

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.202400148

网络首发日期: 2026-01-28; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20260128.1557.004>

基于 GA-PSO 的三电平逆变器闭环控制策略

赵云鹏¹, 张 帅², 常振成², 李 飞², 游国栋², 刘锐君²

(1. 中国人民解放军海军勤务学院, 天津 300450; 2. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300457)

摘要: 针对三电平逆变器中点电压波动问题, 本文设计了一种基于遗传粒子群算法(GA-PSO)的闭环控制策略。首先, 在逆变器中加入空间矢量进行脉宽调制, 采集中点电压, 与设定的阈值进行比较。其次, 对 GA-PSO 目标函数求最优解, 以调节基本矢量作用时间, 保证中点电压控制在可接受范围内。最后, 在 MATLAB 环境中进行建模仿真实验, 结果表明该方法可以使中点电压的波动保持在可接受范围内, 从而验证了该方案的可行性和有效性。

关键词: 逆变器; 闭环控制策略; 遗传算法; 粒子群算法

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2026)04-0055-08

GA-PSO Based Closed-Loop Control Strategy for Three-Level Inverter

ZHAO Yunpeng¹, ZHANG Shuai², CHANG Zhencheng², LI Fei², YOU Guodong², LIU Ruijun²

(1. PLA Navy Logistics Academy, Tianjin 300450, China;

2. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: To address the neutral-point voltage fluctuation issue in three-level inverter, a closed-loop control strategy based on genetic particle swarm algorithm(GA-PSO) is designed in this article. First, a space vector is added to the inverter for pulse width modulation, and the neutral-point voltage is sampled and compared with the set threshold. Second, an optimal solution is found for the GA-PSO objective function to regulate the fundamental vector action time to ensure that the neutral-point voltage is controlled within an acceptable range. Finally, modeling simulation experiments are conducted in MATLAB environment, and the results show that the proposed method can keep the fluctuation of the neutral-point voltage within an acceptable range, thus verifying the feasibility and effectiveness of the scheme.

Key words: inverter; closed-loop control strategy; genetic algorithm; particle swarm algorithm

引文格式:

赵云鹏, 张帅, 常振成, 等. 基于 GA-PSO 的三电平逆变器闭环控制策略[J]. 天津科技大学学报, 2026, 41(4): 55-62.

Zhao Yunpeng, Zhang Shuai, Chang Zhencheng, et al. GA-PSO based closed-loop control strategy for three-level inverter[J].

Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2026, 41(4): 55-62.

随着新能源发电系统和大规模发电设备接入电网, 逆变器被广泛用于电源间的功率处理^[1]。针对逆变器的研究, 国内外研究的热点均是二电平逆变器的拓扑, 其拓扑在电机系统中的应用比较广泛^[2]。众所周知, 逆变器的功能在于实现逆变, 输出高质量电能,

在公共电网中出现故障时, 对电网进行实时保护^[3]。

对电力电子系统来说, 逆变器的性能主要体现在两方面: 逆变器的拓扑结构和逆变器的控制算法^[4]。对电力系统而言, 三电平逆变器更适合当前的市场需求^[5]。然而, 中点钳位(neutral point clamped, NPC)三

收稿日期: 2024-07-21; 修回日期: 2025-11-03

基金项目: 大学生创新创业计划项目(202410057167, 202510057043)

作者简介: 赵云鹏(1974—), 男, 甘肃人, 教授; 通信作者: 游国栋, 教授, yougdong@163.com

电平逆变器的拓扑特性为其带来了固有的中点电位平衡挑战。该电位能否保持稳定,直接决定了逆变器的运行效能与输出质量。当前,对中点电压平衡策略的研究主要有两种技术路径^[6]:一类依赖于外接电路或特定硬件架构的调控,另一类则聚焦于通过控制算法的优化来实现。前者借助额外的硬件装置,直接对中点电位进行动态调节,从而维持其平衡状态^[7]。软件控制方法通常采用永磁同步电机的空间矢量脉宽调制(space vector PWM, SVPWM)。这一方法通过控制三相桥臂的不同开关通断状态,产生多种状态组合,并利用这些组合合成输出电压^[8]。姜晓杰^[9]提出基于 60°坐标系下三电平 NPC 逆变器的改进 SVPWM、加入无差拍控制策略,增强了模型调制因子 k 控制的参数鲁棒性。朱敏龙等^[10]提出一种 NPC 型三相三电平逆变器可视化三矢量无模型预测控制策略,可实现对输出电压的控制和中点电压平衡的控制。苏畅等^[11]提出一种连续集并行预测控制(CCS-PPC)策略,有效提升了各相桥臂的控制精度和动态响应。

