 j 方向上速度,根据式(6)更新位置信息。

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t \times w^{t+1} + [c_1 \times r_{1j}^t \times (P_{\text{Best},i}^t - x_{ij}^t)] + [c_2 \times r_{2j}^t \times (G_{\text{Best}}^t - x_{ij}^t)] \quad (5)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (6)$$

式(5)、式(6)中: j 表示种群的粒子维数, t 表示种群的迭代数, v_{ij}^t 表示粒子 i 在 t 迭代中的飞行速度, x_{ij}^t 表示粒子 i 在 t 次迭代中的当前位置, $P_{\text{Best},i}^t$ 为粒子 i 的个体最优位置, w^{t+1} 表示 t 迭代中惯性权重, r_{1j}^t 和 r_{2j}^t 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数,常数 c_1 和 c_2 分别为个体和种群的加速度系数, w^{t+1} 为惯性权重,可表示为

$$w^{t+1} = w_{\text{max}} - \frac{(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})t}{\text{Iter}_{\text{max}}}$$

其中: w_{max} 和 w_{min} 分别为惯性权重的上限和下限, Iter_{max} 为算法的最大迭代次数。

3.2 MPSO 算法

PSO 算法在粒子迭代初期通过初始化将所有粒子分散到搜索空间中,然后使各个粒子朝着真解的位置移动。因为迭代初期各个粒子分布较散,粒子种群具有很好的多样性,算法可将种群多样性上的优势转化为全局选优的能力,但随着粒子接近适应度函数的局部最优值,就会失去本来的种群多样性优势,随之粒子的迭代速度骤降,很容易收敛于次优解,造成早熟现象。这种现象在求解多电平 SHEPWM 消谐方程组时尤为常见。为此,本文针对求解 CHB 多电平逆变器的 SHEPWM 消谐方程组,提出一种自适应 MPSO 算法。

3.2.1 惯性权重的优化

在 PSO 算法中,改变粒子的飞行速度必须调整惯性权重 w 。 w 可以维持全局搜索能力和局部搜索能力之间的平衡,还决定了粒子未来的移动方向。在传统的 PSO 算法中,一般采用线性减小的惯性权重。在线性惯性权重影响下,粒子由于分布比较广,有利于朝着最优方向移动,然而该方法会使得粒子在接近最佳位置时反复振荡,从而增加算法收敛时间。相比于线性惯性权重,非线性惯性权重具有更优的性能。

混沌作为一种非线性映射方法,它产生的随机数具有很好的无序性和随机性,在进化算法领域取得了广泛的应用。本文利用混沌,通过式(7)产生随机数,并引入到非线性惯性权重中,惯性权重由式(8)计算得到。

$$r(t+1) = 4r(t)(1-r(t)) \quad (7)$$

式(7)中: $r(0)$ 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数。

$$w = r(t)w_{\text{min}} + \frac{(w_{\text{max}} - w_{\text{min}})t}{\text{Iter}_{\text{max}}} \quad (8)$$

式(8)中: w_{min} 为 0.4 , w_{max} 为 0.9 。

图 3 给出了在 1 000 次迭代过程中,改进后的非线性惯性权重随迭代次数变化的趋势图。由图 3 可知:该非线性惯性权重整体呈增大趋势,相邻代数之间存在一定的随机波动。非线性惯性权重在全局搜索能力和局部搜索能力之间做了平衡,非线性惯性权重的波动使粒子在迭代初期时也能够具有不小的惯性权重,增加粒子前期的搜索速度,同时后期也会获得比较大的惯性权重,从而使粒子具有跳出局部极值的能力。

