

# 基于改进遗传算法的多相自励磁同步电机 多谐波励磁策略

钟 屹<sup>1,2</sup>, 林晓刚<sup>2</sup>, 曾 铮<sup>2</sup>, 解 伟<sup>2\*</sup>

(1. 福建农林大学 机电工程学院, 福建 福州 350002;

2. 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350108)

## Multi-Harmonic Excitation Strategy for Multiphase Self-Excited Synchronous Machines Based on Improved Genetic Algorithm

Zhong Yi<sup>1,2</sup>, Lin Xiaogang<sup>2</sup>, Zeng Zheng<sup>2</sup>, Xie Wei<sup>2\*</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University,  
Fuzhou 350002, China;

2. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences,  
Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** [Objective] To address the limited excitation efficiency of single-harmonic excitation in multiphase self-excited synchronous machines under medium- and high-speed operating conditions, a multi-harmonic cooperative excitation strategy based on an improved genetic algorithm is proposed. This strategy fully utilizes the high control degrees of freedom of the multiphase machines and increases the rotor excitation current under the condition that the total stator harmonic current is limited. [Methods] First, the harmonic excitation mechanism of an eleven-phase self-excited synchronous machine was analyzed, and a mathematical model describing the relationship between stator harmonic currents and rotor excitation current was established. On this basis, the conventional single-harmonic excitation scheme was extended to a multi-harmonic cooperative excitation strategy, in which the third-, fifth-, seventh-, and ninth-order harmonics were introduced as the main excitation components. Subsequently, with the objective of maximizing the excitation current, a multi-harmonic amplitude allocation optimization model was constructed under the constraint of a constant total harmonic current effective value. An improved genetic algorithm with adaptive mechanisms was adopted to globally optimize the

amplitude ratios of different harmonic currents. Finally, the optimal distribution of the fundamental and harmonic currents was achieved by combining with a lookup-table-based method. [Results] The proposed multi-harmonic excitation strategy was verified through finite element simulations and experimental platform. Under identical total harmonic current constraints, the optimized multi-harmonic excitation scheme exhibited superior excitation performance compared with the conventional single-harmonic excitation method. Experimental results demonstrate that the rotor excitation current was increased by approximately 11.5%, which was consistent with the simulation results and confirms the effectiveness of the proposed optimization approach. [Conclusion] The research results indicate that the proposed multi-harmonic cooperative excitation strategy based on an improved genetic algorithm can effectively enhance the excitation capability of the multiphase self-excited synchronous machines without increasing the total harmonic current. This strategy fully utilizes the control degrees of freedom of the multiphase systems, providing an effective solution for efficient excitation control in the medium-to-high speed range.

**Key words:** self-excited synchronous machine; multiphase; harmonic injection; improved genetic algorithm

**基金项目:** 国家自然科学基金 (52307072); 稀土新材料技术创新中心支持项目 (CXZX-D-202402-0013)

National Natural Science Foundation of China (52307072);  
Support Project of Rare Earth Advanced Materials Technology  
Innovation Center (CXZX-D-202402-0013)

**摘 要:** [目的] 针对多相自励磁同步电机在中高速运行工况下单一谐波励磁效率受限的问题, 提出一种基于改进遗传算法的多谐波协同励磁策略。该策略充分利用多

相电机所具备的高控制自由度,在定子谐波电流总量受限的条件下提升转子励磁电流。【方法】首先分析十一相自励磁同步电机的谐波励磁机理,建立定子谐波电流与转子励磁电流之间的数学模型。在此基础上,将传统单一谐波励磁拓展为多谐波协同励磁,引入三次、五次、七次及九次谐波作为主要励磁分量。随后,以励磁电流最大化为目标,在总谐波电流有效值不变的约束下构建多谐波幅值分配优化模型,并采用具有自适应机制的改进遗传算法对各次谐波电流幅值比例进行全局优化。最后结合查表法实现基波与谐波电流的最优分配。【结果】通过有限元仿真与试验平台对所提方法进行验证。在相同总谐波电流有效值条件下,多谐波协同励磁策略相比传统单一谐波励磁可显著提升转子励磁电流,试验结果表明励磁电流提高约 11.5%,这与仿真结果一致,证实了所提优化方法的有效性。【结论】研究结果表明,基于改进遗传算法的多谐波协同励磁策略能够在不增加定子总谐波电流有效值的前提下有效提升多相自励磁同步电机的励磁能力。该策略充分利用了多相系统的控制自由度,为中高速范围内的高效励磁控制提供了一种有效解决方案。

**关键词:** 自励磁同步电机;多相;谐波注入;改进遗传算法

## 0 引言

随着电动汽车与混合动力系统的大规模应用,高功率密度、高效率且低成本的电驱动系统成为当前研究与产业界关注的重点<sup>[1]</sup>。稀土永磁同步电机因其卓越的转矩密度和宽速恒功率的特性被广泛采用<sup>[2-3]</sup>,但稀土材料价格波动大,且考虑到供应链风险与环境成本因素,学界与工程界正积极探索无稀土替代方案。传统感应电机没有使用永磁体且结构成熟,但转子涡流损耗与热管理问题制约了传统感应电机的效率与功率密度<sup>[4]</sup>。电励磁同步电机通过可控励磁避免了稀土依赖,并具备快速退磁等安全优势,但其滑环与外部供电装置又带来了可靠性与体积的损失。

为消除滑环并实现无刷励磁,研究者们提出了多种无接触能量传输方案(如电容耦合、旋转变压器)<sup>[5-6]</sup>和基于定子谐波的自励励磁<sup>[7-9]</sup>方法。这些方法尽管避免了机械滑环,但在系统体积、复杂度以及低速/零速励磁能力方面仍存在不足。尤其是利用定子电流产生的高次谐波来激励转子绕组的自励同步电机(Self-Excited Synchronous Machine, SESM),在零转速或极低速

工况下往往因转子端感应电压不足而难以提供足够励磁,导致低速转矩受限<sup>[10]</sup>。

对此,文献[11]提出了一种分数槽集中绕组(Fractional Slot Concentrated Windings, FSCW)的自励磁同步电机结构,该电机采用多相 FSCW 定子、双绕组转子并配多相二极管整流,增加气隙谐波含量。文献[12]通过定子加注可控谐波电流在转子端产生足够的励磁电压,改善了零低速下的励磁问题。然而,现有研究多聚焦于零速或低速工况下的励磁建立<sup>[13]</sup>,对于中高速运行区间内,如何利用多相电机的自由度优势,通过优化多谐波组合以进一步提升励磁效率与转矩输出,尚缺乏系统性的机理分析与优化策略。这一研究空白,限制了多相自励磁同步电机性能潜力的充分发挥。

针对这一问题,本文提出充分利用多相电机高自由度的优势<sup>[14-15]</sup>,将单一谐波励磁拓展为多谐波协同励磁,在定子谐波电流总有效值受限的工程约束条件下,通过合理分配不同阶次谐波电流的幅值比例,利用不同谐波在空间绕组因子和感应特性上的差异,提高谐波磁场的综合利用效率,从而提升转子励磁电流和电机转矩输出能力。基于上述思想,本文建立了多谐波励磁机理模型,并引入改进遗传算法对谐波幅值分配进行全局优化,结合仿真与试验结果验证了所提方法在提升多相自励磁同步电机中高速运行性能方面的有效性。