逆变器在运行中受多种因素影响,其中点电位会发生不可避免的偏移,且偏移量可能超出正常区间^[12]。一种有效的控制策略是对虚拟矢量的作用时间进行在线修正,从而确保设备的稳定工作。这通常需要借助闭环控制实现中对点电位的实时监控与调节。本文结合粒子群优化算法与遗传算法的优点,实时监测中点电压,保证在中点处的电荷量与上下两个直流侧容差的差值在允许范围内,需要对虚拟矢量最优占空比进行精确计算,进而对中点电压进行合理控制,达到平衡状态。

1 三电平逆变器拓扑结构

有源中性点钳位型(active neutral point clamped, ANPC)三电平逆变器拓扑结构是在 21 世纪初由德国学者 Brucker 研究出来的,它解决了传统 NPC 逆变器的器件损耗差异问题。传统逆变器结构呈现出多方面的典型优势,主要体现为:开关器件所承受的电压应力较低、输出波形具有良好的正弦度,以及系统在故障条件下表现出较强的容错能力^[13]。有源中性点钳位型三电平逆变器拓扑结构如图 1 所示。

2 遗传粒子群算法

2.1 遗传算法(GA)

遗传算法是由科学家 John Holland 于 20 世纪 70

年代初提出的^[14]。核心思想是将数据集定义为种群概念,并应用仿生进化策略,以实现问题全局最优解的搜寻。依据如下步骤进行处理。

(1) 确定编码方案,种群初始化。

(2) 通过定义适应度函数 f , 计算个体适应度的数值。

(3) 根据第(2)步中计算出的适应度进行种群的优胜劣汰,其选择概率为

$$P_i = f_i / \sum f_i \quad i \in 1, \dots, N \quad (1)$$

(4) 进行种群个体的交叉变异。

(5) 验证所得解的有效性。一旦确认有效,则中断并退出循环;若无效,则使程序控制流返回到循环序列中的指定节点,即步骤(2)。

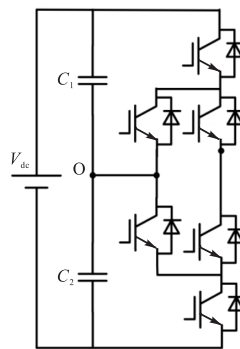


图1 有源中性点钳位型三电平逆变器拓扑结构

Fig. 1 ANPC three-level inverter topology

2.2 粒子群优化(PSO)算法

粒子群优化算法的核心思想建立在群体的记忆与信息共享机制之上。其技术关键在于每个粒子都通过跟踪个体最优解与全局最优解,并遵循一个简单的速度-位置更新模型,从而驱动整个群体向最优区域运动。给定问题解空间维度 D 、粒子种群数量 N 、最大迭代次数 T 这 3 个关键参数,则第 i 个粒子在经历 t 次迭代后的位置可表示为

$$x_i(t) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iD}(t)] \quad (2)$$

第 i 个粒子经过 t 次迭代后的移动速度可表示为

$$v_i(t) = [v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{iD}(t)] \quad (3)$$

第 i 个粒子经过 t 次迭代后,它所记忆的历史最优位置为

$$p_i(t) = [p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{iD}(t)] \quad (4)$$

其更新公式为

$$p_i(t) = \begin{cases} x_i(t), & f(x_i(t)) < f(p_i(t)) \\ p_i(t-1), & f(x_i(t)) \geq f(p_i(t)) \end{cases} \quad (5)$$

其中 $f(x)$ 表示适应度函数。

同样, 经过 t 次迭代后的粒子群中全局最优位置记为

$$g(t) = p_g(t) = [p_{g1}(t), p_{g2}(t), \dots, p_{gD}(t)] \quad (6)$$

除了计算粒子群自身位置, 还需进一步计算粒子更新速度和位置, 其公式为

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 (p_{ij} - x_{ij}(t)) + c_2 r_2 (p_{gj} - x_{ij}(t)) \quad (7)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (8)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$, $j=1, 2, \dots, N$; ω 表示惯量因子; c_1 、 c_2 表示粒子的加速常量因子, 也叫作学习因子; r_1 、 r_2 表示 $(0,1)$ 之间的随机数。

根据取长补短原则, 遗传算法和粒子群优化算法在搜索特性上具有明显互补性, 可以将二者的优势协同整合, 得到遗传粒子群 (GA-PSO) 算法。该混合策略在 PSO 框架中引入遗传算法的进化机制, 既保留了 PSO 局部开发能力强、收敛速度快的优点, 又结合了 GA 全局探索能力强但收敛较慢的特性。因此, 该混合算法不仅有效降低了陷入局部最优解的风险, 而且显著提升了整体寻优效率与稳定性^[15]。

