

文章编号:1671-251X(2015)09-0057-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.09.015

叶满园,黄凯峰.基于改进粒子群算法的阶梯波调制功率均衡控制策略[J].工矿自动化,2015,41(9):57-62.

基于改进粒子群算法的阶梯波调制 功率均衡控制策略

叶满园, 黄凯峰

(华东交通大学 电气与工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对级联型多电平逆变器阶梯波调制时各级联单元输出功率不均衡问题,提出采用调整脉冲开关角的阶梯波调制功率均衡控制策略,该策略以 $1/4$ 输出周期为单位互换各级联单元的输出电压波形,从而实现各级联单元在1个输出周期内的功率均衡。同时将一种基于惯性权重动态调整的粒子群算法引入到对阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角的求解中,该算法不需要开关角初值,随着迭代次数的增加而动态减小惯性权重,能快速有效地求解出开关角最优解。仿真结果验证了基于改进粒子群算法的阶梯波调制功率均衡控制策略的可行性及有效性。

关键词:级联型多电平逆变器;阶梯波调制;功率均衡控制;惯性权重动态调整;粒子群算法

中图分类号:TD614

文献标志码:A

网络出版时间:2015-08-29 15:47

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150829.1547.015.html>

Power balance control strategy for staircase modulation based on
improved particle swarm optimization algorithm

YE Manyuan, HUANG Kaifeng

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University,
Nanchang 330013, China)

Abstract:In view of problem of unbalanced output power of each H-bridge for staircase modulation of cascaded multilevel inverter, a power balance control strategy for staircase modulation of adjusting pulse switching angle was proposed, which realized power balance in one output cycle through interchanging output voltage of the H-bridge each $1/4$ output cycle. Meanwhile, an improved particle swarm optimization algorithm based on dynamic change of inertia weight was applied into solution of switching angles of power balance control strategy for staircase modulation, which could get the optimal solution of switching angle quickly and efficiently by dynamically decreasing inertia weight with increase of evolution algebra without initial value. The simulation results verify feasibility and validity of power balance control strategy for staircase modulation based on improved particle swarm optimization algorithm.

Key words:cascaded multilevel inverter; staircase modulation; power balance control; dynamic change of inertia weight; particle swarm optimization

收稿日期:2015-05-11;修回日期:2015-07-17;责任编辑:盛男。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51167006)。

作者简介:叶满园(1978—),男,安徽蒙城人,副教授,硕士,硕士研究生导师,研究方向为电力电子与电力传动,E-mail:yemanyuan1@163.com。

通信作者:黄凯峰(1991—),男,江西抚州人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动,E-mail:695138590@qq.com。

0 引言

级联型多电平逆变器易于模块化设计,不存在输入电容均压问题,各开关管均可实现自然箝位,因此在中高压、大功率的电动机调速和电力系统中受到越来越多的关注^[1-3]。级联型多电平逆变器输出有功功率时需要考虑功率均衡问题。输出功率不均衡会使各级联单元电池充放电不平衡,甚至会造成各级联单元部分器件满载,而部分器件轻载或空载运行,减少器件的使用寿命,降低系统的可靠性。参考文献[4]提出采用循环的方式实现功率均衡,但实现功率均衡所需时间会随着级联单元个数增加而增加;参考文献[5]提出的 PWM 脉冲随机分配方法简单易行,但所需时间较长,不利于闭环实时控制。本文采用阶梯波调制功率均衡控制策略,该策略利用相电压冗余的特点,以 $1/4$ 输出周期为单位互换各级联单元的输出电压波形,从而实现各级联单元在 1 个输出周期内的功率均衡。

阶梯波调制功率均衡控制策略应用的最大难点是关于开关角的非线性超越方程组的求解,现有文献大多采用数值解法,如牛顿迭代法、同伦算法等,但其对开关角初值的选取有着严苛的要求,增加了求解的难度。参考文献[6]给出迭代初值的期望线性计算公式,涉及的计算量较小,但个别开关角初值的误差较大,影响收敛速度;参考文献[7]采用多项式合成理论法,将非线性方程组转化为多项式方程组进行求解,但其过于复杂,不利于多电平数的推广应用;参考文献[8]验证了遗传算法在特定谐波消除法中求取开关角的有效性,但遗传算法的参数设置较复杂,且存在局部收敛等“早熟”特性;参考文献[9]给出了一种蚁群优化算法,利用正反馈机制和启发式概率搜索方法,但反馈时间较长、效率较低。本文采用一种基于惯性权重动态调整的改进粒子群 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法,该算法随着迭代次数的增加动态减小惯性权重,可有效平衡全局搜索和局部搜索能力,提高开关角求解速度和精度。