## 1 SESM 拓扑结构和谐波励磁机理

### 1.1 SESM 拓扑结构

本文研究的电机拓扑为一种先进的十一相自励磁同步电机。定子采用多相分数槽集中绕组,每槽独立绕线并与专用功率模块直连,且定子线圈两侧匝数不相同以提升低阶谐波绕组因子。转子集成两套绕组(谐波绕组与励磁绕组),并在两者之间配置多相二极管整流单元。电机通过在各相定子电流中注入幅值、频率与极对数可调的谐波分量,在气隙中建立起幅值和转速可控的旋转谐波磁动势,由于谐波磁场与转子之间存在相对运动,在谐波绕组中感应出交流电压,经过转子端多相二极管整流后为绕组提供直流励磁<sup>[16]</sup>。由此,励磁电流可通过定子端谐波电流的幅值与频

率直接决定,实现了在无需滑环机械接触条件下对转子侧无刷励磁和磁场的灵活控制。本文所研究的 SESM 结构如图 1 所示。

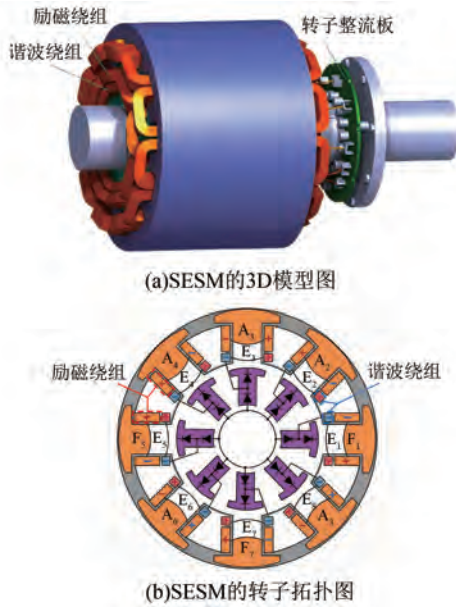


图 1 SESM 的结构与拓扑图

Fig. 1 Structure and topology of the SESM

## 1.2 谐波励磁机理

在单相 SESM 中,定子有  $n$  相集中绕组。如每相绕组有  $N_s$  匝,则每个定子线圈的绕组函数可以用图 2 的波形来表示<sup>[17]</sup>。

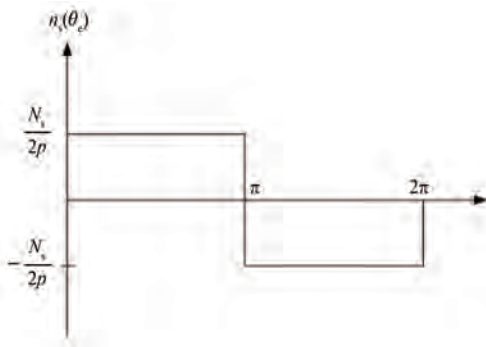


图 2 单相绕组函数

Fig. 2 Winding function for single-phase

其他各相绕组的绕组函数具有相同的形状,但在空间上以  $\alpha = 2\pi/n$  电角度偏移。

定子相绕组的绕组函数可以用傅里叶级数表示为<sup>[18]</sup>

$$n_s(\phi) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4}{k\pi} \cdot \frac{N_s}{2p} \cdot \sin(k\phi_s) \quad (1)$$

式中:  $k$  为谐波阶次;  $p$  为极对数;  $\phi_s$  为相邻定子

槽机械角度。

对于第  $j$  相定子绕组:

$$n_{sj}(\phi) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4}{k\pi} \cdot \frac{N_s}{2p} \cdot \sin(k\phi_s - jk\alpha) \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为电角度。

一个  $n$  相的多相电机包含  $n$  个序列,奇数相时有一个零序序列,偶数相时有两个零序序列。其中,一半的序列可以产生一个沿正向旋转的气隙磁动势 (Magnetomotive Force, MMF),而另一半序列产生一个沿反向旋转的气隙磁动势<sup>[17]</sup>。电机励磁机理如图 3 所示。

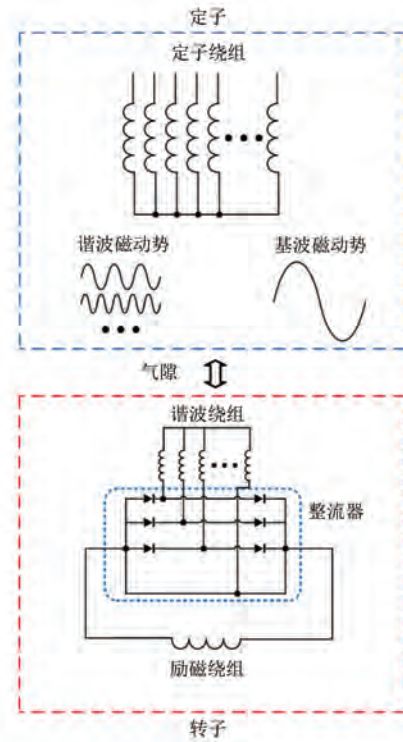


图 3 多相 SESM 的励磁机理

Fig. 3 Excitation principle of the multiphase SESM

在  $n$  相系统中,对于第  $j$  相,谐波次数为  $h$  的定子相电流可以表示为

$$i_j(t) = I_m \cos(h\omega t - js\alpha) \quad (3)$$

式中:  $I_m$  为电流幅值;  $\omega$  为基波角频率;  $s$  为从 1 到  $n$  变化的整数序列号。

总 MMF 由下式给出:

$$F(\phi_s, t) = \sum_{j=1}^n n_{sj}(\phi_s) \cdot i_j(t) \quad (4)$$

对于本文研究电机 ( $n=11$ ),将式 (2) 和式 (3) 代入式 (4) 可得:

$$F(\phi_s, t) =$$

$$\frac{N_s I_m}{\pi p} \left\{ \sum_{j=1}^{11} \left( \sum_{k=1,3}^{\infty} \frac{1}{k} \cdot \cos[k\phi_s - h\omega t - j(k-s)\alpha] \right) + \left( \sum_{k=1,3}^{\infty} \frac{1}{k} \cdot \cos[k\phi_s + h\omega t - j(k+s)\alpha] \right) \right\} \quad (5)$$

电机转子剖面图如图4所示。对于本文研究的电机,  $\tau_h$  为  $\frac{\pi}{4}$ , 磁链可用式(6)表示:

$$\begin{aligned} \psi_h(\phi_s, t) = & N_H \Lambda \sum_{k=1}^{\infty} F(\phi_s, t) = N_H \Lambda \int_{\theta+\Delta\omega t-\frac{\pi}{8}}^{\theta+\Delta\omega t+\frac{\pi}{8}} \sum_{k=1}^{\infty} F_k(x, t) dx = \\ & \frac{2mN_s I K_{wk} N_H \Lambda \sin\left(\frac{k\pi}{8}\right)}{\pi \cdot k^2} \cdot \\ & \left[ \sum_{k=nm+s}^{\infty} \sin[(\omega - k\Delta\omega)t + k\theta] + \sum_{k=nm-s}^{\infty} \sin[(\omega + k\Delta\omega)t + k\theta] \right] \quad (6) \end{aligned}$$