GA-PSO 算法设计引入的进化机制, 使其局部优化和收敛速度都得到了改善, 可以更快计算出粒子更新后的位置, 并缩短搜索全局最优的时间, 根据适应度从当前种群中筛选出优质个体, 为后续操作准备“父代”, 模拟基因重组, 使粒子之间交换信息, 产生新的候选解, 增强了算法的全局探索能力。以一定概率对粒子的某些维度进行随机扰动, 引入新的基因特性, 有助于种群跳出局部最优。GA-PSO 算法流程图如图 2 所示。由于粒子经选择、交叉、变异后状态改变, 需重新评估并更新个体最优 (每个粒子自身的历史最优) 和全局最优 (整个种群的当前最优), 因此在算法的每一轮迭代中均嵌入了遗传操作, 通过这种嵌入式的混合设计, 算法在每一次迭代中不仅利用了 PSO 基于记忆的收敛性, 还通过 GA 的进化算子有效地维持了种群的多样性, 从而在全局搜索和局部开发之间取得了更佳平衡。因此, 该算法可以显著增强原算法跳出局部极值的能力。

3 基于 GA-PSO 的闭环控制策略

3.1 设计闭环控制框图

为了实现 GA-PSO 算法的反馈控制, 采取一种基于改进型虚拟空间矢量脉宽调制 (improved vir-

tual space vector pulse width modulation, IVSVPWM) 策略。该技术策略能够对逆变器的中点电压进行实时采样, 进而精确获取直流侧两电容之间的电压差。为了合理地推进实验, 需要对逆变器中点处的电压进行边界设定, 即允许电压变化的范围为 $(-\Delta U, \Delta U)$, 判断采集到的压差是否在假设的范围之内。设计的目的在于体现对逆变器的作用效果, 根据 GA-PSO 算法, 计算输出的最优参数 k , 将调制比 m 与参考电压矢量 V_{ref} 共同输入“大扇区小三角形区域判断”环节, 确定参考电压矢量在空间中所处的区域, 为后续的“空间矢量重构”“空间电压矢量作用顺序确定”等环节提供基础判断依据。最后生成 PWM 脉冲。控制框图如图 3 所示。

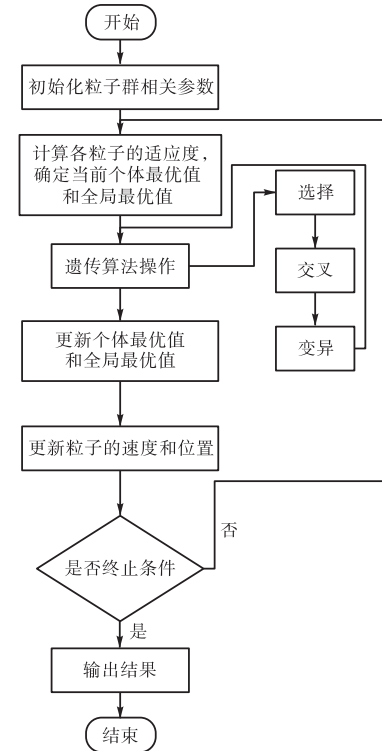


图 2 GA-PSO 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of GA-PSO algorithm

3.2 建立目标函数

短矢量的调节能力存在一定的局限性, 伴随调制比的逐步攀升, 短矢量对中点电压产生的作用呈现出递减趋势。与之形成鲜明对比的是, 中矢量的作用时长随调制比增大而不断延长, 其对中点电压产生的影响愈发凸显。本文所采用的虚拟中矢量由 3 个独立的中矢量组合而成。借助对虚拟中矢量幅值的灵活调整, 能够精准调控中矢量作用于中点电压的时长, 进而达成对逆变器中点电压的有效调节。基于此, 选定虚拟中矢量作为调控中点电压的关键手段。

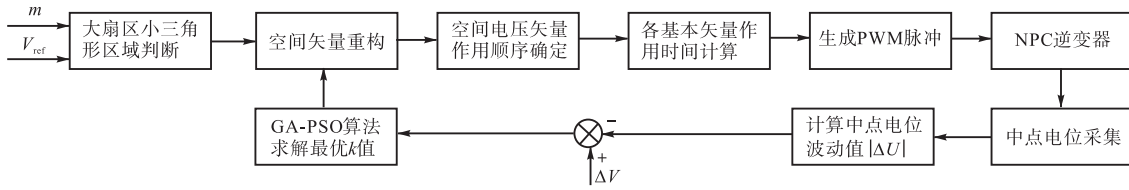


图3 IVSVPWM反馈控制图

Fig. 3 Diagram of IVSVPWM feedback control system

进一步优化虚拟矢量的性能,通过动态参数 k ,对虚拟矢量进行优化处理,具体优化方式如式(9)所示。

$$\mathbf{U}'_{vm} = k(\mathbf{U}_{PNO} + \mathbf{U}_{OPN}) + (1-2k)\mathbf{U}_{PON}, 0 < k < \frac{1}{2} \quad (9)$$

基于三相电流彼此间的关联性分析,可以推导出相关结论,即

$$\mathbf{i}'_{vm} = k(\mathbf{i}_c + \mathbf{i}_a) + (1-2k)\mathbf{i}_b = (1-3k)\mathbf{i}_b \quad (10)$$