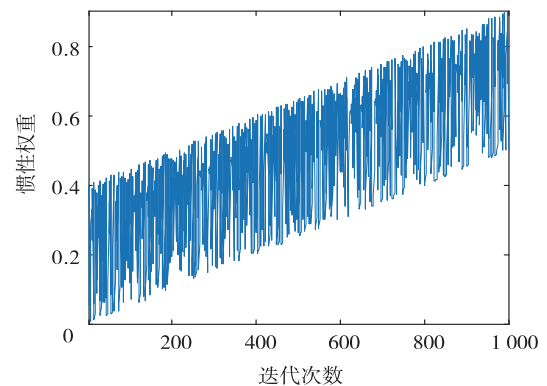


图 3 惯性权重随迭代次数变化图

Fig. 3 Graph of the change of inertia weight with the number of iterations

3.2.2 速度和位置更新机制优化

在 PSO 算法每次迭代过程中,种群的每个粒子都要更新一次自身的速度和位置,而粒子的速度和位置信息是根据上一代粒子的信息来更新的,包括个体速度 v ,个体最优 P_{best} 和种群全局最优 G_{best} 。根据前面的分析,在 PSO 算法的迭代后期,种群的大部分粒子都接近于最优粒子,使得粒子种群失去了种群的多样性优势。MPSO 算法为了保证粒子种群在迭代后期仍保持一定的种群多样性,避免陷入局部最优,对 PSO 算法的速度和位置更新机制进行了优化。

式(5)所示的速度更新公式共有 3 项:第一项包含了上一代粒子的速度信息,第二项包含了上一代个体所取的最优粒子的位置信息,第三项包含了上一代种

群最优粒子的位置信息。在式(5)第二项中,粒子继承了个体自身的的信息,而缺乏与周围粒子的信息交流。为此,MPSO 算法在速度更新的个体更新部分,引入随机相邻粒子 U_{i-1} 和 U_{i+1} , U_{best} 为相邻两个粒子中最优的,将 U 和当前个体最优粒子进行比较作为新的个体,参考粒子 R_{best} , R_{best} 的选择由式(9)得到,该操作有利于个体粒子与其他粒子之间的交流。

$$R_{best_i}^t = \begin{cases} U_{best_i}^t, & f(U_{best_i}^t) \leq f(P_{best_i}^t) \\ P_{best_i}^t, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: $P_{best_i}^t$ 为 t 代粒子 i 的个体最优粒子, $U_{best_i}^t$ 为 $P_{best_i}^t$ 与随机粒子之间的局部最优粒子。

对于速度更新公式(5)中第三项与种群交流的信息, G_{best} 表示了种群中最好的粒子,速度更新在第三项中向最优粒子学习。在社会种群,社会不仅受最优个体的影响,也受社会主流声音的影响。为了模拟社会现象,MPSO 算法在速度更新第三部分采用种群平均粒子 M_{best}^t 替代 G_{best}^t , M 由式(10)生成。

$$M_{best}^t = \text{mean}(P_{best_1}^t, P_{best_2}^t, \dots, P_{best_N}^t) \quad (10)$$

式(10)中, N 为种群规模, $P_{best_i}^t$ 为 t 代第 i 个粒子的最优粒子的位置。

根据上述分析,MPSO 算法的粒子速度更新公式可表示为式(11):

$$V_i^{t+1} = w^t v_i^t + r_1 c_1 \times (R_{best_i}^t - X_{ij}^t) + r_2 c_2 \times (M_{best}^t - X_{ij}^t) \quad (11)$$