式中:  $\Lambda$  为磁导;  $N_H$  为谐波绕组匝数;  $I$  为各次谐波电流幅值;  $K_{wk}$  为  $k$  次磁动势绕组系数;  $m$  为定子相数;  $\theta$  为机械角度;  $\Delta\omega = \omega_\theta - \omega_r$  为相对切割速度, 其中  $\omega_\theta$  为定子合成磁动势机械角速度,  $\omega_r$  为转子机械角速度。

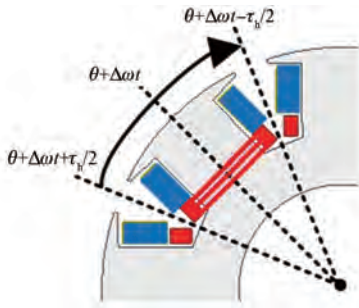


图4 多相 SESM 的转子剖面图

Fig.4 Rotor profile of the multiphase SESM

由磁链对时间微分可以得到  $k$  次谐波在单套谐波绕组上的感应电动势为<sup>[16]</sup>

$$E_k(t) = \frac{2mN_s N_H K_{wk} \Lambda r l \sin\left(\frac{k\pi}{8}\right)}{k^2 \pi} \cdot I \sin(\omega_k t) \quad (7)$$

式中:  $r$  为气隙半径;  $l$  为有效轴向长度;  $\omega_k$  为  $k$  次谐波角频率, 当  $v = 11n + j$  时, 谐波磁场转向与转子相同,  $\omega_k = \omega - k\omega_r$ ; 当  $v = 11n - j$  时, 谐波磁场转向与转子相反,  $\omega_k = \omega + k\omega_r$ 。

电机稳定运行时, 励磁电流大小为

$$i_{lk} = P_m \cdot \frac{\sin\left(\frac{k\pi}{8}\right)}{k^2} \omega I \quad (8)$$

$$P_m = \frac{4Q_r m N_s N_H K_{wk} \Lambda r l \sin\left(\frac{\pi}{Q_r}\right)}{\pi^2 R_f} \quad (9)$$

式中:  $Q_r$  为谐波绕组数量;  $R_f$  为励磁绕组等电阻。

由式(8)可知, 励磁电流是关于电机结构参数  $P_m$ 、电流阶次  $k$ 、电流频率  $\omega$ 、电流幅值  $I$  的相关函数。

根据上述谐波励磁机理分析可知, 电机的总励磁电流  $I_f$  是关于各次谐波电流幅值  $I$  及其阶次  $k$  的复杂非线性函数。由于不同谐波分量在绕组因子、电磁耦合强度以及感应效率等方面存在显著差异<sup>[17-20]</sup>, 对于给定的总谐波电流有效值  $I_h$ , 不同的谐波次数组合及幅值分配, 将产生不同的励磁效果<sup>[21-22]</sup>。在电机结构参数与运行频率确定的条件下, 励磁电流实质上是各次谐波电流幅值的高维非线性函数。当引入多次谐波协同励磁时, 不同谐波分量之间的相互耦合使得励磁电流对各谐波幅值分配高度敏感, 难以通过解析方法获得全局最优解。因此, 有必要在总谐波电流受限的约束条件下, 将各次谐波电流的幅值分配问题表述为一类非线性全局优化问题, 并引入合适的优化算法对其进行求解, 以实现励磁电流的最大化。

## 2 多谐波幅值分配策略及优化算法

### 2.1 多谐波幅值分配策略

根据上述分析, 在十一相系统中, 不同序列对应不同空间谐波磁动势, 综合绕组因子大小、感应效率以及工程实现的可行性, 本文选取三次、五次、七次和九次谐波作为主要励磁谐波分量, 用于构建多谐波协同励磁方案。

定义谐波总电流有效值为

$$I_h = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2} \quad (10)$$

式中:  $I_3$ 、 $I_5$ 、 $I_7$ 、 $I_9$  分别为三次、五次、七次和九次谐波电流。

本文以多谐波励磁效果为目标, 以最优的谐波幅值分配比例作为优化参数, 其表达式如下:

$$I_3 : I_5 : I_7 : I_9 = C_3 : C_5 : C_7 : C_9 \quad (11)$$

式中:  $C_3$ 、 $C_5$ 、 $C_7$ 、 $C_9$  分别为三次、五次、七次和九次谐波电流比例系数。

为保证在给定  $I_h$  时各次谐波幅值满足能量一致性, 对比例系数进行归一化处理, 得到:

$$x_k = \frac{C_k}{\sqrt{\sum C_k^2}}, \quad k \in \{3, 5, 7, 9\} \quad (12)$$

从而各次谐波幅值可表示为

$$I_k = x_k \cdot I_h \quad (13)$$

选择电机励磁电流最大为优化目标, 根据式(3)、式(7)和式(8), 总励磁电流是关于  $P_m$ 、 $K_{wk}$ 、 $\omega$ 、 $I$ 、 $k$  的相关函数:

$$I_{F_{total}} = f(P_m, K_{wk}, \omega, I, k) \quad (14)$$

式中:  $I_{F_{total}}$  为总励磁电流。

## 2.2 遗传算法

针对本文研究的多谐波幅值分配问题, 其最高四阶解空间庞大且存在大量局部最优解, 面对此种复杂优化场景, 传统优化算法存在着种种限制: 解析法往往因模型假设过强而失效; 枚举法计算成本过高; 梯度搜索法依赖梯度信息, 容易陷入局部最优解。为此, 本研究引入遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 作为核心优化策略。遗传算法模拟自然界“优胜劣汰”的进化过程, 通过编码、选择、交叉与变异等操作, 在解空间中进行全局并行搜索。将不同谐波组合幅值比编码为染色体, 并设计了针对性的适应度函数以评估其励磁效果。通过迭代进化, 旨在高效地逼近问题的最优解, 为多谐波幅值分配励磁提供一种新颖且鲁棒的解决方案。遗传算法优化流程如图 5 所示。

由于遗传算法强大的全局优化能力与广泛的适用性, 其已被证实是处理此类高度非线性、多约束优化问题的有效工具之一。一套完整的遗传算法优化流程通常涵盖编码初始化、适应度评估、选择、交叉、变异等步骤, 通过循环迭代逐步逼近最优谐波分配方案。

### 2.2.1 优化参数选择及编码

本文以最高励磁电流  $i_f$  为目标, 各谐波分配比例  $C_j$  作为优化参数。

相对于实数编码, 二进制编码有着稳定性更高, 种群多样性更好的优势。为此, 本文采用二进制对问题进行编码, 优化精度为  $1 \times 10^{-3}$ , 其位数