式中: $\mathbf{i}_a$ 、 $\mathbf{i}_b$ 、 $\mathbf{i}_c$ 代表矢量 $\mathbf{U}_{OPN}$ 、 $\mathbf{U}_{PON}$ 、 $\mathbf{U}_{PNO}$ 对应矢量中点处的电流。

在一个周期范围内, $\mathbf{U}'_{vm}$ 的中点电荷量可以表示为

$$Q'_{vm} = (1-3k)\mathbf{i}_b T_{vm} \quad (11)$$

式中: T_{vm} 表示在虚拟空间中,中矢量的作用时间。

由式(11)可以看出,当 $k = \frac{1}{3}$ 时, $Q'_{vm} = 0$ 。这说明,在特定周期范围内,虚拟中矢量作用在中点时,其周期内积累的电荷量均值呈现零值特性;当系统运行至中点电流矢量与预设参考方向呈同向耦合状态时,中点位置将发生电荷抽取现象,此过程会引发直流侧下层电容的电压幅值衰减;反之,当中点电流矢量与预设参考方向形成反向作用关系时,则导致上层电容电压下降,同时促使下层电容电压产生上升趋势。参数 k 的调整可实现中点位置电荷流动量的精确控制,进而达成对直流侧上下层电容电压的差异化调节目标。该调节策略在维持系统能量平衡的同时,为电容电压的动态均衡提供了理论支撑。本文设计的GA-PSO算法对三电平逆变器的中点控制起到了很大的作用,该算法可以求解目标函数、合成虚拟矢量、进行中点电流的推导等,进而通过引入动态参数 k ,实现对中点处的电荷量与电压的稳定控制。

依据电学基本原理,可推导出逆变器直流侧上下电容储存电荷量的差值关系为

$$\Delta Q = C \cdot \Delta U' = C \cdot (U_{C_1} - U_{C_2}) \quad (12)$$

其中: C 代表电容, U_{C_1} 、 U_{C_2} 分别代表直流侧上下电

容电压。

在逆变器运行过程中,其中点电压的允许波动区间设定为 $(-\Delta U, \Delta U)$,当检测到中点电压实际波动值处于该区间时,表明逆变器的中点电位维持在正常状态,此时无需对虚拟中矢量的作用参数进行调节。

若中点电压波动超出正常范围上限,即出现正向偏移时,系统将进入不平衡运行状态。此时需通过控制策略引导中点电流流入中点节点,该措施可有效提升直流侧下电容的电压水平,具体表现为电压调节量满足特定关系式。反之,当中点电压波动低于正常范围下限,即出现负向偏移时,说明直流侧上电容电压低于下电容电压,此时需控制中点电流流出中点节点,通过调节作用使下电容电压降低,其调节量同样遵循相应的电压调节关系。

通过上述动态调节机制,系统能够基于实时反馈的中点电压波动数据,持续优化控制参数的取值范围。这种闭环调节方式显著提升了最优参数的确定效率,有效缩短了系统达到稳态运行的调整时间。鉴于系统设计的核心目标是确保中点电压波动幅度始终控制在 ΔU 阈值范围内,因此需要建立包含双重约束条件的优化模型。约束条件一,虚拟中矢量的作用时间必须严格限定在一个控制周期内;约束条件二,需构建如式(13)所示的目标函数,通过多目标优化算法实现控制参数的精准配置。该控制策略通过分层递进的调节机制,既保证了系统运行的稳定性,又提升了动态响应特性。

$$F = \min \left\{ (1-3k)\mathbf{i}_b T_{vm} + C(U_{C_1} - U_{C_2}) \right\} \quad (13)$$

使得

$$\frac{\mathbf{i}_b T_{vm} + C(U_{C_1} - U_{C_2}) - C\Delta U}{3\mathbf{i}_b T_{vm}} < k \quad (14)$$

$$0 < T_{vm} < T_s$$

借助基于预设目标函数所构建的优化算法,采用群体遗传与微粒融化相结合的策略,致力于对目标函数进行优化求解。在此过程中,算法通过不断迭代与调整,最终精准地确定最优解,并明确符合条件的最优行动时刻。这一系列操作的有效实施,能够确保逆

变器得以稳定运行,同时使中点电压维持在平衡状态,进而保障整个电力系统的可靠性与稳定性。

3.3 基于 GA-PSO 算法对目标函数求解

参数的预先设定是求解目标函数不可或缺的初始环节。首先,借助适应度函数对每个粒子适应度的数值展开计算,此数值通常呈现为正值;其次,依据所计算得出的粒子适应度数值大小,对粒子个体的优劣程度进行明确界定。

粒子个体的优劣根据其推导的粒子适应度值与数值 1 比较来说明,适应度越接近 1,粒子质量越优,反之则差。在目标函数 F 中,直流侧上下电容的电压差趋于 0,导致目标函数的差值可能近似为 0,求其倒数时会导致数值突然变大,不具有稳定性,因此给 F 加 1 后再求倒数,此时粒子的适应度接近数值 1。设计适应度函数为

$$f = \frac{1}{F+1} = \max \left\{ \frac{1}{(1-3k)i_b T_{vm} + C(U_{C_1} - U_{C_2}) + 1} \right\} \quad (15)$$