式(11)中, r_1 和 r_2 为 $0 \sim 1$ 之间的随机量, $c_1 = c_2 = 2$ 。

在粒子位置更新公式(6)中,不包含惯性权重的信息,在 MPSO 算法中将非线性惯性权重的变化引入到速度更新公式(12)中。

$$X_i^{t+1} = w \times X_i^t + (1-w) \times V_i^{t+1} \quad (12)$$

综合上述分析,MPSO 算法的流程可如图 4 所示。MPSO 算法开始时,先对种群进行初始化,包括种群规模、维度以及粒子位置和速度等信息;然后计算出所有粒子的适应度,根据式(13)和式(14)更新个体最优 P_{best} 和种群最优粒子 G_{best} ;然后进入迭代循环,如果当前迭代次数 t 小于最大迭代次数 $Iter_{max}$,一直进行循环内的命令:在循环内,每次迭代中,要根据当前迭代次数更新非线性惯性权重,然后利用式(11)和式(12)更新当前粒子的速度和位置,并计算所有粒子的适应度,接着根据式(13)和式(14)更新个体最优 P_{best} 和种群最优粒子 G_{best} ;至此,在当前迭代次数内,循环的内容结束;最后,判断是否满足终止条件,若满足,则存储开关

角并结束迭代过程,反之,重复循环内的操作,直到满足终止条件。

$$P_{best}^{t+1} = \begin{cases} X_i^t, & f(X_i^t) \leq f(P_{best}^t) \\ P_{best}^t, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$G_{best}^{t+1} = \begin{cases} P_i^t, & f(P_i^t) \leq f(G_{best}^t) \\ G_{best}^t, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

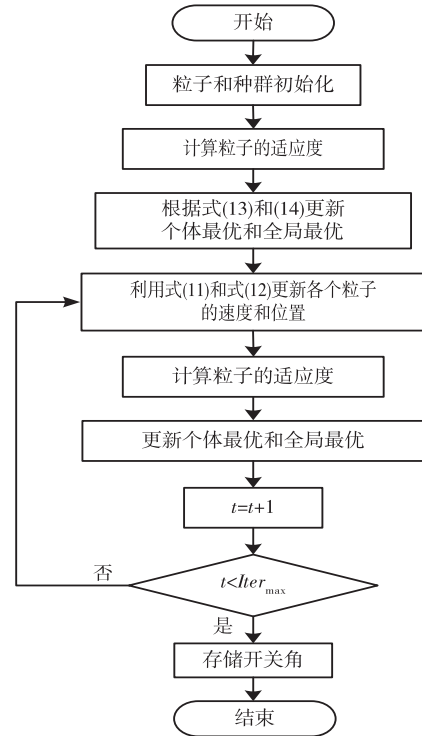


图 4 MPSO 流程图

Fig. 4 Flow diagram of MPSO

3.2.3 MPSO 算法在 SHEPWM 技术中的实现

MSPO 算法根据适应度函数决定其对当前种群粒子的好坏,合适的适应度函数决定了粒子收敛的方向和准确性。因此,将 MPSO 算法应用于阶梯波 SHEPWM,需要建立一个合适的适应度函数。然而,SHEPWM 技术在应用于 CHB 多电平逆变器时,在某些调制度下,无法有效消除目标次谐波。因此,在这种情况下,至少在期望输出电平的基础上,保证基波成分,则 SHEPWM 消谐方程组的适应度评价函数如式(15)所示,其满足式(3)所示的约束关系。

$$f = \min \left\{ \left(100 \frac{V_1^* - V_1}{V_1^*} \right)^4 + \sum_{i=2}^s \frac{1}{h_i} \left(50 \frac{V_{h_i}}{V_1} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

式(15)中: V_1^* 是输出电压中期望基波电压; h_i 是目标消除的奇次谐波次数,当 CHB 逆变器为三单元级联时,由于三相对称系统会消除 3 及 3 的倍数次谐波,则 $h_2 = 5, h_3 = 7$ 。另外,式(15)中第一项部分是保持输出基波

电压 V_1 与期望基波电压 V_1^* 之间误差在 1% 以内,并通过 4 次幂进行误差矫正;第二项部分是目标次谐波的限制,将目标次谐波限制在基波的 2% 以内,并通过 2 次幂进行矫正。

4 实验验证与仿真分析

图 5 给出了利用 MPSO 算法求解七电平 CHB 逆变器的 SHEPWM 消谐方程所得 3 个开关角在调制度 0~1.2 m 范围内的分布情况。横轴为调制度,纵轴为开关角。