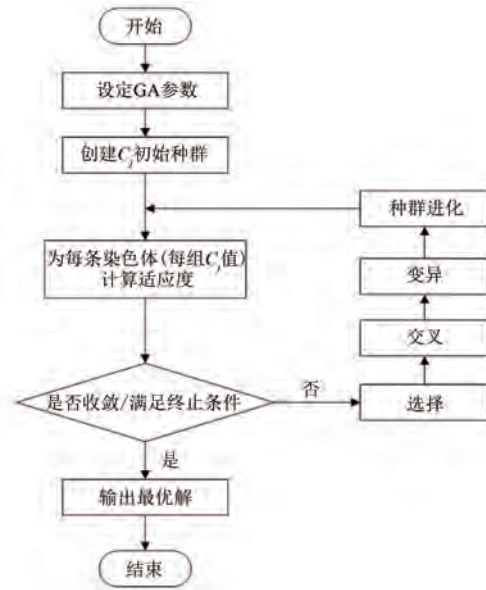


图 5 GA 优化流程图

Fig. 5 GA optimization technique flow chart

可由下式确定:

$$2^{b-1} < (C_{j_{max}} - C_{j_{min}}) \times 10^3 < 2^b - 1 \quad (15)$$

式中:  $b$  为编码长度;  $C_{j_{max}}$  和  $C_{j_{min}}$  分别为解空间的最大值和最小值。

### 2.2.2 初始化种群

初始化种群是优化算法的起点, 其生成质量与多样性对整个算法的性能具有决定性影响。一个理想的初始种群不仅需要在解空间内具备充分的多样性, 以支撑对搜索区域的广泛探索, 还应尽可能分布于潜在的高质量解附近, 从而为后续迭代提供良好的进化基础。因此, 在设计初始化策略时, 必须综合考虑问题本身的特征与算法整体搜索机制之间的协同关系。

为避免随机数生成算法收敛慢, 易在无意义解空间徘徊的问题, 本研究根据优化参数的性质, 借鉴气隙磁通优化思想, 使得磁通分布接近准方波, 将初始种群的大部分个体设定在奇次谐波的理想比例  $1/3$ 、 $1/5$ 、 $1/7$ 、 $1/9$  附近<sup>[19]</sup>。初始化种群规模越大, 优化效果及精度越好, 但同时计算量也会增大。根据实际需求, 将初始种群规模  $N$  设置为 10。

### 2.2.3 适应度函数设定

适应度函数在遗传算法中充当关键的评估准则, 其将每个候选解映射为一个实数值。该数量化了个体对问题环境的适应程度, 从而评估染

色体在解空间的优劣程度,是驱动种群进化的根本动力。在本文研究中,适应度函数为提高励磁效果的目标函数,电机结构相关参数为  $P_m$ ,总励磁电流最大的适应度函数见下式:

$$J = P_m \times \text{Max} \left[ \sum_{k=3,5,\dots} K_{wk} C_{jk} \frac{\sin\left(\frac{k\pi}{8}\right)}{k^2} \omega_k I \right] \quad (16)$$

#### 2.2.4 种群的选择、交叉、变异

种群选择是遗传算法中的关键环节,本文采用随机均匀采样法。该方法基于个体的适应度值分配选择概率,在此基础上,通过引入等间距指针实现确定性采样,从而在保留优良个体的同时,有效维持种群多样性,避免早熟收敛,进而提升算法的全局搜索能力。其数学表述如下:

设种群大小为  $N$ ,个体  $i$  的适应度为  $f_i$ ,其被选择的概率为

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

累积概率分布定义为

$$C_i = \sum_{j=1}^i P_j, \quad C_0 = 0 \quad (18)$$

指针间距为  $d = 1/N$ ,随机起始指针  $s \sim U(0, d)$ ,选择指针序列为

$$S_k = s + k \cdot d, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (19)$$

对于每个  $S_k$ ,选择满足  $C_{i-1} < S_k \leq C_i$  的个体  $i$ ,完成一次完整的种群选择。

交叉操作在遗传算法中模拟了生物遗传的基因重组过程,通过对所选优良个体的染色体片段进行交换,生成具有新基因组合的后代。该操作旨在融合不同个体的优良特性,以期产生适应度更高的新解。本文采用双点交叉法,即在染色体上随机设定两个交叉点,并交换两点之间的基因片段。相较于单点交叉,双点交叉能够促进基因更充分的混合,增强种群的多样性,有助于跳出局部最优,从而提升算法的全局搜索能力。

在完成选择和交叉后,使用变异操作作为优秀解引入新的遗传物质,避免算法过早收敛到局部最优解。以四谐波组合为例,单点变异操作如下:

$$[C_3^a, C_5^a, C_7^a, C_9^a] \xrightarrow{\text{变异}} [C_3^a, C_5^a, C_7^b, C_9^a] \quad (20)$$

式中: $P, Q$  分别代表变异前后个体。

#### 2.2.5 遗传算法改进

遗传算法在处理复杂优化问题时,通常需要大量迭代次数才能收敛到满意解,其收敛速度较慢,且性能显著依赖于种群大小、交叉率与变异率等关键参数的设置。参数选择不当易导致早熟收敛或搜索效率低下,严重限制了算法的实际应用。针对本文最高达四维的搜索空间,算法收敛速度随着问题及规模增大急剧下降;同时在动态优化环境中,固定参数难以适应不同搜索阶段的需求<sup>[23-24]</sup>。为克服上述局限,本文对算法进行两方面的改进:一方面,引入基于非线性缩放排序的适应度调整策略,以平衡选择压力与种群多样性;另一方面,设计自适应交叉概率与变异概率机制,使算法能够根据搜索进程动态调整探索与开发行为,从而有效提升收敛速度与求解质量。

考虑到种群适应度差异较小,采用基于排序的非线性缩放优化适应度选择,在适应度绝对值差距较小的情况下强化精英个体优势:

$$f_i = N * \left[ 1 - \gamma * \left( \frac{R_i}{N+1} \right) \right] \quad (21)$$

式中: $R_i$  为第  $i$  个个体在当前种群中的适应度排名; $f_i$  为改进后个体  $i$  的适应度值; $\gamma$  为可调参数。

对于较为优秀的个体,降低其交叉/变异概率,减少对优秀基因的破坏;对于较为落后的个体,提高其交叉/变异概率,寻求进化:

$$P_c = \begin{cases} k_1 \cdot \frac{(F_{\max} - F')}{F_{\max} - F_{\text{avg}}}, & F' \geq F_{\text{avg}} \\ k_2, & F' < F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (22)$$

$$P_l = \begin{cases} k_3 \cdot \frac{(F_{\max} - F_m)}{F_{\max} - F_{\text{avg}}}, & F_m \geq F_{\text{avg}} \\ k_4, & F_m < F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_c$  和  $P_l$  分别为种群交叉概率和种群变异概率; $F_{\max}$  为种群最大适应度; $F_{\text{avg}}$  为种群平均适应度; $F'$  为交叉对中较大的适应度值, $F_m$  为变异个体的适应度值; $k_1, k_2, k_3, k_4$  为满足  $0 < k_1 < k_2 \leq 1$  且  $0 < k_3 < k_4 \leq 0.05$  的待定系数。

#### 2.2.6 多谐波励磁策略下基波与谐波的分配

改进遗传算法通过对多谐波幅值比例的全局寻优,确定了在任意给定总谐波电流幅值  $I_h$  下,各次谐波的最佳内部协同方式,但在实际控制中,如何在有限的电流容量下,合理分配产生转矩的