本文以五单元级联型多电平逆变器为例进行分析和仿真,利用改进的 PSO 算法分别求解阶梯波调制策略和阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角,给出相应的各级联单元输出电压和相电压。仿真结果验证了基于改进 PSO 算法的阶梯波调制功率均衡控制策略的有效性。

1 阶梯波调制功率均衡控制策略

图 1 为单相 m 单元级联型多电平逆变器拓扑。设各级联单元 $H_1, H_2, \dots, H_m$ 输入电压均为 E ; 输入电流为 $i_{in(1)}, i_{in(2)}, \dots, i_{in(m)}$; 输出电压为 $U_{H_1}, U_{H_2}, \dots, U_{H_m}$ 。由于各级联单元之间是串联关系,各级联单元输出电流相等。相电压 U_{AN} 为 m 个级联单元输出电压之和。

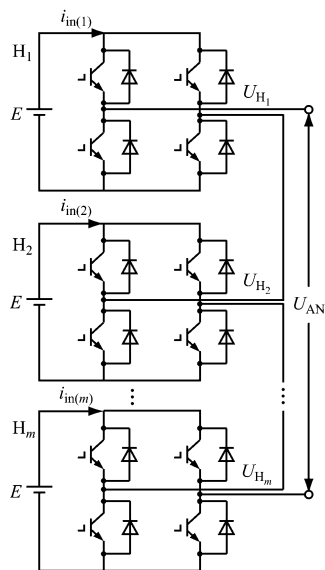


图 1 级联型多电平逆变器拓扑

本文以五单元级联型多电平逆变器为例来探讨阶梯波调制功率均衡控制策略。阶梯波调制策略的原理是每个级联单元输出与 U_{AN} 基波电压同频率的方波,它们叠加形成近似正弦波,如图 2 所示。 U_{AN}

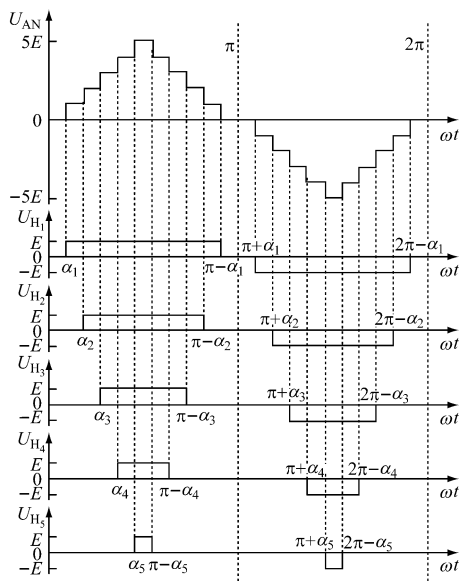


图 2 阶梯波调制策略

只有奇次谐波,其表达式为

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

式中: n 为谐波次数; $U_n = \frac{4E}{n\pi} \sum_{m=1}^5 \cos(n\alpha_m)$, 其中 α_m

为开关角; ω 为角频率; t 为触发脉冲的开关时间。

根据参考文献[10]可得级联型多电平逆变器在阶梯波调制策略下的开关角方程组(以消除 5, 7, 11, 13 次谐波为例):

$$\begin{cases} 4(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3 + \cos \alpha_4 + \cos \alpha_5)/\pi = 5M_r \\ \sum_{m=1}^5 \cos(n\alpha_m) = 0, \quad n = 5, 7, 11, 13 \end{cases} \quad (2)$$

式中: M_r 为调制比。

开关角应满足:

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4 < \alpha_5 < \pi/2 \quad (3)$$

由参考文献[11]可知,单个级联单元 H_1 输出电压的基波电压幅值为

$$U_{1(H_1)} = 4E \cos \alpha_1 / \pi \quad (4)$$

输出有功功率为

$$P_{out(H_1)} = 0.5 U_{1(H_1)} I_{out} \cos \varphi \quad (5)$$

式中: I_{out} 为输出电流幅值; φ 为输出电流与 U_{AN} 基波电压之间的相位差。

根据式(4)和式(5),可推导出各级联单元输出有功功率为

$$P_{out(H_m)} = 2EI_{out} \cos \varphi [\cos \alpha_m - \cos(\pi - \alpha_m)] / \pi \quad (6)$$