3.3.1 PSO 算法参数设计

在针对特定问题的优化过程中,粒子群优化算法采用了实数编码机制,展现出其独特优势。这一特性与遗传算法形成了鲜明对比,后者在编码方式上有所不同。值得注意的是,粒子群优化算法不仅以实数作为编码基础,还进一步允许对这些实数实施遗传操作。基于此,针对本文所探讨的待优化问题,其目标函数可依据这一特性进行相应的编码设计。

在粒子群优化算法中,惯性权重因子(通常以 ω 表示)作为核心调控参数,其作用机制在前期论述中已有所涉及。该参数通过粒子速度更新方程,量化历史运动状态对当前轨迹的延续性影响,是决定算法搜索效能的关键要素之一。 ω 的设计直接关系到粒子群在解空间中的全局搜索与局部开发能力的平衡,当前多数 PSO 改进策略均围绕该参数的优化展开。

针对遗传算法融合粒子群优化算法的混合算法特性,采用动态调整策略构建惯性权重模型。该模型通过迭代进程中的自适应衰减机制,使 ω 值随进化代数增加呈现非线性递减趋势。这种设计有效规避了传统固定权重导致的搜索停滞问题,具体表现为:在算法后期迭代阶段,可显著降低粒子群在全局最优解邻域内的无效振荡概率,从而避免早熟收敛现象。实验验证表明,动态权重调整机制通过平衡探索与开发行为,使算法在保持全局收敛性的同时,提升了局部精炼能力。惯性权重因子的数学表达见式(16)。

$$\omega(t) = \omega_{\max} + \frac{t(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{T} \quad (16)$$

式中: $\omega_{\min}$ 代表惯性权重的最小值($\omega_{\min} = 0.4$); $\omega_{\max}$ 代表惯性权重的最大值($\omega_{\max} = 0.9$),即 $\omega \in [0.4, 0.9]$; t 代表最新迭代完成的次数; T 代表粒子群优化最大迭代次数。

针对粒子边界的设定问题(具体涉及粒子于搜索空间内的位置坐标及移动速率),前文已就控制中点平衡机制中引入的动态调节参数展开深入剖析。基于逆变器的实际运行状态,可预先确定该参数的合理取值区间 $k \in [0, 1/2)$ 。测量并分析中点电压的实时反馈数据,能够明确该参数在两种不同情境下的具体取值范围。范围分别为 $k \in [0, 1/3)$ 、 $k \in (1/3, 1/2)$,这样就大幅缩小了搜索空间,加快了找到最优 k 值的速度,而 $0 < T_{vm} < 1/40$,故粒子在搜索空间内 t 时刻的位置边界可以设置为 $x_{\min} = (0, 0)$, $x_{\max} = (1/40, 1/3)$,或者 $x_{\min} = (0, 1/3)$, $x_{\max} = (1/40, 1/2)$ 。如何对位置边界进行设计取决于粒子的速度边界,本文设计的粒子速度边界值为两端位置边界速度和的一半,即 $v_{\min} = -(x_{\min} + x_{\max})/2$, $v_{\max} = (x_{\min} + x_{\max})/2$ 。

在粒子群算法中,学习因子参数的配置至关重要,其数值设定对算法搜索最优解的能力具有显著影响。若将学习因子设定过高,粒子在搜索过程中可能会因步长过大而跳过最优解区域;反之,若设定过低,则粒子可能因步长过小而在最优解附近区域反复振荡,进而影响算法的整体效率。当学习因子的取值范围处于某一适宜区间时,算法能展现出较为理想的性能表现,且这两个参数的数值应尽量保持相近。在特定学习因子组合下($c_1 = 1.84$, $c_2 = 2.0$),粒子的位置稳定性能够达到较优水平^[16]。

3.3.2 遗传算子设计

构建一种融合策略,将遗传算法的核心机制嵌入粒子群优化算法的框架内。为实现这一目标,系统地设计了 3 类遗传算子:基于适应度评估的选择算子、通过基因片段交换实现的交叉算子以及引入随机扰动的变异算子。这种混合优化方法通过算子间的协同作用,在保持粒子群算法群体智能特性的同时,赋予其遗传算法的进化能力,从而形成具有双重优化特性的混合算法体系。

在群体优化过程中,为了从群体内筛选出具备优良适应特性的个体,应设计基于适应度值比例的选择机制。针对群体中的任意第 i 个粒子,其被选中的概率由该粒子自身的适应度与群体内所有粒子适应度