基波电流  $i_q$  与产生磁场的谐波总电流  $I_h$ , 以实现电机输出转矩最大化, 是实现高效控制的关键。

对于多相自励磁同步电机, 定子电流矢量同时承担着能量转换(转矩分量)与磁场建立(励磁分量)的双重任务。在忽略磁路饱和及交叉耦合效应的简化条件下, 电机的电磁转矩  $T_e$  主要由基波电流  $i_q$  与转子励磁电流  $i_f$  相互作用产生, 可近似表示为

$$T_e \approx \frac{m}{2} p \cdot L_m \cdot i_q \cdot i_f \quad (24)$$

式中:  $L_m$  为定转子间的等效互感。

受逆变器容量限制, 定子电流需满足约束:

$$I_s = \sqrt{i_q^2 + I_h^2} \leq I_{s\_max} \quad (25)$$

要提高电流利用率, 就是在同样的转矩输出下, 合理分配  $i_q$  和  $I_h$  使得定子电流最小。由于定

子多谐波电流与转子励磁电流之间存在复杂的非线性映射关系, 难以获得解析形式的最优解, 因此本文采用查表(Look-Up Table, LUT)的方法来构建闭环控制策略。

试验标定: 在试验台架上, 给定不同的负载转矩需求, 寻找使定子电流幅值  $I_{s\_max}$  最小的组合点。记录并插值构建以转矩指令  $T_e^*$  为输入, 最优基波电流  $i_q^*$  和总谐波电流  $I_h^*$  为输出的二维映射表。在实时控制中, 系统根据转矩需求查表获取指令, 实现了转矩与励磁的解耦分配。完整的多谐波励磁控制策略框图如图 6 所示。

通过引入这一查表环节, 本文将多谐波协同优化的理论成果以低计算量的方式嵌入到实时控制系统中, 确保了电机在全工况下都能发挥多谐波励磁带来的性能提升优势。

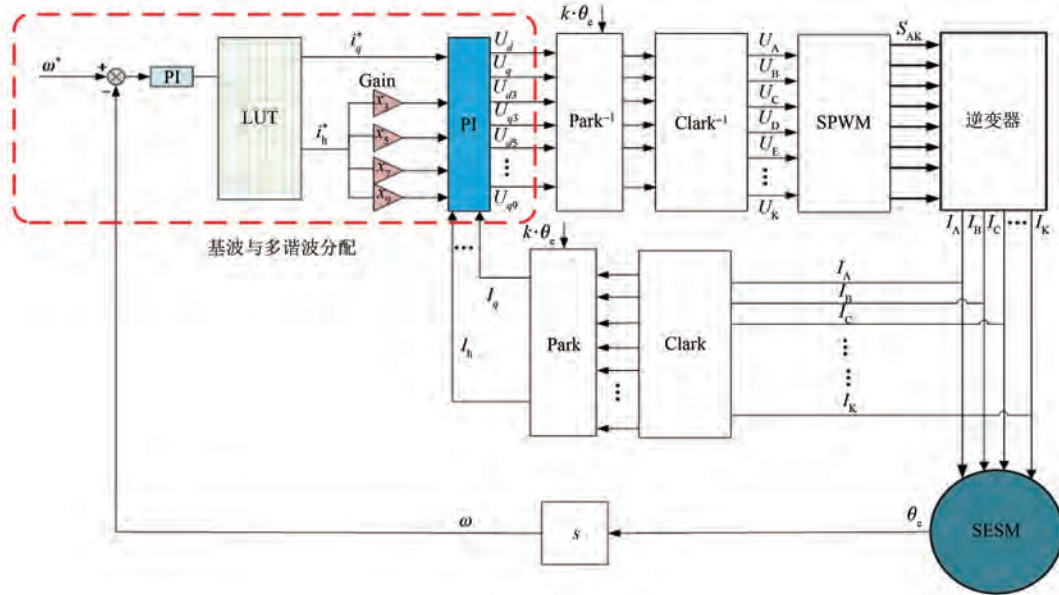


图 6 多谐波分配控制策略控制框图

Fig. 6 Control block diagram for the multi-harmonic allocation strategy

### 3 仿真分析

#### 3.1 分配策略遗传算法参数设置与结果

通过 Ansys Maxwell 软件搭建自励磁电机模型, 设计不同分配策略并利用改进遗传算法计算分配比例, 通过仿真得到对应励磁电流, 进而判断策略和算法的改进效果。改进遗传算法的具体参数见表 1。

给二、三、四谐波组合的最大迭代次数分别设置为 80、80、100, 结果均已得到收敛, 将单谐波励

磁的分配策略适应度标么, 不同分配策略的算法结果见表 2。算法迭代过程如图 7 所示。

由图 7 可知, 二、三、四谐波分配策略适应度分别第 59 代、第 57 代、第 85 代完成收敛, 其中四谐波分配策略的最终适应度最高, 效果最好。相较于单谐波励磁策略, 四谐波励磁策略适应度提高了 16.1%。

#### 3.2 仿真测试

为测试分配策略的有效性, 仿真测试将在基波和总谐波幅值不变的条件下进行比较。基波电

流幅值为 30 A,频率为 100 Hz,谐波励磁幅值为 5 A。采用算法得到的分配策略,励磁电流和电磁转矩仿真结果如图 8 和图 9 所示。

表 1 改进遗传算法的核心参数

Tab. 1 Key parameters of the improved genetic algorithm

| 参数名称   | 参数值    |
|--------|--------|
| 初始种群数量 | 15     |
| 交叉比例   | 1      |
| 二谐波    | 80     |
| 最大迭代次数 | 三谐波 80 |
| 四谐波    | 100    |
| 收敛精度   | 0.001  |
| $k_1$  | 0.8    |
| $k_2$  | 1      |
| $k_3$  | 0.03   |
| $k_4$  | 0.05   |

表 2 不同分配策略改进遗传算法结果

Tab. 2 Results of the improved genetic algorithm for different allocation strategies

| 注入谐波  | 3 次 | 3 次, 5 次 | 3, 5, 7 次 | 3, 5, 7, 9 次 |
|-------|-----|----------|-----------|--------------|
| $C_3$ | 1   | 0.933    | 0.837     | 0.819        |
| $C_5$ | 0   | 0.324    | 0.498     | 0.507        |
| $C_7$ | 0   | 0        | 0.096     | 0.315        |
| $C_9$ | 0   | 0        | 0         | 0.093        |
| 适应度   | 1   | 1.064    | 1.094     | 1.161        |

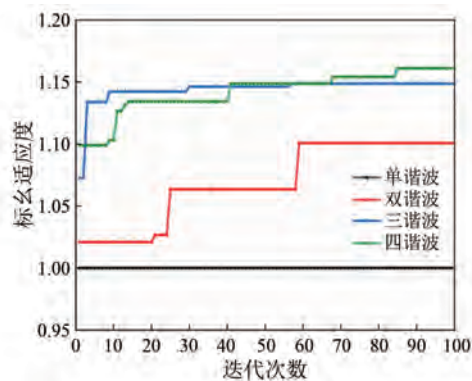


图 7 不同谐波组合算法迭代图

Fig. 7 Iteration curves for different harmonic combinations

由图 8 和图 9 可知,单谐波励磁电流和电磁转矩分别为 5.81 A 和 12.63 N·m,四谐波策略励磁电流和电磁转矩分别为 7.16 A 和 14.13 N·m,