由式(6)可知, H_1-H_5 单元的输出有功功率分别正比于 $\cos \alpha_1 - \cos \alpha_5$, 因此各级联单元输出有功功率不均衡。为了使各级联单元输出有功功率均衡,调整 H_1 单元的输出电压波形去补偿 H_5 单元的输出电压波形,调整 H_2 单元的输出电压波形去补偿 H_4 单元的输出电压波形,如图 3 所示。

五单元级联型多电平逆变器的阶梯波调制功率均衡控制的约束方程为

$$\begin{cases} \cos \alpha_1 + \cos \alpha_5 = 2\cos \alpha_3 \\ \cos \alpha_2 + \cos \alpha_4 = 2\cos \alpha_3 \end{cases} \quad (7)$$

由于功率约束条件的限制,将减少阶梯波调制策略下开关角方程组的 2 个自由度,本文选择减少 11, 13 次谐波方程,可得阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角方程组为

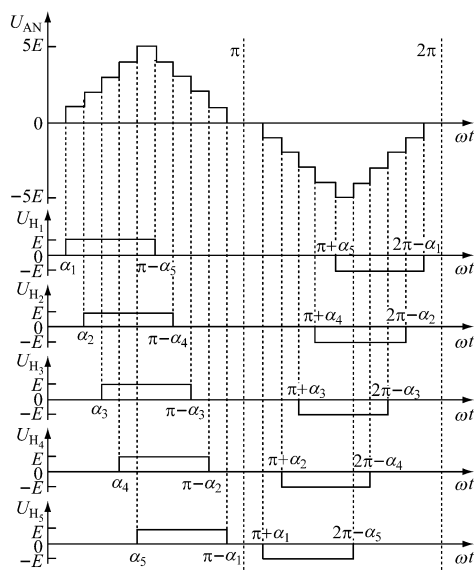


图 3 阶梯波调制功率均衡控制策略

$$\begin{cases} 4(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3 + \cos \alpha_4 + \cos \alpha_5)/\pi = 5M_r \\ \cos 5\alpha_1 + \cos 5\alpha_2 + \cos 5\alpha_3 + \cos 5\alpha_4 + \cos 5\alpha_5 = 0 \\ \cos 7\alpha_1 + \cos 7\alpha_2 + \cos 7\alpha_3 + \cos 7\alpha_4 + \cos 7\alpha_5 = 0 \\ \cos \alpha_1 + \cos \alpha_5 = 2\cos \alpha_3 \\ \cos \alpha_2 + \cos \alpha_4 = 2\cos \alpha_3 \end{cases} \quad (8)$$

在此基础上,可将本文采用的阶梯波调制功率均衡控制策略推广到其他任意 m 个级联单元组成的级联型多电平逆变器中。

2 改进的 PSO 算法

PSO 算法是受鸟群觅食行为的启发而提出的群体性能优化算法,采用进化算法中群体和进化的概念,随机初始化一群粒子,将每个粒子视为优化问题的一个可行解,粒子的好坏由一个事先设定好的适应度函数来确定。每个粒子在可行解空间中运动,由一个速度变量决定其方向和距离。粒子根据自身的最优位置和整个粒子群体的最优位置去调节自身的飞行方向和速度,一直朝目前的最优粒子飞行^[12-15]。

基于惯性权重动态调整的 PSO 算法对粒子进行的操作为

$$V_{id}^{k+1} = wV_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (9)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (10)$$

式中: V_{id} 为粒子的速度; k 为当前迭代次数; w 为惯

性权重; c_1 和 c_2 为加速度因子; r_1 和 r_2 为分布于 $[0,1]$ 区间的随机数; P_{id} 为当前粒子的个体极值; X_{id} 为粒子的位置; P_{gd} 为当前粒子的群体极值。

在式(9)中,等号右边第一项为粒子先前速度的继承,依据自身的速度进行惯性运动;第二项为“认知”部分,结合自身以往的经历实现下一步行为决策;第三项为“社会”部分,表示粒子间的信息共享与合作。

惯性权重体现的是粒子继承先前速度的能力。已有研究表明,如果 PSO 算法进化速度较快,算法可在较大的搜索空间内持续搜索;当粒子搜索速度减慢时,可以减小惯性权重,使得粒子群在小空间搜索,以便更快找到最优解。通常惯性权重的取法有以下 3 种^[16]:

$$\begin{cases} w_1 = 1 \\ w_2 = w_{\text{start}} - (w_{\text{start}} - w_{\text{end}}) \frac{k}{k_{\text{max}}} \\ w_3 = w_{\text{start}} - (w_{\text{start}} - w_{\text{end}}) \left(\frac{k}{k_{\text{max}}}\right)^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: w_{start} 为初始惯性权重; w_{end} 为迭代至最大次数时的惯性权重; k_{max} 为最大迭代次数。