由图 5 可知:该方法可以在 0~1.2 m 的宽调制范围内有解,且所求的开关角在调制度变化时基本可以保持线性变化,这可以保证逆变器在调制度发生细微改变时,输出电压不会发生剧烈变化。

图 6 给出了 MPSO 在迭代 100 次的情况下适应度值的变化情况。可见该方法下粒子由于种群多样性的优势向解的方向迅速收敛,适应度值不断向 0 靠近。根据图 6 中的局部放大图可知:在第 7 代左右已经到达一个很小的适应度了,说明该方法具有很好的全局搜索能力。

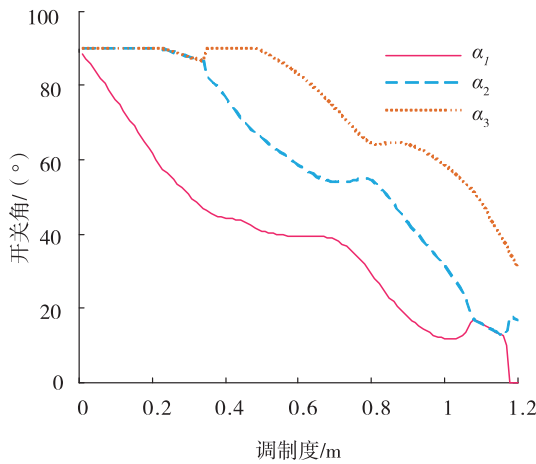


图 5 开关角分布情况

Fig. 5 Distribution of switching angles

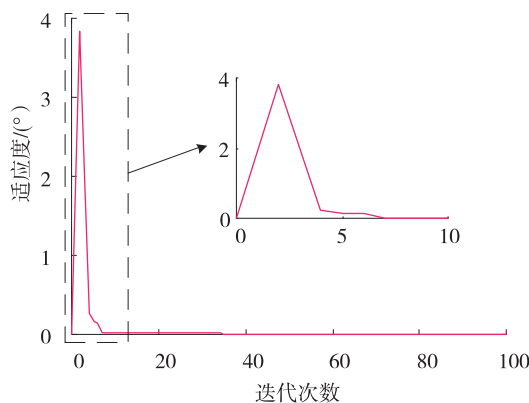


图 6 适应度的变化情况

Fig. 6 The changes of fitness

为了评估所提 MPSO 算法在求解 SHEPWM 消谐方程组方面的优越性能,下面将 MPSO 算法与 PSO 算法进行对比,两者的基本参数完全一致,具体设计如表 1 所示。

表 2 给出了基本 PSO 算法与 MPSO 算法在求解目标 SHEPWM 消谐方程组的结果比较情况,令适应度值小于 $1e-10$ 的结果视为求解成功。由表 2 可知:MPSO 能够达到更优的适应度值,在运行 500 次后,求解成功率可以达到 88.6%,相对于 PSO 算法提高了 15.2%。

表 1 参数说明

Table 1 Specification of parameters

最大迭代次数 $Iter_{max}$	100
种群规模 N	100
粒子维度 D_{im}	3
惯性权重最大值 w_{max}	0.9
惯性权重最小值 w_{min}	0.4
运行次数	500

表 2 不同方法之间的比较

Table 2 Comparison of different methods

算 法	最优适应度 f_{min}	成功率/%
PSO	$6.83e-44$	73.4
MPSO	$3.34e-51$	88.6

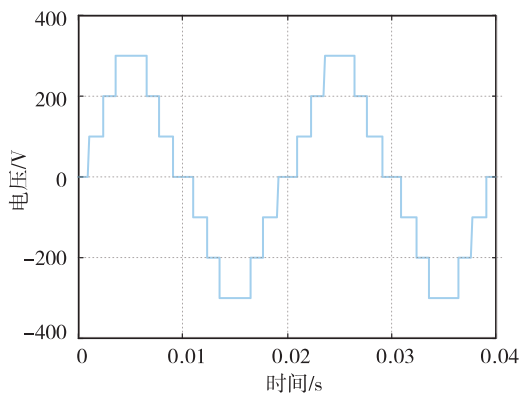
为了验证 MPSO 算法求解 SHEPWM 方程组的正确性,在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建了三单元七电平的 CHB 逆变器的仿真平台,仿真参数设计如表 3 所示,开关角取自图 5 中的数据。