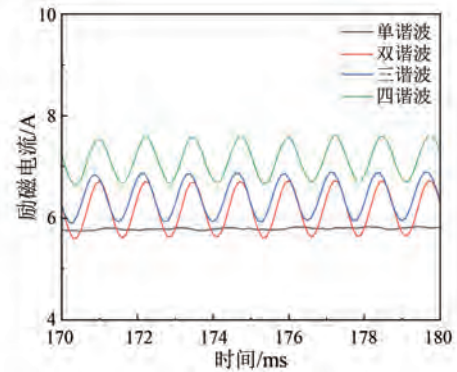


图 8 不同谐波组合励磁电流的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of excitation current under different harmonic combinations

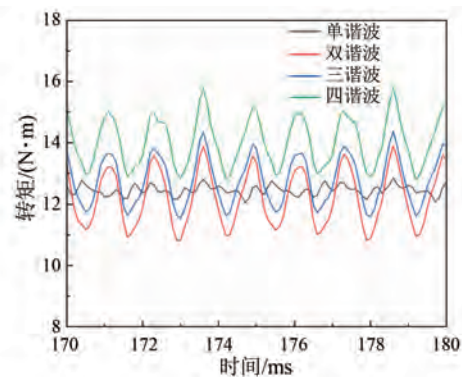


图 9 不同谐波组合电磁转矩的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of electromagnetic torque under different harmonic combinations

相较单谐波励磁分别提升了 23.2% 和 11.9%,与改进遗传算法结果基本吻合。

为了从电磁场分布角度进一步验证多谐波协同励磁策略的优势,本文采用 Maxwell 有限元分析对两种策略下的电机磁通密度分布进行了对比研究。设定两种策略在转子侧产生同等大小的励磁电流。截取定转子铁心磁通密度  $B$  的彩色云图进行比较。图 10 给出了传统单谐波励磁策略下的磁通密度云图。

由图 10 中的色标刻度可知,定子铁心的局部最高磁通密度达到了 2 024.3 mT。可以明显观测到,由于单次谐波的磁动势在空间上高度集中,导致定子部分齿部和轭部区域出现了深红色的高磁通密度分布区。这种局部区域的磁饱和现象会增加该磁路的等效磁阻。

图 11 为多谐波协同励磁策略下的磁通密度云图。对比图 10 可以发现,在达到同等励磁效

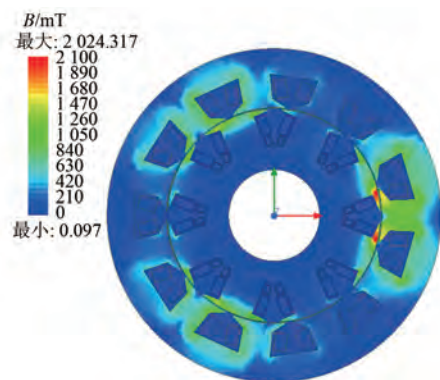


图 10 单谐波励磁磁通密度云图

Fig. 10 Single harmonic excitation magnetic flux density nephogram

果的前提下,多谐波策略下的定子最高磁通密度下降至 1 885.9 mT,且深红色的高饱和区域被有效减少,整体磁场分布更加均匀。多谐波协同励磁策略利用了不同空间阶次谐波在气隙圆周上的分布差异,实现了磁动势的错峰叠加。这种机制有效均化了定转子铁心的磁通密度分布,避免了单点磁通密度的过度集中,从而将铁心的最高磁通密度从 2.02 T 抑制到了 1.88 T 以内。局部磁饱和现象的缓解,意味着电机的整体激磁电感参数得到了改善。因此,相较于单谐波励磁,多谐波协同策略能够以更高的电磁能量传递效率建立转子磁场,即在更小的定子注入电流有效值下产生相同的励磁效果。

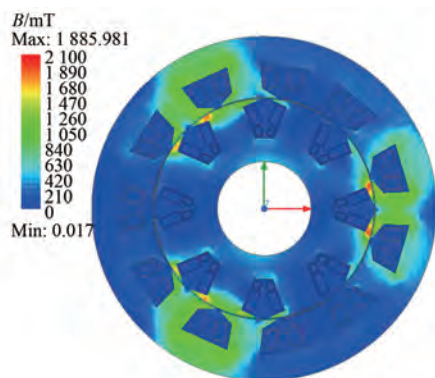


图 11 多谐波励磁磁通密度云图

Fig. 11 Multi-harmonic excitation magnetic flux density nephogram

### 3.3 试验结果

试验采用 dSPACE 半物理仿真平台,在 PC 上位机上搭建控制模型,经由 dSPACE 编译达成对多相逆变器的控制。通过霍尔传感器和光电编

码器完成对电流和电压信号的采样、转子机械位置和电机转速的计算采集,实现对整个电机驱动系统的闭环控制。完整的试验平台如图 12 所示。

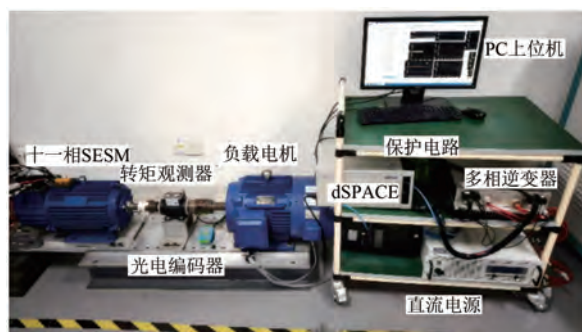


图 12 SESM 试验平台

Fig. 12 SESM experimental platform

#### 3.3.1 不同谐波组合试验

注入 20 A、50 Hz 基波电流,此时电机转速为 750 r/min,谐波电流有效值为 7 A,励磁电流和转矩试验结果如图 13 和图 14 所示。

由图 13 和图 14 可知,试验中单谐波励磁电流和电磁转矩分别为 3.97 A 和 3.21 N·m,四谐波策略励磁电流和电磁转矩分别为 4.42 A 和 3.39 N·m,相较单谐波励磁分别提升了 11.5% 和 5.6%,与改进遗传算法仿真结果基本吻合。

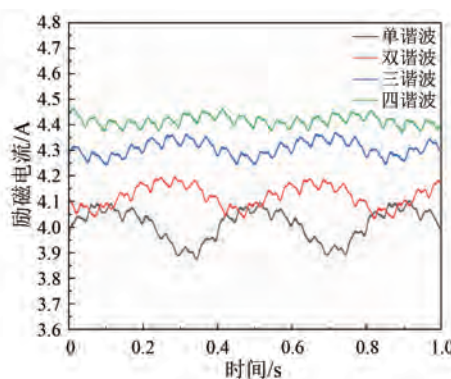


图 13 不同谐波组合励磁电流

Fig. 13 Excitation current under different harmonic combinations

#### 3.3.2 不同分配策略对比试验

由上述分析可知,四谐波组合励磁策略在合理的分配下可以达到最佳励磁效果,为评估算法改进效果,将四谐波基于传统遗传算法、改进遗传算法、均衡分配三种策略的结果进行对比。迭代过程和励磁电流的对比如图 15 和图 16 所示。