本文将基于惯性权重动态调整的 PSO 算法用于阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角方程组的求解,本质为 PSO 算法的多目标优化问题,因此需要对目标函数方程组进行转换:

$$\begin{cases} \cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 + \cos \alpha_3 + \cos \alpha_4 + \cos \alpha_5 - 5M_r\pi/4 = \epsilon_1 \\ \cos 5\alpha_1 + \cos 5\alpha_2 + \cos 5\alpha_3 + \cos 5\alpha_4 + \cos 5\alpha_5 = \epsilon_2 \\ \cos 7\alpha_1 + \cos 7\alpha_2 + \cos 7\alpha_3 + \cos 7\alpha_4 + \cos 7\alpha_5 = \epsilon_3 \\ \cos \alpha_1 + \cos \alpha_5 - 2\cos \alpha_3 = \epsilon_4 \\ \cos \alpha_2 + \cos \alpha_4 - 2\cos \alpha_3 = \epsilon_5 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\epsilon_1-\epsilon_3$ 代表谐波方程; ϵ_4, ϵ_5 代表约束方程。

同时将适应度函数取为

$$f(\alpha) = \frac{1}{1 + \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 + \epsilon_4^2 + \epsilon_5^2} \quad (13)$$

当 $f(\alpha)=1$ 时, $\epsilon_1-\epsilon_5$ 均为 0,可认为方程组的解已求出。

3 仿真研究

为验证上述理论分析的正确性,利用 Matlab/Simulink 仿真软件分别对五单元级联型多电平逆

变器的阶梯波调制策略和阶梯波调制功率均衡控制策略进行仿真研究。仿真设置:单个级联单元的输入电压 $E=10\text{ V}$,负载为纯电阻负载;随机初始化粒子的位置和速度,设 $c_1=c_2=1.494\ 45$,种群规模为 20。

为了研究取不同惯性权重时 PSO 算法的性能,运用式(11)中的 3 种惯性权重取值方法对式(8)进行求解。设 $w_{\text{start}}=0.9, w_{\text{end}}=0.4, k_{\text{max}}=150$ 。每个惯性权重下的程序运行 100 次,得到适应度函数平均值收敛曲线如图 4 所示。

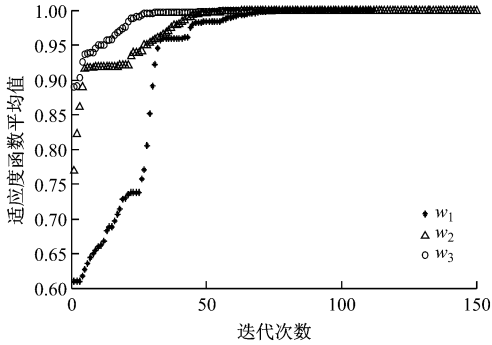


图 4 3 种惯性权重下适应度函数平均值收敛曲线

从图 4 可看出,在满足适应度函数取得最优值的前提下,惯性权重不变的 PSO 算法收敛速度慢,容易陷入局部最优;而惯性权重动态变化的 PSO 算法在迭代初期由于较大的惯性权重使得收敛速度较快,在迭代后期由于较小的惯性权重导致局部搜索能力强,利于算法跳出局部最优而取得最优解,具有较强的函数极值寻优能力。

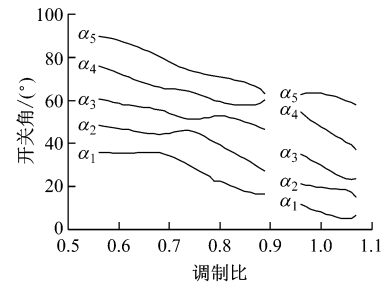
3 种惯性权重下的 PSO 算法性能比较见表 1。可看出基于惯性权重动态调整的 PSO 算法获得适应度函数最优值次数更多,适应度函数平均值更接近 1,具有更强的局部搜索能力;与线性递减惯性权重 w_2 相比,迭代初期减小较慢、迭代后期减小较快的惯性权重 w_3 更能提高算法的局部搜索能力。