表 3 仿真参数

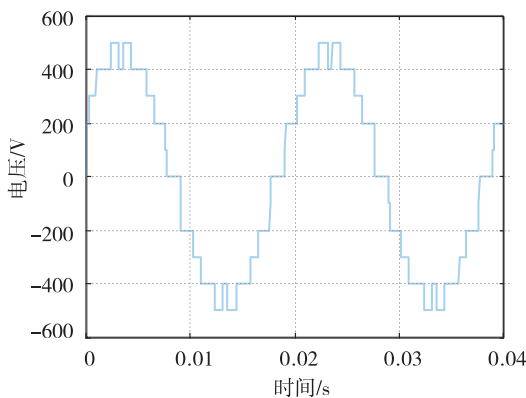
Table 3 Simulation parameters

相关参数	数值
直流电源电压 U_{dc}/V	100
调制度/m	0.91
基波频率 f/Hz	50
开关角 α_1, α_2 和 $\alpha_3/(\circ)$	16.659 3, 41.855 3 和 63.814 7

图 7 给出了调制度 $m=0.91$ m 时应用 MPSO 所得开关角的输出电压情况,其中图 7(a) 为相电压波形,图 7(b) 为线电压波形。由图 7 可知:逆变器工作在低频情况下,有利于降低开关损耗,在 $m=0.91$ m 时,逆变器输出了七电平的相电压波形和十一电平的线电压波形。



(a) 相电压波形

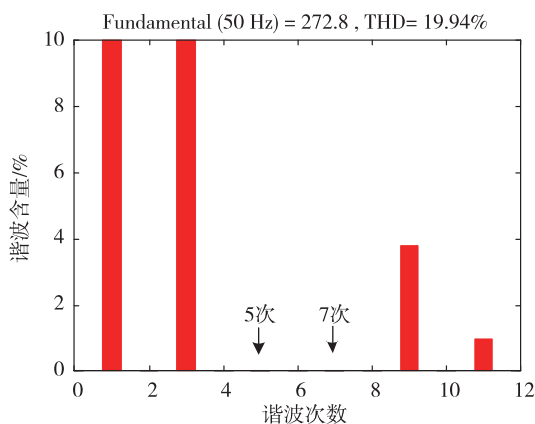


(b) 线电压波形

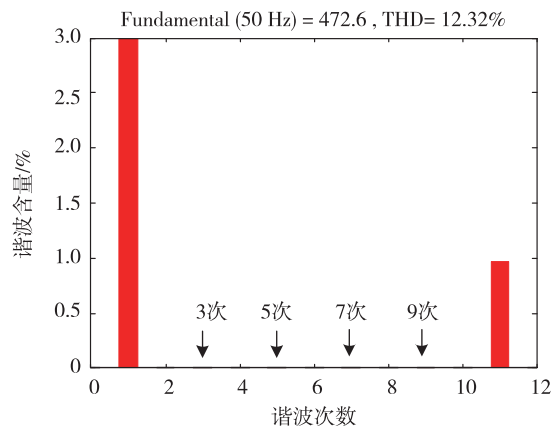
图 7 逆变器输出电压的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of inverter output voltage