由图 15 和图 16 可知,改进遗传算法的初期进

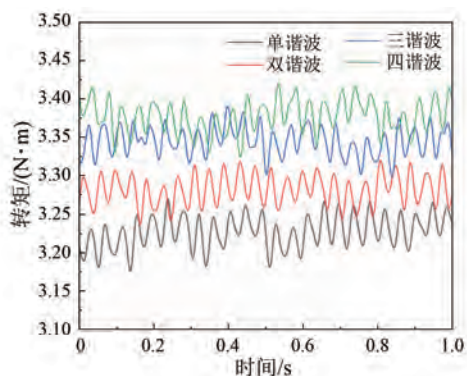


图 14 不同谐波组合电磁转矩

Fig. 14 Electromagnetic torque under different harmonic combinations

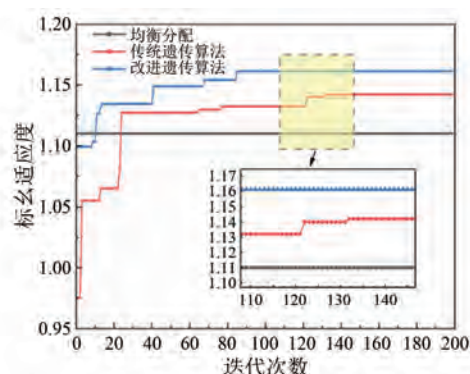


图 15 不同分配策略迭代过程

Fig. 15 Iteration curves under different allocation strategies

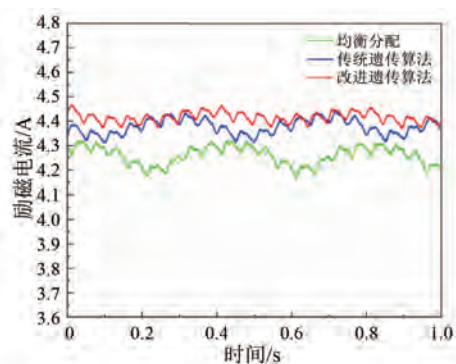


图 16 不同分配策略励磁电流

Fig. 16 Excitation current under different allocation strategies

化速度和最终收敛迭代次数均优于传统遗传算法,同时改进遗传算法进化停滞的时间少于传统遗传算法,在收敛速度和跳出局部最优能力方面展现出了优越性。均衡分配、基于传统遗传算法分配以及基于改进遗传算法分配励磁电流分别为 4.24、4.36

和 4.43 A,可见遗传算法分配提高了励磁效果,改进遗传算法的励磁电流相较于传统遗传算法提高了 1.6%,改进遗传算法的收敛精度更高。

最后,为验证算法的可靠性,提高谐波电流,在算法的最优结果附近进行微调搜索,励磁电流仿真结果对比如图 17 所示。由图 17 可知,算法结果在范围内得到最佳励磁效果,算法的可靠性得到验证。

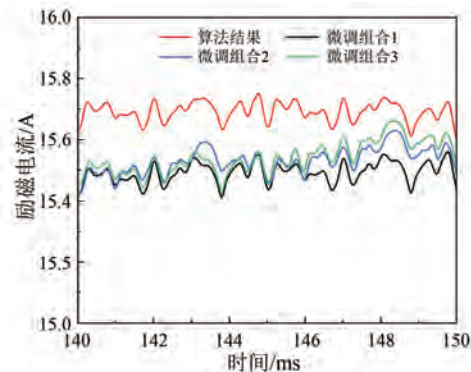


图 17 微调前后的励磁电流

Fig. 17 Excitation current before and after fine adjustment

图 18 展示了采用传统单谐波策略时的加载定子相电流波形。此策略采用 5 A、500 Hz 高频电流励磁,基波  $q$  轴电流由转速环给定,定子电流包络线峰值约 23 A。励磁电流变化如图 19 所示。

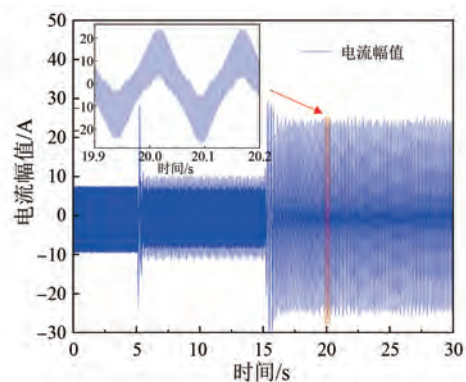


图 18 单谐波励磁策略定子相电流

Fig. 18 Single harmonic excitation strategy stator phase current

图 20 展示了采用本文多谐波协同励磁策略时的定子单相电流波形。由于多谐波空间叠加机制改善了磁场分布,在相同工况下,定子电流包络线峰值稳定在 20 A 以内,平均约 18.2 A。励磁电流变化如图 21 所示,稳态运行时励磁电流约为 7.2 A。

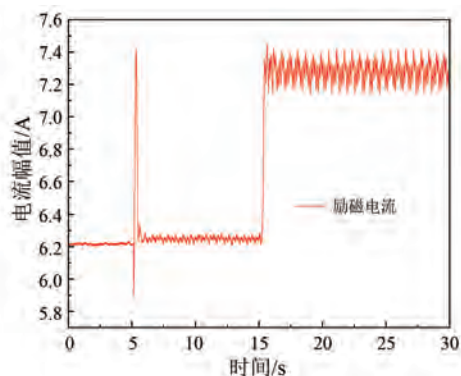


图 19 单谐波励磁策略励磁电流波形

Fig. 19 Excitation current waveform under single-harmonic excitation strategy

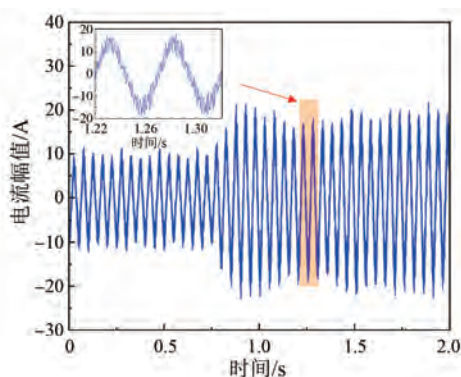


图 20 多谐波励磁策略定子电流

Fig. 20 Multi-harmonic excitation strategy stator phase current

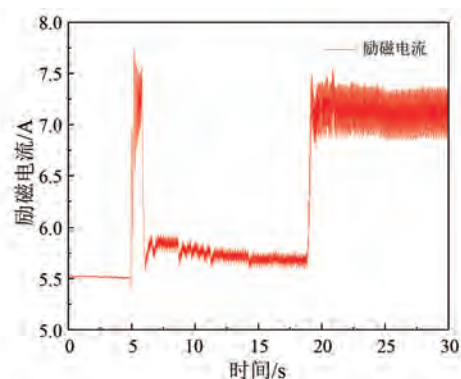


图 21 多谐波励磁策略励磁电流波形

Fig. 21 Excitation current waveform under multi-harmonic excitation strategy

试验数据和对比结果表明,对于多相自励磁同步电机,在相同工况下,相比于传统的励磁策略,本文的多谐波协同策略将定子相电流峰值从 23 A 降低至 18.2 A,电流降幅 20.8%。相较于单谐波励磁,多谐波协同策略通过合理分配电磁能