总和的比值确定。通过公式(17), 适应度表现更优的粒子将获得更高的选择概率, 进而在后续的重组环节中, 这些具备优良特性的个体能够拥有更多机会参与其中, 以此推动产生性能更为卓越的下一代群体。

$$P_s = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (17)$$

式中: N 表示粒子群中粒子的数量, f_i 表示第 i 个粒子的适应度。

交叉算子是遗传算法的核心, 其目的是通过位置交叉公式和速度交叉公式, 对粒子的位置、速度信息进行融合重组, 生成新的位置和速度来产生下一代新个体。采用实数交叉法, 对粒子群中第 i 个粒子和第 j 个粒子的位置和速度进行操作。

位置交叉公式为

$$\begin{cases} x_i(t+1) = r_1 x_i(t) + (1-r_1) x_j(t) \\ x_j(t+1) = r_1 x_j(t) + (1-r_1) x_i(t) \end{cases} \quad (18)$$

速度交叉公式为

$$\begin{cases} v_i(t+1) = r_2 v_i(t) + (1-r_2) v_j(t) \\ v_j(t+1) = r_2 v_j(t) + (1-r_2) v_i(t) \end{cases} \quad (19)$$

式中: r_1 、 r_2 表示 $[0,1]$ 之间的随机数。

在遗传算法的运算体系内, 变异操作占据着举足轻重的地位, 其核心作用在于催生全新个体, 进而使种群具有多样性。变异操作指的是在算法迭代进程里, 个体基因码链的特定位置出现变动。这种变动在算法的数字表征中, 体现为 0 与 1 的相互转换。通常情况下, 变异概率的取值区间设定在 0.001 至 0.01 之间。针对种群中的粒子, 会依据式(20)与式(21)所规定的规则执行变异操作, 保障算法在迭代过程中不断探索新的解空间, 提升算法的全局搜索能力。

位置变异公式为

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) + (x_i(t) - x_{\max}) f(g) & r_1 \geq 0.5 \\ x_i(t) + (x_{\max} - x_i(t)) f(g) & r_1 < 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

速度变异公式为

$$v_i(t+1) = \begin{cases} v_i(t) + (v_i(t) - v_{\max}) f(g) & r_2 \geq 0.5 \\ v_i(t) + (v_{\max} - v_i(t)) f(g) & r_2 < 0.5 \end{cases} \quad (21)$$

$$f(g) = r_3 \left(1 - \frac{t}{l} \right) \quad (22)$$

式中: r_1 、 r_2 表示 $[0,1]$ 之间的随机数, $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别表示粒子可以上下移动的最大和最小的位置界限,

$v_{\min}$ 、 $v_{\max}$ 分别表示粒子移动速度的最小和最大界限, t 代表算法当前迭代次数, l 代表遗传算法迭代的最大次数。

目标函数的求解过程可按如下步骤进行。

(1) 基于粒子可行域的边界约束, 采用随机初始化方法生成规模为 50 的种群, 并同步完成种群内各粒子的编码设计。

(2) 种群初始化。在种群设定阶段, 首先将粒子的空间维度确定为二维。随后, 运用随机生成函数, 在满足预设的最小与最大位置边界条件下, 对 50 个粒子的位置进行初始化; 同时, 在给定的最小与最大速度约束范围内, 对这些粒子的速度进行初始化配置。此外, 还需预先设定整个算法流程的最大迭代次数。在初始化过程中, 将每个粒子的个体最优解以及整个种群的全局最优解均初始设定为零值, 以此作为后续迭代优化的起始基准。

(3) 适应度评估与最优解更新机制包含双重比较过程。首先, 将各粒子当前位置代入适应度函数, 计算适应度, 通过与个体历史最优值对比, 实现个体最优解更新; 其次, 对全体粒子适应度进行降序排列, 将最优适应度与群体历史全局最优值进行比较, 完成全局最优解更新。该机制确保每次迭代均能保留最优解信息。

(4) 在遗传算法实施过程中, 首先将步骤(3)所得粒子的适应度评估结果代入式(17), 计算各粒子的选择概率。随后, 执行选择操作, 保留当前群体中适应度最优的粒子个体。针对筛选后的粒子群体, 分别依据式(18)与式(19)实施位置信息交叉重组和速度参数交叉操作, 以实现基因片段的交换重组。在此基础上, 进一步根据式(20)和式(21)对粒子位置参数和速度参数进行变异操作, 通过引入随机扰动, 增强种群多样性。整个过程通过多阶段优化策略, 逐步提升粒子群体的全局搜索能力与局部开发效率。

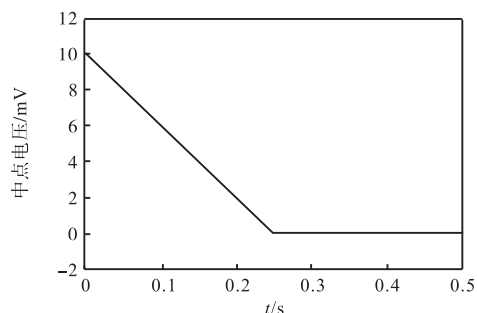
(5) 再次评估所有粒子的适应度, 据此更新每个粒子的个体最优解以及整个群体的全局最优解。