表 1 3 种惯性权重下的 PSO 算法性能比较

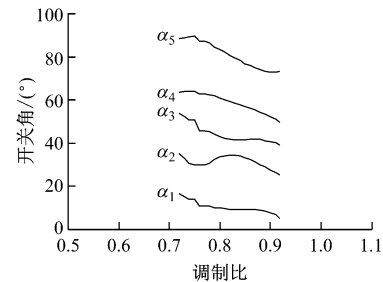
惯性权重	适应度函数最优值	适应度函数平均值	获得适应度函数最优值次数
w_1	1	0.978 6	3
w_2	1	0.983 6	25
w_3	1	0.991 1	42

采用改进的 PSO 算法(取惯性权重 w_3)对式(2)和式(8)进行多次求解,获得阶梯波调制策略和阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角随调制比变化的曲线,如图 5 所示。在满足式(2)的前提下,

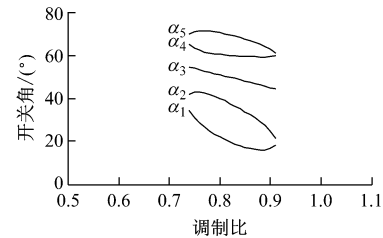
得到2组开关角轨迹曲线,第1组开关角对应的调制比范围为 $[0.56,1.07]$,第2组开关角对应的调制比范围为 $[0.72,0.93]$;在满足式(8)的前提下,开关角对应的调制比范围为 $[0.73,0.91]$ 。



(a) 阶梯波调制策略下第1组开关角轨迹



(b) 阶梯波调制策略下第2组开关角轨迹

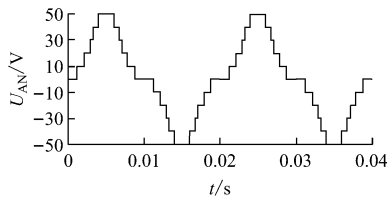


(c) 阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角轨迹

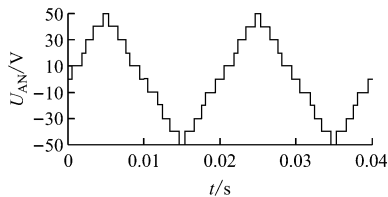
图5 阶梯波调制策略和阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角轨迹

调制比 $M_r=0.8$ 时,阶梯波调制策略下第1组开关角 $[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5]=[22.154 \ 9^\circ \ 39.066 \ 9^\circ \ 52.699 \ 4^\circ \ 59.211 \ 3^\circ \ 70.889 \ 8^\circ]$,阶梯波调制策略下第2组开关角 $[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5]=[9.683 \ 6^\circ \ 33.458 \ 0^\circ \ 43.275 \ 8^\circ \ 61.164 \ 2^\circ \ 83.557 \ 7^\circ]$,阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角 $[\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5]=[21.839 \ 5^\circ \ 39.886 \ 2^\circ \ 51.067 \ 0^\circ \ 60.418 \ 8^\circ \ 70.925 \ 8^\circ]$,得到对应的相电压波形和频谱分别如图6、图7所示,仿真结果见表2。

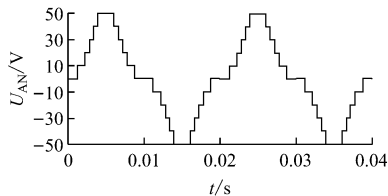
从图6、图7可看出,阶梯波调制策略下相电压的5,7,11,13次谐波及阶梯波调制功率均衡控制策略下相电压的5,7次谐波基本上都被消除,由此可证明改进 PSO 算法在级联型多电平逆变器阶梯波调制策略和阶梯波调制功率均衡策略中的应用是正确可行的。