图 8 给出了逆变器输出电压的谐波分布情况,横轴为谐波次数,纵轴为谐波含量,图 8(a)为逆变器相电压的频谱分析,图 8(b)为线电压的频谱分析。由图 8 可知,在相电压 u_{aV} 的频谱分布中只有奇数次谐波,且目标次谐波 5 次和 7 次得到了有效地消除;由于三相系统的对称性,线电压 u_{ab} 中的 3 的倍数次奇次谐波 3 次和 9 次也得了消除,在线电压的频谱分布中最低次谐波为 11 次谐波。



(a) 相电压频谱分析



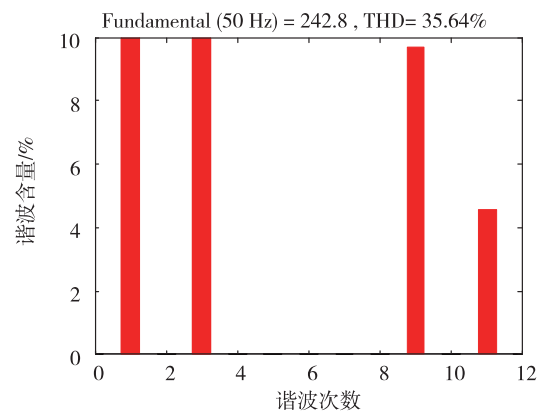
(b) 线电压频谱分析

图 8 $m=0.91$ m 时输出电压的 FFT 分析

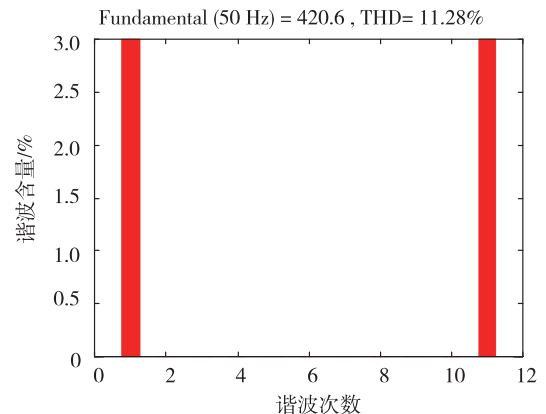
Fig. 8 FFT analysis of output voltage when $m=0.91$ m

为了进一步验证其他调制度开关角的有效性,这里又将调制度 $m=0.8$ m 的开关角组合代入三相 CHB 逆变器进行实验。 $m=0.8$ m 时, α_1 、 α_2 和 α_3 分别为 27.9389° 、 53.8062° 和 64.2432° 。

图 9 给出了 $m=0.8$ m 情况下逆变器输出电压的频谱分析情况。图 9(a)为逆变器相电压的频谱分析,图 9(b)为线电压的频谱分析。



(a) 相电压频谱分析



(b) 线电压频谱分析

图 9 $m=0.8$ m 时输出电压的 FFT 分析

Fig. 9 FFT analysis of output voltage when $m=0.8$ m

由图 9(a)可知:相电压 u_{aV} 的频谱中目标次谐波

5 次和 7 次得到了有效消除,最低次谐波是 3 次谐波。图 9(b)中的线电压 u_{ab} 的频谱中目标次谐波以及 3 的倍数次谐波也得到了消除。因此,MP SO 算法得到的开关角能够有效地消除目标次谐波。

5 结 论

针对 PSO 算法,通过使用非线性惯性权重替代线性变化的惯性权重,并在非线性惯性权重中引入混沌映射,优化粒子的速度和位置更新机制,可以有效解决 PSO 收敛性差和容易局部最优的问题,从而提高多电平 SHEP WM 消谐方程组解的精度,增加开关角求解成功率,促进 MP SO 算法在级联 H 桥型逆变器中的应用。

针对 PSO 算法收敛性差的问题,本文以 CHB 多电平逆变器的 SHEP WM 技术为研究对象,提出一种 MP SO 算法,通过理论分析和仿真结果验证了该方法可以在 PSO 的基础上,明显地提高多电平 SHEP WM 消谐方程组解的精度,增加开关角的求解成功率,所得解可以有效消除目标次谐波。