(6) 终止条件判定采用双阈值机制: 当满足“达到预设精度要求”或“迭代次数达到设定阈值”任一条件时, 算法终止运行; 若未满足终止条件, 则返回适应度评估步骤(3)继续迭代, 直至满足终止条件为止。该机制确保算法在收敛性或计算资源耗尽时自动终止, 避免无效计算。

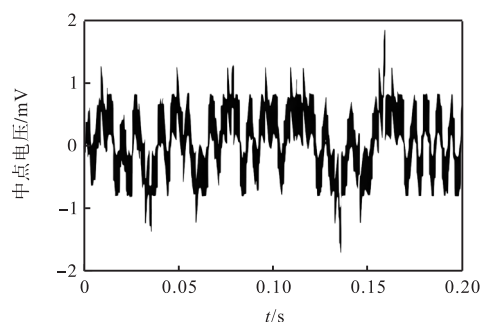
(7) 输出最终获得的群体最优解, 通过空间矢量调制策略实现逆变器中点电位的动态平衡控制。

4 仿真分析

对所设计的基于 GA-PSO 的闭环控制模块进行 Simulink 仿真。仿真模型参数设置: 仿真时间 0.1 s , 直流侧电压 $U_d = 500\text{ V}$, 网侧相电压 $U_p = 220\text{ V}$, 开关采样频率 $f_s = 6\text{ kHz}$, 输出频率 $f_o = 50\text{ Hz}$ 。电容 $C_1 = 4\,500\text{ }\mu\text{F}$, 其他仿真参数保持不变。在研究过程中构建了差异化电容配置模型, 即固定上部电容参数, 通过调整下部电容参数形成多组对比实验, 以此模拟系统运行中可能出现的电容参数失衡状态。该实验设计通过参数梯度化配置, 既保证了单一变量控制原则, 又能全面评估本文方法在不同失衡程度下的性能表现。仿真结果如图 4 所示。



(a) 中点电压平衡过程



(b) 平衡后的中点电压

图 4 中点电压调节方法

Fig. 4 Neutral-point voltage regulation method

通过仿真分析可知, 在初始状态下, 直流母线上、下两侧电容的电压存在 10 V 的差值, 然而, 经过仅 0.25 s 的短暂调节过程, 中点电压迅速趋近于零, 这表明上下两侧电容的端电压实现了平衡, 并且能够使中点电压维持在 $(-0.8, 0.8)\text{ mV}$ 范围内, 平衡过程极为迅速。这一结果充分验证了本文方法在调控逆变器中点电压方面的正确性与有效性。

5 结论

为应对逆变器实际运行中可能产生的中点电位偏移问题, 本研究提出一种基于遗传粒子群算法的闭环调控策略, 该策略可与改进型虚拟空间矢量脉宽调制框架深度融合。系统通过实时采集直流侧中点电位数据, 并与预设安全阈值进行动态比对, 进而构建多目标优化函数, 以迭代求解最优控制参数集。在参数优化基础上, 采用变周期矢量基时序分配机制, 精准调控基础矢量的作用时长, 在确保中点电位波动始终维持于安全边界之内的同时, 显著提升系统的动态响应特性。

为验证算法的有效性, 基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了完整的逆变器控制系统仿真模型。仿真结果表明, 采用本文控制策略后, 系统在 0.25 s 内实现中点电位偏移量趋近于零的目标, 并且使中点电压稳定在 $(-0.8, 0.8)\text{ mV}$ 范围内, 验证了该方法有效抑制中点电位波动的能力。整个调控过程通过实时反馈机制形成闭环控制回路, 既保证了电位平衡的精确性, 又维持了系统运行的稳定性, 为三相逆变器的中点电位管理提供了新的理论支撑与技术实现路径。

参考文献:

- [1] Rathnayake D B, Akrami M, Phurailatpam C, et al. Grid forming inverter modeling, control, and applications[J]. IEEE Access, 2021, 9: 114781–114807.
- [2] Montero-Robina P, Gordillo F, Gómez-Estern F, et al. Voltage balance for five-level DCC based on mixed-integer linear programming[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 106302.
- [3] Meral M E, Çelik D. Mitigation of DC-link voltage oscillations to reduce size of DC-side capacitor and improve lifetime of power converter[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107048.
- [4] Wang Chuyang, Zhang Li, Zhang Zitao. Analysis of pulsation concentration effect related to sorting-algorithm-based voltage-balancing strategy in an MMC system[J]. Energy Reports, 2020, 6: 1000–1009.
- [5] 江雨泽, 付光杰. 具有中点电位非对称控制的 VSVPWM 技术[J]. 电气传动, 2021, 51(4): 40–46.
- [6] 江倩雯. 三电平逆变器控制方法研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(9): 80–81.
- [7] He Ruizhi, Jin Yu, Hou Weiyang, et al. A capacitor over-