(a) 阶梯波调制策略下第1组开关角对应的相电压波形

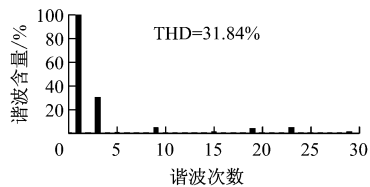


(b) 阶梯波调制策略下第2组开关角对应的相电压波形

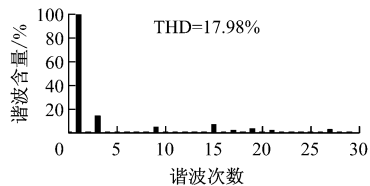


(c) 阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角对应的相电压波形

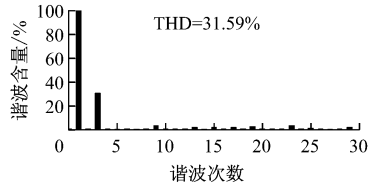
图6 阶梯波调制策略和阶梯波调制功率均衡控制策略下相电压波形



(a) 阶梯波调制策略下第1组开关角对应的相电压频谱



(b) 阶梯波调制策略下第2组开关角对应的相电压频谱



(c) 阶梯波调制功率均衡控制策略下开关角对应的相电压频谱

图7 阶梯波调制策略和阶梯波调制功率均衡控制策略下相电压频谱

由表2可知,在阶梯波调制策略下各级联单元输出电压的基波电压幅值 $U_{1(H_1)}-U_{1(H_5)}$ 不相等,因此各级联单元输出功率不相等,而阶梯波调制功率均衡控制策略下的 $U_{1(H_1)}-U_{1(H_5)}$ 几乎一致,达到了

表 2 阶梯波调制策略和阶梯波调制功率均衡
控制策略仿真结果比较

指标	阶梯波调制策略		阶梯波调制功率 均衡控制策略
	第 1 组开关角	第 2 组开关角	
$U_{1(H_1)}/V$	11.710	12.470	7.915
$U_{1(H_2)}/V$	9.802	10.540	7.952
$U_{1(H_3)}/V$	7.635	9.191	7.917
$U_{1(H_4)}/V$	6.436	6.061	7.948
$U_{1(H_5)}/V$	4.091	1.350	7.913

输出功率的均衡。

4 结论

(1) 阶梯波调制功率均衡控制策略以 1/4 周期为单位互换各级联单元的输出电压波形,并增加约束方程,在输出电压总谐波失真略有增加的情况下,实现了 1 个周期内输出功率的均衡。

(2) 基于惯性权重动态调整的改进 PSO 算法可在不给定开关角初值的情况下得到开关角轨迹,且迭代初期较大的惯性权重有利于全局搜索,迭代后期较小的惯性权重则更有利于精确的局部搜索,较好地平衡了算法的全局搜索和局部搜索能力,具有搜索时间短、收敛性强、精度高等优点。

参考文献:

[1] 叶满园,李宋,黎冰.多电平逆变器特定谐波消除控制技术[J].工矿自动化,2014,40(9):61-65.

[2] 叶满园,蔡鸿,黎冰,等.五电平逆变器双波段 SHEPWM 控制方法研究[J].工矿自动化,2014,40(11):55-60.

[3] 李高峰.H 桥型多电平逆变器 PWM 调制策略及控制系统研究[D].徐州:中国矿业大学,2014:9-25.

[4] TOLBERT L M,PENG F Z,CUNNYNGHAM T, *et al.* Charge balance control schemes for cascade multilevel converter in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(5):1058-1064.

[5] 单庆晓,潘孟春,李圣怡,等.一种新型的级联型逆变器 PWM 信号随机分配方法研究[J].中国电机工程

学报,2004,24(2):156-160.

[6] LI Qiang,HE Zhiyuan,TANG Guangfu. Investigation of the harmonic optimization approaches in the new modular multilevel converters [C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Beijing, 2010:1-6.

[7] BUCCELLA C,CECATI C,CIMORONI M G. Investigation about numerical methods for selective harmonics elimination in cascaded multilevel inverters [C]//Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion,Bologna,2012:1-6.

[8] 叶满园,周琪琦,蔡鸿,等.基于捕食策略遗传算法的 3 电平中点箝位型逆变器特定谐波消除脉宽调制技术[J].高电压技术,2014,40(11):3569-3576.

[9] 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,2008:20-30.

[10] 朱思国,欧阳红林,朱英浩.H 桥级联型逆变器的迭代谐波消除方法[J].高电压技术,2011,37(2):318-324.

[11] 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.

[12] 申科,王建赟,班明飞,等.基于粒子群优化的模块化多电平变换器阶梯波调制策略[J].电力自动化设备,2014,34(4):78-83.

[13] 马立新,单冠华,屈娜娜.基于改进粒子群算法的电力系统无功优化[J].控制工程,2012,19(6):1077-1080.

[14] HAGH M T,TAGHIZADEH H,RAZI K. Harmonic minimization in multilevel inverters using modified species-based particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(10): 2259-2267.

[15] JEEVABHARATHI T,PADMATHILAGAM V. Harmonic elimination of cascaded multilevel inverters using particle swarm optimization[C]//International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies,Nagercoil,2012:301-306.

[16] 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,2011:38-45.