参考文献(References):

- [1] YADAV A K, GOPAKUMAR K, KRISHNA R, et al. A hybrid seven-level inverter using low voltage devices and operation with single DC-link [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 30(10): 9844—9853.
- [2] NEYSHABOURI Y, CHAUDHARY S K, TEODORESCU R, et al. Improving the reactive current compensation capability of cascaded H-bridge based STATCOM under unbalanced grid voltage[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1466—1476.
- [3] 陆道荣,魏缪宇,于宇,等.一种基于方波注入的星形级联静止同步补偿器的负序电流补偿策略[J].电工技术学报, 2022, 37(6): 1482—1494.
LU Dao-rong, WEI Miu-yu, YU Yu, et al. Zero-sequence-voltage injection based on square-wave to balance cluster voltages for star-connected cascaded STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1482—1494.
- [4] BANA P R, PANDA K P, SANJEEVIKUMAR P, et al. Extendable switched-capacitor multilevel inverter with reduced number of components and self-balancing capacitors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 3154—3163.
- [5] 叶满园,魏麒文,章俊飞,等.基于 IPD 调制的电容钳位型多电平逆变器功率均衡控制策略[J].高电压技术, 2020, 46(9): 3212—3219.
YE Man-yuan, WEI Qi-wen, ZHANG Jun-fei, et al. Power balance control strategy of capacitor-clamped multilevel inverter based on IPD modulation [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3212—3219.
- [6] 顾军,宋飞,李平,等.混合级联 H 桥逆变器的调制策略优化方法[J].高电压技术, 2022, 48(2): 753—761.
GU Jun, SONG Fei, LI Ping, et al. Modulation strategy optimization method of hybrid cascaded H-bridge inverter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 753—761.
- [7] MEHDI, HAJIZADEH, SEYED, et al. Selective harmonic elimination strategy for cascaded H-bridge five-level inverter with arbitrary power sharing among the cells[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(1): 95—101.
- [8] 叶满园,苗志林,陈子豪,等.电容电压自均衡多电平逆变器 SHEP WM 控制策略研究[J].高电压技术, 2022, 48(5): 1952—1960.
YE Man-yuan, MIAO Zhi-lin, CHEN Zi-hao, et al. Research on SHEP WM control strategy of capacitor voltage self-balancing multilevel inverter[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1952—1960.
- [9] JIANG Y, LI X Y, QIN C W, et al. Improved particle swarm optimization based selective harmonic elimination and neutral point balance control for three-level inverter in low-voltage ride-through operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(1): 642—652.
- [10] 叶满园,黎冰,李宋.基于 Walsh 函数的多电平逆变器多波段 SHEP WM 控制技术[J].电网技术, 2013, 37(10): 2945—2952.
YE Man-yuan, LI Bing, LI Song. Study on Walsh function based multi-band SHEP WM control technology for multi-level inverter[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2945—2952.
- [11] ROURAY A, SINGH R K, MAHANTY R. Harmonic minimization in three-phase hybrid cascaded multilevel inverter using modified particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4407—4417.
- [12] 费万民,阮新波,张艳莉,等.多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的初值问题研究[J].中国电机工程学报, 2007(13): 87—92.
FEI Wan-min, RUAN Xin-bo, ZHANG Yan-li, et al. Research on the initial values of SHEP WM method for multi-level voltage inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2007 (13): 87—92.
- [13] OZPINECI B, TOLBERT L M, CHIASSON J N. Harmonic optimization of multilevel converters using genetic algorithms[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2005, 3(3): 92—95.
- [14] 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.
- [15] 张安玲,刘雪英.求解非线性方程组的拟牛顿-粒子群混合算法[J].计算机工程与应用, 2008(33): 41-42, 92.
ZHANG An-ling, LIU Xue-ying. Hybrid quasi-newton/particle swarm optimization algorithm for nonlinear equations[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(33): 41-42, 92.