量,获得了更高的励磁效率。该策略能在更小的有效值电流下实现同等的励磁目标,有利于减轻系统整体铜耗并提高电流利用率,结合查表法可实现动态电流分配以匹配不同工况需求。

## 4 结语

针对多相自励磁同步电机在中高速工况下谐波励磁效果受限的问题,本文提出了一种基于改进遗传算法的多谐波励磁策略,充分利用十一相电机的高自由度特性,实现了多谐波协同励磁。通过建立谐波励磁机理模型,将励磁电流最大化作为优化目标,提出对适应度非线性缩放及采用自适应交叉与变异策略的改进遗传算法,对多谐波幅值分配比例进行全局寻优。

试验结果表明,相较于单一谐波励磁策略,四谐波组合策略在相同谐波电流总量下,励磁电流提升 11.5%,在相同转矩输出情况下定子电流下降 20.8%。验证了所提策略在提升励磁效率与转矩输出方面的有效性。同时,改进遗传算法在收敛速度与跳出局部最优能力方面均优于传统遗传算法,具备更高的工程适用性。

然而,多谐波励磁策略和改进遗传算法带来了控制难度和算法复杂度的增加,是否满足工程实际应用对于控制精度和计算效率的要求,有待进一步的工程实践检验。

## 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

## 作者贡献

钟屹进行了方案设计、内容总结与论文撰写,林晓刚、解伟、曾铮参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Zhong Yi. The manuscript was reviewed and revised by Lin Xiaogang, Xie Wei and Zeng Zheng. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

## 参考文献

- [ 1 ] 杜伟,文腾.《“十四五”现代能源体系规划》等多项政策出台布局中国新型能源体系[J]. 国际石油经济, 2023, 31(1): 9-10.  
Du W, Wen T. China released the 14th five-year plan for a modern energy system and other policies to promote the new energy system [J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(1): 9-10.
- [ 2 ] 付兴贺,江政龙,吕鸿飞,等.电励磁同步电机无刷励磁与转矩密度提升技术发展综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1689-1702.  
Fu X H, Jiang Z L, Lv H F, et al. Review of the brushless excitation and torque density improvement in wound field synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1689-1702.
- [ 3 ] Chakraborty C, Basak S, Rao Y T. Synchronous generator with embedded brushless synchronous exciter [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1242-1254.
- [ 4 ] 马伟明,王东,程思为,等.高性能电机系统的共性基础科学问题与技术发展前沿[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2025-2035.  
Ma W M, Wang D, Cheng S W, et al. Common basic scientific problems and development of leading-edge technology of high performance motor system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2025-2035.
- [ 5 ] Lin C, Pathmanathan M, Rodriguez P, et al. Self-excited synchronous machine using airgap harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(8): 6584-6594.
- [ 6 ] Yao F, An Q, Gao X, et al. Principle of operation and performance of a synchronous machine employing a new harmonic excitation scheme [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(5): 3890-3898.
- [ 7 ] Chakraborty C, Basak S, Rao Y T. Synchronous generator with embedded brushless synchronous exciter [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1242-1254.
- [ 8 ] Raminosoa T, Wiles R. Contactless rotor excitation for traction motors [C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, IEEE, 2018: 6448-6453.
- [ 9 ] Boldea I, Tutelea L N, Parsa L, et al. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: an overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5696-5711.
- [ 10 ] Chowdhury M S, Mamun K A A, Rahman A M. Modelling and simulation of power system of battery, solar and fuel cell powered hybrid electric vehicle [C]//2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT). Dhaka, IEEE, 2016: 1-6.
- [ 11 ] Jiji K S, Jayadas N H, Babu C A. FEM-based virtual prototyping and design of third harmonic excitation system for low-voltage salient-pole synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industry on Applications, 2014, 50(3): 1829-1834.
- [ 12 ] 江景成. 电动汽车用多相自励磁同步电机及其控制方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.  
Jiang J C. Research on multiphase self-excited synchronous motor and its control method for electric vehicles [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [ 13 ] 姚飞,安群涛,孙立志,等.电枢磁场对零序谐波磁场励磁电流的影响机理分析与抑制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5867-5875.  
Yao F, An Q T, Sun L Z, et al. Mechanism analysis and suppression of the influence of armature fields on the field current excited with the zero-sequence harmonic magnetic field [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5867-5875.
- [ 14 ] Aoyama M, Noguchi T. Permanent-magnet-free-synchronous motor with self-excited wound-field technique utilizing space harmonics [C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, IEEE, 2017: 3187-3194.
- [ 15 ] Jawad G, Ali Q, Lipo T A, et al. Novel brushless wound rotor synchronous machine with zero-sequence third-harmonic field excitation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1-4.
- [ 16 ] Dajaku G, Gerling D. New self-excited synchronous machine with tooth concentrated winding [C]//International Electric Drives Production Conference (EPDC), Nuremberg, IEEE, 2013.
- [ 17 ] Dajaku G, Gerling D. Self-excited synchronous machine with high torque capability at zero speed

- [ C ]//2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, IEEE, 2018; 1165-1171.
- [18] 姜国豪, 陈伟, 郑涛, 等. 多相自励磁同步电机零低速域高频电流相位优化策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 64-75.
- Jiang G H, Chen W, Zheng T, et al. Phase optimization strategy for high-frequency current in zero-lowspeed domain of multiphase self-excited synchronous motors[J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(10): 64-75.
- [19] 陈会崇, 宋承林. 分数槽集中绕组定子磁动势的分解[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 62-68.
- Chen H C, Song C L. Decomposition of stator magnetomotive force of fractional-slot concentrated winding [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(1): 62-68.
- [20] Seyedi S M, Talebi D, Toliyat H A. A PM-free brushless synchronous machine with a novel compensated wound-field excited by modulated rotating magnetic flux [ J ]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(3): 2068-2080.
- [21] 杨鑫, 林晓刚, 赵宇纬, 等. 多相自励磁同步电机稳态下高频励磁建模与分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(5): 46-52+60.
- Yang X, Lin X G, Zhao Y W, et al. Modeling and analysis of high-frequency excitation in steady state of multi-phase self-excited synchronous motor [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(5): 46-52+60.
- [22] Gadiyar N, Khamitov A, Severson E L. Design of electric machine windings to independently control multiple airgap harmonics [ J/OL ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 3039-3050.
- [23] 徐巍, 刘超. 基于改进遗传算法的新能源多电机系统中能量分配策略研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025, 39(6): 63-72.
- Xu W, Liu C. Energy allocation strategy in new energy multi-motor systems based on improved GA [ J ]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2025, 39(6): 63-72.
- [24] Cong Y, Li X F, Yuan S, et al. Optimal allocation of multi-period active power in wind farms based on improved GA [ J ]. Power Grid and Clean Energy, 2022, 38(12): 107-114.
- 
- 收稿日期:2026-02-07  
收到修改稿日期:2026-04-20  
作者简介:  
钟 屹(1999—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制,m13625219227@163.com;  
\* 通信作者:解 伟(1982—),男,博士,研究员,研究方向为电动汽车主驱系统、工业伺服系统等,wei.xie@fjirsm.ac.cn。