- voltage elimination strategy for reduced-voltage-sensor-based MMC[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 132: 107181.
- [8] Khan M N H, Barzegarkhoo R, Siwakoti Y P, et al. A new switched-capacitor multilevel inverter with soft start and quasi resonant charging capabilities[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107412.
- [9] 姜晓杰. 基于 60°坐标系下三电平 NPC 逆变器控制策略研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2020: 1-30.
- [10] 朱敏龙, 宋慧庆, 李宇航, 等. NPC 型三电平逆变器可视化三矢量无模型预测控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 110-122.
- [11] 苏畅, 许立斌, 于新红, 等. 裂相 T 型三电平逆变器连续集并行预测控制策略[J]. 电力电子技术, 2025, 59(9): 32-38.
- [12] 朱虹, 张兴, 李明, 等. T 型三电平逆变器模型预测多目标优化控制方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 90-96.
- [13] Chitra K, Kamatchikannan V, Viji K, et al. Simple boost PWM controlled cascaded quasi Z-source inverter[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 3161-3169.
- [14] Robles E, Fernandez M, Andreu J, et al. Advanced power inverter topologies and modulation techniques for common-mode voltage elimination in electric motor drive systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 140: 110746.
- [15] Guo Xifeng, Sun Shaobin, Liang Xue, et al. Model predictive current control for two-phase switches clamping of three-phase inverter[J]. Energy Reports, 2020, 6: 164-172.
- [16] Li Po, Li Ruiyu, He Ying, et al. Adaptive finite control set model predictive control for three-phase inverters connected to distorted grid with fewer voltage sensors[J]. Control Engineering Practice, 2021, 116: 104936.
- 责任编辑: 周建军
-
- (上接第 54 页)
- cellulose for water purification, antimicrobial applications, and sensors[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(23): 1800409.
- [16] Gorgieva S, Trček J. Bacterial cellulose: production, modification and perspectives in biomedical applications[J]. Nanomaterials, 2019, 9(10): 1352.
- [17] Nadeem H, Athar M, Dehghani M, et al. Recent advancements, trends, fundamental challenges and opportunities in spray deposited cellulose nanofibril films for packaging applications[J]. Science of the Total Environment, 2022, 836: 155654.
- [18] 张潇, 胡豪, 侯庆喜, 等. 纤维素基气凝胶在保温隔热领域中的研究进展[J]. 中国造纸, 2023, 42(2): 86-93.
- [19] 赵佳音. 疏水性二氧化硅气凝胶的制备及其性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023: 1-28.
- [20] Estok S K, Hughes T A, Carroll M K, et al. Fabrication and characterization of TEOS-based silica aerogels prepared using rapid supercritical extraction[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2014, 70: 371-377.
- [21] Tamon H, Kitamura T, Okazaki M. Preparation of silica aerogel from TEOS[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1998, 197(2): 353-359.
- [22] 丁婉怡, 张宏宇, 胡晶晶, 等. 正硅酸四乙酯制备二氧化硅气凝胶及其性质研究[J]. 辽宁化工, 2024, 53(6): 895-898.
- [23] 赵佳音, 刘再满, 黎白钰. 疏水性二氧化硅气凝胶的制备及其性能研究[J]. 生物化工, 2023, 9(4): 102-105.
- [24] 李绍秀, 崔逸阳, 潘郑宇, 等. 钙锰修饰磁性碳纳米管的制备与表征[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3360-3366.
- [25] 王美月. 二氧化硅气凝胶及其复合材料的制备与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016: 1-30.
- [26] Peng Fei, Jiang Yonggang, Feng Jian, et al. Thermally insulating, fiber-reinforced alumina-silica aerogel composites with ultra-low shrinkage up to 1 500 °C[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 411: 128402.
- [27] 何辉, 姜勇刚, 张忠明, 等. 二氧化硅气凝胶隔热复合材料的高温疏水改性及失效机制[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1813-1820.
- [28] 王小路, 黄晋, 张友寿, 等. 耐火保温材料现状及发展[J]. 耐火材料, 2016, 50(1): 75-80.
- [29] 柳敦雷, 陆佳颖, 薛甜甜, 等. 超疏水隔热聚酯纳米纤维/二氧化硅气凝胶复合膜的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2023, 44(7): 18-25.
- [30] 顾依怡, 王子扬, 孙绍刚, 等. 冰模板法制备纳米纤维素气凝胶及其性能研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S2): 226-230.
- [31] 时吉磊, 唐春霞, 付少海, 等. 柔韧隔热纤维素基气凝胶制备与性能[J]. 纺织学报, 2024, 45(4): 8-14.
- [32] 陆慰萱. UL—94 标准阻燃性能的测定方法[J]. 塑料通讯, 1995(1): 40-42.
- 责任编辑: 周建军